

原子力用人工知能における技術動向調査
(調査報告書)

1999年3月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ
ください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1999

原子力用人工知能における技術動向調査

(調査報告書)

須田 一則¹、米川 強¹
吉川 信治¹、長谷川 信¹

要旨

本調査では、自律型プラントのための分散協調知能化システム開発および原子力施設における知的活動支援の方策に関する研究に資することを目的に、原子力人工知能の技術動向調査として

- ・ 技術動向
- ・ 産業界での導入および応用例
- ・ ニーズ
- ・ 社会的受容性

の項目に関する調査を実施した。

人工知能応用システム開発の動機付けは、ニーズと技術の両者から発生するものであり、お互いが補間しあいなされていく。その技術の有用性、実用性が認められ、自然に社会へ受け入れられて行くためには、人工知能技術に対する社会的受容性についての課題を解決する必要がある。

¹：大洗工学センター システム技術開発部 ビーム利用技術開発グループ

The Present Status of Artificial Intelligence For Nuclear Power Plants

Kazunori Suda¹, Tuyoshi Yonekawa¹
Shinji Yoshikawa¹, Makoto Hasegawa¹

Abstract

JNC researches the development of distributed intelligence systems at autonomous plants and intelligent support system at nuclear power plant. This report describes the present status of artificial intelligence (AI) technologies for this research .

The following are represented in this report:

- present research study for AI
- Implementation of AI system and application of AI technologies in the field of industries
- requirement for AI by industries
- problems of social acceptance for AI

A development of AI systems has to be motivated both by current status of AI and requirement for AI. Furthermore a problem of social acceptance for AI technologies has to be solved for using AI systems in society.

¹ : Beam Group, System Engineering Technology Division, OEC, JNC

目次

1	はじめに	1
1.1	目的	1
1.2	調査内容	1
2	技術動向	4
2.1	概要	4
2.2	知識獲得	6
2.3	オントロジー	13
2.4	推論	18
2.5	機械学習	25
2.6	自然言語処理	35
2.7	エージェント	43
2.8	ニューラルネット	52
2.9	創発システム	61
2.10	高次推論	76
2.11	米国の国家プロジェクトにおける取り組み	81
3	産業界での導入および応用例	82
3.1	概要	82
3.2	診断への応用例	83
3.3	制御への応用例	88
3.4	判断支援への応用例	93
4	ニーズ	99
4.1	概要	99
4.2	各技術要素の対するニーズ	99
4.3	応用例からわかる AI 技術へのニーズ	100
4.4	専門家へのヒアリング	101
5	人工知能の社会的受容性	107
5.1	概要	107
5.2	社会的受容性に関する一般論	108
5.3	原子力分野における社会的受容性	115
5.4	原子力分野以外における社会的受容性	128
5.5	専門家へのヒアリング	135
6	結論	138
6.1	技術動向	138
6.2	産業界での導入及び応用例	138
6.3	ニーズ	138

6.4 社会的受容性	139
6.5 まとめ	140
参考文献	141

表目次

2.1 文献数	5
3.1 応用例と要素技術の関係	82
3.2 AI・アドバンスト制御の応用事例[130]	92
5.1 分野別技術の社会的受容性[141]	110
5.2 テクノロジーアセスメントの導入についての検討状況[141]	112
5.3 原子力分野以外における社会的受容性の事例	129
5.4 ケース・スタディの位置づけ[142]	132

図目次

2.1 知識発見過程[1]	8
2.2 事例ベース推論の一般的な枠組み[28]	19
2.3 誘導類推[31]	22
2.4 ローラーコースター問題[36]	24
2.5 FIPA によるドメイン参照モデル[87]	51
2.6 ニューロンの概略[89]	52
2.7 単位ステップ関数[89]	53
2.8 シグモイド関数[89]	53
2.9 階層構造ニューラルネットモデル[89]	54
2.10 相互結合ニューラルネットモデル[89]	54
2.11 教師あり学習[89]	54
2.12 教師なし学習[89]	54
2.13 コホーネンネット[89]	57
2.14 コホーネンネットにおける近傍領域の取り方[89]	58
2.15 入力の特徴空間とコホーネンネットの結合強度ベクトルの関係[89].....	59
2.16 スキーマと個体[112]	66
2.17 多様性診断システムのフレームワーク[118]	77
2.18 プラント運転員の知識モデル[119]	79
3.1 圧延設備異常診断システムの流れ[124]	84
3.2 冷却システムの概要[125]	85
3.3 AI 技術の適用によるオペレータノウハウの自動化[128]	88
3.4 連続重合プラントにおける物性制御システム[128]	89
3.5 システムの構成[128]	91
3.6 システム構成[131]	93
3.7 機械学習法適用のアプローチ[133]	96
3.8 強化学習と GA の融合モデル[135]	97

5.1	技術の社会的受容性[141]	111
5.2	テクノロジーアセスメントの実施状況[141]	112
6.1	AI システムの開発構造	140

1 はじめに

1.1 目的

原子力発電所や核燃料サイクル施設等の原子力施設における運転・保守の安全性・信頼性の飛躍的向上を目的とし、プラント運転などでヒューマンエラーの減少を目指すことが求められている。このため人間支援型を中間目標としながら自律型ロボットを含む自律型原子力施設開発が究極的な目標とされている。また、情報関連技術の発展と機器の信頼性向上を契機として、原子力施設においても自動化範囲の拡大が顕著となっている。この中で、運転員等に求められる役割は、マニュアルに即した定型的操作に実行者から、この定型的操作を超える高度の知的活動を必要とするものへと移行しつつある。

このような背景から、本調査では、自律型プラントのための分散協調知能化システムの開発および原子力施設における知的活動支援の方策に関する研究に資することを目的に、原子力人工知能の技術動向調査として

- 技術動向
- 産業界での導入および応用例
- ニーズ
- 社会的受容性

の項目に関する調査を実施した。

1.2 調査内容

1.2.1 技術動向

人工知能技術については、ここ10年での研究により実用レベルの技術となり各種の分野へと応用されるようになってきた。また、研究レベルでは、さらに高度な内容の研究が行われている。ここでは、人工知能の最新の技術動向について、論文、国際会議および学会誌等の文献調査を行い、その内容を分類する。分類した項目について、特徴と得意とする対象分野、課題等についてまとめる。まとめる方法は以下の内容にしたがうものとする。まず、人工知能の定義をする。ただし、その定義は原子力分野にとらわれない広めの定義とし、この定義にしたがって人工知能の動向を調査し、その内容を分類する。分類する項目は、人工知能の最新の技術動向を反映させたものとする。分類項目を以下に示す。

1) 知識獲得

知識獲得、データマイニングについて

2) オントロジー

オントロジーについて

3) 推論

各種推論方法について

4) 学習

帰納学習、演繹学習、戦略学習、類推、概念学習について

5) 自然言語処理

自然言語理解、自然言語処理、対話処理、機械翻訳について

6) エージェント

エージェント関連について

7) ニューラルネット

ニューラルネット関連について

8) 創発システム

人工生命、進化的計算、遺伝的アルゴリズムについて

1.2.2 産業界での導入および応用例

製造業をはじめとした産業界では、数多くの人工知能技術の導入例および応用例がある。ここでは、人工知能技術の産業界での導入例と応用例について、最近の文献および新聞を調査し、その内容をまとめた。ただし、調査対象は、化学のプロセスコントロール、異常診断、運転支援等をはじめとした制御技術等への応用を中心とする。金融分野での人工知能の導入例等は範囲外とする。具体的には、応用例として以下の3種類について報告する。

1) 診断への応用例

各種診断システムへの応用例を調査する。

2) 制御への応用例

プラントの運転制御等の応用例を調査する。

3) 判断支援への応用例

人間が状況を判断するための支援を行うようなシステムの応用例を調査する。

1.2.3 ニーズ

人工知能技術の研究は、それぞれ具体的なニーズのもとで研究が行われ、人工知能技術が実用化されてきた。ここでは、人工知能の社会での重要性を示すことを目的とし、3章で調査した産業界での導入および応用例について、人工知能の技術が必要になった状況をまとめた。

また、2章で分類された最近の人工知能技術の各内容についてそのニーズについてまとめた。ここでは、専門家にインタビューを行い、人工知能のニーズをまとめる材料のひとつとした。

1.2.4 社会的受容性

人工知能技術については、原子力分野の他の技術と同様に社会的受容性についての検討も必要である。ここでは、専門家へのインタビューおよび文献をもとに、原子力分野への人工知能技術導入に対する社会的受容性についてまとめた。ここでは、参考にする文献の中には、原子力委員会等で報告されている社会的受容性に関するレポートを含めた。

2 技術動向

2.1 概要

人工知能技術については、ここ10年での研究により実用レベルの技術となり各種の分野へと応用されるようになってきた。また、研究レベルでは、さらに高度な内容の研究が行われている。ここでは、人工知能の最新の技術動向について、論文、国際会議および学会誌等の文献調査を行い、その内容を分類した。

分類は、以下の9項目とした。これらの項目は、それぞれ独立した技術分野ではなく、知識については他の項目の全ての基礎となるようなものであり、また、他の項目同士も関係しあっている。

- 1) 知識獲得
- 2) オントロジー
- 3) 推論
- 4) 機械学習
- 5) 自然言語処理
- 6) エージェント
- 7) ニューラルネット
- 8) 創発システム
- 9) 高次推論

文献調査は、1996～1998年の文献をJOIS¹で検索した。その結果を表2.1に示す。

知識獲得、遺伝的アルゴリズムに対する文献数が非常に多く、知識獲得については、知識をどのように獲得し表現して利用するかというような基礎的な論文が多いようである。逆に遺伝的アルゴリズムについては、最適化問題への多分野での応用例が多いのが特徴である。

最後に、米国の国家プロジェクトにおける取り組みを取り上げた。

¹ 科学技術進行事業団 科学技術情報事業本部 (JICST) が独自に開発したオンライン情報システム、収録件数約1169万件

表 2.1 文献数

キーワード	文献数
知識獲得	1607
データマイニング	379
オントロジー	174
事例ベース推論	353
定性推論	34
帰納推論	999
非単調推論	241
強化学習	434
類推	496
概念学習	72
自然言語理解	131
機械翻訳	387
エージェント * 知的	83
ニューラルネット	567
ファジー	104
創発システム	35
人工生命	205
遺伝的アルゴリズム	4162

