

知的情報技術と利用の動向に関する 調査研究 報告書

—— 複雑系情報処理に関する調査研究 ——

平成 10 年 3 月

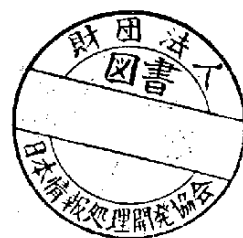


財団法人 日本情報処理開発協会

KEIRIN

00

この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。



まえがき

近年、自然界の振る舞いや社会の諸現象を複雑系（Complex System）として捉えた研究が盛んになっています。これは要素還元主義に基礎を置く従来の科学の方法論に対して、新たな研究の枠組みを与えるものとして注目されています。情報処理の分野においても、これまで人工知能（AI）等の知的情報技術が処理の対象としてきた、持続的に変化し、その変化の予測が難しい現実世界の複雑な諸問題の解決のための方法論を与えるものとして期待されています。

このような状況のもと、当協会では、平成9年度「知的情報技術と利用の動向に関する調査研究」として、複雑系の情報処理の様態、複雑系への情報技術応用の課題等を探るため、本年度より2年計画で「複雑系情報処理に関する調査研究」を実施することといたしました。

実施にあたっては、知的情報技術動向調査委員会（委員長 大須賀 節雄 早稲田大学 理工学部 情報学科 教授）に複雑系情報処理調査専門委員会（委員長 中島 秀之 通商産業省工業技術院電子技術総合研究所 情報科学部 主任研究官）を設置して、調査研究の基本方針、個別テーマの審議・検討を行うとともに、欧米への調査員の派遣、文献調査等を行いました。

本報告書は、平成9年度の調査研究成果を取りまとめたもので、4部から構成され、1章では、複雑系を考える視点について、2章では、諸分野（物理学、情報処理、経済学、数学等）における研究の現状と複雑系に対する問題意識、3章では、欧米における複雑系研究の動向、4章では、資料として複雑系に関連する国内の研究情報、についてまとめています。

本書が広く各界の方々に活用されることを念願する次第です。

最後に、本調査研究の実施にあたり、ご指導ご協力いただいた委員各位ならびに関係各位に深甚なる謝意を表する次第であります。

平成10年3月

財団法人 日本情報処理開発協会

委員会名簿

知的情報技術動向調査委員会

(敬称略、50音順)

委員長：

大須賀 節雄 早稲田大学 理工学部 情報学科 教授

委員：

岡本 吉晴 (株)三菱総合研究所 取締役 情報技術研究センター長

諏訪 基 通商産業省 工業技術院 電子技術総合研究所 情報科学部 部長

武井 欣二 東京都立航空工業高等専門学校 電子工学科 教授

玉井 哲雄 東京大学 大学院 総合文化研究科 広域システム科学系 教授

中島 秀之 通商産業省 工業技術院 電子技術総合研究所 情報科学部 主任研究官

那須 宗也 日揮情報システム(株) 専務取締役

萩原 淳 東京電力(株) 技術開発本部 システム研究所 数理解析グループ 主管研究員

服部 文夫 日本電信電話(株) NTTコミュニケーション科学研究所 計算機科学研究部 部長

市川 隆 (財)日本情報処理開発協会 常務理事

オブザーバ：

山本 雅亮 通商産業省 機械情報産業局 電子政策課 課長補佐

根津 正志 通商産業省 機械情報産業局 電子政策課 国際係長

事務局：

片岡 幸一 (財)日本情報処理開発協会 技術企画部 技術課長

複雑系情報処理調査専門委員会

(敬称略、50音順)

委員長：

中島 秀之 通商産業省 工業技術院 電子技術総合研究所 情報科学部 主任研究官

委員：

池上 高志 東京大学 大学院総合文化研究科 広域システム科学系 助教授

稲吉 宏明 通商産業省 工業技術院 電子技術総合研究所 情報アーキテクチャ部 主任研究官

木下 佳樹 通商産業省 工業技術院 電子技術総合研究所 情報アーキテクチャ部 主任研究官

佐藤 理史 北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報処理学専攻 助教授

竹内 郁雄 電気通信大学 電気通信学部 情報工学科 教授

津田 一郎 北海道大学 大学院理学研究科 数学専攻 教授

出口 弘 京都大学 経済学部 助教授

橋田 浩一 通商産業省 工業技術院 電子技術総合研究所 知能情報部 主任研究官

村上健一郎 日本電信電話(株)NTT 光ネットワークシステム研究所 主幹研究員

執筆協力：

野田五十樹 通商産業省 工業技術院 電子技術総合研究所 情報科学部 主任研究官

オブザーバ：

根津 正志 通商産業省 機械情報産業局 電子政策課 国際係長

市川 隆 (財)日本情報処理開発協会 常務理事

事務局：

片岡 幸一 (財)日本情報処理開発協会 技術企画部 技術課長

目 次

まえがき

1. 複雑系の情報処理 に向けて -----	1
1.1 複雑系の情報処理と人工知能 -----	1
1.2 複雑系の分類 -----	2
1.3 複雑系の設計 -----	4
1.4 本報告書の概要 -----	5
2. 研究の現状と問題意識 -----	7
2.1 複雑系との付き合い方 - 計算機科学の立場から - -----	7
2.1.1 複雑性を回避するためのオブジェクト指向 -----	7
2.1.2 複雑さの定義を求めて -----	11
2.1.3 複雑系を利用すること -----	16
2.2 複雑系としての知能の構築 -----	20
2.2.1 知 能 -----	20
2.2.2 複雑系の定義 -----	21
2.2.3 創発の尺度 -----	24
2.2.4 オートポエシス -----	25
2.2.5 有機的プログラミング -----	27
2.2.6 複雑系の設計 -----	33
2.3 複雑系としての認知と学習へのアプローチ -----	36
2.3.1 複雑系としての理解 -----	36
2.3.2 相手のモデルをつくってゲームするプレイヤーの問題 -----	37
2.3.3 おわりに -----	39
2.4 相互作用する単純な部品集団として捉えた複雑系 -----	41
2.4.1 複雑系に対する問題意識 -----	41
2.4.2 ランダムな粒子集団内での時間的秩序の創発 -----	42
2.4.3 neuronoid (神経細胞もどき) と名付けたモデル -----	48
2.5 複雑性と制約 -----	53
2.5.1 中国語の部屋 -----	53
2.5.2 計算主義 -----	54
2.5.3 部分性と複雑性 -----	56
2.5.4 認知過程の複雑性 -----	58
2.5.5 制 約 -----	59
2.5.6 能力と運用 -----	64

2.5.7	環 境	65
2.5.8	おわりに	69
2.6	ソフトウェアの複雑さ	71
2.6.1	プログラミングでの問題	71
2.6.2	数学的構造	73
2.6.3	スケッチ	74
2.6.4	筆者のスタンスについて	76
2.6.5	関連分野と文献	78
2.7	情報の自動編集と複雑系の接点	80
2.7.1	はじめに	80
2.7.2	自動編集プロジェクト	80
2.7.3	質問応答集の自動編集	83
2.7.4	自動編集と複雑系	88
2.8	コンピュータネットワークと複雑系	91
2.8.1	はじめに	91
2.8.2	インターネットにおける最近の"あやしげ"な現象	92
2.8.3	ネットワークの自己組織化について — 複雑系を創る —	95
2.8.4	インターネットワークの生成、進化	101
2.8.5	おわりに — 複雑系との係わり —	103
2.9	主体を含む複雑系のリサーチプログラム	104
2.9.1	はじめに	104
2.9.2	エージェント集団のマネージメント観	106
2.9.3	リプリケータダイナミックス型システム	111
2.9.4	ゲーミングシミュレーションによる解析	113
2.9.5	非対称型ゲームのレプリケータダイナミックス	119
2.9.6	リプリケータダイナミックスによる外部性表現	123
2.9.7	交換代数による状態記述	128
2.9.8	環境簿記への交換代数の拡張	130
2.9.9	交換代数からバーチャル経済へ	132
2.9.10	制約充足型のシステム記述	135
2.9.11	マルチエージェントの制約充足問題	138
2.9.12	構造変動と制約充足の新問題	139
2.9.13	共有地の悲劇に対するクラシファイアモデルによる分析	142
2.9.14	結 語	146

3. 海外における複雑系研究の動向 -----	149
3.1 米国編 -----	149
3.1.1 Stanford 大学 -----	149
3.1.2 Xerox PARC -----	149
3.1.3 Santa Fe Institute -----	150
3.2 欧州編 -----	159
3.2.1 Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) -----	159
3.2.2 École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) -----	167
3.2.3 Helsinki University of Technology (HUT) -----	170
3.2.4 まとめ -----	176
4. 資料：複雑系に関連する研究情報（国内） -----	177

1. 複雑系の情報処理 に向けて

1. 複雑系の情報処理に向けて

中島 秀之 委員長（電子技術総合研究所）

本報告書は知的情報技術動向調査委員会の複雑系情報処理調査専門委員会メンバーによる調査・討論の結果を踏まえたものである。

今年度は調査の初年度であるので“複雑系”という概念の分野間の擦り合わせを主目的とした。委員会メンバーのバックグラウンドは、物理学、情報処理、経済学、数学と多岐にわたる。単に複雑なシステムという以上の“複雑系”の概念と用語は物理学の分野から提唱されたわけであるが、この委員会ではその概念の一般化、ならびに情報処理との関連を中心として議論した。

1.1 複雑系の情報処理と人工知能

人工知能の研究目的は、知能の解明と知的システムの構築、にある。通常は知的システムの構築、特にエキスパートシステムなどの応用システムに重点が置かれがちであるが、いずれの場合にもキーワードは知能である。では知能とは何か？実はこれは人工知能研究の解として提出されるべき性質のもので、現段階で定義することは、矮小化の危険性をはらんでおり、あまり意味がないように思われる。しかしながら全く無定義で始めるわけにもいかないので、妥協案として以下のような分類を考えた。

1. アメーバの知能 : 外界に反応し、自己を保存する能力
2. 昆虫の知能 : アメーバの知能+環境を自己に有利に変更する能力
3. 犬の知能 : 昆虫の知能+学習能力
4. コンピュータの知能: 抽象的記号操作を行なう能力
5. 人間の知能 : 以上のすべて+ α

ただし、ここでの“アメーバ”や“犬”は単なるラベルであって、生物学的に意味のある代表ではないと考えていただきたい。また、ここでは仮に番号の順に高等な知能であると考えことにしよう（高等というのは後で述べる議論に関係するだけであって、実際にどちらが高等かというのは本稿では本質的な問題ではない）。

上記のすべてを知能の構成要素として捉えるのであるが、人工知能の対象は明らかに人間の知能である。しかし、そのためにはそれ以前の例えばアメーバの知能を研究しなければならないことも事実である。ただ、ここで強調しておきたいのは、アメーバで止まってしまうような方法論は採用できないということである。将来的に人間の知能へと拡張できる、あるいはその基礎となる方法論が求められているのである。

ただし、すべてのレベルの知能について共通の要素がある：外界の方が複雑であるということである（例えばサイモンの指摘[4]）。初期の人工知能では外界のモデルを

内に持つことを前提としたアプローチが多かったが、自分より複雑なものの単純化したモデルを内に持っているだけでは対処しきれない事態が多いのは明らかである（フレーム問題[2]）。最近ではこれに代わるアプローチとして反射を主とするものが注目されている。例えば“昆虫の知能”を構築するのに提案された服属アーキテクチャ[1]がそれである（これに関しては2.2.6で詳しく検討する。しかし、“人間の知能”がそのような反射だけで成立しているわけではなく、シンボル処理を含めた能力を考える必要がある。そのような場合に“複雑系”という見方が必要なのではないかと考えているわけであるが、その議論を展開する前に、複雑系とは何なのかを論じる必要がある。

1.2 複雑系の分類

委員会で、様々な分野の研究者が集まって討論した結果として複雑系研究には大きく分けて以下の3つがあるように思われる：

1. 見方が複雑系：カオス理論を始めとする物理学

従来の単純な法則に基づく世界観、さらに仮説生成とその実験（環境を単純化し、変数を少なくしないと不可能）による検証による法則抽出、では理解できないものがあるという発見の最初がカオスである。しかし、カオス自体は単純な方程式から生成される。決して複雑な対象ではない。そのような現象をどう捉えるかの見方が重要。（2.3.1項）

2. 対象が複雑系：社会学、経済学など

経済や社会現象を完全にモデル化するには、原理的には各個人の認知活動まで考える必要がある。従来の経済学では個人を理想化し、各自が完全情報を持ち完全に合理的に行動するという仮定の元でしか理論構築ができなかった。つまり、対象を単純化することによってしかモデル化ができなかった分野である。また、コンピュータ・ネットワークのように昔はそうでなかったものが、発展とともに複雑系の様相を呈して来たものもある（2.8節）。

3. 手段が複雑系：情報処理

情報処理においては、物理や経済と異なり、情報処理を離れたところに対象だけが独立に存在すると言えない。その意味で情報処理においては処理手法と処理対象が不分離であるという複雑系の見方そのものが本質的に最初から備わっていたと考えられる。

つまり、情報処理的手法こそが複雑系の手法である。

ただし、従来の情報系の手法だけでこと足りるわけではなく、今後は以下のような観点を重視して行く必要がある：

1. 複数の切口（階層）がある。
2. 多自由度系であるが、その自由度を制限しないと制御できない。
3. 部分に分割すると失ってしまう全体としての本質がある。
4. 処理の方式により取り出せる情報が異なる。よって焦点の制御が必要。
5. どのような処理をすべきかがあらかじめ（処理するまでは）自明ではない。

上記は排他的分類ではない。新しい情報処理に物理学で得られた複雑系の見方は必須であろうし、ある意味では情報処理の見方を物理学に持ち込めば複雑系の見方になるとも言える。社会学や経済学においても複雑な対象を単純化して捉える従来の手法ではなく、複雑なまま捉えようとする動きがあるが、これも物理の見方や情報処理の進歩に支えられてのことである。

また、別の切口（2.1節）として

1. 複雑なものを単純に理解する：科学

一見複雑に見える世界を単純な法則で捉えるというのが科学。

2. 単純な記述で複雑なものを生み出す：芸術の一部、ALifeなど

カオスのように単純な規則から複雑な現象が産まれるのを楽しむ。

3. 単純な記述で単純なものを生み出す：工学

単純な仕様記述から、それに合うものを構築する。

4. 単純な記述から複雑なものを経て単純なものを生み出す：複雑系の工学／情報処理

複雑なものを経由する理由は自己安定性や頑健性のためである。単純なものは壊れればそれまでであるが、複雑なものは自己再編や自己修復の可能性を秘めている。

（この最も単純な例として、誤り訂正可能符合が挙げられる。単純な符合より冗長な符合化になるが、その結果誤り訂正が可能となっている。冗長性と訂正可能な誤りの範囲とが正の相関を持つ。）

私は複雑系の構築においては、

単純→複雑

を無限に繰り返す必要があると考えている。つまり、設計し、構築し、その現象を観

察し、設計にフィードバックする。このループの中には必然的に設計者が入ってくる。

1.3 複雑系の設計

では、最初に戻って人工知能の文脈における複雑系とは何であろうか？知能が扱おうとする環境の方が知能自体より複雑である（従って環境にある情報をすべて処理できない）というのが本質であると考えている。知能とは複雑な環境のなかで、部分情報を処理することである。

単純なシステムは知的にはなれそうもない。だからと言って、単に複雑なものが構築できればよいのではなく、知的なシステムが構築できる必要がある。この意味で、複雑な行動が構築できればよいというALife研究の目的とは一線を画している。1.1節の知能の分類において、人工知能の最終目標は人間の知能にある。もちろん、その研究過程でそれ以外の知能を研究するという戦略は有効であろう。これらの各知能はそれぞれ複雑系であるとみなすことができる。しかし、複雑系の構築は人工知能の必要条件ではあるが十分条件ではない。

しかしながら、残念なことに複雑系を設計・管理する手法を我々はいまのところ持ち合わせていない。そこで進化とか創発という手法が注目されている。人工生命やサンタフェでのセルオートマトンの研究などの基本的な戦略は遺伝的アルゴリズムである。これはダーウィンの自然選択の考え方をソフトウェアに適用したもので、基本的には生成と選択の繰り返しである。

知的なシステムを進化的に構築できるかという問いに対しては以下の二派の答えに分かれるであろう：

1. (肯定的) うまい生成・選択の手法と十分な時間があれば可能である。
2. (否定的) 知的なシステムを選択するには長い時間が必要である。

私は否定的である。理由は選択に必要な時間である。生成の手法（主として突然変異と交叉）は改善によりあるいは飛躍的に進歩するかもしれない。しかしながら、知的なものの選択に必要な時間はそう短くならないはずである。

現在のコンピュータで、例えば将棋を1手指すのに数秒から数分かかる。1局には少なく見積もっても1時間以上必要である。つまり強い将棋プログラムを進化的に作るとしたら1世代に1時間は必要なわけである。また、一般的に言ってかなり単純なシステムでも千くらいの世代交替が必要なことを考えると、将棋の強い（有段程度）プログラムを作るには少なくとも百万世代はかかるに違いない（根拠はないが）。だとすると100万時間＝100年のオーダーが必要となり、可能ではあるが我々の生きている間には無理ということになる。

また、仮にそのような手法で知能が構成できたとして、我々はそれによって知能を

理解できるのかという疑問も残る。進化的に作るのが無理だとすると人為的に構成するしかない。そこで使える考え方は何だろうか？複雑なシステムの新しい構築法が求められているわけである。残念ながら本報告書にはその解はない。しかし、出発点になればと考えている。

1.4 本報告書の概要

2章では様々な分野の研究者の複雑系に対する考え方を各自の研究を踏まえて述べる。

2.1節では竹内委員が、計算機科学で古くから研究されている計算の複雑度の議論と複雑系の見方の関係について議論する。古典的なKolmogorov complexity、その改良であるBennettの論理深度の紹介の後、複雑系へと議論が展開する。

2.2節では中島委員が複雑性の尺度としての“スケールの厚み”の概念、創発、オートポイエシスについて紹介した後、それを実現する試みとして有機的プログラミングを提案する。

2.3節では池上委員が複雑系とはものの理解の仕方のことであるという複雑系の基本的スタンスを紹介し、認知や学習への新しい取り組みについて述べる。

2.4節では稲吉委員が単純な部品の相互作用で複雑系を構築する手法について述べる。これは生物をまねたシステムである。

2.5節では橋田委員が彼の持論である情報の部分性と制約の記述の観点から複雑系に迫る。まず、人工の知能には認識ができないことを主張するためにサールが持ち出した中国語の部屋[3]という思考実験を種に計算主義の説明をし、複雑系の議論へと展開して行く。

2.6節では木下委員がソフトウェアの複雑さについて述べる。プログラムの個々の行の動作は完全に理解できるが、数千行のプログラムは理解できないという意味において、複雑系の振舞いに似ている。このようなソフトウェアに関する見方（多重記述系）が複雑系に使えるものかどうかはオープン問題であるとしている。

2.7節では佐藤委員が情報の自動編集という観点から複雑系に迫る。

2.8節と2.9節は扱う対象が複雑系である。

2.8節では村上委員がネットワークが複雑系となった（と思われる）経緯について解説する。

2.9節では出口委員が社会学における複雑系への取り組みについて紹介する。社会は生物個体同様に複雑なシステムであり、自然なマルチエージェントシステムでもある。

3章ではサンタフェ研究所を含む海外調査の報告をする。

4章では現状認識の補助として複雑系の研究情報（国内）を掲載する。

参考文献

- [1] Rodney A. Brooks. Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*, Vol.47, pp.139--160, 1991. (柴田 正良 訳. 表象なしの知能, {現代思想}, 18 (3), 85--105).
- [2] John McCarthy and Pat J. Hayes. Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence. In *Machine Intelligence 4* (eds. B. Meltzer and D. Michie)}, pp.463--502. Edinburgh University Press, 1969.
- [3] J.R. Searle. Minds, brains, and programs. *Behavioral and Brain Sciences*, Vol.3, pp.417--458, 1980.
- [4] Herbert A. Simon. *The Sciences of the Artificial*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, second edition, 1981.

2. 研究の現状と問題意識

2. 研究の現状と問題意識

2.1 複雑系との付き合い方 ―計算機科学の立場から―

竹内 郁雄 委員（電気通信大学）

近年、複雑系に対する関心が高まっている。その先駆けは物理学者を中心とする自然科学者であったが、いまや、社会学、経済学といったもともと研究対象が複雑な学問に加え、計算機、通信ネットワークなどといった工学の分野を巻き込んだ学際的な関心を呼んでいる。

計算機や通信ネットワークは、還元的手法をドグマとするエンジニアの産み出したものであるにもかかわらず、これらを「複雑系」として研究対象にすることは矛盾をはらんでいるように見える。自分で作ったものが複雑なのでわからない、うまく制御できない、といったようなものだからだ。しかし、私はこれは工学のパラダイムシフトを示唆する重要な徴候と考えている。このような話をする機会があるたびに、かならず多くの工学的マインドから反論を受けるということが図らずも立証しているように、このパラダイムシフトは逆に相当にのっぴきならぬともいえる。

本稿では、まず計算機科学の発展が複雑性を回避する方向で進んできたことを論じ、複雑性の定義として興味深いBennettの論理深度について簡単にサーベイする。それから、複雑性の反対語と考えられる「単純性」と複雑性がどのように関係しあっているのかについて概観する。これは計算機科学の立場から見た複雑系への付き合い方についてヒントを与えるものとする。⁽¹⁾

2.1.1 複雑性を回避するためのオブジェクト指向

恒例にしたがい、広辞苑をひくと、「複雑」という言葉の意味として「物事の事情や関係、または心理などがこみいっていること、いりくんでいること」とある。（語義説明が簡潔明瞭と私が思っている）新明解によると「すぐには解決（理解）できない事情（関係）がいろいろからみあっている様子」である。プログラミングが難しいという意味をよく表わしているのは、新明解のほうであろう。

このような「人間にとって理解しにくい、扱いにくい」という意味での複雑さは、工学では忌避すべきものであり、闘うべき敵であった。計算機プログラミングの歴史はその流れに沿ってきた。

計算機が誕生した当時は、ソフトウェアは容易で、ハードウェアが難しくて複雑な技術だと考えられていた。しかし、ハードウェアは、ハードウェア技術者のよってた

⁽¹⁾ この資料は1995年のソフトウェア科学会のオブジェクト指向計算ワークショップでの講演、JIPDECの複雑系調査研究委員会での議論などに基づいて作成した。

つ基本スキルの変遷を見てもわかるように、かなりうまく複雑性を回避してきた。フリップフロップ回路のアナログ技術から、ANDやOR回路をパックしたMSIの利用技術、そして各種専用LSIを組み合わせて使う技術。部品の小型化は素材技術の進歩に負うが、部品は論理的に多機能化したにもかかわらず、技術としては扱いやすく見通しがよくなってきた。つまり、部品自身は複雑性を増したが、それをブラックボックスの内側に隠蔽することに成功したのである。

複雑さをブラックボックスという部品化によって、視界から追いやる。これがどういう場合でも成功するとはかぎらないことに注意しておこう。成功するのは、一般に、われわれの「理解のレベル」で、ブラックボックスの外部機能を語ることができる場合のみである。このときは、「それ以下のレベルの内部的複雑さ」はシステムの当面の理解には不要なものとなる。

ハードウェア技術における複雑さの回避は、部品の論理的な多機能化をブラックボックス化することによって成功し続けてきた。しかしソフトウェアでは、このような部品化がハードウェアほどには成功しなかった。というより、ほとんど成功しなかった。たとえ、ソフトウェアの個々の技術要素としての成功がいくばくかあったとしても、ソフトウェアに要求される機能の複雑さの伸びに追いつかなかったのである。

同じプログラムステップをパラメータを変えて何回も使うサブルーティンは、ソフトウェアにおけるおそらく最初の部品概念である。プログラミング言語が機械語から、より記述性の高い「高級」言語に変遷するにつれ、サブルーティンは手続きや関数の概念へ進展していったが、ソフトウェアの複雑さに対処する有効打にはならなかった――とはいっても、これらがなければソフトウェアなど端からつくりようがなかったことも事実である。

ハードウェア技術における部品化、ブラックボックス化に相当するこれらの概念があまり有効でなかった理由は、まとめると次の三つになるだろう。

(1) ブラックボックス化、すなわち内部情報の複雑さの隠蔽に成功しないことが多かった。つまり、外側に見える仕様と、内側での実装の切り分けがうまくいかず、外側にまで、内部事情が見えてしまうことが多かった。これでは、ブラックボックスでなくて、半透明ボックスである。部品としての仕様が複雑になってしまい、部品として再利用される機会も減ってしまう。ハードウェアの場合は、技術の階層分けが最初から確立していたのに、ソフトウェアでは階層分けが便宜的でしかあり得なかった――記号論理はどこで切っても記号論理で、まるで金太郎飴である。

(2) ソフトウェアのもつ記述能力の高さ（書くだけならなんでも書ける!）と、ソフトウェアに要求される機能の多様さが、このような部品化がもたらす概念整理のレベルを超えていた。部品化は焼石に水であった。逆に部品化をまともにやろうとすると、手に負えないほどの大量の部品種類が必要になり、部品化自身が新たな複雑性の問題を生み出すことになってしまう。

(3) 上と双対の理由だが、部品の仕様の記述自体が複雑だった。仕様の厳密な記述が、内部実装のための記述（プログラム）と同程度の複雑さ（この場合は記述に要する文字の量と考えてよい）をもってしまうという、冗談みたいなことが現実にかかる。これは人間の理解のレベルとの整合性をとるという部品化の意義と矛盾してしまう。

これらの理由のさらに背後には、人間とソフトウェアの関わりに関するもっと根源的なものが潜んでいる。それは人間の空間認知能力と時間認知能力の差である。オブジェクト指向概念の誕生と広がりとは、これを抜きにしては考えられないように思う。

当初、ハードウェアは、一度つくったら変更不能の固い技術で、コストのかかる困難な技術と考えられていた。それに対して、ソフトウェアはいつでも変更可能なやわらかい技術で、保守性もよく、コストの低い技術と考えられていた。ところが、ソフトウェアがハードウェアよりもずっと扱いにくい質の悪い技術であることに計算機屋が気づくのにそう時間はかからなかった。60年代に流行語となった「ソフトウェア危機」は本来、ソフトウェアの需要に供給能力が追いつかず、ソフトウェアの不足が重大な社会問題になるという危機感を表した言葉であるが、これはそのままソフトウェア技術の難しさを言い表していた。

1960年代の記念碑的論文であるDijkstraの"Goto considered harmful"（goto有害論、1968）はわずか2ページのレターであるが、goto文がいかにプログラムの理解を困難にするかについて鋭く指摘した。プログラムを読んでいるときにgotoが出てくると、その行き先を探し、そこへ視点に移さなければならない。こういった視点の移動は、書かれているプログラムテキストの空間的構造と無関係であり、読む人間にあてどもない彷徨を強要する。こういう彷徨の中からプログラムが実現しているアルゴリズムの抽象的構造を再構築して理解することは困難である。当然、プログラムの修正・改造も、修正の影響範囲がすぐにはわからないので困難である。

この簡明直截にして的を得た指摘は、1970年代の「構造化プログラミング」ブームをもたらしした。構造化プログラミングとは、プログラムの論理的抽象構造と、プログラムテキストの空間構造をなるべく一致させようとする考え方である。低レベルでは、プログラムテキストを、逐次実行、選択（if-then-else）、繰り返しの三つの要素の結合で表現し、gotoのように実行順序とプログラムテキストの構造の不一致を起こすものを使わないようにする。もっと高いレベルでは、大規模なプログラム全体を分割統治によって段階的に分割し、各段階で人間の理解のレベルに合わせた詳細化を行なう。後者は、システム工学におけるトップダウン手法、まさに還元的手法そのものである。

プログラムテキストの構造に統制を加える考え方は、それに適した新しいプログラム言語を多数生み出し、またプログラミング書法全般にも大きな影響を与えた。しかし、ソフトウェアのもつ本性的複雑さは、構造化プログラミングの網をもってしても抑えきれぬものでなかった。プログラムはますます巨大化し、複雑化していったのである。

構造化プログラミングにおいてもプログラムの適切な抽象化の必要性が主張されて

いたが、1980年代に花開いたオブジェクト指向プログラミング（あるいはもっと一般的にオブジェクト指向概念）によって、プログラム抽象化の意義や意味がより明確になった。それまでの手続き指向プログラミングでは、プログラムステップをまとめあげて、手続きや関数、さらにプログラムモジュールと、抽象化の段階を積み上げた。これに対し、オブジェクト指向では、データ構造を基礎として抽象化を積み上げていく。すなわち、手続き指向は、実行手順という、いわば時間的な概念を基礎にした抽象化を行なったのに対し、オブジェクト指向では問題を記述するときに出てくる「もの（object）」、たとえば画面上のウィンドウや、運送伝票、倉庫の一室といったものを計算機内部にモデル化した「もの」の概念にもとづいて抽象化を進める。これは人間が、見えるものから出発して抽象概念を獲得していく認知プロセスとも相性がよい。

オブジェクトはブラックボックス化が一段と進んだものであったため、ソフトウェア部品としての価値がクローズアップされることになった。メッセージプロトコルという簡潔なインタフェース仕様により、部品の再利用性が高まると考えられたのである。しかし、これも当初期待されたほどうまくはいかなかった。これは現在でも研究課題のまま積み残されているといってもよいだろう。やはりソフトウェアの複雑さは一筋縄では対処できないのである。

それでは60～70年代のソフトウェア危機はいまだに続行したままかという、以前ほどの危機感はなくなった。遅々としているものの、ソフトウェアの要素技術が着実に進歩しているうえ、つくるべきプログラムの種類がそう青天井でもなくなってきたからであろう。それに、人々がソフトウェアに「慣れてきた」ということも大きい。1960年当時はFortranコンパイラの開発は30人年とされていた。しかし現在、よくできる学部学生であれば、半年でそれなりのコンパイラをつくれるようになっている。その差を裏づけるソフトウェアの進歩はなんだったのか？

私は、どこにもエポックはなかったと思う。しかし、ソフトウェアという、人間の言葉に近い言葉で書かれるものには、人間のつくってきた言葉の文化と同じような、文字どおりの文化的蓄積があったのである。結局それが、生産性の進歩を生んだのであろう。それは、有用な概念を短く言い表す語彙の発明と蓄積であり、教育の改良であり、ソフトウェアにかかわる人口あるいはコミュニティの拡大である。一言でいうなら、人々がソフトウェアに慣れてきて、理解のレベルが変わってきたのである。

こういうソフトウェア文化の蓄積は、ソフトウェアの固定化でもある。以前はあちこちでプログラミング言語やオペレーティングシステムの設計開発が行なわれていたが、いまやその数は激減した。悪くいえば、言語やOSの寡占化が進んだ。しかし、文化の醸成とは所詮そんなものだという見方も成り立つ。（もっとわかりやすい例ではワープロソフトがある。一時群雄割拠であったこの世界もいまや寡占化が完了してしまった。困るのは、それが技術の頂点をきわめる前に終わってしまったことである。）このような固定化が、ソフトウェア全体の複雑性を減ずることはあきらかだろう。いずれにせよ、純技術的現象というより社会現象として、ソフトウェアの問題が変遷し

ていきそうな気配となった。余談だが、このように固定化するソフトウェアに対して、いまやハードウェアのほうがやわらかく対処していこうという傾向があるのは興味深い。

こういう大きな潮流は、野放図にソフトウェアをつくることによって直面せざるを得なかった複雑さの問題を、社会全体で（多分、経済原則にもとづいて）対応し、回避していこうという人間社会のもつ適応性の一つの現われといえよう。

少し話がそれてしまったが、構造化プログラミングからオブジェクト指向プログラミングへという歴史の脊骨のようなストリームをたどってみると、プログラミングを人間にとってやさしくする（複雑でなくする）ための技術の根底には、プログラミングを時間的認知の対象から空間的認知の対象へ移そうという運動がある。構造化プログラミングは、プログラムテキストの空間構造によってプログラムの抽象構造を表現しようとした。また、オブジェクト指向プログラミングは、手順という時間構造ではなく、ものという空間構造を中心に据えたプログラム抽象へと、コペルニクスの転回を行なった。別の言葉でいえば、これらはプログラムの抽象構造の可視化にほかならない。オブジェクト指向を「可視化」と断じてしまうことに対しては異論もあるが、私は自分の日常的なプログラミング経験からしてこれを確信している。誰がなんといおうと「目に見える」のである！

なぜ、空間表現したほうがわかりやすいかについて、私にここでちゃんと述べるほどの能力もスペースもない。だが、時間解像度が高く、順序記憶のよい聴覚をベースにした時間認知にくらべて、一目でいろいろなものの関係を把握することができる視覚をベースにした空間認知のほうが、複雑なものの理解に適していることは容易に想像できる。ハードウェア技術の進歩が、ソフトウェア技術の進歩にくらべて、微分係数であきらかに優っているのは、ハードウェア（たとえば、論理回路）が本質的に視覚的对象だからであろう。

プログラムの実行は時間的現象であるから、これを空間構造に（私の好きな比喻でいえば、フーリエ変換して）焼き直す作業が必要で、また逆にそのような空間表現を時系列として実行可能にする翻訳技術も必要である。プログラミングを人間にとってやさしくするための技術的な流れは今後も可視化という線に沿っていくと私は考えている。実際、並列プログラミングでは時系列のうまい捨象、あるいは可視化なくしては、なにもできなくなってしまうだろう。

2.1.2 複雑さの定義を求めて

上で述べたような国語辞典的な意味の「複雑性」は、エンジニアリングでは回避されるべきものだが、昨今の複雑系への関心の高まりは、それと矛盾しているようでもあり、また複雑さとの従来付き合い方からの脱皮を目指しているようにも見える。オブジェクト指向も、並列オブジェクト指向、マルチエージェントの方向にシフトす

るにつれ、複雑系との付き合いが深まりつつある。

そもそも「複雑系」に明解な定義はあるのか？それとも、計算機で実現してしまったらAIではないというAI逃水論の伝で、簡単な法則で理解できるものの集合の補集合を「複雑なものの集合」とする安易な定義に甘んぜざるを得ないのだろうか？1994年秋に京大基礎物理研で行なわれた第3回複雑系研究会で、東工大の小林孝次郎先生が数学の世界で確立しているKolmogorovの複雑さの紹介を行なったが、そのあとの雑談で、東大の金子邦彦先生が「乱数を一番複雑だといわれても…」と、素朴な疑問を投げかけた。私もそれに同感だったので、すこし文献をサーベイしてみた。その結果、複雑系に対する直観的イメージを支持するような複雑さの定義の試みをいくつか見つけることができた。

複雑さの定義として計算機科学の中でよく知られているものは、アルゴリズム論で計算の量を測るための計算量的複雑度 (computational complexity) と、情報理論に触発されて考案されたKolmogorovの複雑さ (Kolmogorov complexity) である。Kolmogorovの複雑さは、計算量的複雑度に対比して、記述量的複雑度と呼ぶことができよう。

Kolmogorovの複雑さは、直観的な言い方をすると、対象としているものが、どれくらい短く記述できるかを表わす量である。短く記述できれば「単純」で、どうやっても長い記述になるものは「複雑」というわけである。

これをもう少し形式的に定義しておこう。対象としては理論的な取り扱いを容易にするため、0と1からなる有限二進列 x を考える (無限列にも容易に拡張できる)。二進列 x の長さを $|x|$ で表わす。また記述として、0と1からなる有限二進列 p を考える。ここで記述とっているのは、対象としている二進列を出力するプログラムである。こういうからには、プログラムを解釈実行するマシン M を考えなければならない。具体的には、プログラム p を読みとるための一方向の無限テープと、結果 x を出力するための一方向の無限テープと、作業用の両方向無限テープをもったチューリングマシンを考える。プログラム p をマシン M に与えたとき、 M が出力テープ上に x を出して停止するとき、 $M(p)=x$ と書くことにしよう。さて、対象 x のKolmogorovの複雑さ $K_M(x)$ は

$$K_M(x) = \min\{|p| : M(p)=x\}$$

と定義される。この定義はマシン M に依存するが、不変性定理という重要な定理があり、マシンの間の差は本質的には定数でしかないことが証明されている。だから、以下の議論では M を万能チューリングマシン U に固定し、 $K_U(x)$ を単に $K(x)$ と記す。

1ばかりの列 1^n は n がいくら大きくても $\log n$ 程度 ($\log$ の底は2) の K しかもたないことが容易にわかる。長さ n を表わす情報 (これは $\log n$ 程度) をプログラムに埋め込んでおけば、短いループがあれば生成できるからである。 π の小数点以下 (二進展開) のような不規則な列も、 π を計算するプログラム自身は長くないので、展開桁数 n を大きくとれば、 $\log n$ 程度の記述に圧縮できてしまうこともわかる。

しかし、長さ n の列で、たとえば長さ $n-10$ 未満の記述をもつものの割合は、高々

2^{-10} 、つまり約1000分の1以下であるから、ほとんどの二進列はそれほどコンパクトに記述できない。実際、サイコロを振って得られるような二進列の大半は、コピーを行なうプログラムの中にそれ自身をデータ文のように書き込んでおくより本質的にコンパクトな記述はない。逆にこれは適当な定数 c (コピープログラムのビット数程度の数) があって、任意の x に対して、 $K(x) \leq |x| + c$ であることを意味する。というわけで、 $K(x)$ は大体 $\log |x|$ から $|x| + c$ の間に納まる数値となる。

Kolmogorovの複雑さの最初の応用は、数列の乱数性の定義づけであった。上に見たように、なにか規則があって生成されたような列の K は小さく、大体 $\log n$ 程度である。これを裏返せば、無限二進列 x の前のほうを抜き出した有限部分列 $x_{1..n}$ が、 n を順次大きくしていったとき、 n から「本質的に」圧縮できないようであれば、 x を乱数列であると定義してもよいということになる。「本質的」をどう精密化するかに若干のテクニックが必要であるが、この方針でKolmogorov乱数が定義され、ほとんどすべて(測度1)の二進無限列がKolmogorov乱数であることが証明されている(その後Martin-Löfによって、 K にもとづく、統計学者にとっても直観的な乱数の定義が定義され、同様の結果が証明されている)。

なお、 K の計算自身は帰納的でないことに注意しておこう。マシンの停止性の問題がからむからである。しかし、 K にはいろいろな応用がある。たとえば、次のChaitinの定理は、Gödelの不完全性定理の計量的拡張といえるものである。

[Chaitinの定理]

有限無矛盾な公理系 T に対して、ある自然数 t があり、 $K(x) \geq t$ なる x が存在することは、 T の中では証明できない。

Chaitin自身の直観的解説によれば、「(重さ) 10ポンドの公理系では、12ポンドの定理は証明できない。」これをさらに敷衍すると、世界を単純な原理で記述しつくせるという(たとえば理論物理学者の)試みに対して、そうではない、我々の限界を超えたような記述しかあり得ないのだと反論し、それを証明しようとしたとしても、最初から無謀な企てということになる(だからといって統一理論派を後押ししているわけでもない --- 念のため)。

記述が短くならないものを複雑と呼ぶのは、直観的にうなずける定義である。しかし、いま研究者が話題にしている複雑系をうまく規定しているようには思えない。その端的なあらわれが「乱数が一番複雑といわれても…」という疑問である。たとえば、カオスは複雑な振る舞いをするといわれているが、その基礎となる方程式、つまりカオスの記述自身は驚くほど単純である(ただし、連続系でのカオスと、離散系でのKolmogorovの複雑さをなんの準備もなしに同じ俎上で議論するのは、反則である)。むしろ、我々は「どうしてこんなに簡単に記述できるものが、こんな複雑な挙動を示すのだ？」という驚きによって、複雑系をとらえている。Kolmogorovの複雑さは、我々のこのような直観を裏づけてはくれないのであろうか？

しかし、多くの研究者を引きつけたKolmogorovの複雑さはそんなに底の浅いものではないらしい。記述の量と、振る舞い、すなわち実際の計算の量の関係に注目するような拡張が数多く行なわれている。

まず、Solomonoff-Levinの測度、あるいはアルゴリズム的確率と呼ばれるものを見よう。一方向に無限の長い入力テープにデタラメに0と1が書いてある。マシン U がこのテープを左から順に読んでいき、出力テープに二進列 x を出したところで停止したとしよう。入力テープから読んだ二進列を p とすれば、 $U(p) = x$ である。しかし、デタラメに0、1が書いてあるのだから、計算が止まるとはかぎらないことに注意しておこう。さて、二進列 x のSolomonoff-Levinの測度 $m(x)$ は

$$m(x) = \sum_{U(p)=x} 2^{-|p|}$$

と定義される。これは、入力テープ上にデタラメに書いた二進列をマシン U に与えたとき、幸運にも x を出力してから停止する確率となる。実際、Solomonoff-Levinの測度に寄与する（つまり0以上の貢献をする）デタラメプログラム p があると、 U がそれを読んで停止するのだから、 p をプレフィックスにもつほかのどんな二進列ももはやこの測度には寄与できない。つまり、測度に寄与する p の集合は、お互いに他の列のプレフィックスにはなり得ない、いわゆるプレフィックスフリー集合である。このことから、 $0 \leq m(x) \leq 1$ というKraftの不等式が成立し、確率の条件を満たすのである。

アルゴリズム的確率は、サルにキーボードを叩かせて文学作品ができるかどうかとか、鶏舎のニワトリに一斉にキーボードをつつかせてプログラムができるかどうかといった議論を思い起こさせる。以下、幸運にも x を出力するようなデタラメプログラムのことをチキンプログラムと呼ぼう。

さて、 $m(x)$ と $K(x)$ の間には、次のような単純な関係が成立することが証明されている。

$$m(x) = 2^{-K(x) \pm O(1)}$$

おおまかにいって、一番短い記述がほぼ $m(x)$ の値に寄与しているわけである。

Bennettの論理深度（logical depth）は、Solomonoff-Levinの測度を使って次のように定義される。二進列 x の重み b での論理深度 $d_b(x)$ は

$$d_b(x) = \min\{t : m_t(x) / m(x) \geq 2^{-b}\}$$

ここで、

$$m_t(x) = \sum_{U(p)=x \text{ within time } t} 2^{-|p|}$$

は、アルゴリズム的確率を、マシン U が停止するまでの時間（ステップ数）を t 以下に制限したものである。Kolmogorov の複雑さはプログラム p が x を出力するまでに使う時間や記憶容量といったリソースには制限をつけてなかったが、このような制限をつけることにより、理論は急激に面倒になる。しかし、より現実的な尺度になる。Bennett の論理深度はその最も意味深い応用といってよいだろう。

この定義だけから論理深度の直観的な意味を読みとるのは難しいが、 d_b 時間未満にたまたま x を打ち出して停止するようなチキンプログラムの割合が、時間制限のないチキンプログラム全体に対して、高々 2^{-b} 程度の割合であると解釈するのが妥当である。つまり、かなり運のいいニワトリでないと、 d_b より短い時間で計算を終えるようなうまいプログラムを生み出せないというわけである。厳密には等価ではないが、 d_b 時間未満に x を打ち出して停止するようなプログラムは、それより b ビット以上短い記述をもつ --- つまりコンパクトさがまだ中途半端 --- と解釈することも可能である（プログラムも二進列であるから、それをより短いプログラムで記述するという意味で、圧縮の対象になる）。どちらももって回った言い方であるが、十分にコンパクトに記述されたプログラムだと、どうやってもある時間以上かかってしまうということである。なお、 b を大きくすると、深度 d_b は小さくなるが、 b にかかわらず d 以上に深いとか、 d 以下に浅いとかいったことがいえる場合が多い。こういった場合、論理深度を単に d と書く。

このように Bennett の論理深度は、直観的には、コンパクトにした記述（プログラム）が x を出力するまでにどれくらい時間がかかるかを意味している。これが大きい（深い）と、記述をコンパクトにできた代償を計算時間で支払っていることになる。

二進列の長さ に比例した程度の論理深度しかもたないものを「浅い」と呼ぼう。規則正しい二進列、たとえば 0^n は、 n を与えると非常に短いループプログラムが $O(n)$ 時間で打ち出せるので、 n に対して「相対的に」浅い。（泥縄的な定義になるが、 n に対して相対的にしないと、 n 自身が「深い」ことがあり得る）。また、乱数は、もともとコピープログラムより短いものがなく、内部データ文に入れた x を打ち出す $O(n)$ 時間しかかからない。これは相対的といわずとも、無条件に浅い。この定義によれば、 π の計算は（これほどには）浅くないことになるだろう。

Bennett の論理深度で驚くべきは、我々に思いつくようないくらでも大きい深さをもつ二進列の存在を証明できることである。与えられた数から思いつくかぎりの大きい数を計算する関数（ビジービーバー関数）を $B(n)$ としよう。長さが $n-1$ 以下のすべての二進列 p を入力にしてマシン U を $B(n)$ ステップ走らせ、その出力結果を書き並べる（ n より長いものも短いものもあるだろう）。その中に現われない最初の n ビット二進列（かならず存在する）は $B(n)$ 以上の深さをもつ（ $B(n)$ ステップ以下では求まらなかったのだから）。

規則正しい数列や、乱数が浅く、その「中間」に深いものがあるという結果は、複雑系を複雑だと思う我々の直観を裏づけているように思われる。Bennett は次のように言っている。「一見ランダムに見えるが、微妙に冗長な構造が深い。つまり $m(x)$ が

時間のかかるプログラムばかりの確率の和になっている場合が深い。……自然界に発生したDNAのような「組織的情報」は、その起因するところは単純な原理にもとづいているが、とてつもなく長い生物学的プロセス（計算）の所産である。」Bennettの論理深度の意味するところを敷衍すると、我々の世界が単純な原理で記述されていたとしても、それにもとづいて実際の予測を行なうことは計算量的に不可能だということが示唆されている（もちろん世界が「深い」としての話だが…）。

これらの直観的な説明はますますカオスのもつ複雑性をうまく言い表わしているように思われる。実際、カオスにおける、見かけのランダム性に埋め込まれた冗長性、記述の驚くべき簡潔性、初期値過敏性などによる予測不能性など見事な符合がある。しかし、前にも述べたように厳密な意味で両者の間に関連をつけるのは難しい。いろいろな研究があるようであるが、私は両者を結合したものを現時点では知らない。Bennettも引用していたが、Wolframが次元セルオートマトンの研究で見出した「計算非可約性（computational irreducibility）」、すなわち実際に計算してみるほかに有効な予測手段がないという概念との関連も興味深い。

Bennettが論理深度という概念を定義しようとした動機は、生物のような世の中の複雑な組織は一朝一夕にできたものではなく、長い長いプロセスを必要としたという彼の信念であった。彼はそれを「ゆっくりとした成長の原理（slow growth principle）」と呼んでいる。この原理を裏返すと、ゆっくりと成長してきた複雑系は安定であると、彼は結論した。

Kolmogorovの複雑さにしろ、Bennettの論理深度にしろ、かぎりなく大きい有限の世界での理論であるから、我々が日常的に扱っているものの複雑さに具体的な指針を与えてくれるものではない。しかし、このような枠組みの存在自身が我々に安心感を与えてくれる。

余談であるが、私は、小豆（単純で規則正しい）とコシ餡（ほとんどランダム）の中間領域にあるツブ餡（ランダムさに埋め込まれた微妙な冗長性）こそ、味わい「深く」、味の極致と信じているのであるが、Bennettはそれに理論的裏づけを与えてくれた！これにかぎらず、両極の中間にあるものこそ、実世界的で、扱いも理解も難しい。だからこそチャレンジに値するのだ。

2.1.3 複雑系を利用すること

これまで、計算機科学の発展の全般的な傾向が、複雑性からの回避であることを見、複雑性に対する直感を裏付ける理論もありそうなことを見てきた。ここで計算機科学が、いわゆる複雑系とどのようなスタンスで付き合っていくのかについて少し考察することにしよう。たとえば、オブジェクト指向は上でも述べたように、本来は複雑系を回避するためのパラダイムであった。それが、またどうして複雑系とリンクするようになる（なった）のか、どうリンクしていくべきか？

複雑系との付き合い方には、おおまかにいって3種類あると私は考える。

[1] CS 型 (Complex to Simple)

まず複雑系ありきで、それを理解するために人間がいろいろな指標、特性などを抽出し、単純な原理や理論へとマッピングしようとするタイプ。自然科学はすべからくそうであったし、経済学、社会学など、もともと存在している複雑なものの理解を求める学問はすべてそうである。人間は複雑なものを複雑なままには理解できないために、マッピングの過程で情報が欠落することは避けられないが、それはそれで問題なしとする。各種のシミュレーション、人工知能はこのCS型に分類することができよう。

[2] SC 型 (Simple to Complex)

単純な記述から、複雑なものを生み出すタイプ。人工生命がその典型である。さらに、池上高志先生の、いわばIkegamismはこれの代表といってよいだろう。これはBennettの論理深度の意味では定数や低い次数の差しか問題にならない程度の深さの世界かもしれないが、人間にとっては十分刺激的である。ただし一般にこのタイプには確固たる方法論やセオリーが存在しないことが多く見受けられる。複雑系の研究会では、「こんな記述からこんな複雑な振る舞いが生じた。どうだ、面白いでしょう」みたいな感じの発表が結構あり、まだ学問としては日が浅いなという印象を受ける。得られたものの抽象化あるいは汎化が必要である。マルチエージェントの研究会などにもそれに通ずる雰囲気が見られる。むしろ、一部の人工生命研究者のように、娯楽や芸術の手段として利用しようとするほうが、いまのところ潔いのかもしれない。

[3] SCS 型 (Simple to Complex to Simple)

従来の還元的手法の工学では、単純な要素の線形組み合わせ、あるいは制御された組み合わせにより、人間にとってははっきりとわかる単純な効用、特性、指標を得てきた。これは複雑系という扱いにくいものを経由しないので、SS型 (Simple to Simple) と呼ぶことができよう。工学でパラダイムシフトが起こっているとすれば、複雑系を経由して、なおかつ効用を得ようという考えが広まってきたことである。たとえば、マルチエージェントシステムにおいては、個々のエージェントは十分に単純な記述と振る舞いをもつ。それらが多数並列に動くと、振る舞いは制御可能域を超えた複雑さをもち始める。しかしながら、システム全体から抽出される効用、特性、指標はわかりやすいものをねらう。この考え方は、SCS型そのものである。

なお、中島秀之氏は、私のいうSCSを (正規表現の記法を流用して) $S(CS)^*S$ と見るべきでないかと発言したが、それはC、すなわち複雑系の内部構造に言及したものであり、ここでの分類には馴染まない。実際、人間の脳の固有の複雑さの内部を見ると、CとSとが交互になった階層になっているかもしれないが、ここではそれを一括してCと表現するのである。

さて、SCS型の工学が成功するかどうかは、SCSがSSを超えるメリットをもてるか

どうかにかかっているであろう。同じ機能しか得られないのであれば、わざわざSCSのアプローチをとる有り難みがないからである。

Bennettの「ゆっくりとした成長の原理」が示唆しているように、複雑系の特徴は、ある種の、つまりある指標で見た際の安定性にある。頑健性、自己修復性など、自律分散システムの特徴として挙げられるものは、この範疇でカバーできる可能性がある。しかし、いみじくも同じ「ゆっくりとした成長の原理」に則った論理深度の大きいシステムが、チキンプログラムとしてできあがるのは恐ろしく低い可能性だという示唆もまた重いものがある。我々がニワトリのようなレベルの試行錯誤を行なっているかぎり、所望の安定性をもつ（有用な）複雑系を誕生させるには途方もない時間がかかることになる。それよりもっと進んだシステム、すなわち環境に適応し、進化するシステムを我々自身が（長い歴史の目から見れば）インスタントに作ることができるかどうかということに、Bennettの論は原理的な意味で深い疑問を投げかけているようにも見える。

しかし、科学として考えると、我々はそのような進化の断面を実験的に作る機会をもち得る道具立てをもてるようになったといえるかもしれない。また、工学として考えると、そのような原理的疑問は、日常のエンジニアリングともともと次数の違う別世界のものだという割り切りも成り立ち得よう（理論は指数と多項式の差を問題にするが、工学は多項式の次数や係数を問題にする）。実際、並列オブジェクト指向にしても、エージェント指向にしても、Bennettの理論がダイレクトに使えるような規模になっているものは、地球規模のコンピュータネットワークを題材としたもの以外にはほとんどないのではなかろうか。

複雑系に関して、ここでは詳しく述べるができなかったが、いくつかのキーワードを挙げておこう。

- 自己相似性 --- 万能チューリングマシンは自分自身をシミュレーションすることができるという意味において、自己内部に自己の模型を含み得る。つまり、純粋な計算機構に自己相似性の概念が内包されている。
- 冗長性 --- 人間の言語活動や経済活動などに見られるシャノンの情報量の意味での冗長性の起源はなんだろうか？また、そもそもシャノンの情報量の定義に真の妥当性はあるのだろうか。秩序と非秩序の度合を表わすエントロピーという用語と関連づけられたことによって多くの議論を巻き起こしているようである。
- もっと現実的な複雑性の尺度 --- Bennettの論理深度はいわば「絶対的」な複雑性の尺度であり、理論的な枠組としては妥当であるが、工学的な応用には使えない。もっと簡明で、わかりやすい複雑性の尺度はないものか？複雑性を「中間度」といったもので計れないか？

複雑系はたしかに面白い。しかし、SCS型を目指して、結局SC型に終わってしまうことも多そうだ。とすると、娯楽？ 芸術？ だが、私はこれでもいいのだと思う。人間には単純な効用だけではなく、複雑を複雑として（理解しないまでも）そのまま受容し、楽しむ才覚も備わっているからだ。私はこの方向に複雑系と計算機のランデブーの将来性があると思うのである。だからといって、複雑系を工学的に有用するアプローチを簡単にあきらめるわけにはいかない。

参考文献

- [1] M. Li and P.M.B. Vitányi, Kolmogorov Complexity and its Application, in Handbook of Theoretical Computer Science, ed. J.van leeuwen, pp.189-254, Elsevier, 1990.
- [2] C.H. Bennett, Dissipation, Information, Computational Complexity and the Definition of Organization, in Emerging Synthesis in Science (Proc. Founding Workshops of the Santa Fe Institute, 1985), ed. D. Pines, pp.297-313, Addison Wesley, 1987.
- [3] C.H. Bennett, Logical depth and physical complexity, in The Universal Turing Machine, A Half-Century Survey, ed R. Herken, pp.227-258, Oxford University Press, 1988.
- [4] M. Li and P. Vitányi, An Introduction to Kolmogorov Complexity and its Applications, Springer-Verlag, 1993.

2.2 複雑系としての知能の構築

中島 秀之 委員長（電子技術総合研究所）

2.2.1 知 能

計算機で情報を処理しようと思うと、非常に定型的な処理を除いてほとんどはボトムアップな処理になる。例えば画像処理や、音声処理などは典型的なボトムアップ処理の例である。従来からトップダウンにするという試みはなされてきてるが、必ずしも成功したとは思えない。しかし、人工知能研究の初期からMinsky [6]らが強調するように、人間の処理はトップダウン的要素が強い。

また、計算機がネットワークで世界規模でつながっているときに、そのための処理というのは従来の1台1台の計算機が独立に仕事をしていたのとは違うと考えられる。このような全体的な意味での計算・情報統合を考える上で複雑性というのは切り離せない概念である。

人工知能にはいろいろな定義があって「知能」というのがキーワードになっているが、結局は複雑系の情報処理として定式化できるのではないかと考えている。あるいは、複雑系の情報処理ということができない限り、知能にはならないと言っても良い。

以下に複雑情報の特質を挙げる：

1. 部分に分割すると失ってしまう全体としての本質がある。
2. 処理の方式により取り出せる情報が異なる。
3. どのような処理をすべきかがあらかじめ（処理するまでは）自明ではない。

知能とは複雑な環境のなかで、部分情報を処理することである。単純なシステムは知的にはなれそうもない。だからと言って、単に複雑なものが構築できればよいのではなく、知的なシステムが構築できる必要がある。この意味で、複雑な行動が構築できればよいというALife研究の目的とは一線を画している。

1.1 節の知能の分類において、人工知能の最終目標は人間の知能にある。もちろん、その研究過程でそれ以外の知能を研究するという戦略は有効であろう。これらの各知能はそれぞれ複雑系であるとみなすことができる。しかし、複雑系の構築は人工知能の必要条件ではあるが十分条件ではない。

ただし、複雑系を記述しただけではだめで、処理する必要がある。この場合、情報の部分性、処理の部分性が問題となる。複雑系の処理では全体の情報はわからない。従来の数学は完全情報を仮定していて、それから時間とメモリーが無限にあればという前提の解析を行ってきた。アルゴリズムというのがまさにそういう考え方がメインになっている概念であるから、情報が部分的にしかない場合には適用できない。

処理も部分的にしかできない。メモリーが足りないかもしれないし、時間が足りないかもしれない。その中で何をするのか。自分の手に余るような膨大な情報を、その必要部分だけいかにして処理をするのかというようなことが複雑系の情報処理の研究

テーマである。

最近、限定合理エージェント、あるいは限定合理的エージェント (bounded rational agent) という言い方がされる。完全な合理性を持たない。情報や処理能力が限られている。その中で何をしていくのかという問題設定。あるいは別の言い方をすると「神の視点から主体の視点へ」の変換が求められている。神というのは理論家あるいはプログラマー、設計者のことであるが、それらの全体を知っている視点からエージェントをプログラムするという設定ではなく、エージェントの身になって限られた視点から見ていくとどうなるかという視点が必要である。

2.2.2 複雑系の定義

まず、ここでの複雑系の定義をしておかねばならない。

ソフトウェアの複雑性の指標としてKolmogorovのComplexityがある。これはいろいろな対象があったときに、それを生成する一番短いプログラムの大きさを表すというやり方。プログラム言語は違っても、その大きさの差はコンスタントでしかない。

例えば、ゼロがずっと続くプログラムというのは、どんな言語で書いても大概1行で書けるし、 π の計算のプログラムというのは多分数行で書ける。先ほどのゼロをずっと書くよりは長いけれども、やはりコンスタントな長さである。それに対して、ある特定の乱数の列を生成しようと思うと、乱数をそのまま覚えておくしかなくて、乱数の長さ分ぐらいになってしまうので、これは長くなるというのがKolmogorovのComplexityである。乱数が複雑だというのは、やはりちょっと直観に合わない。要するに整然としたものほど単純で、乱れているものほど複雑だというのは、ある意味で複雑性のある側面をとらえているとは思いますが、われわれがやりたいもののすべてではない。

その修正版としてBennett's logical depthという概念がある。これはKolmogorovのComplexityの拡張版であるが、計算時間も考慮に入れたものである。プログラムの長さと実際に列を生み出すのに必要な計算の時間の両方で複雑さの尺度にする。例えば、アッカーマン関数の n 番目の値を求めるには一定の計算時間がかかるわけで、プログラムとしてはリカーシブに短く書けるけれども、計算時間は長い。従ってBennettの尺度ではこれはある程度複雑であることになる。乱数の場合は、データとして長い記述を持っていないければいけないが、 n 番目の要素は $\log(n)$ オーダーで求めることが可能であり、計算時間は短い。そういう意味で、ずっとゼロばかり並んでいるものも、完全な乱数もBennett's logical depthという意味では両方単純なほうに来て、その中間のある程度長く書かなければいけないし、計算時間も長くかかるというようなものが複雑だということになる。

これらは昔からある複雑性の定義だが、やはりこれでも満足できない。上記の複雑度の基準は、やはり処理の仕様になっていない。

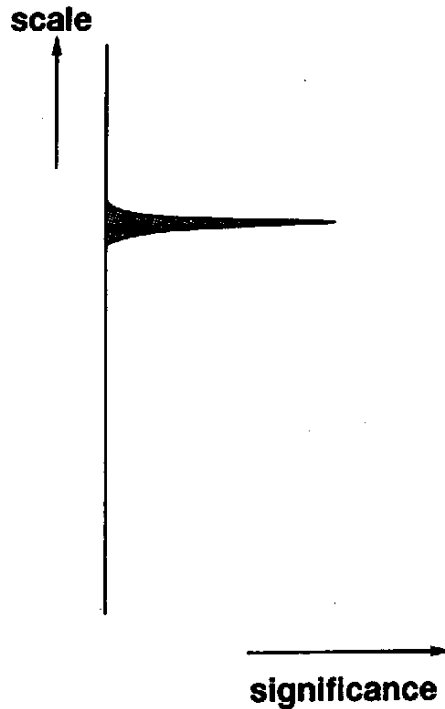


図 2.2-1 スケールに関して薄いシステム

我々は複雑性の指標として「スケールの厚み」[3]を使うことを提案する。Havelは人工知能の国際会議で「知的システムというのはスケールが厚いという意味で複雑なシステムだ」という尺度を示し、次にこのような複雑なシステムの構築手法について述べた。

単純なシステムの例というのは、ゼムクリップ（紙どめのピン）である。人間が設計したシステムで、しかも比較的単純なものである。一方、木は複雑のものの1つの例である。木がゼムクリップより複雑である指標として、スケールの厚みを考える。図 2.2-1 は縦軸がスケールで、横軸が significance である。significance とは、そのスケールがそのものの機能にとって、どれくらい重要かという尺度である。クリップは cm のオーダーの長さのところの構造が意味を持つだけで、あとはあまり意味を持っていない。表面のざらざらの度合い、要するに摩擦係数のようなものも意味があるから、もう 1 か所ぐらい別の場所に山があるかもしれないが、他の大きさのところで見ても、このクリップの本質はわからない。それに対して木というのは、m オーダーの全体の形というのが意味があるし、葉の形を見れば cm オーダー、細胞や、更に下位の DNA の分子レベルまで意味を持っているから、Å オーダーのところまで見ないと木というものを全部理解できない。このように意味のあるスケールの厚いものを複雑であると定義する。¹

¹ なお、この定義に従えばフラクタルも複雑になる。しかしながら、フラクタルは同じ構造が再帰的に現れるので、スケールに関して一様なシステムである。これを除外するにはもう少し考える必要がある。

意味 (significance) があるということの定義は多分に難しいが、創発の尺度のところでも言及するように、結局、意味をつけているのはわれわれ観察者である。Simon が「蟻」の例えでこれを説明している。浜辺を歩いている蟻の経路を観察していると、あちらこちらで曲がって非常に複雑な動きをしているのだけれども、それは蟻自身が複雑なプログラムを持って動いているわけではない。蟻は単に歩きやすいほうへ行っているだけで、砂浜の地形がでこぼこしていて複雑だから、経路は複雑になるのだと考える。そのときに経路というものを記述しようと思うと複雑かもしれないけれども、その蟻のプログラムというものを記述しようと思うと、単純になってしまうわけである。そういう意味で、何を見て何をしたいかによって、対象が複雑だとか単純だというのは変わってくる。ここでのsignificanceというのも同じようなもので、われわれが何をつくりたいのか、何がほしいのかというところで変わってくる。²

対象と同じものを人工的につくることを考える。どこか1つの、例えば木のDNAだけ見てやってしまえば木と同じものがつくれるかと言うと、そういうわけでもないし、多分細胞の構造だけを取り出して研究しても、木が再生できるわけではないという意味で、ある特定の場所だけ見ていてもだめだろう。それに対してクリップと同じようなものをつくろうと思うと、多分1か所か2か所かの構造を調べればつくれる。

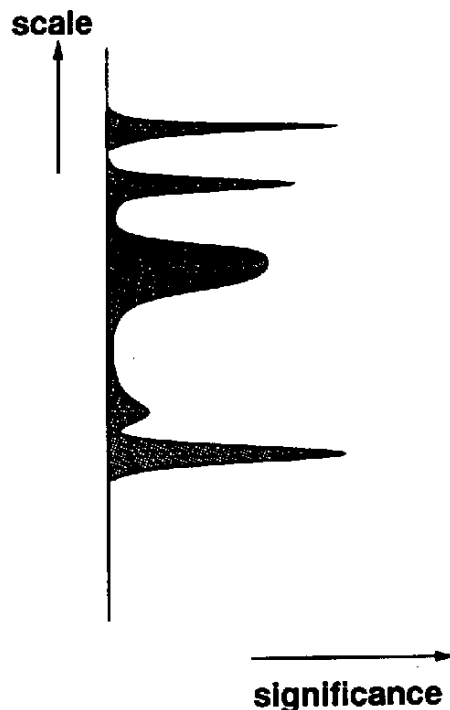


図 2.2-2 スケールに関して厚いシステム

しかしながら、木の例でもそうだが、細胞の形と葉の形、あるいはできた木の形というのは実は独立に設計はできないわけである。それぞれのレベルで意味を持っているけれども、やはり上下が何かの形で関連を持っていて、単独に、例えば「5つの

² “複雑系とはものの見方である” という主張 (池上) がある。

significance のレベルがあるから、それぞれを独立に設計すれば良い」という話にはならない。そうすると、そういうシステムというのは、従来のゼムクリップを設計したような形では設計できないに違いない。そこでHavelは「創発に頼らなければいけない。しかもマルチレベルの創発が必要だ」という。創発の定義も困難であるが、直観的には、設計したレベルと、出てきた現象のレベルが違うことをいう。例えば木の例では「細胞の形を設計すると木の全体の形が創発する」かもしれない。

Havel はマルチレベルの創発の必要性を説いたが、その手法については語っていない。我々はこの手法を開発する必要がある。

2.2.3 創発の尺度

複雑なシステムというのは完全に自分たちでプログラムすることはできないので、ある程度創発というものに頼らざるを得ない。そういう創発システムの究極の姿が auto poiesis である。これは生命とは何かというのに対する答えとしてだされた考え方である。auto は自己。poiesis は創出、産出。つまり自分をつくりだすシステムのことである。創発の具体的な形と考えてよい。

その前に創発をもう少し厳密に定義したいと思う。以下はその方向の提示と研究の呼びかけである。³ $cmpl(x)$ を x の複雑度、 Bh を行動、 Ds をデザイン、 Env を環境としたときに、目標としては

$$\frac{cmpl(Bh(Env))}{cmpl(Ds)cmpl(Env)}$$

が計算したい。この値が大きいほど創発度が高いことになる。創発度というのは言葉で言うと「行動の複雑さをデザインの複雑さと環境の複雑さで割ったもの」というのが気分。要するに、先ほどの「サイモンの蟻」で言うと、環境が複雑でも、蟻のデザインが複雑でも、どちらかが複雑だったら蟻の経路というのは創発したとはあまり言わない。どちらも単純なときに、例えば何か変なことが出てきたら、それを創発と呼ぼうという定義である。創発度が1より大きくないと創発ではない。

まず複雑度を定義する必要がある。先に述べたように複雑度というのは見方で変わってくるから、あるモデルのもとで、その対象の記述に必要なパラメータの数というので考えてはどうかというのが2番目の式である。

$$cmpl(x) \stackrel{def}{=} prm(x)$$

³ 以下の提案は橋田浩一との議論を元に行っている。

ここで $\text{prm}(\text{Ds})$ はデザインパラメータ数で、これは設計者が決めるものだから良いが、 $\text{prm}(\text{Env})$ と $\text{prm}(\text{Bh}(\text{Env}))$ はともに環境や行動のパラメータ数であるからそれらの記述の仕方によって容易に変化する（天動説と地動説の違い）。

しかし、そもそも創発という概念はそのような特定の記述の枠組の下でしか決まらないものかもしれない。そうだとすると、

$$\text{cmpl}(x) \stackrel{\text{def}}{=} \text{prm}(x, M)$$

となる。ここで M は記述モデルのことである。以上をまとめると仮に

$$\text{emg}(\text{Bh}, \text{Env}, \text{Ds}, M) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\text{prm}(\text{Bh}(\text{Env}), M)}{\text{prm}(\text{Ds}, M) \text{prm}(\text{Env}, M)}$$

とすることができる。創発度というのは環境とデザインとモデル、要するに対象の見方の関数になって、行動のパラメータの数をデザインのパラメータの数と環境のパラメータの数で割ったもののようなものが創発度ということである。

2.2.4 オートポイエシス

オートポイエシス[5]は生命の定義として生まれた考え方で、常に自己（auto）のシステムを創り（poiesis）続けるようなシステムのことである。自己の構造を創出する自己組織システムと類似に思えるがそれを越えたものである。システム論的にはベルタランフィに代表される動的平衡を中心概念として構成される第一世代のシステム論、プリゴジン、ハーケンらによって基礎的な機構があたえられた第二世代の自己組織システム、これらに対置してオートポイエシスは、次の世代に位置づくシステム論の構想である。[7] つまり高次（"高度"を含意していないので注意）の自己反映的（reflective）自己組織システムと考えることができる。自分の構造を決定する仕組みも創出するからである。

ちなみに創発の考え方は第二世代の自己組織システムに近いものである。⁴

第3世代のautopoiesisという見方は自己組織化の極端なもので、常に自己組織化をしながら動いているというようなものである。マツラナとバレラが書いている最初に言及したautopoiesisでは「神経システムには入力も出力もない」という言い方をしている。これはちょっと考えると変な話で、神経というのは外界の刺激に対応して何かやっているに違いないわけである。マツラナは神経生理学であり、鳩などの視覚系の研究を通じて、外界にない色が見えるということがわかって来た。物理的に色というのを

⁴ 2階の創発（あるいは創発の創発）[3]はこれとは一線を画しているかもしれない。

規定すると「波長」で定義されることになり、また普通は大体それに近いものをわれわれも見ているわけだが、条件によってはまるきり違うようなものが見えてしまう。例えば、白いライトと赤いライトで照らしたときの影が緑に見えるというもので、緑に対応する波長はどこにもない。また、実際にモノを照らす照明の照度あるいは光度を変えてやると、物理的に出てくる波長は変化するのにもかかわらず、われわれは大体同じ色に見ている。実は対象の波長とまるっきり違う色を見ている可能性はあるわけである。

見ている対象の中で一番明るい色を白だと思って、それで補正しているのではないかというような説がある。モザイク模様のようなものをつくって、各色のところから出てくる波長の成分を物理的に見ると必ず白になっているような模様をつくっても、ちゃんと色が見える。しかし、そのモザイク模様の他を隠して、その単色のところだけを見せると白に見えるというような実験がある。そのようなことから「神経システムというのは何も外界の刺激を取り込んで、そのマップをしているのではない」という考え方が生まれたのである。

神経システムというのは目の表面で切れていて、そこから外が外界で、それより内側が内部だという見方ではだめで、光の刺激から対象のものから全体をひとまとめにして、1つの系として見てやらなければいけないという見方が autopoiesis である。そう思ったときには全体のシステムには入力とか必要がなくて、何か系の中でやって、次の状態を作りだすだけだというわけである。

数理科学（1996年4月）に生命現象をプログラムする特集があり、そこに多賀が二足歩行モデルについて書いている。非常に単純な、手も頭もない胴体と二本足だけがあって、足のところの Dynamics だけは精密に模倣したモデルで、これに歩かせる。自律的に特定のリズムで歩くのだが、障害物があると歩幅を縮めるあるいは広げるにより、それを越えた後、また元の自分の特定のリズムに戻る。これには引き込み現象を使っている。Newral Rythm Generator は Newral system で特定のリズムをつくって、それで歩行のリズムとか歩き方を決めている。Body Dynamics が体の物理的な Dynamics の部分を決めている。その両者の相互作用で実際の歩きが決まっているわけだが、この作り方が面白い。これは創発的な設計の一種だと思われる。

Body Dynamics から Neural Rythm Generator に戻ってくる信号が、実際の歩行行動に相当するものであるから、これが目標。それに対して、Neural Rythm Generator がいかにして Body Dynamics に影響を及ぼすかという部分が、インプリメンテーション。普通は目標からインプリメンテーションを決めるというのが設計なわけである。それに対して創発というのはその逆で、インプリメンテーションから行動が創発するわけである。例えば、ATR の川人（彼の場合は手）Neural system を使って手の動きのコントロールをするときには逆 Dynamics を使う。逆 Dynamics ということは、普通の Dynamics がインプリメンテーションから行動に向かうのの逆で、目標が先にある。それに対して多賀の場合はフォワードの Dynamics（実際にはループになっているが、基本的にはフォワードの Dynamics）だけを使ってつくっているというところが面白い。従来のプログ

ラミングは当然目標からインプリメンテーションの方向。

次に述べる、有機的プログラミングでも同様に、作ったモジュールがどう動くかというのを見て修正していくというようなつくり方になる。部品からつくっていく。その部品の相互作用までつくってみると、実はbehaviorが出てくる。それを見て、われわれは非常にマクロな仕様と比較して試行錯誤繰り返すということである。複雑なシステムをつくろうと思うと、それしかないのではないか。

2.2.5 有機的プログラミング

有機的プログラミング[10][2]が、ある意味のautopoieticシステムになっている。

木村敏[11]が「モノ」と「コト」の違いについて述べている。モノという言い方はcriticaあるいはanalyticな言い方。要するに、世の中を自分＝主体とは切り離して客観的に存在するものとして見て、それを分析的に研究しようというような見方で、西洋哲学の伝統的（デカルトなどに代表される）分析の仕方である。それに対してコトというのは、自分がそれとかかわりあって初めて明らかになる。要するに主体がそこに入ってしまうようなもので、analyticの逆で、何かsyntheticなもので、topcaの働きである。量子力学など、観測すると対象が変わってしまうので、ある意味で客観的にモノだけを見るというパラダイムもだんだん崩れてきて、観測者というのは系の中に入ってしまったてきている。

プログラミングにおいても対象物＝設計したいものというのが先にあって、そういうのをいかにしてインプリメントするかというのがいままでの方法論であった。設計者は系の外にいる。それに対して、プログラムも設計者も何か系の中に入ってしまったような、「神の視点から主体の視点へ」の転換のようなことを考えていかなければいけないのではないかと思っている。木村は違いを英語ではactualityとrealityの差として記述している。

actualityを表に出したプログラミングが有機的プログラミングである。従来の古典的なプログラムの方法論では、環境の中にある情報を中に取り込んで（内部表現をして）、その内部表現を使っていろいろなプランニングを行ない、それをもう一度外に行動として出すものであった。取り込んで、外界との接続を切ったところで中で操作をして、もう1回出すというのをやっている。そうではなくて、外界と内界はずっとつながっているようなものを考える。

例としてマニュアル車の運転の記述を行なう。非常に単純な例であるが、マニュアルシフトの車の運転のうち、ギアシフトの部分だけを考える。

単純なルールが2つあって、普通のプロダクションシステムで書くと、こんな感じになる：

1. エンジンの回転が高かったら、シフトアップしなさい。
2. エンジンの回転が低かったら、シフトダウンしなさい。

残念ながらこのルールには例外が少なくとも2つある。まずトップギアのときには、回転が高くてシフトアップできない。ローギアのときには回転が低くてもシフトダウンできない。そうすると、プロダクションシステムみたいに書くと、どうなるかと言うと、

```
(high-rpm)(not (gear top))-->(shift up)
(low-rpm)(not (gear low))-->(shift down)
(low-rpm)(gear low)-->(clutch)
```

つまり「回転が高くてトップでなければ、シフトアップしなさい。回転が低くてローでなければ、シフトダウンしなさい。回転が低くてローだったら、クラッチを使いなさい」というようなことを書くわけだが、この方式では、複雑なことをやらせると、このif文がどんどん長くなる。フレーム問題と呼ばれているが、基本的にいくら長くても書き切れない。すべてのルールには例外がある。

もう1つは、このif文のところの条件判定というのはコストがゼロではない。当然トップギアにあるかどうかというのはいくらかのコストを払って見るし、回転が高いかどうかもういくらかのコストを払って見る。

有機的プログラミングでは状況を3つに分ける。普通の場合が上の2行。トップギアの場合が次。ローギアの場合が最後の2行というように分けて書けば、if文で一生懸命考える必要がない。普通の場合のときはとにかく無条件にシフトアップすればよい。トップギアの場合は、シフトアップするためのルールは必要ないですから、シフトダウンのことだけ考えればよいというようになる。

各モードはセルとして表現され、モード切替えはセルの取り替え (use で指示される) によって実現される。

```
(in normal
  (=> (high-rpm)
    (shift up)
    (if (gear top) (use top))))
  (=> (low-rpm)
    (shift down)
    (if (gear low) (use low)))
  (<= (high-rpm)
    (rev *x)(> *x 3000)))
(in top
  (=> (low-rpm)
    (shift down) (use normal)))
(in low
  (=> (high-rpm)
    (shift up) (use normal))
  (=> (low-rpm) (clutch)))
```


この方式では5速のギアの位置を常に覚えておく必要はなく、3つのモードでよい。更にどのモードか忘れた場合には通常モードに戻ればよく、その場合にはギア操作をしようとして失敗することでトップやローのモードに戻ることが可能である。

なお、ここでの議論はギア位置の確認が動作を伴う高価なものであるという前提にたっている。そうでない場合（例えばKnight-9000のようにエージェントが車と一体化しておりギア位置センサからの情報が常時利用可能である場合）には受動的状況遷移が使える。しかしながら、そのような利用は回路が固定されてしまい、新たな要求仕様への追従は困難である。例えば、実際の運転では上記の条件以外に坂の登り下りなど、様々な別の条件が加味される。有機的プログラミングにおいては、これらの新しい条件も、別のセルに記述することにより容易に統合可能である。例えばシフトのタイミングを遅くしたいときには以下のように高回転の定義を変更したセルを上（プロセスに違い側に）追加することにより normal セルの high-rpm の定義を上書きできる。

```
(in down-hill
  (<= (high-rpm)
    (rev *x)(> *x 5000)))
```

これは、自分が世の中がどうなっているか、思い込みによってプログラムを変えていることに対応している。従って、本当の reality 要するに外にあるものを毎回見るということをしないで、自分は世の中がどうなっていると思うかという思い込みによって、プログラムをこのように3つに分けて、あとで考えればよい。

何かトリガーがあったら、すぐ反射的にもう何も考えずにシフトアップをしてしまっ、シフトアップをしてから「トップになったかな」というのをゆっくり考えるというプログラムである。トップになっていると、このプログラムをどこか捨てて、次の真中の1行だけのプログラムに変える。この例は非常に単純な例であるから、変わるべきものの候補はこの3つしかなくて、どういう状況で何が変わるかは完全にわれわれには把握できる。従ってあまり創発的ではないのですけれども、こういうのがたくさんたくさんあって、初期状態はわれわれが設定するがそれがどんどん変わっていくうちにどうなるかわからないというようなプログラミングができると、だんだん創発的になる。

従来方式（例えばプロダクションシステム）では図2.2-3のように状況判断を行なった後に行為を行なう。これは判断に時間がかかるが毎回すべての条件を考慮するので間違いも少ない。

これに対し、各規則を状況依存に書くと早い対応が可能となる（図2.2-4）。この方式では入力に対応してすぐに行為が可能である。そして、行為の結果を観察してから次の状況変化への対応を計算する。つまり、従来方式は＜認識－行為＞の順であったのに対し有機的プログラミングでは＜行為－認識＞の順序を可能にしている。我々は上記のドライブプログラムを実装し、有機的プログラミング方式の追従性の良さ

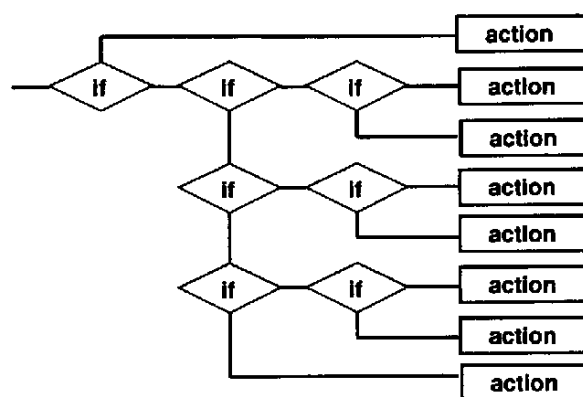


図 2.2-3 従来方式の判断

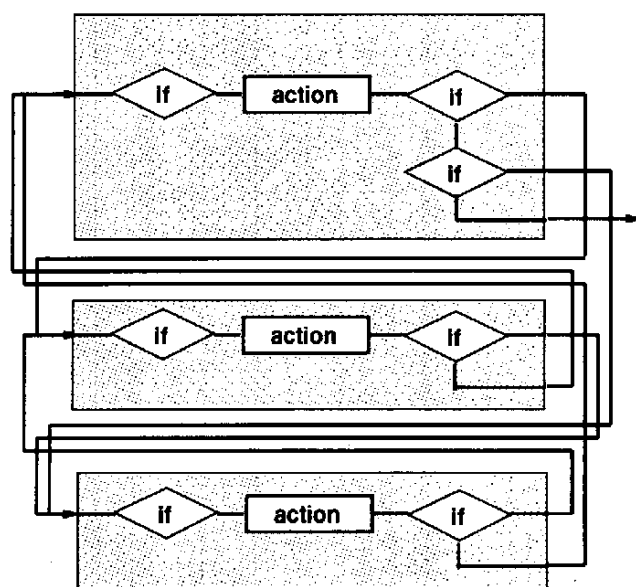


図 2.2-4 有機的プログラミング方式の判断

(反応の早さ)を確認した。

左側にあるif文は外界の認識に使うが、右側のif文は自分のやったことの結果の認識に使う。自分のやったことの結果によって、自分の状態を遷移しようというのがミソである。何か内界の刺激をしてあるアクションをした結果、次に自分の状態を変えてしまう。そういう意味でautopoieticなシステムということが出来る。

この場合、システムの現在の状態の表現はシステムの中にあるともないとも言える。実は外とか中とかという問いがあまり意味を持たない。思い込みだけで中だけで走る

こともできるし、それから、常に外のことを見ながら走ることもできるし、どちらも可能であり、場合によって使い分ける。しかもプログラムにとってみれば、外と中はあまり区別しなくても良いようにした。

先ほどのuseというのは1個のcellをどこか他のものと取り替えている。基本的には他のセルを環境にどんどん積むpushとか、popとか、あるいは全体を眺めて変更をするとかという操作はできるので、環境をデータ構造とみなせばリスト構造に対する変換は何でもできて、例えば一部にループをつくってしまうことも可能である。これが例えば木の構造だと思えば、自然界の木が枝分かれして育っていくような状況というのは、この上に容易に作り出せる。

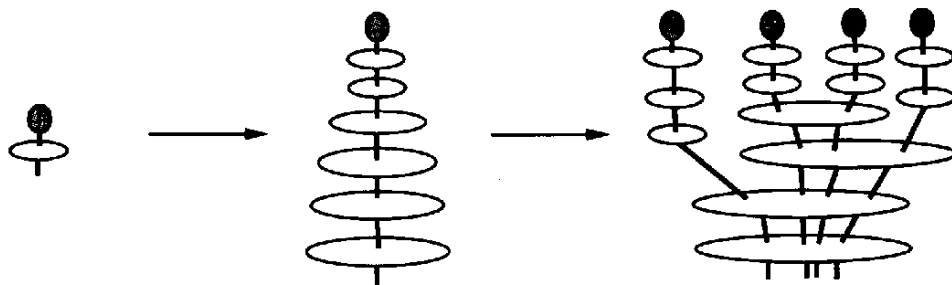


図 2.2-5 環境の成長

上記の状態遷移方式を能動的状态遷移と呼ぶ。自分がこうなると思うからそう変わると言う意味である。従来方式は受動的状態遷移である。外界を観測した結果に従って自分の行動様式を変更する。実際には組み合わせなければうまくいかない。能動的状态遷移だと、何かハプニングがあって、外界と乖離したときにそのままどんどん離れていってしまうわけで、それを引き戻すような受動的状態遷移を適切なタイミングで行なう必要がある。サッカーのプログラムなどでは受動/能動状態遷移の比率やタイミングが重要であることがわかる。うまくやらないと、リアルタイムに遅れたり、いつも受動的に外界ばかり見ていると遅くなったりする。そこをうまく切り分けるのが設計者の腕あるいはチューニングである。

実際にサッカーのようなプログラムを書くと、従来方式でif文をたくさん並べるという方式ではほとんどもう書けない。少なくとも書いてテストするというまでのプログラマーの負担が大きい。サッカーなどはこういうcellの中にある特定用のプログラムだけを書いていって、それをとにかく取り替えるという方法でつくっていくということでない、開発がほとんど無理というのがわれわれの実感である。

能動的状态遷移は予測である。しかし自分の態度が決まらなないと、実は予測というのはできない。複雑な世界では将来何でも起こり得るわけである。そうすると、たぶん主体が少なくともこういうことが起き得るだろうかというある程度の予測がないと何を観測して良いかも決まらない。つまり潜在的に観測すべき事象はほぼ無限にあって、

絞り込みが必要である。ここで要求されるのが限定合理性である。この場合、その予測が必ずしも正しい必要はない。予測しなければ観測すらできないのだから、逆に観測するためには自分の態度さえ決めてしまえば、それでよいのだということにもなる。サッカーでは何かある特定のプログラム群があって、これはとにかくパスを受けに走って行くようなプログラムだと思えば、他のことは見ないでもうそれだけを動かすというようにやっている。そういう意味では完全に思い込みだけで、もうずっと動いてしまうということも可能なシステムであるが、それでは予測がはずれていると悲惨な話になるわけで、やはり外界からのフィードバックは（予測によるバイアス付きでも）必要である。

この場合ソフトウェアによる割り込みをこの上で実現できる。割り込みを実現するには2つプロセスが走っていて、1つはメインのループで例えばドリブルに専念し、もう一方は例えばパスのルートが開いたかどうかを見ているものである。画像の処理の上に何かやってやらなければいけないから、これを割り込み専用ハードでこなすの

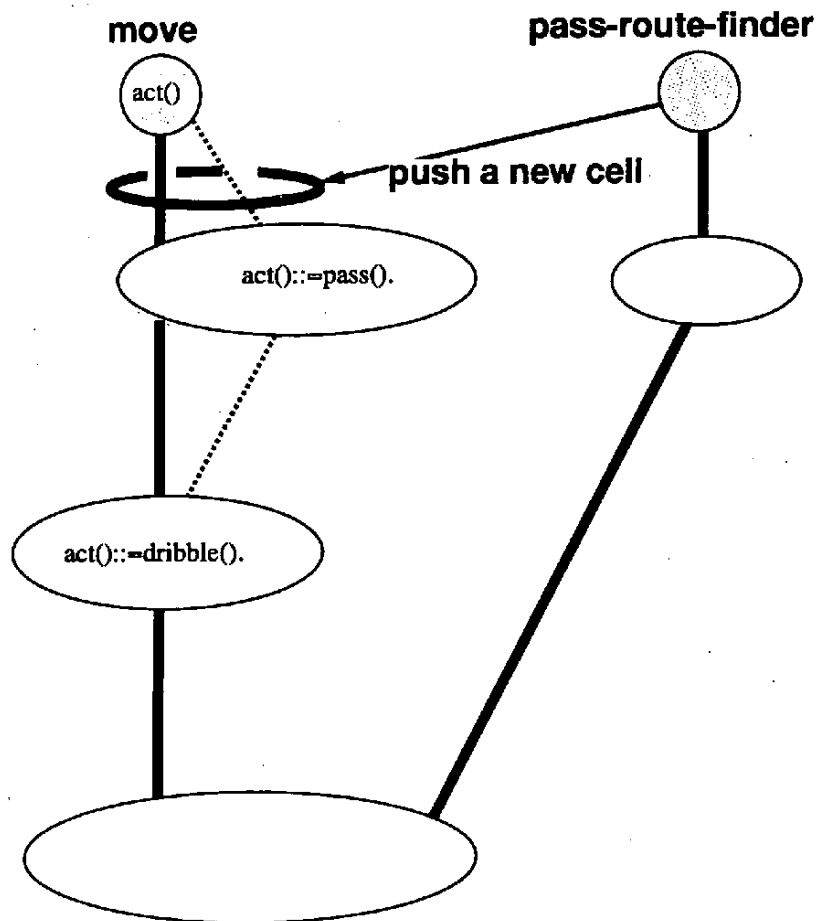


図 2.2-6 割り込み

は困難である。パスルートが開いたと思うと、強制的にパスするセルにつなぎ変える。元のプロセスでは何が起こったかわからないのだけれども、突然勝手にパスをしてしまうというようになる。図2.2-6では、moveプロセスは(act)を呼び続ける。この呼び出しは、セルを変えることにより、(dribble)から (pass)に変更できる。パスの方向の情報はmoveプロセスとfind-pass-routeプロセスの間で共通のセルに書き込むことによって送ることができる。この方式は'subject'[4]で示唆されているものに近い。

2.2.6 複雑系の設計

複雑系を設計・管理する手法を我々は残念ながら、いまのところ持ち合わせていない。そこで進化とか創発という手法が注目されている。知的なシステムを進化的に構築できるかという問いに対しては以下の二つの答を用意しなければならない:

1. (肯定的) 十分な時間があれば可能である。そもそも、人間という存在証明がある。
2. (否定的) 知的なシステムを選択するには長い時間が必要である。

問題は2である。現在のコンピュータで、例えば将棋を1手指すのに数秒から数分かかる。1局には1時間以上必要である。つまり強い将棋プログラムを進化的に作るとしたら1世代に1時間は必要なわけである。また、一般的に言ってかなり単純なシステムでも千くらいの世代交替が必要なことを考えると、将棋の強い(有段程度)プログラムを作るには少なくとも百万世代はかかるに違いない(根拠はないが)。だとすると100万時間=100年のオーダーが必要となり、可能ではあるが我々の生きている間には無理ということになる。

進化的に作るのが無理だとすると人為的に構成するしかない。そこで使える考えかたは何だろうか?

先のHavelのスケールの厚みの話に戻ろう。複雑なシステムは多くのスケールにおいて意味を持っている。しかもそれらはお互いに相互作用してはいるものの記述レベルとしては独立である。例えば木の構造について語るときに、葉にできるだけ日光が当たるように枝が配置されているという現象を細胞の構造のレベルや更に量子力学のレベルで語ることは不可能でないにしてもあまり意味があることではない。スケールに厚いシステムとは、それだけ多くの記述レベルを持つシステムのことであり、それらの記述を上下のレベルに還元することはあまり意味がない。

ここでは、このようなシステムを設計、プログラムする手法の出発点として有機的プログラミングを提案した。特に(ここでは詳しく述べないが)積層アーキテクチャ[9](図2.2-7)が有効であると考えている。これはBrooksの提案した服属(subsumption)アーキテクチャ[1]の拡張である。

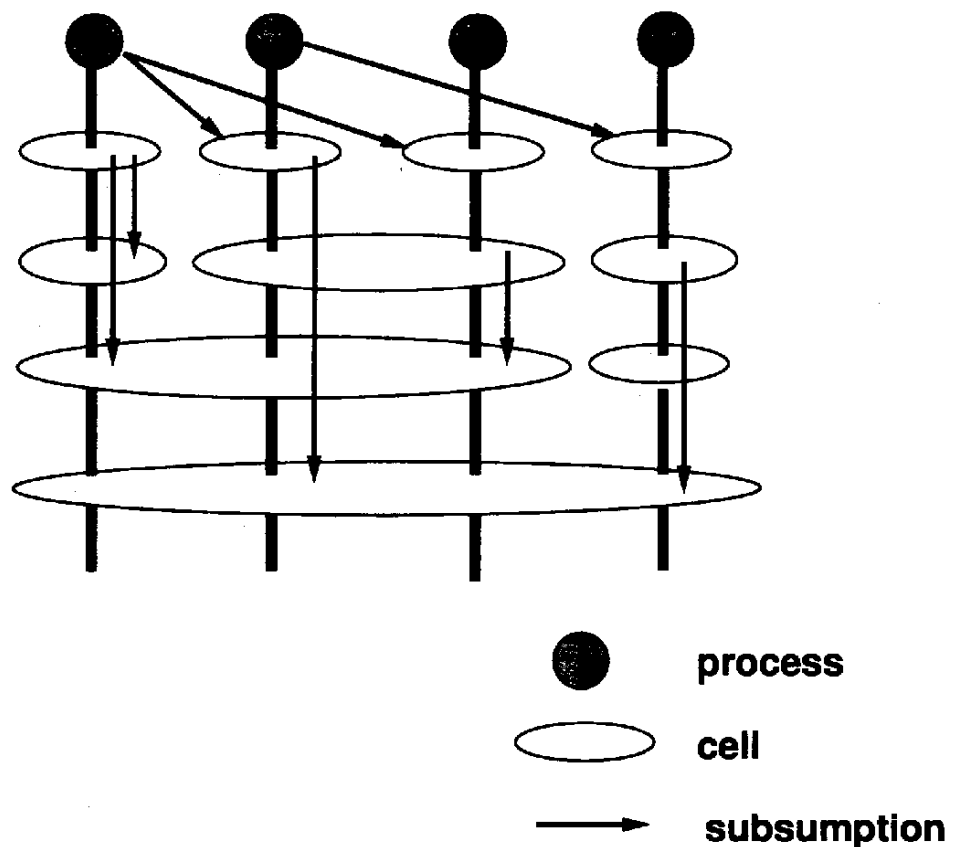


図2.2-7 積層アーキテクチャ

1. 機能単位の並列重ね合わせとして全体が構成される。⁵
2. 上位機能は下位機能を使って構成される。
3. 上位機能は下位機能の一部を置き換えることができる。
4. 上位機能の発動に失敗したときには下位機能が有効になる。

Brooksの服属アーキテクチャにおいては下位機能を司る回路に直接信号を流して、下位機能を抑止（subsume）する。が、積層アーキテクチャにおいては上位層で下位の機能をフィルタリングする点異なる。下位機能はそのままの形で残されるので4のようなことができる。これは上位機能が全く使われなかった場合のみではなく、使われて失敗した後にもバックトラックするように設定することが可能である。

しかしながら、多層のプログラミングの実現にはまだ遠いと感じている。今後の課題である。

⁵ Brooksは行動（behavior）による分割と呼んでいるが、行動とは外部に現れたもの（環境との相互作用の結果）を指すのが正しいと考える。

参考資料

- [1] Rodney A. Brooks. Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*, Vol.47, pp.139--160, 1991. (柴田 正良 訳. 表象なしの知能, 現代思想, 18 (3), 85--105).
- [2] Cooperative architecture project team. Gaea home page. <http://cape.etl.go.jp/gaea/>, 1996.
- [3] Ivan M. Havel. Artificial thought and emergent mind. In *Proc. of IJCAI 93*, pp. 758--766, 1993.
- [4] Takumi Hisano and Motoi Suwa. Synchronization and communication in the 'subject'. In *Logic Programming '85*. Springer-Verlag, LNCS 221, 1986.
- [5] H. R. Maturana and F. J. Varela. 河本英夫訳、オートポイエーシス. 国文社, 1991.
- [6] Marvin Minsky. A framework for representing knowledge. In Patric Winston, editor, *The Psychology of Computer Vision*. McGraw Hill, 1975.
- [7] 河本英夫. オートポイエシス・システム. 岩波講座現代思想 12, 生命とシステムの思想, pp. 123--157. 岩波書店, 1994.
- [8] 清水博. 自己組織現象と生命. 岩波講座現代思想 12, 生命とシステムの思想, pp. 71--120. 岩波書店, 1994.
- [9] 中島, 大澤, 野田. 有機的エージェントアーキテクチャ. 情報処理学会AI研究会, 1995.
- [10] 中島秀之. 情報統合のための有機的プログラミング. 人工知能学会誌, Vol.11, No.2, pp.27--34, 1996.
- [11] 木村敏. 心の病理を考える. 岩波新書, 1994.

2.3 複雑系としての認知と学習へのアプローチ

池上 高志 委員（東京大学）

はじめに複雑系の基本的なスタンス[1]を紹介し、具体的な問題として最近行っているお互いのモデルをつくりあうゲームプレイヤーのゲームの研究を紹介する。

2.3.1 複雑系としての理解

われわれが何かを説明し理解したとすると、その理解の仕方の背後には、好むと好まざるとにかかわらず、あるシステム論が横たわっている。例えば、時計を例にとってみると、時計を分解して、その仕組みが分かると考える背後には、個々の部品の集大成としてのシステムという考え、組み合わせ機械論的システム論が横たわっている。例えば、今の分子生物学の研究はこの機械論的なシステム理論に基づいているように思われる。このシステム論に基づくとなると、個々の部品の性能や他の部品とのつながり具合や組合せ方を調べるといったやり方で、細胞や遺伝の仕組みを見ていくために、細胞や遺伝の仕組みはずいぶんと「こみいった」機械になってしまう。

これに対して「複雑系として」考える際には、別のシステム論を用意する。それは各要素同士の相互作用を一意的には決められないような、相互作用に多義性を持たせたシステム論である。先の組み合わせ機械論的なシステム論が、システムを構成する要素とその相互作用の仕方をシステムの設計者が勝手に与えてやるのに対し、複雑系がもととするシステム論は、相互作用のあり方を内部的に決定させようとする。例えば、要素の相互作用は人間の自然言語のようなのだとすると、対象とするシステムで取り交わされるいくつかのことばや文章が、仮にシステムの外の人間にとっては同じであっても、内部的にその意味するものは同じではありえない。そのような外的に決め得ない相互作用をもとに、システムの動きを理解しようとするのが、複雑系としてのシステム論である。

誤解のないように付け加えておくと、こうしたシステム論は生氣論「生命現象には物理や化学の法則を超えた独自の原理や活力があるとする考え」とは異なる。われわれが生氣論を作りたくなるような対象（つまり生命そのもの）を研究するために、生氣論をベースとしてしまっただけでは本末転倒である。そのかわりに、相互作用の在り方がシステムの外からは一意的には決められないような（使い古された言葉ではあるが、有機的なあるいは柔らかい）機械論を考えているのである。したがって複雑系のシステム論とはオートマトン的な理解を越えることでもある。こみいったという意味での「複雑な」機械的分かり方と複雑系の分かり方は本質的に異なっている。

オートマトン的ではない理解においては、相互作用にはつねに「100%は決め得ない」といった恣意性が入り込むことになる。この恣意性の出現を、「身体性」という言葉で呼ぶことにしたい。なぜなら身体とは、われわれが対象を観測をするとき、われわれと対象を隔てる膜のようなものであり、インターフェイスとなるからである。もし

インターフェイスがなければ、つまり直接知り得ることが許されるならば恣意性はない。しかし、われわれは、自分の手で、目で、耳で、言葉で相互作用するしかない。特に言語という問題に関しては、言語という人工のインターフェイスを作りつつも、その言語を使って深刻な話者の主体的問題が紂ぎ出せるのは、むしろそのインターフェイスが恣意性を消すものではなくて保つからではないか、と考えさせられる。

複雑系の問題は、したがってこのインターフェイスの問題をいかに扱っていくかということに焦点が当てられる[2]。インターフェイスのもたらすこの恣意性は取り除いて考えよう、という考えが従来の分かり方の基本であったとすれば、むしろその恣意性を壊さずに扱って行こうというのが複雑系の分かり方である。そのような方向での研究を一つ次で紹介してみたい。

2.3.2 相手のモデルをつかってゲームするプレイヤーの問題

ここで考えるのは、単純なジレンマのあるゲーム、囚人のジレンマゲームである。囚人のジレンマゲームとは、相手が協調してくれないと非常な不利益を被ってしまう状況で、いかにして相互に協調するような状況が出現するかを考えるゲームである。

今までの研究では外から「良い」戦略を与え、その戦略をみんなが持つと他の悪い戦略ははびこらずに協調性が獲得できるという形で議論されてきた。

囚人どうし相手がどう答えるかわからない状況で、囚人は自白するかしないかという選択をしなくてはならない。もし、自分が自白して相手が自白しなければ自分の罪はもっとも軽く、相手は重い罪に問われる。両方とも自白すれば割と重い罪、両方とも自白しなければ2番目に軽い罪を受けるだけである。したがって囚人は仲間が自白するのなら自白すべきだし、自白しないのなら自白しない、といった心の葛藤（ジレンマ）が生じる。この囚人のジレンマゲームを形式化すると、このジレンマ状況は下のような利得行列図2.3-1で与えることができる。ここで、「自白する」は裏切り、「自白しない」は協調と呼ぶことにする。

1回だけこのゲームを行い、かつ相手と事前に相手と情報交換できない場合には裏切るのがこのゲーム理論で定義される「合理的戦略」である。この解決はゲーム論的には正当化されるかもしれないが、悲劇的なものである。しかし現実にはゲームは1回だけ行われるわけではなく、何度も繰り返して行なわれる。

友人との待ち合わせや、銀行からの融資、各種交通規則からはじまって、およそ社会的常識や共同体の慣習など多くの場合が繰り返しのあるジレンマゲームである。そして多くの場合に、協調的振舞いが出現するのも事実である。これは繰り返しの生む協調性といわれている。それはゲーム論的に考えても繰り返すことで相互に協調する解があると信じられている。それは例えば、ゲームを繰り返すと、前に裏切ったやつは次回に復讐されるために協調を余儀なくされる。といった理由によると考えられている。

	協 調	裏切り
協 調	$R = 3 \setminus R = 3$	$S = 1 \setminus T = 4$
裏切り	$T = 4 \setminus S = 1$	$P = 2 \setminus P = 2$

図 2.3-1 囚人のジレンマの例

両者がともに協調した場合は双方に R 、両者とも裏切った場合は双方に P 、一方が協調し他方が裏切った場合は、協調した方に S 、裏切った方に T の利得を与える。各利得 T, R, P, S は $T > R > P > S$ および $R > (T + S)/2$ を満足するようにとすることで、ジレンマ性が表現される。

この問題に関し R. Axelrod[3] は計算機上で繰り返し囚人のジレンマ・ゲームのトーナメントを計算機の中で行った。2 回の総当り戦のトーナメントに参加したプログラムのうち、優勝したのは Tit for Tat (以下 TFT と略す) という非常に簡単なプログラムであった。TFT という戦略はしっぺ返し戦略であり、単純に前回の相手の手を繰り返すだけである。この戦略は相手を出し抜いて裏切り続けることはないので、大きく勝ち越すことはない。しかし同時に相手に出し抜かれて大きく負け越すこともない。これが TFT を勝利へと導いたのである。

しかし現実においては、われわれは相手の心のうちを考え、その相手のモデルをもとに行動する。そのときに TFT という戦略を使うことに落ち着けるかという問題がある。そこでわれわれ (池上と泰地[4][5]) は計算機の中で、相手のモデルを再帰的なニューラルネットで作製、そのモデルに対して仮想ゲームを行なってから、最良の次の自分の手を決めるというプレイヤーのシミュレーションを行った。

ここでは、ゲームを行って相手のモデルを作らなければならないという。ゲームをすることが相手とのコミュニケーションという意味で、ゲームがインターフェイスとなっている。

まずこちらのモデルを予測しない固定型の戦略に対しては、その戦略が確率的な戦略であっても自由度があまり大きくない再帰的ニューラルネットを用いても、正確にモデルを構成することができることが示される。問題は相手もこちらのモデルをつくりゲームをする場合である。この場合には双方が相手のモデルをつくりあってゲームをして行く中で、相手の複雑なモデルがつくられていく。しかしそのゲームの軌道 (協調したり裏切ったりの時系列をゲームの軌道と呼ぶ) は、ほとんどの場合相互裏切り状態へと引き込まれていく。相手のモデルの複雑さは、それが有限オートマトンとして記述されえない度合であるし、またモデルを構成しえなかった度合である。つまり相手のモデルをつくれなかったということがシステム全体の挙動を不安定なものとしていると考えられる。このシミュレーションは完全に決定論的なダイナミクスに

もかわらず、ランダムな指し手の時系列を生み出すが、それはモデルの複雑さ、つまりモデルのつくれなさの反映と考えられる。

この「モデルのつくれなさ」をより追求するために、モデルの決定に有限の精度を与えてみる。すると有限の精度のためにモデル決定に恣意性が生まれる。そのようなモデルの決定の恣意性が生じるのは、有限の手数から相手のモデルを構成しなくてはならないからである。もしこのときどのモデルを選択するかで次に打つ手（この場合協調するか裏切るか）の予測が同じであれば、その恣意性は問題ではない。しかし予測が異なる場合はモデル選択が重要となる。

そこで、この恣意性がゲームの進行をどのように変化させるかを解析する。具体的にはモデルを構成する際に有限な精度の下で許される可能なゲームの軌道の束がどのようなになるかを論じることになる。そうすると、相手に対し「協調すれば協調してくれるけど、裏切ると裏切る」というモデルを構成する軌道が生まれ、結果として相互協調を学習するようなゲームの軌道が多く、相互裏切りの軌道の中に複雑に埋め込まれていることが分かってきた。

2.3.3 おわりに

ここで見た相互作用というものを固定されたものと見なししてしまうのではなく、それを観測行為とみなす[6]ことでモデルのつくりかたやそのモデルをもとに解析することはいろいろと変わってくる。例えば、谷 [7]はセンサー付きのロボットに再帰的ネットワークを搭載し、迷路の中を迷路のモデルを構成しながら迷路を学習していく実験を行っている。そこで見られるのは単一の迷路のイメージが収斂していくという学習ではなく、いかにその学習が不安定であるかに重点が当てられている。

今後このような研究が進んで行くことで、認知や学習の問題において目標関数に収斂させたりすることではなく、そこからの揺らぎ、いかに収斂しない状態を保つか、といった事とともに、Batson [8]のいう2次学習といった問題にまで焦点が当たった認知の仕組みの解明が期待される。それを複雑系としての認知、学習の問題と位置づけたいと考えている。

参考文献

- [1] ここで紹介する複雑系の考えについては、池上高志、金子邦彦: 生命の複雑系的シナリオ、(仮題)、朝倉出版 (近刊) を参照のこと。
- [2] 池上高志、「複雑系の科学とは何か～進化・認知・言語・運動をめぐる不思議を探る」(ニュートン1997年、9月) pp.49-61
- [3] JTB2.tex:Axelrod, R., *The Evolution of Cooperation*, Basic Books, NewYork (1984).
- [4] Taiji, M. and Ikegami, T., *Dynamics of Internal Models in Game Players* (presented at the 4th

European conference on Artificial Life, 1997 July, Brighton).(preprint, submitted to Physica D.)

[5] Ikegami, T. and Taiji, M., *Epistemic structures of players and Stability of world bifurcations in Game players* (in preparation).

[6] 例えば、郡司ペギオ幸夫氏の「現代思想」に連載されている一連の論考を参照。

[7] Tani, J., *Model-Based Learning for Mobile Robot Navigation from the Dynamical Systems Perspective*, IEEE Trans. System, Man and Cybernetics Part B, Special issue on learning autonomous robots, vol.26, No.3, (1996) pp.421-436.

[8] Bateson, G. /Mind and Nature: A Necessary Unity/ (John Brockman Assoc. 1979).

2.4 相互作用する単純な部品集団として捉えた複雑系

稲吉 宏明 委員（電子技術総合研究所）

はじめに、複雑系に対する問題意識（2.4.1）を記した後、筆者の複雑系関連の最近の研究例2つ（2.4.2 と 2.4.3）を紹介する。

紹介する研究例の1つは「ランダムな粒子集団内での時間的秩序の創発」、もう1つは「neuronoid（神経細胞もどき）と名付けたモデル」である。

なお、本稿の記述は筆者の諸発表論文から部分的に転載していることをはじめにお断りしておく。

2.4.1 複雑系に対する問題意識

複雑系の捉え方は人により異なると思われるが、筆者は複雑系を「相互作用する単純な部品集団」として捉えている（図2.4-1）。

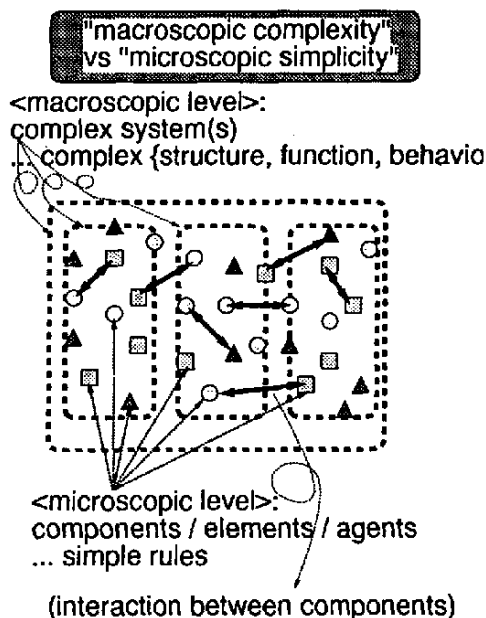


図2.4-1 複雑系を「相互作用する単純な部品集団」として捉える

即ち、系を構成する部品集団の部品個々の振舞いは「単純な規則／規則集合」として記述できるのだが部品集団全体＝系の振舞いは「複雑≡予測不能」となる系を複雑系と見做す。

上記の捉え方をしてどのようなご利益があるかが問題となるが、最大のご利益は「人工知能への新たな方法論の提供」にあると筆者は考える。つまり、知能を「神経細胞を基本部品とした部品集団系で創発する性質」と見做すことにより従来の記号論的（シンボリック）AIとは異なる方法論が構築できるのである（ただし、従来の人工

ニューラルネット研究は、部品＝ニューロンが「単純過ぎ」のため、そのニューロン集団は「複雑系」に至っていない、と筆者は考える)。

ここで、生物の脳／神経系を複雑系と見做すと以下のように捉えられよう：

◆ 複雑系と見做した生物の脳／神経系

神経細胞集団全体としてみると、調和して、脳／神経系の機能が創発されているが、神経細胞個々は、「全体とは無関係に、自分がおかれた局所的環境に《盲目的／機械的に》反応する」に過ぎない。

この「反応規則」が、偶然「細胞集団全体の調和」につながる個体は生存競争で有利になり生き残ったが、神経細胞個々は、「全体の役に立とう」とか「全体を支配しよう」とかの「意図」はない。

生物脳の部品である神経細胞個々は、「各自の持つゲノム（＝遺伝子集合がつくるプログラム）」に従い《盲目的に》

- 細胞分裂／細胞死する、
- 軸索を延ばす／壊す、
- シナプスを作る／壊す、
- シナプス重みを増やす／減らす、
- 細胞間伝達物質を放出する、

等の動作をしているにすぎない。どの動作（応答）を行なうかは、

- (1) 細胞外部からの信号(=入力)
- (2) 細胞内部の内部状態
- (3) ゲノム

の3つで決まる。

筆者の最大の研究目標は上記の脳／神経系の捉え方に基づき神経細胞を基本部品として設計し、基本部品集団の相互作用を通じて「脳／神経系のように振舞える系」を創発させること、であり、2.4.2、2.4.3に示す研究例は、上記の目標を視野に入れたものである。

2.4.2 研究例紹介(1)：「ランダムな粒子集団内での時間的秩序の創発」[1][2]

(1) はじめに

一般に細胞は複数の遺伝子を持つが、それらは常にオン状態にあるわけではなく、「必要な時はオンに、不要な時はオフに」することにより、有限な物質資源を有効利用している。このオン／オフをもたらす仕組みは、遺伝子スイッチ[3]と呼ばれており、人間を含めた大部分の生物の示すサーカディアンリズム（遺伝子産物の約1日周期の量的変動）とよばれる現象にも遺伝子スイッチが関与していると考えられている[4]。

本項では、人工的に設定された化学系において人工的な遺伝子スイッチを導入することにより、盲目的に動作する物質集団に量的リズム変動が創発したので、これを紹介する。

(2) '遺伝子スイッチ'について

図2.4-2に示すように、1つの遺伝子は1つのif-then ruleと見做すことができ、多くの場合、他遺伝子産物により活性化／抑制の調節作用を受ける。この調節作用がスイッチに相当する。

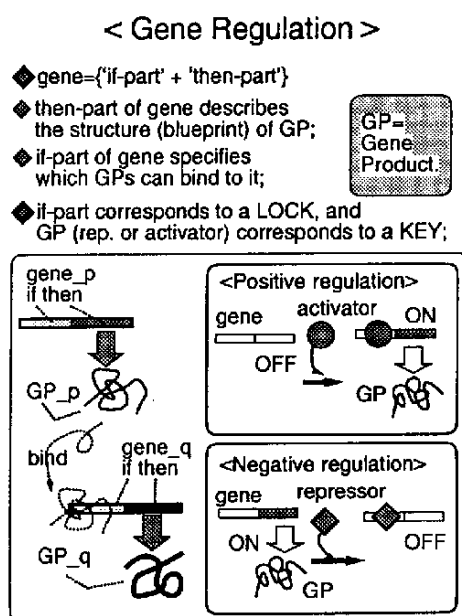


図2.4-2 遺伝子の「発現調節」

(3) '人工化学系'モデル

このモデルとして、次の4項目を設定した：① 部品（粒子）、② 空間、③ 反応規則、④ 振舞い規則。以下で、これらについて順に説明する。

① 《部品（粒子）》：

● 系は、(1) 5種類の粒子 {g,e,f,d,b} および、(2) 2つの遺伝子 ('E','F') とそれらの遺伝子スイッチをもつ DNA (図2.4-3 参照) の2つで構成される。

● 粒子に関しては、粒子 → 分子 → 高分子といった階層構造が形成可能とする (図2.4-4)。

(分子Eは「 α 個のe粒子」で構成され、分子Fは「 β 個のf粒子」で、分子Gは「 γ

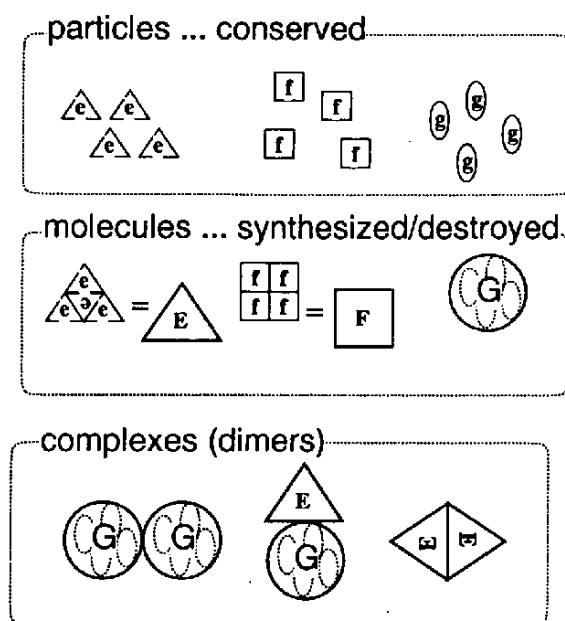


図 2.4-3 粒子→分子→高分子の階層構造

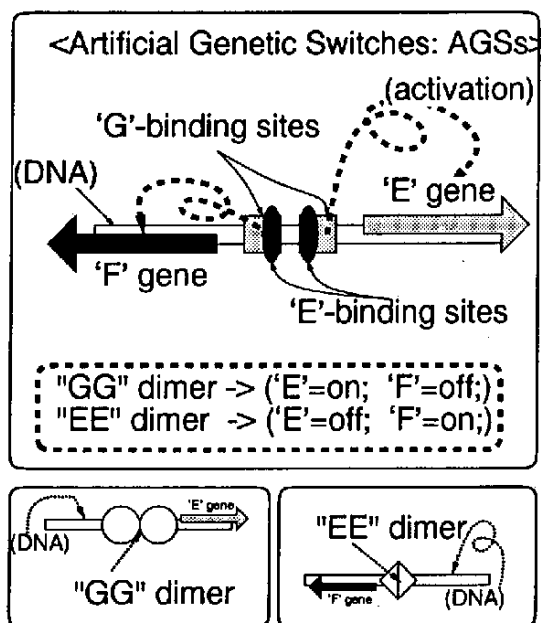
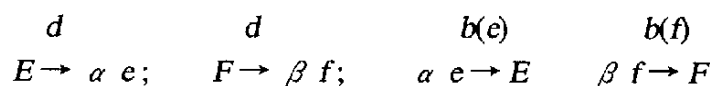


図 2.4-4 人工的遺伝子スイッチ

個の g 粒子」で構成される。また分子 G, E は 2 量体分子 ' GG ', ' EE ', ' GE ' を形成でき、' GE ' は ' GG ', ' EE ' より安定 (= できやすい) と仮定する。)

● ' d ' ("destroyer") 粒子は、分子 E, F の「分解を触媒」し、他方 ' b ' ("builder") 粒子は、分子 E, F の「合成を触媒」する (次式参照)。



★'b'粒子は、{ b(), b(e), b(f) }の3状態のいずれかにあり、この状態に応じて触媒能力が変わる（生物の「リボソーム+mRNA」に相当）。

★すべての粒子は保存される！すなわち、粒子は消滅しない。◆ $N(X)$ で「粒子（or 分子）Xの粒子数（or 分子数）」を示し、 $\dot{N}(X) = (d/dt) N(X)$ と表すと、 $\dot{N}(g) = \dot{N}(e) = \dot{N}(f) = \dot{N}(d) = \dot{N}(b) = 0$ である。 $\dot{N}(G) = 0$ と仮定するが、 $\dot{N}(E) \neq 0$; $\dot{N}(F) \neq 0$;である点に注意。

②《空間》：

①で設定された各{粒子／分子／2量体}は、図2.4-5のような格子空間の1格子内に存在し、③に示されるように、確率的に隣接格子に移動したり、他{粒子／分子／2量体}と衝突（可能な時は、確率的にさらに反応）する（ただし、DNAのみは移動せず、常に同図の原点位置に存在すると仮定）。

③《反応規則》：

'GG', 'EE'のいずれか1つのみがDNAに結合可能とする（図2.4-4、図2.4-6参照）。

★'b'粒子が、DNAと衝突すると、次のような状態変化を起こす（※生物の「遺伝子転写」に相当！）

(1)'GG'がDNAに結合中ならば、 $b(*) \rightarrow b(e)$;

(2)'EE'がDNAに結合中ならば、 $b(*) \rightarrow b(f)$;

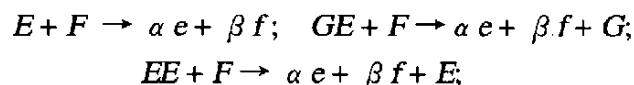
(3)上記以外の場合は、状態変化なし。

（ただし、 $b(*) \in \{b(), b(e), b(f)\}$ ）（図2.4-4参照）

★ $b(e)$ 粒子は、 α 個に達するまで衝突したe粒子を蓄積し、達した際には、1つのE分子を放出し、もとの $b(e)$ 粒子に戻る。また、 $b(f)$ 粒子は、 β 個に達するまで衝突したf粒子を蓄積し、達した際には、1つのF分子を放出し、もとの $b(f)$ 粒子に戻る（図2.4-7参照）。

（※これらの過程は、生物の「遺伝子翻訳」に相当し、生成されるE分子/F分子は、「遺伝子産物」（蛋白質）に相当する）。

★F分子は「カミカゼ」的に、（2量体中の分子も含めて）E分子を分解する：



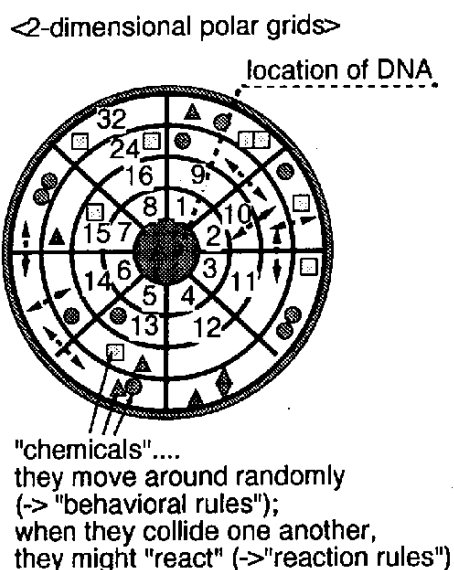


図 2.4-5 2次元極座標格子

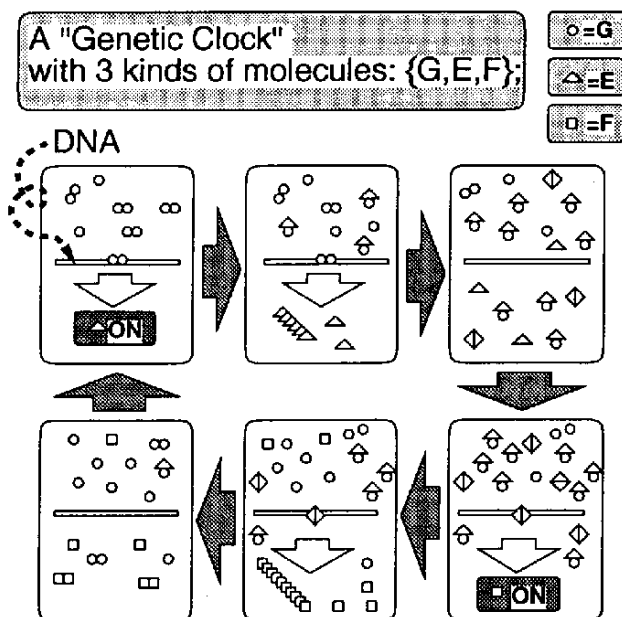


図 2.4-6 分子{G, E, F}による時計サイクル

Molecular synthesis by builders
... cf. "translation process" in nature;

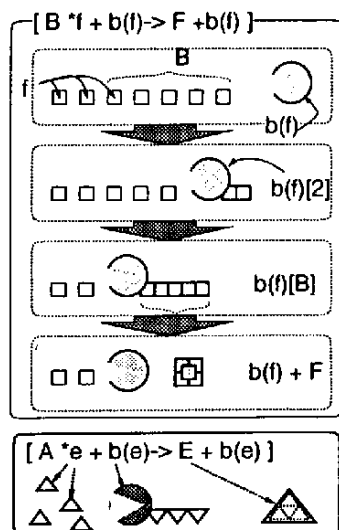


図 2.4-7 b粒子による分子合成

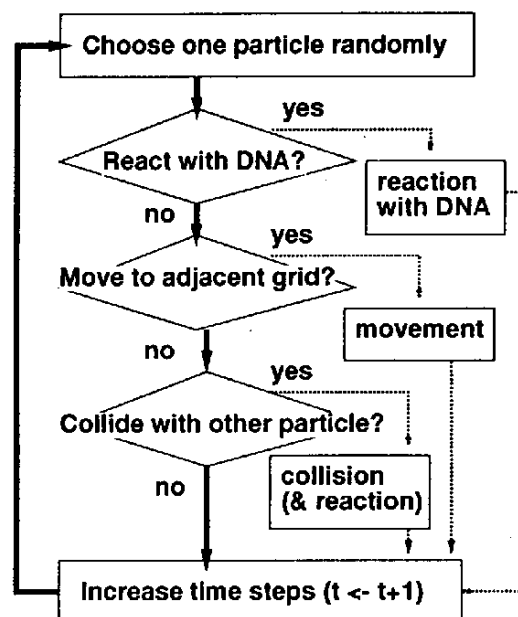
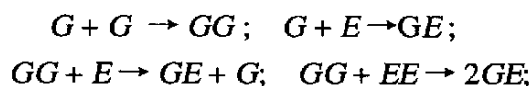


図 2.4-8 振舞いを示すフローチャート

●G分子は、G分子と衝突すると2量体:GG分子を形成し、G分子/GG分子は、E分子/EE分子と衝突するとより安定な2量体:GE分子を形成する:



④《振舞い規則》:

基本的には、各時間ステップにおいて、ランダムに1粒子を選び、その粒子(分子に属している時はその分子)に対して、

- (1) DNAと相互作用可能であれば、DNAに衝突&反応、
- (2) 隣接格子に移動、
- (3) 同一格子内の他粒子/分子と衝突し、反応可能な時は(確率的に)反応する、
- (4) 何もしない、

のいずれかを行なう、というプロセスを反復する(図2.4-8参照)。

(4) 実験結果:リズムの創発

図2.4-9に実験結果の例を示す。(同図は{g, e, f, d, b}の各粒子数:{1400, 2800, 1400, 100, 400}の計6100粒子の系(ただし $\alpha=\beta=\gamma=7$)での結果で、横軸に時間、縦軸に2量体分子数をプロットしたもの)2量体分子数について、周期的な時間変動(リズム)が創発していることがわかる。

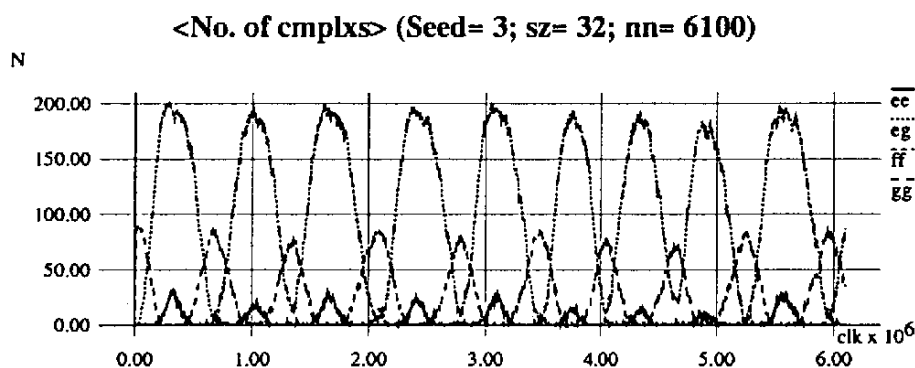


図2.4-9 実験結果の例

(5) おわりに

本項では、比較的単純な反応規則&振舞い規則を設定された保存粒子系において、「各粒子は盲目的に移動や衝突(&反応)を反復しているに過ぎない」にもかかわらず、「系全体では時間的秩序(分子数の周期変動)が創発」する現象を紹介した。

2.4.3 研究例紹介(2):「neuronoid(神経細胞もどき)と名付けたモデル」[5]

(1) はじめに

知能や意識は、神経細胞集団の相互作用により創発する性質であると考えられる。筆者は現在“neuron-oid”（＝神経細胞もどき）と名付けた研究に取り組んでおり、この研究では部品としてneuron-oidを設計し、この部品集団（＝neuron-oid系）での相互作用を通じて人工的な知能／意識の創発を目指している。本項では、neuron-oid 研究の第1報として発火現象を創発させるためのneuron-oidの設計を紹介する。

(2) neuron-oid研究の方針および意義

従来の人工ニューラルネット研究では基本素子であるニューロンの振舞いが「あらかじめ方程式で」与えられている。これに対し、本研究では基本素子の振舞いがその下位部品である「レセプタやイオン&イオンチャネル」の集団的相互作用から創発するモデル（neuronoid）を構築している。

つまりneuronoidにおいては、各部品（イオンやイオンチャネル）の「振舞い／状態遷移規則」を設計するのみで、誤差逆伝搬式やシグモイド関数等の数式を利用しない点を特徴としている。

（学習規則は「LTP, LTD等のシナプス可塑性」に対応する「部品の（状態遷移）規則」で実現可能）各部品の設計においては、「生物ニューロンのお手本」を参考にするものの[6]、

- ・必ずしも生物にあるものすべて持ち込む必要なし
- ・「生物にない部品」の導入（仮想進化）可能

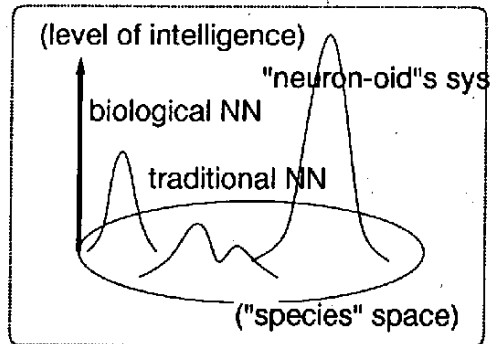
という利点がある。この後者の利点により、neuron-oidの潜在的可能性として「現実生物が到達していない高レベルの知能実現」が考えられる。（図2.4-10参照）

(3) neuron-oidの発火現象について

神経細胞の発火現象（細胞内外のイオン濃度の変化現象）は神経系活動の基本であることから、この現象の構築をneuron-oidのスタートとした。

発火モデルの概念的説明を図2.4-11に示す：

まず、(1)「伝達物質＝（neuro）transmitter」が放出され、(2)伝達物質が「レセプタチャネル」に作用することによりチャネルが開き、(3)イオンが流入可能となる。(4)流入したイオンが内側から「イオンチャネル」に作用することにより、チャネルが「閉→開」状態遷移し、(5)自己増幅的にさらにイオンが流入可能となる。(6)流入したイオンは「イオンポンプ」により細胞外部に送られ、もとの「濃度差」が回復する。



Advantage of "neuron-oid"s
... without equations: only rules!!

-> easy to EXTEND !
(e.g. {adding / deleting /
substituting} the component(s):
cf. "neural evolution".)

図 2.4 - 1 0 neuron-oid の潜在的可能性

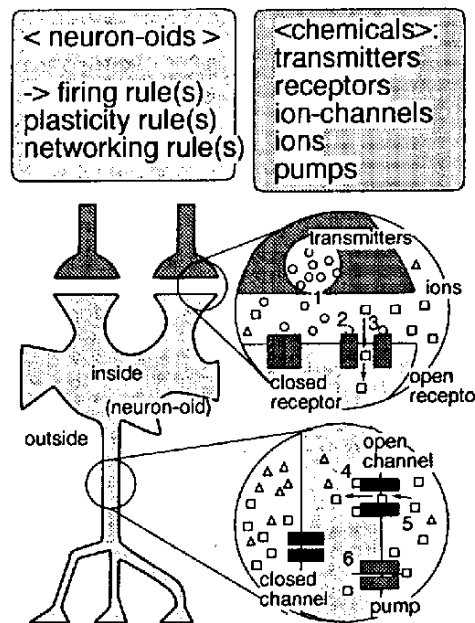


図 2.4 - 1 1 neuron-oid 発火の概念的説明図

(4) 'neuron-oid'モデル

このモデルとして、次の4項目を設定した：① 部品、② 空間、③ 状態遷移／反応規則、④ 振舞い規則。

①《部品（粒子）》：

系は6種類の部品{I, P, C, T, R, U}で構成される（図2.4-1 1 参照）。

- (1) I = Ions (A^+ , B^- の2 types);
- (2) P = Pumps (各ion別);
- (3) C = (ion) Channels (各ion別);
- (4) T = (neuro) Transmitters (興奮性&抑制性);
- (5) R = Receptor-channels (各ion別 & 各T別);
- (6) U = Uptakers of T's (各T別);

・上記の(1) & (4)は「ほぼ自由に空間移動可能」で、他方(2), (3), (5), (6)は「不動部品（＝細胞膜上に存在）」だが「内部状態」を持ち、この状態遷移が前者（特に(1)）の移動時の「動的境界条件」を与える！

→「移動体」は「不動体の状態変化」を起こし、「不動体」は「移動体の移動制約」を与える。（＝移動体&不動体の相互作用）

・(4)は「生成（＝外部入力／前細胞発火による）&消滅（＝Uと衝突時）」有りだが、(4)以外は「保存される（＝消滅しない）」。

②《空間》：

3次元格子空間($W \times H \times D$)内に($w \times h \times d$)の「直方体状」にneuronoidの境界＝細胞膜を存在させる。この膜上に「不動部品」が配置される。

③《反応規則》：

図2.4-1 2と図2.4-1 3参照。イオンポンプに関しては、 A^+ -pumpは A^+ -ionのみを選択的に、 B^- -pumpは B^- -ionのみを選択的に移動させる。Prob(in)で「流入確率」Prob(out)で「流出確率」を示せば、「排出型ポンプ」では、

$$Prob(in) \ll 1; Prob(out) \doteq 1$$

「吸収型ポンプ」では $Prob(out) \ll 1; Prob(in) \doteq 1$ である。

④《振舞い規則》：

基本的には、各時間ステップにおいて、ランダムに1イオン（または1伝達物質）を選び、それに対して、

- (1) ランダムに選んだ隣接格子に移動、
- (2) 移動時に細胞境界を通過する場合は、ランダムに同境界中の「不動部品」を選び、同部品と（可能ならば）確率的に相互作用（不動部品の状態遷移&自分の移動）する、
- (3) 何もしない、

のいずれかを行なう、というプロセスを反復する。
 図 2.4-1 4 に期待される定性的振舞いを示す。

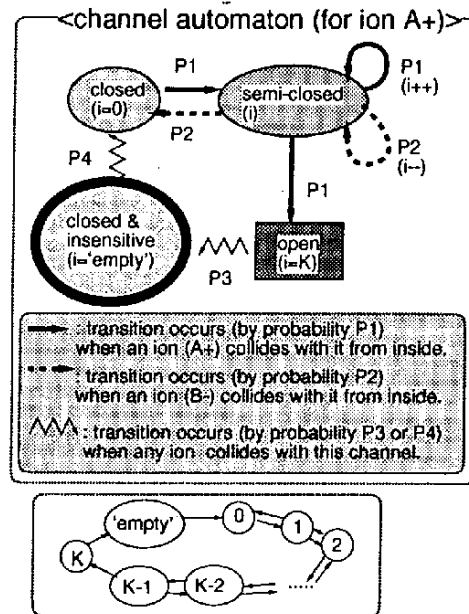


図 2.4-1 2 イオンチャンネルの状態遷移図

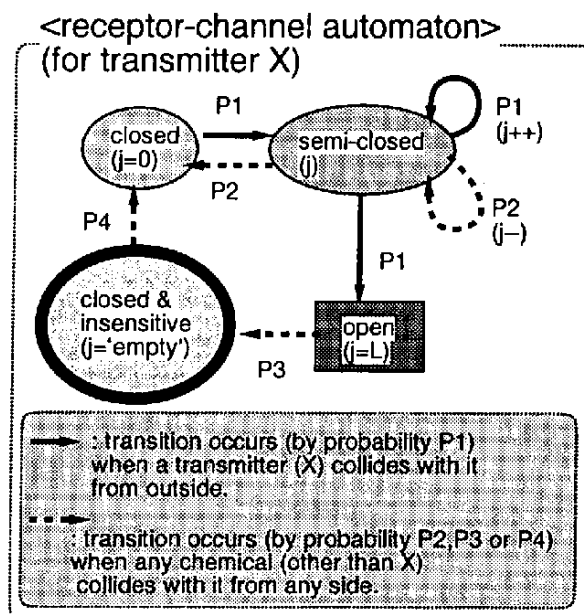


図 2.4-1 3 レセプタチャンネルの状態遷移

<expected firing events of neuronoid>

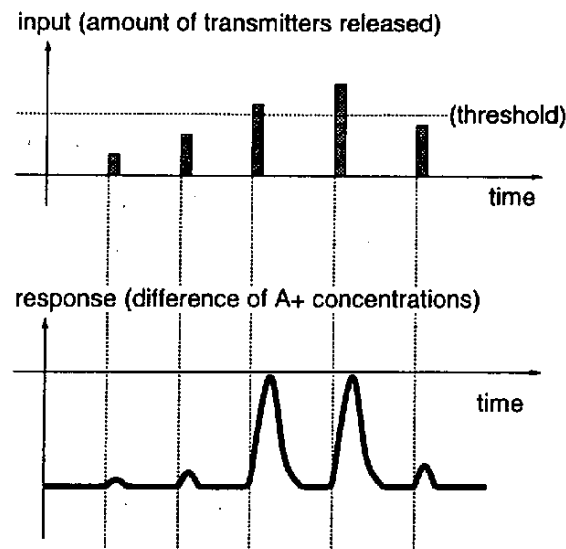


図 2.4-14 期待される定性的振舞い

(5) おわりに

本節では、比較的単純な反応規則&振舞い規則を設定された部品集団において各部品は盲目的に移動や衝突（&状態遷移）を反復しているに過ぎないにもかかわらず、マクロレベルでは神経細胞の発火現象的振舞いの創発が期待されるモデルを紹介した。

参考文献

- [1] 稲吉宏明, 情報処理学会第54回全国大会 (1997)
- [2] Inayohsi H., Iba H. "Rhythms emerge in a collection of 'blind' chemicals by the use of 'Genetic Switches'" in "Genome Informatics 1997", Universal Academy Press, pp.71-79, (1997)
- [3] Ptashne M. "A Genetic Switch: Gene Control and Phage λ ", Blackwell Scientific Publications, (1987)
- [4] Barinaga M.: "New Clock Gene Cloned", *Science*, V.270, pp.732-733 (1995)
- [5] 稲吉宏明, 情報処理学会第56回全国大会 (1998)
- [6] Shepherd G.M. "Neurobiology (3rd ed.)", Oxford Univ. Press, (1994)

2.5 複雑性と制約

橋田 浩一 委員 (電子技術総合研究所)

2.5.1 中国語の部屋

ひとりのアメリカ人が密室の中におり、この人はアメリカ人の常として英語以外の言語をまったく理解できず、当然ながら中国語もさっぱりわからないものとする。そこにはまた、大量の中国語の文書と、中国語に関する形式的な操作の仕方を英語で記したマニュアルがあるとしよう。ここで「形式的」であるとは、それらの操作の定義が、データ(漢字や漢字列)の意味に関係なく、単にその形式(漢字の形や漢字列中の順序)のみに基づいているということである。したがって、中国語が全然わからない人でも、マニュアルに従って漢字列を操作することができる。中国語の文書も英語のマニュアルも、それぞれ2つの部分からなる。マニュアルの第1の部分は、中国語文書の第1の部分と第2の部分を照合する仕方を述べたものであり、マニュアルの第2の部分は、新たに与えられる漢字列に応じてさらに別の漢字列を作り出す仕方を述べたものであり、部屋の中の人はいくつかの事情を了解している。しかし、中国語文書の2つの部分がそれぞれ「スクリプト」および「物語」と呼ばれていることや、マニュアルの2つの部分がそれぞれ「スクリプト照合プログラム」および「質問応答プログラム」と呼ばれていること、さらには、新たに与えられる漢字列が「質問」、それに応じて自分が作り出す漢字列が「質問に対する回答」と呼ばれていることなどは知る由もない(「スクリプト(script)」とは、シャンク(R. Schank) [15]が提案した概念で、世の中の出来事の典型的なパターンに関する知識である。スクリプトに基づいて物語を理解する研究が行なわれている)。

さて、スクリプトやプログラムが十分周到に書かれており、部屋の中の人があるプログラム通りに漢字列を操作するのに十分習熟しているならば、物語に関する質問に対して、この人は、中国語の母語話者による回答と寸分區別できないような回答を作り出すことができるだろう。一方、英語で書かれた物語を渡されてそれに関する質問を英語で受けた場合も、部屋の中の人はいくつかの英語の母語話者らしく回答できるはずである。ここで重要なのは、中国語の場合の受け答えと英語の場合の受け答えとが同様にもらいたいにもかかわらず、英語の場合と違って、中国語の場合には、この人は単に形式的な操作しかしておらず、意味をまったく理解していないということである。

以上は、サール(J. R. Searle) [16]が考案した「中国語の部屋 (Chinese room)」という思考実験である。これに基づいてサールは、コンピュータが人間のように自然言語を理解することは不可能だと主張する。自然言語理解のプログラムがやっている計算は中国語の部屋の中にいる人が行なっている文字列の操作と本質的に同じであり、この人は中国語をまったく理解していないから、コンピュータも(中国語だろうと英語だろうと)自然言語をまったく理解していない、というわけである。この議論は自然言語処理以外の領域にも拡張可能であり、人工知能一般にあてはまる。サールの主張は要するに、意味論的解釈は理論家の頭の中にしかなく、意味の理解は形式的操作か

らは生じない、ということになる。

サールは中国語の部屋の議論に対する代表的な批判をいくつか取り挙げてそれらに反論している。まず、部屋の中には、人間の他に中国語の文書やマニュアルやその人が漢字列を操作する際に使う計算用紙があり、人間だけでなくこれらを含む部屋全体のシステムが理解しているのだ、という批判（システム説：the systems reply）がある。これに対してサールは、その人が中国語の文書やマニュアルの内容を全部暗記し、計算もすべて暗算で行なったとしても、やはりその人が行なうのは無意味な記号操作であり、理解ではないと言う。また、入出力を通じて環境と適切な因果関係を持つことにより、コンピュータもしかるべき意味論を持ち理解に達し得る、という批判（ロボット説：the robot reply）もある。これに対してサールは、ロボットの中に中国語の部屋と同様の部屋をしつらえ、中国語の文書とマニュアルをロボットの制御プログラムに置き換えてみれば、やはり理解が成立しないことがわかると言う。

2.5.2 計算主義

中国語の部屋に関連する論争は、他の種類の批判も含めて多岐にわたるが、このテーマと直接関係がないので割愛する。以下では、サールの議論に対する別の種類の批判を提出することにより、ここでの議論の主題に入る契機としたい。その批判とは、木を見ても森は見えないという趣旨のものである。

サールが否定しようとしている、形式的操作から意味や理解が生ずるという考え方は、古典的な人工知能または認知科学の指導原理である計算主義（computationalism）の核心をなす作業仮説である。また、これに関連して、計算主義においては、図2.5-1に示すように、知能は3つのレベルから構成されると考える[9][13]。レベル（水準；level）とは記述の粒度であり、レベルが高いとは、より抽象的・巨視的だということを意味する。最も高いレベルは、信念、欲求、意図などの、素朴心理学（folk psychology）の用語で記述できるレベルであり、意味の理解はここで成立する。これを、ピリシン(Z. W. Pylyshyn)は意味レベル（semantic level）と呼ぶ。マー(D. Marr)の言う計算理論のレベル（level of computational theory）--- 脳が解くべき問題（WHAT）あるいは脳による情報処理の目的（WHY）のレベル --- は意味レベルを含むと考えられる。また、ギブソン(J. J. Gibson)の言うアフォーダンス（affordance）[5]も意味レベルまたは計算理論のレベルにおける事象と思われる。一方、中国語の部屋の中の人が携わっている計算は、ピリシンの言う機能レベル（functional level）、つまり、生体の神経系の中に符号化されたデータ構造とそれに対する形式的操作のレベルに属する。これは、マーの言うアルゴリズムのレベル（level of algorithm）--- 脳が計算理論を実行する方法（HOW）に関するレベル --- に対応する。最も低い記述のレベル、すなわち、物理的・生理学的現象のレベルを、ピリシンは物理レベル（physical level）と呼び、マーはハードウェア実装のレベル（level of hardware implementation）と呼ぶ。

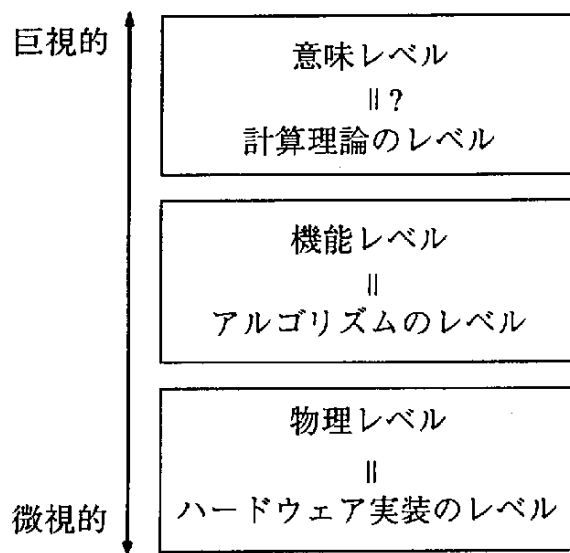


図2.5-1 知能を構成する3つのレベル

人間が普通に自然言語を理解するような仕方で中国語を理解するには、意味レベルを認識する必要がある。ところが、中国語の部屋の中の人々が認識しているのは漢字の列に対する形式的操作のレベル（機能レベル）の事象であるのに対し、中国語の意味内容は、それらの操作が全体として形成する巨視的なパターンに相当するものと考えられる。この人は、漢字列の形式的操作に関しては正しく理解しているが、それは中国語の意味内容に関する理解を含意しない。部屋の中の人々が中国語を理解しているかのように部屋の外から見えるとすれば、意味レベルにおける理解がどこかで成立している可能性があるが、そのレベルが部屋の中の人によって認識される必然性はない。システム説への反論の中でサールが言うように、漢字列の操作に関するマニュアル等の内容をすべてその人が暗記してしまえば、理解はもちろんその人の脳の中で生じることになるが、にもかかわらずこの人はやはり主観的には中国語を理解していない。

サールの主張は、前述のように、意味は形式からは生じないということだが、中国語の部屋の思考実験が示しているのは、意味が形式から生じないということではなく、微視的なレベルの認識から巨視的なレベルの認識が生じないということである。念のために付言しておけば、微視的なレベルの認識から巨視的なレベルの認識が生じないということは、意味が形式から生じないということを含意しない。微視的なレベルの認識から巨視的なレベルの認識が生じないのは、微視的なレベルの現象が複雑であるために、そのうちのどの部分を捨象してどのような抽象化を施せば巨視的な記述のレベルに到達できるかという（広義のパターン認識の）問題の解決が困難だからであり、この事情は微視的なレベルの現象が形式的であるか具体的（生理的・物理的）であるかとは無関係なのである。具体的な現象は粒度が細かいけれどもその分だけ記述の対象となる現象も小さなものであり、逆に、形式的なレベルの現象は粒度が粗いけれど

も問題になる現象が大きい。つまり、具体的なレベルの現象が形式的なレベルの現象よりも複雑であるとか単純であるとか考える理由はない。おそらくサールは、そもそも知能がこのような複数のレベルから成り立っているという考え方そのものに反対するだろう。だが、中国語の部屋の議論はこの反対論を根拠付けるものではない。

しかし当然ながら、だからと言って計算主義者が立証責任を免れたわけでもない。もちろん、脳を中心とする体内の現象が生理学的にすべて解明されたとしても人間がいかんして意味を理解しているかはわからない、ということを考えれば、知能が複数の記述のレベルから構成されており、あるレベルから他のレベルを容易には求めることができないというのは確かであるように思われる。だが、サールが問題にしている形式的な計算は生理学よりも巨視的なレベルの現象であるから、生理学のレベルから意味のレベルが導けないという話をそのまま流用するわけには行かないかも知れない。中国語の部屋の思考実験は、機能レベルを前提にした上で、そこから意味レベルが生じないことを主張しているわけだが、それに対して、機能レベルに関する認識が意味レベルに関する認識を含意しないと反論するだけでは、論争は平行線を辿ることになる。議論を新たな段階に進めるには、意味レベルと機能レベルを具体的に構成し、前者を後者から導くのが困難であることを示す必要があるだろう。

ところが、人工知能や認知科学のこれまでの研究では、多くの場合、機能レベルと意味レベルの間の区別が明確でなかった。チョムスキー(N. Chomsky) [3]やマーが批判するように、人工知能研究の大部分は、この区別に注意を払わず、アドホックな情報処理手順(プログラム)の作成に終始してきたとも言える。こうした研究は意味レベルの定式化を欠いているため、意味や理解は理論家の頭の中だけにしかないと批判されても仕方がないように思われる。

以下ではまず、世界の複雑性すなわち認知主体の部分性が計算主義の起源であることを論じ、さらに、古典的な計算主義がその起源のゆえに深刻な困難を内在していることを指摘する。次に、同じく世界の複雑性に基づいて意味レベルの特徴付けを与えることにより、機能レベルからの意味レベルの独立性が高いことを示す。また、部分性に基づく議論を突き詰めることにより、環境への埋め込みという概念に二重の意味で到達することを指摘し、そこに上記の困難を乗り越えるための手掛かりを探りたい。

2.5.3 部分性と複雑性

そもそも、知能が複数の記述のレベルからなると考える理由は何か？ 複数の記述のレベルを指定するということは、あるレベルに対して抽象化を施した結果としてのより巨視的なレベルを考えるということである。そして、そのような抽象化が必要なのは、世界が複雑(complex)だからである。

世界が複雑だというのは、認知主体(cognitive agent) --- 生体やロボットなどの自律的な行為者 --- にとって複雑だということであり、それは認知主体が部分的(partial)

だということである（複雑性は観点に依存する）。ここで言う部分性は、情報処理を含む行為のための資源に課せられた限界である。これは、認知主体が有限な物理的実体であり、有限な物体における単位時間内の物理的変化および入出力の量はやはり有限だという自明の理に過ぎない。つまり、複雑性は身体性の一部である。

この複雑性・部分性のゆえに、認知主体は物理的環境の全詳細を行動に反映させることができない。したがって、認知主体の行動特性において有意味なのは、世界の物理的全詳細ではなく、その何らかの抽象的構造であり、その構造を得るには、抽出すべきものと捨象すべきものとを物理的詳細の中から選別する必要がある。この抽象的構造が認知主体にとっての情報であり、情報の起源は部分性である。情報とは環境の分節であり、分節の粒度は遂行可能な行動の多様性に依拠して決まる。分節の目的は行動の選択であり、選択の必要性は部分性に由来する。入力を部分的にしか行為に反映させられないからこそ、入力の中の側面を行為に反映させるかという選択を迫られるのである。要するに、情報が有用なのは部分性のゆえであり、この意味において情報と部分性とは初めから分かちがたく結び付いている。

したがって、知能を説明するには、少なくとも物理学のレベルと情報のレベルという、少なくとも2つの記述のレベルに言及せねばならない。これが複数のレベルの由来である。主流の計算主義において3つのレベルを考えているのは、物理レベル（ハードウェア実装のレベル）と意味レベル（計算理論のレベル）とを媒介する説明項として機能レベル（アルゴリズムのレベル）を仮定したということである。それは古来の記号論理学や現在のコンピュータとのアナロジーに基づく仮定であり、論理的な必然性はないが、さしあたり有力な代替案もない。

要するに、情報および情報の概念に基づく計算主義は、世界の複雑性に由来する。世界の複雑性は認知主体の部分性と同義であり、この意味において、情報および計算主義の起源は実は身体にある。つまり、計算主義が仮定している複数の記述のレベルや形式的操作などの考え方は、身体を持つゆえに部分的な認知主体が、いかにして世界の複雑性に対処するかに関する工学的要請から導かれる。情報は身体を含む物理的媒体によって担われるが、情報（機能）のレベルにおいては物理学的詳細が捨象される。人工知能は、この情報のレベルにおいて――したがって物理学に還元されない仕方――知を理解しようという非還元論的唯物論（non-reductive materialism）の方法に基づく。この方法が成立し得るのは、認知主体が身体を持ち、ゆえに部分的であるため、認知主体の行動を説明するためにあらゆる物理学的詳細には立ち入る必要がない、という考え方が、検討に値する作業仮説となるからである。身体がなければ情報もなく、その情報という概念に基づく人工知能という企ても成立しない。

しかし人工知能において扱うべき情報（世の中の普通の情報）は、認知主体の部分性に由来するものだから、「純粋な」情報ではない。ここで純粋な情報とは、媒体を選ばず、無制限に複製を作ったり変換したり伝達したりできるという意味において、身体性をまったく持たない情報だが、部分的であるとはそのような無制限の操作が不可能だということなのである。すなわち、情報が実際には物理的媒体によって担われ

ているため、情報のさまざまな処理には時間的・空間的なコストがかかる。したがって、後に少し詳しく述べるように、無限の計算能力を前提する静的な理論をそのまま人工知能で用いることはできない。従来の通常の情報処理技術においては人工知能ほどには部分性が問題にならなかったが、それはシステムの入出力関係を人手による設計の段階で限定しておくことができたからである。

計算主義の公式見解においても、時間的・空間的なコストは重視されており、これは物理的詳細を完全には捨象し尽くしていないということである。物理的詳細のうちで質的な側面は捨象される（たとえば、高分子化合物かシリコンチップかは重要ではない）が、量的な側面は機能レベルに継承される。ところが、それによって生ずる計算量にまつわる難問はまだ解決からはほど遠い。

以上のように、部分性は、人工知能という研究プログラムを可能にすると同時に、人工知能に対して難問を突き付けてもいる。一般に知能とは部分的な認知主体が複雑な世界に適応する機構と言えようが、その知能を解明しようという試みのうち、この機構を工学的に設計することを手段とするのが人工知能であり、そこでは、物理的詳細を捨象した情報の概念を用いることによって認知主体の部分性を部分的に捉える。これが計算主義である。しかしこの情報は、物理的詳細を捨象し過ぎているために身体性をまったく欠いたものとなっているという意味において、却って部分性を捉えそこねており、そのために人工知能の困難な問題が生じている。部分性を捉えようとして捉えそこねたために生じている問題を解決するには、部分性に関する考察をさらに進めるしかない。以下はそのための試みである。

2.5.4 認知過程の複雑性

物理的詳細を捨象してもなお、世界は十分複雑であり、認知主体による情報処理もそれに応じて複雑なものとならざるを得ない。その複雑性は文脈（context）の多様性から生ずる。文脈とはさまざまな種類の情報の組合せである。たとえば「水ある？」という日本語の文を解釈する際には、言語的情報と非言語的情報が関与するが、言語的情報には音韻的情報や統語的情報などがあり、非言語的情報も、発話が台所でなされているかどうか、話者が花瓶を持っているかどうかなど、さまざまな命題からなる。

「発話が台所でなされている」という要素命題を p と書き、「話者が花瓶を持っている」という要素命題を q と書くと、これらによって構成される、 $p \wedge q$ 、 $\neg p$ 、 $p \wedge \neg q$ 、 $\neg p \wedge q$ などのさまざまな複合命題の各々が可能な文脈である。一般に、 n 個の要素命題およびそれらの否定の連言は 2^n 個あり、さらにそれらの選言は 2^{2^n} 個ある。したがって、 n 個の要素命題を認識することができる認知主体にとって、可能な文脈の個数は 2^{2^n} となる。では n はどれほどになるだろうか。人間に認識可能な要素命題は、人間に認識可能な述語（概念）と項（対象）の組合せによって構成される。概念の個数は辞書の項目の個数以上だから少なくとも数万のオーダーであろう。対象の個数も同様と

考えられる。したがって、要素命題の個数 n は数億以上に及ぶはずであり、文脈の種類の個数 2^n は絶望的に莫大なものとなる。

この議論は、自然言語で記述される記号的情報だけに限った話ではなく、たとえばもっと微視的なレベルにもそのまま妥当する。また、各要素命題や文脈を認知主体が明示的に（何らかの心的表象によって）認識するかどうかにも関係なく成立する。上の議論は、認知主体を外部から見ることによってその認知主体が置かれた環境と認知主体の外面的行動とについて観測される諸命題に関する議論だと考えればよい。その文脈と行動とが認知主体の内部に符号化されていようがまいが、認知主体とその周りの環境とを合わせた世界の一部において何らかの形で符号化され処理されているはずであり、そこでは何らかの仕方で文脈の多様性に直面せざるを得ず、それがいかにして解決されるかに関する説明が求められる。

文脈の種類が上記のようにきわめて多いため、知的なシステムの設計において個別的な文脈ごとにシステムの行動を明示的に指定することは実際上不可能である。（ここで言う「設計」は、人手で与えられたものに限らず、進化や学習によって獲得された構造も含む。）それゆえ、知的なシステムは、設計の複雑性をはるかに越える複雑性を持つ行動を示すという意味での創発性（emergence）を持たねばならない。この意味における創発性を行動に関する創発性（behavioral emergence）と呼ぼう。これに対し、初期設定の複雑性をはるかに越える複雑性を持つ構造が学習や自己組織化によって創出されるという主旨の創発性を構造に関する創発性（structural emergence）と呼ぼう。知的システムの設計はきわめて複雑なものとなりうるから、構造に関する創発性もまた、世界の複雑性に対処するための必要条件である。これら2種類の創発性は互いに深く関連しつつも独立した概念である（しかし、2つの創発性が実際には区別できない可能性もあるだろうが）。すなわち、あるシステムが行動に関する創発性を持ちながら構造に関する創発性を欠く場合も、その逆の場合もあり得る。