2.2 知識獲得

2.2.1 概要

知識獲得、表現、利用は、人工知能の最大のテーマであり、人間の知的能力をコンピュータ上で実現させるための基礎的技術である。

以前のエキスパートシステムでは、論理的な知識を組み上げて行き、推論に利用し回答を得る方法がとられていたが、ハードウェアの発達により、大規模データシステムの急速な増加と各データ量の着実な増大を背景に大規模なデータベースからの知識獲得の研究が活発に行われてきている。

これらの技術は、データマイニング (Data Mining)、データベースからの知識発見 (KDD: Knowledge Discovery in Databases) と呼ばれている。データマイニングに必要な技術は、データベース技術からはじまり、高性能計算技術、データ視覚化技術、統計科学的手法、機械学習技術、オペレーションズリサーチなど数理科学的技術にいたるまで非常に広い範囲に及ぶ。データから知識発見を行う研究は、論理学をはじめとして、数多くの分野で行われているがいずれの分野においてもノイズを含む膨大な実データから知識と呼びうる記述を導出するシステム構築技術を確立するまでに、解決すべき問題は数多く残されている。

この技術の適応分野は、流通業^[9]、製造業^[10]、医療^[11]、データウェアハウス^[12]、科学的発見^[13]等がある。

知識発見の技術を具体的な問題解決への摘要をめざし、ソフトウェア化しツールとして開発する研究もなされている^[14]。これには、対話型のデータ検索、統計処理、機能学習、ニューラルネットなどの技術が統合されている。

2.2.2 データ発掘アルゴリズム

(1) データベースを用いた知識発見プロセス

データ発掘アルゴリズムは、形式的には以下のように論じられている^[15]。データベースに蓄えられている事実 F の集合によって、データが構成される。なお、蓄積されているデータは事実の集合であるため基本的に正事例 (positive set) のみからなり、負事例 (negative set) を含まない。そして、言語 L による記述 E によって、 F の部分集合 F_E に関する知識が規則として記述される。ここで、 E による知識表現 (knowledge representation) は、フレーム (frame)、プロダクションルール (production rule)、意味ネットワーク (semantic networks)、一階述語論理 (first order predicate logic) などである。

次に、言語 L によって記述された E に対する確実度 (certainty) は、関数 $C(E, F)$ によっ

て妥当性 (validity) をもつものとして評価される。また、新規性 (novelty) の高い記述であるかどうかを評価する関数 $N(E, F)$ を与えることも重要である。さらに、得られた記述が、より有用な変化を導く潜在的有効性 (potentially useful) をもつかどうかを評価する関数 $U(E, F)$ も要求される。なお、システム利用者にとっての最終的な理解可能性 (understandability) を評価する関数 $S(E, F)$ を、データベースからの知識発見を行う上で必要とするが、実際にその関数を与えることは困難である。そして、興味深さ (interestingness) の指標が、上記の全ての要素を含む関数 $I(E, F, C, N, U, S)$ によって与えられる。従って、あるしきい値 i (threshold) を満たす $I(E, F, C, N, U, S)$ が得られた場合に、記述 E を知識であるという。

なお、データベースを用いた知識発見を行うためには、上述したデータ発掘を含む複数のプロセスが必要となる。特に、大きく分けると、選択 (selection)、前処理 (preprocessing)、変形 (transformation)、データ発掘 (data mining)、解釈・評価 (interpretation/evaluation) の過程からなり、Fayyad の文献^[8] などでは以下のように整理されている。その過程を図 2.1 に示す。

- 1) データ発掘の適用対象領域の理解に努め、既に知られている性質などに関する考慮を行いながらデータ収集し、データベースを構築する。
- 2) データ・クリーニング (data cleaning) を施すための選択操作を、データに対する前処理として行う。
- 3) データ発掘アルゴリズムで処理が可能な範囲になるように、次元の低減などを含めたデータの変形操作を施す。
- 4) データ発掘アルゴリズムを実行する。
- 5) 生成されたルールの解釈を後処理として行うとともに、その記述に関する検証 (verification) を行う。
- 6) 最終的に得られたルールに対する評価を行い、知識とする。

なお、実用性の高い知識を求めるためには、数多くのステップをバランス良く実行するシステム構成が必要であり、前処理と後処理に特に重要なポイントが置かれていることにも注意しておきたい。

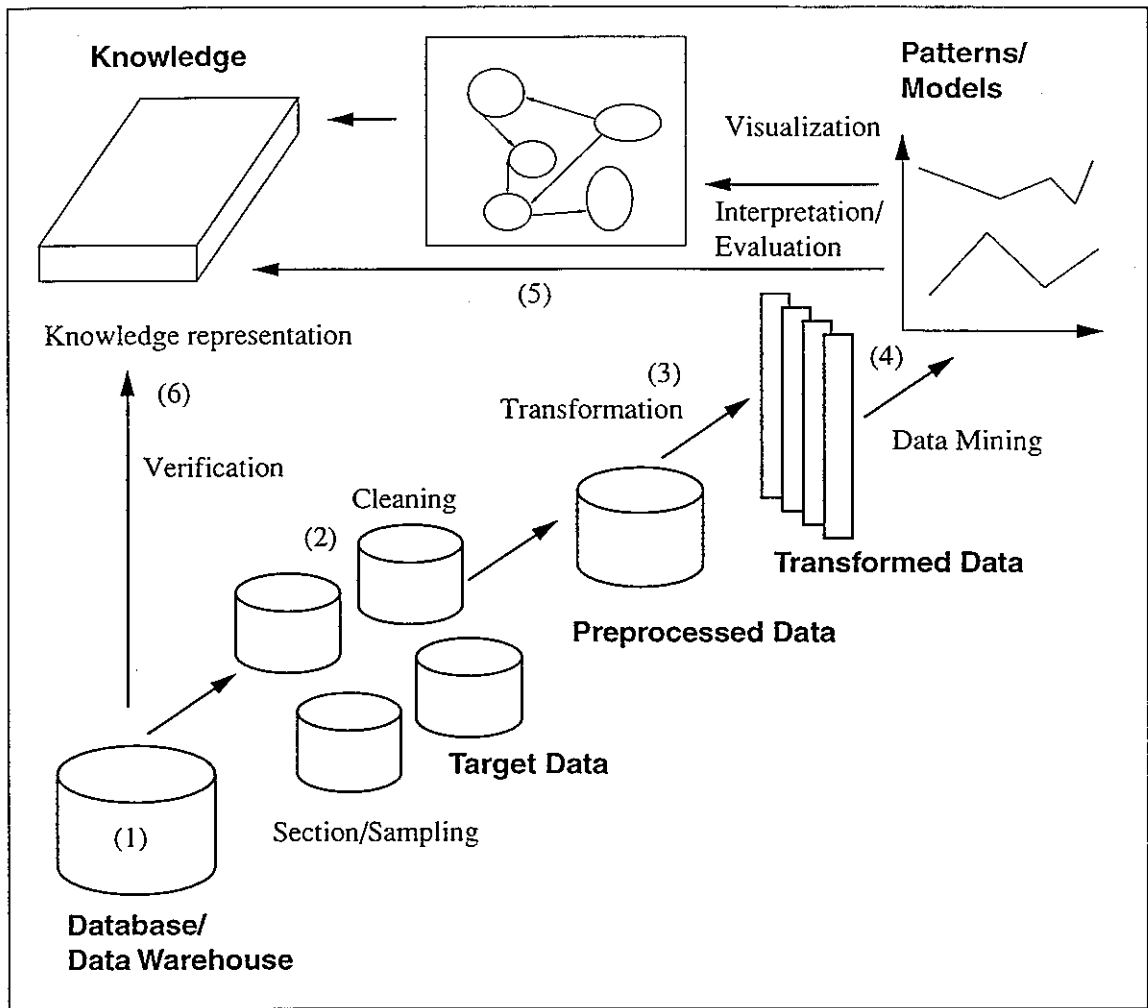


図 2.1 知識発見過程 [1]

(2) 相関ルールの導出

本節では、データ発掘アルゴリズムの代表例として相関ルールに関して簡単に述べる。なお、相関ルールを効率良く導くアルゴリズムとして Apriori があげられる^[9]。Apriori では、まず、(個々の商品に相当する) アイテム集合 $\tau = \{i_1, i_2, \dots, i_m\}$ が基本となる要素として与えられる。そして、(全ての購買記録に相当する) 集合 D は、複数の(レシートに相当する) トランザクションによって構成されており、個々のトランザクション T は、アイテム集合の部分集合 $T \subseteq \tau$ から成る。

ここで、あるアイテム集合 X に関して成立するルール $X \Rightarrow Y$ を考える。なお、 $X \Rightarrow Y$ において、 $X \subset \tau$ 、 $Y \subset \tau$ 、 $X \cap Y = \emptyset$ であるとする。そして、集合 D におけるトランザクションの $s\%$ が $X \cup Y$ を含むならば、いて X を含むトランザクションの $c\%$ が Y

を含むならば、 $X \Rightarrow Y$ は確信度 c をもつ。このようにして、ユーザの与えたサポートと確信度の最小値に対するしきい値を満たすものを相関ルールとして求める。なお、上記に述べたアルゴリズムでは、頻繁に出現するアイテムの組み合わせであることを保証する指標がサポート (support) として、ルールの強さが確信度 (confidence) として表されていることになる。

また、大規模データベースから効率良く相関ルールを導くために、様々な手法に関する研究が行われている。例えば、サンプリングに基づいた手法や、データベースで頻繁に生じるデータ更新において、既に求められているルールの差分を元にどのようにルールが変化するかを求める手法などが提案されている。

さらに、ハードウェア構成面を含めて考慮するならば、並列データ発掘 (PDM、Parallel Data Mining) による処理効率の向上や、分散データベースへの適用も重要な位置を占める^[10]。そこで、並列化の効果を高めるためにルール導出に必要な要素を複数のノードへハッシュ関数を用いて分割したり、対象となるデータの偏りに応じて複製戦略を変化させる研究が行われている。

(3) 分類階層を用いた一般化

データ発掘において、一般化の手法を用いる属性指向アルゴリズム^[11]も重要な位置を占める。まず、属性指向アルゴリズムは、データベースの属性に与えられた領域知識 (domain knowledge) としての概念木による属性値の一般化と、重複度を考慮した属性除去 (attribute-removal) を含めた冗長データの除去が行われる。そして、総データ数が、適切な抽象化レベルとなるしきい値以下になるまで一般化を繰り返すことによって、理解可能性を高める規則が導出される。なお、規則はルール形式やテーブル形式によって記述され、属性に関する条件を満たすクラスの特徴を記述する特徴化規則 (characteristic rules) や、あるクラスの概念と他クラスの概念とを区別する規則である分類規則 (classification rules)、さらに、時系列上の関係に着目した発展規則 (evolution rule) などとして求められる。

他方、分類階層 (taxonomy) により一般化されたアイテム集合を用いて相関ルールを求める手法^{[12][13]}も提案されており、抽象度の低いルールを多数求めないために一般化は必要となっている。加えて、検索式の簡潔な記述が可能になるという点でも、一般化を用いた抽象レベルの高い記述は有効であり、一般化に関わるアルゴリズムを実装することは重要と考えられる。

また、Han らは、より効果的なルール導出を試みるために、概念木の構造の調整を行う概念木エディタを GUI を用いて構築し、単一属性に対して複数の概念木が与えられた場合の規則を求めるシステム構築を試みている。

なお、このような一般化操作を行うために、領域知識として概念木が与えられる仮定は、システムの対象領域によっては十分な現実性を有しており、データベースシステムの設計情報を管理するメタデータ (metadata) として、この種の知識は、データ・ディクショナリやリポジトリ (repository) に蓄えられている。

しかしながら、データの変更などによってデータに偏りが生じた場合、ルール導出において主要な属性が除去されるなどの問題も生じる。そこで、概念木が与えられない場合も含めて、新しい概念木生成を自動的あるいは半自動的に行なう手法も必要である。このため、COBWEBのような概念クラスタリング (conceptual clustering) を行い、分類木 (classification tree) を生成するアルゴリズムは、一般化をデータ発掘で用いる上で基礎的な手法となると考えられる^[40]。

(4) データベースの構成とデータ発掘

これまで、関係データベース (relational database) を想定したデータ発掘の研究が一般的に多かったが、多様なデータモデルに基づくデータベースシステムが構築されてきている。そこで、各種データベースシステムの提供する枠組みが、データ発掘に対してどのような影響を与えるかを述べる。

まず、“Legacy System” と呼ばれる既存のデータベースシステムは、提供されている標準的問い合わせ言語^[41]などを含めて、知識発見の過程に関わる操作を有効に実装することが難しい制約された枠組みとなっている。これは、データベースシステム設計の重要な基準が、条件を満たすデータ全てを効率的に検索することに置かれているからである。よって、検索処理に必要な記憶領域などを含めた問い合わせ処理の最適化、効率的な検索を行う各種インデックス構造、物理的資源をアクセスする際の最適割り当てなどの強い制約のもとでデータを蓄積した場合に検索処理速度を向上するための設計が行われている。

そこで、データ発掘に適したシステムを構築するには、データモデル設計の段階で、興味深い知識を得るために重要な役割を果たす属性が排除される可能性を防ぎ、より柔軟に冗長なデータ格納を可能とするシステムが必要となる。つまり、要領を得ないデータ (inconclusive data)、ノイズを含むデータ (noisy data)、疎なデータ (sparse data) を扱うことによって、有用なルールが捨てられないようにすることが重要となる。

上述した点からは、データベース設計者の領域知識そのものがデータ構造に強く反映されたデータモデルを用いるネットワーク型データベース (network database) は、データ発掘との親和性が低いと言える。さらに、関係代数言語を用いる関係データベースも、スキーマ設計は正規形に関する厳しい制約によって行われる場合が多く、冗長データの排除を目指した設計となっている。そのため、データ発掘で用いられている関係データベースは、

一般にテーブル形式で格納されたデータを用いての議論となっている。

このように、データモデル面から考えた場合、オブジェクト指向データベースは、比較的自由なデータ構造をもち、さらに、クラス階層を用いたデータ構造を提供していることから、一般化を行う上でも望ましい性質をもっている。さらに、今後、画像や音声を扱うマルチメディアデータベース (multimedia database) のような多様なデータ構造を扱うにつれて、データ発掘に関わるアルゴリズムは、より重要な位置を占めると考えられる。

なお、問合わせ言語の面から見た場合、述語論理に基づく強力な枠組みを与える演繹データベース (deductive database) が、ルール形式の知識処理を行う上で重要である。この点では、ILP(Inductive Logic Programming) によるアプローチが、データ発掘と強く関わっている。

(5) データベース応用におけるデータ発掘

データベースシステムにとって、比較的新しい領域となっている空間データを扱う空間データベース (spatial database)^[16] 応用に、地理情報システム (GIS: Geographic Information System) などがある。そこで、ノイズを含む空間データに対する空間データ発掘 (spatial data mining)^[17] では、クラスタリングアルゴリズムが重要な役割を果たす。但し、これまでもクラスタリングアルゴリズムは数多く研究されており、クラスタ内の代表点と他の点のユークリッド距離 (Euclidean distance) やマンハッタン距離 (Manhattan distance) の平均的な差を最小とするクラスタを見つける手法などがある。なお、クラスタリングアルゴリズムである PAM (Partitioning Around Medoids) と CLARA^[18] を改良した CLARANS (Clustering Large Applications Based upon Randomized Search) などが提案されている。さらに、データベース特有の構造を利用した高速化として R-tree や PR-Quadtree などを用いた研究もなされているが、計算幾何学 (computational geometry)^[19] などの分野において行われている研究は、データ発掘にとっても興味深いと言える。

その他、文書データベース (textual database) に対して、単語の共起性などに基づいた研究^[20] も行われている。また、インターネット環境下での情報共有を効率的に進める方法として、ウェブ発掘 (Web mining)^[21] による適切な URL 資源発見、さらに、複数の情報資源の適切な要約記述など、情報システムの統合に対する重要性が指摘されている。

加えて、検索に対してシステムが受け身 (passive) に動作するだけでなく、格納されるデータの変化に応じた能動性をもつアクティブデータベース (active database) のもつ可能性も考慮しておくべきである。

この様に、データモデルとデータ構造の変化に加えて、処理対象となるデータの性質が異なる多様な情報システムが増えており、その領域に応じて様々な要求が生じている。ま

た、通信ネットワークを含めたハードウェアの飛躍的な発展によって、さらに新しいデータベース応用システムが登場してくると考えられる。よって、今後、データベース応用システムの構築を容易にするために、インタフェースとなる問い合わせ言語の能力を、データ発掘を含めた視点から、適切に拡張することが求められると考えられる。

2.3 オントロジー

2.3.1 オントロジー研究の重要性^[23]

人工知能研究のなかには、論理や知識表現などを扱う「形式指向」の研究と知識の内容を研究の対象とする「内容指向」の研究がある^[24]。人工知能研究はこれまで「形式指向」の研究を中心に行なわれてきたが、近年、内容指向の研究の重要性が高まっている。それは、現実に存在する知識処理の課題の多く、例えば、知識の再利用、複数のエージェントが協調するために必要な通信、理解に基づくメディア統合、大規模知識ベース / 常識ベースの開発、知識の標準化による知識共有などの問題の解決には、推論などの形式的な操作の高度化だけではなく、様々な形態で存在する知識の「内容」を扱う基礎研究と高度技術が不可欠であることが明らかになってきたからである。

形式化の一つである論理は形式的に健全な議論を規定するための強力な道具を提供する。そこでは、形式的に正しい思考を規定することができ、人間の思考の抽象的な限界を議論することも可能である。しかし、健全な推論によって、与えられた問題を解決するためにはどのような知識を用意すればよいか、そもそも知識とは何か、我々は認識をどのように構成し、知識の具体的内容はどのような構造と性質を持っているのかといった疑問に「形式」は答えてくれないのである。その意味で、「知能」を形式的に捉える、あるいはその根源を問題解決機能(推論、論理など)に求めることの代わりに「知識」の重要性を力説した Feigenbaum の主張は正しかった^[25]。このことはエキスパートシステムの成功が証明している。

しかし、それは更に深化しなければならない。即ち、Feigenbaum の時代の知識に対する理解は、「専門家の専門知識をルールで表現する」ということが本質であった。現在はそこから遥かに進歩している。知識は様々な形態を取って存在することから分かるように、知識源は実に多様である。専門家、データ集合(データベース)、ドキュメント、画像の中にも存在する。そして、知識を扱う主体としてコンピュータ(ソフトウェアエージェント)と人間との2種類のエージェントが存在する。即ち、知識はこれら両方のエージェントのために存在するべきである。知識は複数のエージェントの間で共有され、様々な目的のために再利用されなければならない。そしてコンピュータによる知識処理は、このような多様な知識源に潜在する知識を両エージェントにとって操作可能な形に、抽出、変形、組織化する技術、即ち、知識メディア技術に進化しなければならない。その基礎を与える学問がオントロジー工学である。

「内容指向」の研究の重要性はある程度認識されつつある。それにもかかわらず、これまでの人工知能研究の多くは形式指向の研究が重要視され、内容指向の研究は軽んじられてきた。これにはいくつかの理由があるが、最も重要なことは内容指向の研究が次のよう

な問題を抱えていることであろう。

- 1) 個別の状況に依存したアドホックな議論になりがちであること。従って、
- 2) 形式理論の様に積み重ねが効くような方法論がないこと。
- 3) しっかりした基盤研究、あるいは技術がないこと。