以下では主として行動に関する創発性について考えるが、いずれの創発にせよ、知的システムにおける創発は2つの要件を持つ。ひとつは複雑な行動や構造を生成する能力であり、これは当然ながらどのような創発においても要請される。もうひとつは、それらの多様な可能性を評価し、適切なものをそこから選択する能力である。これが必要とされるのは環境に適応するためであり、この意味において、評価と選択の能力は知的システムに特徴的である。次にこうした能力に関して考察しよう。

2.5.5 制約

一般に、あるシステムの行動を設計するための最も直接的なやり方は、システムがなすべき（運動だけでなく情報処理も含む）行動を各文脈ごとに明記するという設計法である。この設計法は、情報の流れの方向きや情報処理の手順を明示するプログラミングであり、そのようなプログラムを手続き（procedure）と言う。極端に明示的に

書かれた手続きの大きさは文脈の種類の数と行動の自由度との積に比例するから、これによって人間のような認知主体を設計することは事実上不可能だろう。つまり、手続きプログラムは一度に考慮すべきパラメタが多過ぎるわけである。文脈の範囲を限定することによってそのような手続きプログラムが書けたとしても、そのプログラムはシステムの行動と同程度に複雑なものとなるから、行動に関する創発性が満たされない。

各筋肉に対して個別的に中枢神経系から指令を送ることを想定する運動制御の古典的なモデルは手続きプログラムの一種である。脊椎動物の筋肉は数百にのぼるため、個々の筋肉を別々の自由度として、しかも多様な文脈の下で制御しようとする、運動制御のプログラムはきわめて複雑なものとなり、生理学的モデルとして非現実的だということをベルンシュタイン(N. Bernstein)が指摘しているが、これは、上記の手続きプログラムに関する議論に含まれる。

行動に関する創発性を実現するには、文脈ごとに行動を明記するのでないような設計法が必要となる。文脈や行動を個別的に数え上げるのではなく文脈や行動の抽象的なクラスを組合せるような書き方によって手続きプログラムの複雑性を抑制することももちろん可能であり、それが従来の情報処理技術において行なわれてきた通常の方法である。

しかし、ここではもっと徹底的な方法を考えよう。それは、可能な文脈のクラス（および望ましい文脈のクラス）だけを具体的に明示しておくような設計法である。文脈のクラスとは文脈（命題）の選言だから結局は1個の命題となる。この設計法は、文脈（命題）ごとに行動を指定する手続きプログラムに比べてはるかに単純である。文脈のクラスを規定する1個（または2個）だけ命題を記述するこうしたプログラミングの方法を制約プログラミング（constraint programming）と言う。制約（constraint）とは情報処理の手順を捨象した仕様である。手続きプログラミングにおいて各文脈における行動を明示的に指定するということは、多数の（たとえば統語解析とか跳び箱を跳ぶとかいう）個別的な作業に対する処理の手順を多くの個別的な手続きとして記述するということだが、制約プログラミングでは多くの個別的な作業をすべてひとつの一般的な手続きに基づいて行なうことになる。

手続きプログラミングに比べて制約プログラミングではプログラムの自由度が大幅に少ない。また、手続きプログラミングでは文脈全体を見渡す強力な中央制御機構が必要とされるのに対し、制約プログラミングではそのような機構は不要であり、上記の一般的な手続きを制約の各部分において同時並列的に適用する分散的な制御の方が自然である。ギブソン(J. Gibson)の直接知覚論の流れを汲む研究者たちは、ベルンシュタインによる上記の指摘を受けて、中枢の運動制御プログラムから独立して筋肉同士の間で自己組織的に成立する関係が制御の自由度を劇的に圧縮している可能性を指摘している(三嶋)[12]が、これは制約に関するここでの一般的な考察のひとつの具体例になっている。

ここで「制約」の意味について少し補足しておこう。まず、発達や学習に関する研

究においては「制約」をある種の生得的な知識という意味で用いることがあったが、ここで言う「制約」にはそのような意味はない。次に、制約にはもともと可能性の制限という意味があり、多様な可能性の評価とそこからの選択という側面が初めから含まれている。制約が制限しているのは世界のありさまに関する可能性であり、制約は、この可能性の範囲内において可能な行動の多様性を最大にする設計なのである。逆に言えば、同程度の複雑性を持つ制約プログラムと手続きプログラムを比べると、制約プログラムの方が格段に多様な行動を生成することができる。さらに、時間的順序を含む知識もまた制約でありうる。たとえば、料理のレシピは作業の時間的手順を含む知識だが、「後で麺を温め直すから、初めはちょっと硬めにゆでておこう」というような予測（時間の先取り）を含む推論と行為がこの知識に基づいてできるからである。身体的技能も同様の意味において制約と見なしてよい。このように、技能を含む多くの知識を制約と呼んで差し支えないことがわかる。また、制約は認知主体の「頭の中」にあるわけではなく、一般に認知主体とその環境を含む世界の一部にあると考えられるが、これについては後述する。

認知システムが制約に基づいているという作業仮説は、次のような少し異なる観点からも導くことができる。まず、行動に関する創発性を実現するには、ごく少数の種類の情報の間の変換を司る機能要素を多数用意しておき、具体的な各文脈においては、その文脈の中で重要性の高いさまざまな情報に関与するいくつかの機能要素を働かせ、その組合せとしてシステム全体の行動を生成するしかない。各機能要素は文脈に関して薄いシステムであるが、それらが文脈に応じて複合することにより、システム全体としては非常に複雑な行動を生成することができるはずである。

このようなシステムは、少なくとも近似的な意味において、制約に基づくシステムとなる。それはこういうことである。まず、上記のような機能要素をひとつ取り上げ、それがたとえばある種類の情報Xを入力として別の種類の情報Yを出力するものとしよう。文脈が十分多様であるとすれば、逆にYを入力してXを出力すべき文脈もあるはずだから、システムはそのための機能要素も含む。3種類以上の情報を扱う機能要素に関しても同様である。しかしそうすると、システム全体としてはきわめて粒度（これは情報論的な粒度であり、物理的な大きさとは無関係である）の小さいレベルにおいてあらゆる方向にわたる情報の流れを許容することになる。これは情報の流れる方向を指定しないということと同じだから、システムの設計はあるレベルで宣言的（この「宣言的」には、言語によって明示的に説明できるという含みはない）な形をしていることになる。この議論は、知的なシステムが厳密な意味で制約に基づく設計を持つことの論理的証明ではもちろんないが、対処可能な文脈の多様性と宣言性の度合との間に正の相関があることを示しており、したがって、知的なシステムの設計が制約に基づいているということが、検討に値する作業仮説であることがわかる。

制約を意味レベルと考えれば、意味レベルが機能レベルから容易には認識できないことが説明できる。制約の下では、異なる文脈に応じて異なる情報処理が行なわれ、文脈の多様性は上記のように莫大であるから、制約に基づく行動の複雑さもそれに応

じて莫大なものとなる。したがって、制約に基づく情報処理（機能レベル）は制約自体（意味レベル）に比べてはるかに複雑だから、前者から後者に至るには、非常に多数な抽象化の可能性の中から探索せねばならず、それはきわめて難しい問題になると考えられる。さらに、制約は理論家の頭の中で想定されるだけでなく物理的に実在する、ということを強調しておく必要があるだろう。制約は、（後述のように必ずしも認知主体の「頭の中」にあるとは限らないが）何らかの形で物理的媒体に符号化されている。したがって、中国語の部屋においても意味や理解は実在する可能性がある。部屋の中の人が中国語を理解できるのは、この人の身体を含む物理的媒体によってそれに対応する制約が何らかの形で符号化される場合だろう。

フォーダー(J. Fodor) [4]は認知の中央系 (central system) がモジュラリティを欠くと言うが、これは、機能レベルにおける現象が複雑過ぎて工学的な設計や科学的な説明が不可能だという主張と考えられる。ただしフォーダーは、中央系がモジュラーでないため、これを解明しようとする認知科学は不可能だと言うが、もし制約説が正しいとすれば、解明すべきものは、意味レベルでは制約の内容、機能レベルでは一般的な制約処理手続きということになり、機能レベルにおける非モジュール的な情報処理過程はそれらから導かれる。制約のような意味レベルを考慮せずに機能レベルの複雑な現象を手続きプログラムで明示的に設計または説明しようとするれば、プログラムが複雑化して設計が破綻することになる。

次に、制約の維持が情報の流れの巡回路によってもたらされることに注意しよう。制約説においては、こうした巡回路を認知の単位と考える。この観点から見れば、認知過程に関してこれまで提案された多くのモデルや理論が制約説に沿うものであるこ

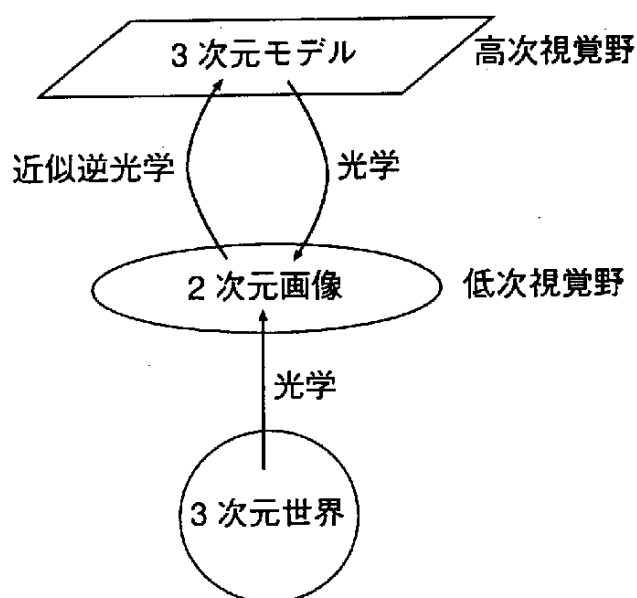


図 2.5-2 視覚の順逆変換モデル

とがわかる。

たとえば、(川人・乾)[7]による視覚認知の順逆変換モデルでは、2次元画像から3次元の世界を認識する過程を、図2.5-2に示すような巡回路と考える。つまり、2次元画像からまず大雑把な3次元モデルを推定し、それを光学の原理に従って2次元画像に戻すと、もとの2次元画像とずれているので、このずれが小さくなるように3次元モデルを調節して行き、ずれが十分小さくなるまでこのサイクルを繰り返すわけである。一般に、脳の中である部位から他の部位への結線がある場合は逆方向の結合もあることが知られているが、これは、このモデルの生理学的根拠であると同時に制約説のひとつの状況証拠でもある。

巡回路に基づく認知理論としては、他にもたとえば音声知覚の運動説 (motor theory) がある。これは、音響の表象と構音運動の表象との間に双方向の情報の流れがあり、音声知覚も構音運動もこの巡回路に基づいて行なわれているという考え方である。たとえば、音声を認識する際には、聴覚刺激から直接に得られる音響データからそれに対応する構音運動のモデルを推定し、それによって生成されるはずの音と先の音響データを比較し、そのずれが小さくなるように音響と構音運動を修正するサイクルを繰り返すというような、上記の視覚の認識と同様の処理過程が考えられる。発音の際の処理過程は、最初の入力は構音運動のモデルであるが、後は本質的に同じサイクルとなる。ちなみに、言語学の音韻論で広く用いられている弁別素性は構音運動の素性であるが、これは言語音の体系的記述が運動的属性に基づかざるを得ないことを示している。

認知主体の設計が制約に基づくという仮説を否定する明確な経験的証拠は、これまでのところ知られていない。たとえばブローカ失語症 (Broca's aphasia) は、一見したところ制約説の反例のようでありながら、実は逆に、制約説のひとつの証拠となる可能性がある。ブローカ失語症とは、ブローカ領域 (大脳左半球の前頭葉の一部) およびその周辺の損傷によって生ずる言語障害である。この失語症においては、正しい文を話す能力と書く能力が著しく損われるが、簡単な文を理解する能力は比較的良く保たれる。ブローカ (Paul Broca) が1861年にこの失語症を発見した際の患者は、'tan' としか発話できなかったが、日常会話の理解にはほとんど問題がなかった。それ以来1世紀以上にわたり、これは言語表現を産出する機能における障害だと解釈されてきた。この解釈は制約説に矛盾する。言語表現の理解と産出のための別々の心的プログラムのようなものは存在せず、いずれの作業も共通の一般的な処理手続きによって行なわれるということを制約説は含意するからである。しかしその後、たとえば 'The girl the boy is chasing is tall' のようにある種の統語的な知識が理解に必要な文をブローカ失語症の患者が理解できる割合はあてずっぽうのレベルを越えないことがわかっている (詳しくは[6]などを参照)。したがって、ブローカ失語症は文の産出に関する障害ではない。今後、文の産出における障害に関する研究がさらに進み、ブローカ失語症が産出と理解に関して対称だとわかれば、それは制約説を支持することになる。

2.5.6 能力と運用

論理学の公理系による知識表現の研究は、モデル論的意味論 (model-theoretic semantics) --- 公理系の意味をその公理系を満たす世界の状態の集合として静的に捉える方法--- に基づいて意味レベルを制約として定式化する試みと考えられるかも知れない。しかしそうした論理主義 (logicism) のアプローチは、理論上無限の情報処理能力を前提しており、現実性に欠ける。無限の推論能力という理想化は言語学や経済学でも用いられている標準的な研究方略であって、この方略に対する批判はしばしば学問的方法についての無知に基づくナイーブな心情論として排斥され、それは応々にして当たっているのだが、結局のところ、この批判は本質的に正しい。

論理主義に基づくアプローチでは、部分性を扱うために非単調性 (non-monotonicity) を持つ論理体系[10][11]を用いる。非単調性とは、新しい情報が得られることによって以前の結論が棄却されうるということである。情報が欠如している状況で意思決定をしなければならない場合には非単調性が生ずる。情報の欠如を補って意思決定を行なうための蓋然的な知識を、一般にヒューリスティクス (heuristics) と言う。たとえば「鳥は普通は飛ぶ」のようなデフォルト規則はヒューリスティクスである。ヒューリスティクスは、情報の欠如を補うものだから、常に正しいわけではない。つまり、ある情報の欠如を補うためのヒューリスティクスが、その情報が得られたために適用できなくなり、以前にそのヒューリスティクスを用いて導かれてた結論が成立しなくなることがある。

人工知能や認知科学では、常識の扱い、文の容認性に関する判断のゆれ、社会的制約の文脈依存性など、単調な論理では記述不可能な現象は多い。したがって、非単調性を説明するためにヒューリスティクスを用いる必要がある。問題は、能力 (competence) を説明するためにヒューリスティクスを使うことから生ずる。能力 (competence) とは、情報処理速度や記憶容量が無限の理想的な認知主体の振舞である。言語学でいう言語能力 (linguistic competence) は文字通り言語に関する能力を指し、多くの言語理論は言語能力 (静的な言語知識) に関するものである。これに対し、情報処理速度や記憶容量が限定された現実の認知主体の振舞を運用 (performance) と言う。

能力に関する理論においてヒューリスティクスを用いることによって問題が生ずるのは、能力におけるヒューリスティクスと運用におけるヒューリスティクスを区別できないからである。まず、能力におけるヒューリスティクスとは、理想的な認知主体が部分的な知識の下で完全な情報処理を行なった後にどのような意思決定 (行動の選択) を行なうかを説明するものであることに注意しよう。したがって、能力に関するヒューリスティクスは、完全な情報処理を行なった後に残る情報不足を補う。一方、運用におけるヒューリスティクスとは、現実の認知主体が部分的な知識の下で不完全な情報処理と意思決定をいかにして行なうかを説明するためのものである。したがって、運用に関するヒューリスティクスが補う情報不足は、完全な情報処理を行なった

後に残るものに限らず、情報処理が不完全であるために生ずる情報不足も含む。

能力におけるヒューリスティクスと運用におけるヒューリスティクスとを区別できないのは、完全な情報処理を行なった末に残る情報不足と、情報処理が不完全であるために生ずる情報不足とを区別できないからである。つまり、これら2種類の情報不足を区別するためには完全な情報処理を行なわねばならないが、それは現実の認知主体には不可能である。

たとえば「鳥は普通は飛ぶ」というデフォルト規則は、能力理論のヒューリスティクスとして扱われることが多いが、ヒューリスティクスであるからには運用理論にも属する。つまり、「普通は」の部分を「完全な推論を行なっても、飛ばないという強い（「強い」というのは、上のデフォルト規則よりも強いということである）結論が推論されない場合には」という意味で用いることは実際には不可能であり、「飛ばないという強い結論がとりあえず推論できていない場合には」という条件付きの意味で用いるしかない。「飛ばない」という情報の欠如が認識論的部分性によるものか発見的部分性によるものかが判別不能だからである。

もちろん理論家の観点からは完全な情報処理を想定することができるが、その観点を認知主体の中に持ち込むことはできない。すなわち、実際の認知主体が2種類のヒューリスティクスを使い分けることは不可能である。したがって、ヒューリスティクスを含む能力理論が実際の認知主体の知識として使われているとしても、それは運用理論と区別することができないため、能力と運用の区別は意味を失う。

部分性にいかに対処するかというのが本来解くべき問題であり、これを解決するには部分性を完全に捉える必要がある。ところが論理主義は、物理学的情報の捨象だけに着目して完全な情報処理を前提し、物理的情報を捨象できることの根拠が部分性であることに関する配慮を欠いている。物理学的情報を捨象できるということと計算が不完全にしかできないということとは本来同じことなのだから、これらは統一的に扱わねばならない。

2.5.7 環 境

人工知能と認知科学の最大の研究課題は、物理的に限定された認知主体が環境に適応するために環境との複雑な相互作用をいかにして行なうかという問いである。にも関わらず、孤立した思惟に基づく問題解決が重視される時期が永らく続いた。これに対して、頭の中での推論よりもむしろ環境との相互作用に重きを置くアプローチが1980年代の中頃から提唱され[1][2][14]、人工知能および認知科学全体としても環境との密接な相互作用 --- 環境への埋め込み --- を重視する傾向が定着しつつあるように思われる。以下では、環境への埋め込みという概念が二重の意味で部分性から導かれることを指摘し、環境との密接な相互作用を実現する工学的な方法について考察する。

部分性から環境への埋め込みが導かれるということの第1の意味は制約説に関係する。

2.5.5で述べたように、多様な行動を生成するためには個別的な文脈ごとにシステム全体の行動を指定する仕方によって環境との相互作用を明示的に設計するのは現実的ではないから、認知主体の設計は制約に基づくものと考えられる。ところが、制約とは情報の流れを捨象した仕様であり、入出力とはシステムの内部と外部との間の情

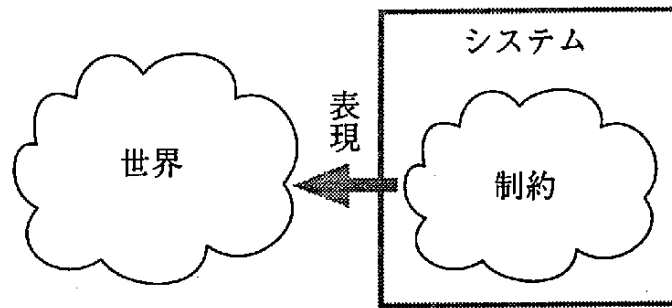


図 2.5-3 システム内部の知識表現としての制約

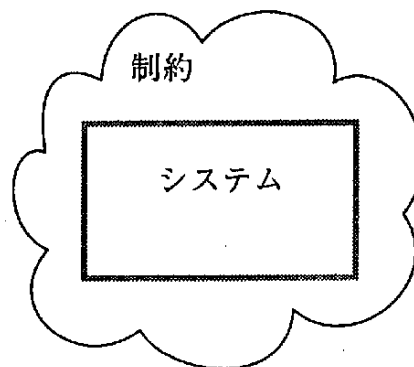


図 2.5-4 システムと環境との関係としての制約

報の流れであるから、制約の中には入出力は現われない。したがって、制約は図 2.5-3 のようにシステムの内部に格納されているわけではなく、図 2.5-4 に示したようにシステムと外部環境との関係において成立する。制約に基づくシステムにおいては、システムの内と外を隔てる絶対的な境界は存在しない。

第2の意味は、能力と運用とが区別不可能だという前項での議論に関連する。その議論は、部分性のゆえに完全な情報処理ができない認知主体にとっては完全な情報処理を行なった末に残る情報不足と、情報処理が不完全であるために生ずる情報不足とを区別できず、したがって、能力におけるヒューリスティクスと運用におけるヒューリスティクスとを区別できないというものであった。ある情報がシステム内部での推

論によって得られるとすれば、その情報はシステムの内部にあったことになる。一方、システム内部で完璧な推論を行なっても得られないとすれば、その情報はシステムの外部にあったことになる。しかし、部分性によってこの区別は不可能だから、システムの内と外の境界はこの意味においても相対的なものに過ぎない。

環境への埋め込みを実現した工学的システムの例として、ローゼンシャイン(S. Rosenschein)[14]とブルックス(R. Brooks)[2]のロボットがある。ローゼンシャインは、ロボットとその環境との関係としてロボットの論理的な仕様を与え、これをコンパイルすることによってロボットの内部の論理回路を設計した。また、ブルックスのロボットでは内部のモジュールのそれぞれが環境と直結しており、各モジュールと環境との相互作用がロボットと環境との間の何らかの制約を維持している。ここで、環境と相互作用するモジュールとしては、常にいずれか1個だけが文脈に応じて選択される。ローゼンシャインのロボットでは制約のうちロボットの内部において担われる部分が固定されているのに対し、ブルックスのロボットではどのモジュールがロボットの動作の制御を握るかが文脈に依存して変化するので、行動に関する創発性がより高いシステムとなっている。ブルックスのロボットにおいては、常に1個の制約だけが部分的にシステムの内部にあって他の制約の維持は環境に委ねられており、制約全体におけるシステムの内外の境界が、モジュールの交替によって変化していると言える。

しかし、これらのロボットはいずれにせよきわめて単純なものであり、行動に関する十分な創発性を持つとは言えない。ブルックスのロボットではモジュールが常に1個だけ働くが、複数のモジュールの動きを同時に組合せて多様な行為のパターンを生成することは困難である。また、いずれのロボットにおいても、制約におけるシステムの内外の境界がかなり大きな粒度のレベルで固定されており、行動の多様性が十分ではない。ブルックスのロボットでは上記のようにモジュールの交替によって制約全体におけるシステムの内外の境界が変化するが、各モジュールに対応する各制約において内外の境界が細かく変化することはない。例えば自然言語処理のような組合せ的な複雑性の高い作業がこうした設計法によって実現できるとは思えない。

行動の多様性と環境への適応性をさらに向上させるには、粒度の小さな多くの制約の単位を文脈に応じて組合せるだけでなく、各制約を実現する情報の流れの巡回路のうちでシステムが担う部分と環境が担う部分の配分をやはり文脈に応じて変化させることが必要だろう。そのための一般的な方法は不明だが、ひとつの可能性として、制約全体の内容が一応システムの内部でコーディングされており、各時刻においては、その一部が働いてシステム内の情報の流れを生じ、これが環境における情報の流れと繋がって情報の循環を構成し、これがその時刻における制約を形成する、ということが考えられる。システム内の情報の流れと環境における情報の流れがどこで繋がるかは文脈に依存するわけである。さらには、図2.5-5に示すように、制約を仮想的に実現するような情報の循環がシステムの内部で常に自律的に生じており、これが随所で環境にアクセスすることによって、システムと環境との間の関係にまつわる制約が維持されると考えることもできるだろう。この図において実際に働いているのは実線

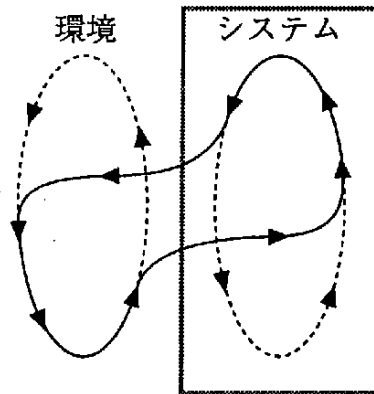


図2.5-5 システムと環境にわたる情報の巡回路

で示した巡回路であり、破線の部分は事実上存在しないも同然であることに注意されたい。環境への埋め込みをいかにして実現するかというのは、情報処理のどの部分をシステムの内部で行なうかということであるから、つまるところは情報処理の制御に関する問題となる。静的な制御はローゼンシャインのロボットの場合のような設計時における事前のコンパイルーションであり、動的な制御はブルックスのロボットの場合のような実行時の選択である。図2.5-5においてどこで入出力を行なうべきかを決定するのも情報処理の動的な制御である。

一般に動的な制御は非常に難しい。すなわち、情報処理が部分的にしかできない場合には、最適な意思決定を求めるのが困難である。情報処理における最適な意思決定とは、情報処理のためのさまざまな演算のうちから長い目で見て最も好ましい結果をもたらすものを選択するということである。ところがその選択は、それらの演算を何らかの形で評価した上で最適のものを選ぶという情報処理を含む。そして、その情報処理も複雑なものになり、したがってそこでもやはり最適な演算を選択せねばならないことがありうる。最適な意思決定の定義はこのように循環してしまう。ここで言う「最適」は、情報処理を含む行動が部分的にしか行なえないことを考慮に入れた上での最適性である。実は、その意味での最適性を矛盾なく定義することができ、それに従う最適な意思決定を求めることも原理的にはできる[8]。しかし、それを求めるための計算は認知主体の行動に関連する全情報を参照するきわめて膨大なものとなるから、認知主体が動的にこれを行なうことは不可能である。情報処理の動的な制御に関しては人工知能や意思決定論において永年にわたって研究されてはいるが、体系的な理論はまだない。

2.5.8 おわりに

情報とは環境の分節であり、分節の目的は行動の選択であり、選択の必要性は部分性に由来する。入力を部分的にしか行為に反映させられないからこそ、入力の中の側面を行為に反映させるかという選択を迫られるのである。すなわち、情報なるものが有用なのは部分性のゆえであり、この意味において情報と部分性とは初めから分かちがたく結び付いている。情報の概念に基づく人工知能や認知科学という企てを可能にしているのも、論理主義や制御に関する難問を生み出しているのも、ともに部分性なのである。部分性のこの2つの側面を統一的にとらえるような新たな情報の概念が必要となる。そのような情報の概念を得て初めて、中国語の部屋にまつわる意味や理解に関する論争や感覚質 (qualia) などの問題が最終的な決着を見ることになるだろう。

参考文献

- [1] Agre, P. A. and Chapman, D. (1991). What are Plans for ?, In Maes, P.(ed.), *Designing Autonomous Agents: Theory and Practice from Biology and Back*, pp.17-34. MIT Press.
- [2] Brooks, R. A. (1991). New Approach to Robotics, *Science*, 253, 1227-1232.
- [3] Chomsky, N. (1987). 「言語 --- 内的なるメカニズム」 AIジャーナル, 1 (12), 119-129.
- [4] Fodor, J. A. (1983). *The Modularity of Mind*. MIT Press. (伊藤笏康・信原幸弘 訳 (1985). 精神のモジュール形式, 産業図書).
- [5] Gibson, J. J. (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Houghton Mifflin Company. 古崎 敬 他 訳 (1985). 生態学的視覚論, サイエンス社).
- [6] Grodzinsky, Y. (1998). 「統語理論と神経組織 (萩原 裕子 訳)」 大津由紀雄・橋田浩一 編, 言語の獲得と喪失(岩波講座「言語の科学」第10巻), 第3章, 岩波書店, 東京.
- [7] 川人 光男・乾 敏郎 (1991). 「視覚皮質の計算理論 --- 再構成からパターン認知記憶まで」 科学, 61, 214-222.
- [8] Lipman, B. L. (1995). How to Decide How to Decide How to ...: Modeling Limited Rationality, *Econometrica*, 59 (4), 1105-1125.
- [9] Marr, D. (1982). *Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*. W. H. Freeman and Company. (乾 敏郎・安藤 広志 訳 (1987). ビジョン: 視覚の計算理論と脳内表現, 産業図書).
- [10] McCarthy, J. (1980). Circumscription: A Form of Non-Monotonic Reasoning, *Artificial Intelligence*, 13, 27-39.
- [11] McDermott, D. and Doyle, J. (1980). Non-Monotonic Logic I, *Artificial Intelligence*, 13, 41-72.
- [12] 三嶋博之 (1994). 「認識エンジンとしての知覚-行為循環」 現代思想, 22-13 (11), 334-343.
- [13] Pylyshyn, Z. W. (1984). *Computation and Cognition: Toward a Foundation for Cognitive*

- Science*. MIT Press, Cambridge, Mass. (信原幸弘 訳 (1988). 認知科学の計算理論, 産業図書).
- [14] Rosenschein, S. (1987). *Formal Theories of Knowledge in AI and Robotics*, CSLI-87-84, Center for the Study of Language and Information, Stanford University, Stanford, CA. (斎藤浩文 訳 (1990). 「AIとロボット工学における知識の形式理論」 現代思想, 6 (3), 127-139.).
- [15] Schank, R. C. and Abelson, R. P. (1977). *Scripts, Plans, and Goals and Understanding: An Inquiry into Human Knowledge Structures*. Erlbaum.
- [16] Searle, J. R. (1980). Minds, Brains, and Programs, *Behavioral and Brain Sciences*, 3, 417-458.

2.6 ソフトウェアの複雑さ

木下 佳樹 委員 (電子技術総合研究所)

2.6.1 プログラミングでの問題

プログラミングの根本問題、とはいわずともプログラミングにおける大問題の一つに、一ステップからなるプログラムなら振る舞いが良く分かるのに、千ステップからなるプログラムの振る舞いはよくわからない、ということがあると思う。一ステップの振る舞いはマニュアルを見たら詳しく書いてある。にもかかわらず、それを一千個集めただけのプログラムの振る舞いはよくわからない。これは多少ともプログラミングの経験のある人ならみな感じることはなかろうか。千ステップからなるプログラムの振る舞いを説明することはできる。一ステップずつの振る舞いの説明を千個分つづけたような説明なら、書き下ろすのは大変だけれども、書くことはできる。しかしそういう説明では、やっぱりわからないのである。漱石の「吾輩は猫である」に、

...「へえもとはなんだったんです」「なんでも天璋院様の御祐筆の妹のお嫁に行った先のおっかさんの甥の娘なんだって」「なんですって?」「あの天璋院様の御祐筆の妹のお嫁に行った……」「なるほど。少し待ってください。天璋院様の妹の御祐筆の……」「あらそうじゃないの、天璋院様の御祐筆の妹の……」「よろしいわかりました天璋院様のでしょう」「ええ」「御祐筆のでしょう」「そうよ」「お嫁に行った」「妹のお嫁に行ったですよ」「そうそう間違った。妹のお嫁に行った先の」「おっかさんの甥の娘なんですとさ」「おっかさんの甥の娘なんですか」「ええ。わかったでしょう」「いいえ。なんだか混雑して要領を得ないですよ。つまりところ天璋院様のなんになるんですか」「あなたもよっぽどわからないのね。だから天璋院様の御祐筆の妹のお嫁に行った先のおっかさんの甥の娘なんだって、さっきから言ってるんじゃないですか」「それはすっかりわかっているんですがね」「それがわかりさえすればいいんでしょう」「ええ」としかたがないから降参をした。我々は時とすると理詰めのうそをつかねばならぬことがある。

という一節がある。上記の問題は、ちょうどこのことだろうと思う。

別に「一ステップならわかるというが、本当に分かっているのか」という疑問も、もちろんあるわけで、これらの二つの問題のどちらに着目するかが、後に述べるプログラミングへの二つの観点を分けるものではなかろうかと考えている。

ともあれ、長いプログラムは訳が分からないので、「オレが書いたプログラムは、オレの思った通りに動くのか?」という疑問が、まじめに論じられなければならない。もちろん、プログラムを他の工作物、例えば飛行機に置き換えて、同様の疑問が生じてもおかしくはない。「オレが作った飛行機は、オレの思った通りに動くのか?」と

いう問いは、もっともな疑問である。しかし、飛行機が飛ぶかどうかには、人知を超えた自然現象がからむので、オレの思った通りにならなくとも不思議には感じられない。これに対して、プログラムの場合、その動作には自然現象が絡む余地はない。にもかかわらず、上記のような疑問が生じることには、何かしら、欲求不満のようなものを感じる。このような状況は、プログラミングに特有のことではないだろうか。

プログラムが正しいことを保証することは自明ではない。そればかりか、そもそもプログラムが正しいとはどういうことか、よくわからない。プログラムはただ動いているだけで、それだけでは正しいだの間違っているだのという主張をすること自体には意味がないのだ。プログラムをどのように動かしたいかという意味付けあるいは意図、解釈（論理学では解釈という言葉が専門用語として用いるが、ここでは一般用語として用いているだけである）を与えて、初めてプログラムの正しさを議論することができる。

単純なモデルを与えると、図2.6-1のようになる。プログラムをビット列を受け取って、ビット列を返す関数と考える。これは機械の世界での話である。一方、プログラムの利用者が計算したいものは、ビット列とは限らない入力データをうけとって、これまたビット列とは限らない出力データを返す関数である。この関数やデータは利用者の世界の中のものである。機械の世界、利用者の世界の二つがバラバラではどうしようもないわけで、入力データをビット列によって表現し、それをプログラムに入力して、出力されたビット列を取り出し、再びそれを出力データに翻訳（伝統的に、この翻訳を抽象化という）したものが、計算したいものになっておれば、そのプログラムは、利用者の意図どおりのものだということになるのである。

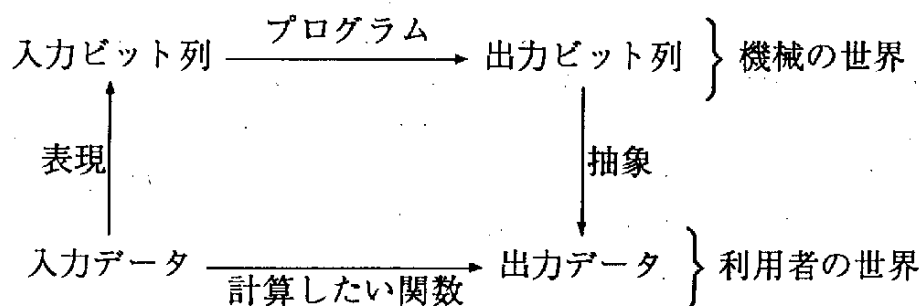


図2.6-1 プログラムと利用者

ここで「単純な」モデルといったのにはいくつかの意味があって、まず、プログラムを関数としてとらえる、というのは大変な単純化である。もちろん、関数によってとらえられるようなプログラムもあるが、オペレーティングシステムやロボットの制御プログラムなどのように、決して停止せず、動いている間の外界とのやりとりが利

用者の意図する動きである、というようなものも沢山あり、このようなものは、入力に対して出力を返すという単純な関数では表わすことができない。また、入力データの表現や出力ビット列の抽象などに相当する関数があるとしたが、実際には、これらは関数ではなく、一般の「関係」にしかない場合が多い。

このように単純化した話ではあるが、機械の世界と利用者の世界を分けて考え、それらの間をつなぐ表現あるいは抽象のような解釈がある、という図式は、かなり広く通用すると筆者は考えており、それを厳密に定式化していくのが、筆者にとって重要な仕事である。

このようなわけなので、プログラムの動作の仕様をプログラム自身とは別に明示する必要があることになる。このとき、仕様は利用者の世界の言葉で語られることになる。仕様をプログラムの世界に翻訳した主張をプログラムが満たすときに、そのプログラムは仕様を実現する、という。これら、仕様と実現の概念はプログラムの正当性を論じるときに基本的である。このような見方では、仕様もプログラムもそれぞれ独立に存在するものであり、「実現」という関係は、多対多の、一般の関係であって、片方を決めれば他方が決まるというようなものではないことになる。

2.6.2 数学的構造

さて、以上で「世界」と呼んできたものは何か。ここでいう世界には各々公理系が与えられている。もう一步進んで、その公理系こそ世界のことであると考えて良い。公理系が与えられれば、一つの構造が定まると考えて、各世界は構造であるといってもよいと思う。これは、計算機科学の用語で抽象データ型 (ADT) と呼ばれているものに相当する。

ここでは「構造の大衆化」とでも呼びたい現象が起こっている。良い性質を持つ公理系の性質を良く調べる、というのが伝統的数学だったように感じられるが、ここでは、利用者ごと、計算機ごとに一つの構造が出現するのであり、それらの構造は、一般にとてつもなく大きな記号倉と大量の公理を持っていて、群や環がもっているような良い性質を持つことはほとんどないのである。そうして、各構造の詳しい性質を調べることもさることながら、それよりもむしろ、構造どうしの関係を調べる、構造を組み合わせる新しい構造を作る方法を求める、などといった、構造というものの一般論が求められる。

数学的な構造にもいろいろある。一般に、一つの形式的理論をたてると、それは一つの構造を与えると考えることができ、これがもっとも一般的な構造の捕らえ型であろうが、これでは一般論で得られる主張、定理はあまりないかもしれない。いわゆる General Abstract Nonsense に陥る危険がある。そこで構造の範囲を少し制限して考える。とくに、抽象データ型の記述に有効なのは代数構造である。もう一つの代表的な数学的構造のクラスである位相構造は、特別なもの、つまり ω -CPO などの順序構造が、領

域論（いわゆるスコット理論）などの計算の理論に用いられるが、今までのところ、抽象データ型には役立てられておらず、上に述べたような「大衆化」は、位相構造には起こっていない。一方、代数構造はそれ自身、等式論理、Lawvere theory、finitary monad、FP-スケッチなど、いくつかの表現法を持つ安定した概念であるのみならず、いくつかの方向に一般化されて抽象データ型の記述に用いられている。まず、Set から一般の圏 C への拡張がある。台集合の代わりに台位相空間 ($C = Top$)、台圏 ($C = Cat$) などが出てくるわけである。また、オペレータに部分関数に当たるものを許す essentially algebraic structure や FL-スケッチがある。さらに enrichment、高次元化、後に述べる (T,D)-スケッチなどの拡張があり、FL-スケッチなどは既に抽象データ型記述には必須の道具とされているし、(T,D)-スケッチも現在 Power と筆者らによって抽象データ記述への応用が提案されている [5]。

構造の一般論が求められると述べた。いわば、構造の間を渡り歩くことをしたいわけである。そのために、少なくとも、ふたつのアプローチが考えられる。一つは、モデルの中のモデルとでもいいたいもので、例えば位相群に見られるように、ある構造（この場合、位相空間）のなかで別の構造（この場合、群）をもつことを考える、というものである。圏の中の group-object など考えるのもそうだし、カルテジアン閉圏の上で高階データ型を定義する、というのもこの方向である。現在、筆者らは、この方向で抽象データ型の変換（データ精製）を考えている。もう一つ考えられるのは、構造全体の圏を考え、その性質を調べる、というものである。例えば Lawvere theory 全体の圏を考えると、これが complete and cocomplete であることなどが知られている。

2.6.3 スケッチ

この項では、構造の数学的定式化の一つであるスケッチについて短く解説する。

もっとも簡単な種類のスケッチは FP-スケッチである。FP は finite product の略記である。FP-スケッチは、等式論理や Lawvere の algebraic theory、finitary monad などと同等のものであり、いわゆる代数構造を記述する手段の一つなので重要である。

FP-スケッチとは、圏 C と、 C における離散推の集合 $Cones$ の対 $(C, Cones)$ をいう。ここで C における離散推とは、自然変換 $T: [c] \Rightarrow D: J \rightarrow C$ で、 J は小さな離散圏、 $D: J \rightarrow C$ は J から C への函手、 $[c]$ は J から C への定数函手であるようなものである。

FP-スケッチ $(C, Cones)$ のモデルとは C から有限積を持つ圏 P への函手 $F: C \rightarrow P$ で、 $Cones$ に属する C における錘を、 P における積の錘 (product cone) に写すようなものである。

FP-スケッチについて、いわゆる自由スケッチの存在定理などが成り立つが、それは [1] などの教科書を参照していただくことにする。（つまり、スケッチの理論というものがあるのがあるのであって、定義しただけで終わりではないといいたいわけである。）

FP-スケッチを用いて、自然数のスタックのデータ型の構造を概略次のように与えることができる。Cとして次のようなグラフによって自由生成される圏をとる。

$$\begin{array}{ccccc}
 1 & \xrightarrow{\text{empty}} & \text{Stack} & \xrightleftharpoons[\pi']{\text{push}} & \text{Nat} \times \text{Stack} \\
 & & \downarrow \text{top} & \nearrow \pi & \\
 & & \text{Nat} & &
 \end{array}$$

ここで注意しなければならないのは $\text{Nat} \times \text{Stack}$ という名前を使ったが、この対象は Nat と Stack の積ではないことである。Cは単に上記のグラフによって自由生成されたものだからである。1についても同様で、Cの終対象ではない。これらがモデルにおいて積や終対象に写されることを保証するために、Conesをつぎの二つの錘からなる集合とする。

$$\left\{ 1, \begin{array}{ccc} & \text{Nat} \times \text{Stack} & \\ \pi \swarrow & & \searrow \pi' \\ \text{Nat} & & \text{Stack} \end{array} \right\}$$

FP-スケッチを拡張してFL-スケッチを得ることができる。FLは *finitelimit* の略記である。FP-スケッチの定義で、Conesを、離散錘だけでなく、一般の錘を持つように変えたと、FL-スケッチの定義が得られる。モデルの定義もそれにしたがって変える。

FL-スケッチを用いると、部分的にしか定義されないオペレータを持つような代数系（のようなもの）を記述することができる。例えば、圏の構造は、射の合成が部分的にしか定義されていないので、これをFP-スケッチによって記述することはできないが、この構造を記述するFL-スケッチを、概略次のように与えることができる。

Cとして次のグラフと、等式 $\text{dom} \circ d_0 = \text{cod} \circ d_1$ によって自由生成される圏をとる。

$$\begin{array}{ccccc}
 & \xleftarrow{\text{dom}} & & \xleftarrow{d_0} & \\
 O & \xrightarrow{\text{id}} & A & \xleftarrow{\text{comp}} & CP \\
 & \xleftarrow{\text{cod}} & & \xleftarrow{d_1} &
 \end{array}$$

Oは object、Aは arrow、CPは composable pair のつもり、 d_0, d_1 は composable pair の射を取り出す射影のつもり、comp は、射の合成のつもりである。射の composable pair としては第一の射の dom が第二の射の cod に等しいものだけをとりたいが、そのためには、引き戻し (pullback) をとれば良い。つまり、Cones のなかに、次のような錘を入れておく。

$$\begin{array}{ccccc}
 & & CP & & \\
 d_0 \swarrow & & \downarrow & & \searrow d_1 \\
 A & \xrightarrow{\text{dom}} & O & \xleftarrow{\text{cod}} & A
 \end{array}$$

ここで、まんなかの射は、 $\text{dom } d_0 = \text{cod } d_1$ である。

FL-スケッチによっても、例えば体の構造は記述できない。体の公理の中には x が 0 でなければ x^{-1} が定義される、というのがあるが、ここで、定義域が否定形によって示されているのが問題になる。FL-FS-スケッチ (FS は finite sum の略記) というものによって体の構造を記述することもできる。

さて、FL-スケッチでは、ある対象が、ある図式の極限であることを指定することができたが、それだけではなく、例えばある対象がテンソル積であることとか、冪対象であることなどを指定したい場合がある。FP、FL、テンソル積、冪対象などは、すべて圏の上の代数構造であることに着目して、Power、武山、筆者らは (T,D)-スケッチというものを導入し [6, 7]、自由スケッチの存在などの最小限必要な性質を示している。ここで T は Cat の上の finitary monad, D は、図式の指定法 (FL の場合の Δ に相当する) である。これを用いて、CCC における高階型の定義が初めて説明できる。

2.6.4 筆者のスタンスについて

最後に、筆者の立場について、思い付いたことをいくつか記してみたい。

(1) プログラミングへの二つの観点

プログラミングに対して、二つの対照的な観点があるように思う。仮にミクロな立場とマクロな立場とよぶことにして、思い浮かぶおのおのの特徴をブレインストーミング的に書き並べてみると、次のようになる。マクロというのは、1970年代後半から programming in the large という言葉で呼ばれている分野での問題意識に大体一致すると思う。

ミクロな立場では、関係する理論はホーア論理、領域論、項書換などの計算の理論である。これに対し、マクロな立場ではモジュールやオブジェクト、データ精製やプログラム精製などの精製 (refinement)、またプロセスの模倣などを対象とする理論が求められる。明示的に教えることができないソフトウェアの工芸、プログラムを一から作る構成的な立場がミクロであるのに対して、マニュアル化あるいは自動化できるソフトウェア工学、既存ライブラリを組み合わせでプログラムを作ったりソフトウェアの保守をする公理的な立場がマクロだ、といったところである。

計算の理論は大変詳細なものができていて、現在プログラムの理論とよばれるものは、こちらの立場のものが多く、しかしこれは本稿のはじめに述べたプログラミングの大問題とは別の問題を追求する理論ではないかと考えている。このことは、計算の理論がプログラマによってほとんど見向きもされていない事実によっても裏付けられているのではないか。計算そのものとは違う、プログラムを作ったり取り扱ったりする現象を扱う科学が必要である。そのようなものを仮にソフトウェアの科学と呼ぶ。

このようなものが上記でマクロな立場と呼んだ問題意識である。このような立場からの数理科学的なアプローチにはまだまだこれからやっていくべき仕事があると考えている。

(2) 多重記述系か？

筆者の方向は、多数の構造を扱うという意味で、多重記述系なのかもしれないが、これらが相互に還元不可能だということに着目するよりも、むしろ複数の構造を（還元されないまでも）相互に関連付けていきたい、というのが図2.6-1での主張であった。

(3) Foundation

計算機科学では数理論理学や圏論を多用するが、これらの数学はしばしば数学の基礎と結び付けて語られる。しかし、foundationには、できるだけ関わりたくない、というのが筆者の立場である。鴨浩靖氏は「我々は記号処理の科学としてlogicを使うのだ」といったことがあるが、まったく同感である。同様に構造の科学として圏論を使う、といったところか。いずれにしろ、論理も圏論も一つの方法論として使う、というのが筆者の立場であり、たいていの計算機科学に従事している者の立場も同様であろうと思われる。

(4) 決定不能性に向きあう？

Foundationに関わりたくないとはいっても、不完全性定理や決定不能性という事実は存在するわけで、そこから逃げるわけには行かない。ではそれにどう向き合うか。計算機による定理証明の場合に二つのアプローチがあるが、これが示唆的だと思う。一つはBoyer-Mooreなどの自動定理証明で、これは自然数論の部分理論で決定的なものを見つけ、その範囲で全自動的に証明をつけようとするものである。常に、より大きな決定可能理論をみつけようとする努力が続く。もう一つは80年代に起こった動きで、いわゆるproof assistantを作ろうとするものである。これは基本的には人間がすべて形式的証明を書くのだが、その際にいろいろ手助けをする計算機ソフトウェアを作ろうとするアプローチである。書いた証明がちゃんとした証明になっているかの検査をしたり、証明を書くときのルーチンワークを見つけて、それを計算機がやるようにしたりする。もちろん、この方式でも、自動定理証明のテクニックを応用して、命題論理のような決定可能な理論に対しては全自動の証明をつくることもできるわけだが、必ずしもそういう決定可能理論を固定しなくても、アドホックあるいはプラグマティックにルーチンワークを計算機に渡していくことが可能である。この、proof assistant的な発想が道具としての計算機を作っていく上で有効なのではないかと思う。

2.6.5 関連分野と文献

筆者は、ソフトウェア工学をささえる科学には、圏論が有効な道具として働くと考えている。このような見方をもって実際に圏論を本格的に使う研究者はまだ少ないように思う。ADJグループが普遍代数 (universal algebra) の考えを用いて抽象データ型の理論を作った [3]。これが、ソフトウェア工学の理論の先駆的仕事である。その後、Goguenらは普遍代数的技法を用いて、もっと強力な記述法を提案している [9]。これらの仕事では、始代数などの圏論的な概念が少し用いられているが、あまり本格的に用いられているとはいえない。それは普遍代数の分野での圏論の用いられかたを反映している。一方、これらの普遍代数の理論を圏論の立場から別に構成しているのが、代数的理論 (algebraic theory) やスケッチの理論で、普遍代数が1940年代から研究されているのに対し、こちらは1960年代半ばからはじまった、より新しい理論である。BarrとWellsによる教科書 [2] に、スケッチによる抽象データ型の扱いが解説されている。その後、最近になって、筆者らはスケッチの概念の拡張を提案し [7,8]、高階の抽象データ型への応用も可能になっている (未発表)。

データ精製は、C.A.R. Hoareによる1972年の画期的論文 [4] から研究が始まった。これは、基本的なプログラム開発法である「段階的詳細化法」のための重要な概念となっている。データ精製は、抽象データ型の間の変換と見なすことができる。上記のような抽象データ型の研究の上になつて、その間の変換を研究していこう、というのが筆者の立場である。

さて、データ精製で起こっていることは、同じものを違う見方、違う抽象データ型をとおして見てみようということである。つまり我々は、「多重記述系」の一種を扱っている。多重記述性は複雑系の特徴の一つであると言われているので、この辺りが、ソフトウェア科学と複雑系科学との接点かと考えている。

参考文献

- [1] Michael Barr and Charles Wells. *Toposes, Triples and Theories*, volume 278 of *Grundlehren der mathematischen Wissenschaften*. Springer-Verlag, 1985.
- [2] Michael Barr and Charles Wells. *Category Theory for Computing Science*. Prentice-Hall, second edition, 1995.
- [3] J. A. Goguen, J. W. Thatcher, and E.G. Wagner. *An initial algebra approach to the specification, correctness, and implementation of abstract data types*, pages 80-149. Prentice-Hall, 1978.
- [4] C. A. R. Hoare. Proof of correctness of data representation. *Acta Information*, 1:271-281, 1972.
- [5] Y. Kinoshita and A. J. Power. Data refinement and algebraic structure. ETL Technical Report TR96-2, Electrotechnical Laboratory, January 1996.

- [6] Y. Kinoshita and A. J. Power. Lax naturality through enrichment. *Journal of Pure and Applied Algebra*, 112 (1): 53-72, 1996.
- [7] Yoshiki Kinoshita, and A. John Power, and Makoto Takeyama. Sketches. *Electric Notes in Theoretical Computer Science*, 6, 1997.
URL: <http://www.elsevier.nl/locate/entcs/volume6.html>.
- [8] Yoshiki Kinoshita, and A. John Power, and Makoto Takeyama. 1998. to appear in JPAA.
- [9] Gert Smolka, Werner Nutt, José Meseguer, and J. A. Goguen. *Order-Sorted Equational Computation*, pages 299-367. Academic Press, 1989.

2.7 情報の自動編集と複雑系の接点

佐藤 理史 委員（北陸先端科学技術大学院大学）

2.7.1 はじめに

筆者は、「複雑系」とは何かということについて、確固とした考えを持っているわけではない。と言うよりは、「複雑系」とは何であるか、そう呼ぶことでどんなメリットがあるのか、ほとんどわかっていないというのが正直なところである。本稿では、筆者が進めている自動編集プロジェクトの内容について紹介するとともに、本委員会での筆者の発表と質疑に基づき、本プロジェクトと「複雑系」との接点について考えてみる。

2.7.2 自動編集プロジェクト

(1) ねらい

自動編集プロジェクトの目的は、

1. 情報を編集するとはどういうことなのか
2. それはどのようにしたら機械的に実現できるのか

を明らかにすることである。現在は、主にテキスト情報を対象に研究を進めている。

我々の出発点は、「情報（の提示の仕方）にはわかりやすいものと、そうでないものがある」という認識にある。本や雑誌を例にとって考えてみよう。同じものを対象としたもの（例えば、ハワイのガイドブックなどを考えればよい）でも、わかりやすいものとそうでないものが歴然として存在する。これはどうしてなのだろう。何が情報のわかりやすさに関係しているのだろうか。どうすれば、情報をよりわかりやすくすることができるのだろうか。

これらの疑問に対して、我々の立てた仮説は以下の通りである。

わかりやすい情報は編集によって生み出される

我々が普段接するマスメディアのほとんどは、誰かの手によって編集された情報である。その編集の巧みさの度合いが、情報のわかりやすさを決定していると考えるのである。このような仮説の元で我々がすべきことは、編集とは何かということを明らかにし、それを機械化する方法を考えることとなる。

自動編集プロジェクトは、図2.7-1に示すように、認知科学、自然言語処理、人

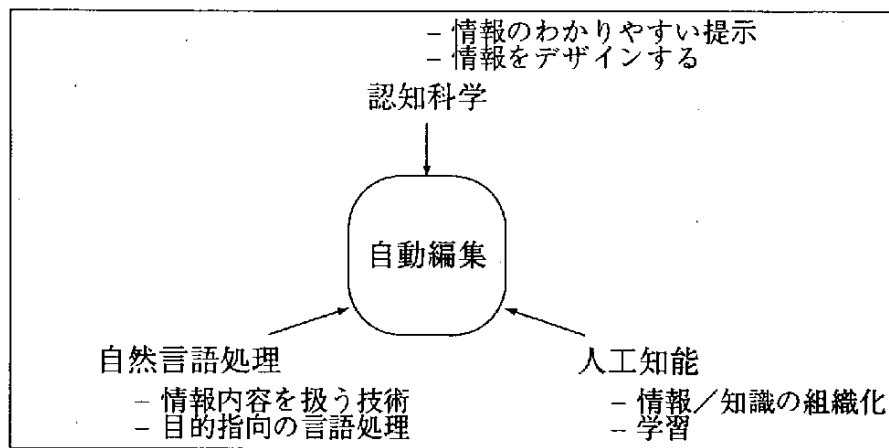


図 2.7-1 情報の自動編集

工知能の3つの研究分野に関連している。

認知科学では、ヒューマン・コンピューター・インタラクションなどを中心に、情報をわかりやすく提示する方法についての研究が行なわれている。我々は、これを一歩進め、「ある目的のために情報をデザインするとはどういうことなのか」について考えていきたい。

多くの情報がテキストという形で表現されているため、実際の自動編集処理は、テキストを対象とした処理となる。このため、自動編集は自然言語処理と密接に関連することになる。ここでは、形態素解析や文解析に代表される要素技術ではなく、応用指向の言語処理技術やテキストの情報内容を扱う技術について研究する。

自動編集は、単に情報をわかりやすくするだけではない。その過程において、情報を整理することが不可欠である。情報を整理するとはどういうことなのか、それによって何か新しいもの生み出されるのか。ここでは、情報を組織化する方法とその意味について考えることになろう。これは、人工知能における知識の体系化や学習と密接に関連する。

(2) これまでの経過

本プロジェクトは、1993年より著者らが行ってきたネットニュースのダイジェスティングの研究 [3] に端を発する。この研究では、ネットニュースを利用者にとってより便利なものにするために、ニュースグループのダイジェストを自動生成し、これを提供することを考え、2つのシステムを試作した。

1. fj.meetingsのダイジェスト自動生成 [1]

fj.meetingsは、会議の開催案内や論文募集案内が投稿されるニュースグループである。このニュースグループの記事群から、会議に関する中心的な情報（会議名、開催日、開催場所、締切）を抽出し、カレンダー形式のダイジェストを提供するシステムを作成した。

2. fj.wantedのダイジェスト自動生成 [2]

fj.wantedは、売買広告や各種の質問（情報を求む）が投稿されるニュースグループである。それぞれの記事から、中心的な内容を表す一文を抽出することにより要約を作成し、それらをカテゴリ毎（売ります、買います、など）に整理したダイジェストを提供するシステムを作成した。ダイジェストは、ユーザーの希望により、動的に生成される点に特徴がある。

これらのシステムを作成することによって、ネットニュースのダイジェストを自動生成することができることを実証した。

この研究の過程で、我々は、「もしこのダイジェストが利用者にとって便利だとするならば、それは何のおかげなのだろうか」という疑問を抱くに至った。ダイジェストを作るということは、一体どういうことなのだろうか。ダイジェストを作成するということは、オリジナルの情報群にはない、何か新しい情報を作り出しているのだろうか。

これらの疑問について考えるうちに、我々は、「編集」がキーワードであると考えに至った。

もし、ダイジェストが使いやすいとするならば、それは「編集」のおかげである。ここで、「編集」とは、利用者とその目的を想定し、それに合った形に情報を加工する処理の総称である。

こうして、ネットニュースのダイジェスティングの研究は、「編集」により焦点を当てた自動編集プロジェクトに発展することとなった。このプロジェクトは、1996年頃より開始し、次項で述べる質問応答集の自動編集システムを試作するに至っている。

(3) 出発点となる「編集の4要素モデル」

「編集」とは、一体どれだけのことを含むものなのか、十分に分かっているわけではない。そこで、我々は、まず図2.7-2に示すような、収集・選択・組織化・提示という4つの部分から成るモデルを考え、これを出発点とすることとした。これらの4つの部分は、それぞれ以下の設問に対応する。

収 集 情報をどのように集めるか
選 択 適切な情報をどうやって選ぶか
組織化 情報群をどのようにまとめるか
提 示 情報群をどのように提示するか

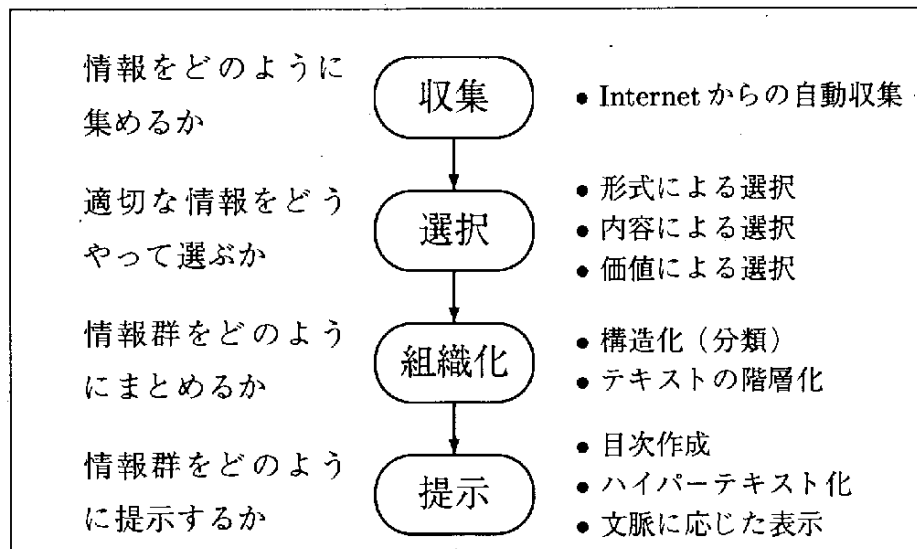


図 2.7-2 編集とは

これらの要素は相互に関連しているが、このように4つに分けて考えることは、研究を進める上では有用であると考えている。

2.7.3 質問応答集の自動編集

自動編集プロジェクトにおける、我々の最初の対象問題は、ネットニュースの記事から質問応答集（Frequently Asked Questions; FAQ）を作成するというものである。作成したシステム[4]は、fj.sys.sun及びcomp.sys.sun.adminから、Question-Answers Package (QA-Pack) と呼ぶハイパーテキストの形をとった質問応答集を自動編集する。

(1) QA-Packの構造

自動編集されるQA-Packは、ニュースのスレッド（一つの質問記事とそれに対する応答記事群）を、内容に基づいて分類したものである。分類体系は、あらかじめ概念木

(分類木)として与えられ、それぞれのスレッドは、概念木のいずれかの節点(概念)に分類される。

QA-Packは、4種類のウェブページから構成される。

目次ページ 概念木の最初の2段を示す(図2.7-3)。

節点ページ 概念木のそれぞれの節点に対応するページ。

その概念に関連した質問のダイジェストを表示する(図2.7-4)。

スレッドページ 一つの質問とそれに対する応答群に対するページ。

上部に質問の要約と応答の要約(リード)、下部に質問記事本体が表示される(図2.7-5)。

応答記事ページ 応答記事を表示するページ。

これらのページは、ハイパーリンクによって結合されている。

File Edit View Go Bookmarks Options Directory Window Help			
Sun QA-Pack-j (in Japanese)			
Questions and Answers about Sun Workstations from fi.sys.sun			
Automatic Edition (October 04, 1996)			
トピック (87)	ハードウェア (66)	ソフトウェア (156)	その他 (35)
- オーディオ (3) - バックアップ (6) - ブート (3) - ディスクレス - 日本語 (11) - メール (20) - ニュース (2) - ソフトの移植 - PPP (6) - 印刷 (12) - ポストスクリプト (6) - 遠隔ログイン (6) - シャットダウン (2) - システムトラブル (1) - Web (9)	- CD-ROM (6) - フロッピーディスク - ハードディスク (12) - キーボード (5) - メモリ (3) - 光ディスク (5) - モデム (1) - モニタ (7) - マウス (1) - ネットワークハード (7) - パラレルポート - SCSI (8) - シリアルポート (4)	- コマンド (8) - エディタ (5) - プログラミング言語 (19) - ライブラリ (5) - ネットワークソフト (47) - OS (30) - ソフトウェアツール (8) - X (27)	
[Top Menu Section Finder How to Use About QA-Pack]			
Edited By APG v3.14 @sango			

図2.7-3 目次ページ

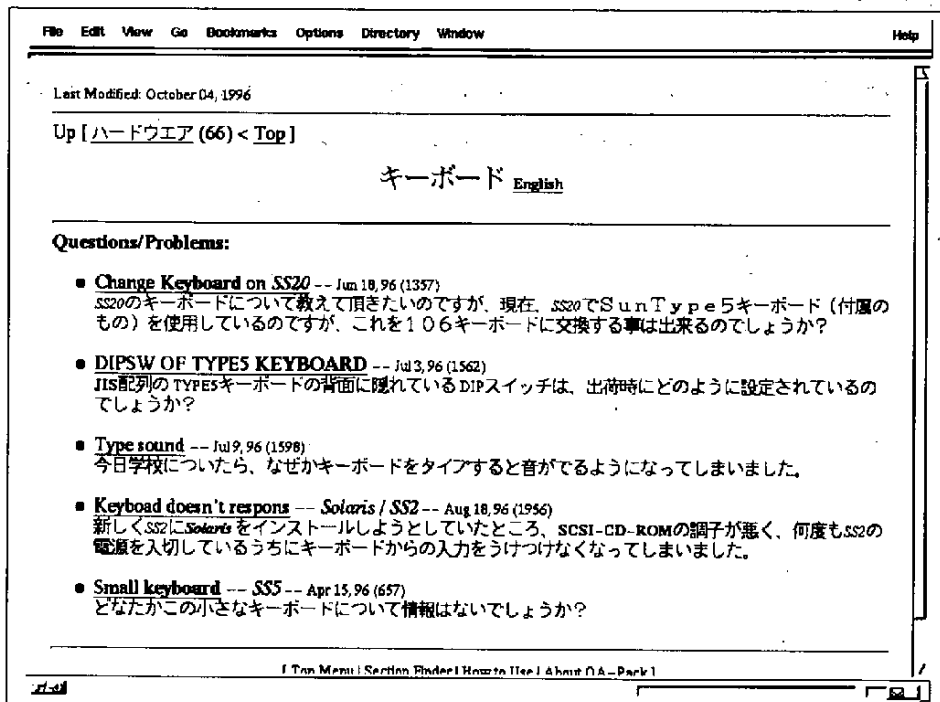


図 2.7-4 節点ページ

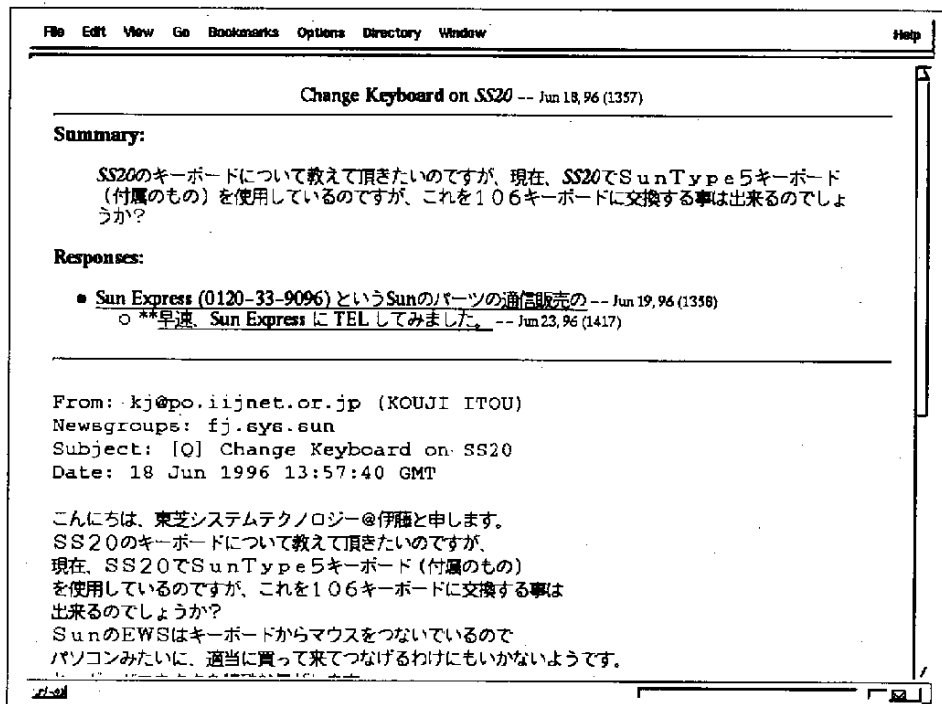


図 2.7-5 スレッドページ

(2) 自動編集システムの概要

システムの概要を図 2.7-6 に示す。QA-Packの編集のためには多様な処理が必要であるが、そのハイライトは、以下の二つの処理である。

要約の作成 それぞれのスレッドに対してその要約を作成する。

内容による階層的分類 それぞれのスレッドがどの分類項目（節点）に分類すべきか決定する。

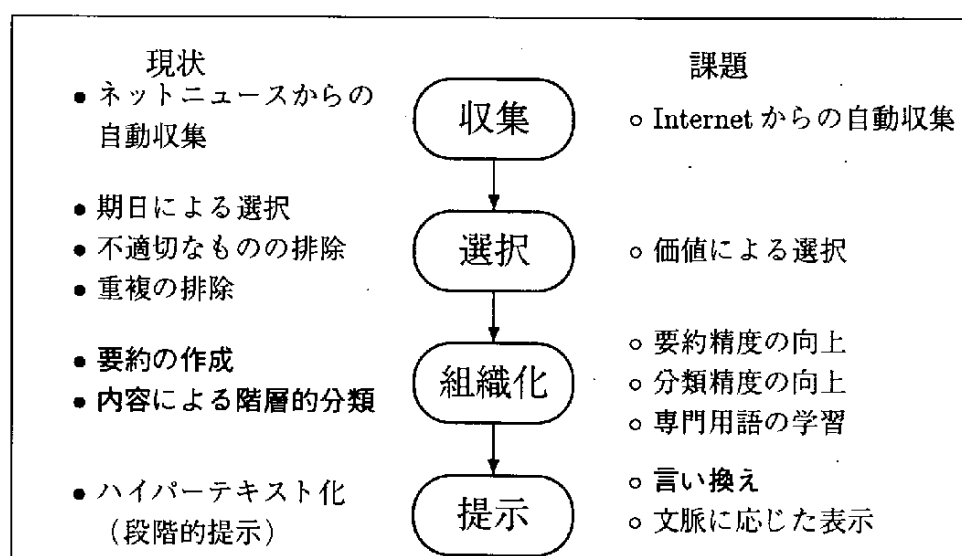


図 2.7-6 QA-Pack 自動編集システムの概要

(3) 要約の作成

QA-Packでは、それぞれのスレッドに対して、ヘッドラインとサマリと呼ぶ2段階の要約を採用している。ヘッドラインは、質問記事の内容を端的に表したもので、サマリは、それをもう少し詳しく説明したものである。ヘッドラインは、質問記事のヘッダーのSubjectをリライトすることによって作成するのに対し、サマリは、質問記事の本文の中から、最も重要だと思われる一、二文を抽出することによって作成する。

このサマリの抽出には、表層表現（特徴抽出）を手がかりとした方法を用いている。図 2.7-7 にその例を示す。この図において、下線が付加されている部分が、注目する表層表現である。この例の場合、最初の文は、挨拶・自己紹介の文だと判定され、その文はスキップされる。次の文において、状況説明（「～しているのですが」）と質問（「～出来るのでしょうか？」）という特徴が見つかり、この文が最も重要な文だと判定され、抽出される。この方法により、約80%の精度で、もっともらしいサマ

りを抽出することができる。

#	文	特徴	抽出
1.	こんにちは、東芝システムテクノロジー@伊藤と申します。	(X^{28}, X^{29})	
2.	SS20のキーボードについて教えて頂きたいのですが、現在、SS20でSun Type 5キーボード（付属のもの）を使用しているのですが、これを106キーボードに交換する事は出来るのでしょうか？	(S^3, q^{17}, Q^{18})	✓
3.	SunのEWSはキーボードからマウスをつないでいるのでパソコンみたいに、適当に買って来てつなげるわけにもいかないようです。	(X^{32})	
4.	キーボードコネクタも特殊な気がします。	(X^{32})	
5.	どこかの周辺機器メーカでSS用の106キーボードって売ってないでしょうか？	(q^{17})	
6.	どなたかご存知の方いらっしゃいましたら教えて下さい。	$()$	
7.	お願いします。	(X^{32})	

図2.7-7 表層的特徴を利用した要約文抽出

(4) 質問内容の自動分類

それぞれのスレッドが何に関係した質問であるかは、要約（ヘッドラインとサマリ）に現れる専門用語を用いて決定する。図2.7-8に例を示す。この場合、キーボードに関連する専門用語が2種類見つかるため、この質問（スレッド）は、キーボードに関連するものであると決定される。この方法の精度は、専門用語辞書のカバレッジに強く依存する。専門用語辞書を適切に準備した場合は、80%以上の精度で正しく分類できる。

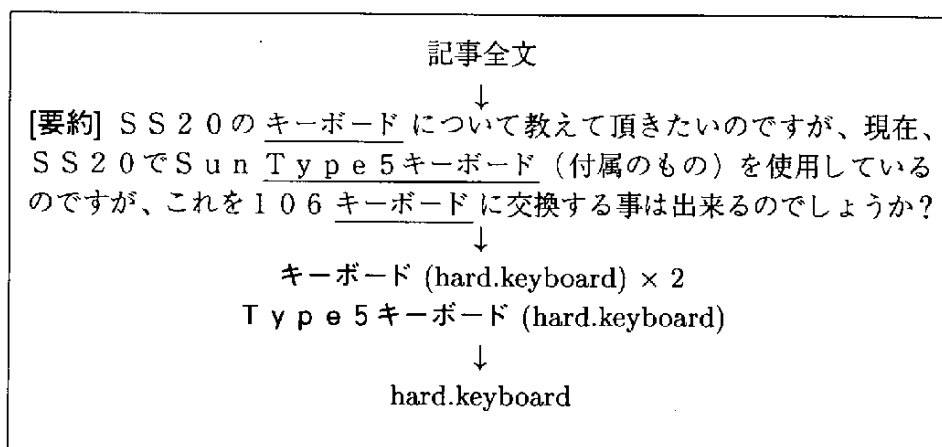


図2.7-8 要約と専門用語を利用した階層的分類

(5) リライト／言い換え

現在、システムは、<http://www-sato.jaist.ac.jp:8000/faq> において試験運用中であり、AltaVista などのサーチエンジン経由で広く利用されている。それと並行して、本システムを改良するための研究を継続して行なっている。その中で、最も力を入れているものは、要約（ヘッドラインとサマリ）のリライトである。

現在のシステムにおいては、非常に簡単なリライトしか行なっていないため、節点ページの品質は、オリジナルテキストの品質に強く依存する。

リライトは以下の二つのために必要である。

1. 簡単化

抽出したヘッドラインやサマリが冗長な場合、これをより短く書き換える。

例1 S S 2 0 のキーボードについて教えて頂きたいのですが、現在、S S 2 0 で S u n T y p e 5 キーボード（付属のもの）を使用しているのですが、これを 1 0 6 キーボードに交換する事は出来るのでしょうか？

リライト例1 S S 2 0 の S u n T y p e 5 キーボードを 1 0 6 キーボードに交換できますか？

2. 標準化

ほとんど同じ内容の質問の場合は、表現を統一する。

例2 Ascii-tex-2.1.1 をインストールしようとしてエラーが出て困っています。どなたか対処方法を教えて頂けませんか。

例3 Jtex1.7.tar のインストールについて教えて頂きたく再び投稿しました。

リライト例2 Ascii-tex-2.1.1 のインストール方法について教えて下さい。

リライト例3 Jtex1.7.tar のインストール方法について教えて下さい。

我々が特に注目しているのは、後者のリライトであり、典型的な質問に対して標準形を用意することによって、この種のリライトを実現することを試みている [5]。

2.7.4 自動編集と複雑系

現在、例題を実現することを中心にプロジェクトを進めているが、この過程において、いくつかの本質的な疑問が湧きだし、それらについて検討することを余儀なくされている。おそらく、この辺りに、自動編集と複雑系の節点があるのではないかとと思われる。

(1) 情報とは何か

最も大きな疑問は、「情報とは何か」ということである。ここでの「情報」とは、情報科学／工学でいうところの「情報」ではなく、我々が日常的に使うところの「情報」である。編集は、単なる情報の等価変換なのだろうか。それとも編集は、何か新しい情報を生み出すものなのだろうか。

この疑問に対して、我々は「編集によって、潜在情報が顕在化されることがある」と考えてきた。しかし、最近は、「情報と処理は不可分である」という考え方に立った以下の説明の方が的を得ていると考え始めている。

「編集によって、人間の認識／理解の処理を軽減されるため、人間は、編集されたものをわかりやすいと感じる」

図2.7-9はそれを模式的に表したものである。我々人間が実際に接するものは、情報そのものでなく、情報を運ぶメディア（例えば、テキスト）である。そこから情報を得るためには、何らかの処理が不可欠である。これは、通常、認識とか、理解とか呼ばれているものである。編集は、この処理の一部を代替するものであり、その結果、人間が行なわなければならない処理が軽減されるため、人間はわかりやすいと感じるのである。つまり、わかりやすさとは、その処理の軽さの度合を指すものであると考えるのである。

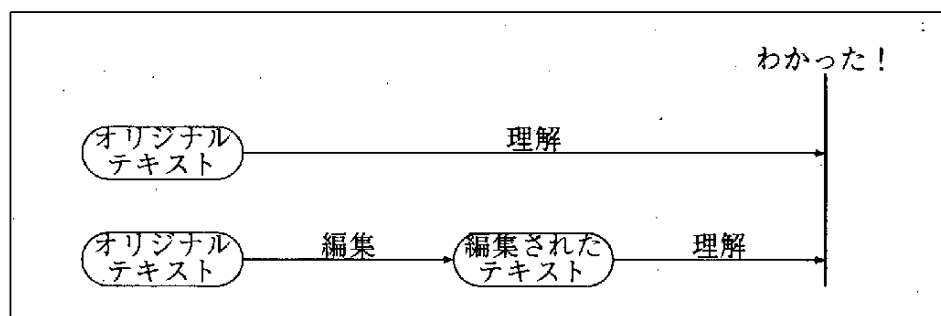


図2.7-9 編集による効果

「情報と処理は不可分である」という主張は、情報の理論を、情報を「モノ」として捉え理論化することはできないという主張である。処理というフィルターを通してしか情報を見ることができないというこの考え方は、一般に考えられている複雑系の考え方と相通じるところがあるのかもしれない。

(2) 言語と複雑系

「ことば」は情報を伝える最も汎用なメディアであり、画像などのメディアよりは、より直接的に情報を表現することができる。それ故、ことばについて研究することは、その奥にある情報について研究することにつながっていくと考えられる。

書き言葉であるテキストは、「テキスト--段落--文--句--語」といった、複数のレベルの構造を持っている。それぞれのレベル、および、レベル間の関係は、少数の規則で記述できるようなものではない。複雑系がシステム（系）を表す用語であるのならば、ことば（言語）は、複雑系の一つに分類されることは間違いないであろう。

編集という文脈は、ことば（テキスト）が非常に柔軟なメディアであることに気づかせる。例えば、テキストの要約は、元々のテキストの中心的な内容を、より短いテキストで書き表すことであるが、これが可能なのは、テキストが一つの情報を複数の詳細度で伝えることができる（おおまかに伝えることもでき、また、詳細に伝えることもできる）からである。また、言い換え（パラフレーズ）が可能なのは、一つのことを表すのに複数の異なった言い方が存在するからである。このような柔軟性は、言語の本質の一部であり、コミュニケーションのための道具、あるいは、情報を伝達するメディアとしての重要な性質なのではないかと思われる。

参考文献

- [1] 佐藤 円, 佐藤理史, 篠田陽一: 電子ニュースのダイジェスト自動生成, 情報処理学会論文誌, Vol.36, No.10, (1995), pp.2371-2379.
- [2] 佐藤理史, 佐藤 円: ネットニュースグループfj.wantedのダイジェスト自動生成, 自然言語処理, Vol.3, No.2, (1996), pp.19-32.
- [3] 佐藤 円, 佐藤 理史: ネットニュースとニュースダイジェスト自動生成『コンピュータソフトウェア』, Vol.13, No.5 (1996).
- [4] 佐藤 円, 佐藤理史: ネットニュース記事群の自動パッケージ化, 情報処理学会論文誌, Vol.38, No.7, (1997), pp.1225--1234.
- [5] Satoshi Sato and Madoka Sato: Rewriting Saves Extracted Summaries, In Working notes of the AAI'98 Spring Symposium on Intelligent Text Summarization, in press.