これらの問題点を解決することなしには、内容指向研究の発展は望めない。多くの場合、「開発」とどまり、「研究」へと昇華することは難しい。この様な問題を解決するのが、本論文で提唱するオントロジー工学である。オントロジー工学は、知識ベースの設計意図、核となる概念化、基本概念の意味の厳密な定義などを与えるだけでなく、実世界の情報モデル構築のために不可欠な、知識を「積み上げる」技術と理論を提供する。

オントロジーに関する研究はこの数年間で急速な広がりをもって行なわれている。しかし、未だにオントロジー自身に関する定義が定まっていないのが現状であり、まして外部にいる研究者には不透明な部分が多い。更に、我が国においてはオントロジー研究の重要性が必ずしも正しく理解されているとは言えない。オントロジーは哲学的な理論から現実の問題解決に直接関係する具体的な課題まで幅広い議論が必要であり、それだけに奥が深く、理解も混乱しがちである。しかし、工学としての知識処理の将来を考えたとき、「内容指向」研究を支える基礎としてオントロジー研究は今後ますます重要となる。

2.3.2 オントロジーとは^[24]

(1) 定義

「オントロジー」は本来は哲学用語で「存在に関する体系的な理論(存在論)」という意味を持っているが、情報科学では、「ある対象物(世界)のモデルを記述する際に必要となる概念の体系的な理論」といえる。基本的な立場は哲学と同じであるが、対象を「存在」という一般的なものではなく、情報科学が興味を持つ全ての「もの」とするところが大きく異なる。

哲学は「わかる」という中立的なことを目的にして存在を考える。しかし、我々が対象のモデルを記述する際には、必ず何らかの個別の「目的」を持っている。目的は対象を眺める「視点」を明確にしその視点に基づいて、初めて有効なモデルの構築が可能となる。

もう一つ重要な相違点は、後者はその理論がコンピュータにも理解可能であるようにすることを目標にしていることである。このことはかなり本質的である。コンピュータ理解可能性を追求することによって、概念の厳密さが重んじられる。それと同時に、人間の理解のレベルである知識レベルとコンピュータ理解レベル、即ち記号レベル(実行レベル)ま

での異なったレベルの間の(ある程度の)連続性が保たれるということである。言い換えると、人間の概念操作がコンピュータの実行で裏付けられる訳である。このことは人間とコンピュータとの意味共有ということの意味している。オントロジーは単なる「概念階層」ではない。そうでなければ従来からある「概念階層」に加えて「オントロジー」という新しい用語を導入する意味がない。オントロジーには以下の様々な形態(機能)がある。

- 1) 共通語彙
- 2) 概念(用語)の階層的記述
- 3) データベースの概念スキーマ
- 4) シソーラス
- 5) シソーラス + 目的からみて必要な概念と概念間の関係との厳密な記述

最後の5)がオントロジーの本質であり、1)から4)までを包含する。このようにオントロジーにはその形態に応じて様々な利用法、あるいは機能の有効利用法があるが、それらを全て同じオントロジーと呼ぶため不要な混乱が生じやすいので、オントロジーに関する3つのレベル分けを行う。

(2) オントロジーの3つのレベル

i) レベル1

オントロジーの基本的な機能は、対象世界に存在する概念の切り出し(選択)とそれらの関係の記述である。最も一般的で簡単な記述が階層関係の記述であり、そこには概念のラベルと階層記述だけが存在する。このレベルを最もプリミティブなものという意味で、オントロジー1と呼ぼう。

ii) レベル2

次に各概念の意味定義(制約)や関係の記述(公理的記述)が加わることによって、オントロジーを利用したモデル構築において種々の適切なガイドや示唆を与えるとともに、オントロジーを用いて記述できるもの全体の性質(Competence)に関する質問に答えることができる。これをオントロジー2と呼ぼう。

iii) レベル3

このレベルのオントロジーはオントロジーを用いて構築されたモデルの、ある問題解決における実行のパフォーマンス(Performance)、即ち、オントロジーを用いて記

述したものが実行されたときの振る舞いに関する質問に回答する。このようなパフォーマンスに関する質問に対しては、本質的に手続き的な記述が必要な場合があり、形式的な公理と証明系では答えることができないことが多いのが現実である。そこで準公理が必要となる。

通常オントロジーと呼んで新しい研究の動向として注目すべきものは、レベル2以降にあるとあって良い。以下ではその代表的な3つの役割について述べる。

(3) オントロジーの役割

- メタモデルとしてのオントロジー

モデルは現実の対象を抽象化してコンピュータ内部に作られる。そして、オントロジーはある対象をモデル化するときに必要となる概念とそれらの間の関係を明示的に規定し、そのモデルはオントロジーが提供する概念と制約の下で作られる。この意味で、オントロジーはメタモデルということができる。

- 設計意図

オントロジーの利点は従来暗黙的であった概念構造を明示的に記述することにある。これはシステム設計者が持っている対象に関する理解、システム設計の意図、すなわち design rationale (DR) を明らかにすることに対応する。オントロジーは、前提とされている条件や環境、解くべき問題が要求する仮定などの暗黙的な情報、そしてそれらを反映した対象の世界の概念化に関わる根本的な情報を明示し、知識ベースの構築を支えるバックボーンとして機能する。

- 標準化

オントロジー工学の主要な役割は標準化にある。今後の知識処理の高度化、高能率化を考えると、標準化の問題を避けて通れない。オントロジーは標準概念の意味を規定するものであり、形式化を通じた厳密さと「内容」を扱おうとする姿勢が標準化に貢献する。

2.3.3 オントロジーに基づく知識処理

エキスパートシステム開発の過程で、内容を扱うことの難しさを思い知らされた苦い経験を活かすべきである。困難さの原因は多くある。その全てをオントロジーが解決するなどという大言壮語は慎むべきであろう。しかし、「Theory of Content」を提供することによって、内容指向研究の前進に大きく貢献することは確信を持って宣言できる。オント

ロジーの記述によって、従来隠されていた様々な本質的な情報が明示され、それを参照することによって従来なかった reflective なシステムの開発が可能になる。即ち、システム自身が何を知っているか、どのような世界モデルに基づいて自分の知識が構成されているか、各知識を構成する基本概念体系はどのようになっているかなど、知識処理を行うシステムとして持つべき基盤知識、及びメタ知識が明示化され、それらを対象とする高度な推論の実行が可能になるからである。次世代の知識処理のために、オントロジーベースの方法論の開発が急務であろう。

2.4 推論

推論の技術動向として、事例ベース推論、類推、定性推論について解説する。これらは、知識を規則で表現する従来の AI システムに対し、どちらかといえば、類似事例の活用により推論をおこなうアプローチをとるやり方の推論方法である。

2.4.1 事例ベース推論

(1) 事例ベース推論が注目される背景

次世代知識システムの基盤技術として、事例ベース推論 (CBR:Case Based Reasoning) が期待されるのは以下の理由による^[26]。

1) エキスパートシステムにおける知識獲得緩和の要請

専門家から経験的知識を体系的に獲得することは容易なことではないが、事例はエピソードとして記憶されているので、獲得がより容易と見られる。また、新しい機能材料や触媒、香料などの研究開発のように、本当の意味での専門家が不在の問題領域では、探索をガイドする理論や方法が確立されていないことから、過去の探索事例を有効に利用する枠組みへの期待は大きいものがある。

2) 探索型問題解決における計算負荷緩和の要請

計画や設計など合成型問題は、一般に、組合せ問題を内包していることから最適解の探索に膨大な計算量がかかるために、過去に解いた類似の事例を有効に利用することにより計算量を節約し、結果として探索効率を向上させるうえで、CBR の導入が期待されている。

3) 事例が優先する問題領域の存在

一般的に利用可能な知識があっても、事例が優先する問題領域は、特に、非工学的な分野において少なくない。例えば、裁判においては、(特に、欧米では)判例の拘束力が強く、法律は後づけたに利用される場合が多い。実務の基本は、過去の事例を有効に利用することにあるともいえる。

(2) 事例ベース推論の一般的枠組み

CBR システムの一般的な枠組みの構成要素および推論の流れを文献^[26]にもとづいて図 2.2 に示す。CBR システムの主たる構成要素について、それぞれの機能的な役割を以下に示す。ここで述べた CBR の枠組みは一般的なものであり、研究者の観点の違いによりさまざまなバージョンがある。

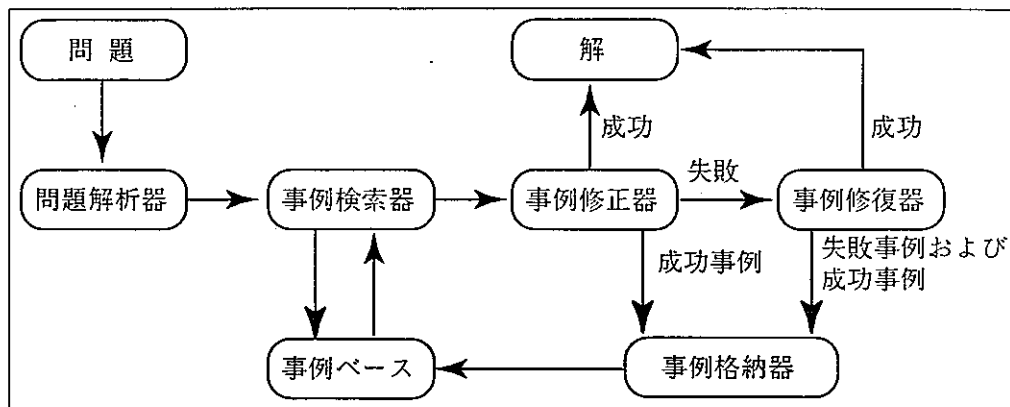


図 2.2 事例ベース推論の一般的な枠組み [28]

- 事例ベース (Case Base)

特徴づけられた問題解決事例の集まりであり、成功事例だけでなく、失敗事例も含まれる。

- 問題解析器 (Problem Analyzer)

特徴づけルールによって問題の特徴づけを行うとともに、予想される問題点を列挙する。

- 事例検索器 (Case Retriever)

与えられた問題の特徴と比べて、最もよく照合する事例を事例ベースから検索する。

- 事例修正器 (Case Modifier)

検索された事例と問題の間で照合しない部分の違いを考慮しながら、領域知識を使って、事例の解に対し修正を施し、与えられた問題の形とする。修正 (modification) の代わりに、適合 (adaptation) という用語を使う場合もある [29]。

- 事例修復器 (Case Repairer)

検索された事例の問題への適用に失敗した場合、領域知識または別の事例を使い、失敗の原因を解析して、同じ過ちを回避するように、該当する特徴づけルールを変更する。さらに、修復ルールによって失敗事例を修復することができれば、これを与えられた問題の解として出力する。

- 事例格納器 (Case Storer)

CBRによる問題解決は、それ自身を新しい事例の獲得とみなし、特徴づけを行ったうえで、成功事例として事例ベースに格納される。同様に、失敗事例も事例ベースに格納される。

(3) 事例ベース推論の特徴

CBRは、次のような特徴を持つ。

- 1) 事例は問題解決の過程が縮約された一種のマクロであり、推論や探索の中間過程を節約できる。
- 2) データベース探索では、正確な検索条件の入力が要請されるが、CBRでは部分的な照合が許されるので、柔軟な検索が可能である。
- 3) 事例の利用が新しい事例を生み出すことから、自己組織化的側面を持つ。
- 4) ほかの問題解決手法と併用することにより、導出解の正当化に利用できる。
- 5) 失敗事例を利用することにより、好ましくない問題点の予測や失敗の回避を行える。
- 6) 事例だけでは解空間を完全にカバーできないことから、最適解を逃す可能性がある。
- 7) 事例間の整合性の維持は困難であり、どの事例を利用するかにより、結果は異なる。

また、研究課題として

- 1) どのように事例を検索するか。
- 2) 事例をどのような形で表現するか。
- 3) 事例間の類似性をどう決めるか。
- 4) 事例の評価をどのように行うか。
- 5) 事例の修正はどのように行うか。

が挙げられる。

(4) 事例ベース推論の応用分野

事例ベース推論の応用分野は、分類、診断、計画、設計等多岐におよんでいる。いくつかの例を3章に示す。

2.4.2 類推^[31]

類推 (Analogical Reasoning)^[30] と CBR とはよく似ている。類推の研究では一般に、ある既知の知識 (基底 (base) と呼ぶ) の一部が未知の知識 (目標 (target) と呼ぶ) に写像される、という定式化を行う。類推の過程は以下の四つのステップからなる^[32]。

- 1) 目標の知識をどのように表現するかを決める。
- 2) 目標の知識に似た基底の知識を選び出す。
- 3) 基底の知識の一部を目標の知識に写像する。
- 4) 目標の知識を適合するように変形する。

言葉遣いこそ違うものの、CBR と全く同じ過程である。類推のモデルをたてるにあたっては、

- ある目標の知識が定まったときに、一般に膨大に存在する既知の知識の中からどのようにして適切な基底知識を選び出すか？
- ある目標知識に対して適切な基底の知識が求まったとして、基底の知識の中のどの部分を目標の知識に写像するか？

という二つの大きな問題が存在するが、これまでのところは決定的な答えは得られていない。

一般に類推と CBR の区別は明確ではないが、それぞれの研究者の関心は異なっているように思える。CBR が応用指向であるのに対し、類推は理論指向である。CBR は対象領域に依存したメカニズムを求めているのに対し、類推は対象領域に独立なメカニズムを求めている。CBR が上記の問題の前者に焦点を当てているのに対し、類推は後の問題に焦点を当てた研究が多かった。このような理由によって、それぞれの研究で好んで用いられる例題の種類と規模がかなり異なる。CBR では機械設計や法律推論などの現実的で大規模な例題を用いるが、類推では「太陽系と原子模型」や小説のプロットなどの人工的で小規模な例題を用いる。類推による推論と学習のメカニズムを現実の問題解決に適用するのが CBR とみなすことができる。

Carbonell が提案した誘導類推 (derivational analogy)^{[33][34]} は以下の過程からなる。

- 1) 何らかの手段で問題を解決するにはその過程でとられた各ステップ (中間状態、各決定とその理由、参照した知識、結果の解) を記憶しておく。

- 2) 新しい問題に遭遇しそれがある計画を直接適用しても解けない場合。目標手段解析 (Means - Ends analysis) などの非類推的な方法でその問題の解析を始める。
 - 3) 解析を始めて、その問題に対する判断過程 (最初になされた決定とそのための情報) が過去におけるそれと一致すれば、その過去の問題についてのすべての判断過程を思い出して4)を始める。もしそのような記憶がなければ解の類推的変換を行ったり2)の手法を続けたりする。
 - 4) 誘導変換過程：想起された誘導類推過程の各ステップについて、その判断が新しい状況のもとでも有効かどうか調べ、有効でないならその部分についての代替案を探す。それもなければ3)に戻る。
 - 5) 誘導過程全体が新しい問題に適合したら、それを次の機会のために記憶しておく。
- 図 2.3に示すように、誘導類推は CBR とほとんど同じものである。

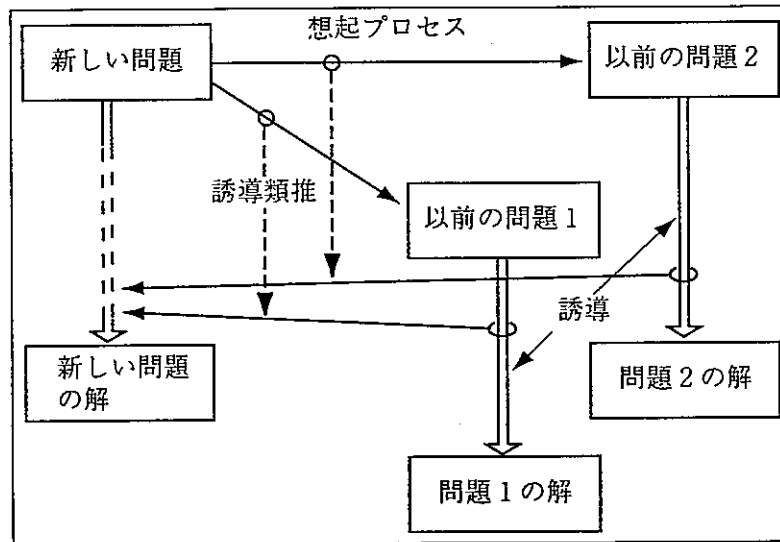


図 2.3 誘導類推 [31]

2.4.3 定性推論 [35]

定性推論は、P.Hayes の Naive Physics から始まる。人間の直観的現象理解に主眼に置いた研究である。例えば、物が落下する時。ニュートン力学の方程式などを解いたりせず、日常生活内で物の振舞に対する因果的な推論が、人間は可能である。P.Hayes の研究は、ナイーブな人間が、自然現象を理解する時の、常識推論の実現が自的であり、特徴としては、記述に一階の述語論理に基づく公理論的方法を採用していることである。

Hayse 自身は、液体の特性に関する述語を対象とすることによって研究を行なった。Hayse によると、基本的な公理的な述語の組み合わせによって、物理現象を記述することができるとしているが、その述語の数は一万から数十万ぐらいだろうと予測している。

(1) エンビジョニング

定性推論の表す概念に、de Kleer の言うエンビジョニングというものがある。物理学が得意な者が問題を解く時、以下の方針に基づき問題を解く。

- 1) 問題の物理的状況から何が起こるか考える
- 2) 微分方程式を解く

一方物理学の問題解決になれていない者が解くと、まず微分方程式を解こうとする。しかし無方針に微分方程式を解く場合、結局その取扱を必要以上に難しくし、計算間違いを起こす原因となる。たとえば有名なローターコースターの例を取り上げてみる(図 2.4 参照)。カートが、X の地点に到達できるかどうか、この問題である。この問題を解く時、曲線の形状や初速度、ループの直径などから、直ちに計算に移ることは、問題の見通しを悪くするだけであろう。物理的問題を解く時に、熟練者が用いる基本は、まず定性的知識 / 推論に基づいて、何が起こるかを心に描くことである。この場合、定性的知識は、運動に関するエネルギー保存の法則や周回運動を可能にする十分な向心力の存在などである。物理学の演習では一般的に、重力による力を mg とし垂直効力を N とする。遠心力を $\frac{mv^2}{r}$ とし、物体に作用する力の釣合とエネルギー保存則により制約条件を作る。そして系の状況を予測し、そこに広がる状況を予測し解答を得るという手順を踏む。これらがどんな条件にあるかによって、このカートが S1 を経て C1 に到達した後、C2 まで至らず振動する、C2 を越えて S3 で落下する、C3 まで垂りループを回って X に到達する。などの可能性があることが予想できる。そしてこのいずれの場合か生じるかはカートの初速度や高さ、ループの直径に依存し、その曖昧さの解決は定量的解析に引き渡される。このエンビジョニングというものは物理系などをなす機構の因果理解である。

(2) 力学系の挙動の自動解析

力学系の理論では、微分方程式の解が陽に得られない時でも、相空間における解曲線の幾何学的特性、特に位相的な特徴を分析することによって解の挙動の定性的特徴を知る為のさまざまな手法が開発されている。このアプローチの研究には、西田^[7]による研究が知られている。そこでの特徴は数値計算による手法と走性的手法を用いることによって理論

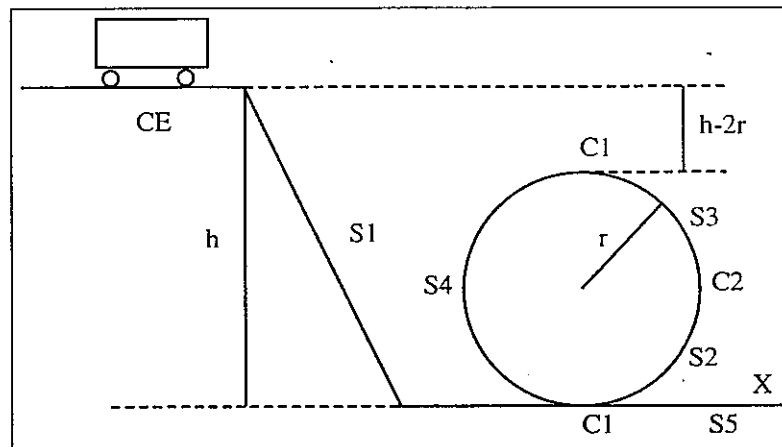


図 2.4 ローラーコースター問題 [36]