2.8 コンピュータネットワークと複雑系

村上 健一郎 委員 (NTT 光ネットワークシステム研究所)

2.8.1 はじめに

本稿では、コンピュータネットワーク、特に、インターネットにおける動的ふるまいと複雑系とのかかわりについて述べる。コンピュータネットワークにおいては、これまでの電話などのネットワークにない"あやしげ"な挙動が観測されるようになってきているものの、複雑系と直接関係すると思われるような現象を対象とした研究は極めて少ない。しかし、ここで、その"あやしげ"な挙動のいくつか、あるいは、逆に、それを目指したアプローチについて見ておくことは、無駄ではあるまい。

本稿では、まず、最近のトラフィック理論における話題を概観する。これまでのトラフィック理論は、待ち行列理論とも呼ばれ、系の安定した状態における特性を議論の中心としてきた。この古典的トラフィック理論は、従来のネットワーク、例えば、電話網などではネットワークの設計に一般に使用されている。ところが、インターネットでは、これが成り立たなくなり、その原因が"あやしげ"なトラフィックの自己相似性にあると言われている。なお、この話題は、"あやしげ"であっても複雑性との関連は薄いと思われる。

次に、視点を自律適応型ネットワークに移し、単一のネットワークの生成、進化、崩壊について論じる。これは、筆者がかなり前に、ネットワークの自動生成法について考えていた頃の論文に再度考察を加えたものであり、いわゆる自己組織化を目指したものである。ここでは、そのアルゴリズムの概要を説明する。もし、"自己組織化"を"複雑性"の特徴の一部として考えて良いならば、この議論は、この場のテーマにふさわしいものとなる。

最後に、実際にインターネットがどういう成長過程をとってきたのかについて言及する。ここでは、インターネットプロバイダが設立され、合併、買収、崩壊によって新たなネットワークのネットワーク（即ち、インターネット）として統合されていく様子を紹介する。この議論は情報工学ではなく、むしろ、複雑性パラダイムでの経済学のとらえ方を説明する場合の例題として挙げられている競争と淘汰などの例をインターネットに関して、参考として示したものと考えている。

なお、筆者は、コンピュータネットワークのプロトコル、ソフトウェア、経路制御などが専門であり、複雑性に関する専門的な知識を持ちあわせていないことをお断わりしておく。但し、システムの視点で、ネットワークを含む汎用のパラダイムとして複雑系には、興味がある。

2.8.2 インターネットにおける最近の"あやしげ"な現象

このサブセクションでは、最近のトラフィック理論における話題を概観する。

(1) 古典的トラフィック理論

これまでのトラフィック理論は、系の安定した状態における特性を議論の中心としてきた。これは、確率論を応用し、20世紀の始めにデンマークのアーランによって研究が始められた理論であり、ネットワークの特性解析や設計に広く用いられている。また、同様の理論が、オペレーションズリサーチ (OR) の分野でも研究された。その一例を図2.8-1に示す。これは、電話局間で何本の回線を用意すれば、十分かを考えるための図である。この場合、呼の発生（電話をかけること）量、そのパターン、サービスの時間（保留時間）などがパラメータとなる。図2.8-1をトラフィック理論式にモデル化すると図2.8-2になる。図2.8-2は、入りの待ち行列、サービス窓口から成り、この一般的なモデルを表わすのにA/B/Sといったケンドールの記号が使われる。ここで、Aは呼の発生間隔、Bはサービス時間、Cは窓口の数（回線の数）である。入りの待ち行列には、電話のサービスを待つリクエストがキューイングされ、サービス窓口、つまり、通信網で処理されるのを待つ。このモデルでパラメータを変え、どの程度の呼の発生の場合に、何本の中継線を用意すれば、どの程度の待ち時間で利用できるかという計算を行う。

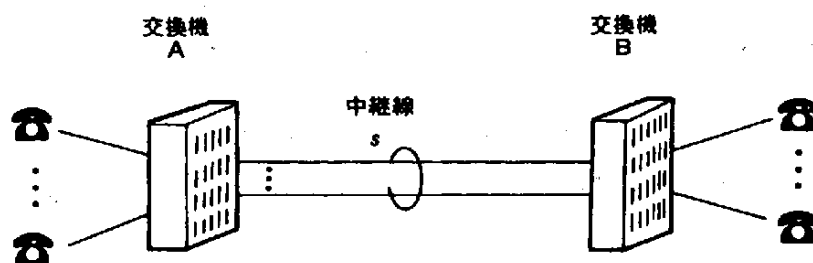


図2.8-1 何本の中継線が必要か？

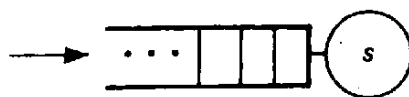


図2.8-2 待ち行列モデル

これまでの理論では、呼の発生間隔やサービス時間が共に指数分布に従うという前提で、第一にマルコフモデルを考えてきた。また、非マルコフモデルとしても、ある

時点でマルコフ性の成立する隠れマルコフチェーンとして処理してきた。いずれにしても、その視点はマルコフモデルが中心である。これは、従来のネットワーク、例えば、電話網や古典的なX.25パケット網などでは力を発揮してきたが、インターネットでは、これが成り立たなくなっている。即ち、インターネットの設計者は、実際には"エイヤ"とネットワークを設計するのであり、トラフィックの予測の基に設計したり、事前にネットワークの振舞いを解析する手段を持たない。その原因は、インターネットにおける"あやしげ"なトラフィックの自己相似性にあると言われている。

(2) 自己相似性

実際にインターネットのトラフィックを観測すると、そこには自己相似性があるのではないかと思わせる場合がある。例えば、さまざまなスケールにおいてパケットの

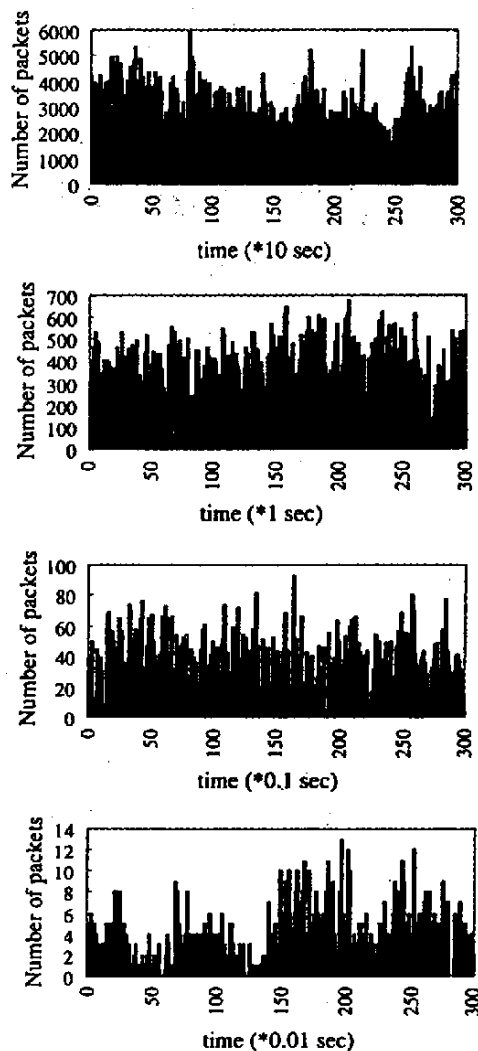
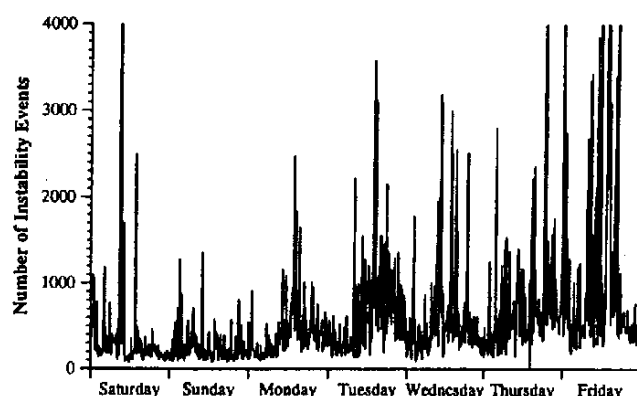
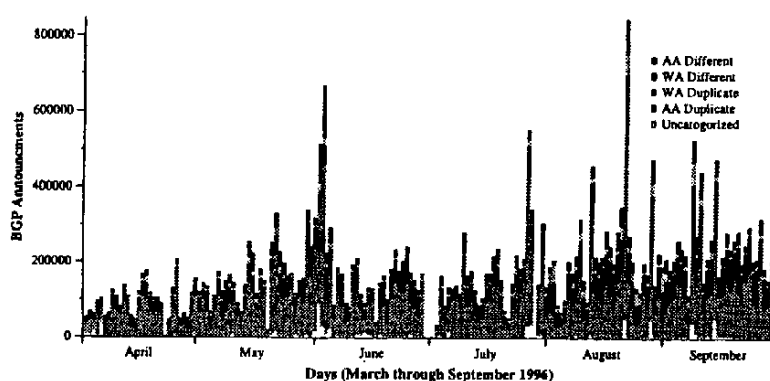


図2.8-3 異なったタイムスケールにおけるパケット到着数

発生個数を観測すると図2.8-3のように直観的には自己相似ではないかと思わせる場合がある。また、図2.8-4のようにインターネットの相互接続点における経路情報においても、自己相似ではないかと思わせる場合がある。前者は、各コンピュータから発生するデータのトラフィックであり、後者は、データを運ぶトラフィックではなく、インターネットのどこにどのネットワークが接続されているかというトポロジの情報である。インターネットでは、刻々と変化する世界のネットワークトポロジに追従するため、各交換機が経路情報を交換しあって、全部の交換機が世界地図を持つような仕組みになっている。この地図によってデータ（パケット）は目的のコンピュー



(1) 相互接続点における経路情報数の変化（一週間）



(2) 相互接続点における経路情報数の変化（半年）

図2.8-4 相互接続点における経路情報数の変化

タまで複数の交換機によって運ばれる。以上のような観測から、代表的なネットワークの研究者である米国BBN研究所のCraig Partridgeは、"この結果の持つ意味は、データトラフィックを表現するために我々が何年にもわたって用いてきた典型的なトラフィックモデルがひどく誤まったものであったということである"と述べている。

この自己相似性の原因が何であるかについては、さまざまな議論がある。例えば、ビデオのトラフィックはそのストーリーが関係してるのではないかという議論もあるし、それは関係ないという議論もある。また、そもそも自己相似性自身が疑わしいという議論がある。そのような意味で、この現象は、解明が始まったばかりで、新しいトラフィック理論の成立までには、時間がかかると思われる。現在は、さまざまな場所で長期的にデータを収集して解析が行われ、これから新たなトラフィックモデルが提案されようとしている時期である。その意味で、"あやしさ"を取り入れた新たなパラダイムの誕生が期待できる。

2.8.3 ネットワークの自己組織化について - 複雑系を創る -

次に、視点を自律適応型ネットワークに移し、単一のネットワークの自律的進化を可能とするシステムについて、具体的研究事例を論じる。

(1) 非平衡ネットワークモデル

非平衡ネットワークモデルは、筆者がネットワークの自動最適制御法について考えていた頃に提案したネットワークモデルである。従来のモデルは、ネットワークを静的なものに見なし、古典的トラフィック理論による計算の結果に基づいて非常に長い期間を見越してネットワークの構築を行ってきた。即ち、従来は将来のトラフィックやその発生パターンを推定して長期的な設備計画を行い、それに従って、ネットワーク構築や変更を人間がやってきた。このため、ネットワークは、短期的、中期的には状況の変化によって動的に変化することはない。

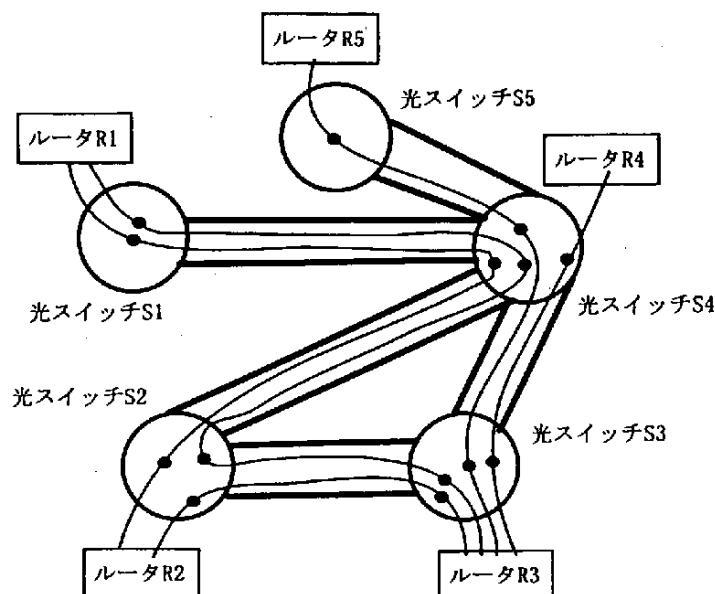
一方、非平衡ネットワークモデルでは、自己組織化を、その中心原理とし、ネットワーク自身が動的にトポロジを準最適な状態になるように常に変更する。そのトポロジを決定するのは、末端に接続されている各コンピュータが発生するトラフィックである。このネットワークは、いくつもの局所的な準安定点を持ち、コンピュータの非決定的なふるまいによってトポロジが変化する。

(2) 自己組織化するネットワーク

ここでは、非平衡ネットワークモデルを実現するアルゴリズムの概要を説明する。もし、"自己組織化"を"複雑性"の特徴の一部として考えて良いならば、この議論は、

複雑系という話題にふさわしいものとなると思われる。

ここでの対象は、光の地域ネットワークである。即ち、適当な数の光ファイバが適当な地点を接続して都市の中を走っており、ファイバは、各町などに設置されている光の経路の接続を変更できるスイッチへ接続されているものとする。これを図2.8-5に示す。ファイバの数は有限であるが、これまでの設計法と異なり、その数やトポ



ルータR3からルータR1への経路は本来最短のスイッチS3→S4→S1となるべきであるが、S3とS4の間のファイバの最大経路（波長）数が2なので迂回経路S3→S2→S4→S1を通っている。しかし、S3からS4までのファイバが空けば、最短経路に経路が張り直される。S2とS4のスイッチでは、それぞれ、1本、3本の経路が通過している。その経路に対するスイッチの動きは単なる中継装置である。

図2.8-5 光ネットワーク

ロジは適当に決めて良い。つまり、ドンブリ勘定でネットワークを初期設定することになる。一本の光ファイバにはさまざまな波長の光が有限個入れられるが、ある町に入る特定の波長の光はスイッチで通過せられ、その町では使用できない場合もある。これは、別の町への単なる中継経路として使用される。ここでの目的は、このような帯域の割り当て（光ファイバや光の波長の割り当て）を、これまでのような固定的な設計によるものではなく、町の間でのトラフィック需要によって動的かつ準最適に割り当てようというものである。ある町でのトラフィックが0であっても、その町を通るファイバは、別の町へトラフィックを運ぶ媒体として使用されるので、無駄にはならない。また、ある町への直通経路のファイバがいっぱいになっても、別の町のスイッチを通過させて別の経路を並列に接続することにより帯域を増加させることができるという自由度がある。

この自己組織化では、スイッチが重要な役目を果す。各スイッチは、近傍のスイッチとのネゴシエーションによって帯域あるいはトポロジを変化させる。光ファイバには帯域の制限があり、スイッチには接続できる光ファイバの数の制限がある。このため、資源配分の問題が発生し、必ずネゴシエーションが必要となる。別の見方をすれば、ネットワークのトポロジが、資源の限界と需要との間でバランスすることになる。それは最適な点でバランスするのではなく、いくつかの局所的な安定点のうちの一つに落ちつく。

(3) 自己組織化のアルゴリズム

スイッチ間では、新たな経路が必要となった場合には、光ファイバ内の波長の数の上限にも考慮しながら、効率的な通信（ここでは、その基準をより小さなホップ数とする。しかし、より大きな帯域とすることも可能である）が行えるように近傍のスイッチ間でファイバ、あるいは、ファイバ上の波長を割り当てる。これは、自己組織化の成長のフェーズである。

一方、利用度の低くなった経路については、ファイバあるいは波長が取り上げられ、それが別の経路のために使用されることがある。この淘汰は、近傍のスイッチ間のトラフィックまで考慮し、長期的戦略によって行われる。それは、資源の割り当てや回収のような急激なトポロジの変化が短期間に繰り返されると、ネットワークが常に安定しない状態に陥る危険があるからである。

以上のような成長と淘汰によりほぼ適切なトポロジとなるように、資源の割り当てが行われる。従来のネットワーク設計構築が計画経済的な色彩の濃いものであったのに対し、この方法はネットワークに市場経済的なパラダイムを導入することになる。

(4) 近傍系

これまでのアルゴリズムを実現するためには、何らかの指標が必要である。ここで導入するのは、物理近傍と論理近傍という概念である。前者は、光で接続されたスイッチ群のうち、スイッチ間の物理的結合度が強いものの集合である。例えば、その結合の強さを表わす指標には、

物理的距離（ホップカウント）

ファイバ内の光の遅延、帯域

などがある。一方、各町を結ぶ特定のスイッチ間のトラフィックにはローカリティが認められる。例えば、隣町のコンピュータとはよく通信するが、隣接しない町との通信量は少ないなどである。このローカリティを持つスイッチの集合を論理近傍と呼ぶ。論理近傍の強さは、以下のような指標で表わされる。

トラフィック量
パケット数

非平衡ネットワークモデルでは、物理的な近傍の関係が論理的な近傍の関係に近づくように各スイッチが接続（ファイバの割り当てや波長の割り当て）を変更してゆく。しかし、ネットワークが有限の資源からできているために、各スイッチ間のトラフィックと物理的な近傍は必ずしも一致させることができない。

ここで、物理近傍と論理近傍との差をポテンシャルエネルギーと考える。それは、物理近傍が論理近傍へ近づくようにする力が常に働くからである。図 2.8-6 にそのイメージを示す。物理近傍は、論理近傍との差、つまり、ポテンシャルエネルギーが低い点を求めて移動する。ポテンシャルエネルギーの局所安定点に落ちこみつつも、新たな通信相手の発生という要因によって遷移が行われ、別の局所安定点に移動する。以下では、そのアルゴリズムを具体的に説明する。

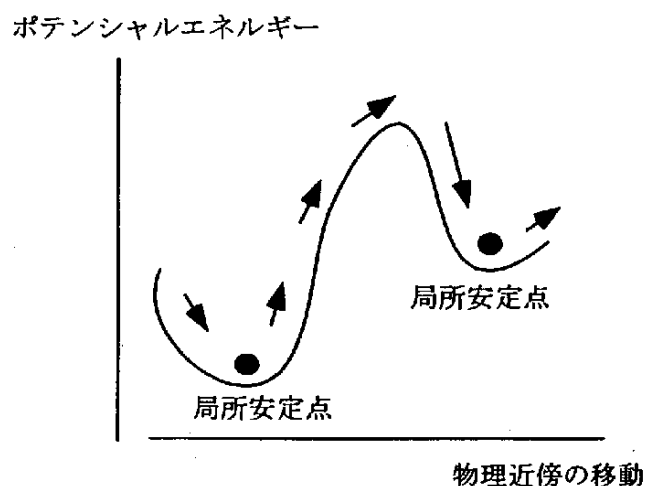


図 2.8-6 局所安定点

(5) 成長フェーズ

トポロジの変更には、いくつかのフェーズがある。まず、あるスイッチがこれまで接続のなかったスイッチと接続を行う成長フェーズである。接続された光の経路の途中に別のスイッチが入っても構わない。ただし、そのスイッチは、光を中継する透過的なスイッチとなる。このフェーズでは、冗長性や有効利用率にかかわらず、とにかく直ちに接続することが重要である。接続が行われない限り、要求された通信ができないからである。

もし、スイッチのインタフェースに資源（空いた光ファイバや帯域）がなければ、論理的近傍の関係にあるスイッチとのネゴシエーションを行い、近い順に近傍のスイッチから目的のスイッチへの経路生成（光の波長の割り当て）を行う。

（図2.8-7）更に、そのスイッチが最終目的のスイッチへ光を中継するようにネゴシエーションを行っておく。この物理的近傍の成長によって、新たなスイッチが近傍に加わったり、離れていた近傍同士がオーバーラップするようになる。例えば、図2.8-7では、①②③の順に接続を試る。

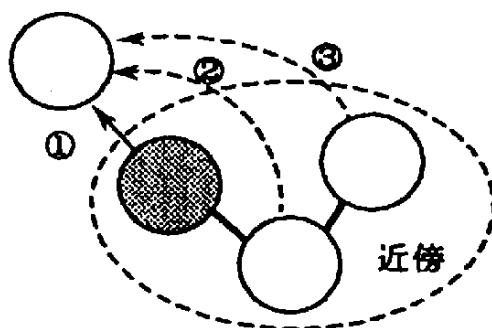


図2.8-7 成長フェーズ

（6）最適化フェーズ

近傍の成長フェーズはできるだけ早く接続を完了することが最優先であるため、準最適なトポロジから外れた状態になりかねない。また、トラフィックは常に変動しているため、これに合わせたトポロジの変更が必要になる。これを行うのが、最適化フェーズ、つまり、ネットワークが局所安定点へ移動するフェーズである。ここでは、以下のように、論理的な近傍を物理的な近傍にするための接続や、冗長な接続を切断してリンクの淘汰を行う。

1. 最適な経路を確保するための新たなスイッチ間の経路を割り当てる。
2. トラフィックが高い接続に対する並列の経路を割り当てる。
3. トラフィックが低く必要性の薄くなった資源（経路）を開放する。

この例を図2.8-8に示す。各スイッチでは、表2.8-1のような経路表をもつ（この経路表は、スイッチAのものである。なお、ルータと書いてある覧はスイッチに読みかえていただきたい）。ここでは、物理近傍の関係の強さを評価する値として、ホップカウントだけを挙げた。ホップカウントが2未満のものを物理近傍と考えると、ノードB、C、DがノードAの物理近傍となる。次に論理近傍を考える。その評価値として、ここでは簡素化のためにパケット数だけを考慮する。もし、単位時間あたりのパケッ

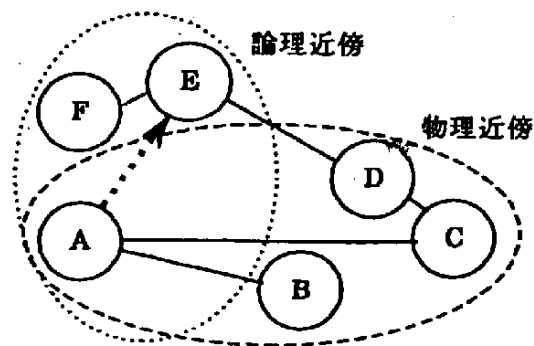


図 2.8-8 最適化フェーズ

表 2.8-1 スイッチAの経路表

転送先	ルータ	ホップカウント	パケット数
B	B	0	300
C	C	0	6,000
D	C	1	4,000
E	C	2	50,000
F	C	3	40,000

ト数が10,000パケット以上のものだけを論理近傍とすれば、ノードAの論理近傍は、ノードEとFになる。

ノードAでは、物理近傍の集合{b,c,d}と論理近傍の集合{e,f}を比較する。この結果、差集合の{e,f}のうち、もっとも大きい評価値を持つ論理近傍Eへの経路を新設する。この結果aとeとを媒介して、それらが含まれる2つの近傍がオーバーラップすることになる。もし、接続に失敗すれば、ノードeの物理近傍ノードが持つ空きファイバあるいは空き波長のうち、最も近いもの（例えば、スイッチfのインタフェース）を選択して接続を試る。

逆に切断の場合には、論理近傍と物理近傍の差集合{b,c,d}のうち、評価値がある基準以下の物理近傍スイッチ（例えば、B）への接続を切断する。但し、当該スイッチへの並行経路が存在しない場合には、極力切断を行わない。それは、最接続要求があっても、必ずしも成功するとは限らず、bが孤立する恐れがあるからである。また、判定から切断まで十分な時間を置く。このことは急激なトポロジの変更による発振を防止し、安定性を確保する意味がある。

(7) 特 性

以上のような非平衡ネットワークの特性が、どのようになるかを解析した研究が防

衛大が学校によって行われた模様であるが、残念ながら、現在の時点でその論文を見つけることができなかった。いずれにしても、これまで説明した自己組織化のアルゴリズムの健全性の検証を行わなければならない。また、トポロジがトラフィックによって変化するということは、すでに述べたインターネットにおける"あやしい"自己相関性がトポロジ変化にも現われることを意味しており、その影響を見きわめる必要がある。

このようなパラダイムが自己組織化("もどき")を可能とする一方、これまでの、システムの安定性、安全性という見地からは、大きい危険をはらんでいることは否定できない。例えば、何もメタな制御をしなければ、経済で言うところの、景気の停滞や過熱に相当するものが発生すると予想される。その場合のメタな制御をどうするかは更なる研究にまかせなければならない。そのメタな制御が自己組織化に常につきまとう問題、即ち、自己言及になり、ソフトウェアで言うリフレクションのタワーに陥る恐れがある。その点でも、上記のアルゴリズムは未完成である。

2.8.4 インターネットワークの生成、進化

本セクションでは、どのようにインターネットが進化しているかということについて、そのダイナミクスを簡単に説明する。前のサブセクションでは、自律適応型のネットワークについて述べたが、人間まで含めて言えば本セクションで説明するネットワークも自律適応型の一つと言える。但し、それは、情報科学ではなく経済学的な枠組の中で語られるべきものである。

(1) インターネットにおける生成、進化、崩壊過程

1990年代に入り、インターネットの中心は、それまでの米国科学財団のNSFnetにかわり、民間のインターネットプロバイダへと移行した。特に、米国における多数のプロバイダの出現、成長、淘汰、合併という栄枯盛衰は、情報科学的な視点よりも、むしろ経済活動の一例として眺めるほうが自然であろう。経済学方面では、複雑系を取り上げる場合に、その特性として限定合理性、経路依存性、収獲逦増などのキーワードで語ると言うが、この例は、それを表わす例題と言えるかもしれないと思い、参考のためにここに示す次第である。

(2) 民間インターネットプロバイダの出現

ここで具体的に、インターネットプロバイダがどう発生し、統合されてきたかを説明する。まず、NSFnetがインターネットの中心としてトラフィックを中継する時代が終わり、ANS社、Sprint社、MCI社を代表とする複数のバックボーン（これらを

NSP=National Service Providerと呼ぶ)が鼎立する時代となった。次に、その周囲にこれらのネットワーク配下でローカル接続サービスを行うISP (Internet Service Provider)が発生している。即ち、第一段階では、いくつもの核が並存し、その配下に階層的にISPが存在する状態となった。(図 2.8-9) 各ISPがどのNSPの配下に収まるかは、さまざまなパラメータ、例えば、料金、地域性、コネなどによって合理的あるいは非合理的に決定されたものである。しかし、時間とともに、上流のNSPを変更する等の、トポロジの動きが激しい。その意味で、このネットワークはダイナミックであり、非平衡である。

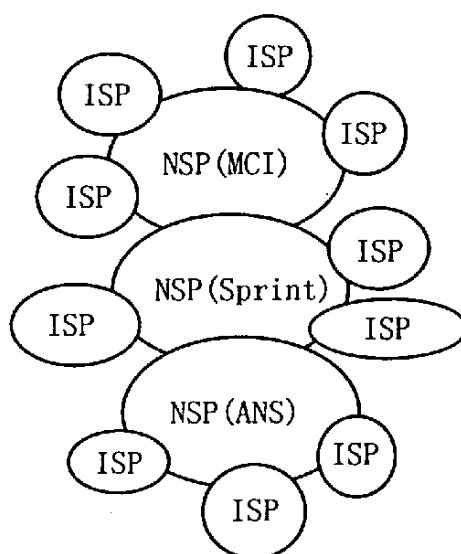


図 2.8-9 プロバイダの発生

(3) 統合と淘汰

次の段階では、ISPの買収が開始された。例えば、地域サービスを行うISPの一つであったBBN社は、Surfnet、Barnetなどの他のISPを買収し全米のサービス即ちNSPのサービスを開始した。また、NSPの中には、ANSのように二度も買収され、事実上、崩壊したプロバイダもある。(図 2.8-10) 最近では、UUNETとMCIのWorldcomによる買収のようにNSP同士が第三者によって融合する例が出てきている。もちろん、小規模なプロバイダの中には廃業によって崩壊したものもある。つまり、これによって、これまでのNSP、ISPという階層の垣根があいまいになったことになる。

上記のようにインターネットプロバイダはそれにかかわる人間全部を含めるとグローバルに成長、進化、崩壊などを経て自己組織化を行うネットワークと見なすことができる。但し、再度、ここで言うが、これらは、情報科学の範疇をはみ出している。

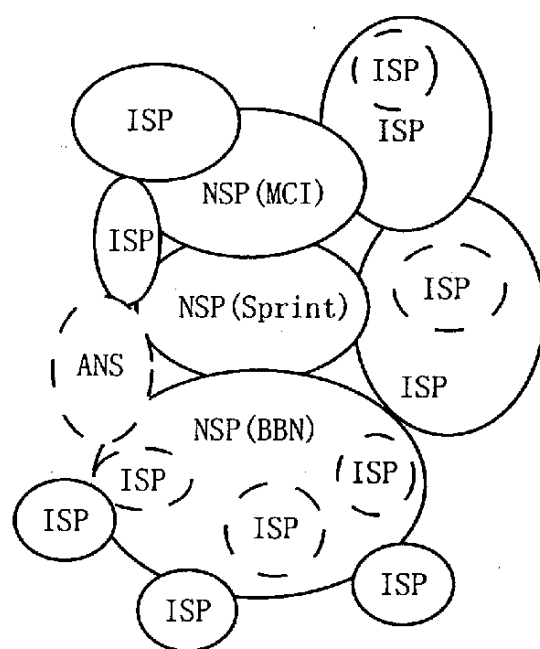


図2.8-10 プロバイダの統合と淘汰

2.8.5 おわりに 一複雑系との係わりー

筆者が困惑しているのは、まず、複雑系の定義である。サンタフェ研究所の物理学者、マレーゲルマンによれば、"多数の構成物が同時に相互作用することから生じる自己組織化の予測、つまり、システムの構成物が相互作用する無数の可能な状態を計算すること"だそうである。しかし、この定義では、ネットワーク工学の片方の面、即ち、ふるまいを説明したり解析したりすることしか対象に入らないと思われる。ネットワーク工学のもう一つの面、ある設計モデルに基づいて複雑系のシステムを創造することに対しては、その設計に指針を与えていない。

そこで、筆者は、どのようなアルゴリズムが"役にたつ"複雑性を生成できるのかという点について、さまざまなアプローチをやるべきであると考え。この複雑性の合成で心配するのは、実際のコンピュータネットワークにそれを導入した時、たとえ相当の覚悟をした人にも耐えがたいような不安定性を一時的に示すのではないかという点である。逆に、その凶暴さを押えるアルゴリズムを導入してゆくと、最後には、複雑系とは言えない普通のネットワークになってしまうのではないかと考える。このため、その複雑性の度合を制御する何らかの方法も一緒に考えることが必要になってくるのではないだろうか。

2.9 主体を含む複雑系のリサーチプログラム ー社会経済システムへのアプローチー

出口 弘委員 (京都大学)

本稿では、主体を含む複雑系のリサーチプログラムに関して、これを自身の研究に関連して概括することを試みる。

そこではまず、自然科学的な認識枠組みと自律性を持ったエージェントからなる社会集団の解析とのシステム認識の差異を、システムの法則の立て方とそこでのミクロ、マクロ解析のあり方の差として捉え、それを図式化して説明する。

その上で、エージェント指向のシステムの分析の手段としてとして、まずレプリケータダイナミクスという力学系を用いた解析を行う。力学系の分岐という立場から、レプリケータダイナミクスの構造変動を問い、それが社会的制度とどのように関連するかを理論、数値シミュレーション、ゲーミングの三つの観点から論じる。また本稿では、レプリケータダイナミクスを導くようなエージェント間のミクロ相互作用へのマクロ的観点からの影響（ミクロマクロリンク）を、構造パラメータによる間接制御という観点から捉え、エージェントの行動をマクロ的なある厚生基準にたって間接制御するための制度デザインのための枠組みについて分析する。

次に我々はレプリケータダイナミクスのような時間発展作用素によるシステム記述に代わるものとして、エージェントの自律的探索能力を重視したアプローチとの差を分析し、両者を統合するような枠組みについての可能性について論じる。そのために本稿では、制約充足型のシステム記述に着目する。その上で多主体複雑系に関してこのマクロミクロリンク、構造変動、間接制御の問題を制約充足問題の中でどのように扱っていくかについての基礎的なモデルについて論じる。

更に、主体を含む複雑系で重要な、状態空間の豊富な記述の重要性を、経済システムを例にとってこれを論じ、交換代数によるシステム記述の重要性について簡単に説明する。

キーワード：

レプリケータダイナミクス、ゲーミングシミュレーション、ミクロマクロリンク、多主体複雑系（ポリエージェントシステム）、構造安定性、制約充足問題、交換代数、バーチャル経済

2.9.1 はじめに

創発的特性を示すシステムの多くは、自律的エージェント集団からなるシステムである。このエージェント集団の最適化活動を特徴付ける方法としては遺伝アルゴリズムなど幾つかの方法がある。このエージェント集団の自律性を前提として、そのダイ

ナミックな変化や構造変動を分析しようとする、何らかのルールに従って活動し、そのルールそのものも学習によって変化するような、学習、進化するエージェントの記述が一方で用いられる。このようなエージェント集団の分析法としては、遺伝アルゴリズムや、クラシファイア、あるいは様々な強化学習の理論が用いられる。

しかしこれらの枠組みは現状ではまだ理論分析のための枠組みとしては取り扱いが難しい。また近年では強化学習の理論も進んでいるが、構造変動や自己組織化の議論を行うことはそのままでは難しい。これらのアプローチは主にエージェントの自主的探索能力を重視した記述になっている。そこでこれを発見的探索型システム記述と呼ぼう。

他方で、80年代に盛んに行われた、自己組織化や散逸構造といったシステムの構造変動のパラダイムは、その前提として力学系によるシステム記述というシステム認識があった。これは自然科学の法則のように状態空間上の何らかの時間発展作用素の形で法則が表現でき、その定常解が時間発展作用素の平衡解として表現できるクラスの問題に対しては非常に強力な技法であった。構造パラメータの変化による力学系の分岐を構造変動、自己組織化と捉える視点は、主に自然科学領域を中心に多くの具体的な適用領域を見いだした。しかし、この枠組みを、個人や組織と言った主体、自律的エージェントからなる集団に適用しようとするとき、どのようにして力学系を求めるかが問題となる。これには、メイナード・スミスらが生物学の領域で開発した、進化ゲームによるシステム記述の手法があり、本稿ではこれを用いながら社会集団でどのようにして、代替案選択に関する力学系を導くことが出来るのかを説明し、その構造変動分析を行う。この自律的エージェント集団に対して、ともかくも力学系を導き、自然科学的構造変動の手法を援用するアプローチを時間発展作用素型のシステム記述と呼ぼう。

このレプリケータダイナミクスと呼ばれる力学系は、しばらく前から進化経済学の領域で使われているが、そこでの利用方は本稿で論じるような構造変動に関する分岐を論じるものではなく、その意味で本稿のアプローチは新しいものである。

だが現状ではエージェントの自律性やその集団の中で生じてくるマクロ特性、制度やマクロな働きをするエージェントの形成（制度創発）、何らかの形でそのマクロ特性を集団の中で自己制御しようとする機能をどのように整理し理論化していくかについての研究プログラム自体が十分に整理されているとは言い難い。

我々はエージェント集団のミクロマクロリンクを含む制御モデル、とりわけエージェントの自律性を前提とした間接制御の概念や、エージェントが自己や環境に関する知識を表現するために構成しその活動のために参照し或いは相互参照する内部モデルなどのシステムの性質を明確にするようリサーチプログラムを打ち立てる必要がある。そのためには、とりわけ自律的エージェント集団の構造変動を含む制御モデルを明確な形で定式化する必要がある。

ここで我々は理論と実験の両面からのアプローチを試みた。理論分析としてはエージェントのミクロモデルをゲーム理論やリスク下の意思決定で特徴付け、そこから導

かれるマクロレプリケータダイナミクスの分岐理論（自己組織化）を利用したアプローチを行った。更に実際の人間集団を対象とした実験枠組みとしてゲーミングシミュレーションによるアプローチを試みた。これは人間がプレーヤとなって人工的に設定された役割をプレーするアプローチである。

だがこれらのアプローチを通じて、同時に時間発展作用素型のアプローチの限界もまた明かとなる。そこで我々の次の課題は、この時間発展作用素型のアプローチが持つ、構造変動に関するパースペクティブなどをひきついだ形での、発見的探索（ヒューリスティックサーチ）型のアプローチを導くことである。エージェントの探索という活動は、時間発展作用素を包摂するより広いクラスの問題設定を含んでいる。探索能力が非常に高いグローバル探索能力をエージェント或いはエージェント集団が持つならば、局所最適、つまり力学系でいう局所解はそもそも陥らない。だがまた探索能力が片寄っていたり、低かったりすれば、通常の時間発展作用素よりも遥かに能力の低い、容易に局所最適につかまってしまうような探索能力を持つエージェントのダイナミクスも考えられる。これら探索問題の広いクラスを含むシステム記述として、我々は制約充足型のシステム記述に着目し、その可能性を論じる事にする。

2.9.2 エージェント集団のマネジメント観

我々は自律的エージェント集団のマネジメントの方法論的枠組みとして、マクロ的な役割を持つエージェントなどマクロミクロリンクを可能とする主体的エージェントを含む、ヘテロなエージェント集団からなマルチエージェントシステムである多主体複雑系（ポリエージェントシステム）という概念枠組みを用いる[3]。本稿では我々のモデル作成に対する概念枠組みを図式化して考える。まず通常の自然科学的なモデル観の中でミクロマクロ関係を含むようなシステムの認識は図2.9-1のように示されるだろう。ここでは図の左側が系のミクロの状態記述と法則の有り様を、右がマクロの状態記述と法則の有り様を表している。自然科学的なモデルでは、ミクロな状態記述は粒子や局所的な場の状態記述の形で与えられる。また対象領域の一般法則が自

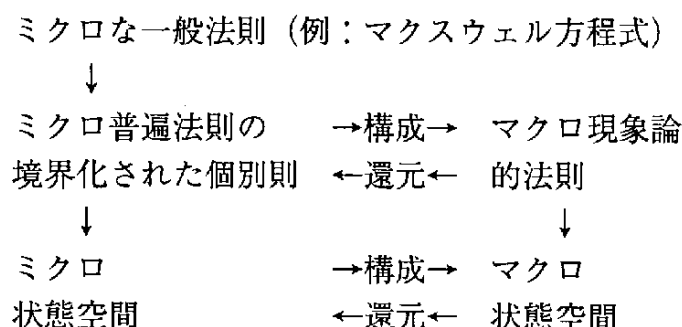


図2.9-1 自然科学のモデル観

然法則として知られているならば、それを個別状況に応じて境界化することで個々の問題、用状況に応じた法則が得られる。他方ミクロな状態から構成されるマクロな状態に関しても、マクロな現象論的方程式が得られ、これらは原理的にミクロな法則に還元される。或いはマクロな状態や法則はミクロのそれから構成されると見なされる。

この自然科学的なモデル観では、また得られた法則や状態空間の変化は、測定機という物理装置上で、目盛りという形で視覚的に外延化され、相互主観化された空間上で解釈される。いわゆる実験による解釈である。自然科学ではこの二つのリアリティが我々が主に扱うべきリアリティとなる。それゆえ社会的に構成された認識のあり方としてのリアリティつまり、社会的に構成されたリアリティ (Social Constructed Reality) については、自然科学は殆ど何も言及しない。実際の社会への自然科学的知識の応用では、それが社会的に構成された現実とどのようにかわるかもまた多くの工学的議論では、議論の範疇の外である。

これに対して、意思決定主体を基本的なミクロ単位とする社会科学のモデルでは、モデル観を表す図式が異なる形になる。これは図2.9-2のように示される。

ここでも、左が系のミクロの状態と法則記述、右がマクロの状態記述を表している。また上下の関係は階層的な状態と法則記述とその上の相互作用則の記述の関係を意味している。これと図2.9-1の自然科学的認識図式との最大の差異は、意思決定主体を含むシステムでは、代替案空間と代替案選択の結果得られるペイオフのような基本的状態の二つの状態空間があると考えなければならないことである。

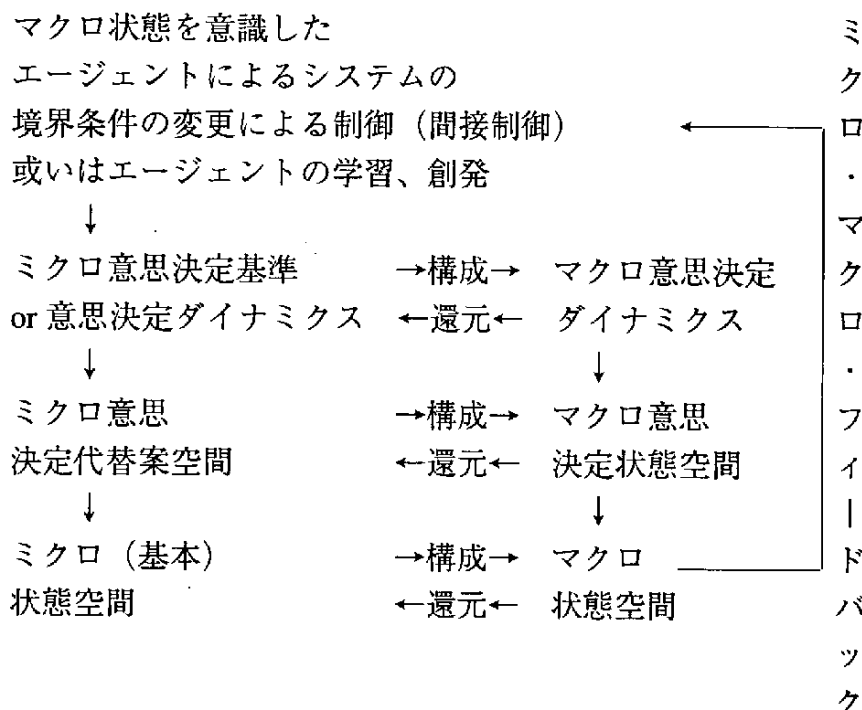


図2.9-2 ポリエージェントシステムのモデル観

主体を含むシステムでは、自然科学のような普遍法則を求めるには無理があり、通常何らかの意思決定基準を前提にして議論を進める。そこでは代替案空間という状態空間と、代替案の選択の結果生じる状態変化に関する基本的な状態空間の2種類の空間を扱っている。

これは例えばゲーム理論では代替案空間とそこでのペイオフの値の空間を意味し、現実の経済では企業の取引という形の代替案選択とその結果の簿記的記述で測定される企業の状態の変化を意味する。

上位の状態空間としての代替案空間は、そこでの代替案という状態が定まることで、他のエージェントとの相互作用などが定まり、結果として下位のグラウンドの状態空間の値が定まる。その意味では上位の状態空間は下位の状態空間を支配している。ゲーム理論では、ゲームの代替案の選択の結果、ペイオフが定まり、企業の活動では取引が定まれば、財の状態空間が変化する。

この代替案空間の状態を決定するのが、その上位の意思決定基準にあたる層だが、意思決定原理は普遍法則から導かれず、意思決定基準そのものが学習によって変化したり新しい基準を導入するなどの変化を起こし得る可能性も問題とされる必要がある。この意思決定基準は通常多くのものがあり、エージェントが全て同じ意思決定基準に従う保証はなにもない。それどころかこの層が学習などで容易に変化するのが主体を含む複雑系の大きな特徴である。

これら主体を含むシステムに関する我々の基本的な興味は最終的にはこの最下層の状態空間の変化にある。ゲーム論ではペイオフの値が問題となるし、企業もその会計状態で示される財務状態で評価される。またしばしばエージェント集団のマネジメントにとっては、マクロな（社会的）状態空間の値がある範囲になるような厚生基準に照らして政策変数を制御し、エージェントの行動を間接的に変えるようなインセンティブ設計が重要な意味を持つ。

この我々のモデル観から幾つかのリサーチプログラムが見えてくる。一つは、下位の基本状態空間の構造をどこまでリッチなものにして、対象の複雑系をモデルの中に表現できるかを問う方向性である。これを状態空間の記述の豊富化へ向けた研究プログラム（State Space Rich Description）と呼ぶことにする。状態空間の記述の豊富化は、実際の経済システムのような複雑系を記す為には必須の作業である。

この方向のアプローチは、そもそも経済システムや社会システムがどのような形で記述できるかという、経済社会システムに対する解剖学的分析に一つの起源を持つ。これは、ケネーの経済表に始まり、産業連関分析を経て、現在のSNA（System of National Account：国民経済計算）やSAM（Social Accounting Matrix：社会会計行列）へとつながる流れである。経済システムの実体を、単なるペイオフの集合で表現できない以上、経済社会システムの複雑性を扱うためには、経済社会システムを表現できるだけの基底的状态空間やそこでの代替案集合の構造分析を行う必要がある。経済学ではこのアプローチは、マクロにはSNAの歴史の中に見て取ることができる。だが経済システムのマクロ状態記述と同様の社会状態記述を構成しようとした、国連の社会人

口統計 (SSDS) は結局成功しなかった。経済社会システムに関して、どのような状態記述を構成することが政策的に必要とされるかに関しては、今日でも多くの課題が残されている。とりわけ、環境問題など従来経済外部性の名のもとで体系から切り離されていた、諸社会インデクスを改めて中枢の状態記述の体系の中に取り込むことが必須となる。

そこでは情報コミュニケーション革命下での新しい地球社会の制度設計を行うために、環境や技術進化の度合いなど新しい形での社会厚生基準を構成し、その上で必要とされる状態記述を構成することが必須となる。このような問題意識そのものは、今日では広く見受けられるようになってきて。米国のGPIや英国のグリーンインデクスなどの取組も新しい豊かさの尺度を求める取組の一つである。国連によって策定作業が終了したばかりの93年SNAの中では、サテライト勘定という形で様々な外部性が扱われているが、その構造化は十分ではない。

これらは、いわばマクロの状態記述のアプローチであるが、本来複数のエージェントからなる主体を含む複雑系では、システム全体を特徴付けるマクロの状態変数は、当然ミクロの個々の状態変数にグラウンディングされる必要がある。しばしば誤解されるところだが、システム分析や複雑系の議論は反還元主義であるという理解がある。これは、物理法則のような一般法則に還元しても、上位の独立性を持ったルールによって動くシステムの説明にはならないという意味では正しい。ただし、そのような自律的エージェントからなる更に上位のシステムとして社会全体のあるマクロ変数やそこでのマクロな変化を問題とする時には、我々はそれを個々のエージェントのレベルに必要なに応じて還元して理解することが極めて重要となる。

とりわけ社会全体を特徴付けるようなGDP、消費、貯蓄を始めとする様々なマクロな状態変数は個々の経済主体の取引レベルの変数へ本来はグラウンディングされるべきであり、その他の諸社会経済インデクスについても同様のことが言える。これが我々が図2.9-2で示したようなマクロな状態とミクロな状態をつなぐ還元の意味である。これは個々のエージェントのミクロの基底状態記述からマクロのグラウンドレベルの状態記述を構成する。或いは代替案空間でも個々のエージェントのミクロ状態記述からマクロの状態記述を構成する作業が重要となることを意味している。この状態空間の複雑性に関する、状態空間の構成問題に関しては、実際の経済システムの記述枠組みを拡張する例も含み2.9.7項と2.9.8項で扱う。

我々は社会的ななんらかの厚生基準に従って問題解決を行うための制度設計の論理を系統的に問題とする必要があると考えている。これはマクロには総利得 (社会の総ペイオフやGDPなどのマクロ変数) の値をある水準に維持することなどが制御目標になることを意味する。その際、我々は構造変動の論理に着目する。構造変動の論理を系統的に扱う手法として現在標準的に利用できるものに力学系の分岐理論がある。分岐理論を利用したモデル化では、何を構造変動を導く分岐パラメータと考えるかと、どのような形で個々のエージェントの意思決定からマクロな力学系を導くかという問題がある。前者の問題には、例えば二つの可能性がある。一つは市場不確実度のよう

な外的な環境変化が分岐パラメータとなってエージェントの意思決定のパターンを構造的に変化させるケースである[10]。もう一つはミクロ・マクロを結ぶ政策主体がエージェントとして存在し、そこが制御する政策変数が分岐パラメータと見なせるケースである。本稿ではこちらを扱う。

ここから力学系を導くには、エージェント集団の平均利得とある代替案をとるエージェントの平均利得との差から、特定の代替案の人口比率を導くレプリケータダイナミクスというモデル化の技法があり、我々はこれを用いる[2]。そこではエージェントの局所的意思決定のメカニズムとして、ゲーム理論やリスク下の意思決定モデルが用いられる。

このアプローチを図式化すると次のようになる。これは進化経済学でしばしば用いられるレプリケータダイナミクスのモデルを我々の多主体複雑系の枠組みから捉え直したものである。

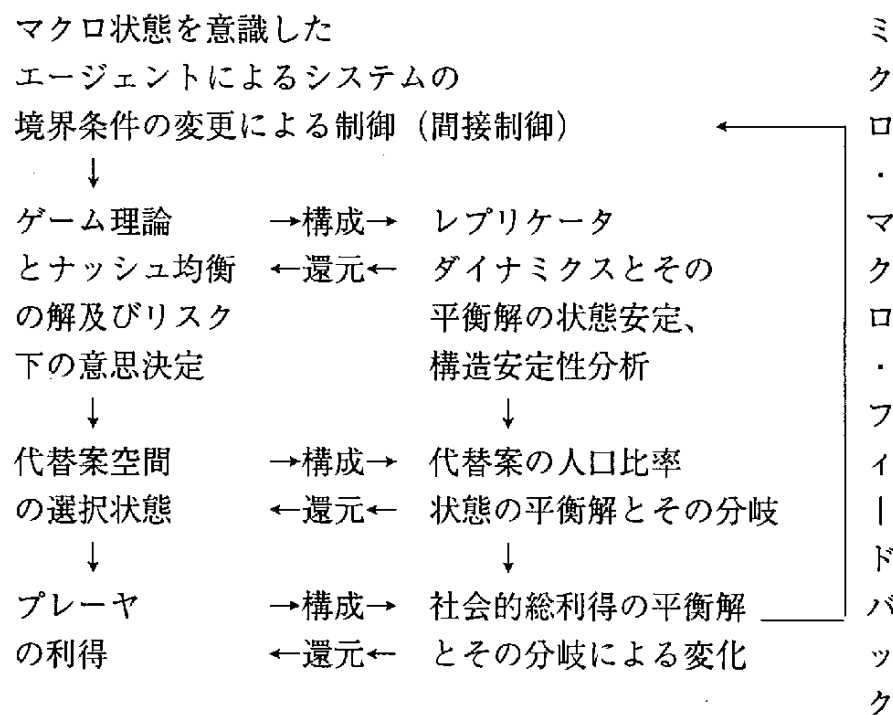


図 2.9-3 レプリケータダイナミクスのモデル観

以下で我々はレプリケータダイナミクスというエージェントの意思決定に関する一種のマクロモデルをエージェントの相互干渉を含む合理的意思決定のモデルから導き、その構造安定性などを分析する。

ただし通常の進化経済学的モデルに対する認識関心と異なり、複数の平衡解を含む相空間の間の構造転移（分岐）を構造変動として扱っている。これは通常のダイナミカルシステムの構造変動の定義に適合したものである。進化経済学ではしばしば平衡解の多型性そのものが構造の多義性を示すと解釈される。これはいわゆる自己組織化のパラダイムの標準的な解釈とは異なっている。散逸構造やシナジェティクスに代表

される自己組織化の議論では、分岐を持って構造変動と見做す。我々はこのより普遍的なパラダイムの解釈に従う[7]。解の多義性は初期値と経路に依存した（社会の）慣習の差異程度に捉える。

【複雑系に関する四つのリアリティ】

主体を含む複雑系を論じるには、上述のような手法に関する方法論的課題と同時に、我々がモデルを通じてどのようなリアリティを解析しようとしているかに関する分析も不可避となる。というのは、主体を含む複雑系では自然法則のような普遍法則を前提としないため、数理モデルのリアリティは、測定機によって構成される実験的リアリティと比較される。社会科学でもしばしば実験という言葉が用いられるが、これは本来の物理的実験のような測定機によって外延化される実験とは性質の異なるものが多く、それ自身の価値を否定するものではないが、一応区別して扱うべきリアリティの空間である。これに対して社会科学では社会的に構成された現実と呼ばれる、人間によって共有されるリアリティの世界がある。これが実際の社会現象では重要な意味を持つ。近年の組織の問題解決の理論では、ORのような合理的意思決定モデルだけでは、組織や社会の構成された現実を変化させることは難しいことが認識され、様々なソフトアプローチと呼ばれる技法が発展してきている。

我々にとって、社会の状態記述そのものは、我々にとって構成された現実としての側面を強く持っている。簿記による経済取引の記述は、相互主観的に我々自身が構成し、共有している事実認識の方法である。従ってこの認識を拡大することがエージェントの活動にとっても重要な意味を持つ。我々は後ほど、交換代数とその環境問題への適用の事例でこのことを検証する。

さて近年の複雑なシステムの分析にとって忘れることのできないのが、コンピュータ上での実験的分析である。これはコンピューショナルリアリティとでもいうべき新しいリアリティの世界を我々が手にいれたということを意味している。この計算機上での実験世界は、物理学でのカオスの発見に役だったし、今日の人工生命、人工社会の研究を支える重要なリアリティの空間であり、そこでの発見は大きな意義を持つ。更に今日ではこのコンピューショナルリアリティの世界が、バーチャルリアリティやネットワーク環境、更にはゲーム世界という形で我々の伝統的な生活世界と連続的なシステムとして急速にその存在感を増しつつある。

我々は後ほど、この人工社会でのファクトファインディングについても論及したい。

2.9.3 レプリケータダイナミクス型システム

レプリケータダイナミクスをエージェントの意思決定モデルから導くとき、幾つかのモデルを利用することができる。一つはエージェントの意思決定が外的な何らかのリスク下で（エージェント間の相互作用なく）合理的な意思決定を行うリスク下の意

思決定モデルである[7][10]。またエージェント間の意思決定に干渉がある場合は、ゲーム論的なモデルが利用できる[11]。更に場合によっては個々のエージェントは独立に個人合理性に従って意思決定を行うが、それが全体として個人の状態にフィードバックしてきて個人合理性と社会合理性が矛盾する社会的ジレンマのようなケースも我々は扱う必要がある[17]。しかし、本稿の範囲内では我々は、意思決定に関する相互干渉があるゲーム論的意思決定モデルと、外的モニタリングによるリスク下の意思決定モデルを重ね合わせたモデルを扱うことにする。

我々はまず対称型のゲームによって相互作用するようなエージェント集団としての社会を扱う。ここで例にするのは、下表のような囚人のジレンマ社会である。ただしこの社会は、N人のプレーヤがランダムマッチングで相互作用して意思決定を行うとする。

	C	D
C	(R, R)	(S, T)
D	(T, S)	(Q, Q)

囚人のジレンマの条件から、 $T > R > Q > S$ と、 $R > (T+S)/2$ が成り立つことを仮定する。ここでPを集団の中で協力解(C)を選択するエージェントの比率 ($0 \leq P \leq 1$) とする。標準的なレプリケータダイナミクスは次のようになる。

$$\begin{aligned} dP/dt &= P(W[C] - \bar{W}) = P\{W[C] - PW[C] - (1-P)W[D]\} \\ &= P\{(1-P)(W[C] - W[D])\} \\ &= P(1-P)\{P(R+Q-S-T) + S-Q\} \end{aligned}$$

ただし $\bar{W} = PW[C] + (1-P)W[D]$ 、 $W[C] = PR + (1-P)S$ はC戦略を取るエージェントの平均利得。 $W[D] = PT + (1-P)Q$ も同様。我々の知りたい平衡点はこの $dP/dt = 0$ となるPの値。この力学系は、●を安定平衡点、○が不安定平衡点とする相図で示すと、
 $0 \bullet \leftarrow \text{-----} \rightarrow \text{-----} \bullet 1$ となり、 $p=0$ が安定平衡点、 $p=1$ が不安定平衡点となる。

この社会に、マクロな政府があり、 β というモニタリング確率で、エージェントの活動をモニタリングして罰金や補償金などのインセンティブを徴収したり支払うことで、間接的にエージェントの意思決定を制御するというモデルを考える。このモニタリングによって、我々は一種の社会的なミクロ・マクロリンクを構成していることになる。これは下表で表される。

	C	D
β	C (R, R)	(S+a, T-b)
	D (T-b, S+a)	(Q, Q)
$1-\beta$	C (R, R)	(S, T)
	D (T, S)	(Q, Q)

ここで β は、ゲームが行われたときにそのゲームについてのモニタリングが行われる確率とする。また b はモニタリングが行われたときに裏切り戦略を採用した場合の罰金、ただし裏切りもの同士のゲームについては、罰金は徴収されないとする。次に a は協力戦略を採用したプレーヤが裏切り戦略を採用したプレーヤに利益を持っていかれたことに対する補償金と考える。モニタリングが行われないとき ($1-\beta$ の確率) の利得は以前の通り。

このリスク下の意思決定が2人間の干渉型意思決定に付け加わった形のエージェントの意思決定モデルから導かれるレプリケータダイナミクスは、

$$\begin{aligned} dP/dt &= P\{Wr[C]-\overline{W}\} = P(1-P)\{Wr[C]-Wr[D]\} \\ &= P(1-P)[(\beta a+S-Q)+P\{\beta(b-a)+R-S+Q-T\}] \end{aligned}$$

ここで $\overline{W}=PW_r[C]+(1-P)Wr[D]$ 、 $Wr[C]$ 、 $Wr[D]$ はモニタリングを考慮に入れたC、D各々の戦略を取るエージェントの平均利得。

この力学系は、モニタリング確率 β の値や罰金、補償金の値でダイナミックに分岐する。これはエージェント集団の戦略選択の態度が分岐パラメータの変化で急変するということを意味している。

(1) $\beta=0.8$ 、 $a=1, b=1.5$ 0○---->-----●1

(2) $\beta=0.6$ 、 $a=1, b=1.5$ 0○-->--●--<--○1

(3) $\beta=0.4$ 、 $a=1, b=1.5$ 0●----<-----○1

更に罰金 b の値が大きいときには、初期条件に依存する平衡解も生じる。

(4) $\beta=0.4$ 、 $a=1, b=3$ 0●--<---->--●1

このレプリケータダイナミクスという極めてシンプルなマクロモデルから、我々は社会的態度に関するマクロ構造の変動モデルを分岐モデルとして立てることができた。モデルは社会の構造のミクロマクロリンクエージェントとしての政府がエージェント集団に入ったヘテロな構造を持つものとなっている。このモデルで協力的態度の0から1への分岐は結果的に社会的総ペイオフの劇的な改善をもたらす。ここで行った制御は、エージェントの自発的な合理的解の探索に基づいたものであるという意味で間接制御によるマクロ構造変動型のインセンティブ設計と言える。このようなアプローチが実際の人間集団を対象として具体的にどのように作用するだろうか。それを確かめるために我々はゲーミングシミュレーションという手法を用いる[9][10]。

2.9.4 ゲーミングシミュレーションによる解析

ゲーミングシミュレーションは、プレーヤに対して役割構造を作り込んでやり、その役割遂行のプロセスの中でさまざまな体験をし、それを相互に対話プロセスの中で

検討することで問題解決を試みる技法である。つまり一つの架空の社会的リアリティ空間を構成し、そこでのエージェントの多様な振る舞いを観察し、それと理論のリアリティを比較検討する中で、理論的リアリティと実際の社会的に構成されたリアリティの世界をつなぐための知見を得ようとする試みである。

いわゆる自然科学的実験を標榜する実験経済学との差異は、理論の検証のための実験ではなく、実際の主体を含む構成的現実世界での事実発見や問題解決のための実験に主眼を置くアプローチという点にある。実際に我々のアプローチでも理論が先にあったのではなく、ゲーミングによるエージェント社会のマネージメントに関するポリエージェント的分析のための実験の中でエージェント集団の間接制御設計について得られた知見をベースにそれを説明する最も単純な枠組みとしてレプリケータダイナミクスを用いた。

その上で我々は再びモデルの検証の作業をゲーミングによって行いたい。ここでは実験はプレーヤにカードに自分の選択を記してもらった紙をゲームファシリテータがランダムマッチングさせることで、各々の利得を定める方式で行った。モニタリングはルーレットによってその行なわれる回を β の確率で決定した。

ここでは、 $T=3$ 、 $R=2$ 、 $Q=1$ 、 $S=0.5$ で $T > R > Q > S$ と $R > (T+S)/2$ が成立する囚人のジレンマ社会で、裏切り戦略を協調戦略に対して取ったプレーヤに対して $\beta=0.4$ のモニタリング確率でサンクション $b=1.5$ が罰金として政府（的エージェント）によって徴収され、裏切られた協力者には、 $a=1$ の補償金が支払われるという社会構造を導入しよう。ここでは共に裏切り戦略を取った場合は罰金は徴収されないとする。

【事例1】 この実験ではモニタリングがなされるかは、確率的にルーレットで毎回決定された。しかしそこには大きなゆらぎが出現する。このケースでは9回のプレイのうちで1-6回までがモニタリング有りとなり、7-9回がモニタリング無しという特徴的な結果となった。

図2.9-4は、図2.9-3の図式でいうと第二層の代替案のマクロ状態としての人口比率を示すものである。縦軸は人数横軸は実験の回数である。我々がこのエージェン

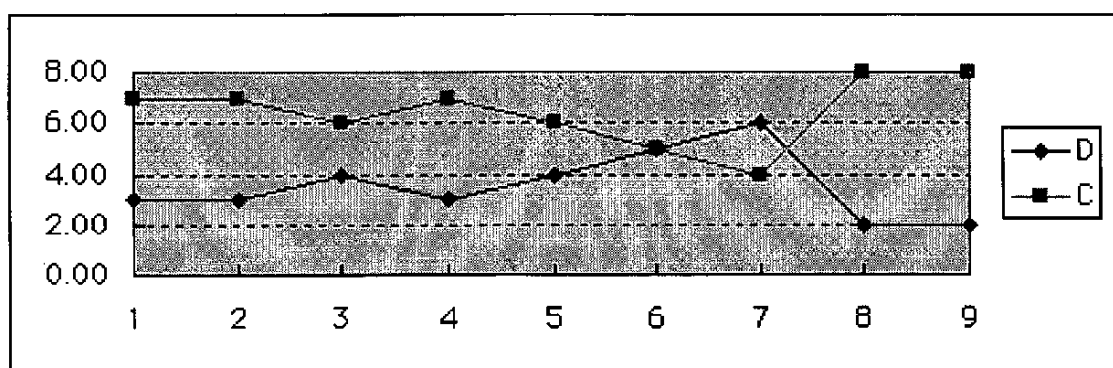


図2.9-4 毎回の戦略の選択人数

ト社会の厚生基準として、興味があるのは、実は代替案空間の相図ではない。基層のプレーヤの利得空間のマクロな状態とその変化に我々の認識関心は向けられる。

図2.9-5はこの社会的な総利得の空間をプロットしたものである。縦軸はペイオフ、横軸は実験の回数である。

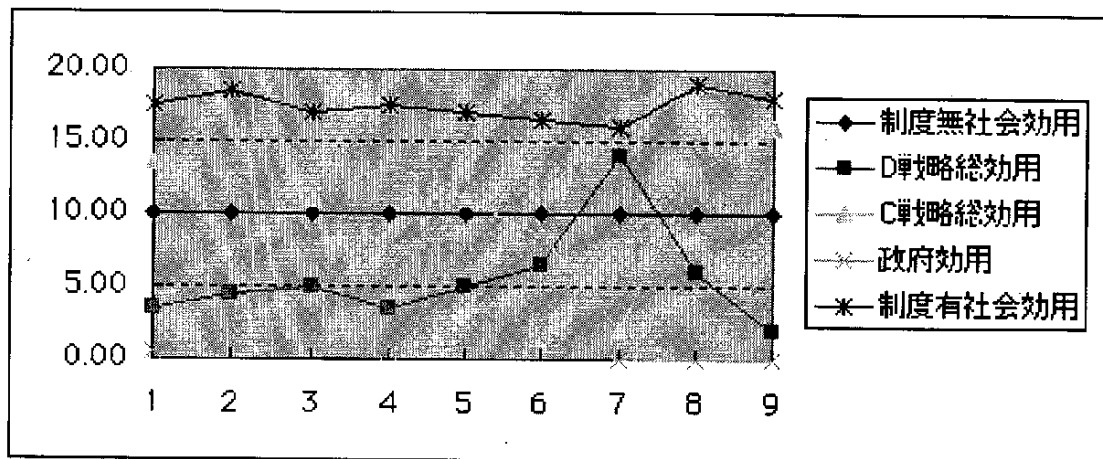


図2.9-5 戦略の選択者の総効用と社会の総効用

β を制御することが、我々のいう間接制御に対応する。ここで社会総利得が、間接制御により劇的に変化していることに注意する。

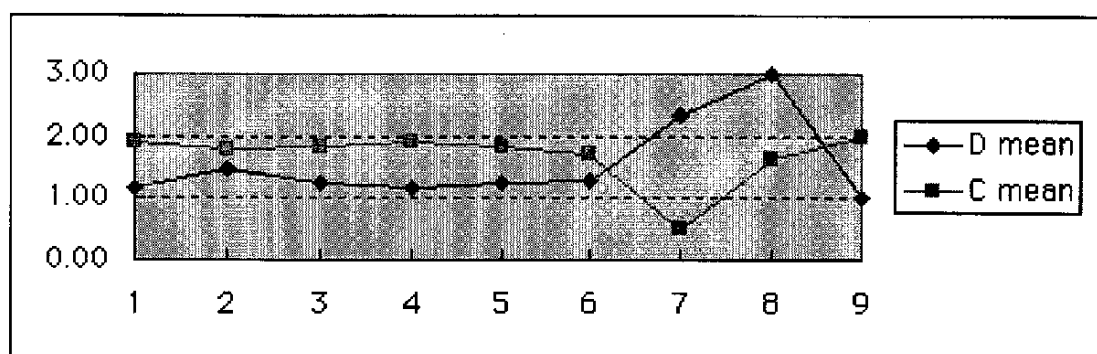


図2.9-6 毎回の戦略の平均効用

この実験の結果は、実は先ほどの理論的分析と一致しない。本来 $\beta=0.4$ ではまだ分岐は生じていないはずであった。このエージェント社会の構造変動（分岐）は理論より小さいパラメータで生じている。

このゲーミングの結果はゲーム論的にも読み解くことができる。モニタリングが生じたときは、 $(T+S)/2=1.75$ 、 $a=1$ 、 $b=1.5$ 、 $S+a=1.5$ 、 $T-b=1.5$ 、 $S+\beta a=0.9$ 、 $T-\beta b=2.4$ となり $\beta=0.4$ のときの平均利得表は次のようになる。

		C		D	
平均 利得	C	2	2	0.9	2.4
	D	2.4	0.9	1	1

平均期待利得で見ると、ナッシュ均衡は裏切りであり、レプリケータダイナミクスの解は裏切りに収束する。しかしゲーミングでは予想以上に協調戦略が優勢に選択される。

その理由は幾つか考えられる。一つは分岐パラメータの β が理論的には確率0.4であっても実際にはサイコロで決めるモニタリングで確率のゆらぎのために少ない試行の範囲では主観的に β が大きく感じられていることである。これは主観性の扱いが不可避であること、少数試行での確率概念の適用の難しさを示す。更にこの社会のモデルは記憶がないことを前提としているが、実際の人間のエージェントは記憶がありその効果が入っていないことも大きい[13][14]。

ここで導入したモニタリングの制度がない場合、社会の総効用は全員が裏切り戦略をとるとして10となるがそれが17.44と非常に高い値となっている。また民間部門の平均効用も裏切り戦略は1.55、協調戦略が1.68と高い値となっている。これは社会効用を大きくする間接制御は成功していることを意味している。

【事例2】 更に面白いケースを分析しよう。

$T=3$ 、 $R=2$ 、 $Q=1$ 、 $S=0.5$ 、で $T>R>Q>S$ 、 $R>(T+S)/2$ の成り立っている前述と同じ条件の囚人のジレンマ社会で、今度は裏切りに対するサンクションを $b=3$ と大きく取る。このとき $\beta=0.4$ 、 $(T+S)/2=1.75$ 、 $a=1$ 、 $b=3$ 、 $S+a=1.5$ 、 $T-b=0$ 、 $S+\beta a=0.9$ 、 $T-\beta b=1.8$ となり下図の平均利得表が得られる。

		C		D	
平均 利得	C	2	2	0.9	1.8
	D	1.8	0.9	1	1

ここでは平均の利得表でナッシュ均衡は（協調、協調）と（裏切り、裏切り）の二つでコーディネーション型となる。理論上はこのケースは初期値依存性のある形で二つの平衡解へ収束する筈だが実際にはそうならない。

このケースでは8回の試行の中で、モニタリングがあったのは、初回と6回だけであった。

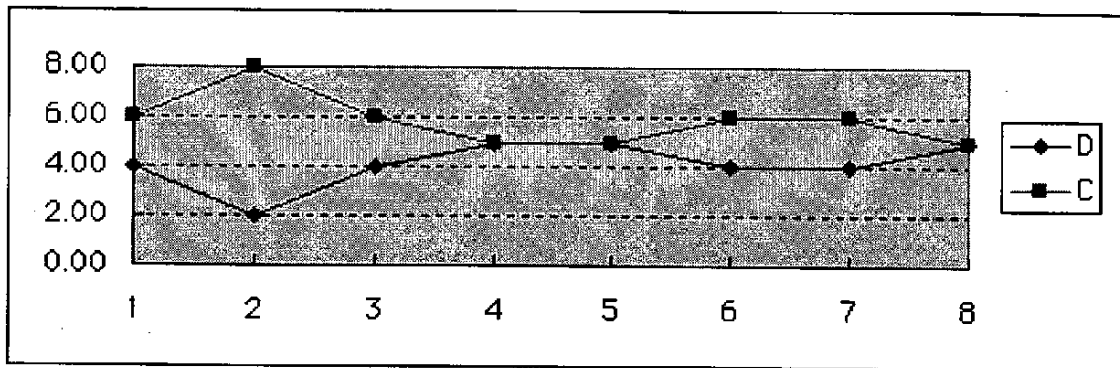


図 2.9-7 毎回の戦略の選択人数

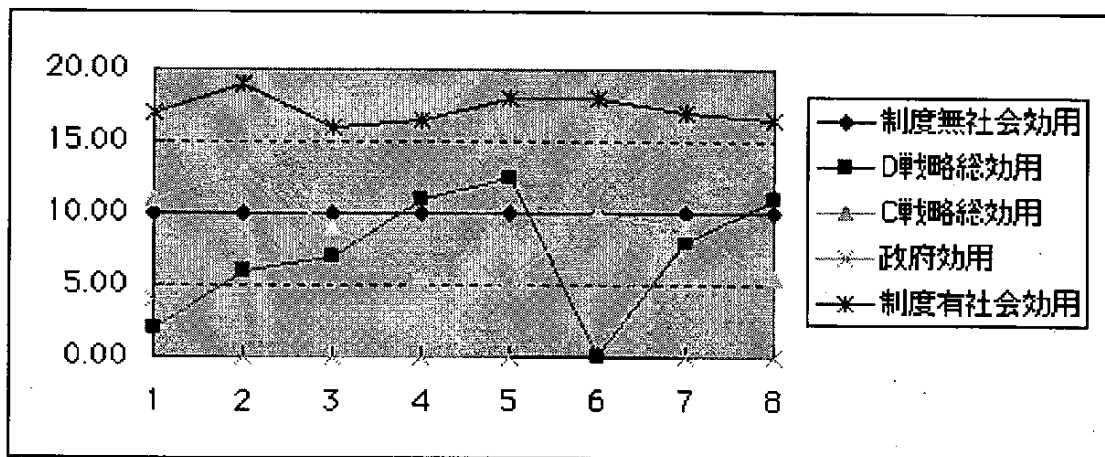


図 2.9-8 各々の戦略の選択者の総効用と社会の総効用

このケースでは裏切りへの罰金は大きくなっている。これによって全体の社会の総効用は平均で17.25となっている。だが罰金を大きくしたほどの効果はない。むしろ政府に税としてモニタリングの際の罰金のかなりが吸い上げられているので、民間のエージェントの平均効用は裏切り戦略が1.77で協調戦略が1.43と罰金が高いケースの裏切り戦略1.55、協調戦略が1.68に比べると協調戦略ではむしろ低下している。

このケースではモニタリングリスクを加味したナッシュ均衡は（C、C）と（D、D）の2種類有り、いわゆるコーディネーションゲームとなっている。これはレプリケータダイナミクスとして見ると、協調解のみの人口と裏切り解のみの人口に初期条件に応じて収束するモデルとなっている。

だが実際にゲーミングの結果は初期値依存の複数均衡というよりは、中間に均衡のあるモデルのような結果を出している。そもそも確率的モニタリングの入る環境下では必ずマージナルなエージェントが出現し、一方の極に収束することが生じにくい。

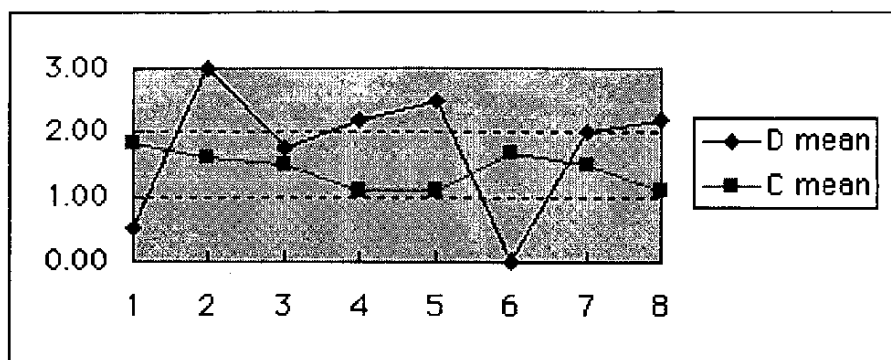


図 2.9-9 毎回の戦略の平均効用

このゲーミングに対応したレプリケータダイナミクスのシミュレーションは図 2.9-4 で既に示されている。

次のようになる。 $\beta=0.4$ $a=1$ $b=3$ では、相図は $0 \bullet \text{---} \langle \text{---} \rangle \text{---} \bullet 1$ となり、初期条件に依存して協調戦略のみあるいは裏切り戦略のみに収束する筈であった。これがそうならならずに多型状態を示したのは、主体の持つ内部モデルが一種の多型選好をこの場合示したためである。その原因のひとつには我々の確率的リスクに対する予想以上の複雑な反応があると思われる。

結局、罰金のような制度はそれほど高額にしなくても十分働き得ることをこれは示している。ただしモニタリング確率が低い場合はまた別の話となる。

また純粋にエージェントだけの社会では相対的に低い社会的総効用（ペイオフ）しか得られないような状況が、マクロエージェントが登場しその結果劇的に社会効用が増大する点は同様である。

【内部モデルとコミュニケーション】

本稿の範囲では確率的なモニタリングに関してリスク下の意思決定モデルが用いられているが、混合解概念は用いていない。だが通常ゲームの理解で混合解という概念を比較的普通に用いる。

エージェントがどのような内部モデルを用いるかという点に着目するならば、何らかの確率概念が入ったときのエージェントの振舞いは、その活動が少数回のときは我々が確率の理論で想定するものとかなり違う。

混合解という概念は、純粋解に比べ有限と実数空間との比較という意味で言えば遥かに大きな次元の状態空間を扱っていることになる。このような状態空間を実際に確率的リスク下にあるエージェントが確率を扱う際に用いているかということこれはかなりの程度怪しい。これはエージェントが理論的に訓練されたエージェントであると仮定できないということでもある。

主体は、意思決定のためのモデルを自ら構成し、それに依拠して活動する主体である。従って、エージェントが実際に合理的意思決定モデルを意識的であれ無意識的であ

あれ採用していないかぎり合理的意思決定モデルのダイナミクスは通用しない。実際に、確率的モニタリング下ではエージェントは、そこで生じる確率のゆらぎに敏感に反応する。また常に裏を読むエージェントなど固有の信念を持つエージェントが存在しそれがかなり大きな影響をエージェント集団に与えている。これらエージェントの信念や認識、或いはこれに関連したコミュニケーションがどのような間接制御のモダリティを可能とするのかは今後の課題である。

またこのモデルでは記憶がない。したがって相手を特定しないTFTなどの戦略も用いることができない。これについては、我々のモデルを基礎として、a, bまで含めて進化し更に記憶のあるモデルを星野等がシミュレーションベースで展開しており面白い結果が得られている[13][14]。だがここではモデルの拡張をこれらとは異なる方法で試みる。

2.9.5 非対称型ゲームのレプリケータダイナミクス

前項で扱った両者の立場が対称であるゲームでは、両プレイヤーの代替案集合が等しく、また $E(i, j) = E(j, i)$ という対称性が成立するようなゲームであった。ゲーム理論の利用はこのような解釈に限定されるものではない。立場の違う2人のプレイヤーの間のゲームも同様に扱うことができる。このような場合でもそこからRDを導くことができる。

プレイヤー1の代替案集合を{A, B}、プレイヤー2の代替案集合を{R, S}とする。このとき、プレイヤー1、プレイヤー2の属する集団の人口を各々 N_1 、 N_2 とする。効用テーブルは次のようになる。

	R	S
A	(a, r)	(c, s)
B	(b, t)	(d, u)

またその人口に対する代替案A, Rの選択比率を各々 X , Y とする。ここから非対称的な立場を持つ2つの集団に対するRDを構成すると、

$$\begin{aligned}
 dX/dt &= \{X(WA - \bar{W})\} / \bar{W} \\
 dY/dt &= \{Y(VR - \bar{V})\} / \bar{V} \\
 \bar{W} &= XWA + (1-X)WB \\
 \bar{V} &= YVR + (1-Y)VS \\
 WA &= aY + c(1-Y), \quad WB = bY + d(1-Y) \\
 VR &= rX + (1-X)t, \quad VS = sX + u(1-X)
 \end{aligned}$$

となる。 WA 、 WB は各々A, Bの代替案をプレイヤー1が選択したときの期待利得である。同様に VR 、 VS はプレイヤー2がR, Sの代替案を選択したときの期待利得である。 $\bar{W}$

はプレーヤ1の期待利得、 V^2 はプレーヤ2の期待利得となる。

これは人口集団N1、N2の人口比 $[0, 1] \times [0, 1]$ の2次元空間のダイナミクスとなる。代替案が二つの非対称型のゲームの場合、それをレプリケータダイナミクスで解釈した場合、この2次元平衡解の解析が必要となる。

非対称型のゲームの場合、個別のダイアディックな主体間関係から出発したエージェント社会では、二つの立場の異なる集団で内部的にはプレーは行なわれず、集団間でのみプレーが行なわれる状況が想定されている。このような型（フレーム）としてのモデルの応用領域として、生物学では雄と雌の間の戦略がある。社会経済システムで同様のモデルを扱うとすると、異質な集団間でランダムマッチングがコンスタントに生じるような状況を想定とする必要がある。経済経営領域では、企業集団と消費者集団のような非対象性のある領域のモデルにこのゲームを利用することができる。

そこで企業集団と消費者集団の代替案に関する評価基準が個々のエージェントに関する局所合理性の指標である効用とは別の何らかの社会的厚生基準でGood、Badと価値付けられているとしよう。このような想定は、環境問題や社会的ジレンマ状況にあるエージェント集団では自然な想定である。例えば前項までの対称型囚人のジレンマ社会で言えば、ナッシュ均衡で示される局所合理性と社会全体の総利得は矛盾しているので社会全体の総利得を社会的厚生基準とすれば当然、(C, C)が(good, good)となる。

本稿ではエージェント間のゲーム的なダイアディックな相互干渉下での合理的意思決定モデルをベースにするエージェント社会を考えた。エージェントのダイアディックな相互作用の結果、個々のエージェントはナッシュ均衡解のような形で局所合理性を持った解を選択しようとする。だが囚人のジレンマ社会のゲーミングで見たように、この局所合理性を持った解は、社会の総ペイオフという観点からは問題のある解である。このように何らかの社会的観点からエージェントの局所合理性を持った解を、エージェントの自律的な選択を前提としつつ、インセンティブや罰金によって特定の方向に誘導したいケースが考えられる。こうした問題は特定の状況ではエージェンシー理論のように精緻に解析されている。しかし我々はこの問題を自律的エージェント社会の構造変化の問題として捉える。

			Good		Bad
			R		S
Good	A	(a	r)	(c	s)
Bad	B	(b	t)	(d	u)

とする。つまりA, Rが好ましい代替案であるとして、ここへ間接制御をデザインしたい。このときモニタリング確率を含む政策手段は次のような可能性がある。

P_{in}：個人インセンティブ、F_{in}：企業インセンティブ、P_{Co}：個人補償、F_{Co}：企業への補償、F_{Pe}：企業へのペナルティ、P_{Pe}：個人へのペナルティ、P_{dPe}：直接個人ペナルティ、F_{dPe}：直接企業ペナルティという制御変数を導入する。我々はこれらの組み合わせがどのような形で間接制御を可能とするかに興味がある。

	制御要因	
R	S	
A	P_in, F_in	P_Co, F_Pe
B	P_Pe, F_Co	P_dPe, F_dPe
	合成ペイオフ	
A	$a + \beta P_in, r + \beta F_in$	$c + \beta P_Co, s - \beta F_Pe$
B	$b - \beta P_Pe, t + \beta F_Co$	$d - \beta P_dPe, u - \beta F_dPe$

まず、(good, bad), (bad, good)の取引がモニタリング可能であると考え、そこに保証金や罰金をかけることを考える。この方式だと罰金は、(good, good)をナッシュ均衡解にするために有効であり、補償金は(bad, bad)をナッシュ均衡解でなくするのに有効である。

次に(good, good)や(bad, bad)に直接的にペナルティをかけたりインセンティブを与える可能性を考慮する。直接的なペナルティやインセンティブはインセンティブが(good, good)をナッシュ均衡解にするのに有効であり、直接的なペナルティは(bad, bad)をナッシュ均衡解でなくするのに有効である。これらに関して様々な政策的実行、減税、罰金、補償、奨励金などの可能性がある。

そこでこの非対称ゲームのナッシュ均衡解を(A, R)にすることができることをGG間接可制御、既にナッシュ均衡解である(B, S)をナッシュ均衡解でなくすることをBB間接可制御と呼ぶことにする。更に(A, R)をナッシュ均衡解にして、同時に(B, S)がナッシュ均衡解でないようにすることをGB間接可制御と呼ぶことにする。我々は、適当な制度設計でシステムをGB間接可制御にできるかに興味がある。

【命題1】 GG間接可制御とBB間接可制御

β がコントロール可能であるという前提で

(1) GG間接可制御となる必要十分条件は、

P_PeとF_Peを動かせる或いは、P_inとF_inを動かせる或いは、P_inとF_Peを動かせる或いは、P_PeとF_inを動かせること。

(2) BB間接可制御となる必要十分条件は、

F_CoまたはP_dPeまたはP_CoまたはF_dPeが動かせること。

証明：ここでは、モニタリング確率 β は1にコントロールできるので、議論から省く。

GG可制御であるためには、(A, R)がナッシュ均衡解になることが必要十分。つまりモニタリング変数 β のもとで、 $a+x1>b+x2$ and $r+y1>s+y2$ となるような、 $x1, x2, y1, y2$ が存在すればよい。

可能な制御手段を代入すると、

(A) $a+P_in>b-P_Pe$ and (B) $r+F_in>s-F_Pen$

P_Penが動かせるということは、 $x2$ を任意のマイナスの値にできることを意味する。

F_Penが動かせるということは、 $y2$ を任意のマイナスの値にできることを意味する。

従って任意の a, b, r, s に対して不等式は成立する。同様に(A),(B)の各々の等式での

制御変数の組み合わせがGG可制御の条件となる。

BB間接可制御になるとは、(B,S)がナッシュ均衡解にならないことが条件。これは、 $\exists x_3, x_4, y_3, y_4 \neg \{ d+x_3 > c+x_4 \text{ and } u+y_3 > t+y_4 \} \Leftrightarrow \exists x_3, x_4, y_3, y_4 \ d+x_3 < c+x_4 \text{ or } u+y_3 < t+y_4$ となる条件を導く。制御変数から、

(A) $d+P_dPe < c+P_Co$ or (B) $u+F_dPe < t+F_Co$ となるような制御変数の組み合わせがあればよい。これには、 P_dPe 、 P_Co 、 F_dPe 、 F_Co のいずれかが動かせれば十分である。

次に我々はこのようなインセンティブや罰金、補償金の政策的な導入可能性を探ろう。我々はシステムをGB間接可制御つまりBB間接可制御かつGG間接可制御にするような政策手段を設計したい。命題1に見られるように、BB間接可制御の方がコントロールは容易である。消費者、企業間ゲームという解釈で言うと、消費者に関しては、 P_Pen 、 P_ins 、 P_Com 、 P_dPen という4つの制御変数が、企業に関しても、 F_Pen 、 F_ins 、 F_Com 、 F_dPen という4つの制御変数がある。

【命題2】GB間接可制御のための制御変数組み合わせ

- (1) 企業に関する制御変数だけでGB間接可制御にすることは不可能である。
- (2) 消費者に関する制御変数だけでGB間接可制御にすることは不可能である。
- (3) ペナルティに関する制御変数、 P_Pen 、 F_Pen 、 P_dPen 、 F_dPen だけでGB間接可制御にすることが可能である。
- (4) インセンティブや補償に関する制御変数、 P_ins 、 P_Com 、 F_ins 、 F_Com だけでGB間接可制御にすることが可能である。

証明：

(1) 命題1より F_Com 或いは F_dPen があればBB間接可制御。しかし、GG間接可制御のためには、命題1より企業と消費者の両方の制御変数が必ず必要。(2)も同様。(3)は、命題1より P_Pen かつ F_Pen が動かせるならGG間接可制御、BB間接可制御のためには、 P_dPe または F_dPe が動かせればよいので成り立つ。(4)も命題1より P_ins と F_ins でGG間接可制御、BBについて F_Co または P_Co が動かせればよいので明らか。

命題より、企業に関する政策、或いは消費者に関する政策のどちらかだけではGB間接可制御にすることができない。他方罰金的な政策或いはインセンティブと保証金だけでもGB間接可制御にすることができる。

【政策としての制御変数】

次にこれらの罰金や補償金、インセンティブを具体的に実施する方策を考察しよう。ある態度に対してこれをモニタリングして罰金や保証金、インセンティブを与えるためのモニタリングの容易さは、制度設計の方向性によって異なる。一般に罰金による施策はモニタリングコストが一般的に高い。しかしインセンティブの場合はモニタリングコストが低く、 β を容易に高くすることができる。これは、インセンティブの場

合には自主申告が可能だからである。

また税制によって、この間接制御を行うこともしばしば試みられる。特定の取引に課税することは、ペナルティ的に用いることができる。特定の取引を減税することで、インセンティブを与えることができるし、補償的な役割を担わせることができる。

税制によるこのメカニズムの場合には、モニタリングがかなり大きいかわりに、制御変数を小さくする制度化の方法である。

囚人のジレンマの事例2で示されたように、社会の総利得を大きくすることに成功したとしても、それは政府のようなマクロミクロをリンクするエージェントの利得になるのか、民間部門に再配分されるかでその意味は大きく変わってくる。

2.9.6 レプリケータダイナミクスによる外部性表現

我々はここまでレプリケータダイナミクスによるエージェント集団のダイナミクスを扱ってきた。従来経済学では、ゲームのような形でエージェント間の直接的な相互作用形式を書き下し、それに関してナッシュ均衡などの解概念を論じてきた。これに対してレプリケータダイナミクスのような手法では、動的に相互作用の係数が変化するような場合など遥かに多様な変化のダイナミクスが記述可能である。とはいってもそれが経済学的に意味のないものではしかたがない。

複雑系に関する近年の議論でしばしば、マーケットに於ける商品の普及が自己触媒的效果を持って、他の製品に対して本来その商品が持っている効用以上の効用をもたらし、有利になるような現象に対してロックイン或いは収穫逦増という概念が用いられる。このうち収穫逦増という概念をこの領域に用いるのは、経済学者の完全な誤解であり、これはいわゆるネットワーク外部性或いはプラットフォーム外部性というべき概念である。この外部性効果を表現するために、レプリケータダイナミクスを援用した我々のアプローチは非常に有益な分析を与えてくれる。環境問題に関する外部性については、在間、出口[19]の中で扱われているが、ここでは単純な例として、今後普及が予想される電子財布型の電子マネーに関して非対象RDモデルを考え、外部性の扱いを見てみよう。

【電子マネーの非対象RDモデル】

前提条件：商店は、現金だけで取り引きする、電子マネー1の取引契約をする。電子マネー2の取引契約をする。電子マネー1、2の両方の取引契約をするという四つの選択肢を考える。

商店の代替案：

- a0 現金だけで取り引きする
- a1 電子マネー1の受け入れ契約をする
- a2 電子マネー2の受け入れ契約をする

a3 電子マネー 1 と 2 の両方の受け入れ契約をする
消費者の代替案：

- b0 現金だけを利用する
- b1 電子マネー 1 の利用をする
- b2 電子マネー 2 の利用をする
- b3 電子マネー 1 と 2 の両方を利用する

これに対して次のような利得とコストの構造を次のように仮定する。

商店のコスト構造：

- c1 商店の電子マネー 1 の契約コスト
- c2 商店の電子マネー 2 の契約コスト
- c3=c1+c2 商店の電子マネー 1 と 2 の両方の契約コスト

消費者のコスト構造：

- w1 電子マネー 1 のワレットの利用コスト
- w2 電子マネー 2 のワレットの利用コスト
- w3=w1+w2 電子マネー 1 と 2 の両方のワレットの利用コスト

消費者の利得構造：

- u_{ij} 消費者が電子マネー i を企業が j を利用したときの消費者利得
- v_{ij} 消費者が電子マネー i を企業が j を利用したときの企業利得
- ただし、 $u_{12}=u_{21}=0$ 、 $v_{12}=v_{21}=0$ 、 $u_{13}=u_{11}$ 、 $u_{31}=u_{11}$ 、 $u_{23}=u_{22}$ 、 $u_{32}=u_{22}$ 、 $u_{11}=g_1+P[a_1]*h_1$ 、 $u_{22}=g_2+P[a_2]*h_2$ 、 $u_{33}=\max(u_{22}, u_{11})$ 、

商店の利得構造：

- $v_{11}=e_1+P[b_1]*f_1$ 、 $v_{22}=e_2+P[b_2]*f_2$ 、 $v_{13}=v_{11}$ 、 $v_{31}=v_{11}$ 、
 $v_{33}=v_{11}$ if $\max(u_{22}, u_{11})=u_{11}$ 、
 $=v_{22}$ if $\max(u_{22}, u_{11})=u_{22}$

とする。これはどちらを使ってもよいのだから、利得の高いほうを利用するがその選択権は、消費者にあると考える。これによって消費者に対する利得設計、つまりインセンティブ設計の作り込の可能性が生じる。

人口変数：Ns 商店の数、Nc 消費者の数、P[a0] 現金だけを利用できる商店の比率、P[a1] 電子マネー 1 だけを利用できる商店の比率、P[a2] 電子マネー 2 だけを利用できる商店の比率、 $P[a3]=1-P[a2]-P[a1]-P[a0]$ 電子マネー 1 と 2 の両方を利用できる商店の比率、P[b0] 現金だけを利用する消費者の比率、P[b1] 電子マネー 1 だけを利用する消費者の比率、P[b2] 電子マネー 2 だけを利用する消費者の比率、 $P[b3]=1-P[b2]-P[b1]-P[b0]$ 電子マネー 1 と 2 の両方を利用する消費者の比率、 $Px_1=P[a1]+P[a3]$ 電子マネー 1 を利用できる商店の比率、 $Py_1=P[b1]+P[b3]$ 電子マネー 1 を利用する消費者の比率、 $Px_2=P[a2]+P[a3]$ 電子マネー 2 を利用できる商店の比率、 $Py_2=P[b2]+P[b3]$ 電子マネー 2 を利用する消費者の比率

以上を利得テーブルの形で表現すると、下表のようになる。

表 2.9-1 電子マネーの利得テーブル

	商 店 x			
	a0	a1	a2	a3
b0	(t0,s0)	(t0,s0-c1)	(t0,s0-c2)	(t0,s0-c3)
消 費 者 b1	(t0-w1,s0)	(u11-w1,v11-c1)	(t0-w1,s0-c2)	(u11-w1,v11-c3)
y b2	(t0-w2,s0)	(t0-w2, s0-c1)	(u22-w2,v22-c2)	(u22-w2,v22-c3)
b3	(t0-w3,s0)	(u11-w3, v11-c1)	(u22-w3, v22-c2)	(u33-w3,v33-c3)

電子マネーのタイプが合わないときは現金を利用する。その消費者利得を $t0$ 、企業利得を $s0$ とする。

ここで、 $u11 > t0$ 、 $v11 > s0$ とする。これは、現金よりも電子マネーが利用便益が高いことを意味する。これはカードが新たな購買チャンスをもたらすのと同様。

【レプリケータダイナミクスの導出】

ここで $W[ai]$ は ai という代替案を取った場合の企業の平均利得である。

W^- は、商店の全体としての期待利得となる。

商店が現金のみを利用できるときの商店の平均利得

$$W[a0] = s0p[b0] + s0p[b1] + s0p[b2] + s0p[b3] = s0$$

商店が電子マネー 1 のみを利用できるようにしたときの商店の平均利得

$$\begin{aligned} W[a1] &= (s0-c1)p[b0] + (v11-c1)p[b1] + (s0-c1)p[b2] + (v11-c1)p[b3] \\ &= s0p[b0] + v11p[b1] + s0p[b2] + v11p[b3] - c1 \end{aligned}$$

商店が電子マネー 2 のみを利用できるようにしたときの商店の平均利得

$$\begin{aligned} W[a2] &= (s0-c2)p[b0] + (s0-c2)p[b1] + (v22-c2)p[b2] + (v22-c2)p[b3] \\ &= s0p[b0] + s0p[b1] + v22p[b2] + v22p[b3] - c2 \end{aligned}$$

商店が電子マネー 1 と 2 の両方を利用できるようにしたときの商店の平均利得

$$\begin{aligned} W[a3] &= (s0-c3)p[b0] + (v11-c3)p[b1] + (v22-c3)p[b2] + (v33-c3)p[b3] \\ &= s0p[b0] + v11p[b1] + v22p[b2] + v33p[b3] - c3 \end{aligned}$$

$$W^- = p[a0]W[a0] + p[a1]W[a1] + p[a2]W[a2] + p[a3]W[a3]$$

これから、企業の代替案 $a0, a1, a2, a3$ についての人口比率の変化のダイナミクスは次のようになる。

$$dp[a0]/dt = \{P[a0](W[a0] - W^-)\} / W^-$$

$$dp[a1]/dt = \{P[a1](W[a1] - W^-)\} / W^-$$

$$dp[a2]/dt = \{P[a2](W[a2] - W^-)\} / W^-$$

$$P[a3] = 1 - p[a0] - p[a1] - p[a2]$$

更にここで、 $V[bi]$ は bi という代替案を取った場合の消費者の平均利得である。 V^- は、

消費者の全体としての期待利得となる。

消費者が現金のみを利用するときの消費者の平均利得

$$V[b_0]=t_0p[a_0]+t_0p[a_1]+t_0p[a_2]+t_0p[a_3]=t_0$$

消費者が電子マネー 1 のみを利用するときの消費者の平均利得

$$V[b_1]=(t_0-w_1)p[a_0]+(u_{11}-w_1)p[a_1]+(t_0-w_1)p[a_2]+(u_{11}-w_1)p[a_3] \\ =t_0p[a_0]+u_{11}p[a_1]+t_0p[a_2]+u_{11}p[a_3]-w_1$$

消費者が電子マネー 2 のみを利用するときの消費者の平均利得

$$V[b_2]=(t_0-w_2)p[a_0]+(t_0-w_2)p[a_1]+(u_{22}-w_2)p[a_2]+(u_{22}-w_2)p[a_3] \\ =t_0p[a_0]+t_0p[a_1]+u_{22}p[a_2]+u_{22}p[a_3]-w_2$$

消費者が電子マネー 1 と 2 の両方を利用するときの消費者の平均利得

$$V[b_3]=(t_0-w_3)p[a_0]+(u_{11}-w_3)p[a_1]+(u_{22}-w_3)p[a_2]+(u_{33}-w_3)p[a_3] \\ =t_0p[a_0]+u_{11}p[a_1]+u_{22}p[a_2]+u_{33}p[a_3]-w_3$$

$$\bar{V}=p[b_0]V[b_0]+p[b_1]V[b_1]+p[b_2]V[b_2]+p[b_3]V[b_3]$$

これらから、消費者の代替案 b_0, b_1, b_2, b_3 についての人口比率の変化のダイナミクスは次のようになる。

$$dp[b_0]/dt=\{P[b_0](V[b_0]-\bar{V})\} / \bar{V}$$

$$dp[b_1]/dt=\{P[b_1](V[b_1]-\bar{V})\} / \bar{V}$$

$$dp[b_2]/dt=\{P[b_2](V[b_2]-\bar{V})\} / \bar{V}$$

$$dp[b_3]/dt=\{P[b_3](V[b_3]-\bar{V})\} / \bar{V}$$

$$P[b_3]=1-p[b_0]-p[b_1]-p[b_2]$$

ここでモデルの中の外部性効果は利得表の中に人口比率変数が $u_{11}=g_1+P[a_1]*h_1$ 、 $u_{22}=g_2+P[a_2]*h_2$ 、 $v_{11}=e_1+P[b_1]*f_1$ 、 $v_{22}=e_2+P[b_2]*f_2$ のように含まれていることで示される。これをゲームとして見たときには、個々の時点でのゲームの利得構造がシェアによって動的に変化することになる。この意味ではこのような相互作用構造の分析は静的なゲーム理論では難しい。

これらのモデルの結果は例えば次のようになる。ここでは二つの電子マネーに殆ど初期シェアに差異がないが、ちょっとした差が拡大し、外部性効果で電子マネー 1 がシェアを握る様子がシミュレーションされている。

このような外部性を含むモデルは、非対称レプリケータダイナミクスのような手法を用いると比較的に簡単に分析可能であることが分かる。このような分析から、従来経済学や経営学で議論の対象となっていた何らかのシェアに関連した外部性を持つ本当の問題点が逆に明らかになる。それは実際の社会経済システムでは、この種の外部性などで生じる単純な独占解は、極端な形では見当たらず、そこには参入と退出のある多様な戦略の共存解が存在し、或いは好まれているという現実である。これが制度的な帰結なのか、或いは他に原因があるのか。また多様性を選考する根拠は何であるか、それは古典的な独占の議論を越えるのかなどが我々の真にとうべき問題意識である。この多様性をもたらすマネジメントについては、最後の 2.9.1 3 項のところで再び論じる。

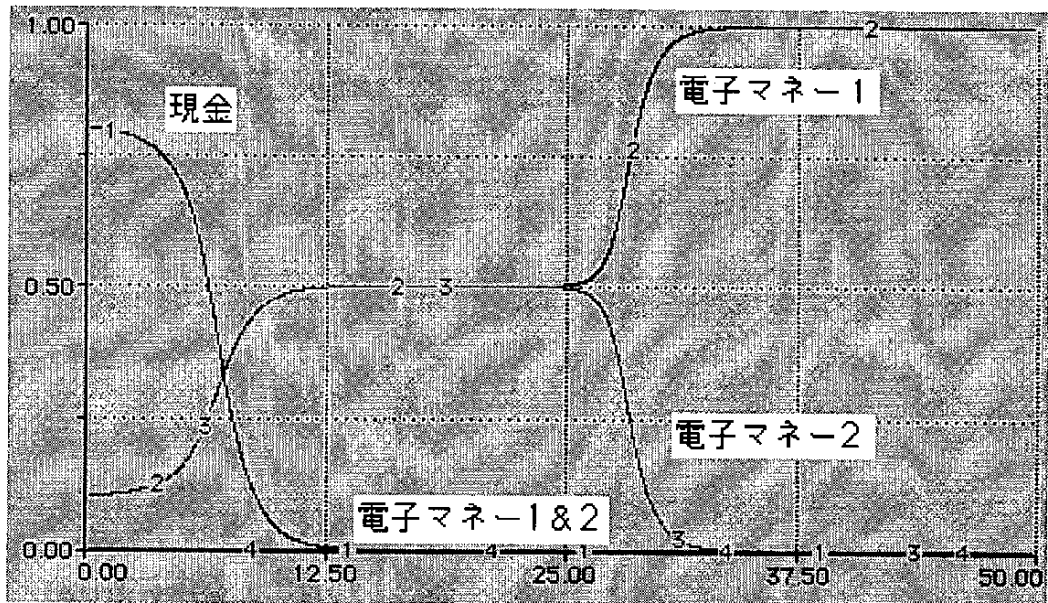


図2.9-10 電子マネー採用店の人口比率

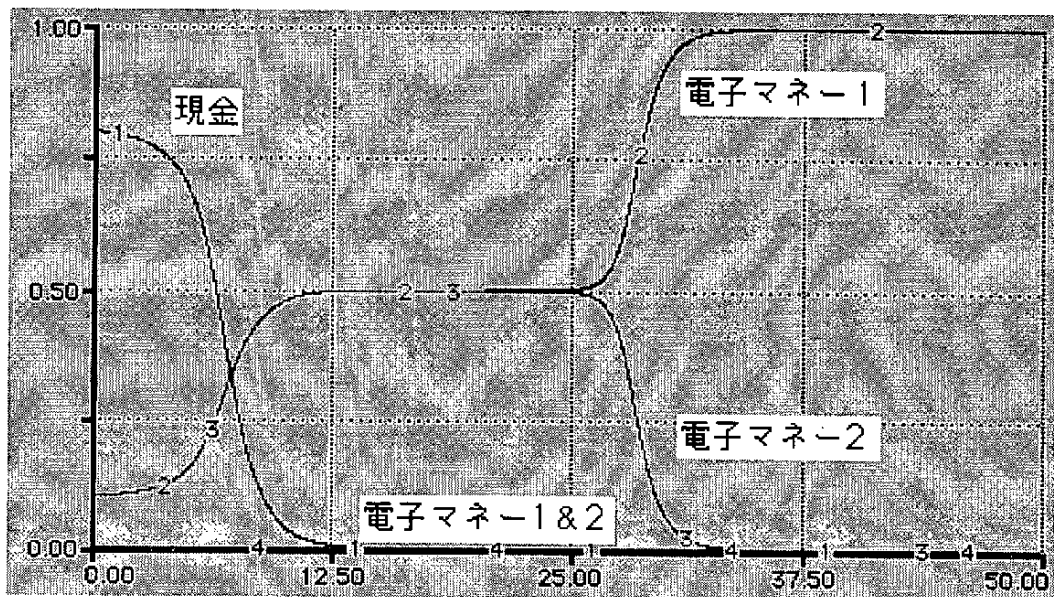


図2.9-11 電子マネー採用消費者の人口比率

2.9.7 交換代数による状態記述

次に我々は、先に述べたエージェント集団の状態記述に関して、記述の豊富さを追及するアプローチについて筆者の研究を簡単に紹介する。この状態空間に着目したアプローチでは、我々は複雑なシステムの多様性をどこまでモデルの中で安定した形で表現できるかということに注意を向ける。

ここでは筆者によって定式化された多元簿記の数理的定式化である交換代数について簡単に説明しよう。交換代数は、冗長代数という次のような代数系をベースにして、その代数系の基底が簿記的交換に関するある性質を満たすような代数系として定式化される。この代数系は厳密な意味で簿記的交換概念の深層構造となっている。

【交換代数の公理系】

交換代数は、まず冗長代数と呼ばれる下記の代数系の上に定式化される。今 T を非負の整数か実数とする。二項 $\wedge$ -レシオン $\wedge$ と単項 $\wedge$ -レシオン $\wedge$ 、 $\neg$ が集合 Ψ の上に定義されており、更にスカラー積 $ax \in \Psi$ が $a \in T, x \in \Psi$ に対して定義され下記の公理系(2-1)を満たすとき、 Ψ を冗長代数と呼ぶ。

公理系(2-1)

- | | |
|---|---|
| (1) $x + y = y + x$ | (2) $(x + y) + z = x + (y + z)$ |
| (3) $x + 0 = x$ | (4) $a(bx) = (ab)x$ |
| (5) $1x = x, 0x = 0$ | (6) $(a + b)x = ax + bx$ |
| (7) $a(x + y) = ax + ay$ | (8) $\neg\neg x = x$ |
| (9) $\wedge\wedge x = x$ | (10) $\neg(x + y) = \neg(\neg x + \neg y)$ |
| (11) $\wedge(x + y) = \wedge x + \wedge y$ | (12) $\neg(x + \wedge y) = 0 \equiv \neg x = \neg y$ |
| (13) $\neg(\wedge x) = \wedge(\neg x)$ | (14) $\neg(ax) = a(\neg x), \wedge(ax) = a(\wedge x)$ |
| (15) $x + y = 0 \rightarrow x = 0 \wedge y = 0$ | (16) $ax = 0 \rightarrow a = 0 \vee x = 0$ |

この冗長代数上には、ノルムや一次独立、基底などの概念が導入できる。冗長代数はそれ自体では、簿記の抽象化としては不十分である。冗長代数 Ψ の基底の集合 Γ の上の関係 $\Leftrightarrow$ が、更に次の公理系(2-2)を満たすとき、 Ψ を交換代数と呼ぶ。

公理系(2-2)

- | | |
|---|---|
| (1) $\forall x, y \in \Gamma \ x \Leftrightarrow y \equiv \wedge x \Leftrightarrow \wedge y$ | (2) $\forall x, y, z \in \Gamma \ x \Leftrightarrow y \text{ and } y \Leftrightarrow z \rightarrow \neg(x \Leftrightarrow z)$ |
| (3) $\forall x, y \in \Gamma \ x \Leftrightarrow y \equiv y \Leftrightarrow x$ | (4) $\forall x, y \in \Gamma \ x \Leftrightarrow y \rightarrow \neg(x \Leftrightarrow \wedge y)$ |
| (5) $\forall x, y, z \in \Gamma \ \neg(x \Leftrightarrow y) \text{ and } \neg(y \Leftrightarrow z) \rightarrow \neg(x \Leftrightarrow z)$ | (6) $\forall x \in \Gamma \ \exists y \in \Gamma \ x \Leftrightarrow y$ |

この交換代数は、簿記の抽象化にあたっている。交換代数を用いて国民経済計算：SNA (Systems of National Account) を代数的に再構築することが可能となる。

具体的な簿記的記述を交換代数で表現するためには、<現金,MOU>などの交換代数の基底を与えてやる必要がある。一例を示すと、次のようになる。

期首ストック					
借方	資産項目		貸方	資本負債項目	
現金残高	208.194	MOU	資本金	270	MOU
機械設備金額	270	MOU	内部留保	144.994	MOU
金利性預金残高	0	MOU	銀行借入残高	100	MOU
国債保有残高	120	MOU	減価償却引当金	108	MOU
製品在庫	24.8	MOU			
原材料在庫	0.00	MOU			
小計 622.994			小計 622.994		

交換代数で上述の期首ストックを表現すると次のようになる。

$$\begin{aligned}
 f[\text{期首ストック}] = & 208.19\langle\text{現金,MOU}\rangle + 270.00\langle\text{資本金,MOU}\rangle \\
 + & 270.00\langle\text{機械,MOU}\rangle + 144.99\langle\text{内部留保,MOU}\rangle \\
 + & 0.00\langle\text{預金,MOU}\rangle + 100.00\langle\text{銀行借入,MOU}\rangle \\
 + & 120.00\langle\text{国債,MOU}\rangle + 108.00\langle\text{減価償却引当金,MOU}\rangle \\
 + & 24.80\langle\text{小麦粉,MOU}\rangle + 0.00\langle\text{小麦,MOU}\rangle
 \end{aligned}$$

借方と貸方という部分空間へ元を射影してノルムを取ると $|\text{Pr}[\text{Deb}](f[\text{期首ストック}])| = 622.99$ 、 $|\text{Pr}[\text{Cre}](f[\text{期首ストック}])| = 622.99$ と等しくなることが示せる。

このモデルは、更に多元・多通貨記述を許す形に拡張できる。例えば通貨単位としてMOU、実物財の単位として、WHU(小麦単位)、FLU(小麦粉単位)、BRU(パン単位)、STU(鉄単位)、MAU(機械単位)の五つの単位系を採用する。gで交換代数の価格表示から実物表示への変換関数を、Gでその逆関数を表すものとする。と次のような実物表示の記述が得られる。

$$\begin{aligned}
 g(f[\text{期首ストック}]) = & 208.19\langle\text{現金,MOU}\rangle + 270.00\langle\text{資本金,MOU}\rangle \\
 + & 27.00\langle\text{機械,MAU}\rangle + 144.99\langle\text{内部留保,MOU}\rangle \\
 + & 0.00\langle\text{預金,MOU}\rangle + 100.00\langle\text{銀行借入,MOU}\rangle \\
 + & 120.00\langle\text{国債,MOU}\rangle + 108.00\langle\text{減価償却引当金,MOU}\rangle \\
 + & 56.00\langle\text{小麦粉,FLU}\rangle + 0.00\langle\text{小麦,WHU}\rangle
 \end{aligned}$$

例えばここでは機械の価格は1台10MOUであり、実物単位を用いた記述では簿記的バランスは成立しない。

2.9.8 環境簿記への交換代数の拡張

【環境簿記】

環境簿記というものは近年さまざまに喧伝されている。しかしそこで論じられているのはほとんどの場合、企業の廃棄物やエネルギーなどの指標的測定と記述の理論である。そこでの廃棄物やエネルギー処理に関する活動記述は、いわゆる簿記の原理、交換記述に従って定式化されたものではない。ここで我々は、こういった外部性を持つ財の記述空間を拡大するために交換代数の枠組みを使えることを示したい。

廃棄物やエネルギー処理に関する活動記述として我々は二つの可能性を考えることができる。ひとつは多元簿記の拡張として、さまざまな財をエネルギー単位系に変換するという形の記述である。これはあらゆる財はそれをエネルギーとして見た評価が与えられるという前提で、多元簿記的記述を行うものである。これをエネルギー簿記と呼ぼう。これによって企業の簿記的な記述から、変換する形でその企業でのエネルギー的な出入りに関する記述体系が構成できることになる。ただしこれはかなり荒い測定の理論であり、更に汚染物質や廃棄物のような負の価値を持つ財を内部に取り込んでいない。そこでもうひとつの考え方として、汚染物質や廃棄物のような負の価値を持つ財との取引を含む形で、交換代数を拡張した簿記の定式化を考えたい。これを狭義の環境簿記と呼ぶことにする。

【環境簿記の交換代数による定式化】

我々は、交換代数によって、交換 (transaction) における交換 (exchange) そのものの論理構造を定式化した。そもそも簿記には、負債というマイナスのストックの概念がある。これは自然科学にはない概念である。この負債というマイナスのストック概念があるから、経済的エージェントは相互に信用を融通して多彩な活動が可能となる。しかし現在の会計学的な財概念の中には、金融的な負債の概念はあっても、負の評価を持つ財としての廃棄物の概念はない。廃棄物が金銭を払って引き取ってもらう、或いは金銭を費やして処理するという財である以上、そこでの交換概念は通常の正の価値を持つ財とは異なっている。そこでまず負の評価を受ける廃棄物などの特殊な性向を持った財の記述を導入して交換概念が拡張できることを示したい。

我々は、廃棄物というマイナスの評価を持つ財を含む生産や交換の概念を定式化するために、廃棄物などを示すPOLという基底を交換代数に導入する。多元記述で現金評価の場合は、基底は $\langle \text{POL}, \text{MOU} \rangle$ のように表わされる。この基底が満たすべき交換関係を定義できれば、この基底を含む交換代数が生成できる。

そこで、 $\text{POL} \Leftrightarrow \text{現金}$ 、あるいは、 $\langle \text{POL}, \text{MOU} \rangle \Leftrightarrow \langle \text{Cash}, \text{MOU} \rangle$ という交換関係を仮定する。これは汚染物質が現金を払って購入する通常の財と異なり、例えば現金を払ってそれを他の会社に引き取ってもらうという取引が行われるからである。そこでは $\wedge \langle \text{POL}, \text{MOU} \rangle \Leftrightarrow \wedge \langle \text{Cash}, \text{MOU} \rangle$ という取引関係が成立する。これは汚染物質を引受る会社から見れば、現金をもらって汚染物質を引き取るという取引を行うことになる。

そこでは<POL, MOU>⇔<Cash, MOU>という取引関係が成立する。

さて基底<POL, MOU>について、ひとたび既存の基底のひとつとの交換関係を定めれば、他の基底との交換関係は、交換関係の公理を満たす形で一意に自動的に定まる。そこで汚染物質に関連した代表的取引を事例として示そう。

汚染物質の売却：

売り手：300[^]<POL, MOU>+300[^]<Cash, MOU>

：汚染物質を現金を払って売却

買い手：300<POL, MOU>+300<Cash, MOU>

：汚染物質を現金を受け取って引き取る

借方	貸方
売り手：300 汚染物質	300 現金
買い手：300 現金	300 汚染物質

汚染物質の生産：

50<POL, MOU>+100<原料, MOU>+200<製品, MOU>+50<付加価値, MOU>

これは、もし汚染物質を生産しないときには、100<原料, MOU>+200<製品, MOU>+100<付加価値, MOU> と記述される生産過程での付加価値生成が負の価値を持つ汚染物質を生産するために、50だけ低めに生成されることを示す。これを通常の簿記の形式で記述すると、次のような4項取引となる。

借方	貸方
200 製品	100 原料
	50 付加価値
	50 汚染物質

汚染物質の加工消滅：

汚染物質をなんらかの形で消滅させるような処理は、一見奇異に見えるかも知れないが一種の生産と見なされ次のような取引で記述されるだろう。

100[^]<POL, MOU>+50<付加価値, MOU>+50[^]<原料, MOU>

ここで、50[^]<原料, MOU>は汚染物質の分解に用いられた何らかの原料を意味する。逆に例えば作業ミスなどで予想外の汚染物質が生じたときは、コストの発生として捉える。即ち、例えば100<POL, MOU>+100<COST, MOU> という取引が発生したことになる。

借方	貸方
100 汚染物質	50 原料
	50 付加価値

これから汚染物質の加工消滅のプロセスも定義上、GDPに寄与することになる。

汚染物質の地球環境への排出：

汚染物質を環境に垂れ流すような排出行為も、取引として記される。そのためには環境という主体を疑似的な取引主体として導入する必要がある。実際さまざまな資源の変化の問題、汚染の蓄積の問題、資源再生の問題などを交換概念に基づいて記述するためには、環境自体の主体としての扱いが極めて本質的かつ重要となる。

汚染企業： $300 \wedge <POL, MOU> + 300 <利益, MOU>$

環 境： $300 <POL, MOU> + 300 <環境損失, MOU>$

汚染物質を環境に勝手に排出する企業は、本来負のコストを持つ汚染物質を環境に排出することでその分の利益を得ることができると考えられる。これは負債の一方的な転移に相当する負の価値の強制的な転移が、汚染物質の排出という形でなされたことになる。環境には汚染物質を排出した結果環境の側には損失が生じる。

汚染物質の環境による分解・浄化：

環境という主体には汚染物質の分解などの浄化能力がある。これは汚染物質を原料とした、一種の生産であると考えてやはり簿記的に記述することが可能となる。

$300 \wedge <POL, MOU> + 300 <付加価値, MOU>$

つまり環境という主体は付加価値生産を行う主体と見なされる。これは経済主体による汚染除去が付加価値生産と見なされるのと同様である。この環境を主体とする記述では、資源の再生産や、資源の枯渇といった問題も同様に交換代数に基づく多元簿記的枠組みで扱うことが可能である。従って我々の環境簿記では、自然という主体のストックとフローの変化が、環境簿記の大きな部分を占めることになる。

このように我々は厳密な状態空間の記述を与えることで、環境などの外部性もまた我々の状態記述の体系の中に組み込むことが可能であることを示した。これらのミクロの環境外部性を取引の記述体系に組み込んだモデルを元に、マクロの環境記述を組み立てることができれば、93年SNAの段階でもサテライト勘定という形で付表の形で扱われているこれらの外部記述を、体系内の他の変数との内的拘束関係を含んだモデルの中に統合することが可能となる。

2.9.9 交換代数からバーチャル経済へ

我々は、簿記の背後にある代数構造を公理化して抽象的にモデル化することで、実物財の計量単位を扱える多元簿記を特徴付ける交換代数という代数体系を定式化した。またこれに基づいてエージェントの状態空間を記述することで、マクロ経済のSNA的な諸変数を代数的な変数として構成的に与える試みを行っている[21][22]。

その上で筆者は、マクロ経済を複数の機能の異なる経済的エージェントからなる多

主体複雑系であると考えてこれを分析している。その分析のひとつの手段に、仮想の実験経済系を作るアプローチがある。バーチャルエコノミーと呼ばれる、図 2.9-12 に示されるような 9 つの経済的エージェント（政府、銀行、中央銀行、農家、製鉄、製粉、製パン、機械製造、家計）からなる国民経済の実験モデルは、個々の経済主体が、製造業の場合は製造も含む形で簿記的に記述された状態空間を持っている。国民経済の SNA 的諸変数は個々の経済主体の、代数的に記述された簿記的変数に還元される。このマルチエージェントの実験経済をモデル経済として様々な経済の変化を再現することが可能となる。その場合、個々のエージェント間の取引の連鎖がどのように決定されるかが問題となる。筆者はこれを実験経済学の手法と人工知能の手法で研究している。ここで実験経済学と言っているのは、個々の経済主体の意思決定を人間のプレーヤが行って、そのダイナミクスを研究するアプローチで、ゲーミングシミュレーションを用いた分析である。

このバーチャル経済のゲームのプレーヤは、政府、銀行、中央銀行、農家、製鉄、製粉、製パン、機械製造、家計の 9 主体である。このほかに、ゲームファシリテータがゲームをコーディネートしてバーチャル経済のダイナミクスは進行する。ひとつの経済主体をプレーするプレーヤは個人であっても、チームであってもかまわない。この経済では小さいながら農家は小麦を生産し、製粉業は小麦を購入し小麦粉を生産するなどの生産活動がある。生産量は機械の台数と雇用者数、調達した原料の制約の範囲で制約され、機械製造業では資本財としての機械装置が生産される。家計は労働力を各産業と政府に供給し、最終消費の主体となる。家計の人口増加だけが外部シナリオによって定められる。

経済学にも従来から繰り返しゲームなどに基づく実験経済学の試みが幾つかある。だがそれらの試みは、実際の SNA の諸変数に匹敵する多様性をもたらすものではない。その意味で経済学は、物理学のような適当なモデル実験系を持ってこなかった。

バーチャル経済という現実的なマクロ経済の諸変数を含んだ状態空間でのゲームを、人間を意思決定者としてプレーしてみると、人間はさまざまな制度的工夫でゲームの構造そのものを変化させていることに気付く。例えば政府は、補助金と投資を結び付けた制度を作るような工夫をすることがある。これは企業に対して投資のインセンティブをもたらしゲームの質を変化させる。このような形の制度創発がこの経済発展のダイナミズムと多様性の源泉にある。

我々が交換代数による状態記述から構成した仮想の経済系は、現実の経済システムで生じる様々な多様性をその内部で表現できるシステムである。ただしこのような多様性はエージェント自身の意思決定の多様性による部分も多い。我々が次に着目すべきは、この状態空間の多様性の上に醸し出される意思決定の多様性である。我々は、ある厚生基準から見て失敗した経済に対してそれは間違っていると、何か規範的な理論に従って、実際の人間のエージェントも活動すべきであるというような規範的な人間活動システムの理論としての経済理論を構成することを目標とはしない。

我々は人間のような主体を含むシステムの自律性を持った活動を前提とし、それを

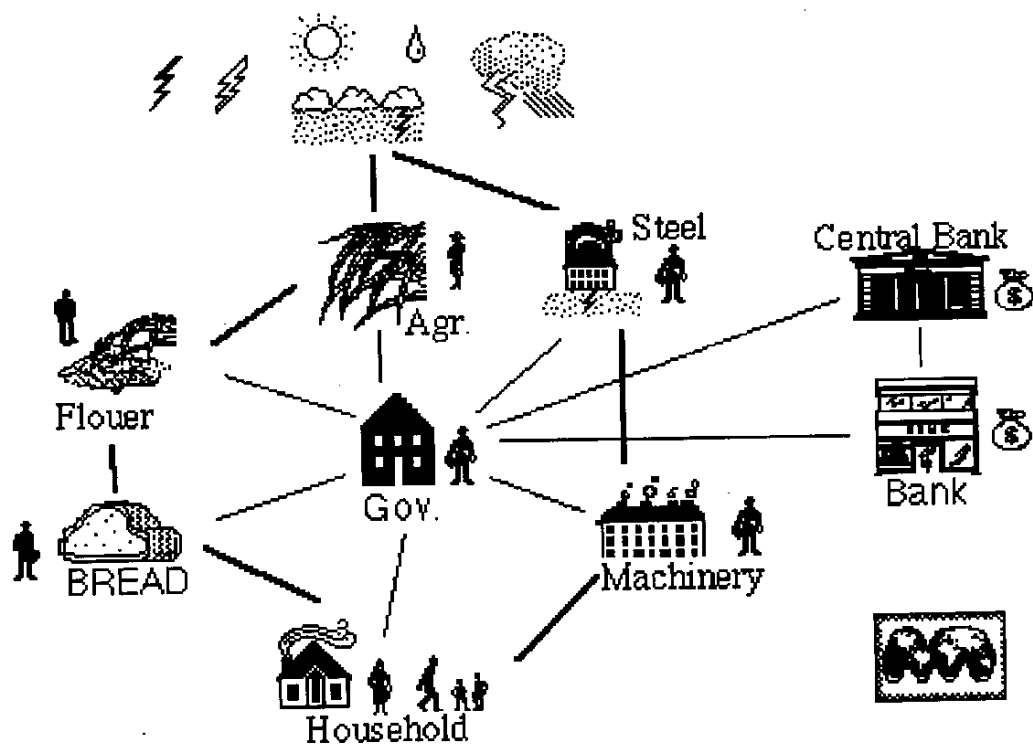


図 2.9-1 2 バーチャル経済を構成する自律的エージェント

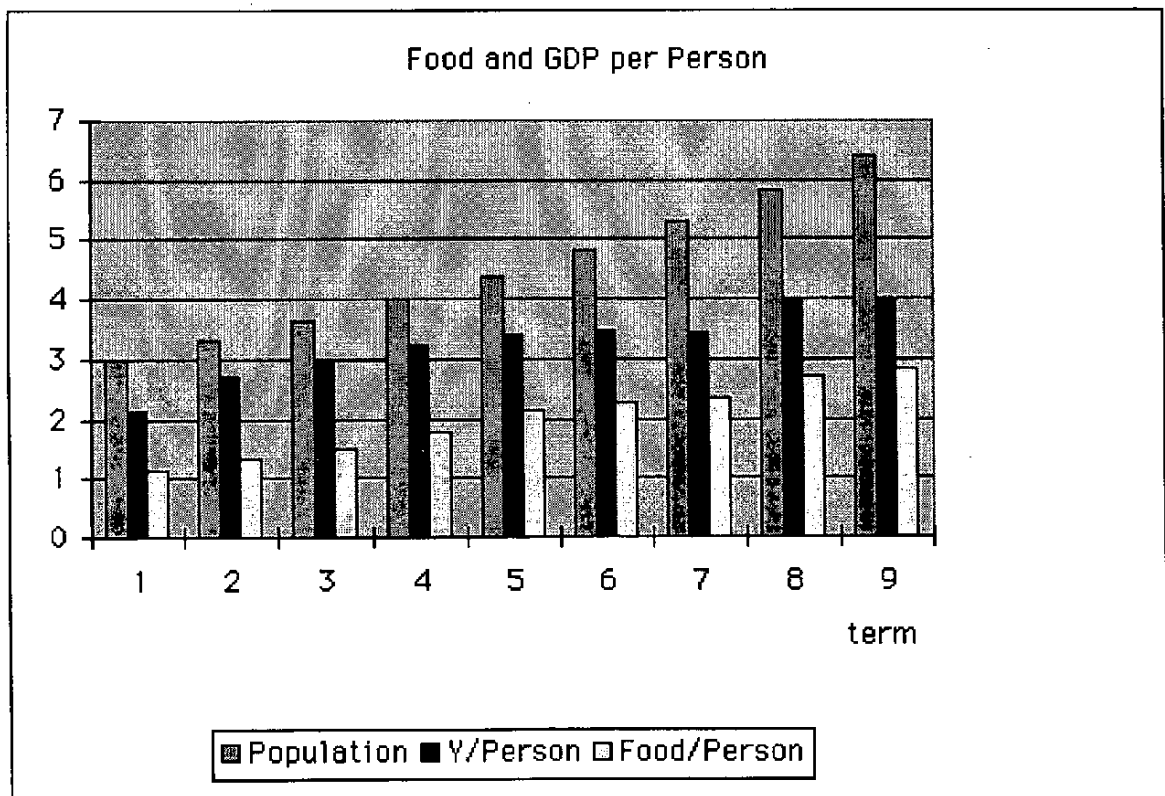


図 2.9-1 3 バーチャル経済の発展の一例

学習や制度設計によってどのように間接的にある社会的厚生基準を満たす形でシステムをデザインできるかを考えていきたいのである。バーチャル経済のような複雑性を持ったシステムでは、既にレプリケータダイナミクスのような手法でそのダイナミクスを記述することは殆ど不可能に近い。何よりもこの程度の大きさの経済であっても取引の代替案の種類は無数とってよいほどある。しかもそれらは互いに相互拘束条件を構成している。

必然的に個々のエージェントに対して、何らかの活動ルールを組み込んだ、エージェントの発見的探索によるシステム記述やそこでの学習を組み込んだモデルでの記述がこの種のシステムに対するダイナミクスでは必要となる。

人間をエージェントとしてプレーしたゲームに対応する複雑さやリアリティを持った、探索的ダイナミクスを構成するのは容易ではない。単に理論無しでAIエージェントを作り込んだとしてもまた得られる知見は限定されたものとなるだろう。そこで次に我々は、このようなある目的に基づいて発見的探索を行うエージェント集団の定式化について議論を進めたい。

2.9.10 制約充足型のシステム記述

経済のようなマルチエージェントシステムの構造変化を論じる理論枠組みとしてのレプリケータダイナミクスは、局所的相互作用から代替案に関する人口比率の微分方程式を導くという手法の特徴から、使える問題領域は限定される。またそこでは平均利得の差に反応して態度を少しずつ変えるというエージェントの態度学習のモデルが方程式に隠された形で仮定されている。それゆえ我々が長期的に課題とする社会経済システムでの多主体複雑系のマネジメント問題には利用できる側面は限られている。そこで我々は本項でより一般的な問題記述の可能性を検討する。

レプリケータダイナミクスによって論じられた多主体複雑系の分析をより一般的にするためには、時間発展作用素を一般化する方法と、平衡解そのものを時間発展作用素によらず特徴付けるという二つの可能性がある。前者に関しては、マルコフ過程のような様々な何らかの時間発展モデルをエージェントの相互作用から導いてその平衡解を分析するというアプローチになる。このような相互作用に基づいたアプローチは、プロセス指向のアプローチであると言えることができる。時間発展作用素 $H(x)$ $x \in \Omega$ の平衡解 $\{x \mid H(x)=x\}$ で特徴付けられる集合から逆には、一般的に時間発展作用素を一意に特徴付けることは一般にはできない。同一の初期値からでも同じ平衡点へ向かう無数の軌道曲線がありえるからである。それゆえ時間発展作用素はより詳細な情報を与える。自然科学的なモデルについては、このようなプロセス指向の記述法が標準的方法であった。しかし、自然科学でも変分原理による定式化のように宣言型の法則表現の方式が利用されることもある。また経済学の領域では、比較静学という形で時間発展作用素によらない形で平衡解の特徴付けが広く行われてきた。これら平衡解の

特徴付けは、時間発展作用素によって行われる必要はない。むしろある状態空間の平衡解の特徴付けは、その空間上の何らかの述語によって行われると考えることがより一般的である。

ある目的や満足化水準を満たす代替案を求めるという形の宣言型の代替案選択原理の記述による状態空間の特徴付けはこのような述語の記述の一般的な方法である。経済学では最適化述語がこの目的のために広く使われてきた。このような宣言型の代替案選択原理の記述方法は、一般的にそれを探索するプロセスに関してはオープンとなっている。AIの領域では、これを探索問題として捉えて、制約充足問題（CSP：Constraint Satisfaction Problem）として効果的な探索アルゴリズムの開発が盛んである[15][16]。

制約充足解が先に述語の形で与えられ、それを求める探索プロセスを作用素的に見るという逆転したモデル化の方法論がここでは取られる。

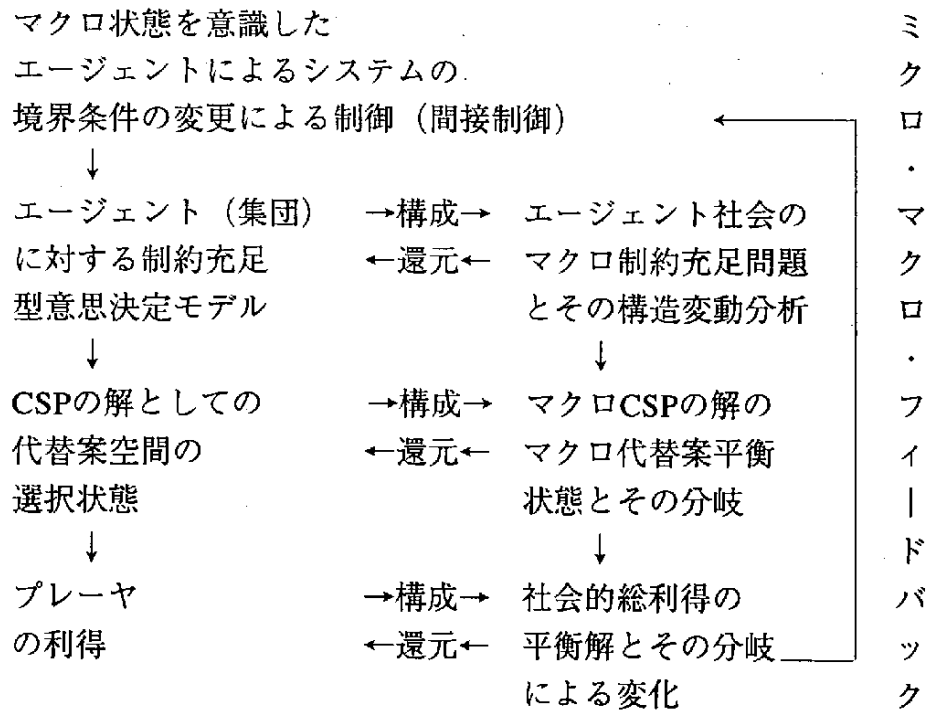
このような制約充足型のシステム記述では、ダイナミカルシステムで議論となるような、状態安定性や構造安定性の議論は通常は議論の対象とはならない。

先にも述べたように、経済学ではマクロには比較静学という形で既に、目的指向の記述形式が利用されていた。しかしそれは多くは価格均衡モデルとして記述され平衡解が構造的分岐を引き起こすようなものではない。更に、最適充足解の唯一性を前提とした議論がそこでは行われていた。近年それが拡張され、サイモンの限定合理性の下での満足解の概念が用いられるようになってきた。或いは、ゲーム理論のナッシュ均衡のような複数均衡が明示的に扱われるようになった。このゲーム理論の解概念もやはり宣言型の制約充足問題の一種であると捉えられる。そこでは、解に到達するプロセスとは無関係に解の満たすべき条件がナッシュ均衡解のような形で与えられている。このようにミクロでエージェント指向の記述であれ、マクロ変数の間の記述であれ経済システムでは、制約充足的な問題記述は比較的普通に行われている。ただしこれらの記述は通常は制約充足問題として明示的に意識され扱われることはない。

他方、経営的な観点から経済主体を見たとき、そこでの意思決定原理の多くのものは容易に制約充足型の問題記述として捉えることが可能である。

このようにエージェント指向のシステム記述に於ても制約充足問題という形の問題の一般化は、重要な問題提起を含んでいる。そこで本稿ではこの制約充足という問題記述の方法を、エージェントの活動記述の宣言型の方法として捉え、その観点から従来のアルゴリズム的な認識関心からの制約充足問題の定式化に欠けている問題関心を明確にし、そこでのミクロ制約充足問題と構造変動の問題を我々の枠組みの中でどのように定式化できるかを明らかにしたい。

我々が図2.9-2で示したポリエージェント型のシステムモデル間は、図2.9-3の範囲ではダイナミカルシステムつまり時間発展作用素による陽なシステム記述を前提としたものとして具体化された。ここで我々は視点を変えて同様の問題を制約充足問題として捉るならばそれは下図のように示される。



2.9-14 制約充足型ポリエージェントシステム観

我々は、[[代替案選択原理]->[代替案空間]->[状態空間]]という3階層モデルを、エージェントの基本意思決定モデルと考えてきた。ここで代替案選択原理と呼んでいるのは、何らかの形で代替案空間の元を選択する方法である。

通常マルチエージェントの意思決定モデルでは、あるエージェントの意思決定が他のエージェントの意思決定に干渉し、互いに相互制約関係にあることがしばしばある。通常の売買は皆このような関係である。いくらでどれだけ買うという取引は、相手側もその取引を認めることで成立する。

2人非協力ゲームは、このエージェント間の相互制約のある場合の代替案選択原理の最も単純な例を与えてくれている。このようなシステムでは、複数エージェント間で何らかの形で制約条件を充足する意思決定が必要となる。通常非協力ゲームでは、ナッシュ均衡がこのような制約充足条件を定める意思決定原理（解概念）として採用されている。

しかしむしろこれは唯一の基準ではない。比較的合理的な基準というだけである。問題は通常の経済では、エージェント間の取引の連鎖を通じて、全体としてある制約充足問題が構成されている。この代替案選択原理を、人工生命のような手法でヒュリステックに構成することも可能である。例えば遺伝アルゴリズムの議論でしばしば利用されるクラシファイアは、代替案選択原理となる。更にこの代替案選択原理としてのクラシファイアを変化させるより上位の強化学習と進化のメカニズムがバケツリレーアルゴリズムによる報酬配分と遺伝アルゴリズムによるルールの交叉のメカニズムとして用意されている。エキスパートシステム的な言い方をすれば、代替案空

間がアクションであり、状態空間がワークスペースであり、代替案選択原理がルール集合になる。この代替案選択原理も広義の制約充足型のモデルであると考ええる。またこのようなモデルは実際の複雑なエージェントの挙動を再現するのに有効である[17]。

2.9.1.1 マルチエージェントの制約充足問題

制約充足問題CFPは、AIの領域でよく知られている問題記述の方法である。そこでは、何らかの探索問題を記述するのに、制約記述述語を用いてこれを行う。本項では、特にマルチエージェントの制約充足問題について、これを拡張することで、我々が図2.9-10で示したポリエージェント型の制約充足モデルに必要な定式化を与えたい。

【マルチエージェント型制約充足問題の定式化】

$D[i/j], i \in \text{Agents}, j \in \text{Dom_ind}[i]$ を制約変数のドメインとする。ここで i はエージェントのインデックス、 j はエージェント i の制約変数のドメインの変数とする。マルチエージェントの制約充足問題では、制約がエージェント内の制約とエージェント間にまたがる制約に区分できる。

$D[i] \Leftrightarrow \text{def } \Pi \{D[i/j] \mid j \in \text{Dom_ind}[i]\}$ でエージェント i の制約ドメインを、

$D \Leftrightarrow \text{def } \Pi \{D[i] \mid i \in \text{Agents}\}$ で全エージェントの制約ドメインを表す。

ミクロな視点からのマルチエージェントの制約充足問題は、制約述語 $P_{\text{sum}} \subseteq D = \Pi \{D[i] \mid i \in \text{Agents}\}$ を与えることで定式化される。

【制約充足型意思決定の例】

例.1. Nash 制約充足 $P[\text{nash}](x1, x2)$

$D[p1]=D[p2]=\{a1, a2\}$, $P1, p2 \in \{\text{Player}_1, \text{Player}_2\}$ とする。

$P[\text{nash}](x1, x2) \Leftrightarrow$

$\forall y \in D[p2] \text{ ev}[p1](x1, x2) \geq \text{ev}[p1](x1, y)$ and

$\forall y \in D[p1] \text{ ev}[p2](x1, x2) \geq \text{ev}[p2](y, x2)$

$X_{\text{nash}} = \{ \langle x1, x2 \rangle \mid P[\text{nash}](x1, x2), x1, x2 \in \{a1, a2\} \}$

$\subseteq D[p1] \times D[p2]$

例.2. 需給均衡の制約充足

$D[\text{consumer}, 1] = \text{Dem} \subseteq \mathbb{R}^+$, $D[\text{supplier}, 1] = \text{Sup} \subseteq \mathbb{R}^+$,

$D[\text{consumer}, 2] = \text{Price1} \subseteq \mathbb{R}^+$, $D[\text{supplier}, 2] = \text{Price2} \subseteq \mathbb{R}^+$, $\text{Agents} = \{\text{consumer}, \text{supplier}\}$

これらから、局所制約が $P1 \subseteq \text{Dem} \times \text{Price1}$, $P2 \subseteq \text{Sup} \times \text{Price2}$ のように与えられる。このとき、需要と供給の一致というエージェント間制約が、 $P3 = \{ \langle x1, x2, y1, y2 \rangle \mid \langle x1, x2 \rangle \in P1, \langle y1, y2 \rangle \in P2, x2 = y2 \} \subseteq P1 \times P2$ のように与えられる。

ミクロ経済学ではこれらは唯一の均衡点を許すような直線或いは曲線として与えられ

る。つまり制約充足をするような価格均衡は唯一しかなく、それが無差別曲線から導かれることが意義のあることという問題設定上の約束事が支配している。しかし無論経営学的な感覚からは需給に関するモデルやそこでの制約充足的意思決定は異なったモデル化となり、複数充足解の存在は限定合理性の下で当然のこととなる。エージェントのグループによって制約充足問題のクラスが異なり、それらの間でなんらかの学習や相互影響のあるモデルさえ可能である。また何らかの構造パラメータを変化させることで充足集合が大きく変化するといいうわゆる構造変動の論理は、どちらにせよ現在の経済学のモデルでは殆ど論じられることはない。

2.9.1 2 構造変動と制約充足の新問題

制約充足問題は、人工知能のアルゴリズムとして意識され、研究されてきた。そのため、そこでの問題意識は、ここで我々が多主体複雑系の記述のために必要とするものとは異なっている。制約充足型のモデルの記述力はどの程度のものなのであろうか。そこで、例えば力学系の平衡解の構造転移の形で議論されるような自己組織化、構造変動の議論が制約充足型のモデルでも可能かどうか大きな関心の対象となる。

レプリケータダイナミクス型のエージェント集団の力学系としての分析は、そのミクロ的相互作用の基礎をゲーム理論に置き、そこからレプリケータダイナミクスを導出し力学系としての分析を行う。この手法で記述できる社会経済現象は限定される。より記述力の高い方法で図2.9-3で示した認識枠組みを表現することが必要となる。そのために制約充足問題 (CSP) による記述に基づいて力学系の構造変動と同様の議論が構成可能であることを示す。

定義12.1 制約充足構造集合 Structural Set of Constraint Satisfaction (SSCS)

$S = \{X[a] \mid X[a] = \{x \mid P[a](x), x \in \Omega\}, a \in A\}$ は、様々な構造パラメータ $a \in A$ を動かしたときの制約充足集合の集まりである。我々はこれを制約充足構造集合 (CSSS) と呼ぶ。この制約充足構造集合に対して、我々は Generic Bifurcation の概念を導入する。そのために、 S の要素である充足集合を分類する必要がある。我々は $\sim$ をこの制約充足構造集合の元 $X \in S$ 上の同値関係とする。ここで構造パラメータ空間 A 上には、位相構造が入っていると仮定する。

定義12.2 制約充足構造安定

構造パラメータ a のところで制約充足構造集合が分類 $\sim$ に関して構造不安定であるとは、 $\exists a' \in U[a] \ [X[a]] \neq [X[a']]$ となること。 $U[a]$ は a の近傍構造変動という概念自体は、ダイナミクスや微分構造抜きで抽象化することが可能である。この抽象化の範囲で、我々は力学系の分岐を含む広範な構造変動概念を扱うことが可能となる。

システムの構造を規定する構造パラメータに位相構造が入っていることを前提とし

て、その微小変化に対して構造を分類する同値関係が変化しなければ、そのシステムは構造安定と見做される。ただしこの構造概念は同値関係に依存した概念であり、どのような同値関係でシステムの構造を分類するかに依存している。これは一見奇異に思えるかもしれないが、むしろどのような構造が変化するかという構造概念の明示化のためにはこのような定式化の方が望ましい。

微分方程式によって定式化されたシステムの構造概念は、平衡点の位相同型に関する分類（同値関係）概念が前提とされていた。これは一つの構造概念であるが、必ずしも全ての構造という概念を包摂するものではない。構造は我々が何を「同じ構造」と見做すかという概念と、その同じと見做される構造の類から別の類へ変化するという概念によって成り立っているからである。

微分方程式や差分方程式で記述されたシステムでは、動的プロセスとして記述される状態空間の相空間の軌道概念は、状態空間が代替案空間とペイオフの空間のような2重の構造を持つ主体を含む複雑系では異なって分析される必要がある。

意思決定主体としてのエージェントからなる空間では、代替案空間と代替案選択の結果として得られるペイオフなどの基礎的状态空間がある。基礎的状态空間の変化のプロセスは、代替案空間上の制約充足解の探索プロセスの結果として得られるものである。

従って、代替案空間上での制約充足解の探索を行う探索プロセスそのものが問題とならざるを得ない。

これらに関して我々は、ダイナミカルシステムの状態安定に対応する概念を導入する必要がある。自律的エージェントからなるシステムのなんらかの充足解の安定性という概念を、代替案空間の探索オペレータに依拠した概念として再構成する必要があるということになる。この探索という問題意識は重要である。例えば従来の微分方程式でグラジエント系のような単純な力学系で、系の平衡点を制約充足解と見なすケースを考えてみよう。その解は初期値依存の時間発展作用素によって探索される。もし2つの谷を持つポテンシャル系であれば、通常は解の探索は初期値依存となる、しかし我々が大きい揺らぎを持つ長距離探索が可能であれば2つの谷を比較してより深い谷をよりよい大域最適として探索できる。つまり通常のダイナミカルシステムの軌道曲線は大域最適を探索するオペレータではない。

【探索充足安定】

状態安定概念は、通常のダイナミカルシステムでは構造安定に関する概念よりは、基礎的或いはその前提となる概念と捉えられがちである。しかし我々のより抽象化された枠組みでは、構造安定と状態安定は独立性の高い、別々のシステムの性質に依存した安定概念と見做される。構造安定性は、構造を分類する同値関係に依存したシステムの性質と見做される。これに対して状態安定に対応する概念は、充足解を探索する探索オペレータに依存したシステムの性質と見做される。

いま充足解空間に適当な位相が定義されているとする。このとき充足解 x が探索オペ

レータHに関して探索充足安定であることが次のように定義される。

定義12.3 探索充足解の局所安定と大域安定、部分局所安定

探索オペレータHが与えられたとき、制約充足問題の充足解 $x \in \Omega$ に対して、 x の近傍 $V[x]$ に属する y からその探索オペレータが充足解を探索できるとき、その探索オペレータHに関して、その充足解 x は局所安定であるという。

同様に制約充足問題に充足解 $x \in \Omega$ が存在するとき、任意の $x \in \Omega$ からその充足解が探索されるとき、探索オペレータHに関して、充足解 x は大域安定であるという。

更に、充足解 $x \in \Omega$ に対して x の近傍 $V[x]$ の中に充足解に到達できる近傍 y が存在するとき、探索オペレータHに関して、充足解 x は部分局所安定であるという。

Cor. 大域安定 $\rightarrow$ 局所安定 $\rightarrow$ 部分局所安定

【間接制御と制約充足問題】

次に我々はこのエージェント集団に対して、エージェント自らの制約充足行動を前提として何らかの構造変数を動かすことによりその充足集合を目的の述語を満たすように変化させるという意味での間接制御の概念を我々の枠組みで定式化したい。我々の意味での間接制御では、 $a \in A$ を変化させて、制約充足集合 $X[a] = \{x \mid P[a](x), x \in \Omega\}$ を変化させる。これは、ある制約述語を満たす範囲で、別の制約述語を満たすような構造パラメータ a を探索する問題として定義される。制約充足述語に対して、構造パラメータの探索オペレータを定義することで我々は充足解を求める問題を考える。

定義12.4：間接可制御

$X[a] = \{x \mid P[a](x), x \in \Omega\}$ に対して、新たな制御目的となる間接制御述語 $Q(x)$ が制約として与えられたとき、 $\exists a, x \{x \in X[a] \text{ and } Q(x)\}$ となるなら、 $X[a]$ は $Q(x)$ に対して間接可制御であるという。

定義12.5：間接完全可制御

$\exists a X[a] \subseteq \{x \mid Q(x), x \in \Omega\}$ のとき、 $X[a]$ は間接制御述語 $Q(x)$ に対して間接完全可制御であるという。

Cor. 間接完全可制御 $\rightarrow$ 間接可制御

この間接制御では、エージェントは自律的に充足解を探索することを前提として、構造変数を制御して、間接制御述語 (Indirect Control Predicate : ICP) を満たす構造変数を求める。構造変数が入力変数となった制御である。

間接可制御概念は、シングルエージェントの場合よりも、マルチエージェント系で本質的に重要となる。我々は何らかの制約目的充足のために自律的に活動しているエージェント集団の性質を知りたいからである。実際には、これら充足型のシステム記述から具体的な探索オペレータをどのように構成するかの部分に関する展開があって始

めて具体的な問題解決のモデルが定式化されることになる。この方向の研究が理論、シミュレーションとも今後発展することが期待される。

2.9.1 3 共有地の悲劇に対するクラシファイアモデルによる分析[17]

ここでは、共有地の悲劇と呼ばれる社会的ジレンマに対してモデル化したクラシファイアによる人工社会シミュレーションを例にとり、コンピュータシミュレーションの世界での事実発見の、複雑系研究における意義について簡単に論じたい。

共有地の悲劇は、社会的ジレンマとして社会学や経済学の領域で広く研究されている。そこではゲーム理論が重要な道具立てとして用いられている。しかしそのモデルは比較的単純であり、実際に行動ルールを相互に参照し学習する自律的エージェント集団では、ゲーム論的な合理的意思決定モデルとは異なる挙動をする可能性がある。またゲーミングシミュレーションによる実験ではかなり複雑な挙動が観察される。

そこでここでは、ルールによって活動し経験を学習するエージェントのモデルをクラシファイアシステムとしてモデル化し、エージェント集団からなる人工社会的モデルのシミュレーションによって共有地の悲劇的な社会的ジレンマを分析することを試みた。ここでは、我々の興味は共有地を維持するような制度はどのように設計可能であるかという点に向けられている。ここではクラシファイアの発火結果の評価で、羊以外の財に関しても価値を見いだすケース、政府のような調整エージェントがいて羊保有税を課すケース、破産者に補助金を交付するケースなどを検討し、共有地の生産性を保ってエージェントの活動の多様性が保たれる条件を検討する。

【環境マネジメントゲーミング】

一定の閉じられた環境に暮らしている複数の羊飼いが、羊を繁殖させることによって収入を得て生活していくという共有地の悲劇の特質を分析するモデルとして、ここでは出口によって開発された環境マネジメントゲームというゲーミングシミュレーションを用いる。このゲームは、個人にとって合理的だと考えられる選択（羊を増やすこと）が、全員がそうすることによって全体に不利益（繁殖倍率の低下）をもたらすという社会的ジレンマの一種「共有地の悲劇問題」に資金繰りや消費行動などのミニマムな社会構造を付け加えてゲーム化したものである。

このモデルに基づいて人工生命化するにあたって、モノを1種類にし、一期に売り買いできる数を制限するなどの変更を施した。

- ・ゲームに登場する全ての財は、現金の単位であるMOU（Money of Unit）で表せる。
羊は2 MOU、モノは6 MOU、食料は2 MOUである。
- ・プレイヤー数は5人とし、各プレイヤーは羊を3頭持って他には何も持っていない状態からスタートし、毎期に必ず食料として2 MOUを消費しなければならない。
- ・期中にプレイヤーができる行動は、羊を売ること、生活の豊かさの象徴としてのモ

ノを買うこと、羊を借りることであり、行動は同時に行われる。全プレイヤーの行動が終わった後に、環境の状態によって決まる繁殖倍率を手持ち羊数にかけた数が期末の各プレイヤーの手持ち羊の数となる。総羊数と繁殖率の関係は総羊数が0-50で1.8、51-75で1.6、76-90で1.4、91-100で1.2、101以上で1倍つまり増殖せずとなっている。この倍率はプレイヤーには知らされない。

- ・一期に売ることのできる羊・借りられる羊の数は7頭まで。買うことのできるモノの数は1個まで。羊を借りたプレイヤーは、来々期の期首に借りた2倍の羊を返却しなければならない。

【人工社会のシミュレーション結果】

ここではシミュレーションの結果をグラフで示す。それぞれのグラフに示されている50期は、50期を9回、都合450期を経験させ適応度を上げたものであり、総価値とはMOU、羊、モノの価値を加えたものを示す。まず単純な人工社会の結果は図2.9-15に示される。

この単純なケースでは、1人のプレイヤーの独占状態となる。独占状態にあるプレイヤーは、初期は繁殖倍率が高いため、MOUやモノとして資産を保有せずに、羊として保有する。総羊数が増え環境が悪化してくると、おもむろにモノを買い始める。独占を生む理由は、環境が悪化し繁殖倍率が下がったあとには他のプレイヤーは成長できないので「富めるものはますます富む」という構造を生むからである。また初期にモノを買って成長していたプレイヤーが環境の悪化により羊の返却ができなくなり破産するのも、独占を生む理由である。

【単純な人工社会】

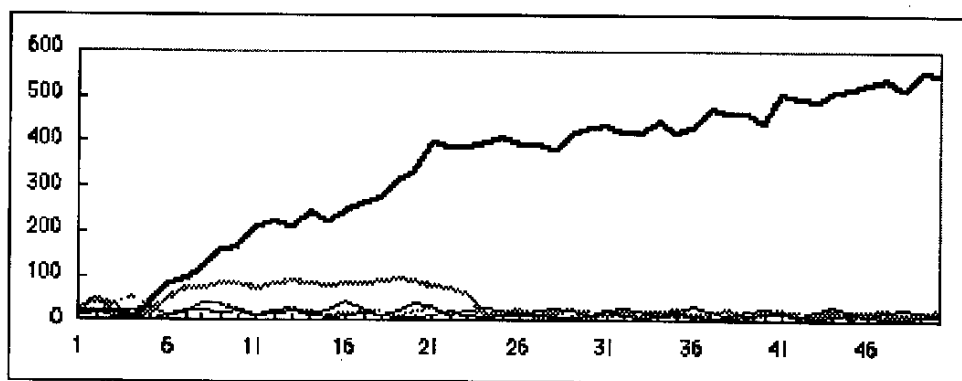


図2.9-15(1) 総資産の推移

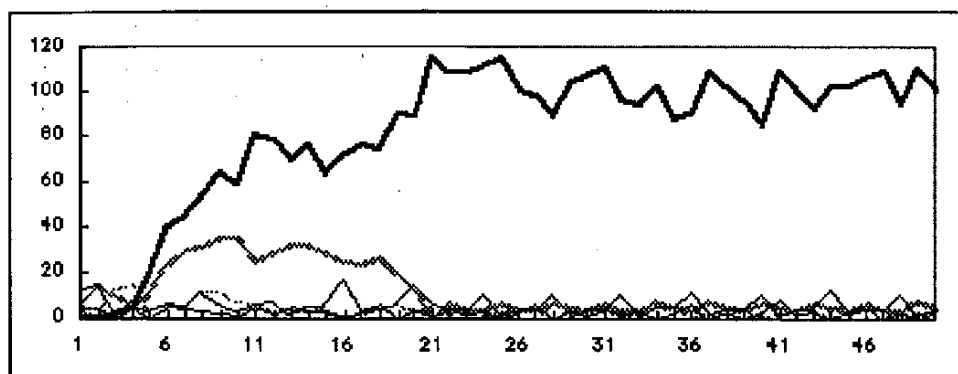


図2.9-15(2) 羊数の推移

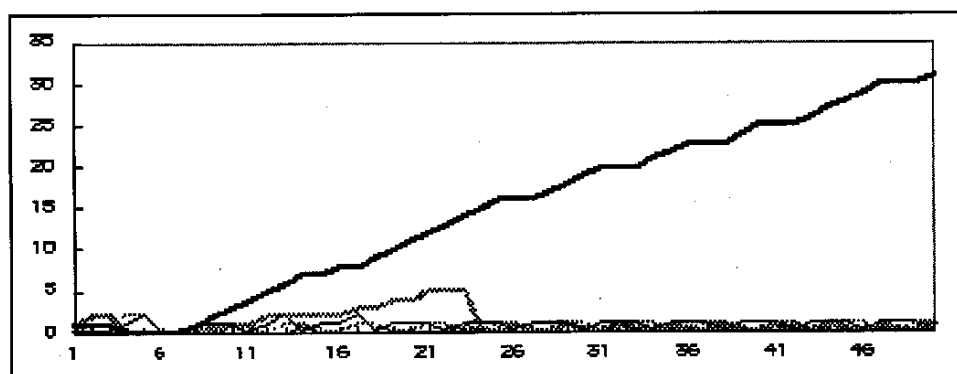


図2.9-15(3) モノ数の推移

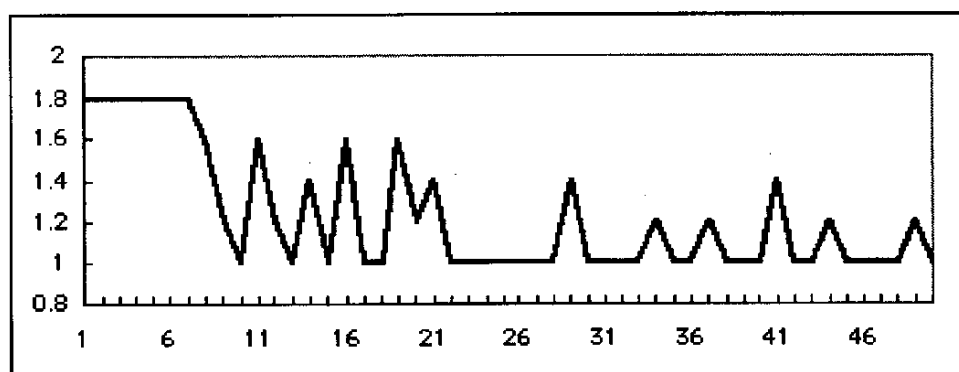


図2.9-15(4) 繁殖倍率の推移

【コミュニケーションと税金から生活補助が発生する社会】

この社会に多様性をもたらし、共存と共有地の維持という社会的目標を実現するにはどうしたらよいだろうか。一つの可能性は、強者から税金を徴収することである。

実際には税金だけでは、大金持ちと小金持ちの存在する人まわり小さい、第二勝者が誕生するだけであった。そこで更に徴収した税金を使って資産の再配分を行い、弱者への生活補助を行う社会をデザインし、更にクラシファイア間のクロスオーバーという形でルールが交叉するコミュニケーションによる知識の共有に加えて、税金と下からの押し上げの間接制御である生活補助を制度デザインした社会を考える。これによってようやく我々は十分な多様性と共存、共有地の維持を満足する制度デザインができた。