的に明らかな間違いなどを除外することによって数値的な誤差を検出に訂正しグラフ化していることである。

(3) 定性微分方程式系

定性微分方程式系の研究については、B.J.Kuipers らの QSIM(qualitative simulation)^[38] に焦点を当てる。QSIM とは B.J.Kuipers らの微分方程式の定性的挙動予測を行うシステムである。そこでは、対象系の振る舞いを数値計算を行わずに記号を用いて抽象化された量の間の代数的な計算によって求められる。

一般の物理、経済、生体などの系では、諸変数の値は時間とともに実数の値を変動する。しかし、系の振舞いを定性的に知りたい時は、値の詳細は必要ではなく、それがどのような範囲にあるかだけがわかればよいことが多い。例えば振り子の動きを定性的に説明したい時は、振り子の重りが支点から見て真下 / 左右 / 左右のいずれかの臨界点にあり、どの方向に動いているかを問題にすればよい。QSIM では中心 0 を境界標にし $\frac{dx}{dt}(t)$ については [正、0、負] のいずれかであるとしか区別しない。さらに、四則、微分、定性的比例関係を用いて記述された定性微分方程式を入力として状態遷移木を出力する。

2.5 機械学習

EAGL 総括報告書^[39]より機械学習についての解説を、次に最近その有用性がされている強化学習について解説する。

2.5.1 研究背景

(1) 機械学習の生い立ち

機械に学習を行なわせる研究としては、まずパターン認識における学習機械の研究が挙げられる。文字や音声などの認識システムでは、認識率を向上させるための調整に非常に手間がかかる。それを自動化して、学習により認識装置を構成する方法が研究されたわけである。この分野は、F.Rosenblattによる1958年のパーセプトロンの提案をきっかけにして盛んに研究されたが、その後、M.MinskyとS.Papertが限界を指摘したために、一時下火となった。このことを反省材料として、マサチューセッツ工科大学においてP.Winstonらのグループにより、学習や類推をコンピュータ上で実現する方法が研究された。これが、機械学習研究のルーツになっている。

1970年代になって、ファイゲンバウムが知識工学を提唱し、数多くのエキスパートシステムが構築されたが、その際の最大の障害は知識の獲得、すなわち人間のエキスパートの知識のルール化にあり、マンパワーの大部分がこの部分に費やされている。現在の機械学習の研究は機械化によりこのボトルネックを解消するために、研究されるようになった。このような機械学習の成果を持ち寄って開かれたのが、1980年にカーネギーメロン大学で開かれた機械学習ワークショップである。このワークショップは1987年から公開のコンファレンスと非公開のワークショップが交互に毎年開かれるようになり、最近では公開のコンファレンスのみが開かれている。1997年は「ミュージックシティ USA」の名で親しまれているテネシー州ナッシュビルで開催された^[40]。

(2) 機械学習の研究分野

最も単純な学習は、状況をそのまま蓄えて利用する「暗記学習」であろう。○×ゲームなどの単純なゲームは、すべての局面に対し、成功した手を記憶しておくことができるから、暗記学習で究めることができる。

人間がコンピュータに物を教える場合に、一般的に成立するルールやプログラムを作って入力していたのでは大変な労力が必要となる。具体例を順に与えるだけでコンピュータが学習を行なってくれば、人間の側の労力が大幅に軽減されることになるので、例からの学習ではその手法を研究している。例という限られた情報から一般的なルールを学習す

るには、多数の例や多くの計算が必要になりがちである。その解決策として数多くの試みがなされており、領域理論の導入、情報量に基づく発見的な知識の導入、コンピュータの側からユーザに質問を許す、生物の遺伝メカニズムの導入などが提案されている。

学習の対象領域で成立する理論が参照できれば、学習効率を飛躍的に向上させることができる。そのような領域理論 (domain theory) を導入した場合の学習を「説明に基づく学習」(Explanation-Based Learning、以下 EBL と略す) と呼ぶ。EBL では領域理論を変換することによって知識が得られ、例はそのための補助的な役割だけを果たすことになるので、領域理論から演繹して学習するという意味で、「演繹学習」と呼ばれている。この学習では、記号処理システムの効率化がなされるものの新しい知識が獲得されるわけではないので、「記号レベルの学習」と呼ばれることもある。EBL の歴史的なルーツは、ロボットの行動計画を高速化するために 20 年程前に研究されたマクロオペレータの学習にある。

EBL とよく似た手法として、「知識コンパイル」および「部分計算」と呼ばれる技法がある。人間による例からの学習を心理学的に分析し、コンピュータプログラムによってモデル化したのが、チャンキングである。この手法は機構的には EBL によく似ているが、技能の改善 (演繹学習) だけではなく、知識の獲得 (帰納学習) 過程をも示すモデルになっている。

演繹学習に対して「帰納学習」では、例に基づいて新しい知識が獲得される。演繹学習と異なり、例題に基づいて学習前に知らなかった新しい知識を獲得するので、「知識レベルの学習」と言われることがある。

人間は過去の経験からの類推により、物事を処理することが多い。類推は推論の一形態であり、学習とは異なるが、かなり似通った面を持っている。すなわち、例からの学習では、一般的な知識を獲得した後で、それを使って推論を行なうことを想定しているのに対し、推論時に例を直接参照するのが「類推」である。類推の考え方を超並列計算機 (コネクションマシンなど) で実現し、スペリングからの音声生成などに応用したのが、Memory-Based Reasoning (MBR) である。事例に基づく推論 (Case-Based Reasoning) では、例をあらかじめ加工するなど他の手法と組み合わせて、自然言語などの応用中心に研究を展開している。

(3) ニューラルネットワークと機械学習

10 年前にニューラルネットワークの研究が活発化したため、「学習」という言葉を使うとニューラルネットワークが連想されることも多い。今の所、ニューラルネットワークは主としてパターン認識で成果が挙がっており、信号レベル (サブシンボル・レベル) の処理を得意としているが、述語論理のように変数を含んだ記述を扱うのは難しい。これに対し、

機械学習はプロダクションシステムの規則や述語論理などを対象にしており棲分けがなされていると言える。ただ命題論理についてはどちらでも扱うことができ、両者の実験的比較の結果が発表されている。

比較に用いられたのは、ニューラルネットワークの代表的手法であるバックプロパゲーション (BP) およびパーセプトロンと、J.R.Quinlan の ID3 で用いられ機械学習においてよく研究されている決定木を用いた手法である。ニューラルネットワークでは述語の学習は普通できないので、機械学習の機構としても ID3 という命題論理の学習システムが使われた。現実に応用で用いられるようなデータを用いて実験を行なうという趣旨で、大豆の病気、チェス、聴覚異常、心臓病、NETtalk の例から学習が行なわれた²。

それによると、両方で学習能力はほぼ同じであるが、ニューラルネットワークの方は学習に非常に時間がかかるという結果が出ている。ただし、データに数値やノイズが含まれている場合にニューラルネットワークが有利であるようである。この結果を応用してニューラルネットワークと記号表現を相互に変換する研究が活発になってきており、記号表現をニューラルネットワークに変換して学習を行い、結果を記号表現に戻して利用する^[41]、決定木^[42]や命題^[43]を抽出する研究などが行われている。ニューラルネットワークを記号表現に変換することで、学習結果が単純化され利用しやすくなる。また通学習気味の表現も整理されて、クロスバリデーションによる評価がよくなることも多い。

このように機械学習とニューラルネットワークにおける学習では、同じ学習といっても対象にかなり違いがある。機械学習の中でも、学習のクラスに応じていろいろなアルゴリズムが提案されているので、対象を見きわめることが重要である。

(4) 計算論的学習理論

初期の研究では、学習機構のアイデアが数多く提案され、プログラムを作成することによって、それを実証するというのが機械学習における研究のスタイルであった。このようなやり方に疑問を述べたのが、計算論的学習理論の研究者たちであり、特定のデータで学習機構が動作したというだけではなく、一般的に学習の計算量を見積もることが必要であると主張している。例からの学習の成否は、例から帰納的に一般的なルールを推論できるかどうかにかかっている。計算論的学習理論では、そのような推論を「帰納推論」と呼び、理論的な解析を続けている。

従来の学習モデルでは、正確かつ確実に正しい学習結果が得られる場合のみを学習の成功とみなしていた。L.G.Valiant は、これをゆるめて近似的にほぼ正しい学習結果を得る

²これらのデータはカリフォルニア大学アーバイン校ホームページの機械学習宝庫 (UCI Machine Learning Repository) : <http://www.ics.uci.edu/mlcan/MLRepository.html> に置かれている。

ための学習モデルを提案した。これは、PAC(Probably Approximately Correct)学習モデルと呼ばれており、理論研究の最も活発な分野となっている。

データ圧縮の考え方にに基づき、データ解析やパターン認識における確率モデルの選択原理として、J.RissanenによりMDL(Minimum Description Length)原理が提案された。MDL原理は、「与えられたデータを、モデル自体の記述を含めて、最も短く記述できるようなモデルが最良のモデルである」と主張している。端的に言う、「簡単なものの方がよい」というしごく当たり前の原理だが、QuinlanとR.L.Rivestがこれを用いて例に含まれるノイズの問題に対処し、成功をおさめた。このことをきっかけにして、計算論的学習理論の分野でMDL原理が注目されるようになり、統計的な手法を学習理論に適用する一つの流れを形成している。