ここでは上を押さえる間接制御と下から押し上げる間接制御が全プレイヤーにおいてうまく機能している。このようなシステムの分析には、現在の理論だけでは不十分であり、コンピュータシミュレーションの世界での解析、或いはゲーミングシミュレーションによる仮想の社会での社会的リアリティ構成のもとでの実験が極めて有用な知見をもたらしてくれる。

また主体を含む複雑系では、ある種の多様性の維持というのが重要な社会的間接制御の目標となるのであるが、現在の理論はまだこういった経験的には知られている問題を論じられるところまで到達していないのである。

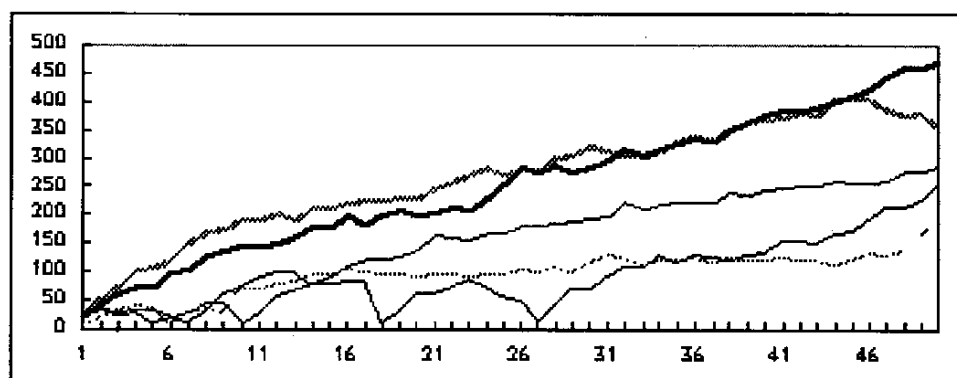


図 2.9-16(1) 総資産の推移

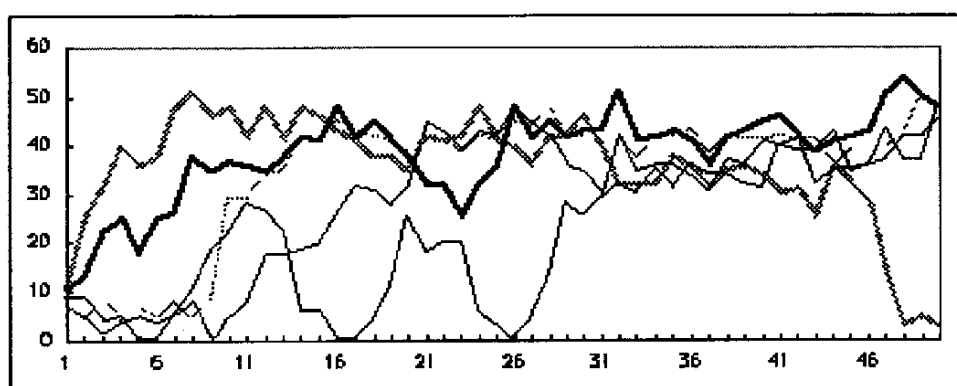


図 2.9-16(2) 羊数の推移

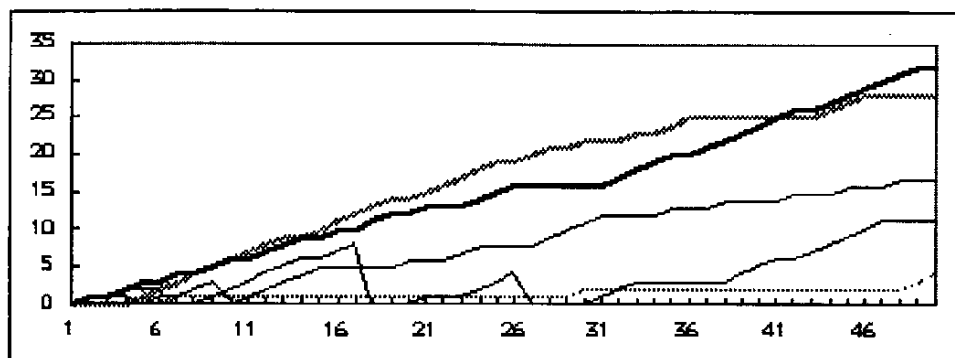


図2.9-16(3) モノ数の推移

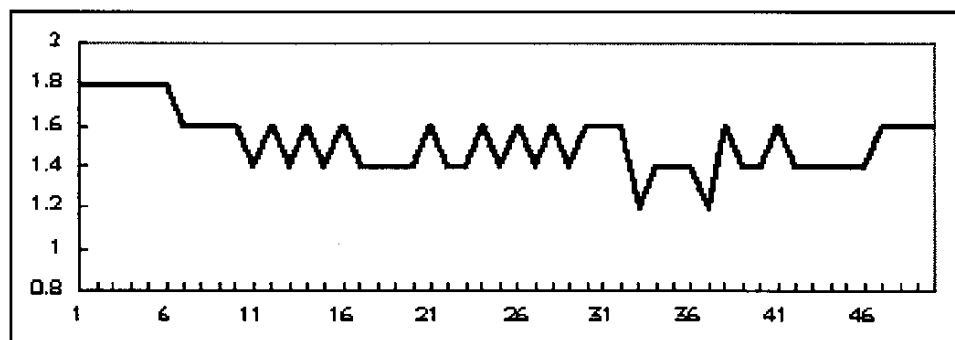


図2.9-16(4) 繁殖率の推移

2.9.14 結 語

我々は、エージェント指向のアプローチとして、適当なマイクロマクロリンクのあるダイナミクスを導入し、マクロからマイクロへの構造的フィードバックをデザインすることでエージェント集団の社会厚生を配慮したマネージメントが可能となるようなシステムデザインを問題としてきた。

ここでエージェント社会を扱うための方法として、自然科学の領域で発展した構造変動の理論を用いるアプローチとして、レプリケータダイナミクスの分岐理論が一つの可能性であることを見てきた。この力学系的なアプローチ従来のゲーム理論的アプローチに比べ、相互作用形式の動的変化による外部性の扱いが可能であるなど多くの拡張可能性を持ち、更に構造変動に関する議論を行え、制度設計に関する多岐に渡る議論が可能となるなど優れた側面がある。

だがレプリケータダイナミクスは、そもそもある特定の形式でのエージェント間での代替案の遷移（学習過程）を前提としており、より詳細なエージェントの内部モデ

ルの相互参照や学習などを扱うには不向きである。他方で従来から、エージェントの活動を分析してきた発見的探索やそれに関する遺伝アルゴリズムによる進化的探索などを含む諸手法、或いは強化学習などのアプローチでは、システムの構造変動や自己組織化に関して、力学系のパラダイムが作りだしてきた安定性や構造安定性などについての枠組み程にはエレガントな枠組みは存在しない。そこで本稿では、エージェント集団のダイナミクスに関しては、この両者のアプローチの接点となるアプローチとして、制約充足型でエージェントの目的指向的活動を特徴付け、その充足解の具体的探索については、自由度を持たせたシステム記述を提案した。そこでは、制約充足問題というのが、従来の経済学的な問題設定を拡張する形となっており、経済学的問題関心に接合でき、また新しいエージェント集団の非線形の構造解析のための手段となりえる可能性があることを主張してきた。

更に我々は制度の設計の問題を、間接制御というエージェントの制御原理に基づいて考えてきた。しかし現実世界のエージェント集団の制度設計を論じるには、まだ道具立てが足りない。例えば制度の複合的なリンクも重要な課題となる。これはいわゆる構造パラメータ間のカップリングを持つようなシステムを考えることになる。この外にも制度設計上の課題は多くあり、エージェントの自律性と間接制御に基づく制度設計の論理についての今後のさらなる展開が必要とされる。

我々がもうひとつ着目した、エージェントの状態空間の持つ複雑性へのアプローチについては、筆者によって展開されている交換代数に基づいた経済主体の状態記述について簡単に紹介した。この方向のアプローチは比較的地味であり、現在の複雑系の議論の中では省みられることの少ない領域であるが、実際に我々が社会経済システムの内的複雑性を表現するようなモデルを構築するためには、必須の領域である。

注と参考文献

- [1] Esben Sloth Andersen, *Evolutionary Economics -Post-Schumpeterian Contributions -*, Pinter Publishers, 1996
- [2] Fernando Vega-Redondo, *Evolution, Games, and Economics Behaviour*, OXFORD UNIVERSITY PRESS, 1996
- [3] 高木春夫, 木嶋恭一, 出口 弘, 他著『マルチメディア時代の人間と社会』, 日科技連出版, 1995.
- [4] Hiroshi Deguchi, "MULTI AGENT ECONOMICS AND ITS GAMING SIMULATION", in 『Modeling and Control of National and Regional Economies 1995』 edited by Vlacic et al., pp.269-274, Pergamon Press, 1996
- [5] 出口弘, 「自律分散型の産業構造と組織」, ハーバード・ビジネス, 5月号, pp.44-53, 1996, ダイアモンド社
- [6] 出口弘, 「情報と複雑系の経済システム論」, 経済セミナー, No.504, pp.32-39, January 1997, 日本評論社

- [7] 出口弘,「社会科学とポリエージェントシステム」オペレーション・リサーチ, 1997, 9月号, PP.16-21, OR学会
- [8] 木嶋恭一, 出口弘 編著,『システム知の探求1』, 1997, 日科技連出版
- [9] 出口弘, ゲームプログラミングと社会科学,『ゲームプログラミング』, bit 7月号増刊, pp.231-243, 1997, 共立出版
- [10] 出口弘, ゲーミングシミュレーションのポリエージェントシステム分析, シミュレーション&ゲーミング学会第9回大会予稿集, pp.49-52, 1997年9月
- [11] 出口弘, 「レプリケータダイナミクス型モデルのミクロマクロリンク」, 第10回自律分散システム・シンポジウム予稿集, 計測自動制御学会, pp.89-94, 1998年1月
- [12] 出口弘, 「多主体複雑系の構造変動と制約充足型モデル」, 電子通信技術研究報告, 信学技法Vol.97, No.490, PP.41-48, 1998年1月
- [13] 星野力, 「モラルと行動の共進化」 「創発性科学重点研究」97年度A01班報告書, 1998年3月
- [14] 星野力, 『進化論は計算しないとわからない』, 共立出版, 近刊
- [15] 特集「制約充足問題の基礎と応用」, 人工知能学会誌, Vol.12, No.3, May 1997.
- [16] Edited by E. C. Freuder, A. K. Mackworth, Constraint Based Reasoning, MIT Press, 1994
- [17] 出口弘, 矢菅智之, 共有地の悲劇に対する人工社会的分析, 数理社会学会 1998年3月大会報告予稿集, 1998.
- [18] 出口弘, 分岐型モデルによる社会構造進化のためのデザイン, 進化経済学会第2回大会予稿集, 1998年3月
- [19] 在間敬子, 出口弘, 環境ラベリング制度の効果に関する経済モデル分析, 進化経済学会第2回大会予稿集, 1998年3月
- [20] Hiroshi Deguchi, "Complex Social Systems and Its Management", 5th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-5), June 1-4, 1998, to appear
- [21] H.Deguchi, B.Nakano, Axiomatic Foundations of Vector Accounting, Systems Research, Vol.3, No.1, pp.31-39, 1986.
- [22] H. Deguchi, Exchange Algebras and Economic Field, 数理解析研究所講究録 809, pp.88-105, 京都大学数理解析研究所, 1992.
- [23] 出口弘, 国民経済のマルチエージェント・システムとしてのゲーミングシミュレーション, シミュレーション&ゲーミング, Vol.4 No.1, Sep., pp.112-128, 1994.
- [24] 出口弘, 「情報と複雑系の経済システム論」, 経済セミナー, No.504, pp.32-39, January 1997, 日本評論社

3. 海外における複雑系研究の動向

3. 海外における複雑系研究の動向

3.1 米国編

中島 秀之 委員長（電子技術総合研究所）

1998年2月12日から20日にかけて、スタンフォード大学、ゼロックス・パロアルト研究所、サンタフェ研究所における複雑系関連の研究者を訪問し、討論を行なったのでその結果を報告する。主目的地はやはり複雑系のメッカ、サンタフェ研究所である。

3.1.1 Stanford 大学

サンフランシスコから車で30分程度。空港からバスもあるが大学構内へは入らない。

(1) Stanley Peters (Stanford)

言語学。現在、統計的手法に基づく情報検索を行なっている。大量のコーパスを機械処理し、単語間の共出現に基づく意味ベクトルを計算。これにより検索を行なう。

複雑系について討論し、David Beaver と Bernardo Huberman を紹介される。

(2) David Beaver (Stanford)

言語学。言語の発生をシミュレートするプロジェクトをKozaと共同で提案中。2つのデータベースがその内容を交換できるようなプロトコルを発見することが狙い。GP (genetic programming) [6]を使う。

このような通信には両者がレファレンスポイントとできる何かが必要である。人間の場合は体の仕組みと実世界が両者に共通なので、それを前提として通信が成立する。

Beaverらはデータベースの仕組み（用いる述語などは異なっても良い）の同一性と選択関数（GAにおける子孫を残すための選択。神の立場から良いものを選択できる）による同定を使おうとしている。しかし、選択関数を結果ではなく、このようなデータベースの構造と言うような内部のものに適応するのは行き過ぎであると思う。

3.1.2 Xerox PARC

スタンフォード大学南側の丘陵の上。セキュリティはタイトで訪問者は受付で待たされ、ホストが向かえに来るまで入れない。帰りも出口までホストが付き添う必要あり。

(1) Bernardo Huberman (Xerox PARC)

SFIの創設に力を貸したメンバーの一人（設立ワークショップでも発表[5]している）ではあるが現在のSFIの活動には批判的。CA（cellular automata）は数学的には面白いがそれだけで、実用にはなりそうもない。例えば複雑度の指標が数学的に定義できたとして、それをどう利用するのかはよくわからない。

また、CAの多くの結果は同期に依存しているが、実世界にはそのような同期は存在しない。CAのシミュレーションを非同期に実行するとパターンが生まれない[2]。

また、最近は経済との関係を強調[3]しているとのこと。

3.1.3 Santa Fe Institute

Address: 1399 hydepark road, Santa Fe, NM 87501

WWW: <http://www.santafe.edu>

サンタフェ空港へはデンバーから日に数便の小型機（15人乗り程度）が出ているのみ。隣町のアルバカーキ空港から車で1時間程度だからその方が便利だと思われる。ロスアラモスへも車で1時間以内で行ける。ロスアラモスは原爆開発のためにわざわざ人里離れた場所を選んだという位の僻地であり、サンタフェも似たようなもの。ただし、夏は観光客でにぎわう。冬は雪が積もっているくらい寒い（シーズンオフで宿も安い）。

サンタフェ研究所は、更にサンタフェの町の北東約2マイルの岡の上にあり、周囲にはほとんど何もない。比較的小規模（スタッフを全部含めても50名に満たない）な研究所で、平屋の建物が3つだけから構成されている（現在建築工事が行なわれているので増える模様ではあるが）。e-mailによる訪問予約には大変渋い印象を受けた。おそらく皆忙しすぎるのであろう（例えば、Melanie Michel はビジネスマン向けのGAのチュートリアルの準備中と言っていた）。

しかしながら、実際に訪問してみるとオープンな雰囲気のある場所である。周囲には何もないところなので、昼と3時のお茶はキッチンで用意される。皆こそこに集まってダベりながらお茶を飲んでいる。

現在の主な研究テーマ：

- ・ Adaptive Agent Simulation
- ・ Adaptive Computation
- ・ Biological Networks
- ・ Cognition
- ・ Computation, Dynamics and Inference
- ・ Computational Molecular Biology

- ・ Evolutionary Dynamics
- ・ Distributed Learning
- ・ Ecology
- ・ Economics
- ・ Evolution of Human Societies
- ・ Evolution of Language
- ・ Evolving Cellular Automaton Project
- ・ Evolving Local Rules for Global Problems
- ・ Origin of Life
- ・ Scaling Phenomena
- ・ Theoretical Immunology
- ・ Theoretical Neurobiology

(1) Jim Crutchfield

(コンタクトしていたが、結局南米出張中で会えず)

<http://www.santafe.edu/jpc/>

カオスと計算について研究しており、最近はGAをより計算理論的にみるという仕事をしている。本拠地は、Physics Dep., Univ. of California Berkley。

(2) Chris Langton (SFI)

人工生命研究の創始者。以前はSFIの常駐研究者であったが、現在はSFIを辞めて外部メンバーの一人である。

Swarm (www.santafe.edu/projects/swarm) のデモをいくつか見せてもらった。Swarmはmulti-level programmingが可能なシステムである。システムの単位をswarm (群れ) と呼ぶが各swarmは更に小さいswarmの集団から構成できる (しなくても良い)。上位のswarmに群れに関する制約を書いて下位のswarmを制御することもできるし、上位には何も書かずに下位swarmの集団からの行動創発を用いることもできる。

現在、人類学的考証に基づいた村落の発生のシミュレーションを計画中とのことである。個人、家族、集落、村などをそれぞれswarmとして実装する。家族の構成swarmは結婚や出産、死亡などにつれて入れ替わるが家族自体はそれより長く存続する (しかしいずれ消えるかもしれない)。集落や村についても同様に構成要素は入れ替わる。村の単位になると比較的安定して長く続く。実際の地形 (サンタフェ周辺)、気温、降水量などのデータを基にして、穀物の収穫などによって集落が移動して行く模様のシミュレーションが行なわれている。

更にswarmによるデモをいくつか見せてもらった。

① Heat Bugs.

2次元のグリッド状の平面で動き回る虫のシミュレーション。



図 3.1 - 1 Heat Bugs

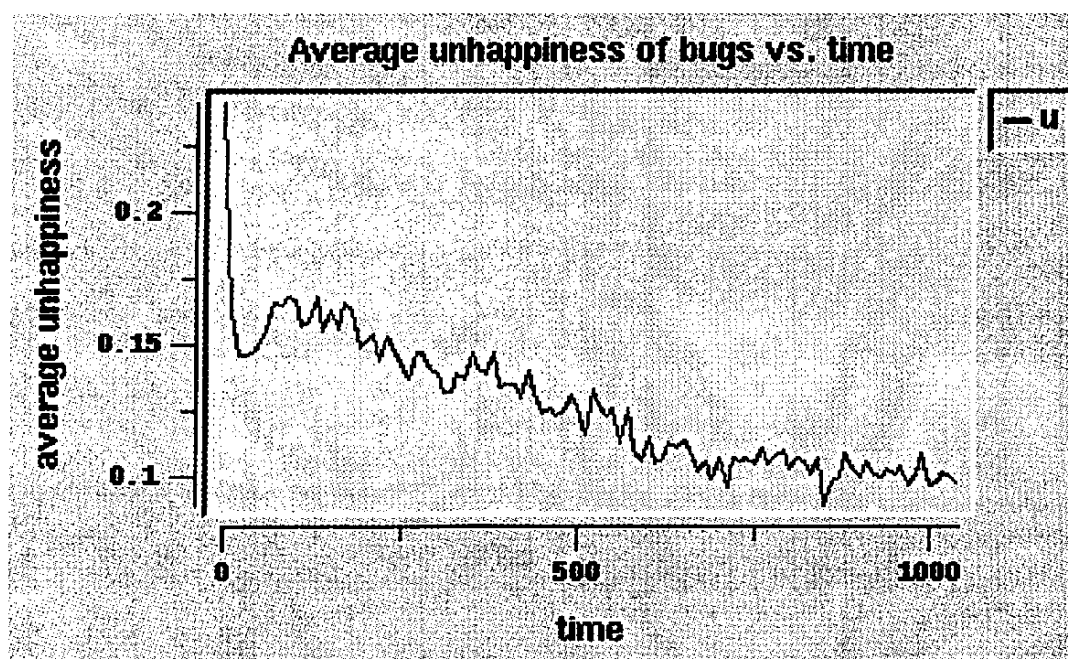


図 3.1 - 2 Heat Bugsの不幸度

各虫には好みの温度があり、又移動すると後に決まった量の熱を残す。好みの温度として環境温度より高いものを設定すると徐々に集まってクラスターを形成する。分散最適値探索問題の一種で、全体的な不満足度が図3.1-2のように時間と共に減少して行く。

シミュレーション中に個々の虫の設定を変更することが可能。低い好みの温度を設定すると皆で集団から逃げ回る。これは安定しない。

② 経済現象のシミュレーション

かなり単純なシミュレーション。エージェントの行為のフィードバックはなく、為替変動はランダム。各エージェントは複数(15)ある評価基準(傾向、ファンダメンタルズなど)のうちから、最近予測が的中していると思うものを選ぶだけ。各エージェントがどれくらいの数の評価基準を追跡するか(このセットはエージェントごとに乱数で選ばれる)を変化させることができ、例えば1に絞ると選好は変化しないし、全部にすると全エージェントが同じ動き(最適基準に集まる)をする。

もう一つフィードバック(つまり、エージェントの行為が相場に反映される)のある複雑なモデルも見せてくれたがLangton自身理解していない模様。

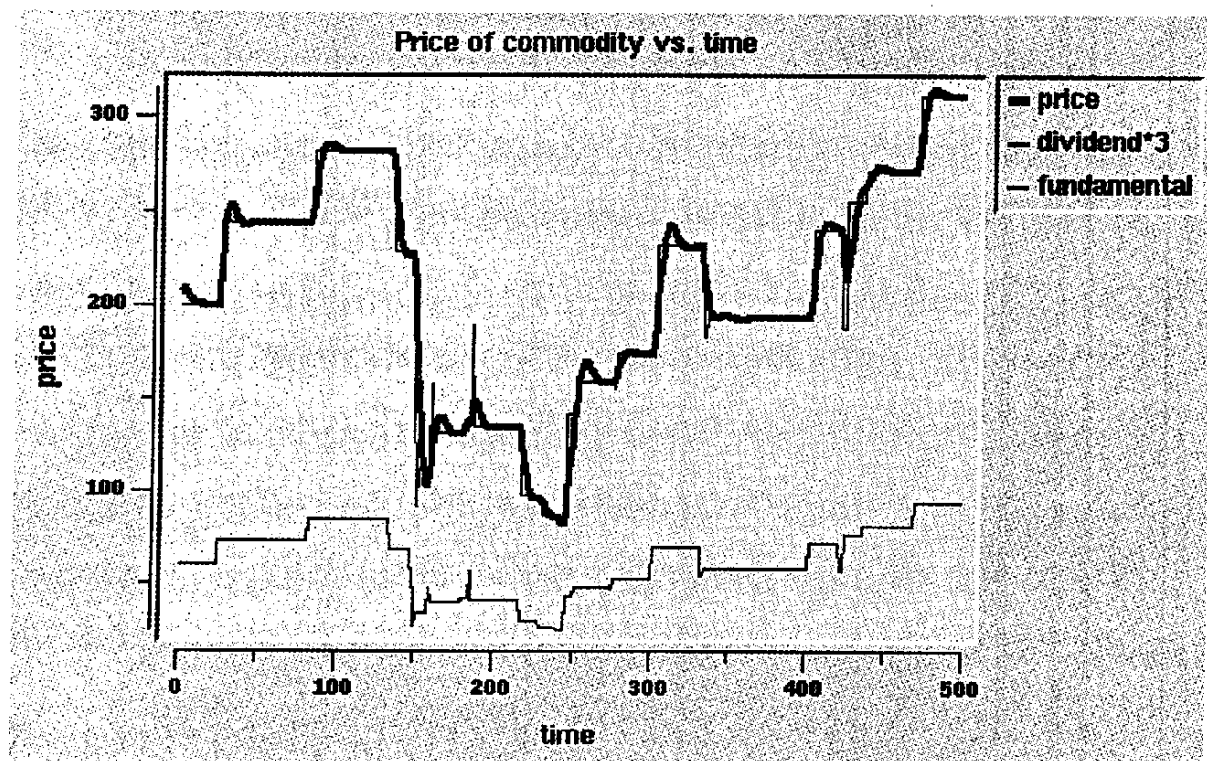


図3.1-3 経済現象のシミュレーション

③ チューリングマシンのテープ

2次元平面を動きながらテープを残していくチューリングマシンのヘッドのシミュレーション。他のヘッドの残したテープを別のヘッドが（あるいは自分が戻って）横切ることにより、テープが書き換えられることでヘッドの行動が変化する。

多くはランダムだが、たまに2つのヘッドが共生（互いにテープを書き換え合う）して面白い行動が創発することがある。

いずれのデモも実質は1層のswarmである。多層化はやはり困難を伴うとLangtonも言っていた。Swarmで下等生物をまるごとシミュレートしようとしているという噂があったが、それは遠い将来とのこと。そこに行くまでに様々な問題を解決する必要がある。

[感想]

Swarmは昆虫などの群の意味ではあるが、実際には人間の社会構造とか、生物の個体のように、集団に実体があるものに近い気がする。昆虫の群は個体の集まりにすぎないと考えられる程度の緩い結合しかしていないが、会社は組織としての明文化された規則を持っており、それ自体に強制力がある（法人として、法律的にも個人と同じような単位として扱われている）。Swarmの制約もこの規則のようなものである。一方昆虫の群にはそのような強制力を持つ単位が存在しない。（しかし、本当に群と会社は質の異なるシステムなのであるだろうか？異なるとしたら何が異なるのか？）

生物の個体も、構成要素の分子の行動記述だけでは不足で、細胞や内蔵器官の単位の実体の存在が大きい。これらの単位が（構成要素が変化するにもかかわらず）いかにして自分を維持しているかというのはシステム論の大きなテーマであるが、複雑系の研究の中心もこのあたりにあるのではないかと思う。

その意味では、swarmのように集団をやはりswarmとし、集団の規則をそこに書くという方法は短絡的な解決であるという気もする。

(3) Barry McMullin (英国に帰国)

<http://www.eeng.dcu.ie/~mcmullin>

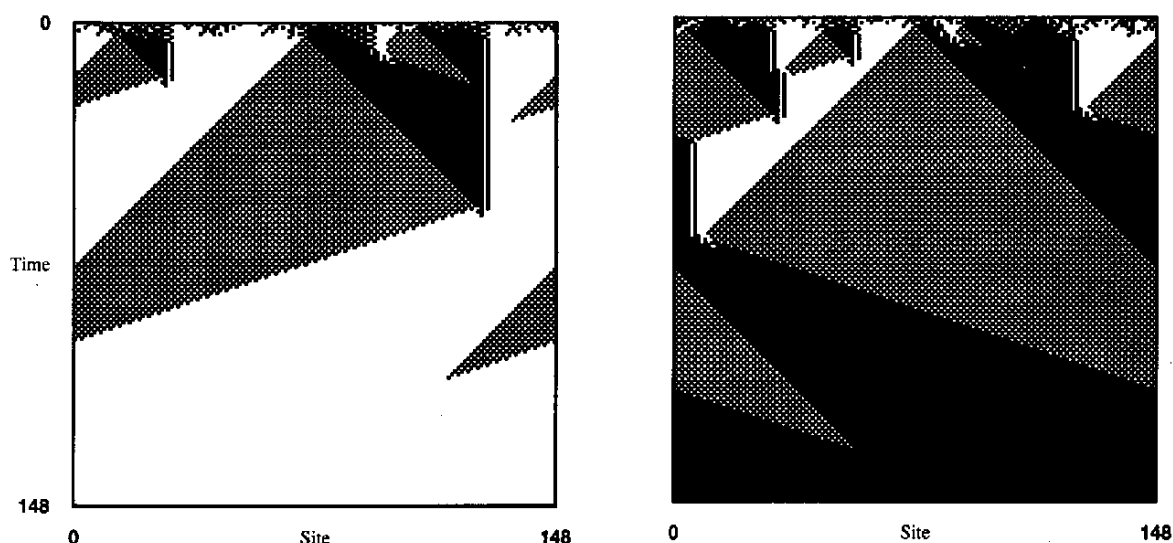
Swarm projectでオートポイエシスの計算モデル[8][9]の研究をしていた。これは最初にVarelaらによって作られたFortranプログラムの再現である。あまり多くない数のセルによる反応シミュレーションで、システムの境界を自動生成するというもの。

(4) Melanie Mitchel (SFI)

<http://www.santafe.edu/~mm/>

Evolving Cellular Automaton Project のメンバーでもある。

このプロジェクトの面白い成果の一つにCAで大域的な計算をさせる試みがある。1次元2状態CAで、白と黒のどちらの数が多いかという単純な計算であるが、多数決は全体的な性質で局所的に求めるのは不可能のように思える問題である。



左は白が多いCA、右は黒が多いCA。縦軸は時間軸で、上から下に時間が推移している。各々最終的には全体が多数派のセルの色で塗られている。途中で白・黒の反転が連続する領域が広がってそれが白あるいは黒の領域と出会って変化して行く様が見える。

図 3.1-4 多数決を行なうCA

彼らはGP (genetic programming) を用いてCAの書き換え規則を進化させた結果、図 3.1-4 のように“白黒の反転が連続する領域”という新しい概念を導入して計算を行なう規則を発見した[1][7]。

[感想]

全体的な性質と局所的な計算との関係は重要なテーマである。しかしながら、今のところ、このような現象の理解にはGAのようなランダムな探索しか方法論を持っていないのが辛い。もう少し構成的にプログラムする方法はないものかと思う。

代案として、現在、多層のプログラミングについて考えている。個の動作のプログラミングと全体の動作のプログラミングを個別に行ない、両者を融合させる方法の追求である。全体の個への還元でもなく、個から全体の創発でもない、両者の相互作用の方法を発見する必要がある。

また、彼女の博士論文のデモを見せてくれた。これは人間の融通性をシミュレートする試みとして類比を行なうマルチエージェントシステムである。

Copycat [4]

abc → ijk

という類比があったときに

abd → ???

の答は無数にあるが、これが ijl になるとすると“右端の文字をアルファベットの1字後に置き換える”という規則で両者が説明できる。では、この類比の元で

aabbcc → iijkkk

aabbdd → ???

は何になるだろうか？

aabbdd → iijll

今度は、“右端のペアをアルファベットの1字後に置き換える”という規則になる。
“文字” → “ペア” の置換えが起こっている。

abc → kji

abd → lji

の場合は“右端” → “左端”の置き換えである。

このような問題に応じた柔軟な規則の置き換えのために、“次の文字”、“前の文字”、“端”、“右隣”、“左隣”、“グループ”、“同じ”などの関係を探す個々のエージェントを用意する。これらはランダムに関係を探索するが、見つけるとその活性値が上がり、他の場所の同じ関係を見つけようとする。

この機構はマルチエージェントによるボトムアップ探索と、活性値伝播によるトップダウンフォーカスの両者から成り立っていると見ることができる。また温度（エントロピーと呼んだ方が良いと思うのだが）という全体の整合性の度合を導入しており、全部が同じ関係でマップされる程温度が下がる。温度がある値（探索中にランダムに変更される）以下になったところで探索が終了する。類比の問題はどちらかと言えば古いAIの問題であるが、上記の意味では複雑系処理の一手法とみなせる。

(5) Walter Fontana (SFI)

本拠地は、

Theoretical Chemistry, Institut für Theoretische Chemie und Strahlenchemie,
Universität Wien

<http://www.tbi.univie.ac.at/~walter/>

化学出身で、生命と計算について考えている。ラムダ計算を出発点として計算モデルの研究を行なっている。

化学反応： λ 計算

という対比において

生物化学：XXX

という高次の計算モデルを探している。chemical computingが化学を計算に持ち込んでいるのに対し、彼はその逆で、計算を生物化学に持ち込もうとしている。

分子反応はclosedである：反応に外的要因が入り込む余地がなく、反応が起これば結果は決まっている。一方、生体における反応連鎖はopenである：反応連鎖は様々な要因で断ち切られる。 λ 計算もclosedである。Milnerのパイ計算も同様に各プリミティブはclosedな事象である。これらのclosedな計算単位の連鎖を考えるとそこにはopenな要素が入ってくる。このような連鎖の数学的なモデルが欲しいとのこと。

(6) Working Paper

SFIではジャーナル (Artificial Life, Complexity) や本のシリーズの他に working paper を発行しているが、ほとんどwebから入手可能である。

<http://www.santafe.edu/sfi/publications/working-papers.html>

最近のもので面白そうなものをいくつか持ち帰った。

98-01-005

Eric Bonabeau, Guy Theraulaz, and Francois Cogne

The Design of Complex Architectures by Simple Agents

97-12-094 E

Joshua M. Epstein

Zones of Cooperation in Demographic Prisoner's Dilemma

97-08-076

Cristopher Moore and Timothy Boykett
Commuting Cellular Automata

97-08-075

Andreas Wagner
Causality in Complex Systems

参考文献

- [1] James P. Crutchfield and Melanie Mitchell. The evolution of emergent computation. In *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 92, pages 10742--10746, 1995. SFI Working Paper 94-03-012.
- [2] Bernard A. Huberman and Natalie S. Glance. Evolutionary games and computer simulations. In *Proc. Natl. Acad. Sci.*, volume 90, pages 7716--7718, 1993.
- [3] Bernard A. Huberman, Rajan M. Lukose, and Tad Hogg. An economics approach to hard computational problems. *Science*, 275:51--54, 1997.
- [4] Douglas Hofstadter. *Fluid Concepts and Creative Analogies*. Basic Books, 1995.
- [5] Bernard A. Huberman. Computing with attractors: from self-repairing computers, to ultradiffusion, and the application of dynamical systems to human behavior. In David Pines, editor, *Emerging Syntheses in Science, Proc. of the founding workshops of the Santa Fe Institute*, pages 167--174, 1987.
- [6] J.R. Koza. *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. MIT Press, 1992.
- [7] Melanie Mitchell, James P. Crutchfield, and Rajarshi Das. Evolving cellular automata with genetic algorithms: A review of recent work. In *Proceedings of the First International Conference on Evolutionary Computation and Its Applications (EvCA'96)*, 1996.
- [8] Barry McMullin. Computational autopoiesis: The original algorithm. Technical Report 97-01-001, Santa Fe Institute Working Paper, 1997.
- [9] Barry McMullin and Francisco J. Varela. Rediscovering computational autopoiesis. Technical Report 97-02-012, Santa Fe Institute Working Paper, 1997.

3.2 欧州編

野田 五十樹 (電子技術総合研究所)

3.2.1 Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

Address: V.le Marx 15, Rome, 00137, Italy

WWW: <http://www.cnr.it/>, <http://kant.irmkant.rm.cnr.it.gral.html>

行き方: ローマ、Termini 駅からmetro B line (北方面) に乗り、Ponte Mammolo 駅で降り、311 に乗り、Viale Marx で下車。道を渡ったところにある、青い鉄骨とコンクリートの建物がそれ。Viale Marx は非常にわかりにくいので、バスの運転手にいっておいた方が無難。Termini から約30分。

(1) 概要

Institute of Psychology のNeural Systems and Artificial Life 学科のArtificial Life 研究グループのStefano Nolfi 教授を訪問し、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) を用いたロボットの制御法の創発的獲得の研究の調査を行なった。

このグループの仕事の特徴は、ロボットの制御に用いている神経回路網を単にGAで進化させるのではなく、別の目的を持った学習を行なわせたり、あるいは回路網を学習回路網と教師回路用に分けてともに進化させるという方法を取っていることである。これらの方法をとることにより、GAによる進化が加速されたり、集団全体の平均のパフォーマンスを上げたりできることを示している。

(2) 学習と GA の併用 (1)

GAによる適応の試みとして、GAで神経回路網の各結合の重みの初期値を適応させ、さらに誤差逆伝搬 (Back-Propagation: BP) 学習によりその重みを変化させるという実験を紹介された。

GAとBP学習はともに、与えられた評価関数を最大にするパラメータの値をある範囲の中で探索する手法である。つまり、同種の手法を同時に組み合わせて用いようという実験であり、彼ら以外にも多くの研究者が試んでいる。通常、この手の研究では、同一の評価関数を用いてGAとBPを行なうのが一般的であるが、彼らは、GAとBP各々、異なる評価関数を用いていることが目新しい。彼らは、この手法により回路網がより安定して動作できる準最適解に到達することを示している。

実験の概要は以下の通りである。

部屋の床にゴミが散らばっており、そのゴミを回収するロボットが1台いる。このロボットは近距離のゴミや壁を認識できるソナーセンサーを4つ持っており、2つの車輪により前後に進んだり左右に回転できるものとする。ロボットの制御は神経回路網により行なわれる。この神経回路網は4つのソナーセンサーの値を入力とし、2つの車輪を動かすモータへの信号を出力とする。さらに、回路網は別の4つの出力ユニッ

トを持っており、このユニットを使って、次の時刻に起こるセンサーの入力を予測するようになっている。

回路網の学習は、次のセンサー入力の予測を行なう部分のみを使って行なわれる。つまり、この出力ユニットの活性値と次の時刻のセンサー入力の値を最小化するように、BP学習が行なわれる。一方、GAは回路網の結合の重みの初期値を遺伝子とし、集めたゴミの量を適合度として進化を行なわせる。

ここで興味深いのは、BP学習は外界の変化の予測を行なうことを目的としており、GAはゴミを集めるというタスク達成を目的としていることである。通常では、このように異なる目的を達成しようとする、お互いに邪魔をするだけのように思える。しかし実際には、回路網はかなりうまく両方のタスクを達成できるようになる。さらに、このようにして獲得された振舞いは、外界の変化に対し非常に頑健であることを彼らは示している。つまり、BPとGAが異なる目的を持って回路網を変化させようとするので、最終的には、回路網はこの2つの目的がお互いに影響し合わないところにおける準最適解に到達する。この準最適解は異なる目的が互いに影響し合わないため、環境の変化に対し比較的なだらかな適合曲面を描くところにあたっている。このため、BPやGAで獲得した目的以外のものに対しても、比較的影響を受けないようになっている。これが、獲得された振舞いが頑健である理由である。

関連文献

"Learning and Evolution in Neural Networks", Nolfi S., Elman J.L., Parisi D. Adaptive Behavior, Vol. 3, 1, pp.5-28 (1994)

(3) 学習とGAの併用(2)

GAと学習の組み合わせのもう1つ別の試みとして、ロボットのモータの制御用神経回路網と、その回路網の学習に用いられる教示信号を出力する教師回路網を同時に進化させる実験を紹介された(図3.2-1)。

この実験の設定は以下の通りである。

前の実験と同じく、部屋の中のゴミ拾いを行なうロボットを考える。このロボットは、ゴミや壁を検出する6つのソナーセンサーを持ち、2つの車輪モータによって進行方向を決定する。このモータの制御に図3.2-1に示すような回路網を用いる。この回路網の左半分は制御回路網であり、ソナーセンサーのデータをそのまま入力とし、2つのモータに与える値を出力する。一方、右半分は教師回路網であり、制御回路網と同じくセンサーデータを入力とし、2つの値を出力する。この2つの値は教師信号として制御回路網に渡され、この教師信号と制御回路網の出力が最小化されるようにBP学習を行なう。つまり、制御回路網の方は、1個体が生存する間に学習によって変

化する。一方、教師回路網の方は、1個体の生涯の間、変化しない。よって、1個体の生涯が十分長い場合、制御回路網の出力はほとんど教師回路網の出力と同じになるはずである。

1個体の制御回路網及び教師回路網の結合の重みの初期値は、その遺伝子によって決定される。つまり、教師回路網は完全に遺伝子によって決定され、生涯変化しない。一方、制御回路網は学習が始まる開始時点の回路網が遺伝子によって決定される。そして、この遺伝子はGAによって進化する。進化の際の各個体の評価関数は、その個体が生涯の間、どれだけのゴミを拾ったかにより決められる。

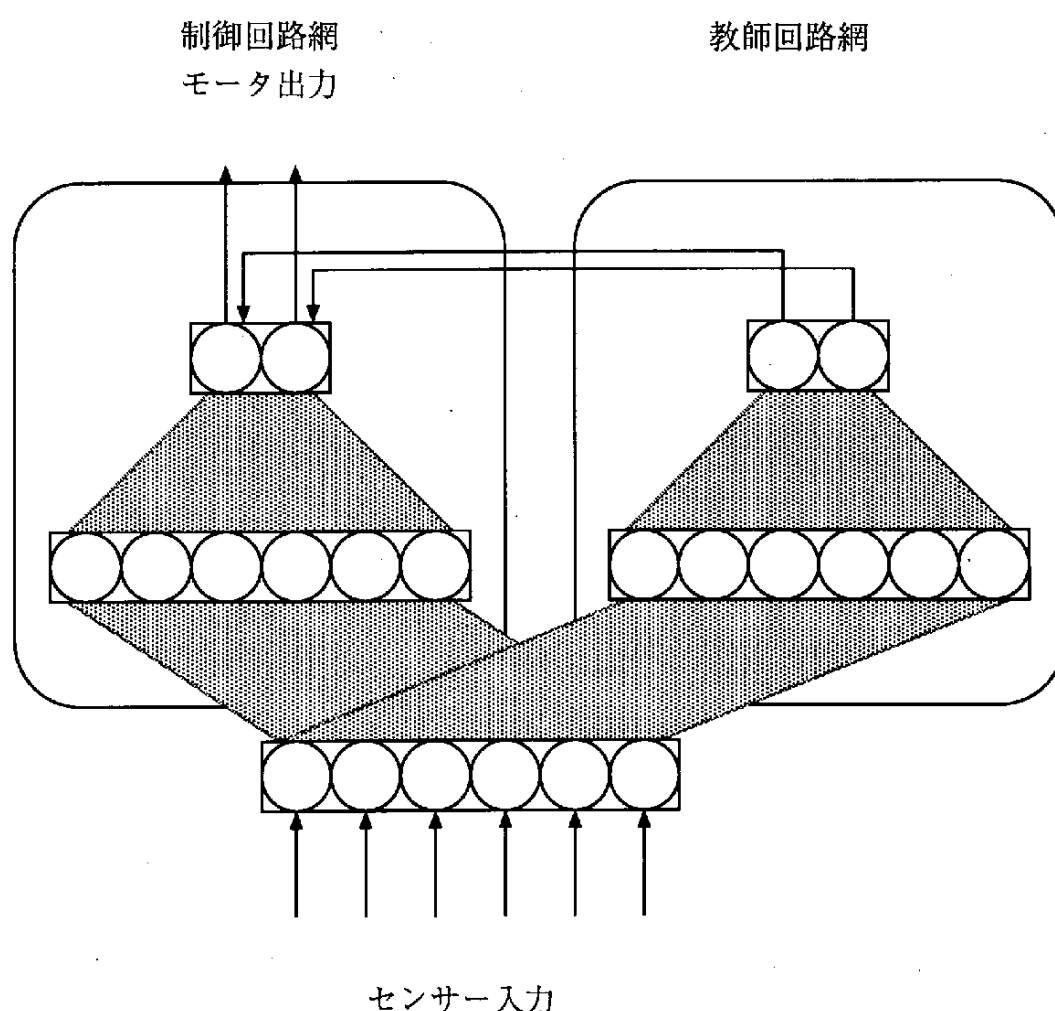


図 3.2-1 制御回路網と教師回路網

左の回路網（制御回路網）の出力は直接、車輪モータへの制御信号となる。右の回路網の出力は、制御回路網への教示信号となる。制御回路網はこの教示信号に従って、活動中に結合の重みを変更する。教師回路網の結合の重みは、活動中には変化しない。両回路網の結合の重みの初期値はGAによる遺伝子によって定められる。

この設定を用いてGAの進化を行なうと、通常のGAによる進化¹に比べ、以下の点で優れていることが、実験によって示されている。

- 単純なGAに比べ教師回路網を組み込んだ方が、早い世代で最適適合に達する。
- 最終的な世代において、その世代の最優秀個体の適合値は単純な場合と、学習を組み合わせる場合ではそれほど差はないが、平均値では学習を組み合わせる方がよい。つまり、世代の中では、最優秀個体と同等の成績を収める個体の数が非常に多い。

この設定において素朴な疑問は、なぜ教師回路網の出力を直接モータ制御に使わないかということである。上に述べたように、学習によって制御回路網の出力は教師回路網の出力に近づく。ならば、学習の際の目標値である教師信号を直接使った方が、始めから使った方が、適合値が上がるのではないかというわけである。この疑問に対する答えは、以下の通りである。

教師回路網の出力を直接使う、すなわち単純なGAのみによりタスクの最適解を探索するということは、その最適解となるパラメータの値を直接求めることになる。それに対し、学習する制御回路網と教師回路網という組み合わせは、制御回路網の初期値と教師回路網の初期値が、タスクの最適解をはさむように位置すれば、全体的な適合値をあげることができる。つまり、単純に最適値を求めるという問題を、最適値をはさむ2点を求めるという問題に変更することで、問題の探索の困難さを和らげているというわけである。ここで重要なのは、制御回路網の学習に要する時間²が1個体の生存期間に比べ多少長いということを仮定している。よって、学習があまりに速く、制御回路網がすぐに教師回路網と同じ出力をするようになってしまうと、通常のGAと変わらないことになる。

関連文献

"Learning to adapt to changing environments in evolving neural networks", Stefano Nolfi and Domenico Parisi, Technical Report 95--15, Department of Neural Systems and Artificial Life, Institute of Psychology, C.N.R.-Rome

(4) GAによるモジュラリティ

複雑な振舞いをロボットに行なわせるためには、その制御機構のモジュラリティが重要になる。このモジュラリティをどのように設定するかは難しい問題であるが、こ

¹ 単純に、制御回路網を進化させ、1個体の生涯の間、学習による変更は行なわない。

² 制御回路網の出力が教師回路網の出力とほぼ同じになるまでの時間。

れをGAにより創発させる可能性を探る研究を行っていた。

もしロボットの制御機構として、一様な神経回路網³を用いる場合、そのタスクに依存せずに学習を行なわせられるが、複雑な振舞いを獲得するまでには一般に非常に多くの時間がかかるという欠点もある。一方、その振舞いを人間があらかじめモジュールに分割できる場合、その分割が適切であれば、短い時間で複雑な振舞いを実現する回路網を構築できるが、モジュール分割が適切でない場合、うまくタスクが達成できない可能性がある。

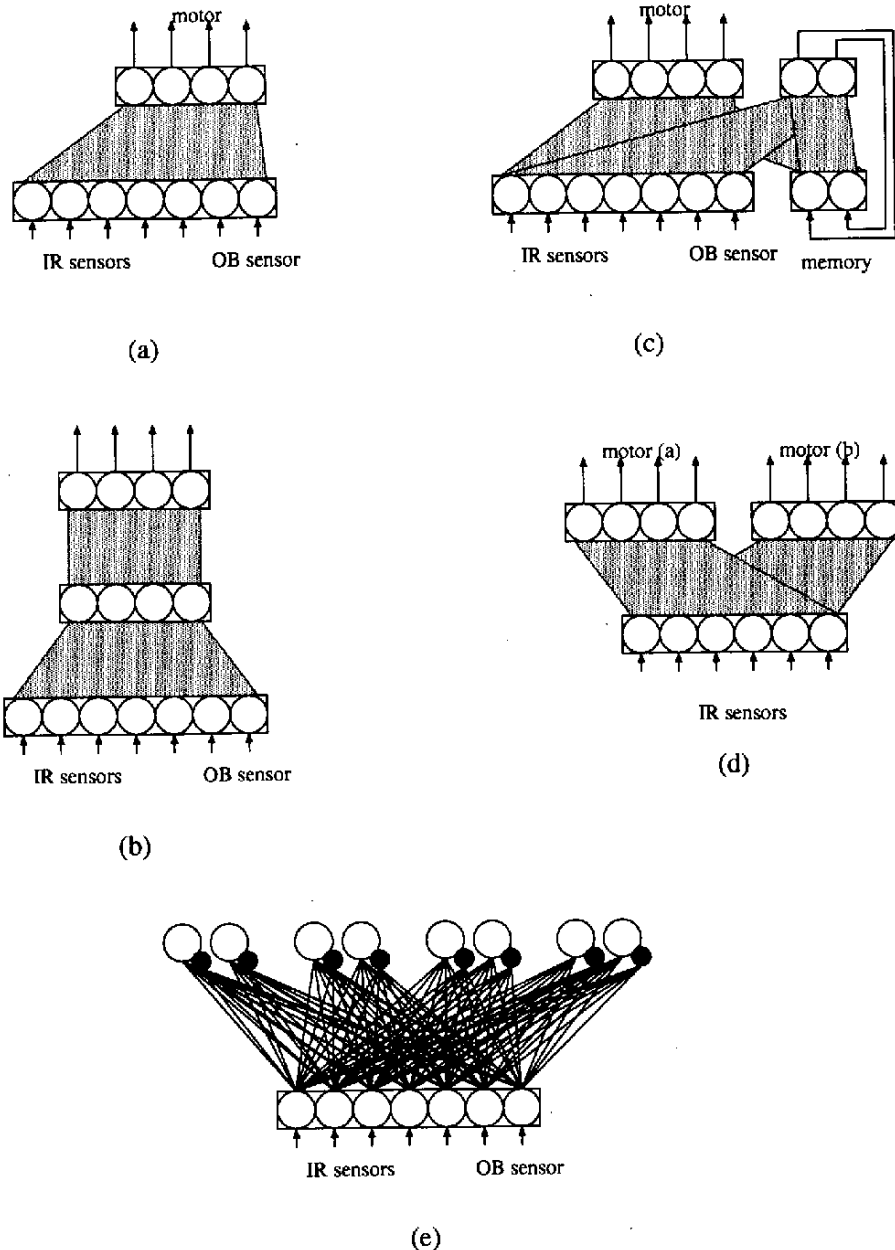


図 3.2-2 各種モジュラー回路網

³ 入力層から出力層まで全結合でつながれている回路網。内部に明示的なモジュラリティはない。

この研究では、このモジュールへの分割を人間が行なうべきか、あるいは GA により創発させるべきかを実験によって比較している。

彼らはゴミ拾いロボットの制御構造を神経回路網で実現し、人間が前もってモジュラリティを規定するより、GAにより創発させる方が進化が速くなることを示している。

彼らの実験の設定は以下の通りである。

ロボットを制御する回路網として、図 3.2-2 に示すようないくつかの種類の回路網を用意する。この各々のを用いてゴミ拾いタスクを行なわせ、GAによりこの回路網の結合の重みを変化させる。この場合のゴミ拾いタスクでは、ロボットの腕を使って、「ゴミを持ち上げる」「ゴミを離す」という動作もコントロールする必要がある。

ここで特に注目すべきなのが、(d) と (e) の回路網である。(d) では、ゴミを持っていない時用の回路網（左側）とゴミを持っている時用の回路網（右側）がすでに用意されており、ゴミのあるなしにより、別々のモジュールでロボットを制御しようというものである。一方、(e) ではそのような明確なモジュール性はなく、そのかわりに各出力ユニットを 2 つずつ用意し、gate ユニットによりそのどちらの出力を選ぶかを選択する。この gate ユニットの結合も GA によって変化する。よって、(e) の回路網は、モジュラティを創発する枠組は用意されているが、どのような分け方でそのモジュールを使うかは指定されておらず、回路網が自分で獲得する必要がある。

実験では、適合度の改善の速さ、最終適合度の高さともに、(e) の回路網がもっとも良い成績をおさめた。このことは以下のことを示している。

- モジュラリティのない回路網 (a-c) は、進化が遅く、十分な適合度を獲得できない。
- あらかじめモジュールの役割を決めておく場合(d)、モジュラリティがない場合に比べると進化は速いが、モジュールの役割を決めない方(e)がより進化が速く、達成できる適合度も高い。

さらに回路網の動作を解析すると、(e)の回路網では各出力ユニット対はほとんどの場合において片方のユニットの出力を使っており、ただ1つの対のみが、たまにもう一つのユニット出力を使っていることがわかった。この出力の選択は、(d)で人間が行なった、「ゴミを持っている／いない」の区別とは異なっており、その意味付けは簡単には行なえないことがわかった。

つまり、下手に人間の知識を入れるよりも、自動的に進化する枠組を用いて環境からモジュラティを獲得する方が、効率がいい場合が多いことを示唆している。

関連文献

"Using Emergent Modularity to Develop Control Systems for Mobile Robots", Stefano Nolfi, Technical Report 96--14, Department of Neural Systems and Artificial Life, Institute of Psychology, C.N.R.- Rome

(5) 共進化

捕食者と被食者のロボットを用意し、共に進化させた場合、どのような進化をたど

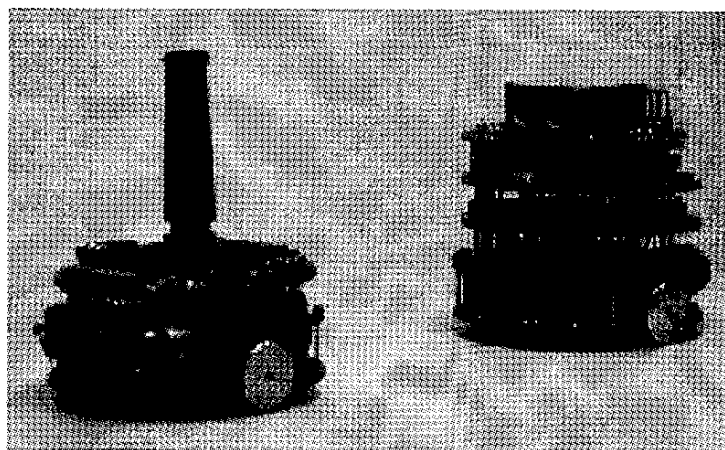


図 3.2-3 捕食者ロボットと被食者ロボット

るかという実験を紹介された。この実験の設定では、相手の出方によりあきらかに異なる戦略があるため、最適解は存在しない。よって、無限に進化し続けることになるが、設定をうまくしないと、適切な進化が起きないことを示している。

実験は以下のように行なわれた。まず、図 3.2-3 に示すような 2 種類のロボットを考える。これらのロボットには、一方（被食者）が逃げ回り、それを他方（捕食者）をおっかけ続けるというタスクが課せられている。例えば、実験の初期設定としては、図 3.2-4 のような形で行なわれる。

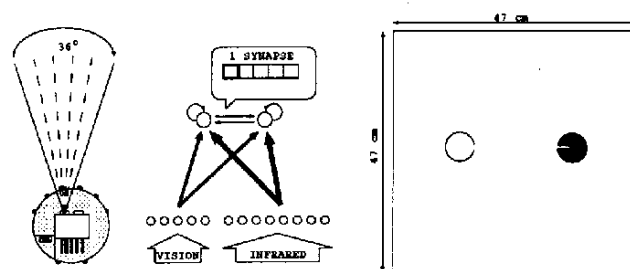


図 3.2-4 実験の設定

両ロボットの振舞いを制御する回路網をGAによって進化させると、各世代において、両ロボットの適合度は図3.2-5のように変化する。つまり、はじめ補食者はなかなか相手を捕まえられなかったが、じょじょに捕まえられるようになり、適合度が上がってゆく。一方、被食者も進化するので、補食者の適合度はある程度以上は上がらず、バランスをとりながら進化が続く。

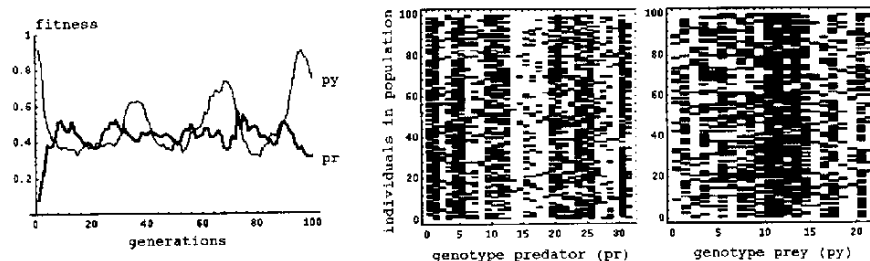


図3.2-5 進化による平均適応度の変化

進化の各世代では、ロボットはさまざまな行動を創発する。図3.2-6はその行動の例である。これらの行動は、世代毎に絶えず徐々に変化し、一定の解に落ち着くことはない。

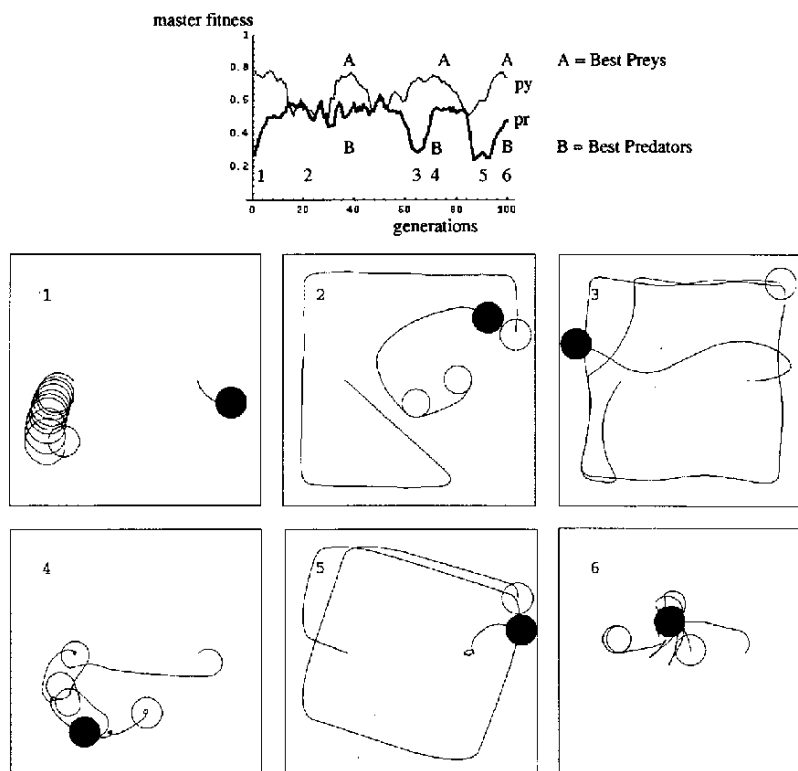


図3.2-6 進化による行動の変化

ここで興味深い点は、両ロボットを進化させる上で、相手のロボットは旧世代のものをを用いる点である。もし、同世代のロボットを用いて進化させると、発信現象が起きてしまい、なだらかな進化をたどらない。これは、GAのシミュレーションが世代毎に区切られて行なわれている問題と強く関わっていると思われる。自然界と同じく、世代に関係なく連続的に進化が起きる枠組が望まれる。

関連文献

"God Save the Red Queen! Competition in Co-evolutionary Robotics", Dario Floreano and Stefano Nolfi,

"Adaptive Behavior in Competing Co-Evolving Species", Dario Floreano and Stefano Nolfi,

3.2.2 École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

Address: Ecublens, IN-F, CH-1015 Lausanne, Switzerland

WWW: <http://www.epfl.ch/>, <http://diwww.epfl.ch/lami/>

行き方: ローザンヌ中央駅 (CFE) からメトロで Lausanne Fl. へ。そこから、Metro Quest 線に乗り、約 15 分。EPFL 駅で下車。

(1) 概 要

情報工学部の LAMI (Microprocessors Systems Lab) プロジェクトの研究を調査した。

このプロジェクトでは Khepera という小型ロボットおよびそのシミュレータを開発し、それを用いて実世界におけるロボット個体やロボット集団の制御方法を様々な方法によって開発している。特に senior researcher の Dr. Dario Floreano を中心とするグループは、GA を用いて、共進化、subsumption architecture の進化などの研究を行なっている。

(2) Khepera

Khepera 図 3.2-7 は直径 5cm の小さなロボットであり、その中に、CPU、カメラ、赤外線センサなどセンサと、駆動用の車輪とものを囲む腕を積んでおり、自律して動かすことができる。また、シミュレーション環境が整っており、ワークステーション上で制御プログラムを作成し、シミュレーションで動作を確認した後、本体にダウンロードして動かすことができる。

このロボットは、小型で安価であるため、容易にマルチロボットの実験ができるという点で優れており、彼らの研究室においても盛んにその研究が行なわれていた。

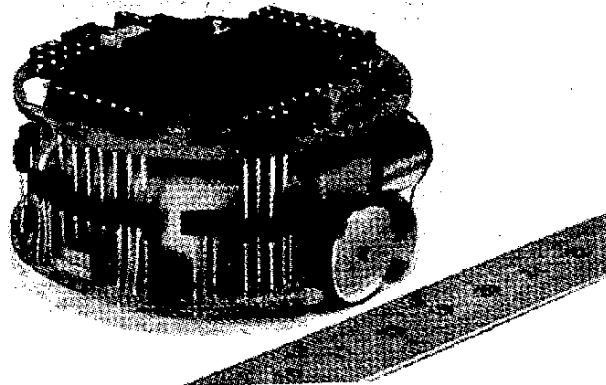


図 3.2-7 Khepera ロボット

① Khepera Simulator

Dr. Olivier Michel 氏は、Khepera の制御プログラムを容易に作成するためのシミュレータを作成していた。これは、ケペラの動きをシミュレートするだけでなく、センサー入力をかなり正確にシミュレートしている。また、X window 上のインターフェースを利用して、外界を人為的に変化させることもできる。

Michel 氏は今後、このシミュレータを汎用に利用できるよう、拡張していく予定であると述べている。実世界におけるマルチエージェントシステムの研究を行なうツールとして、非常に重要な研究と思える。

詳しくは、以下のサイトを参照されたい。

<http://diwww.epfl.ch/lami/team/michel/webots/>

(3) GA による Subsumption Architecture の構築

複雑な環境で安定に動作するロボットの制御機構として、subsumption architecture が注目されているが、その機構の内部にあるいくつかの behavior module をどのように結び付けるか一般に難しいという点が、この手法の問題点となっている。彼らはこれを解決するため、GA により module 間の結合を創発的に獲得するという実験を行なっていた。それにより、GA でもかなりうまく module 間の結合を獲得できることは示されていた。

実験は以下のように行なわれた。まず、Khepera ロボットの制御構造として、図 3.2-8 のような構造を考える。この制御構造を、いくつかのモジュールに分け、これらのモジュールを相互に結合することを考える。このモジュール間の結合を GA によって進化させる。ロボットが行なうタスクはゴミ拾い (図 3.2-9) である。つまり、

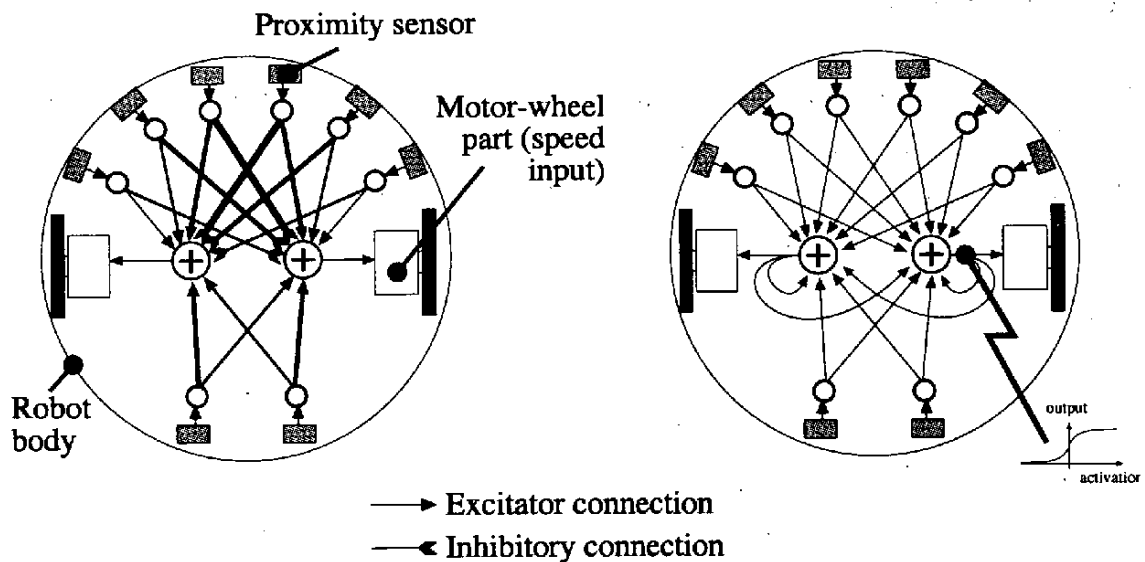


図 3.2-8 ロボットを制御する回路網

ロボットはできるだけ早く敷地内のゴミを拾い集め、枠の外に捨てる。同時に、ロボットは自分の電池の残量を調べ、少なくなったら補給所に行って充電を行なわなければならない。

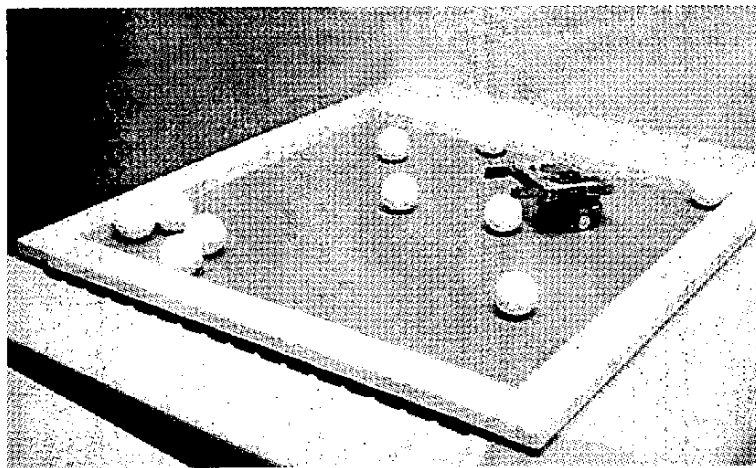


図 3.2-9 ゴミ拾いタスク

ならない。このような設定でうまく仕事をこなす制御構造を創発することが実験の目的である。かれらの実験では、GAによりうまくその制御構造が獲得できることを示している。

ただ、彼らの実験では、module間の結合は創発されているが、module自身は事前に用意されていた。実際には module 自身の設計も含めて GA を行なう必要があり、彼らも今後の課題として取り組んでいく予定らしい。

(4) 地図学習

マルチロボットのタスクとして取り上げられることが多いのが、未知の環境の地図を作るということである。この地図の作成において問題となるのが、作成された地図をどのような表現で保持するかである。つまり、一般の地図のようにイメージで表現した場合、その環境の多くの属性を表現できる一方、高度な推論には用いにくい。逆にシンボリックに表現した場合、推論には便利であるが、多くの情報が失われるため柔軟性がない。

彼らはこの問題を解決するため、行列による表現とグラフによる表現を合わせて持つという手法を提案している。そして、実際にKheperaを用いて地図の獲得を行なうシステムを構築していた。さらに、彼らは地図の獲得のための探索を効率良く行なうため、ある地域の地図についてどれくらい確信を持っているかを表す値を保持しておき、それによって、曖昧なところを優先的に回るという手法を使っていた。現状では彼らのシステムはまだ簡単な地図しか学習できないが、枠組としてはいろいろ拡張できる部分が多いように見え、今後の発展に期待したい。

3.2.3 Helsinki University of Technology (HUT)

Address: Rakentajanaukio 2C, TKK-F FIN-02150 Espoo, Finland

WWW: <http://www.hut.fi/English/>

行き方: ヘルシンキ駅の西方向のバスステーションから102番のバスに乗り、終点の1つ手前で降りる。終点までいっても歩いて15分。バスに乗っている時間は約15分。

(1) 概要

Control Engineering Lab. の Heikki Koivo 教授のグループ、Neural Networks Research Centre の Erkki Oja 教授のグループ、及び、Automation Lab. の Arto Visalo 教授のグループの研究を調査した。

Heikki Koivo 教授のグループでは、自己組織化マップを用いて、多数のモデルを切替えながら対象システムを近似するシステムを、GA を用いて構築する方法を研究している。これにより、1モデルでは記述し切れない複雑なシステムの振舞いを表現できることを示している。Erkki Oja のグループは、non-linear Hebbian 学習、non-linear PCA、ICP など、従来の主成分解析 (PCA) の拡張に当たる研究を精力的に進めており、これら新しい手法により、異なる情報源からの信号が混ざったデータから、元のデータを復元することがより精度良くできることを示している。

(2) EVSOMを利用した複数モデルによるシステム同定

Heikki Hyötyniemi 博士とその同僚は、同大学の Kohonen 教授の提案した SOM（自己組織化マップ、Self Organization Map）を利用して、複雑なシステムを同定するシステムを構築していた。

一般に未知のシステムを同定する場合、ある1つのモデルを仮定し、対象とするシステムの挙動に合うようにモデルのパラメータを調節してシステムの同定を行なう。しかし、この手法では複雑で多様なシステムを同定するのは難しい。彼らの提案している方法は、さまざまなモデルを多数用意し、それをSOMの各ユニットに割り当てる。そして、システムの挙動と各ユニット（モデル）の挙動を比較し、一番近いユニット

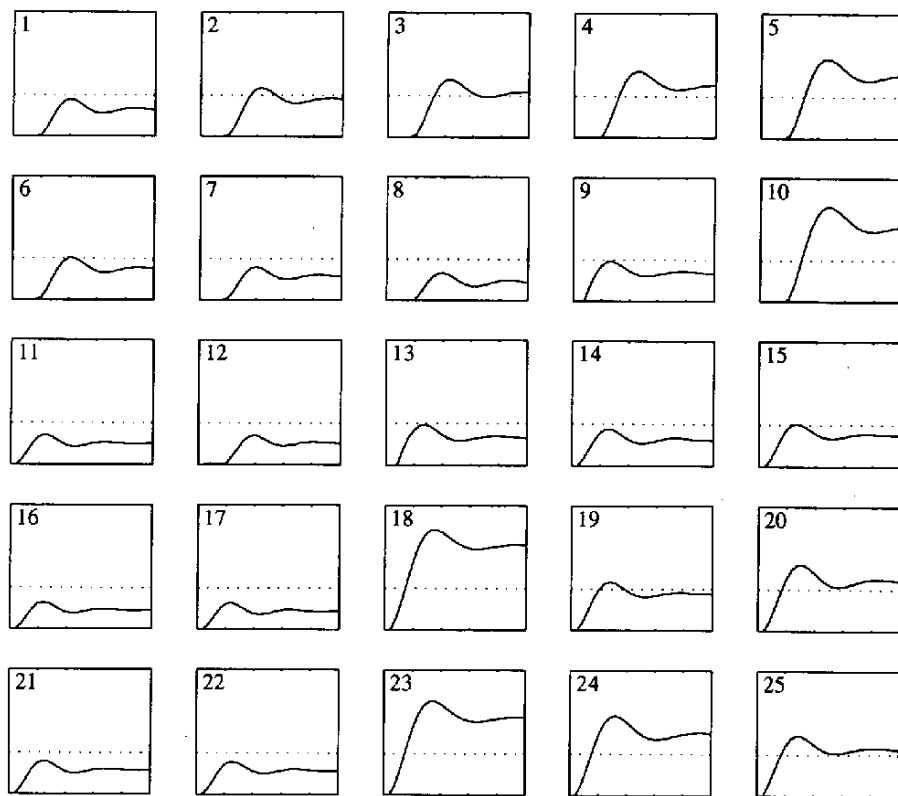


図 3.2-10 EVSOM の各ユニットの予測波形の例

を winner ユニットとして自己組織化を行なう。ただし、この自己組織化は通常の学習ではなく、遺伝子アルゴリズムの手法を用いる。このようにすると、SOM の性質により良く似たモデル同士は近くに配置され、これによりマップ上の近さでシステムの同定をしやすくなる。また、システムが非常に複雑な場合、そのマップ上を移動させることでより広い範囲のシステムの記述ができるようになる。

彼らはこの手法を、化学プラントのデータに適用し、これまでの手法に比べより正確なシステムの予測が行なえることを示している。

この手法は、従来に比べ説明できるシステムの範囲が広がっている点は面白いと思われる。ただ、このように一般化した手法ではパラメータの数が増え、汎用性の面で問題が出る。この点が解決されれば、実用的な手法になると思われる。

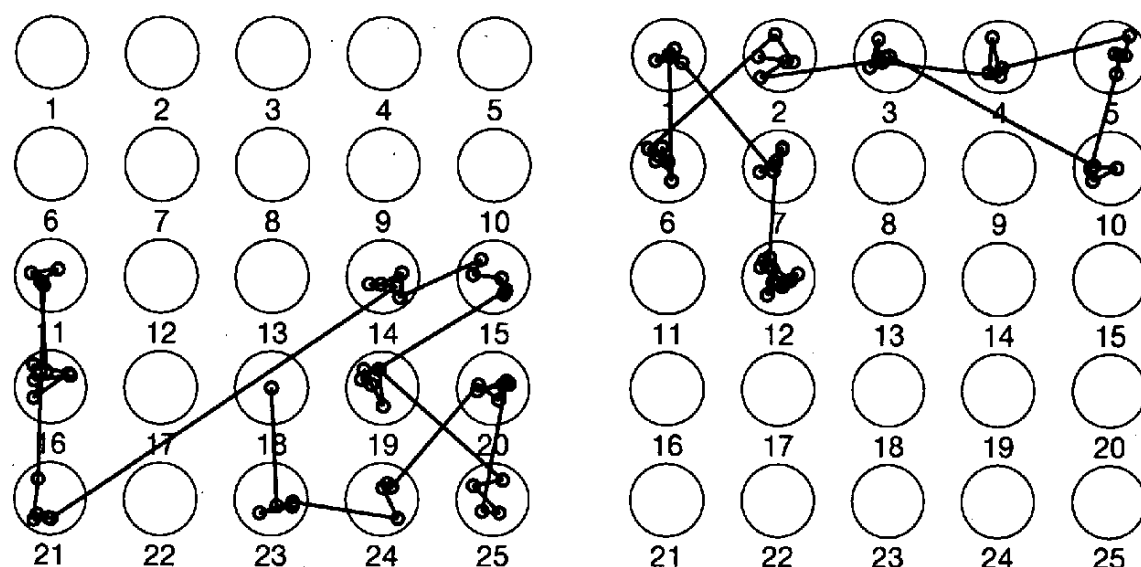


図 3.2-1 1 システムの同定時におけるEVSOMのユニット上の遷移の様子

(3) non-linear PCA

Erkki Oja教授は長年、PCAを一般化した解析方法を、数学的に解く手法を構成してきている。PCAは多数の計測データから特徴を抽出する強力な手法として広く用いられているが、そのバックグラウンドとして、あらゆるデータは正規分布に基づいて得られるという前提がある。しかし実際の複雑な現象では正規分布を仮定できないものが多くあり、PCAに代わる統計的手法が望まれていた。Erkki OjaはPCAを、2次のキウムラントを最大化するための1次変換であることを示し、それから逆に任意のキウムラントを最大化する手法を提案した。そして、その理論を元に、独立に提案されてきた non-linear hebbian rule, ICP などが同じ枠組で議論できることを示している。

(4) ICAを利用した画像の分離

Erkki Oja 教授の共同研究者である Juha Karhunen 博士は、彼が提唱してきた ICA (独立成分解析, Independent Component Analysis) を用いて、複数情報が混ざっているデータから、元の情報を復元するという手法を提案している。実験では、彼は、複数

の絵を混ぜ合わせた画像から、元の絵を復元するという実験を行なっていた（図3.2-1.2）。このタスクは従来のPCAなどで解析すると、どうしてもいくつかの元の絵が混ざったものまでしか復元できなかった。それに対し、彼の方法では非常に鮮明な絵に復元することができている。



(1) 分離前



(2) 分離後

図3.2-1.2 ICAによる混合画像からの現画像の復元

彼と彼の同僚は、同じ手法を脳の診断に用いる実験を行っていた（図3.2-13、図3.2-14）。つまり、脳波など頭の外部から計測できるデータを用いて脳の状態を分析し、異常なところがどこにあるかを推定するというものである。つまり、このICAという手法は汎用性が高く、実世界の複雑な事象を扱うことができることがわかる。

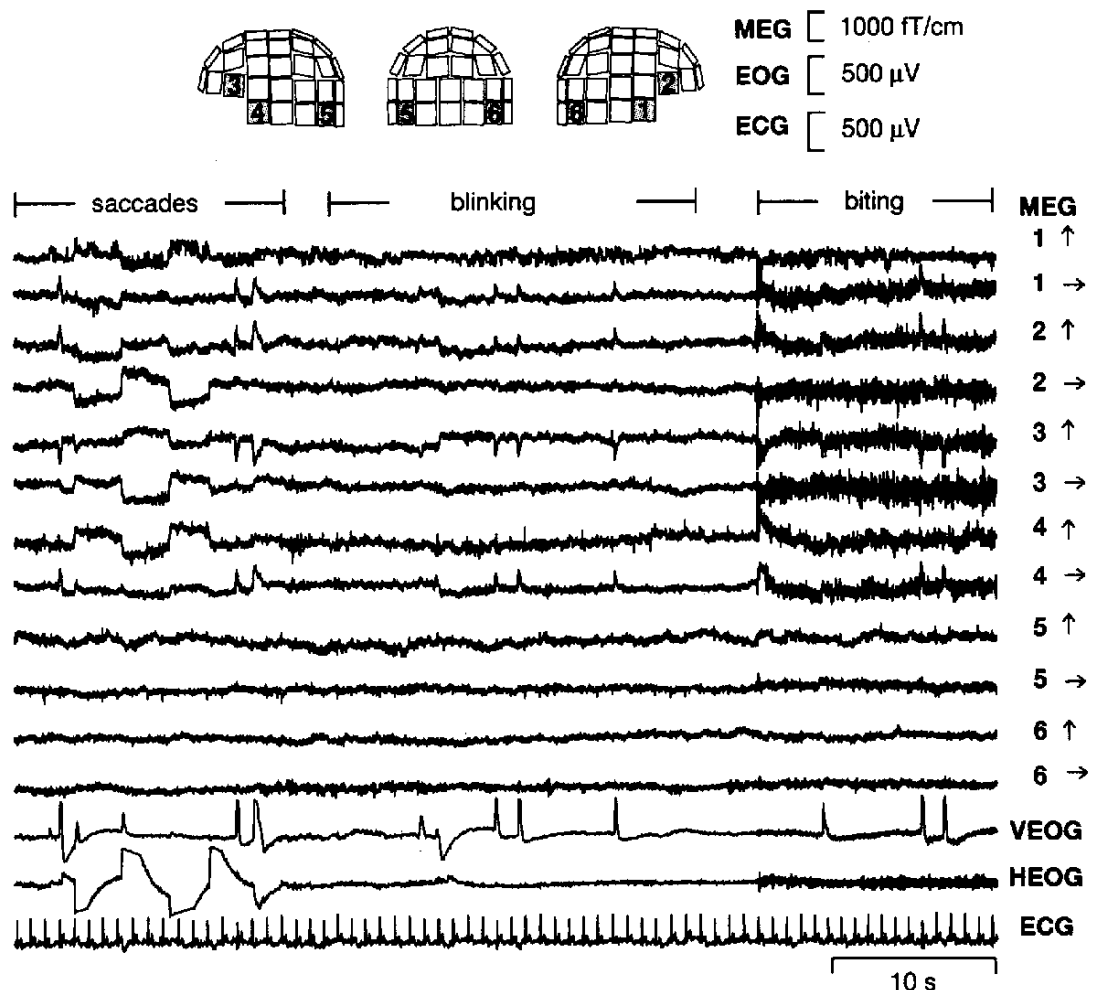


図3.2-13 MEGから得られる波形

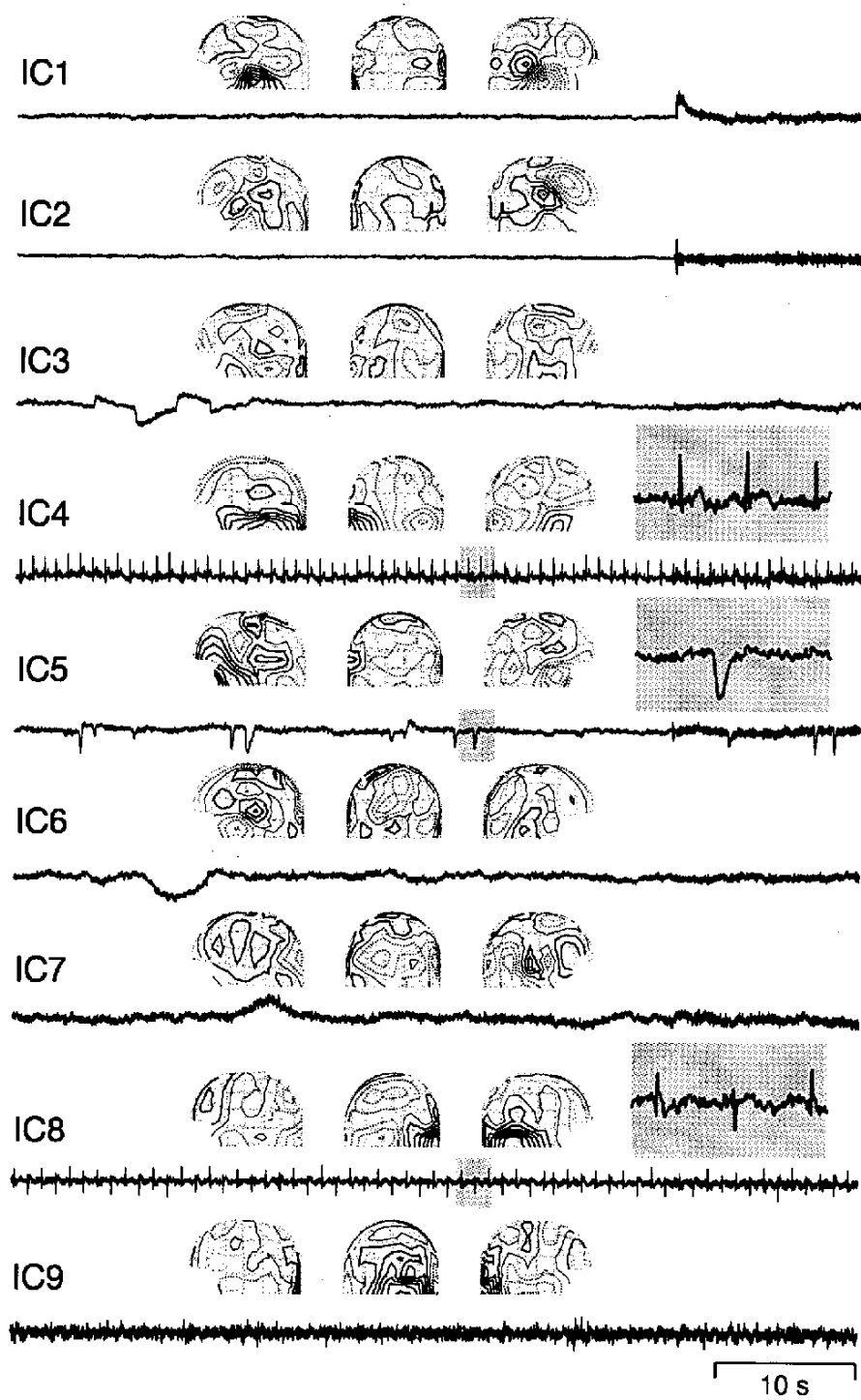


図 3.2-14 MEG波形を ICA で解析した結果

3.2.4 まとめ

ヨーロッパではアメリカと違い、1つの研究課題を比較的長期に渡って行なっているという研究所、研究者が多いように見受けられる。そしてその中から、重要な研究の種になるものが出てきているように思える。今回の訪問先でも、ヘルシンキ工科大学は昔から神経回路を中心とした研究を息長く続けており、Kohonen の SOM や Oja の non-linear PCA などの研究が今、世界的に注目されているようになっている。

4. 資料：複雑系に関連する研究情報（国内）

4. 資料：複雑系に関連する研究情報（国内）

ここに掲載した研究情報は、複雑系（研究）の現状認識の参考とするため、複雑系、複雑性、非線形、カオス、人工生命（A-Life）、遺伝的アルゴリズム（GA）、ニューラルネットワークなどをキーワードにして、国内の大学、国立および民間の研究機関、学術団体等、ならびに研究者ご自身が公開しているインターネットホームページを対象に収集しました（平成10年1月～3月）。また、併せて最近発行の複雑系関連書籍、学会誌等を参考としています。このため、限られた範囲での研究情報になっていること、また、分野間のバランスなどは必ずしも考慮したものになっていないことをあらかじめお断りします。

機 関 名	参照 No.	機 関 名	参照No.
室蘭工業大学	1	東京理科大学	74 - 75
北海道大学	2 - 17	NTT光ネットワークシステム研究所	76
弘前大学	18	横浜国立大学	77
東北大学	19 - 21	慶応義塾大学	78 - 79
会津大学	22	富山大学	80 - 82
茨城大学	23	北陸先端科学技術大学院大学	83
筑波大学	24	福井県立大学	84 - 85
電子技術総合研究所	25 - 28	福井大学	86
群馬大学	29	名古屋大学	87 - 88
千葉大学	30	滋賀大学	89
ソニーCSL	31	京都大学	90 - 105
玉川大学	32	龍谷大学	106
情報処理学会ICS研究会	33	大阪市立大学	107
創価大学	34	大阪大学	108 - 113
早稲田大学	35 - 38	大阪府立大学	114 - 115
電気通信大学	39	奈良先端科学技術大学院大学	116 - 117
東京工業大学	40 - 51	九州大学	118 - 120
東京大学	52 - 71	鹿児島大学	121
東京電機大学	72 - 73		

(敬称略、50音順)

研究者	参照No.	研究者	参照No.	研究者	参照No.
相澤 洋二	036	佐々 真一	069	古橋 武	087
合原 一幸	060	佐藤 理史	083	堀尾 喜彦	072
相原 正樹	117	沢田 康次	021	堀田 武彦	057
赤間 清	010	塩沢 由典	107	松浦 弘幸	053
朝倉 俊行	086	嶋田 正和	061	松野 文俊	050
足立 聡	051	庄司 正弘	055	松葉 育雄	030
雨森 道紘	018	鈴木 恵二	008	松本 健司	015
池上 高志	064	染田 清彦	066	丸山 次人	041
池口 徹	074	高橋 聡	116	三上 貞芳	002
池田 誠	022	竹内 郁雄	039	三田村 保	009
石井 良夫	034	田中 泰明	100	三宅 美博	044
石塚 智	118	谷 淳	031	宮崎 修次	103
磯 祐介	104	千葉 訓司	089	宮本 衛市	011
市村 宗武	070	辻下 徹	017	村上 健一郎	076
伊藤 耿一	019	津田 一郎	014	森 教安	112
伊藤 宏司	043	堤 敦司	058	矢内 浩文	032
稲吉 宏明	025	出口 弘	090	柳田 達男	016
井上 政義	121	徳田 功	001	山川 修	084
上田 正則	109	都甲 潔	120	山口 俊和	075
鵜飼 正二	046	等々力 賢	056	山口 昌哉	106
潮 俊光	111	土橋 敏明	029	山本 裕	097
内山 隆	047	中島 秀之	028	山本 義春	054
大石 進一	037	中野 文平	042	横井 浩史	006
大内 東	007	中村 喜代次	113	吉岡 宗之	108
大澤 幸生	110	中村 量空	085	吉川 研一	088
大場 一郎	038	行木 孝夫	013	米澤 保雄	023
小川 哲生	020	成瀬 継太郎	005	米田 政明	082
嘉数 侑昇	004	西田 孝明	094	渡邊 昭義	099
金子 邦彦	068	西谷 卓史	048	渡辺 治	040
金子 豊	105	野木 達夫	098	渡辺 慎哉	012
川村 清	079	野村 正雄	062	和田 充雄	003
木上 淳	091	萩原 将文	078		
木下 佳樹	026	橋田 浩一	027		
久保 雅義	092	長谷 博行	080		
木村 英紀	059	原 辰次	049		
木本 昌秀	052	氷上 忍	065		
桐木 紳	073	樋口 三郎	067		
国場 敦夫	063	日野 正訓	095		
熊谷 隆	093	平田 健太郎	096		
香田 徹	119	広瀬 貞樹	081		
小林 孝次郎	045	福田 浩昭	115		
金野 秀敏	024	藤坂 博一	102		
斉藤 信彦	035	藤島 実	071		
佐々木 逸雄	114	船越 満明	101		

参照No. 001

研究テーマ ／対象	最適化力学系の分岐現象、音声生成系の非線形解析、カオスの時系列の認識
機関名	室蘭工業大学
研究分野	専門分野：非線形力学
研究概要	研究テーマ：最適化力学系の分岐現象、音声生成系の非線形解析、カオスの時系列の認識
文献等	
研究者	徳田 功

出典： http://may.csse.muroran-it.ac.jp/lab/lab_intro.html

参照No. 002

研究テーマ ／対象	Reinforcement Learning for Complex, Dynamical, and Chaotic Systems, and its Application to the Emergence of Co-operative Robots
機関名	北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻
研究分野	システム情報工学／複雑系工学（混沌系工学分野）
研究概要	生命、心、人間、社会、物理現象など自然と人間の巧妙な仕組みを工学的に理解・解析し、これを機械に応用する新しい分野の研究・開拓を進めています。群れによる知的行動の発現を利用した群ロボットや、心が伝わるインターフェース、人・自然との協調ロボットなど新しいパラダイムの情報・機械の工学を目指しています。 Reinforcement Learning for Complex, Dynamical, and Chaotic Systems, and its Application to the Emergence of Co-operative Robots／Multi-Agent Reinforcement Learning by Scalar Value Exchange／Non-Darwinian Genetic Algorithms for Multi-Agent Learning／Insect Robot／Adaptive Traffic Control／Chaotic Learning Systems
文献等	
研究者	三上 貞芳

出典： <http://chaos1.complex.hokudai.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	ヒューマンインターフェース、カオスロボット工学、ニューラルネットワーク
機関名	北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻
研究分野	システム情報工学／複雑系工学（混沌系工学分野）
研究概要	生命、心、人間、社会、物理現象など自然と人間の巧妙な仕組みを工学的に理解・解析し、これを機械に応用する新しい分野の研究・開拓を進めています。群れによる知的行動の発現を利用した群ロボットや、心が伝わるインターフェース、人・自然との協調ロボットなど新しいパラダイムの情報・機械の工学を目指しています。
文献等	
研究者	和田 充雄

出典： <http://www.eng.hokudai.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	複雑系工学、CAD/CAM、画像処理工学、ロボティクス、知識工学、ニューラルネットワーク、人工知能
機関名	北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻
研究分野	システム情報工学／複雑系工学（自律系工学分野）
研究概要	生命はその周囲と多様で複雑な関わり合いを保ちながら進化や学習を通して自己を創造していく優れたシステムである。このような生命の優れた仕組みの理論的解明と人工的生成を目指して、人工生命や人工生態系、アニマト（アニマルもどき）のコンピュータ上での仮想的実現及び実機ロボットの作成に関する研究を行っています。
文献等	論文：疲労度パラメータを導入した行動選択ネットワークによるエージェントの創造的組織化に関する考察／人工知能学会誌、Vol.12, No., 1/97.
研究者	嘉数 侑昇

出典： <http://www.eng.hokudai.ac.jp/>

参照No. 005

研究テーマ ／対象	複雑系工学（ロボティクス，人工知能）
機関名	北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻
研究分野	システム情報工学／複雑系工学（自律系工学分野）
研究概要	生命はその周囲と多様で複雑な関わり合いを保ちながら進化や学習を通して自己を創造していく優れたシステムである。このような生命の優れた仕組みの理論的解明と人工的生成を目指して、人工生命や人工生態系、アニマット（アニマルもどき）のコンピュータ上での仮想的実現及び実機ロボットの作成に関する研究を行っています。
文献等	
研究者	成瀬 継太郎

出典： <http://www.eng.hokudai.ac.jp/>

参照No. 006

研究テーマ ／対象	複雑系工学（人工生命、人工生態系、アニマットの実験ロボット）
機関名	北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻
研究分野	システム情報工学／複雑系工学（自律系工学分野）
研究概要	生命はその周囲と多様で複雑な関わり合いを保ちながら進化や学習を通して自己を創造していく優れたシステムである。このような生命の優れた仕組みの理論的解明と人工的生成を目指して、人工生命や人工生態系、アニマット（アニマルもどき）のコンピュータ上での仮想的実現及び実機ロボットの作成に関する研究を行っています。
文献等	
研究者	横井 浩史

出典： <http://www.eng.hokudai.ac.jp/>

参照No. 007

研究テーマ ／対象	複雑系工学、調和系工学、システム情報工学、応用人工知能システム、医療システム
機関名	北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻
研究分野	システム情報工学／複雑系工学（調和系工学分野）
研究概要	私たちの周りには、複雑かつ曖昧な問題が山積みされています。このような問題に対して、計算機と人間の調和による解決を目的として人工知能、生命情報工学、ファジィ理論を基礎とし、工学的応用を図ることに研究の重点をおいています。
文献等	論文：遺伝的アルゴリズムによる選言概念獲得アルゴリズム 論文：ファジィ可到達行列モデルの修正理論とアルゴリズム／日本ファジィ学会誌、Vol.8, No.4, '96/8. 論文：順序尺度に基づく階層分析法／日本ファジィ学会誌、Vol.9, No.1, Feb. 1997.
研究者	大内 東

出典： <http://www.eng.hokudai.ac.jp/>

参照No. 008

研究テーマ ／対象	複雑系工学（ニューラルネットワーク、遺伝的アルゴリズム、マルチエージェント）
機関名	北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻
研究分野	システム情報工学／複雑系工学（調和系工学分野）
研究概要	私たちの周りには、複雑かつ曖昧な問題が山積みされています。このような問題に対して、計算機と人間の調和による解決を目的として人工知能、生命情報工学、ファジィ理論を基礎とし、工学的応用を図ることに研究の重点をおいています。
文献等	論文：疲労度パラメータを導入した行動選択ネットワークによるエージェントの創発的組織化に関する考察／人工知能学会誌、Vol.12, No.1, 1/97.
研究者	鈴木 恵二

出典： <http://www.eng.hokudai.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	複雑系工学（システム工学）の研究
機関名	北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻
研究分野	システム情報工学／複雑系工学（調和系工学分野）
研究概要	私たちの周りには、複雑かつ曖昧な問題が山積みされています。このような問題に対して、計算機と人間の調和による解決を目的として人工知能、生命情報工学、ファジィ理論を基礎とし、工学的応用を図ることに研究の重点をおいています。
文献等	論文：ファジィ可到達行列モデルの修正理論とアルゴリズム／日本ファジィ学会誌、Vol.8, No.4, 1996/8. 論文：順序尺度に基づく階層分析法／日本ファジィ学会誌、Vol.9, No.1, Feb. 1997.
研究者	三田村 保

出典： <http://www.eng.hokudai.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	複雑系工学（人工知能、宣言的知識表現とプログラム変換に基づく知識処理）
機関名	北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻
研究分野	システム情報工学／複雑系工学（表現系工学分野）
研究概要	人間の意志をコンピュータにうまく伝えるためには、どのような計算の仕組みを基にして、どのような言葉がふさわしいか、またコンピュータにどのようにして高度な知能を与えるか、さらには人間はどのようにして問題を解くべきかを研究しています。プログラム言語、自然言語理解、並列計算、人工知能、学習システム等が研究対象です。
文献等	論文：クラスと部分構造を持つ対象の表現と計算-論理に基づいた単純な枠組みの提案-／人工知能学会誌、Vol.12, No.1, Jan.1997. 論文：論理プログラムの等価変換による問題解決の枠組／人工知能学会誌、Vol.12, No.2, Mar. 1997. 論文：宣言的プログラムの推論規則／人工知能学会誌、Vol.12, No.4, July 1997. 論文：等価変換ルールの追加によるシステムの改善／人工知能学会誌、Vol.12, No.6, Nov. 1997.
研究者	赤間 清

出典： <http://www.eng.hokudai.ac.jp/>

参照No. 011

研究テーマ ／対象	複雑系工学（プログラミング言語、プログラミング環境、並列処理、分散環境）
機関名	北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻
研究分野	システム情報工学／複雑系工学（表現系工学分野）
研究概要	人間の意志をコンピュータにうまく伝えるためには、どのような計算の仕組みを基にして、どのような言葉がふさわしいか、またコンピュータにどのようにして高度な知能を与えるか、さらには人間はどのようにして問題を解くべきかを研究しています。 プログラム言語、自然言語理解、並列計算、人工知能、学習システム等が研究対象です。
文献等	著書：「PASCAL－プログラミングと翻訳技法」（森北出版）など 論文：クラスと部分構造を持つ対象の表現と計算-論理に基づいた単純な枠組みの提案-／人工知能学会誌、Vol.12, No.1, Jan.1997. 論文：論理プログラムの等価変換による問題解決の枠組／人工知能学会誌、Vol.12, No.2, Mar. 1997. 論文：宣言的プログラムの推論規則／人工知能学会誌、Vol.12, No.4, July 1997. 論文：等価変換ルールの追加によるシステムの改善／人工知能学会誌、Vol.12, No.6, Nov. 1997
研究者	宮本 衛市

出典： <http://www.eng.hokudai.ac.jp/>

参照No. 012

研究テーマ ／対象	複雑系工学（プログラム言語、自然言語理解、並列計算、人工知能、学習システム）
機関名	北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻
研究分野	システム情報工学／複雑系工学（表現系工学分野）
研究概要	人間の意志をコンピュータにうまく伝えるためには、どのような計算の仕組みを基にして、どのような言葉がふさわしいか、またコンピュータにどのようにして高度な知能を与えるか、さらには人間はどのようにして問題を解くべきかを研究しています。 プログラム言語、自然言語理解、並列計算、人工知能、学習システム等が研究対象です。
文献等	
研究者	渡辺 慎哉

出典： <http://www.eng.hokudai.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	カオス的な力学系の特徴を、エントロピー解析の側面から取り出すこと
機関名	北海道大学大学院理学研究科数学専攻
研究分野	専門分野：エルゴード理論、力学系 キーワード：エントロピー、記号力学系、エルゴード定理、変分原理、セルオートマトン、カオス
研究概要	研究内容： カオス的な力学系の特徴を、エントロピー解析の側面から取り出すことを目標にしている。特に、有名ではあるが力学系としての性質が一般的によくわかっていないセルオートマトンという系を集中的に研究している。そこでは、イジングモデルなど格子模型や統計力学における確率論の結果との関連も見られる。
文献等	
研究者	行木 孝夫

出典： <http://www.math.hokudai.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	非線形系、複雑系の数理全般を視野にしているが、特にカオスと脳の理論および数値計算による実験数学的手法での研究
機関名	北海道大学大学院理学研究科数学専攻
研究分野	専門分野：カオス的な力学系、脳神経系の数理学理論など非線形複雑系の数理学、応用数学、実験数学 キーワード：カオス、フラクタル、力学系、神経回路網理論、複雑系、非線形系、脳のダイナミクス、記憶過程、知覚過程、計算理論。
研究概要	研究内容： 非線形系、複雑系の数理全般を視野にしているが、特にカオスと脳の理論および数値計算による実験数学的手法での研究を行っている。カオス的な力学系の研究では、いたるところ微分不可能なアトラクターをもつ微分可能力学系、構造安定性にかわる新しい安定性概念、ノイズインデューストオーダー、カオスの遍歴、新しい力学系のクラスに関する発見的研究、カオスの情報理論、計算理論、結合格子写像などの研究を行なっている。脳の研究においては、情報の時間コーディングの機構に関する研究、カオス的な神経回路網の計算機実験、嗅覚、聴覚、視覚などの知覚過程における力学系モデルの構築と数値計算、動的な記憶過程の機構に関する研究、および解釈学的方法論の研究を行っている。
文献等	著書： 「カオスで脳をみる」（日経サイエンス1994年5月号） 「カオス的な脳観—脳の新しいモデルをめざして」（サイエンス社、1990年） 共著書： 「複雑系の科学と現代思想……カオス」（1997年、青土社） 「複雑系のカオス的なシナリオ」（金子・津田共著、朝倉書店、1996年）
研究者	津田 一郎

出典： <http://www.math.hokudai.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	カオス力学系、非線形複雑系の数理学、実験数学
機関名	北海道大学大学院理学研究科数学専攻
研究分野	専門分野：カオス力学系、非線形複雑系の数理学、実験数学 キーワード：カオス、乱流、非線形力学系、タンパク質、複雑系、情報理論
研究概要	研究内容： 非線形力学系のカオスの現実感に興味がある。カオス的な力学系の振舞いをみていると妙に生々しいのである。そこで、カオス力学系の情報理論的解析法を拡張して実際の生物系の解析に応用してみたが、現在の実験技術では複雑系を力学的に解析するのに必要なデータを得ることが、いくつかの例外を除いて非常に困難であることが判明した。実験については技術の進歩を待つことにして、現在は乱流やタンパク質の力学の計算機実験をして、いまだほとんど一般論というもののない高次元力学系の世界を探っている。
文献等	
研究者	松本 健司

出典： <http://www.math.hokudai.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	非線形発展方程式に支配されたパターン変動現象（時空カオス）
機関名	北海道大学大学院理学研究科数学専攻
研究分野	専門分野：非線形物理、時空カオス キーワード：カオス、時空カオス、構成論的モデル化、混相流体（沸騰、雲）、シミュレーション
研究概要	研究内容： ：非線形発展方程式に支配されたパターン変動現象（時空カオス）に興味がある。主に、沸騰や雲の動力学で見られる相転移をともなった混相の流体現象を研究している。これらの現象を構成的にモデル化しシミュレーションをおこない相関関数、パワースペクトル、KSエントロピーなどの量を用いてパターン・ダイナミクスの特徴付けを行なっている。流体のような動的な現象はシミュレーションから得られたデータを数値として眺めているだけではその特徴を十分に把握する事ができない。そこで、空間パターンの変動をアニメーションとして可視化する事によりダイナミックな性質を調べている。
文献等	
研究者	柳田 達男

出典： <http://www.math.hokudai.ac.jp/>

研究テーマ	複雑システムの数理
機関名	北海道大学大学院理学研究科数学専攻
研究分野	専門分野 : 複雑システムの数理 キーワード : 分散システム、カテゴリー、マトロイド、超準数学、非有基的集合論
研究概要	複雑系に関連する本質的諸問題をじかに数学的問題として定式化することは困難であるだけでなく、的外れとなることが多く、むしろ、複雑系科学の現場で日常言語でなされている概念化・議論等を数学的な立場から明確にする作業のほうが、遠回りであるが重要であると判断し、複雑系の基礎数理言語となるべきものの模索を長期的研究目標としている。具体的には以下をテーマとしているが、現在は重点を(E,F)においている。 (A) 神経回路網による環境構造の学習 (B) コヒーレンスの表現法と、それに基づく相互作用の定式化 (C) 分散系の数理 (D) 自己言明の数学的形式 (E) <内部観測>問題への数学的アプローチ: 複雑系の<認識機能>を問題にする場合に、研究者自身の認識機能が不可避免地に関係してしまう、この様相はどの学問にも本来潜在するものであるが、複雑系研究では避けることのできないものである。この問題は超越的立場を基盤とする数学による扱いは一見すると困難に思われるが、ラッセルのパラドクスが象徴するように数学自身にも内部観測の問題は潜在する。数学のこのような側面の分析を通して内部観測の様相への数学的アプローチが可能であると考えている。 (F) 数学的語り方の新しい形式の模索: 集合論と古典論理は数学研究の有効な足場として絶対的なものでないことは、超準数学と直観主義的集合論の有効性によって実証された。また、研究者が数学的対象を如何に使うかということ自身が明示的に表現されるという点で、集合論的なものよりも圏論的語り方が適切であると考えられる。これらのことは、複雑系の諸問題を扱うに適した、簡潔で有効な種々の<数学的語り方>を形成できる可能性を暗示するものとみなすことができる。
文献等	[A-1995a] 複雑系の動的挙動の記述法 応用物理 Vol 64(2),126--132,1995. [A-1995b] On Triple Mutual Information, Advances in Applied Math.16,269-274,1995. [A-1995c] Hypersets and dynamics and knowledge, With S. Tanaka, Hokkaido Mathematical Journal,26, 215--230,1995. [A-1997a] Construction of universal modal worlds based on hyperset theory, to appear in Archive for Mathematical Logic 1998, in press. [A-1997d] An axiomatics for transition systems and simulations with Peter Johnstone, John Power, Hiroshi Watanabe and James Worrack, LICS (Thirteenth Annual IEEE Symposium on LOGIC IN COMPUTER SCIENCE, June. 1998)
研究者	辻下 徹

出典: <http://fcs.math.sci.hokudai.ac.jp/tjst/works.html>

研究テーマ ／対象	カオス、ファジィ、人工知能等
機関名	弘前大学理工学部
研究分野	情報認識論
研究概要	脳の情報処理及び神経細胞モデルを理解し、ソフトウェアの充実や情報工学におけるロボティクスなどの応用を目的として研究している。特にニューラルネットワークにおける情報認識、画像認識や音声認識、最適化問題等について研究。また、カオス、ファジィ、人工知能等にも取り組んでいます。
文献等	
研究者	雨森 道紘

出典: <http://sci.hirosaki-u.ac.jp/~ninsiki/index-j.html>

研究テーマ ／対象	複雑系の活性化プロセスと複合スケーリング確立過程
機関名	東北大学大学院情報科学研究科
研究分野	情報応用数理学
研究概要	複雑系の活性化プロセスと複合スケーリング確立過程。 地震現象や生体の情報処理が関係する能と心の問題、パターン認識などに関するモデルシステムを土台にして、そこで発生する複合スケーリング過程の特性を予測検討する。また、この問題で重要な役割を演ずるゆらぎの変量を生成する「ゆらぎ生成器」の試作を行う。 本研究室の英語名は Computational Mechanics and Materials であり、計算力学と材料科学、あるいは力学と材料科学に関する計算機利用技術の基礎と応用について、コンピューターシミュレーションを有力な手段としながら理論的・実験的研究を行なっている。 ハイテク材料とハイテク加工技術によるハイテク製品は、それを構成する部品の一つ一つについて適切な材料とその加工方法を選択し、それらを組み立てることで現実のものとなる。そのために、そこで使用される材料の挙動を予測した上で、材料とその加工プロセスおよび製品の性能の適切な評価をすることが設計段階で求められるが、これをコンピューター上でフレキシブルに効率よく行うためのCAEシステムの構築を目指している。その要素テクノロジーは非線形計算力学・固体力学・トライボロジー・材料科学・生産工学・物性物理学などの広範な学問分野にまたがるものであり、さらにこれらの要素テクノロジーに基づき、分散処理計算機システム上でCAEシステムを構築するためのニューラルネットワークシステムの基本特性の評価とその試作研究も行なっている。
文献等	現在の研究テーマ： 1. 計算機援用仮想生産システムの開発 2. 材料のミクロ情報にもとづくマクロ数理モデルの確立 3. レーザースペックル相関法による大ひずみ計測システム 4. 速度-温度等価換算則によるポリマーの変形特性 5. 複合材料の振動減衰と音響放射特性の評価 6. 複雑系の活性化プロセスと複合スケーリング確立過程
研究者	伊藤 耿一

出典： <http://www.mech.tohoku.ac.jp/ssme/gsis/iam/index-j.html>

研究テーマ ／対象	物性理論・量子光学／非線形光学・量子力学基礎論・非平衡非線形力学系を研究対象とする量子物理学・物性物理学・物質科学・物理学基礎論の理論研究
機関名	東北大学大学院理学研究科／理学部
研究分野	量子多体系の非線形応答理論。光子・電子・格子場の量子揺らぎの制御理論。量子測定・量子カオス・MQC等の量子力学基礎論。 物性理論・量子光学／非線形光学・量子力学基礎論・非平衡非線形力学系を研究対象とする量子物理学・物性物理学・物質科学・物理学基礎論の理論研究室
研究概要	研究分野のキーワード 低次元多電子系／低次元多励起子系／低次元電子-格子系の動的応答理論・量子光学／非線形光学・量子力学基礎論と観測問題・非平衡非線形系の動的相転移ダイナミクスと緩和と散逸現象・量子-古典クロスオーバー 物性物理学を中心に研究テーマの選定を行っています。しかし、研究対象を狭い意味の凝縮系物理学に限定してはおりません。量子物理学全体に目を配りながら、様々な分野に興味を持って研究を進めていく計画です（ただし、高エネルギー領域と原子核領域と完全古典系は研究していません）。従って関連する（既存）分野名を挙げると、低次元量子流体、低次元多励起子系、非平衡力学系、非線形光学、量子光学、量子力学の観測問題など、いくつもの分野にまたがることになっています。しかしむしろ、物理学内部の細かい分野の境界を気にせずに研究し、それによって新しい研究分野を拓くことにつながれば一番よいと考えています。 最近の研究テーマ： 1. 低次元量子多体系の線形光学応答、2. 低次元量子多体系の非線形光学応答、3. 量子化された光子場と電子系との非線形相互作用、4. 量子化された光パルスの空間伝搬と自己収束のダイナミクス、5. 量子力学的連続測定と量子カオスの問題、6. 光誘起構造相転移の量子ダイナミクス、7. ランダム系での複合粒子系のホッピングとトンネルダイナミクスと非マルコフ緩和
文献等	
研究者	小川 哲生

出典： <http://www.cmpt.phys.tohoku.ac.jp/~ogawa/research.html>

研究テーマ ／対象	複雑システムの非線形物理学に基づく理解と、フラクタルやカオス時系列等の情報処理への応用を通じ、新しい情報処理システムの構築
機関名	東北大学電気通信研究所
研究分野	情報物理学 1.ブレインコンピューティング・アーキテクチャ 2.脳の計算原理とブレインコンピュータの設計 3.生命状態の統計物理 4.非線形動力学と複雑系 5.非平衡系における自己組織化
研究概要	専門は情報物理学で、非線形非平衡系の秩序と乱れを研究している。 ブレインコンピューティングシステム研究分野では、脳や生体などに代表される複雑システムの非線形動力学、およびその知的情報処理システムへの応用を研究している。生命状態の研究においては、腔腸動物ヒドラを細胞解離し、細胞の無秩序集合体から個体が完全再生する機構を分析し、生体の秩序と生命状態の関係を追求している。さらに、脳に近い機能を有する知的な情報処理システムであるブレインコンピューティングアーキテクチャの構築を目指した研究を進めており、現在まで半導体集積回路によるシステム実装の基礎研究を行ってきた。また、現在はブレインコンピューティングの要件である柔軟かつ適切な情報処理に必要なリアルタイムシミュレータの研究、高度な判断処理に必要なアクティブ情報処理の研究を進めている。さらに、複雑システムの非線形物理学に基づく理解と、フラクタルやカオス時系列等の情報処理への応用を通じ、新しい情報処理システムの構築をめざしている。
文献等	論文：「生命の自己組織—適応する生命力」（日経サイエンス、1994年5月号） 著書：「非平衡系の秩序と乱れ」（朝倉書店、1993年）
研究者	沢田 康次

出典： <http://www.riec.tohoku.ac.jp/index-j.html>

研究テーマ ／対象	複雑系システム領域の研究
機関名	会津大学ハードウェア学科コンピュータ産業学
研究分野	専門分野：複雑系システム領域
研究概要	
文献等	論文：ECの過去から現在、そして未来／情報処理、Vol.38, No.9, Sep. 1997. 著書・訳書： 「絵ときWindowsNTバイブル」（オーム社、1995） 「Netscapeではじめる電子商取引」（ナツメ社、1996） 「JavaでOSのなくなる」（ナツメ社、1996） 「Java言語ハンドブック」（ナツメ社、1997） 「NetscapeGoldハンドブック」（ナツメ社、1997） 「NetscapeCommunicationハンドブック」（ナツメ社、1997）
研究者	池田 誠

出典： <http://mandala.u-aizu.ac.jp>

研究テーマ ／対象	複雑適応系の研究および推進
機関名	茨城大学大学院
研究分野	
研究概要	日本コンピュータサイエンス学会「非線形複雑情報処理研究会」会長、日本医学物理学会課題別研究会「生体の非線形挙動の複雑構造解析研究会」会長として、複雑適応系の研究および推進に携わる。
文献等	共訳：「岐路に立つサンタフェ研究所」（著者：J. ホーガン＜SCIENTIFIC AMERICANのシニアライター＞、原論文掲載誌：SCIENTIFIC AMERICAN June1995日経サイエンス1995年8月号）
研究者	米澤 保雄

出典： <http://www.ibaraki.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	表面触媒反応系のカオスや、散逸系のソリトンの統計力学
機関名	筑波大学物質工学系
研究分野	統計力学
研究概要	専門は非平衡統計力学、非線形工学で、現在とくに、表面触媒反応系のカオスや、散逸系のソリトンの統計力学などに関心を持ち、研究を進めている。非線形・非平衡統計理論の工学システムへの応用。
文献等	訳書：「カオスの制御と応用」（W.L.ディトゥ/L.M.ペコラ著、原論文掲載誌、SCIENTIFIC AMERICAN August1993日経サイエンス1993年10月号） 共同執筆論文：「応用カオス-カオスそして複雑系に挑む」（4編4章）
研究者	金野 秀敏

出典： [Http://www.ims.tsukuba.ac.jp/](http://www.ims.tsukuba.ac.jp/)

研究テーマ ／対象	創発的性質を持つ系の構築に関する研究 (or 人工生命) : 具体的には、(1) atomoid=原子もどき、(2) celloid=細胞もどき、(3) neuronoid=神経細胞もどきの3つが研究対象。
機関名	電子技術総合研究所
研究分野	
研究概要	(0) 'XXX-oid': 部品として「Xのようなもの」を設計し、それらの集団的相互作用を通じて「Y」な「Zのようなもの」の創発を目指す。 {XXX,X,Y,Z}の値は下記の3組: (1) 'atomoid': XXX=atom, X=「原子」, Y=「自己複製可能」, Z=「分子」 (2) 'celloid': XXX=cell, X=「細胞」, Y=「形態形成可能」, Z=「多細胞生物」 (3) 'neuronoid': XXX=neuron, X=「神経細胞」, Y=「知的振舞い可能」, Z=「脳／神経系」 なお、上記の3研究は、C. Reynolds の "birdoid (or boid, 鳥もどき)" に触発されたものである。
文献等	・ 稲吉宏明: 'neuron-oid'系における創発的情報処理(第1報): 'neuron-oid'の発火の創発, 第56回全国大会講演論文集(2), 情報処理学会, pp.402-403, 1998. ・ Inayoshi H. and Iba H.: "Rhythms emerge in a collection of 'blind' chemicals by the use of 'Genetic Switches'", "Genome Informatics 1997", Universal Academy Press, pp.71-79, 1997. ・ Yoshii S., Inayoshi H., Kakazu Y.: "Atomoid: A New Prospect in Reaction-Formation System Spontaneous Hypercycles Guided by Dissipative Structural Propertie", "Artificial Life V", MIT Press, pp.418-425, 1997. ・ Inayoshi H.: "Simulating Natural Spacing Patterns of Insect Bristles Using a Network of Interacting Celloids", "Artificial Life IV", MIT Press, pp.295-300. 1994. ・ Inayoshi H.: "Artificial Spacing Patterns in a Network of Interacting Celloids", "PPSN-III (Lecture Notes in Computer Science # 866)", Springer-Verlag, pp.365-374. 1994. ・ 稲吉宏明: 人工生命への招待, 情報処理学会誌第34巻 第7号, pp.884-891. 1993.
研究者	稲吉 宏明

出典:

研究テーマ ／対象	算譜意味論、とくにソフトウェア開発・保守過程の意味論
機関名	電子技術総合研究所
研究分野	
研究概要	評価による正規化への高次元圏における米田の補題によるアプローチ、論理プログラムにおけるファイブレーション意味論、データ精製の意味論、ソフトウェアの差分、定理証明系の利用者環境、算譜言語意味論、複雑系への代数的アプローチ
文献等	・ Y. Kinoshita: A bicategorical analysis of E-categories, Mathematica Japonica, vol. 47, No. 1, pp. 157-169, 1998. ・ Y. Kinoshita, P.W. O'Hearn, A.J. Power, M. Takeyama and R.D. Tennent: An axiomatic approach to binary logical relations with applications to data refinement, Proceedings of TACS'97, LNCS 1281, pp.191-212, 1997. Here are slides used for TACS talk. ・ Y. Kinoshita, A.J. Power, M. Takeyama: Sketches, Electronic Notes in Theoretical Computer Science 6 (1997), URL: http://www.elsevier.nl/locate/entcs/volume6.html 14 pages. 1997. ・ Y. Kinoshita: Interpreting OBJ subsorting in Martin-Loef's subset theory with a universe Information Processing Society of Japan, IPSJ-PROG91-11, Nov 1991. ・ Y. Kinoshita and K. Takahashi: Groupoid of equational proofs, Bulletin of the Electrotechnical Laboratory, Vol.60, No.11, pp. 711-718 (1996). Supersedes TR95-17. ・ 木下佳樹, 高橋孝一, 中田秀基: 証明支援系の図式によるインターフェイス, コンピュータソフトウェア, vol. 14, No. 3 (1997), pp.42-50. ・ 木下佳樹: 構成的プログラミング言語 Maya の型理論の意味, 第33回プログラミングシンポジウム予稿集, 情報処理学会, 1992. ・ 木下佳樹: Martin-Loef の集合定数の導入と λ -cube, 1992年プログラム変換・合成研究会予稿集, 日本ソフトウェア科学会, 1992.
研究者	木下 佳樹

出典: <http://www.etl.go.jp/>

研究テーマ	制約の概念に基づく知能の計算モデルの開発、コミュニケーションのゲーム理論的解析
機関名	電子技術総合研究所
研究分野	自然言語処理、認知科学、人工知能
研究概要	これまでに手がけた主な研究は、統語解析、言語の認知モデル、記号的制約を扱う制約論理プログラミング、談話理解システム、制約に基づく日本語文法など。現在の主要な研究テーマは、制約の概念に基づく知能の計算モデルの開発、大域文書修飾、対話システムの評価、コミュニケーションのゲーム理論的解析など。
文献等	論文： 人工知能における基本的問題 新しいAI研究を目指して／人工知能学会誌、Vol.11, No.5, 9.1996. DiaLeague-自然言語処理システムの総合評価-／人工知能学会誌、Vol.12, No.3, May 1997. 特集「AIチャレンジ」知能発掘とコミュニケーション増幅／人工知能学会誌、Vol.13, No.1, Jan. 1998. 'Dynamics of Symbol Systems,' New Generation Computing, vol.12, no.3, pp.285-310 (1994) 「GDA: 意味的修飾に基づく多用途の知的コンテンツ」 人工知能学会誌, vol.13, no.4 (1998) 著書： 知のエンジニアリング, ジャストシステム (1994). 編著書： 岩波講座「認知科学」(1994-1995) 岩波講座「言語の科学」(1997-1998) 受賞： 情報処理学会 学術奨励賞 (1988)／日本認知科学会 大会発表賞 (1991)／日本認知科学会 研究会発表賞 (1991)／人工知能学会 研究奨励賞 (1994)／情報処理学会 山下記念研究賞 (1994)／日本認知科学会 優秀論文賞 (1995)／言語処理学会 年次大会優秀発表賞 (1997)
研究者	橋田 浩一

出典： <http://www.etl.go.jp/etl/nl/gda>

研究テーマ	大規模で複雑なソフトウェアの構成を可能にする協調アーキテクチャの開発
機関名	電子技術総合研究所
研究分野	情報工学 (知識表現、推論など)
研究概要	研究目標：適応性に富んだ複数のエージェントの柔軟な結合 (協調) を通じて、大規模で複雑なソフトウェアの構成を可能にする協調アーキテクチャの開発を目指す。 産業科学技術開発、新ソフトウェア構造化モデル、基本構造メカニズムの研究開発、状況依存推論と有機的プログラミングの研究
文献等	論文：複雑系としての知能の構築／人工知能学会誌、Vol.13, No.1, Jan 1998. 著書：「Prolog」(産業図書)、「知識表現とProlog/KR」(産業図書)、「楽しいプログラミングII」(岩波)など。 論文：因果関係と状況に基づく動作効果の動的計算 論文：情報統合のための有機的プログラミング／人工知能学会誌、Vol.11, No.2, March 1996. 論文：新しいAI研究を目指して／人工知能学会誌、Vol.11, No.5, Sept. 1996.
研究者	中島 秀之

出典： <http://www.etl.go.jp/>

参照No. 029

研究テーマ ／対象	複雑物質に関する構造と物性の研究
機関名	群馬大学工学部生物化学工学
研究分野	生物化学工学
研究概要	高分子溶液、マイクロカプセル分散系などの複雑物質に関する構造と物性の研究
文献等	論文：非線形現象の不思議-溶液の相平衡と非線形方程式／電子情報通信学会誌、Vol.80, No.11, Nov. 1997.
研究者	土橋 敏明

出典： <http://www.gunma-u.ac.jp/>

参照No. 030

研究テーマ ／対象	カオスそして複雑系
機関名	千葉大学工学部情報処理工学講座
研究分野	
研究概要	共通講座：情報処理工学講座では、ニューラルネットワーク、カオス、フラクタル等の知的情報処理および数値解析など、情報化社会の技術的基盤である情報工学の先端的分野の基礎的理論と方法及び応用について研究、教育を行っている。
文献等	共著書：「応用カオス-カオスそして複雑系に挑む」（3編5章、サイエンス社）
研究者	松葉 育雄

出典： <http://www.eng.chiba-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	カオスそして複雑系
機関名	(株) ソニーコンピュータサイエンス研究所
研究分野	自律システムは置かれている環境の変動に合わせて、適時必要な内部表現及びそれに基づく行動のメカニズムを獲得していくことが望まれます。私は、自律、適応といった漠然とした概念について、力学系の相転移の枠組を適用することにより、その複雑さに基づく分類が可能になると考えています。それは、Artifactとしての自律システムの設計において、重要な指針を与えると考えます。現在、未知空間を探索する自律ロボットの行動学習の実験を行っており、特にreactiveな行動からplanに基づく行動へと遷移進化する、まさに知能が発現し出す臨界点の構造について研究しています。Artifactとしての自律システムは、力学系の階層を人間に助けられながら登っていくことにより、さらに進化していくと思います。
研究概要	
文献等	共著書： 「応用カオス-カオスそして複雑系に挑む」(3編6章、サイエンス社)。 1.谷, "カオスの最急降下法を適用したニューラルネットにおける学習及び記憶想起の動特性", 信学論A Vol. J74-A, No8 (1991) 1208. 2.Tani, J. and Fukumura, N., "Learning Goal-Directed Sensory-Based Navigation of a Mobile Robot", in press. Neural Networks.
研究者	谷 淳

出典: <http://www.csl.sony.co.jp/index.j.html>

研究テーマ ／対象	神経型システムによる情報の獲得、処理通信に関する数理 自然、ひと、社会における(非線形)現象の数理的解析
機関名	玉川大学工学部情報通信工学科
研究分野	・神経情報工学(神経型システムによる情報の獲得、処理通信に関する数理) 特に、連想記憶のダイナミクスに関する数理的解析、時には、ひとの記憶・認知能力に関する心理学的実験とその数理的解釈 ・数理工学(自然、ひと、社会における(非線形)現象の数理的解析)
研究概要	
文献等	特集: 複雑系とコンピュータ-神経型システムの記憶情報処理/Computer Today誌、1997、9、No.81
研究者	矢内 浩文

出典: http://mu.eng.tamagawa.ac.jp/yanai/yanai_personal.html

研究テーマ ／対象	複雑系研究からの示唆を得つつ知能とは何かについての考察
機関名	情報処理学会「知能と複雑系（ICS）」研究会
研究分野	研究テーマ：知識表現，推論，学習，対話，複雑系の情報処理，人工社会， 分散協調処理，自己組織化，自己言及システム，人工生命， その他知能に関することなら何でも。
研究概要	我々は，人工知能の本質は，“不完全情報を如何に不完全ながら合理的に処理するか”にあるという 観点に立っている．その結果，“人工知能研究会”は最近の研究動向の変化も考慮し，守備範囲を広 げて来た．特に同じく複雑系を対象とする社会学との関係を深めた活動を行ってきた．複雑な社会シ ステムの挙動を複数のエージェントの並列動作によってシミュレートしようとするアプローチは， エージェントの相互作用によって創発的知識を実現しようという最近のAIの動向と深い関連性を持つ と考える．今後は，複雑系研究からの示唆を得つつ知能とは何かについて考えてゆきたいと思ってい る．
文献等	
研究者	

出典： <http://www.ymd.dis.titech.ac.jp/sig-ics/>

研究テーマ ／対象	非線形システム工学、応用数理学、可視化情報、複雑系の研究
機関名	創価大学工学部
研究分野	非線形システム工学、応用数理学
研究概要	非線形システム工学、応用数理学、可視化情報、複雑系の研究
文献等	
研究者	石井 良夫

出典： <http://www.t.soka.ac.jp/InfoSys/staff/ishii.html>

研究テーマ ／対象	量子系のカオス
機関名	早稲田大学
研究分野	理論物理学（統計物理、生物物理）
研究概要	専門は理論物理学（統計物理、生物物理）で、カオスという言葉が使われていなかった1960年代から、この分野とかかわってきた。そのころ力学系の乱雑挙動をもたらす非線形格子振動の誘導現象を発見し、現在は、量子系のカオスに取り組んでいる。
文献等	著書：『複雑系がひらく世界』－科学・技術・社会へのインパクト－（1997年、日経サイエンス） 「カオスが科学に与えたインパクト」（日経サイエンス1992年3月号「特集カオス：科学に与えたインパクト」に大幅に加筆、修正した。）
研究者	斉藤 信彦

出典：

研究テーマ ／対象	量子と宇宙、カオスの非線形動力学の考察
機関名	早稲田大学理工学部応用物理学科
研究分野	統計力学、非線形非平衡物理学、カオス理論、エルゴード問題、不可逆性の起源、理論生物学、自己組織化、パターン形成、1/f ゆらぎ、ジップ則、アロメトリー則、ニューラルネットワーク、形態進化
研究概要	素粒子物理学、宇宙物理学及び統計物理学などの基礎物理学では、多くの現象が非線形方程式によって記述されています。線形現象に関しては多くの数学的方法が開発され、統一的に理解されていますが、非線形問題に関して統一的に理解しようという試みは、統計物理学の一分野であるカオスやフラクタル、ソリトンの研究で始まったばかりです。本助成研究では素粒子論、宇宙論、生命科学、統計力学などの各専門分野における非線形問題を整理し、その類似点や相違点をまとめ、各分野でのアプローチを比較検討し、総合的観点から非線形物理系に共通な普遍的機構や基本法則を総合的に明らかにする研究を進めています。
文献等	論文：非線形現象の不思議：複雑系への視点／電子情報通信学会誌、Vol.80, No.11, Nov. 1997. "カオスの問題（1990年代の科学）", 1990, 科学（岩波）, 60, No.7, pp.474, 相澤洋二 "カオス-カオス理論の基礎と応用", 1990, 相原一幸編（サイエンス社）, 相澤洋二 "カオスを視る-予測不可能な世界への扉-", 1991, 数理科学（サイエンス社）, No.334, pp.30, 原山卓久、相澤洋二 "偶然と必然-カオスからの考察-", 1991, 数学セミナー（日本評論社）, 30, No.11, pp.38, 相澤洋二、田中健司 "カオス、散逸構造", 1991, 数理科学辞典、広中平祐代表編集（大阪書籍）, 相澤洋二 "カオスと1/f ゆらぎ", 1992, 数理科学（サイエンス社）, No.349, pp.8, 相澤洋二
研究者	相澤 洋二

出典： <http://www.phys.waseda.ac.jp/aizawa/index-j.html>

研究テーマ ／対象	非線形を中心とした情報数理工学の研究
機関名	早稲田大学理工学部情報学科
研究分野	情報数理工学
研究概要	非線形現象の計算機援用解析、精度保証付数値計算理論、ソフトウェアシステム構築
文献等	共著：応用カオス「カオスそして複雑系に挑む」（2編5章） 論文：精度保証付き数値解析にまつわるできたてはやほやの話／電子情報通信学会誌、Vol.79, No.7, '96/7. 論文：非線形現象の解析手法 [1] -非線形現象の精度保証付き数値解析 (1) -／電子情報通信学会誌、Vol.79, No.2, '96/2.
研究者	大石 進一

出典： <http://www.oishi.info.waseda.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	量子と宇宙、カオスの非線形動力学考察
機関名	早稲田大学理工学部理工学総合研究センター
研究分野	素粒子・核・宇宙線、物性一般（含基礎論） 現在の研究課題：メソスコピック系等を対象とした量子力学基礎理論、ゲージ場の量子論 素粒子理論・量子力学基礎論
研究概要	素粒子物理学、宇宙物理学及び統計物理学などの基礎物理学では、多くの現象が非線形方程式によって記述されています。線形現象に関しては多くの数学的方法が開発され、統一的に理解されていますが、非線形問題に関して統一的に理解しようという試みは、統計物理学の一分野であるカオスやフラクタル、ソリトンの研究で始まったばかりです。本助成研究では素粒子論、宇宙論、生命科学、統計力学などの各専門分野における非線形問題を整理し、その類似点や相違点をまとめ、各分野でのアプローチを比較検討し、総合的観点から非線形物理系に共通な普遍的機構や基本法則を総合的に明らかにする研究を進めています。
文献等	著書：「相対論に必要な数学」（共立出版、1995/5） 共著：量子力学のパラドックス（日経サイエンス、1995/4） 共同執筆論文：「Tunneling time based on the quantum diffusion process approach」Phys. Letters, A 204 ElsevierScience B.V., 1995/ 8) 評論：角運動量と回転数理論科学383サイエンス社1995/ 5 評論物理学と空間数学セミナー34;11日本評論 社1995/11 評論トンネル現象の物 理数理論科学 392 サイエンス社1996/ 2
研究者	大場 一郎

出典： <http://www.phys.waseda.ac.jp/hep/index-j.html>

研究テーマ	ソフトウェア学
機関名	電気通信大学電気通信学部情報工学科
研究分野	最も専門とする分野：記号処理システムの設計と開発
研究概要	複雑性との関わり：プログラミングとはそもそも非常に複雑なものをつくる行為である。まだ学生時代のころ、プログラムの複雑性として、アルゴリズム的複雑度 (algorithmic complexity) のほかに、記述の複雑度ともいえるKolmogorov complexityの存在を知り、なるほどと感心する。その後、いろいろなシステムを開発したころから、ソフトウェアの複雑さに心を痛めると同時にその複雑性を楽しむ心境に至る。また、コンピュータネットワークや、並行オブジェクト指向プログラミングが本質的にもつプログラミングの複雑さをなんとか研究の対象にできないかと考え、仲間達とConnecticsというスローガンを打ち出した(1990ごろ)。このスローガン自身はほとんどスローガン止まりであったが、その一念はいまでも底流にある。1994年ごろ、第3回の複雑系シンポジウムに計算機屋の立場から複雑性について話をさせられる機会があり、いろいろ調べてみようという気持ちになった。そしてBennetのlogical depthの理論を知り、ある程度納得をする。しかし、そのような理論世界の概念ではなく、エンジニアリングに複雑性をうまく使えないか夢想している。いまのところ夢想の段階を出ていない。総じて言えば、エンジニアリングというものの、どちらかという、as it be, つまりTaoismの発想というのが一番当たっている。
文献等	
研究者	竹内 郁雄

出典：

研究テーマ	計算の複雑さ(Computational Complexity) に関する基礎理論や応用の研究
機関名	東京工業大学
研究分野	アルゴリズムの設計・解析に関する基礎的研究
研究概要	手に負えない問題の構造についての研究とその応用(例：暗号理論、学習理論)などの研究。計算の複雑さに関する理論全般に興味を持って研究している。とくにNP問題の難しさに興味があり、現在、その平均的な難しさの解明を中心に研究している。 研究における抱負：まず、P vs. NP問題に対して、何らかの貢献をしたい。現在すぐに解決するのは難しいだろうが、後の研究者が「渡辺のあの手法がきっかけで...」と言ってくれるような糸口を見出したい。それから、最近脳のマカニズムに興味を持っている。今のところ、アルゴリズム理論的に脳のマカニズムを解明しようとした研究はないが、そのアプローチもかなり有効だと思っている。
文献等	共著書：「情報セキュリティの科学(マジック・プロトコルへの招待)」(講談社ブルーバックス、太田・黒澤・渡辺共著) 研究内容に関連のある解説論文 計算の複雑さの構造的解析の各話題に関するもの： How hard are sparse sets?, Proc. 7th Structure in Complexity Theory Conference IEEE(1992), pp.222-238. On the complexity of small description and related topics, Proc. 17th Mathematical Foundations of Computer Science, Lecture Notes in Computer Science 629 (1992), pp.82-94. A view of structural complexity theory, Current Trends in Theoretical Computer Science (G. Rozenberg and A. Salomaa eds.), World Scientific (1993), pp.451-468. (Co-author: R.V. Book) Pvs.NP 問題全般に関するもの： 手に負えない問題, 電子情報通信学会, 74 (3) (1991), pp.288-291. N P型問題の近似解法の可能性について, オペレーションズ・リサーチ, 39 (2) (1994), pp.105-111. 暗号や学習など関連分野に関するもの： 一方関数のお話し, 情報処理, 32 (6) (1991), pp.704-714. 計算論的学習のお話し, 人工知能学会誌, 6 (5) (1991), pp.641-650.
研究者	渡辺 治

出典： <http://watanabe-www.cs.titech.ac.jp/watanabe-home-j.html>

研究テーマ ／対象	人間と共棲する自律型ロボットの実現
機関名	東京工業大学大学院 総合理工学研究科知能システム科学専攻
研究分野	複雑システム解析／感覚行動制御分野 専門分野：ロボット制御、ロボットビジョン、リアルタイムシミュレーション
研究概要	人間と共棲する自律型ロボットの実現を目標に、介護ロボットやパーソナルロボットの要素技術の研究を進めている。 知覚認識では、リアルタイムビジョンを用いた環境計測認識や自律移動用ナビゲーション技術を、自律化制御では、感覚行動制御や人とロボットとのインタラクション技術の開発を行っている。また、独自開発した高速シミュレーション技術の実用化を目指して、マルチメディア分野における人や生物を含むモーションコンテンツの製作支援環境の開発、機械系 CAD における機構設計解析シミュレータの開発を進めている。宇宙分野では、複数センサと3指ハンドを特徴とする宇宙用精密作業ロボットやリモートセンシング用高分解能スキャナの開発を行っている。
文献等	
研究者	丸山 次人

出典： <http://midget.cs.dis.titech.ac.jp/staff/uchiymaru.html>

研究テーマ ／対象	数理的組織設計論とその周辺
機関名	東京工業大学大学院 総合理工学研究科知能システム科学専攻
研究分野	複雑システム解析／自律分散制御分野 専門分野：数理的組織設計、数理経済学、システム理論
研究概要	研究領域は数理的組織設計論とその周辺である。それ自身意思を有した個性ある複数の主体からなるシステムに関して数理的研究を行っている。部分の合理性と全体の目標とが必ずしも調和しない社会のパラドックス状況(社会システムの失敗、組織の失敗)を回避するメカニズムの性質の解明や設計を論ずる。システム論的には部分と全体の関係を扱うことになる。利用する数理的言語としては、数理経済学、ゲーム理論の諸概念が用いられる。 最近の研究題目：1.情報の不完全性下の誘因両立的メカニズムの研究、2.ハイパーゲーム的状况下での情報交換と意志決定の研究、3.全体目的を達成する自律分権的なメカニズム設計論
文献等	論文・著書： "Comparison between Interaction Concepts", International Journal of General Systems, Vol.2, No.4, 1995. "Properties of 'soft' games with mutual exchange of Inducement Tactics", Information & Systems engineering, Vol.1, No.2, 1995. 組織的 DSS の枠組みとその実現, 経営情報学会誌, Vol.4, No.4, 1996.
研究者	中野 文平

出典： <http://midget.cs.dis.titech.ac.jp/staff/nakano.html>

研究テーマ ／対象	並列処理機構および自己組織化機能を非線形ダイナミックシステムの観点から解析し、創発システム設計のための理論的枠組みを追求
機関名	東京工業大学大学院 総合理工学研究科知能システム科学専攻
研究分野	複雑システム解析／適応学習システム分野 専門分野：生体システム、ロボティクス、感覚・運動学習
研究概要	”運動の巧みさ・スキル”という言葉から、私たちはピアニストの微妙な指の動き、陶芸家の巧みな手さばき、スポーツ選手のダイナミックな動きなどをイメージする。私たちが驚嘆するのは、これらの動きの精緻性や巧妙さだけではない。同じ体から生み出される運動の多様性・柔軟性や外部環境への適応性である。このような生体の運動機能は、脳内に形成されている機能モジュールの間の時空間マッピングによって自己組織的に産み出される。本研究室では、このような並列処理機構および自己組織化機能を非線形ダイナミックシステムの観点から解析し、創発システム設計のための理論的枠組みを追求している。これらをもとに、歩行や上肢動作のパターン生成機構を解明するとともに、ロボットの協調制御や生体ミメティックロボットへの応用を目指している。 最近の研究題目：1.機能モジュールに基づく運動・行動の重層的表現とロボット制御への応用、2.生体システムの運動制御機能とその表現モデル、3.生体ミメティック義肢の開発
文献等	最近の公表論文・著書： 1.Skilled Actions: Goal-directed Motor Dynamics, Proc. of IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, pp.18-25, 1996. 2.Neural Network Learning of Robot Arm Impedance in Operational Space, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol.26, No.2, pp.290-298, 1996. 3.Dynamic Control of the Musculoskeletal System, pp.219-232, in K.Hayashi & H.Ishikawa (Eds.) : Computational Biomechanics, Springer, 1996.
研究者	伊藤 宏司

出典： <http://midget.cs.dis.titech.ac.jp/staff/itou.html>

研究テーマ ／対象	生物に学び、創発型知能の実現に向けての基礎研究
機関名	東京工業大学大学院 総合理工学研究科知能システム科学専攻
研究分野	複雑システム解析／適応学習システム分野 専門分野：生命情報システム、自己言及システム、マルチエージェントシステム、コミュニケーション支援システム
研究概要	生命系における知能の最大の特色は、あらかじめ予測できない状況下でも、自らその意味を発見しリアルタイムに機能を創発できることにある。これは従来の AI における探索型知能の限界を越える上で非常に示唆的である。そこで本研究室では生物に学び、創発型知能の実現に向けての基礎研究を進めている。そして、既に、システムと環境の身体的引き込み（エンタインメント）を通して両者が不可分な関係としての「場」を生成し、それをシステム自身の視点から解釈し「内部場」を生成し、それが再帰的に身体的「場」の生成を拘束することを示した。そして、このような2中心間での相互拘束としての創発的自己言及ループの重要性を示唆した。そこで今年度は「場」の創発性の基礎理論として脳の認知マップ生成モデルを構築し、さらに、その実践的表現として人間とロボットの生成的コミュニケーション系を構築する。 最近の研究題目 1.生命システム（脳、粘菌 etc.）における自己言及的な空間認知マップ生成モデル 2.人間-ロボット共存系における身体的コミュニケーションと創発的自己言及 3.マルチエージェント系における2中心性に基づく多様性生成モデル
文献等	最近の公表論文・著書： 1.位置情報「場」と生命的自律性, 数理科学, No.394, pp.56-63, 1996 2.知的マルチエージェントの機能分散と自己言及, 計測と制御, Vol.35, No.7, pp.540-544, 1996 (同号 pp.557-563 に創発に関する討論会の記事あり) 3.「場所」における設計, 電気学会論文誌D, Vol.117, No.3, pp.268-273, 1997 論文：「相互引き込みに基づく内的制御—人間-ロボット協調歩行系における適応的プロセス—」
研究者	三宅 美博

出典： <http://midget.cs.dis.titech.ac.jp/staff/miyake.html>

参照No. 045

研究テーマ ／対象	問題を解くアルゴリズムの研究（計算の複雑さの理論の研究）
機関名	東京工業大学大学院情報理工学研究科
研究分野	
研究概要	問題を解くアルゴリズム（解き方）には色々なものがある。この研究室では、効率のよいアルゴリズムを見つけること、アルゴリズムの効率がどこまで改良できるかという限界を調べることなど、効率の立場からアルゴリズムの研究（計算の複雑さの理論の研究）を行っている。
文献等	
研究者	小林 孝次郎

出典： <http://www.is.titech.ac.jp/labs/kobayasilab/index-j.html>

参照No. 046

研究テーマ ／対象	非線形解析、力学系理論などに基づく数学的な解析と、コンピュータの関心の深いカオス・フラクタル理論、ウェーブレット解析などの応用によるこの分野の実験数理解的手法を用いた研究
機関名	東京工業大学大学院情報理工学研究科
研究分野	数理・計算科学
研究概要	非線形偏微分方程式論と応用数理解析、数理科学の様々な分野に現れる非線形偏微分方程式を対象として、非線形解析、力学系理論などに基づく数学的な解析と、コンピュータの関心の深いカオス・フラクタル理論、ウェーブレット解析などの応用によるこの分野の実験数理解的手法を用いた研究を行なう。
文献等	
研究者	鵜飼 正二

出典： <http://www.is.titech.ac.jp/labs/ukailab/ukailab.html>

研究テーマ ／対象	自律ロボット、宇宙開発、制御工学、リアルタイムビジョン、情報記憶
機関名	東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻
研究分野	複雑システム解析／感覚行動制御分野 専門分野：自律ロボット、宇宙開発、制御工学、リアルタイムビジョン、情報記憶
研究概要	人間と共棲する自律型ロボットの実現を目標に、介護ロボットやパーソナルロボットの要素技術の研究を進めている。 知覚認識では、リアルタイムビジョンを用いた環境計測認識や自律移動用ナビゲーション技術を、自律化制御では、感覚行動制御や人とロボットとのインタラクション技術の開発を行っている。また、独自開発した高速シミュレーション技術の実用化を目指して、マルチメディア分野における人や生物を含むモーションコンテンツの製作支援環境の開発、機械系 CAD における機構設計解析シミュレータの開発を進めている。宇宙分野では、複数センサと3指ハンドを特徴とする宇宙用精密作業ロボットやリモートセンシング用高分解能スキャナの開発を行っている。
文献等	
研究者	内山 隆

出典： <http://midget.cs.dis.titech.ac.jp/staff/uchiymaru.html>

研究テーマ ／対象	磁気ディスク用の信号処理及び記録符号の研究
機関名	東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻
研究分野	複雑システム解析／感覚行動制御分野 専門分野：信号処理、符号理論、システム最適化、パターン認識
研究概要	磁気ディスク用の信号処理及び記録符号の研究を行っている。磁気ディスクの記録密度は年率1.6倍で上昇を続け、最近では2Gb/in*inに近づこうとしている。これに伴い、記録された符号間の干渉を積極的に利用した、パーシャルレスポンス方式が実用化されつつある。本研究室では、この高密度磁気記録に対応した、適応的波形等化方式、符号化方式、エラー訂正方式などの研究、および、LSI化のための高速・低消費電力な回路方式の研究を行っている。
文献等	
研究者	西谷 卓史

出典： <http://midget.cs.dis.titech.ac.jp/staff/nishiya.html>

研究テーマ ／対象	複雑・大規模・分散化するシステムの高速かつ高精度な制御系の実現を目指して、その解析・設計に関する基礎研究
機関名	東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻
研究分野	複雑システム解析／複雑システム数理解分野 専門分野：システム制御理論、複雑系解析、計算機援用設計
研究概要	本研究室では、複雑・大規模・分散化するシステムの高速かつ高精度な制御系の実現を目指して、その解析・設計に関する基礎研究を行っている。柱となる研究はシステム制御理論であり、制御系の解析・設計を統一的に扱うことができる新しい理論の枠組みの構築や制御理論的アプローチによる複雑系解析を目標としている。ロバスト制御、デジタル制御、学習制御などをテーマとして、世界のトップレベルの研究を行っている。もう一つの柱は、計算機を用いた解析・設計支援環境とその制御系CADへの応用に関するもので、オブジェクト指向の考えに基づいてネットワーク環境をベースとした分散処理型の協調作業支援環境に関する研究や線形／非線形数値最適化による設計法の開発を行っている。 ■ 最近の研究題目 1. 変動モデリングとロバスト制御系設計の融合 2. スケールドH^∞制御問題の大域的最適化 3. オブジェクト指向に基づく分散協調作業支援環境
文献等	最近の公表論文・著書： 1. Hankel Norm of Sampled-Data Systems; IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.40, No.11, pp.1939-1942, 1995. 2. パラメータ変動のモデリングと設計を同時に行うロバスト制御系設計法, 計測自動制御学会論文集, Vol.32, No.1, pp.35-44, 1996. 3. ϵ-Feasibility for H^∞ Control Problem with Constant Diagonal Scaling; Tras. of the SICE, Vol.33, No.3, pp.155-162, 1997.
研究者	原 辰次

出典： <http://midget.cs.dis.titech.ac.jp/staff/hara.html>

研究テーマ ／対象	地球を含めた宇宙における物理現象を力学的に解析し、自然界の法則にあった宇宙開発システムを研究
機関名	東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻
研究分野	複雑システム解析／複雑システム数理解分野 専門分野：知能ロボット、宇宙工学、制御工学、地理情報処理、画像理解、分布定数システム。
研究概要	研究テーマは「自然て何?」「人間て何?」であり、キーワードは「制御・宇宙・ロボット・人間機械協調」である。地球を含めた宇宙における物理現象を力学的に解析し、自然界の法則にあった宇宙開発システムを研究している。人間は練習を重ねることによって「わざ」と言われるような超人間的な運動を実現する。このスキル獲得システムを解析し、ロボットに実現させるための手法について、また、家庭などの実環境にロボットが入って来る場合を想定し、人間との協調についての研究を行っている。 最近の研究題目： 1. 人間の手先技量の理解とロボットによるタスクの実現 2. 宇宙におけるダイナミクス解析と宇宙ロボット・宇宙構造物のモデリングと制御 3. 地理情報と画像情報を融合した空間認知と自律移動ロボットのナビゲーション
文献等	論文・著書： 1. Modeling and Quasi-Static Hybrid Position/Force Control of Constrained Planar Two-Link Flexible Manipulators; IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.10, No. 3, pp. 287-297, 1994. 2. Vibration Absorption Control of Force-Controlled Manipulators on the Basis of a Spring Model; IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 41, No. 5, pp.501-507, 1995. 3. Modeling and Control of a Flexible Solar Array Paddle as a Clamped-Free-Free-Free Rectangular Plate; Automatica, Vol. 32, No. 1, pp.49-58, 1996. 4. 知能ロボットのめざすもの、計測と制御, Vol.34, No.4, pp.305-322, 1996.
研究者	松野 文俊

出典： <http://midget.cs.dis.titech.ac.jp/staff/matsuno.html>

研究テーマ ／対象	非線形物理学、量子カオスの研究
機関名	東京工業大学理学部応用物理学科
研究分野	物理学
研究概要	非線形物理学、とくに量子カオスの研究を進めている。
文献等	訳書：「量子カオス」（著者：M.C.グッツヴィラー） 原論文掲載誌：SCIENTIFIC AMERICAN January1992日経サイエンス1992年3月号
研究者	足立 聡

出典： <http://www.titech.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	大気海洋結合モデルによる気候変動の研究、ブロッキングや異常気象のメカニズム研究
機関名	東京大学気候システム研究センター
研究分野	地球物理数学、気象学（気象、気候、気候モデル）
研究概要	現在の研究課題：大気海洋結合モデルによる気候変動の研究、ブロッキングや異常気象のメカニズム研究 研究内容キーワード：気象、気候、気候モデル
文献等	共著書：「応用カオス-カオスそして複雑系に挑む」（4編5章、サイエンス社） 著書・学術論文： Kimoto,M.,and M.Ghil,1993:Multiple flow regimes in the Northern Hemisphere winter.Parts I & II,J.Atmos.Sci.,50,2625-2643,and 2645-2673. Kimoto,M.,H.Mukougawa,and S.Yoden,1992:Medium-range forecast skill variation and blocking transition:A case study.Mon.Weather Rev.,120,1616-1627. Kimoto,M.,I.Yoshikawa,and M.Ishii,1997:An ocean data assimilation system for climate monitoring.J.Meteor.Soc.Japan,75,471-487. Itoh,H.,and M.Kimoto,1996:Multiple attractors and chaotic itinerancy in a quasi-geostrophic model with realistic topography:Implications for weather regimes and low-frequency variability.J.Atmos.Sci. Zhang,R.-H.,M.Kimoto,and A.sumi,1996:Impact of El Nino on the East Asian Monsoon:A diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events.J.Meteor.Soc.Japan,74,49-62.
研究者	木本 昌秀

出典： <http://www.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>

研究テーマ ／対象	医用生体材料の組織適合性に関する研究、複雑系のシステム分析法の開発、マイクロ・ナノマシンの動作機序に関する研究
機関名	東京大学先端科学技術研究センター、人工生体機構分野
研究分野	研究分野：複合領域／医用生体工学・生体材料学／医用生体工学・生体材料学／医用生体工学（マイクロマシン）、医学／医学一般／医療社会学、理学／物理学／物性一般（含基礎論）
研究概要	現在の研究課題：医用生体材料の組織適合性に関する研究、複雑系のシステム分析法の開発、マイクロ・ナノマシンの動作機序に関する研究 研究内容キーワード：確率共鳴、熱ゆらぎ・ノイズ、散逸構造、量子論的方法、分子疲労
文献等	著書・学術論文： Jr of Micromachine 微小機構の物理学、マクロマシン連合。 熱ゆらぎと微小機械、パリテイ、丸善、1996、11月号。 レーザーピンセットとレーザーシザーズのマイクロ世界への応用、日本レーザー医学会誌 Vol16. 4号、23-32、1995。 藤正巖・松浦弘幸 ナノテクノロジーにおける加工技術、BME, Vol9.
研究者	松浦 弘幸

出典： <http://www.u-tokyo.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	生体信号の時系列解析、ゆらぎと"ホメオスタシス"、生体ゆらぎの機能的意義
機関名	東京大学大学院教育学研究科総合教育科学専攻
研究分野	研究分野：複合領域／体育学 複合領域／神経科学（含脳科学）／神経・筋肉生理学／医用生体工学・生体材料学
研究概要	現在の研究課題："生体信号の時系列解析、ゆらぎと"ホメオスタシス"、生体ゆらぎの機能的意義" 研究内容キーワード：神経系、非線形、生体システム、複雑系 運動生理学、トレーニング論（平成10年度からは「理論生理学入門」として開講予定）、トレーニング科学（平成10年度からは「身体システム論」として開講予定）
文献等	著書・学術論文 Yamamoto, Y., and R.L. Hughson. Extracting fractal components from time series. Physica 68D. Yamamoto, Y., et al. Operation Everest II: an indication of deterministic chaos in human heart rate variability at simulated extreme altitude. Biological Cybernetics 69: 205-212, 1993. Yamamoto, Y., and R.L. Hughson. On the fractal nature of heart rate variability in humans. Yamamoto, Y., et al. On the fractal nature of heart rate variability in humans. Yamamoto, Y., et al. On the fractal nature of heart rate variability in humans.
研究者	山本 義春

出典： <http://www.u-tokyo.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	沸騰、非線型カオス、蒸気爆発、表面張力熱流動、レーザ加熱治療法
機関名	東京大学大学院工学系研究科
研究分野	研究分野：工学（機械工学／熱工学） 工学（機械工学／流体工学）、熱工学（伝熱工学）、伝熱物理学
研究概要	現在の研究課題：沸騰熱伝達の研究、非線型熱流体現象の研究、レーザ加熱治療法の開発のための基礎研究 研究内容キーワード：沸騰、非線型カオス、蒸気爆発、表面張力熱流動、レーザ加熱治療法
文献等	著書・学術論文： 「伝熱工学」、東京大学出版会、1993年。 Nonlinear Dynamics in Boiling Phenomena、日本伝熱学会誌、35巻136号、1996年。 「表面張力に関連した熱・流体問題」、機械の研究（養賢堂）、26巻6号-27巻1号、1974年-1975年。 「熱伝導の逆問題」、日本機械学会論文集、44巻、381号、1977年。 "Pressure Generation by Laser Pulse Heating of Liquid metal in Water", Proc. International Seminar on Vapor Explosions and Explosive Eruption, Sendai, May, 1997.
研究者	庄司 正弘

出典： <http://www.u-tokyo.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	カオス的時系列データの解析、精度保証付き数値計算法の開発、レーザー熱レンズ振動現象の工学的応用
機関名	東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻
研究分野	研究分野：工学／応用物理学・工学基礎／工学基礎／システム量子工学実験
研究概要	現在の研究課題：カオス的時系列データの解析、精度保証付き数値計算法の開発、レーザー熱レンズ振動現象の工学的応用 研究内容キーワード：カオス、非線形現象、時系列データ解析、予測、精度保証
文献等	著書・学術論文： 1. "Experimental Investigation of New Concentration Measurements using Nonlinear Dynamics Through Laser-induced Thermal Lens Oscillation", Applied Optics, 35-18, 1996. 2. "Characteristics of Nonlinear Dynamics Dependent on TBP Concentration Change in Extraction Process for Nuclear Fuel Reprocessing", Nuclear Technology, 1997.
研究者	等々力 賢

出典： <http://www.u-tokyo.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	カオスを中心とした非線形現象の統計力学的研究
機関名	東京大学大学院工学系研究科・工学部計数工学専攻
研究分野	研究分野：工学／応用物理学・工学基礎／工学基礎 情報理論、数理工学演習、非線形力学
研究概要	現在の研究課題：カオスを中心とした非線形現象の統計力学的研究 研究内容キーワード：非線形力学、フラクタル、確率共振
文献等	著書・学術論文： "Local Structures of Chaotic Attractors and q-Phase Transitions at Attractor-Merging Crises in the Sine-Circle Maps", Progress of Theoretical Physics, 80, 1998. "Singular Local Structures of Chaotic Attractors Due to Collisions with Unstable Periodic Orbits in Two-Dimensional Maps", Progress of Theoretical Physics, 80, 1998. "Long-Time Correlations and Anomalous Scaling Laws of Widespread Chaos in the Standard Map", in From Phase Transitions to Chaos, World Scientific, 1992. "On the Linear Slopes in the Expansion-Rate Spectra of Chaos", Progress of Theoretical Physics, 91, 1994. "Statistical distribution and stochastic resonance in a periodically driven chemical system", Journal of Chemical Physics, 103, 1995.
研究者	堀田 武彦