(5) 論理プログラミングと学習

プログラム変換や部分計算の手法は演繹学習と関係が深いと考えられる。さらに、帰納学習の手法を論理プログラミングの観点からとらえ直し、機械学習の手法を論理プログラミングに応用する研究がヨーロッパを中心に活発に行われている。これが帰納論理プログラミングの研究で、1991年3月に最初のワークショップがポルトガルで、1992年6月に2回目が日本で開かれた。1997年9月には7回目がチェコのプラハで開かれている^[44]。帰納論理プログラミングの手法としては、古くはShapiroのMISがある。MISでは、帰納推論の過程でユーザに質問を発することによって、探索の範囲を絞っている。質問への回答に従ってプログラムを合成する過程がプログラムの自動デバッグとみなせるので、論理プログラミングの研究者の関心を集めた。ユーザへの質問をせずにバッチ方式でデバッグを行なう手法も提案されており、例のノイズにも対応できる^[45]。

論理プログラムを実行するには導出(resolution)が用いられるが、MuggletonとBuntineによるCIGOLでは、その過程を反対向きにたどる「逆導出」を帰納推論機構として用いている。これにより、プログラムの構成要素として適切な新しい述語を「発明」することが可能になった。その枠組をさらに整理したものとして、Saturationの技法がある。また、より効率的な新述語発明の手法に関しても、精力的に研究が進められている^[46]。その後、Muggletonは最弱仮説を利用して仮説空間を縮小する手法を提案し、Progolというシステムを構築した^[47]。その際、最弱仮説を導出する手法として、作意(entailment)を逆にした逆作意(inverse entailment)を用いている。

一方、前述のID3では、与えられた正例の集合および負例の集合を最もよく弁別する属性を先に用いて、決定木を構成するようになっている。その際、各属性による弁別の前後において例集合が持つ情報量の差により、弁別の度合が決定される。この方式がQuinlan

自身によって述語論理の学習に拡張され、FOIL システムとしてインプリメントされた。

FOIL の方法により、真偽を判定するプログラムは合成されるが、答を計算するようなプログラムは合成できないので、それに適した手法として、決定的な項だけに仮説空間を制限することが提案されている (GOLEM システム)。これは G.D.Plotkin の Relative Least General Generalization (RIGG) の概念を発展させたもので、論理プログラムの多くはバックトラックを伴わないことから、かなり有効な手法であると考えられる。

(6) 手法が多くなりすぎた。

80 年代前半には夢の技術として語られるのみでアイデア倒れの感もあった機械学習分野だったが、以上でわかるように現在では、千差万別の手法が数多く提案、実現されている。ある応用問題が与えられた場合、適切な学習手法を適切に適用すれば、かなりの問題が解きうる段階になってきたと言えるであろう。しかしながら、学習手法を選択し、その扱いに習熟するのは、専門家にとってもかなり困難である。その解決策として、以下の二つのアプローチが取られている。

- 種々の学習手法を組み込んだツールを提供する。

Clementine³では、C4.5、ニューラルネットワークなどの学習機構に加え、学習結果をグラフ化するツールが組み込まれている。ユーザは学習結果を比較しながら、学習機構を選択し、そのパラメータを調整しながら、よい結果を得ることができる。Kohavi らが開発した MLC++⁴は、決定木による学習アルゴリズム (ID3)、最近傍法、ベイズなどの手法を使って学習を行える。ツールから C4.5、CN2 などの学習システムを呼び出して使うことも可能である。クロスバリデーションなどによる評価ツールも組み込まれ、エンドユーザでも利用可能なツールになっている。

シリコングラフィックスのワークステーションで動作するバージョンでは、評価結果を三次元グラフィックス表示することが可能になっており、機械学習国際会議でデモを行っていた^[48]。帰納論理プログラミングの学習ツールとして GKS^[49]があり、従来の帰納論理プログラミングの弱点であった数値データにも対応できる。これらのツールでは手法の選択はユーザにまかされているが、それがある程度自動化されれば、機械学習の手法が実用に応用される機会も多くなるであろう。

- 複数の学習手法を組み合わせて、欠点の少なく扱いやすいシステムに仕上げる。

³フランスの機械学習の研究者である Kodorotoff が関与したとのことである。

⁴<http://www.sgi.com/Technology/mlc/> より入手できる。

単独では欠点の多い手法も他の手法とうまく組み合わせると扱いやすくなることが多い。このような複数の手法を組み合わせた学習法は以前は統合学習と呼ばれていたが、数年前から多戦略学習と呼ばれるようになった。次節ではこれについて述べる。

2.5.2 多戦略学習への発展

パーセプトロンの研究への反省から、高次の記号処理に基づく機械学習が研究されるようになったが、それが純化されて行き着いたのが EBL であり、あくまで極端に理想化された学習のモデルを示している。したがって、EBL が応用場面で真価を発揮するのは、むしろ他の手法と組み合わせた場合である。それが糸口になり、まず、EBL を核として多戦略学習の研究が始まった。すなわち、「経験的手法と説明に基づく学習の統合」(Combining Empirical and Explanation-Based Learning) 手法である。さらに、表現の変更、構成的学習、ニューラルネットワーク、遺伝アルゴリズムなどを加え、その中の複数の学習手法を統合化する試みが「多戦略学習」⁵と呼ばれている^[50]。

統合的手法の発展多戦略学習の代表的な手法として、理論洗練 (theory refinement) がある。これは、領域理論の誤りを例題に基づいて修正する技術である。理論洗練を行うためには、まず領域理論により例題を説明する。その説明を参照して誤りを特定し理論を修正するので、EBL と帰納学習を組み合わせることになる。その手法の一つである BM-EBL では、次の手順で領域理論の洗練を行う。

- 1) EBL により例を説明し、規則を生成する。
- 2) カバーされない正例がある場合、規則中の各リテラルの Gain 値⁶の低いリテラルを取り除く。
- 3) 規則が負例をカバーする場合、リテラルを追加する。
- 4) 以上の操作でカバーされない正例がある場合、FOIL を用いて不足している規則を生成する。

領域理論が完全、すなわち正例をすべて導き、負例を導かないならば、上のアルゴリズムにより EBL を実行しただけで、規則が導かれる。領域理論が完全でないならば、EBL で生成した規則に対し、リテラルを追加または削除して、完全な規則を得ることができる。

⁵Multi Strategy Learning。以下 MSL と略す。

⁶FOIL で用いられているヒューリスティック。エントロピーに基づき、正例と負例の弁別能力を評価した値。

領域理論を元に規則の叩き台を生成して修正を加えることにより、完全な規則を得るので、FOILにより帰納的な学習だけで規則を導く場合に比べて、少ない例題と学習時間で完全な規則を得ることができる。

Mooney らの EITHER システムは、EBL と帰納だけでなく、アブダクションも加え、典型的な MSL システムになっている。

Pazzani は行為の結果を予測する規則を学習するシステム OCCAM を作成した。このシステムでは、EBL、理論駆動学習、データ駆動学習の3つの学習戦略が用いられている。

Shavlik のグループでは、EBL で生成した説明木に従って、ニューラルネットワークを生成し、バックプロパゲーションアルゴリズムを用いて知識の洗練を行った。説明木すなわち証明木をそのままニューラルネットワークにするという発想は、最初に聞いた時には、かなり安易な感じがしたが、二つの学習パラダイムを統合することにより、ニューラルネットワークの初期構造を決定する問題と、説明構造に微妙な重み付けを導入するという二つの問題を一挙に解決した一石二鳥的な研究になっている。

得られたニューラルネットワークを N of M 形式⁷の条件部を持った規則に変換することもできる。遺伝子情報処理への応用実験では、規則に変換した後の方が過一般化の影響が小さくなり、正解率が向上したと報告されている。

EBL を非演繹的な学習に拡張する試みとして、G.DeJong が「もっともらしい説明」(Plausible Explanation) を用いて学習を行うことを提案している。これにより定性的な領域理論 (qualitative domain theory) のように、厳密な規則と一般的な依存関係が混在している場合にも学習を行うことができる。

Widmer はもっともらしい説明に基づいた学習を音楽情報処理に応用し、和音の生成を試みた。Mozart のピアノソナタを題材として実験すると、生成された和音は原作曲者によるものと一致し、一般化において説明を参照することにより、少ない訓練例で適切な一般化を行うことができた⁸と報告されている。

山口らは理論洗練を応用することにより、和音の生成についての説明に肌理の細かな一般化と特殊化を施せることを示した。音楽教科書に書いてある和音の理論を用いて、メロディより得られたコードの列を元に編曲を行うことができるが、その結果は標準的な編曲結果であるとは言え、いささか味気無いものになる。音楽を理解するのは、知性というよりは「感性」^[61]であろう。感性は完全なパターン、あるいは標準的なパターンから生ずるのではなく、それからの「差異」や「ずれ」の部分によって生じるのだという考え方があ^[62]る。作曲家は標準からわざとずれた編曲を行うことにより、「感性」を醸し出す編曲を行うのである。このようなずれをあらかじめ、組み込んでおくことはできないし、できた

⁷M 個の属性の中で N 個の属性が真の時に全体を真にするという条件の記述方式。医療診断のように証拠が多いほど確信度が高くなる分野で有用であると言われている、

としても個性に依存するのであるから、すぐに変更する必要が生じるであろう。まさに、学習によって「まね」するのに最適の対象である。このシステムは、特定の作曲家の編曲を入力として理論洗練を行い、そのような「ずれ」を獲得する。少々ブロークンな編曲結果にはなるが、かなり面白い結果が得られ、被験者には好評であった。

このシステムをさらに発展させ、特定の人感性を獲得したり、感性に合わせた編曲を可能にしたのが沼尾らの研究^[53]である。編曲によって得られる音符や和音などの構造のどの部分が人に感性を抱かせるのかを獲得するのが目標で、ごく部分的にはあるが、そのような構造を取り出すことに成功している。また、そのような構造が人によって微妙に異なることも確認している。以上の結果より、明確な理論を獲得するだけでなく、漠然とした対象を捉えるためにも、機械学習の有用なことが確かめられたことになる。