出典： <http://www.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>

研究テーマ ／対象	流動層・三相反応器の非線形流動挙動のカオス解析とスケールアップ手法の開発
機関名	東京大学大学院工学系研究科科学システム工学専攻
研究分野	エネルギー基礎論、熱・エネルギー工学、エネルギー開発工学、熱・エネルギー工学 研究分野：複合領域／エネルギー学／エネルギー学一般・原子力学非線形流動工学、多相系反応工学
研究概要	現在の研究課題：熱・科学エネルギー変換による水素製造プロセスの開発、三次元電極を用いた可逆水電解・燃料電池システムの開発、流動層・三相反応器の非線形流動挙動のカオス解析とスケールアップ手法の開発 研究内容キーワード：エネルギー・環境問題、クリーンエネルギー、水素エネルギー、カオス・フラクタル、流動層
文献等	著書・学術論文： Sakurai, M., E. Bilgen, A. Tsutsumi and K. Yoshida, Solar UT-3 Thermochemical Cycle for Hydrogen Production, Solar Energy, 57(1), 51-58 (1996). KiKuchi, R., A. Tsutsumi and K. Yoshida, Fractal Aspects of Hydrodynamics in a Three-Phase Fluidized Beds, Chem. Eng. Sci., 51(11), 2865-2870 (1996). Luewisuthichat, W., A. Tsutsumi and K. Yoshida, Deterministic Chaos Analysis of Particle Dynamics in Three-Phase Systems, J. Chem. Eng. Jpn., 29(4), 675-682 (1996). Tsutsumi, A., W. Ju and K. Yoshida, Reduction of NO in Diesel Exhaust by Soot Using a Centrifugal Fluidized Bed, AIChE Symp. Ser., 92(313), 86-90 (1996). Mitsuno, Y., A. Tsutsumi and K. Yoshida, Improvement in Electrode Performance of Three-Phase Fluidized-Bed Electrodes for an Alkaline Fuel Cell Cathode, Int. J. Hydrogen Energy, 22(6), 615-620 (1997).
研究者	堤 敦司

出典： <http://www.u-tokyo.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	自動車のエンジン・車体・走行の総合制御、ロバスト制御、複雑系のモデリングと制御
機関名	東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻
研究分野	研究分野：制御系設計論、モデリング、システム理論 回路学基礎、制御論、モデル論、多変数制御理論、信号処理特論
研究概要	現在の研究課題：自動車のエンジン・車体・走行の総合制御、ロバスト制御、複雑系のモデリングと制御 研究内容キーワード：制御系設計、ロバスト性、モデル、複雑系、シミュレーション
文献等	著書・学術論文： H.Kimura,"Chain-Scattering approach to H^∞ Control", Birkheuser, 1996. H.Kimura,"Chain-Scattering representation, J-lossless factorization and H^∞ Control", Journal of Mathematical Systems, Estimation & Control, Vol.5, pp.203-255, 1995. H.Kimura,"From output feedback pole-assignment to robust stabilization", European Journal of Control, Vol.2, No.3, pp.160-165, 1996. P.H.Lee and H.Kimura, "On J-lossless embedding thesrem in H^∞ ", Systems & Control Letters, Vol.29, pp.1-7, 1996. 山本、牛田、木村、"調整可能なパラメーターをもつ H^∞ 制御による二次安定化", システム・情報・制御, 10巻, 1号, pp.11-17, 1997.
研究者	木村 英紀

出典： <http://www.u-tokyo.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	カオスの基礎理論及びその応用、動的細胞集成分仮説を用いた脳のモデリング、カオス工学
機関名	東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻
研究分野	数理・計数工学・ 生体情報論、カオス工学、脳神経システム論
研究概要	専門は数理工学で、現在特にカオス工学と脳のモデリングの研究に精力的に取り組んでいる。 研究分野：工学：応用物理学・工学基礎／工学基礎／電気電子工学／システム工学 複合領域：情報科学／知能情報学 研究内容キーワード：カオス、脳・神経系、非線形、ニューロコンピューティング、モデリング
文献等	論文：非線形現象の解析手法[VI・完]／電子情報通信学会誌、Vol.79, No.8, '96/8. 論文：非線形現象の不思議：カオス・複雑系・工学／電子情報通信学会誌, Vol.80, No.11, Nov.1997. 著書：「カオス・複雑系と光学」、「応用カオス-カオスそして複雑系に挑む」 著書・学術論文： 1. 「カオスの数理と技術 - カオス, そしてフラクタル, 複雑系への序章 -」放送大学教育振興会, 1997. 2. 「A Special Issue on Chaos Engineering」J. Intelligent & Fuzzy Systems, 5,1, 1997. 3. 「カオス - 全く新しい創造の波 -」講談社, 1993. 4. 「カオス - カオス理論の基礎と応用 -」サイエンス社, 1990. 5. 「ニューラルコンピュータ - 脳と神経に学ぶ -」東京電機大学出版局, 1988.
研究者	合原 一幸

出典： <http://www.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>

研究テーマ ／対象	個体数のダイナミクス、カオス、資源利用講堂、ニッチ、保全生物学
機関名	東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻
研究分野	研究分野：理学／生物学／生態理学部、生物学 生態環境論、生態進化学、野外生物学、自然体系論、生態システム論
研究概要	現在の研究課題：生物の個体数変動、昆虫の繁殖行動の進化、マメ科－マメゾウムシ－寄生蜂群集構造の共進化 研究内容キーワード：個体数のダイナミクス、カオス、資源利用講堂、ニッチ、保全生物学
文献等	著書・学術論文： Niche modification and stability of competitive systems. II. Persistence of interspecific competitive systems with parasitoid wasps. 固体群生態学会・Res. Popul. Ecol. 27, 1985年. 「動物生態学」蒼樹書房, 1992年. Sex allocation of parasitic wasps: local mate competition, dispersal before mating and host quality variation. 欧州進化生物学会・J. Evol. Biol. 6, 1993年. Trade-off in allocation of metabolic reserves: effects on diapause on egg production and adult longevity in a multivoltine bruchid, <i>Kytorhinus sharpianus</i> . 英国生態学会・Func. Ecol. 9, 1995年. Delayed density dependence and oscillatory population dynamics in overlapping-generation systems of a seed beetle <i>Callosobruchus chinensis</i> . Springer-Verlag・Oecologia 105, 1996年.
研究者	嶋田 正和

出典： <http://www.u-tokyo.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	電磁気学・振動波動論、複雑系統計学（量子群に基づくWigner-Racah代表の拡張とその応用、多体問題）
機関名	東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻
研究分野	研究分野：理学／物理学／素粒子・核・宇宙線 熱力学・電磁気学・振動波動論、複雑系統計学
研究概要	現在の研究課題：量子群に基づくWigner-Racah代表の拡張とその応用、多体問題 研究内容キーワード：量子群・ヤング図表・可解模型・ラカー代数・回転群
文献等	著書・学術論文 1. M. Nomura, "A soluble nonlinear Bose field as dynamical manifestation of symmetric group characters and Young diagrams", Phys. Lett. 117A, 289-292 (1986). 2. M. Nomura, "A reduction relation for the trace over a finite set of many-fermion states with a definite symmetry $U(N)$ ", Phys. Lett. 126A, 1-4 (1987). 3. M. Nomura, "Relations among n -j symbols in forms of the star-triangle relation", J. Phys. Soc. Japan 57, 3653-3656 (1988). 4. M. Nomura, "Yang-Baxter relations in terms of n -j symbols of $suq(2)$ algebra", J. Phys. Soc. Japan 58, 2694-2704 (1989). 5. M. Nomura, "Relations for CG and Racah coefficients in $suq(2)$ and Yang-Baxter equations", J. Math. Phys. 30, 2397-2405 (1989).
研究者	野村 正雄

出典： <http://www.u-tokyo.ac.jp/>

研究テーマ 対象	力学、電磁気学、熱統計物理学、物理数学、複雑系解析学（量子群の結晶基底、ベータ仮説と表現論、可解格子模型）
機関名	東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻
研究分野	研究分野：力学、電磁気学、熱統計物理学、物理数学、複雑系解析学
研究概要	現在の研究課題：量子群の結晶基底、ベータ仮説と表現論、可解格子模型 研究内容キーワード：ヤン、バクスター方程式、ベータ仮説、可解格子模型、量子群、アクインリー環
文献等	著書・学術論文 "Pfaffian and determinant solutions to a discretized Toda equation for Br,Cr and Dr", A.Kuniba,S.Nakamura and R.Hirota,Journal of Physics A.29 1759-1766(1996). "Analytic Bethe Ansatz for Fundamental Representations of Yangians", A.Kuniba and J.Suzuki, Communications in Mathematical Physics 173 225-264(1995). "Functional Relations in Solvable Lattice Models:I.Functional Relations and Representation Theory", A.Kunimi,T.Nakanishi and J.Suzuki,International Journal of Modern Physics A.95215-5266(1994). "Thermodynamics of the U9(Xr)Bethe ansatz system with g a root of unity", A.Kuniba,Nuclear Physics B389 209-244(1993). "Exact Solution of Solid-Solid Models for Twisted Affine Lie Algebras $A_{2n}^{(1)}$ and $A_{2n}^{(1)}$ ", A.Kuniba,Nuclear Physics B355 801-821(1991).
研究者	国場 敦夫

出典： <http://www.u-tokyo.ac.jp/>

研究テーマ 対象	複雑系の数理、非線形動力学、理論生物学
機関名	東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻
研究分野	広域科学専攻・広域システム科学系 研究分野：複雑系の数理、非線形動力学、理論生物学、熱力学、非線形システム、自己複製の理論
研究概要	専門は非線形動力学で、特に生物進化の数理モデル、進化ゲーム理論に興味を持っている。 現在の研究課題：相手のモデルをつくるゲームのダイナミックスの研究、チューリングマシンの集団とその相互作用のモデルによる、進化と自己複製の研究、言語認知的側面の数理的研究 研究内容キーワード：進化、自己複製、カオス、ゲーム力学系、人工生命
文献等	訳書：「カオスの縁と生物の進化」（S.A.カウフマン著、原論文掲載誌：SCIENTIFIC AMERICAN August 1991日経サイエンス1991年10月号「ダーウィンを超える「カオス進化論」」を改題） 著書・学術論文： 1.T.Ikegami and T.Hashimoto,"Coevolution of Machines and Taps",Artificial Life 2 (1995)305-318. 2.T.Ikegami,"From Genetic Evolution to Emergence of Game Strategies",Physica D75(1994)310-327. 3.池上高志、「進化と創造的エラー」科学（Kagaku）64(1994)pp.153-161. 4.K.Kaneko and T.Ikegami,"Homeochaos:Dynamical stability of Symbiotic Network with Population Dynamical and Evolving Mutation Rates",Physica D 56(1992)406-429. 5.カオス・進化・ゲーム in 「人工生命」（共立出版）3章(1994年)。
研究者	池上 高志

出典： <http://www.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>

参照No. 065

研究テーマ ／対象	ランダムマトリックス、金属非金属転移、相転移、量子カオス
機関名	東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻
研究分野	広域科学専攻・相関基礎科学 振動波動、量子統計力学、複雑系統計学 研究分野：物理学、物性一般
研究概要	現在の研究課題：ランダム行列理論、メンスコビックゆらぎ、高温超伝導ゆらぎ 研究内容キーワード：ランダムマトリックス、金属非金属転移、相転移、量子カオス
文献等	
研究者	氷上 忍

出典： <http://www.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>

参照No. 066

研究テーマ ／対象	量子カオス、少数多体系、ゆらぎ
機関名	東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻
研究分野	広域科学専攻・相関基礎科学系 研究分野：理学／化学／物理化学(理論化学物理学) 構造化学、反応動力学Ⅰ、高次構造解析学Ⅰ
研究概要	現在の研究課題：化学反応ダイナミクス、量子カオス 研究内容キーワード：量子カオス、少数多体系、ゆらぎ
文献等	著書・学術論文 1."Derivative-State Analysis of a sequential Intramolecular Vibrational energy Re-distribution", Bulletin of the chemical society of Japan 69,11,1996. 2."Divergences of the Semiclassical S-matrix Formula in Irregular Scattering", Reports on Mathematical physics 38,3,1996.
研究者	染田 清彦

出典： <http://www.u-tokyo.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	量子カオス、非エルミートランダム行列、弦の理論、トンネル効果、高分子
機関名	東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻
研究分野	広域科学専攻・関連基礎科学系 研究分野：理学／物理学／素粒子・核・宇宙線／量子力学、数理科学
研究概要	現在の研究課題：場の理論のグラフ理論への応用、ランダム行列理論、半古典量子化 研究内容キーワード：量子カオス、非エルミートランダム行列、弦の理論、トンネル効果、高分子
文献等	著書・学術論文： A connection between lattice and surgery constructions of three-dimensional topological field theory "Feynman rules for string field theories with discrete target space", Physics Letters B357(1995)62. "Renormalization group flow in one- and two-matrix models", Nuclear Physics B434(1995)283. "Topology change in ISO(2,1) Chern-Simons Gravity", Nuclear Physics B377(1992)218. "Topology changes in (2+1)-dimensional quantum gravity", Physical Reviews D44(1991)1763.
研究者	樋口 三郎

出典： <http://www.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>

研究テーマ ／対象	相互作用-内部ダイナミクス系による生物学、大自由度カオス、認知過程のダイナミクス
機関名	東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻
研究分野	広域科学専攻・関連基礎科学系（複雑系解析学） （自然現象とモデル、数理物理学Ⅲ、物理科学、基礎科セミナー、複雑系解析学） 研究分野：非平衡統計物理、非線形物理、理論生物学
研究概要	専門は物理学で、カオス、大自由度カオス、生物ネットワークの進化などを研究している。 現在の研究課題：相互作用-内部ダイナミクス系による生物学、大自由度カオス、認知過程のダイナミクス 研究内容キーワード：カオス、Coupled Map Lattice、多様性、複雑系、カオスの遍歴
文献等	論文：「多様性を生み出すカオス」（日経サイエンス、1994年5月号） 共著書：「複雑系のカオスのシナリオ」（1996年、朝倉書店） 著書・学術論文： ①複雑系のカオスのシナリオ(朝倉,1996)津田一郎と共著. ②Theory and Applications of coupled Map Lattices, wiley,1993, K.Kaneko. ③Collapse of Tori and Genesis of Chaos in Dissipative Systems, World Sci.Pub 1986, K.Kaneko. ④Clustering,Coding,Switching,Hierarchical Ordering, and Control in Network of Chaotic Elements, Physica 41D(1990)137-172, K.kaneko. ⑤ologous Diversification: A Theory of Cell Differentiation, Bull .Math.Biol.59(1997)139-196, K.kaneko and T.Yomo.
研究者	金子 邦彦

出典： <http://www.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>

研究テーマ ／対象	分子スケールの非平衡現象に関する理論、非線形動力学記述における記述縮約理論
機関名	東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻
研究分野	広域科学専攻・相関基礎科学系（複雑系解析学） 熱力学、電磁気学、数理セミナー、カオス解析学（複雑系解析学）
研究概要	研究内容キーワード：ゆらぎ、非線形動力学、非平衡熱力学
文献等	著書・学術論文 Collective patterns arising out of spatio-temporal chaos' APS,chaos,1996. きりんのまだら論争と非平衡科学、岩波書店、科学66-10,1996年 Renormalization Group Derivation of phase equations',Elsevier,physicaD,1997.
研究者	佐々 真一

出典： <http://www.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>

研究テーマ ／対象	物質科学基礎、物理学、物性物理学、複雑系動力学（中間エネルギー核反応機構、原子核のスピン・アイソスピン・モードの生成および構造）
機関名	東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻
研究分野	物質科学基礎、物理学、物性物理学、複雑系動力学 研究分野：理学／物理学／素粒子・核・宇宙線
研究概要	現在の研究課題： 中間エネルギー核反応機構、原子核のスピン・アイソスピン・モードの生成および構造 研究内容キーワード： 核反応機構、準弾性散乱、スピン・アイソスピン・モード、応答関数、パイオン・モード
文献等	著書・学術論文 1.On the Quasispin Formalism, Prog.in Nucl.Phys.,vol.10,(1968,Pergamon Press,Oxford)p.307. 2.Magnetic Moments and GT-Type β -Decay Matrix Elements in Nuclei with an LS Doubly Closed Shell Plus or Minus One Nucleon,Nucl.Phys.,A226(1974)282-318. 3.Extraction of Nuclear Spin Response Functions From Spin Observables of Nucleon Quasifree Scatterings,Phys.Rev.,C45(1992),1822. 4.Spin-Isospin Response Functions and the Effects of the Δ -Hole Configurations,Phys.Rev.,C51(1995), 269. 5.岩波講座 現代の物理学 第9巻 「原子核の論理」（岩波書店、1993、第2次刊行,1997）.
研究者	市村 宗武

出典： <http://www.u-tokyo.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	集積回路、センサー、情報処理、量子エレクトロニクス、カオス
機関名	東京大学大規模集積システム設計教育研究センター
研究分野	電気電子数学、電気電子情報、集積回路工学 研究分野：工学／電気電子工学／電子デバイス・機器工学 複合領域／医用生体工学・生体材料学／医用生体工学・生体材料学
研究概要	現在の研究課題：マイクロヒューマンセンサー、シリコンデバイス、単電子回路 研究内容キーワード：集積回路、センサー、情報処理、量子エレクトロニクス、カオス
文献等	著書・学術論文 "Proposal of standard characterization method for dynamic circuit performance", 1993 IEEE ICMTS, vol.6, 1993. "Low power 1/2 frequency dividers using 0.1-um CMOS circuits built with ultrathin SIMOX substrates", IEEE J. of SSC, 28, 4, 1993. "A non-pinch-off gradual channel model for deep-submicron MOSFETs", IEEE Trans. ED, 40, 10, 1993. "Simultaneous determination of threshold voltage, mobility, and parasitic resistance for short-channel MOSFETs", 1996 IEEE ICMTS, vol. 9, 1996. "High speed simulation of SET-CMOS mixed circuits", Silicon Nanoelectronics Workshop 1997, 1997.
研究者	藤島 実

出典： <http://www.u-tokyo.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	カオスニューラルネットワークの設計製作、カオス信号処理及びその測定系のハードウェア化、カオスを用いたスペクトラム拡散通信など
機関名	東京電機大学工学部電子工学科
研究分野	
研究概要	カオスニューラルネットワークの設計製作：カオスには、実数全体を使った計算や信号処理の可能性が指摘され、これを実現出来るアナログ回路技術が注目されている。本研究では、カオスニューラルネットワークを電子回路で製作し、従来のノイマン型の計算機では、不得意とされている処理を行える新世代のアナログコンピュータの可能性を探る。 カオス信号処理及びその測定系のハードウェア化：カオスハードウェアによるデータをどのように扱うか、カオス工学を元にしたカオス信号の解析法と新しい情報理論を取り入れた解析を行い検討する。この結果をもとに、新しいカオス信号計測のアーキテクチャを開発する。カオス理論の勉強の後、ソフトウェアによるカオス信号の解析、カオス電子回路の測定及びこれらを実現するシステムのハードウェアモデルの検討と設計を行う。 カオスを用いたスペクトラム拡散通信：本研究においては、現在までに提案されているスペクトラム拡散通信にカオスを導入し、新しい通信方式の可能性を探る。ここでは、カオスを用いた通信系としての能力の高さを評価、検討する。 パルス情報を重視したニューラルネットワークのVLSI化：従来から広く研究されているニューラルネットワークは、神経細胞から発するパルスを受け送りして、その総和によって情報処理が行われていたが、伝達するパルスのタイミングに本来の生体情報が含まれているのではないかと、というのが最近の研究の焦点になっている。これをアナログ回路において実現する。 高速階層型FIRフィルタのスイッチトカレント回路によるVLSI化：階層型FIRフィルタを最新のアナログ技術を用いて構成することを目的とする。従来の電子回路の信号は電圧であるが、伝送信号媒体を電圧から電流に変換した電流モードにおける回路技術が盛んに研究されている。その技術の1つであり、サンプル系の動作を行うスイッチトカレント回路の応用をし、ビデオ領域に用いる高速階層型FIRフィルタを実現する。
文献等	特集：複雑系とコンピュータ-カオスニューロコンピュータ／Computer Today誌、1997、9、No.81
研究者	堀尾 喜彦

出典： <http://www.d.dendai.ac.jp/lsi/nonframetoplink-j.html>

研究テーマ ／対象	力学系、複雑系理論
機関名	東京電機大学理工学部数理学科
研究分野	力学系理論：力学系、複雑系理論
研究概要	力学系のカオスの性質について研究。2次元ヘノン写像の高次元への拡張として、三波、桐木、中島が提唱する3次元ヘノン写像の数値実験など。
文献等	論文：Shin Kiriki: Hyperbolicity of the special 1-parameter family with a first homoclinic tangency 論文：Shin Kiriki: The Palis and Takens' problem on the first homoclinic tangency inside the Horseshoe 論文：Shin Kiriki and Masaki Nakajima: 3-dimensional diffeomorphism of Henon type: Its hyperbolicity and first tangency
研究者	桐木 紳

出典： <http://www.r.dendai.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	カオス時系列解析、カオスニューラルネットを用いた連想記憶、最適化問題の解法と画像処理への応用に関する研究
機関名	東京理科大学基礎工学部電子応用工学科
研究分野	電子応用工学
研究概要	カオス時系列解析、カオスニューラルネットを用いた連想記憶、最適化問題の解法と画像処理への応用に関する研究に従事。
文献等	論文：非線形現象の解析手法[VI・完]／電子情報通信学会誌、Vol.79, No.8, 8/96.
研究者	池口 徹

出典： <http://www.te.noda.sut.ac.jp/indexj.html>

参照No. 075

研究テーマ ／対象	多目標計画、経済性工学などの研究
機関名	東京理科大学工学部経営工学科
研究分野	経済性工学
研究概要	多目標計画、経済性工学などの研究に従事。 経済性工学(Economic Engineering) ファジィ数理計画法(Fuzzy Mathematical Programming) 多目標計画法(Multiple Goal Programming) DEA (Data Envelopment Analysis;データ包絡分析) ALM (Asset Liability Management;資産負債管理)
文献等	論文：係数間の関係を考慮したファジィ多目標分数計画法／日本ファジィ学会誌、Vol.8, No.2, 1996/4. 論文：目的関数の係数と決定変数の関係を考慮したファジィ多目的計画法／日本ファジィ学会誌、Vol.9, No.2, Apr. 1997.
研究者	山口 俊和

出典： <http://www.ms.kagu.sut.ac.jp/indexj.html>

参照No. 076

研究テーマ ／対象	インターネットパラダイム、記号処理計算機などの研究
機関名	NTT光ネットワークシステム研究所
研究分野	情報工学
研究概要	データ通信用プロトコルの開発 (Development of New Data Communication Protocols) 知能的ネットワークアーキテクチャの研究 (Design of Smart Networks) データ通信アルゴリズム (Data Communication Algorithm)
文献等	論文：ギガビットネットワークの壁, 情報処理, Vol.36, 1995. 著書：「インターネット」 (岩波書店1994) . 訳書「はやわかり TCP/IP」 (共立出版1991) , 「インターネット縦横無尽」 (共立出版1994)
研究者	村上 健一郎

出典： <http://www.ntt.co.jp/>

研究テーマ ／対象	量子力学からソリトン・カオス・フラクタルを含む非線形科学、シミュレーション科学等の20世紀に発展した物理学
機関名	横浜国立大学工学部知能物理工学科
研究分野	光エレクトロニクス、電子デバイス、超伝導、新エネルギー、新素材、コンピュータ物理、情報、数理科学、素粒子・宇宙線、カオス・ソリトン・フラクタル
研究概要	専門基礎科目は、量子力学からソリトン・カオス・フラクタルを含む非線形科学、シミュレーション科学等の20世紀に発展した物理学を講義の中心に据えます。 専門科目は、物理学的手法が現在の先端技術で生かされている例を示しながら、物理学の技術への応用について講義を行います。 例えば、「量子力学と電子デバイス」「応用電磁気学とエネルギー変換」「量子力学と現代化学」「非線形科学と先端技術」などの講義を用意します。 ●物理システム工学（応用電磁気物性／非線形科学／金属物性工学／量子統計物理／基礎物理システム工学） 自然界や実験室で観測される様々な運動と現象に触れ、それを支配する非平衡・非線形・高速度・高エネルギー等の諸効果がもたらす個別の働きと全体としての調和を理解し、それを科学と工学に応用する教育・研究を行う。 ●量子機能工学（分子機能工学／表面物性工学／量子材料科学／低温物性工学／量子物性物理／基礎物性工学） 固体の物性は原子・分子の構造や、それらの配列の仕方によって決まることをミクロな立場から理解し、固体の持つ機能の科学と工学への応用を創出すると同時に、特定の優れた機能を持つ物質の創成について教育・研究する。 ●数理解析工学（数値量子科学／極限量子工学／応用確率論／応用数理工学／計算物理工学） ミクロからマクロまでの複雑な現象の数理解析、およびコンピュータ・シミュレーションによる現象の再現と本質の抽出により、その現象がもたらす新しい機能と働きを科学と工学へ応用する教育・研究を行う。
文献等	
研究者	

出典： <http://cr.physics.ed.ynu.ac.jp/chinou/annai.html>

研究テーマ ／対象	ニューラルネットワーク・ファジィ・遺伝的アルゴリズム・カオス・人工生命
機関名	慶應義塾大学理工学部
研究分野	情報工学
研究概要	キーワード：ニューラルネットワーク・ファジィ・遺伝的アルゴリズム・カオス・人工生命 研究テーマ：カオス（カオス連想記憶モデル／知的情報処理） ニューラルネットワーク（連想記憶モデル（知識情報処理、マルチメディア画像検索）、新しい知識表現（知識情報処理）、時系列ニューラルネットワーク（音楽記憶・作曲）、多勝者ニューラルネットワーク（画像符号化）、高次ニューロンニューラルネットワーク（パターン認識） ファジィ（主観的クラスタリング（ヒューマンインターフェース、感性工学）、ファジィニューロ（社会現象の予測・解明、手書き文字認識）、ファジィネットワーク（社会現象の予測・解明）、ロボット群知能（知識の創発） 遺伝的アルゴリズム（新しい遺伝的アルゴリズム、人間（顔）の検出） 人工知能（手書き文字認識） 人工生命（知識の創発）
文献等	
研究者	萩原 将文

出典： <http://www.soft.elec.keio.ac.jp/>

研究テーマ	複雑系物理モデルによる生命情報システムの研究
機関名	慶應義塾大学理工学部物理科
研究分野	物理学
研究概要	かつて要素還元主義を唱えていた物理学から複雑系の概念が近年になって提唱されたことはよく知られているが、その体系化は未だ具現化されているとはいえない。このような背景のもとに、本研究の第一の目的は、仮想モデルに基づいて発展してきた複雑系の物理学を生命情報の伝播と処理についての現象論的モデルと融合させ、物理的モデルを確立するところにある。 ここでは、複雑系の物理学の基本概念と基本法則ないしは基本原理を模索する。また、ここでの研究成果を生命科学の新たな発展にフィードバックさせ、さらに理工学の分野のみならず、広く社会に貢献することも目的とする。
文献等	
研究者	川村 清

出典： <http://www.phys.keio.ac.jp/Physics-jp.html>

研究テーマ	複雑系、セルオートマトン、時空間パターン、スペクトル解析、パワースペクトル
機関名	富山大学工学部
研究分野	
研究概要	複雑系、セルオートマトン、時空間パターン、スペクトル解析、パワースペクトル 下記の研究テーマの主題は「人間の知的機能を如何にして機械に実現させるか」である。特に画像に関係する認知機能に注目し研究を行っている。 1.文書画像認識・理解の研究、2.カラー文書画像の解析に関する研究、3.文字認識に関する研究、4.パターン認識に関する研究、5.画像処理に関する研究、6.移動物体認識に関する研究
文献等	論文： スペクトル解析による1次元セルオートマトンの分類：電子情報通信学会論文誌、Vol.J80-D-1, No.11, 11/97. カラー文書画像中の文字領域抽出のための領域分割方式：電子情報通信学会パターン認識・メディア理解研究会, PRMU97-217, pp.1-8(1998). 国内における地域ⅠXの技術動向：情報処理学会分散システム運用技術研究会, DSM7-1, pp.1-5(1997) スペクトル解析による1次元セルオートマトンの分類：電子情報通信学会論文誌D, VOL.J80-D-1, No.11, pp.856-865 Character string extraction by multi-stage relaxation Proc.International Conf. on Document Analysis and Recognition'97 Tu-2A5 pp.298-302(1997). 時空間画像の濃度勾配を利用した1画素マッチングによるオプティカルフローの抽出：電子情報通信学会画像工学研究会, IE97-20, pp.13-20(1997). OCR入力文書形態のロバストな判定方法：電子情報通信学会論文誌D, Vol.80-D, No.5, pp.1314-1317(1997). 散逸境界条件下のセルオートマトンについて：情報処理学会論文誌, Vol38, No.4, pp.927-930(1997) 段階的弛緩法による文字列抽出：電子情報通信学会パターン認識・メディア理解研究会, PRMU96-182, pp.17-24(1997).
研究者	長谷 博行

出典： <http://www.toyama-u.ac.jp/eng/>

参照No. 081

研究テーマ ／対象	オートマトン・形式言語理論、アルゴリズム解析、計算の複雑さの理論
機関名	富山大学工学部
研究分野	
研究概要	オートマトン・形式言語理論、アルゴリズム解析、計算の複雑さの理論などの研究に従事。
文献等	論文： 推論パスネットワークによる仮説合成時の矛盾性チェックの改善案／人工知能学会誌, Vol.11, No.5, Sep.1996. 推論パスネットワークによる仮説合成時の包摂処理の改善案／人工知能学会誌, Vol.12, No.4, July, 1997. プロダクションシステムの直接条件照合アルゴリズムの改善案／人工知能学会誌, Vol.12, No.5, Sept. 1997. 各種直積インスタンスレーション表現法の効用比較／人工知能学会誌, Vol.12, No.6, Nov. 1997. スペクトル解析による1次元セルオートマトンの分類／電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-D-I, No.11, 11/97.
研究者	広瀬 貞樹

出典： http://www.ecs.toyama-u.ac.jp/chi_index-j.html

参照No. 082

研究テーマ ／対象	複雑系、セルオートマトン、時空間パターン、スペクトル解析、パワースペクトル
機関名	富山大学工学部
研究分野	
研究概要	複雑系、セルオートマトン、時空間パターン、スペクトル解析、パワースペクトル
文献等	著書：「計算機科学の基礎」（森北出版）。 スペクトル解析による1次元セルオートマトンの分類／電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-D-I, No.11, 11/97.
研究者	米田 政明

出典： <http://www.toyama-u.ac.jp/eng/>

研究テーマ	自然言語処理、機械学習、超並列人工知能などの研究
機関名	北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報処理学専攻
研究分野	
研究概要	・情報の自動編集に関する研究 ・言い替え（パラフレーズ）の研究 ・情報統合によるリポジトリの生成の研究
文献等	・アナロジーによる機械翻訳. 共立出版, 1997. ・ネットニュース記事群の自動パッケージ化. 情報処理学会論文誌, Vol. 86, No. 6, pp1225-1234, 1997. ・ネットニュースグループfj.wantedのダイジェスト自動生成. 自然言語処理, Vol. 3, No. 2, pp19-32, 1996. ・電子ニュースのダイジェスト自動生成. 情報処理学会論文誌, Vol. 36, No. 10, pp2371-2379, 1995. ・新しいAI研究を目指して／人工知能学会誌, Vol.11, No.5, 9/96.
研究者	佐藤 理史

出典: <http://www.jaist.ac.jp/is/index-jp.html>

研究テーマ	ニューラルネットワークをベースにした複雑系の探求
機関名	福井県立大学情報センター
研究分野	
研究概要	「複雑系の科学」研究会を生物資源学部の中村量空先生らと始め、複雑系を対象とした研究に移行する。ニューラルネットワークをベースにした複雑系の探求。
文献等	競合作用により冗長中間層素子を自律淘汰する誤差逆伝搬学習アルゴリズム／電子情報通信学会論文誌, Vol.J79-D-II, No.3, '96/3. 論文リスト(Publication List): 菊沢正裕, 山川修, 田中武之共著, 「情報とコンピュータ」, 森北出版, 1997. O.Yamakawa, T.Mori, E.R.Nakamura, K.Kudo, Y.Tamagawa and H.Suzuki, "A complexity measure of the Internet", in "Complexity and Diversity", Springer-Verlag Tokyo, pp.55-57, 1997. E.R.Nakamura, O.Yamakawa, K.Kudo, H.Matsuda and T.Murata, "Intermittent chaos and multifractal systems", Phys.Rev.E., Vol.53, pp.3330-3332, 1996. H.Matsuda, K.Kudo, E.R.Nakamura, O.Yamakawa and T.Murata, "Mutual Information of Ising Systems", Int.J.Theor.Phys., Vol.35, pp839-845, 1996. 松永豊, 村瀬一之, 山川修, 谷藤学, 「競合作用により冗長中間層素子を自律淘汰する誤差逆伝搬学習アルゴリズム」, 信学論(D-II), Vol.J79-D-II, pp.403-412, 1996. 山川 修, 中村量空, 伊佐公男, 「「複雑系の科学」研究会報告 No.3」, 福井県立大学論集, 第9号, pp.55-112, 1996. A.Ozawa, I.Tanihata, T.Kobayashi, D.Hirata, O.Yamakawa, K.Omata, N.Takahashi, T.Shimoda, K.Sugimoto, D.Olson, W.Christie, and H.Wieman, "INTERACTION CROSS-SECTIONS AND RADII OF ^{11}C AND ^{12}N AND EFFECTIVE DEFORMATION PARAMETERS IN LIGHT MIRROR NUCLEI", Nuclear Physics, A583, pp807-810, 1995. 山川 修, 中村量空, 伊佐公男, 「「複雑系の科学」研究会報告 No.2」, pp.1-80, 1995. 山川 修, 中村量空, 伊佐公男, 「「複雑系(Complex System)の科学」研究会報告」, 福井県立大学論集, 第4号, pp.61-90, 1994.
研究者	山川 修

出典: <http://www.fpu.ac.jp/>

参照No. 085

研究テーマ ／対象	物質と生命の自己組織化の解明
機関名	福井県立大学生物資源学部
研究分野	理論物理学、複雑系科学、科学思想
研究概要	専門は理論物理学、複雑系科学、科学思想。「統計力学的多体重層構造の理論（コンボルーション理論）」を提唱し、物質と生命の自己組織化の解明に取り組む。
文献等	訳書：「複雑系思考」（著者：クラウス・マインツァー（Klausu MAINZER）、1997年、シュプリンガー・フェアラーク東京） 著書：「Complexity and Diversity」（編著、Springer-verlag）、「シュレーディンガーの思索と生涯」（工作舎）、シュレーディンガーの著作の訳書に『精神と物質』（工作舎）、『シュレーディンガーわが世界観〔自伝〕』（共訳、共立出版）など。
研究者	中村 量空

出典： <http://www.fpu.ac.jp/>

参照No. 086

研究テーマ ／対象	基礎制御，制御システム解析，制御システム設計，不規則運動論，機械の世界
機関名	福井大学工学部機械工学科
研究分野	専門分野：制御工学，計測工学，画像認識
研究概要	研究テーマ：1.動画像識別機能を持つロボット・システムの開発、2.防爆型空気圧ロボットの開発研究、3.ニューラルネットワークによるシステム同定と故障診断への応用
文献等	共著書：「応用カオス-カオスそして複雑系に挑む」（2編2章、サイエンス社）
研究者	朝倉 俊行

出典： <http://mech.mech.fukui-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	複雑システム・ソフトコンピューティングに関する研究
機関名	名古屋大学工学部
研究分野	
研究概要	複雑システム・ソフトコンピューティングに関する研究に従事。
文献等	ベトリネットによるファジィ制御系の安定解析／日本ファジィ学会誌、Vol.9, No.1, Feb. 1997. 症状の程度情報を利用したファジィ発想推論による診断問題の解法／日本ファジィ学会誌、Vol.9, No.3, June 1997. オフィスレイアウトの事例活用システムのための事例のインデックス化および事例検索知識の獲得／日本ファジィ学会誌、Vol.9, No.4, Aug. 1997. 複数の意味を持つあいまいパターンによる推論と注意の機構／日本ファジィ学会誌、Vol.9, No.4, Aug. 1997. あいまいなパターンの連想による概念想起／日本ファジィ学会誌、Vol.9, No.4, Aug. 1997.
研究者	古橋 武

出典： <http://nuis.nuie.nagoya-u.ac.jp/eng/index.html>

研究テーマ ／対象	生命現象の非線形ダイナミクスの研究
機関名	名古屋大学大学院人間情報学研究科
研究分野	非線形科学
研究概要	非平衡開放系としての生命現象を、分子レベルから解き明かすことを目指す。 1.DNA分子のダイナミクスと遺伝子発現。2.化学的振動反応による時空間の自己秩序形成。3.動的な非線形応答と感覚受容。4.分子モーター・動的ニューラルネットなどの疑似生命現象。 “非線形・非平衡”—このような観点から私達は生命現象にアプローチしています。生命体はエネルギーや物質に関して非平衡な状態を保ちながら、非線形のダイナミクスを有したシステムです。では非線形とは何でしょうか？「線形」は予測可能な現象を意味するのに対し、「非線形」とは単純には予測できないようなそれを指します。例えば興奮などの閾値をもつ現象やリズムを生じる現象がそれに当たります。自然現象のみならず社会で起こる事象のほとんどは非線形のシステムであると言えます。しかし、このような見方でもって自然を探索する試みはここ二十年来に始まったばかりです。大きく分けて4つあります。数学・物理・化学・生物・計算機科学といったさまざまな方法論を用いてこれらの課題に迫っています。それぞれの研究が目指しているものは以下のようになっています。研究の細部にとらわれずに、大きな視野に立って、謎を解明していきたいと思っています。 DNA分子の動的構造変化…塩基配列(一次元)だけでは情報不足！溶液内でのDNA分子の形態(時空間四次元)こそが生命現象を説明 化学モーター…筋肉はどのように化学エネルギーを力学的エネルギーに変えるのか？ 化学モデルを用いた変換系の構築 時空間の秩序形成…どのように生体はリズムやパターンを形成するのか？モデル系を用いた理論・実験的研究 知覚情報処理モデル…動的な非線形性応答を活用することで生物により近い情報処理システムの確立を目指す
文献等	
研究者	吉川 研一

出典： <http://www.human.nagoya-u.ac.jp/gshi/chair.html>

研究テーマ ／対象	複雑流体（複雑な流路内における繊維懸濁液の流れ）
機関名	滋賀大学
研究分野	非ニュートン流体力学
研究概要	研究テーマ 急絞り流路内における高分子溶液の不安定流動 複雑な流路内における繊維懸濁液の流れ ブラウン運動を用いた希薄高分子溶液の流動解析
文献等	
研究者	千葉 訓司

出典：

研究テーマ	社会的複雑系
機関名	京都大学経済学部
研究分野	リプリータダイナミクス、ゲーミングシミュレーション、ミクロマクロリンク、多主体複雑系、構造安定性、制約充足問題、交換代数、バーチャル経済
研究概要	研究では、情報コミュニケーション革命のもとで生じている産業社会の急速な構造変動を、主体を含む複雑系として捉え、その制度設計や構造変化の論理を理論分析すると同時に、具体的な問題にこれを適用することを目的とする。そのためにこれら主体を含む複雑系の構造変動の論理の背後にある、自律的エージェントからなる多主体複雑系の解析のための方法論と、その数理的基礎についても分析を行う。その上で、進化経済学的なリプリータダイナミクスを利用した構造変動モデルと、制約充足型のマルチエージェントシステムの構造変動モデルを具体的に展開すると同時に、これをバーチャルエコノミーという国民経済のモデルに適用する。また情報ネットワーク下の企業戦略などの産業構造モデルや社会システムに適用し、新しい産業構造や社会システムのための制度設計の論理を明確にする。
文献等	・ 出口弘,「ネットワーク」(日科技連出版 1995年). ・ 「マルチメディア時代の人間と社会」高木,木嶋,出口 共編著(日科技連出版 1996年). ・ 「システム知の探求1ー決定するシステムー」木嶋,出口 共編著(日科技連出版 1997年). ・ 出口弘,「バーチャルコマーで迫る経済の「複雑性」」,経済センサ, No.513, pp.31-38, Oct., 1997, 日本評論社. ・ 出口弘,「意味と情報の社会システム論 試論」,社会経済システム学会誌, 第16号, pp.107-113, 1997. ・ 週刊ダイヤモンド&ダイヤモンド・ハーバード・ビジネス編集部編,「複雑系のマネジメント」,ダイヤモンド社, 1998, 6章「自己組織化とポリエージェントシステム」. ・ 出口弘,「交叉近傍の情報空間」,重点領域研究 課題番号264 創発的機能形成のシステム理論, 研究成果報告書, pp.115-124, 1996. ・ Hiroshi Deguchi, "MULTI AGENT ECONOMICS AND ITS GAMING SIMULATION", in 「Modeling and Control of National and Regional Economies 1995」, edited by Vlacic et al. (ISBN 0-08-042376-0), pp.269-274, Pergamon Press, February 1996. ・ 植田弘和他著,「新しい産業技術と社会システム」,日科技連出版, 高木, 木嶋, 出口監修シリーズ社会科学のフロンティア, 第4巻, 1996年4月(担当: 第5章 バーチャル産業と生産システム). ・ 出口弘,「自律分散型の産業構造と組織」,ハーバード・ビジネス, 5月号, pp.44-53, 1996, ケイ・エント社.
研究者	出口 弘

出典： <http://www.econ.kyoto-u.ac.jp/~deguchi/>

研究テーマ ／対象	複雑系における多様な挙動の解明とそのモデル化をめざして
機関名	京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻
研究分野	情報学（応用解析学／逆問題解析分野）
研究概要	応用解析学講座（非線型解析分野・逆問題解析分野）-- 21世紀の解析を目指して -- 「応用数学」は既存の純粋数学の単なる応用によって物理や工学の問題を解くものでは決してなく、むしろ新しい数学を創造しようとするものです。すなわち我々は現象の記述に様々な数値モデルの数学的理解を利用しますが、応用数学とはそのような数値モデルの研究を通して新しい数学を創造することが目的なのです。本講座ではこのような応用数学の中でも特に解析学的側面に重点をおいた「応用解析学」の研究と教育をその目的とし、これまでの解析学に対する深い理解と21世紀へ向けての新しい解析学の創造を目指しています。具体的には物理や工学の現象を記述する数値モデルに対して、数学解析・数値解析・確率論等の手法を利用した解析を行い、解析手法とモデルの数学構造の双方の理解を目指し、さらにより深い理解を目指して新しい解析手法の確立を図ろうとするものです。本講座では「非線型解析」「逆問題解析」をキーワードに、専任教員が相互に関係を持ちながら研究と教育を行っています。 フラクタル上の解析、フラクタル幾何学 自然界の新しいモデルとしてのフラクタル上で、どのように熱や波が伝わるかという問題の数学的基礎理論に興味をもって研究を行っている。
文献等	
研究者	木上 淳

出典： <http://www.kogaku.kyoto-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	複雑系における多様な挙動の解明とそのモデル化をめざして
機関名	京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻
研究分野	情報学（応用解析学／逆問題解析分野）
研究概要	応用解析学講座（非線型解析分野・逆問題解析分野）-- 21世紀の解析を目指して -- 「応用数学」は既存の純粋数学の単なる応用によって物理や工学の問題を解くものでは決してなく、むしろ新しい数学を創造しようとするものです。すなわち我々は現象の記述に様々な数値モデルの数学的理解を利用しますが、応用数学とはそのような数値モデルの研究を通して新しい数学を創造することが目的なのです。本講座ではこのような応用数学の中でも特に解析学的側面に重点をおいた「応用解析学」の研究と教育をその目的とし、これまでの解析学に対する深い理解と21世紀へ向けての新しい解析学の創造を目指しています。具体的には物理や工学の現象を記述する数値モデルに対して、数学解析・数値解析・確率論等の手法を利用した解析を行い、解析手法とモデルの数学構造の双方の理解を目指し、さらにより深い理解を目指して新しい解析手法の確立を図ろうとするものです。本講座では「非線型解析」「逆問題解析」をキーワードに、専任教員が相互に関係を持ちながら研究と教育を行っています。 逆問題解析、微分方程式の数値解析、偏微分方程式 数理物理に現れる偏微分方程式に対する数学解析、およびそれらの方程式に含まれる未知係数を観測データから決定するタイプの逆問題に対し、数学解析と数値解析の両面から研究を行っている。
文献等	
研究者	久保 雅義

出典： <http://www.kogaku.kyoto-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	複雑系における多様な挙動の解明とそのモデル化をめざして
機関名	京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻
研究分野	情報学（応用解析学／非線型解析分野）
研究概要	応用解析学講座（非線型解析分野・逆問題解析分野）-- 21世紀の解析を目指して -- 「応用数学」は既存の純粋数学の単なる応用によって物理や工学の問題を解くものでは決してなく、むしろ新しい数学を創造しようとするものです。すなわち我々は現象の記述に様々な数値モデルの数学的理解を利用しますが、応用数学とはそのような数値モデルの研究を通して新しい数学を創造することが目的なのです。本講座ではこのような応用数学の中でも特に解析学的側面に重点をおいた「応用解析学」の研究と教育をその目的とし、これまでの解析学に対する深い理解と21世紀へ向けての新しい解析学の創造を目指しています。具体的には物理や工学の現象を記述する数値モデルに対して、数学解析・数値解析・確率論等の手法を利用した解析を行い、解析手法とモデルの数学構造の双方の理解を目指し、さらにより深い理解を目指して新しい解析手法の確立を図ろうとするものです。本講座では「非線型解析」「逆問題解析」をキーワードに、専任教官が相互に関係を持ちながら研究と教育を行っています。 フラクタル上の確率過程の研究、確率モデルの解析 自己相似性を持つ図形の上の解析学を、主に確率論の手法を用いて展開している。さらにより一般に、ランダムな媒質等の上の物理現象を確率モデルとして設定し、確率論の手法を用いてその解析を行う研究を行っている。
文献等	
研究者	熊谷 隆

出典： <http://www.kogaku.kyoto-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	複雑系における多様な挙動の解明とそのモデル化をめざして
機関名	京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻
研究分野	情報学（応用解析学／非線型解析分野）
研究概要	応用解析学（非線型解析分野・逆問題解析分野）-- 21世紀の解析を目指して -- 「応用数学」は既存の純粋数学の単なる応用によって物理や工学の問題を解くものでは決してなく、むしろ新しい数学を創造しようとするものです。すなわち我々は現象の記述に様々な数値モデルの数学的理解を利用しますが、応用数学とはそのような数値モデルの研究を通して新しい数学を創造することが目的なのです。本講座ではこのような応用数学の中でも特に解析学的側面に重点をおいた「応用解析学」の研究と教育をその目的とし、これまでの解析学に対する深い理解と21世紀へ向けての新しい解析学の創造を目指しています。具体的には物理や工学の現象を記述する数値モデルに対して、数学解析・数値解析・確率論等の手法を利用した解析を行い、解析手法とモデルの数学構造の双方の理解を目指し、さらにより深い理解を目指して新しい解析手法の確立を図ろうとするものです。本講座では「非線型解析」「逆問題解析」をキーワードに、専任教官が相互に関係を持ちながら研究と教育を行っています。 非線型偏微分方程式、精度保証数値計算、分岐理論 流体力学に現れるような非線型偏微分方程式の解の構造を数学解析・数値解析の手法を利用して研究している。さらに数学解析では未だに解決できない場合の解の存在などを精度保証数値計算によって研究している。
文献等	
研究者	西田 孝明

出典： <http://www.kogaku.kyoto-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	複雑系における多様な挙動の解明とそのモデル化をめざして
機関名	京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻
研究分野	情報学（応用解析学／非線型解析分野）
研究概要	応用解析学講座（非線型解析分野・逆問題解析分野） --- 21世紀の解析を目指して --- 「応用数学」は既存の純粋数学の単なる応用によって物理や工学の問題を解くものでは決してなく、むしろ新しい数学を創造しようとするものです。すなわち我々は現象の記述に様々な数理モデルの数学的理解を利用しますが、応用数学とはそのような数理モデルの研究を通して新しい数学を創造することが目的なのです。本講座ではこの様な応用数学の中でも特に解析学的側面に重点をおいた「応用解析学」の研究と教育をその目的とし、これまでの解析学に対する深い理解と21世紀へ向けての新しい解析学の創造を目指しています。具体的には物理や工学の現象を記述する数理モデルに対して、数学解析・数値解析・確率論等の手法を利用した解析を行い、解析手法とモデルの数学構造の双方の理解を目指し、さらにより深い理解を目指して新しい解析手法の確立を図ろうとするものです。本講座では「非線型解析」「逆問題解析」をキーワードに、専任教官が相互に関係を持ちながら研究と教育を行っています。 無限次元空間上の確率解析、ディリクレ形式に関連した関数解析 ランダムな現象を記述する際に用いられる標本空間の無限次元的な側面に焦点を当てた研究を、マリアヴァン解析やディリクレ形式の理論を基に行っている。
文献等	
研究者	日野 正訓

出典： <http://www.kogaku.kyoto-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	複雑系における多様な挙動の解明とそのモデル化をめざして
機関名	京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻
研究分野	情報学（複雑系構成論／知能化システム分野）
研究概要	複雑系構成論講座（複雑系基礎論分野・知能化システム分野） 複雑系はその多様で複雑な要素結合によって、そのさまざまな挙動を生み出しています。自己組織化や記憶学習などはその一例ですが、それらを我々にとって有益なものとするには、それを構成するための原理、モデル化や挙動を制御するための仕組みを解明する必要があります。本講座では、並列計算モデルや制御システムの原理を中心として、複雑系挙動の原理の解明とその応用にとり組んでいます。 知能化システム分野 --- システムの制御と知能化 --- 我々は膨大な数のシステムに囲まれて生活しています。水の循環系や気象系などの自然システムから人工衛星、航空機やコンピュータネットワーク、ロボット、生産システム、小規模電気製品に至る人工システムまで、それらがうまく動くには何らかの意味での制御機構が働いていなければなりません。これらはますます高度に、知能的に動作することを求められています。本分野ではデジタル/ロバスト制御、学習/CADシステム、信号処理系、ニューラルネットワークなどにおいて、その高度な制御と知能化、自己組織化の原理と応用の先端の研究を行っています。
文献等	
研究者	平田 健太郎

出典： <http://www.kogaku.kyoto-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	複雑系における多様な挙動の解明とそのモデル化をめざして
機関名	京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻
研究分野	情報学（複雑系構成論／知能化システム分野）
研究概要	複雑系構成論講座（複雑系基礎論分野・知能化システム分野） 複雑系はその多様で複雑な要素結合によって、そのさまざまな挙動を生み出しています。自己組織化や記憶学習などはその一例ですが、それらを我々にとって有益なものとするには、それを構成するための原理、モデル化や挙動を制御するための仕組みを解明する必要があります。本講座では、並列計算モデルや制御システムの原理を中心として、複雑系挙動の原理の解明とその応用に取り組んでいます。 知能化システム分野 --- システムの制御と知能化 --- 我々は膨大な数のシステムに囲まれて生活しています。水の循環系や気象系などの自然システムから人工衛星、航空機やコンピュータネットワーク、ロボット、生産システム、小規模電気製品に至る人工システムまで、それらがうまく動くには何らかの意味での制御機構が働いていなければなりません。これらはますます高度に、知能的に動作することを求められています。本分野ではディジタル/ロバスト制御、学習/CADシステム、信号処理系、ニューラルネットワークなどにおいて、その高度な制御と知能化、自己組織化の原理と応用の先端の研究を行っています。
文献等	
研究者	山本 裕

出典： <http://www.kogaku.kyoto-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	複雑系における多様な挙動の解明とそのモデル化をめざして
機関名	京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻
研究分野	情報学（複雑系構成論／複雑系基礎論分野）
研究概要	複雑系構成論講座（複雑系基礎論分野・知能化システム分野） 複雑系はその多様で複雑な要素結合によって、そのさまざまな挙動を生み出しています。自己組織化や記憶学習などはその一例ですが、それらを我々にとって有益なものとするには、それを構成するための原理、モデル化や挙動を制御するための仕組みを解明する必要があります。本講座では、並列計算モデルや制御システムの原理を中心として、複雑系挙動の原理の解明とその応用に取り組んでいます。 複雑系基礎論分野 --- 複雑系数学と並列計算システムから世界を見る --- 複雑系の数学モデル、計算モデル、解法アルゴリズムについての数理工学研究基盤として、並列的相互作用の複雑さ、それを通じた自己組織化、大局的把握などの解明をめざした基礎研究と、複雑系を再現するための最適な新型並列計算機や高度の認知を体した自動並列化コンパイラ環境、さらに知識データベースに自己増殖学習機能まで取り込んだ問題解決型ソフトウェアの開発を進めます。総じて、代表的複雑系としての、脳システムや、地球環境システムなどへの応用展開も視野に入れた複雑系計算工学をめざします。
文献等	
研究者	野木 達夫

出典： <http://www.kogaku.kyoto-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	複雑系における多様な挙動の解明とそのモデル化をめざして
機関名	京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻
研究分野	情報学（複雑系構成論／複雑系基礎論分野）
研究概要	複雑系構成論講座（複雑系基礎論分野・知能化システム分野） 複雑系はその多様で複雑な要素結合によって、そのさまざまな挙動を生み出しています。自己組織化や記憶学習などはその一例ですが、それらを我々にとって有益なものとするには、それを構成するための原理、モデル化や挙動を制御するための仕組みを解明する必要があります。本講座では、並列計算モデルや制御システムの原理を中心として、複雑系挙動の原理の解明とその応用にとり組んでいきます。 複雑系基礎論分野 --- 複雑系数学と並列計算システムから世界を視る 複雑系の数学モデル、計算モデル、解法アルゴリズムについての数理工学研究基盤として、並列的相互作用の複雑さ、それを通じた自己組織化、大局的把握などの解明をめざした基礎研究と、複雑系を再現するための最適な新型並列計算機や高度の認知を体した自動並列化コンパイラ環境、さらに知識データベースに自己増殖学習機能まで取り込んだ問題解決型ソフトウェアの開発を進めます。総じて、代表的複雑系としての、脳システムや、地球環境システムなどへの応用展開も視野に入れた複雑系計算工学をめざします。
文献等	
研究者	渡邊 昭義

出典： <http://www.kogaku.kyoto-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	複雑系における多様な挙動の解明とそのモデル化をめざして
機関名	京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻
研究分野	情報学（複雑系力学／非線形力学分野）
研究概要	複雑系力学講座（非線形力学分野・複雑系数理分野） 最近、大きな自由度をもち、非線形的な相互作用をする系の力学的挙動は、大変複雑であり多様性に富む一方で、規則的な構造の形成など、多くの系に共通した普遍的な性質も持っていることがわかってきました。本講座では、理論的解析や計算機を用いたシミュレーションにより、このような力学系のさまざまな複雑挙動の解明や制御をめざすとともに、その中に含まれる共通原理を明らかにしていきます。 非線形力学分野 --- 流体等の非線形力学系の示す複雑挙動の解明 --- 流体系、多粒子系、構造システムなどの非線形力学系の示すさまざまな複雑挙動の解明やその制御をめざしています。とくに、非線形力学系の理論、縮約理論、ソリトン理論などを使って、流体系や結合力学系でのカオス、パターン形成、波動、渦の相互作用などの非線形挙動の解明やその制御・利用をめざすほか、確率過程論・確率場理論の応用の立場からの構造システムの信頼性解析手法の開発、複雑液体での協力現象に関する理論及び計算機シミュレーションを用いた研究を行っています。
文献等	
研究者	田中 泰明

出典： <http://www.kogaku.kyoto-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	複雑系における多様な挙動の解明とそのモデル化をめざして
機関名	京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻
研究分野	情報学（複雑系力学／非線形力学分野）
研究概要	最近、大きな自由度をもち、非線形的な相互作用をする系の力学的挙動は、大変複雑であり多様性に富む一方で、規則的な構造の形成など、多くの系に共通した普遍的な性質も持っていることがわかってきました。本講座では、理論的解析や計算機を用いたシミュレーションにより、このような力学系のさまざまな複雑挙動の解明や制御をめざすとともに、その中に含まれる共通原理を明らかにしていきます。 非線形力学分野 -- 流体等の非線形力学系の示す複雑挙動の解明 -- 流体系、多粒子系、構造システムなどの非線形力学系の示すさまざまな複雑挙動の解明やその制御をめざしています。とくに、非線形力学系の理論、縮約理論、ソリトン理論などを使って、流体系や結合力学系でのカオス、パターン形成、波動、渦の相互作用などの非線形挙動の解明やその制御・利用をめざすほか、確率過程論・確率場理論の応用の立場からの構造システムの信頼性解析手法の開発、複雑液体での協現象に関する理論及び計算機シミュレーションを用いた研究を行っています。
文献等	
研究者	船越 満明

出典： <http://www.kogaku.kyoto-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	複雑系における多様な挙動の解明とそのモデル化をめざして
機関名	京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻
研究分野	情報学（複雑系力学／複雑系数理分野）
研究概要	複雑系力学講座（非線形力学分野・複雑系数理分野） 最近、大きな自由度をもち、非線形的な相互作用をする系の力学的挙動は、大変複雑であり多様性に富む一方で、規則的な構造の形成など、多くの系に共通した普遍的な性質も持っていることがわかってきました。本講座では、理論的解析や計算機を用いたシミュレーションにより、このような力学系のさまざまな複雑挙動の解明や制御をめざすとともに、その中に含まれる共通原理を明らかにしていきます。 複雑系数理分野 -- 非線形非平衡系の物理学から複雑力学系を解析する -- 自然法則はシンプルであると言われます。しかし、私たちの身の周りには流体から生命現象に至るまで、これまでの過度に単純化されたモデル化や視点では理解できない多彩で複雑な現象で満ちあふれています。当分野では、流体、結合電子回路、化学反応、液晶、磁性体、生物系などを対象に、計算機を援用して、空間自由度などの大きな自由度をもつ非線形系の複雑系に見られる多様な構造の形成と運動の発現の共通原理およびそれらの特性の数理法則を明らかにすることを目的として研究を行っています。
文献等	
研究者	藤坂 博一

出典： <http://www.kogaku.kyoto-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	複雑系における多様な挙動の解明とそのモデル化をめざして
機関名	京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻
研究分野	情報学（複雑系力学／複雑系数理分野）
研究概要	複雑系力学講座（非線形力学分野・複雑系数理分野） 最近、大きな自由度をもち、非線形的な相互作用をする系の力学的挙動は、大変複雑であり多様性に富む一方で、規則的な構造の形成など、多くの系に共通した普遍的な性質も持っていることがわかってきました。本講座では、理論的解析や計算機を用いたシミュレーションにより、このような力学系のさまざまな複雑挙動の解明や制御をめざすとともに、その中に含まれる共通原理を明らかにしていきます。 複雑系数理分野－非線形非平衡系の物理学から複雑力学系を解析する－ 自然法則はシンプルであると言われます。しかし、私たちの身の周りには流体から生命現象に至るまで、これまでの過度に単純化されたモデル化や視点では理解できない多彩で複雑な現象で満ちあふれています。当分野では、流体、結合電子回路、化学反応、液晶、磁性体、生物系などを対象に、計算機を援用して、空間自由度などの大きな自由度をもつ非線形系の複雑系に見られる多様な構造の形成と運動の発現の共通原理およびそれらの特性の数理法則を明らかにすることを目的として研究を行っています。
文献等	
研究者	宮崎 修次

出典： <http://www.kogaku.kyoto-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	複雑系における多様な挙動の解明とそのモデル化をめざして
機関名	京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻
研究分野	複雑系科学（応用解析学／逆問題解析分野）
研究概要	応用解析学講座（非線形解析分野・逆問題解析分野）-- 21世紀の解析を目指して -- 「応用数学」は既存の純粋数学の単なる応用によって物理や工学の問題を解くものでは決してなく、むしろ新しい数学を創造しようとするものです。すなわち我々は現象の記述に様々な数理モデルの数学的理解を利用しますが、応用数学とはそのような数理モデルの研究を通して新しい数学を創造することが目的なのです。本講座ではこのような応用数学の中でも特に解析学的側面に重点をおいた「応用解析学」の研究と教育をその目的とし、これまでの解析学に対する深い理解と21世紀へ向けての新しい解析学の創造を目指しています。具体的には物理や工学の現象を記述する数理モデルに対して、数学解析・数値解析・確率論等の手法を利用した解析を行い、解析手法とモデルの数学構造の双方の理解を目指し、さらにより深い理解を目指して新しい解析手法の確立を図ろうとするものです。本講座では「非線形解析」「逆問題解析」をキーワードに、専任教員が相互に関係を持ちながら研究と教育を行っています。 微分方程式の数値解析、非適切問題の数値解析、逆問題解析 工学・物理の現象を記述する偏微分方程式に対して、境界値問題などの順問題と未知係数決定などの逆問題の研究を数学解析と数値解析の両面から行っている。
文献等	
研究者	磯 祐介

出典： <http://www.kogaku.kyoto-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	複雑系における多様な挙動の解明とそのモデル化をめざして
機関名	京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻
研究分野	複雑系力学講座（非線形力学分野・複雑系数理分野）
研究概要	最近、大きな自由度をもち、非線形的な相互作用をする系の力学的挙動は、大変複雑であり多様性に富む一方で、規則的な構造の形成など、多くの系に共通した普遍的な性質も持っていることがわかってきました。本講座では、理論的解析や計算機を用いたシミュレーションにより、このような力学系のさまざまな複雑挙動の解明や制御をめざすとともに、その中に含まれる共通原理を明らかにしていきます。 非線形力学分野 --- 流体等の非線形力学系の示す複雑挙動の解明 --- 流体系、多粒子系、構造システムなどの非線形力学系の示すさまざまな複雑挙動の解明やその制御をめざしています。とくに、非線形力学系の理論、縮約理論、ソリトン理論などを使って、流体系や結合力学系でのカオス、パターン形成、波動、渦の相互作用などの非線形挙動の解明やその制御・利用をめざすほか、確率過程論・確率場理論の応用の立場からの構造システムの信頼性解析手法の開発、複雑液体での協力現象に関する理論及び計算機シミュレーションを用いた研究を行っています。
文献等	
研究者	金子 豊

出典： <http://www.kogaku.kyoto-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	カオスとフラクタル、生物数学の研究
機関名	龍谷大学理工学部
研究分野	応用数学
研究概要	カオスとフラクタルのほか、生物数学の研究もしている。
文献等	論文：複雑系科学の哲学に不足しているもの／日本ファジイ学会誌、Vol.9, No.5, Oct. 1997. 共訳書：「カオスとは何か」（著者：J.P.クラッチフィールド/J.D.フィーマー/N.H.バッカー/R.S.ショー、原論文掲載誌：SCIENTIFIC AMERICAN December 1986、サイエンス1987年2月号「カオス」を改題、1997年、日経サイエンス） 共訳書：「大地震や経済恐慌を説明する自己組織的臨界状態理論」（P.バック／陳侃、原論文掲載誌：SCIENTIFIC AMERICAN January 1991、日経サイエンス1991年3月号「大地震や経済恐慌を説明する数学理論」を改題、訳者：山口昌哉、木坂 正史）
研究者	山口 昌哉

出典： <http://sparrow.math.ryukoku.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	複雑系の視点による経済理論の再編成
機関名	大阪市立大学
研究分野	理論経済学、数理経済学
研究概要	制度の経済学・経済の発展過程に興味を持ち、複雑系の視点による経済理論の再編成を目指している。
文献等	論文：複雑系としての経済と経済学／日本ファジィ学会誌、Vol.9, No.1, Feb. 1997. 著書：「複雑系経済学入門」（1997年、生産性出版）、「複雑さの帰結—複雑系経済学試論」（NTT出版）、「市場の秩序学 反均衡から複雑系へ」（1990年、筑摩書房）（サントリー学芸賞・政治経済部門受賞）、「近代経済学の反省」（日本経済新聞社）、「数理経済学の基礎」（朝倉書店）がある。
研究者	塩沢 由典

出典： <http://www.osaka-cu.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	多粒子複雑系（流動層における粉粒体流動現象を対象に数値解析を行っている）
機関名	大阪大学工学部
研究分野	専門分野：流体・固体混相流および粉粒体の流動（粒子複雑系領域）
研究概要	研究概要：流体システムの過渡現象および波動現象解析 流動層における粉粒体流動現象を対象に数値解析を行っているが、多粒子複雑系であれば何にでも興味を持っている。衝突したり接触しながら運動する多くの粒子を含む複雑系が新しい研究対象として改めて興味を持たれている。実例としては、小惑星、土石流、砂漠の砂の移動のような自然現象から各種の工業装置内の粉粒体の流れに至るまでである。数え切れない粒子が存在する場に対し従来は粒子の集団を流体のような連続体で置き換える手法が取られてきた。そのため種々の仮定が必要で、それぞれの分野で独特の方法論が発展してきた。最近の計算機の発達により、1つ1つの粒子の運動を厳密かつ単純な方程式に基づいて計算し、その結果の統計的性質から全体運動を求めることが可能になってきた。この方法は離散粒子法と呼ばれるが、用いられる数学的モデルはありのままに現象を数式化したものであり理解しやすい。
文献等	
研究者	吉岡 宗之

出典： <http://www.mupf.mech.eng.osaka-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	遺伝物質としてのDNAがどのような挙動を示すかを自己組織化という側面から研究
機関名	大阪大学産業科学研究所
研究分野	非線形科学
研究概要	巨大DNA分子の転移現象について研究し、現在は、遺伝物質としてのDNAがどのような挙動を示すかを自己組織化という側面から研究している。
文献等	訳書：「広がる複雑適応系の研究」（著者：R.ラサンSCIENTIFIC AMERICANのスタップライター、 原論文掲載誌：SCIENTIFIC AMERICAN January1993、日経サイエンス1993年3月号）
研究者	上田 正則

出典： <http://www.osaka-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	複雑な世界に隠された事実の発見を支援できる柔軟な推論の実現
機関名	大阪大学大学院基礎工学研究科システム人間系
研究分野	情報処理技術（高速推論）
研究概要	自然言語、非線形光伝搬という異なる分野において数学を駆使した研究を経て、機械推論の研究を始めた、「多項式時間仮説推論を達成するネットワーク化バブル伝播法の述語論理への拡張」のように数理計画法と人工知能の橋渡しに基づく高速推論を足掛りに、複雑な世界に隠された事実の発見を支援できる柔軟な推論の実現を夢とする。
文献等	論文：知識の実行時リフォーメーションに基づく仮説推論の高速化手法 論文：改良型ネットワーク化バブル伝播法による低次多項式時間仮説推論法 論文：多項式時間仮説推論を達成するネットワーク化バブル伝播法の述語論理への拡張 論文：仮説推論のコストに基づく協調による時系列の理解／人工知能学会誌、Vol.12, No.4, July 1997.
研究者	大澤 幸生

出典： <http://w3.sys.es.osaka-u.ac.jp/~osawa/>

研究テーマ ／対象	離散事象システム、線形システム、非線形システム、複雑系、モデル集合
機関名	大阪大学大学院基礎工学研究科システム人間系専攻
研究分野	システム人間系専攻システム科学分野（人間情報科学） 研究テーマ：離散事象システム（形式言語に基づくスーパーバイザの設計、述語に基づく状態フィードバック制御、故障診断、ペトリネットを用いた定性シミュレーション、実時間システムの解析）。
研究概要	離散事象システム、非線形システムおよびハイブリッドシステムの解析・制御に関する研究を行っている。 複雑系：計算生態学的アプローチによる安定化戦略、電力のマルチエージェント型経済的負荷配分、創発システムの解析と設計 非線形システム：カオス、分岐現象の解析とその工学的応用、カオス符号、カオス通信、カオススクランプリング、電力系統の非線形現象解析とターゲティング、ハイブリッドシステムの安定解析 線形システム：モデリングとロバスト制御系設計の統合化、スケーリング付き最適化指標に基づくロバスト制御系設計、構造化特異値に基づくロバスト性解析、システムの対称性に着目した解析と設計、線形制御器のパラメトリゼーションに基づく制御系の自己調整化 モデル集合：モデル集合のシステム理論と制御、入出力データに基づくモデル集合の同定、マルチモデルシステムの制御
文献等	
研究者	潮 俊光

出典： <http://duke.sys.es.osaka-u.ac.jp/index-jp.html>

研究テーマ ／対象	液晶高分子の複雑流路内流れに関する研究
機関名	大阪大学大学院工学研究科機械物理工学専攻
研究分野	非ニュートン流体力学
研究概要	研究テーマ：液晶高分子の紡糸流れの解析／液晶高分子のコーティングに関する研究／液晶高分子の複雑流路内流れに関する研究／モデル分子の定常せん断流れの非平衡分子動力学／異方性剛体分子のBrownian Dynamicsシミュレーション／高分子溶液の伸長流れに関する研究
文献等	
研究者	森 教安

出典： <http://www.mupf.mech.eng.osaka-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	複雑流体、特に粘弾性流体の流動解析（複雑流体工学領域）
機関名	大阪大学大学院工学研究科機械物理工学専攻
研究分野	非ニュートン流体力学（複雑流体工学領域）
研究概要	水や空気などの低分子量の流体に比べて複雑な構造をもった流体を対象にし、そのような流体の流動現象の研究を行っています。現在は主として高分子液体などの粘弾性流体や、流体中に短繊維を混入した繊維懸濁液、結晶的な固体と非晶的な液体の中間的な状態である液晶を扱っています。 粘弾性流体（Viscoelastic Fluid）：高分子の溶液や融液は粘性的性質と弾性的性質をあわせもつ流体で粘弾性流体とよべます。粘弾性流体の流れは水や空気のようなニュートン流体の流れにはみられない複雑な挙動を示します。このような粘弾性流体の流動のメカニズムの解明は高分子成形プロセスの効率化や成形品の品質の向上に役立ちます。粘弾性流体の不安定流れ、非定常流れ、3次元流れについて実験と数値シミュレーションによる研究を行っています。またヘレ・ショウセル内における非ニュートン粘性指状体の成長現象についての研究も行っています。 研究テーマ：複雑流体、特に粘弾性流体の流動解析／高分子成形加工に関する数値シミュレーション／複合材料とその成型に関する研究／非等方性流体、例えば液晶系などの力学
文献等	
研究者	中村 喜代次

出典： <http://www-rheol.mech.eng.osaka-u.ac.jp/rheol-j.html>

研究テーマ ／対象	スペクトル拡散符号の構成法に関する研究およびカオスの情報伝送への適用に関する研究
機関名	大阪府立大学
研究分野	数理工学
研究概要	現在、光ソリトンを用いた通信などで見られるように、ソリトン・カオスといった非線形性に起因する現象が工学の分野でも利用されはじめています。非線形現象を理解するために必要な数学と物理の素養を身につける事が重要になってきています。 数理工学科非線形力学研究グループでは、数理科学の立場からプラズマ中の非線形波動、ソリトン、非平衡状態にある多体系の統計力学、層流の不安定化等の非線形現象の研究を行なっています。 信号処理論：スペクトル拡散符号の構成法に関する研究およびカオスの情報伝送への適用に関する研究
文献等	
研究者	佐々木 逸雄

出典： <http://www.nm.ms.osakafu-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	数理学の立場からプラズマ中の非線形波動、ソリトン、非平衡状態にある多体系の統計力学、層流の不安定化等の非線形現象の研究
機関名	大阪府立大学工学部数理工学科
研究分野	数理工学：非線形力学
研究概要	研究内容：二次元周期流の安定性 数理学の立場からプラズマ中の非線形波動、ソリトン、非平衡状態にある多体系の統計力学、層流の不安定化等の非線形現象の研究を行なっている。
文献等	
研究者	福田 浩昭

出典： <http://www.nm.ms.osakafu-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	レーザ光を凝縮物質に照射したときに生ずる様々な光励起複雑系における諸現象について、コンピュータを用いた理論解析を行う
機関名	奈良先端科学技術大学院大学
研究分野	物質創成科学研究科／複雑系解析学
研究概要	一般に物質の持つ性質は、電場、磁場、圧力などの外部からの作用に対する応答として現れます。レーザ光を凝縮物質に照射したときに生ずる様々な光励起複雑系における諸現象について、コンピュータを用いた理論解析を行い、非平衡状態で凝縮物質が示す新たな物性を明らかにします。 ●高密度励起系における超流動と光学過程の研究 光により生成された高密度励起系における、超流動、超伝導に類似な巨視的量子現象を解析しています。光ジョセフソン効果、励起子凝縮相-BCS相の光誘起相転移、多体量子効果により誘起された光章動など、光励起非平衡状態での新たな光学現象の研究を行っています。 ●強相関系における光物性の研究 酸化物高温超伝導体に例を見るように、強い電子間相互作用がもたらす強相関系の物性が注目されています。強相関物質の非線形光学応答を解析することにより、非フェルミ流体に特徴的なキャリアのダイナミックスを明らかにする事を計画しています。また、キャリア濃度を光によってコントロールすることによる強相関超伝導状態の変化の解析、更には光誘起超伝導物質の探索を行います。
文献等	
研究者	高橋 聡

出典： <http://msw3.aist-nara.ac.jp/ms/home-ja.html>

研究テーマ ／対象	レーザ光を凝縮物質に照射したときに生ずる様々な光励起複雑系における諸現象について、コンピュータを用いた理論解析を行う
機関名	奈良先端科学技術大学院大学
研究分野	物質創成科学研究科／複雑系解析学 研究分野：高密度励起子系における超流動と光学過程の研究、強相関系における光物性の研究
研究概要	一般に物質の持つ性質は、電場、磁場、圧力などの外部からの作用に対する応答として現れます。レーザ光を凝縮物質に照射したときに生ずる様々な光励起複雑系における諸現象について、コンピュータを用いた理論解析を行い、非平衡状態で凝縮物質が示す新たな物性を明らかにします。 ●高密度励起子系における超流動と光学過程の研究 光により生成された高密度励起子系における、超流動、超伝導に類似な巨視的量子現象を解析しています。光ジョセフソン効果、励起子凝縮相-BCS相の光誘起相転移、多体量子効果により誘起された光章動など、光強励起非平衡状態での新たな光学現象の研究を行っています。 ●強相関系における光物性の研究 酸化物高温超伝導体に例を見るように、強い電子間相互作用がもたらす強相関系の物性が注目されています。強相関物質の非線形光学応答を解析することにより、非フェルミ流体に特徴的なキャリアのダイナミクスを明らかにする事を計画しています。また、キャリア濃度を光によってコントロールすることによる強相関超伝導状態の変化の解析、更には光誘起超伝導物質の探索を行います。
文献等	
研究者	相原 正樹

出典： <http://msw3.aist-nara.ac.jp/ms/home-ja.html>

研究テーマ ／対象	神経系の非線形現象とカオスの研究
機関名	九州大学歯学部
研究分野	神経生理学
研究概要	神経生理学の基礎を学びながら、神経系の非線形現象とカオスの研究を進めている。
文献等	著書：「ニューラルシステムにおけるカオス」など。 論文：非線形現象の不思議：脳のリズム活動と非線形現象／電子情報通信学会誌、Vol.80, No.11, Nov.1997.
研究者	石塚 智

出典： <http://www.kyushu-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	離散力学系のカオスの確率論・統計論的解析
機関名	九州大学大学院システム情報科学研究科
研究分野	基礎回路理論, 情報伝送工学, 情報音響学, 生体システム特論, 情報系統論
研究概要	非線形システム、疑似乱数の生成および検定、疑似乱数を用いた情報通信、カオスを用いた情報通信、システム故障診断、生体情報、聴覚系の情報処理機構の研究 研究テーマ：スペクトラム拡散通信、暗号通信、生体情報処理過程のモデリング 研究内容のキーワード：疑似乱数、不規則・確率過程、ストリーム暗号
文献等	論文：非線形現象の解析手法 [III] - 離散力学系のカオスの確率論・統計論的解析 - / 電子情報通信学会誌, Vol.79, No.5, 5/96。 論文：非線形現象の不思議：神はいかにサイコロをふるか？ / 電子情報通信学会誌, Vol.80, No.11, Nov.1997。 主要著書・論文： 「Statistics of Chaotic Binary Sequences」, IEEE Trans. on Information Theory, vol.43, No.1, 104-112, 1997。 「新編感覚・知覚心理学ハンドブック」共著, 1007-1019, 誠信書房, 1994。 「カオス-カオス理論の基礎と応用-」共著, 1-19, サイエンス社, 1990。
研究者	香田 徹

出典： <http://www.kyushu-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	味覚センサの開発, 自己組織化の研究
機関名	九州大学大学院システム情報科学研究科
研究分野	電子物性論／応用電子物性特論
研究概要	研究内容のキーワード：味覚センサ, 高機能性材料, インテリジェントデバイス
文献等	共著書：「応用カオス-カオスそして複雑系に挑む」 (3編8章, サイエンス社) 主要著書又は発表論文： ①味覚センサ, 単著, 朝倉書店, 1993。 ②センサ工学, 共著, 培風館, 1995。 ③自己組織化, 共著, 朝倉書店, 1996
研究者	都甲 潔

出典： <http://www.kyushu-u.ac.jp/>

研究テーマ ／対象	カオスの理論と応用、ならびに複雑系における自己組織化現象
機関名	鹿児島大学理学部物理学科
研究分野	物理学
研究概要	専門はカオスの理論と応用、ならびに複雑系における自己組織化現象。
文献等	共著書：「応用カオス-カオスそして複雑系に挑む」（3編1章、サイエンス社） 著書：「やさしくわかる カオスと複雑系の科学」（1996年、日本実業出版社）
研究者	井上 政義

出典： <http://www.kagoshima-u.ac.jp/>

— 禁無断転載 —

知的情報技術と利用の動向に関する調査研究報告書
— 複雑系情報処理に関する調査研究 —

発 行 平成10年3月

発行所 財団法人 日本情報処理開発協会
東京都港区芝公園3丁目5番8号
機械振興会館内
電話 (03) 3432-9390

09-R 003