以上は EBL と他の学習手法を組み合わせた場合であるが、クラスタリング、遺伝アルゴリズムと帰納学習を統合する手法なども提案されている。

(1) 多戦略学習から多媒体学習へ

以上述べてきたように、MSL のアプローチでは学習の要素技術を組み合わせることにより、目的に合った学習システムを構築する。逆に、要素技術を分析することにより、学習手法の位置関係を明らかにすることができる。このような位置関係はグラフ構造で表すことができ、筆者自身も学習手法を整理するために何度かグラフ構造を用いて図解化を行っている。グラフ構造が単純なうちは学習手法の関係が整理されたような気がするが、MSL として似たような手法が提案され続けているので、グラフがやたらに複雑になる嫌がある。

MSL を単に任意の学習戦略を組み合わせるという見方をすると、やたらに複雑な手法を際限なく構築するだけで、学習を統一的な観点で捉えることができなくなり、学習法の長所と短所のトレードオフを選択するだけになってしまう。そのような混沌ではなく、学習の妙味、すなわち、複数の考えが一致して、「分かった」と感じたり、新しいアイデアを思いついたりする過程を MSL の中から取り出していくことが必要である。

MSL の発展すべき方向は、単に手法を組み合わせるのではなく、形態の異なった情報を組み合わせて学習するアプローチの追求にあると、考えられる。以下で、そのことについて述べたい。

人間が比例関係を学ぶ場合を例として、考察を進めよう。滑車の回転量と巻き上げ量の間の関係、および水槽からの水の流出量と水位の関係は、共に比例関係により説明できるが、人間がその本質を見抜くには大きな困難が伴う。偶然または教師の導きによって、滑車と水槽の共通点を結びつけ、比例関係のような本質的な関係を発見することが、学習過

程の大半を占める。これまでの機械学習パラダイムでは、共通点を見つける部分を無視し、単一の知識表現に変換済の対象のみを扱ってきた。表現された知識が不足すれば、学習は不可能であるし、説明に基づく学習のように十分な知識があるならば、学習過程はトリビアルであると評価されたのは、このためである。そこで、学習を教師から学生への情報伝達として捉え、情報媒体という新しい視点^[54]を設定することにより、学習過程の新しいモデル化の方法を提案する。

ある概念を学習するとき、教師から学生への伝達の媒介となるような対象およびそれについての情報を情報媒体と呼ぶ⁸。比例関係を学ぶときの滑車や水槽が媒体にあたる。媒体の情報は、送り手と受け手で共通に持っており、その情報をテコにして、より高次の情報が伝達される。日常の言葉では、「イメージ」という言葉で、媒体の情報を指すことが多い。「どうもイメージがわからない。」「イメージがとらえられない。」といった具合である。

学習を分析する際、従来からある機構中心の見方では、情報の受け手のみに注目していた。そこで媒体に相当するものは、帰納学習における背景知識やバイアス、説明に基づく学習における領域理論である。MSLとして、帰納学習と説明に基づく学習を組み合わせたとしよう。実はこれは、学習手法を組み合わせたMSLというより、領域理論とバイアスという二つの媒体を組み合わせた、多媒体学習 (Multi-media Learning、略してMML)なのである。「多媒体」という言葉は、もちろん巷で流行している「マルチメディア」に関連している。また、視覚や言葉などといった本来の意味での媒体に依存したコミュニケーションおよび推論の研究が、いくつかのグループで研究されている⁹。ここで言う媒体はそれをさらに一般化したもので、情報の送り手と受け手とに共通に存在し、情報伝達を媒介する情報を指しており、より抽象化された考え方になっている。データ駆動学習、理論駆動学習やニューラルネットワークなどの各学習戦略も、データの組合せ方法、理論、ネットワークトポロジといった特有の情報を伴っており、学習手法を組み合わせることは、それらを媒体として導入していることに他ならない、アナロジーは対象と新しい媒体間の対応づけ (mapping) を行っている。それが正しかった場合には新しい媒体が学習に採り入れられる。人間は、各媒体ごとに多くの情報を互いに無関係なまま保持している。発見学習のような高次の学習は異種媒体間の対応づけが契機となって起こると考えられる。

多戦略学習 (MSL) システムについて概観し、それらを見通し良くとらえる見方として、多媒体学習 (MML) の考え方について述べた。MSLの学習手法が出てきた場合には、MMLで捉え直すようにすれば、その本質が理解しやすいし、学習手法の乱立状態を整理してい

⁸以下、「情報媒体」を「媒体」と略記することがある。

⁹ただし、人間の学習研究の多くがマルチメディア絡みなのに対して、マルチメディアに関する機械学習の研究はほとんど見当たらない。

くにも役立つであろう。今後は、MSLの手法を提案していくばかりではなく、MMLの観点で応用に応じた媒体を組み合わせる手法が必要である。そうした試みの一つとして、日本でも企業を交えて多戦略学習のプロジェクトが進行中である^[5]。たとえば、通信カラオケにおいて音楽に合わせた画を選択する手法^[6]も研究されており、この場合は文字どおり「マルチメディア学習」(MML)になっている。

2.5.3 強化学習

バックプロパゲーションの代表されるようなニューラルネットの教師付き学習 (supervised learning) は、ネットワークの目標とすべき出力パターンが与えられていることを前提としている。近年、出力の目標パターンは与えられず、出力の良し悪しを示すスカラー値の評価信号だけが与えられる場合に、それを最大化する出力を学習する枠組、強化学習 (reinforcement learning) が、自立ロボットや学習機械の開発と、脳の学習モデルの両面から注目を集めている。

強化学習研究の原点は、思想的には50年代後半のSamuelのChecker Playerに関する研究、技術的には60年前後のマルコフ決定過程とダイナミックプログラミングに求められる。その後、20年以上の空白期間があったが、80年代後半になって強化学習の重要性が認識され90年代に入り理論面での発展があり、工学的にも応用され今日に至っている。

強化学習の基本的な原理は、様々な出力パターンを確率的に試みて、より良い結果に結びつく出力パターンを選択する、というごく自然な「試行錯誤」によるものである。学習に使用される、評価信号は強化信号 (reinforcement signal) と呼ばれ、課題の成功や報酬は正の強化信号に、失敗や罰は負の強化信号に対応する。

2.6 自然言語処理

2.6.1 自然言語処理の動向

我々が日常使っている言葉(自然言語)をコンピュータにより処理しようとする研究は、コンピュータ創成期の頃から行なわれてきた。実用に供せられている成果も数多く得られている。例えば、カナ漢字変換やワードプロセッサは、我々の身の回りに浸透しており、いまや文書作成のうえでの必需品といっても過言ではない。また、音声認識装置や音声合成装置、あるいは機械翻訳システムなどの製品も現れてきている。自然言語のコンピュータ処理には困難な点が多くあり、まだ満足できるレベルにないシステムもあるが、今後の研究の進展にともない、より使いやすい自然言語処理応用システムが現れてくることは間違いない。

さて、自然言語をコンピュータ処理するためには、二つの側面からの研究が必要である。一つは物理的な音(音声)を処理するための研究であり、もう一つは音声の意味する内容に関する研究である。従来、これらは音声処理や自然言語処理として別個に研究されてきたが、近年、「音声言語処理」(Spoken Language Processing)という名のもとに、音声処理と自然言語処理を統合的な観点から研究しようという大きな流れが世界的にでてきている¹⁰。例えば、アメリカでは、先端研究計画局(ARPA: Advanced Research Projects Agency)が中心となり、各大学や研究機関が協力して言語技術(Human Language Technology)に関する一大プロジェクトを推進しているし、日本でもATR(Advanced Telecommunications Research: 国際電気通信基礎技術研究所)^[57]を始めとして、各大学や企業で音声言語処理に関する研究が精力的に進められている。

また、音声言語処理における大きな特徴として、「コーパスに基づいたアプローチ」をあげることができる。コーパスとは、電子化された(すなわち機械可読な)大量の音声・言語データを指す用語であるが、このような大量の音声・言語データから、音響的あるいは言語的なモデルや知識を客観的かつ定量的に、しかも自動的に獲得することにより、高精度で(accurate)、適用範囲が広く(broad-coverage)、頑健な(robust)音声言語処理システムを構築しようという研究が広く行なわれている。コーパスに基づいたアプローチは、従来の人工知能的アプローチの抱えていた問題点である対象領域の狭さや拡張性の乏しさを補うことのできる新しいアプローチであり、今後の音声言語処理の中心的な方法になると考えられる。

¹⁰<http://gamma.is.tokushima-u.ac.jp/member/kita/index-jp.html> にレポートのリンク集がある。

2.6.2 今後の研究の方向性

辻井の文献^[58]では、言語処理研究のこれまでの成果、解決されていない課題について述べ、今後の研究の方向性を研究の再構築という観点から示唆するものである。以下にその内容を示す。

過去10数年の経験から、もうすでにいくつものグループが再構築のための研究を始めている。実際、この5年間ブームとなっているコーパス中心の研究は、定義すべき言語、あるいは、処理すべき言語を言語使用の実態から定めていくという立場である。これは、Native-Speakerの直観に頼り、実態的な言語の使用から切り離された言語を研究していた従来の研究へのアンチテーゼになっている。

以下では、いくつかの次元に分けて、再構築のためには、どのような方向の研究に努力が注がれるべきかの議論をする。

(1) 新しい応用分野

現時点では、広範囲の言語使用すべてに対して、一般の人間と同程度の理解を示す言語処理システムはあり得ない。しかし、工学の立場からは、

- 1) 人間を大きな一部としてシステムに組み込めることから、自律的なシステムにこだわる必要はないこと
- 2) システムの目的にとって、必須な部分のみを、必要な深さで理解すればよいこと
- 3) 対象分野を絞った部分言語を対象にできること

などから、現時点で、十分応用システムを開発できる段階にきている。むしろ、使用者が何を必要としているかの分析から始めて、応用システムのイメージを作るのが先決である。

例えば、ドイツのGMDでは、人間どうしの電子メールでの議論の流れを一部理解し、必要な情報の整理や検索を手助けするシステムの研究が行われている。T.Winogradが以前に提案したComputer-Co-ordinatorのようなものであるが、使用者がある程度テキストをアノテートして、さらに手助けする。知的な検索システムと会話システムの融合体のようなシステムである^[59]。

研究的なおもしろさ(複数人が関与する対話と書き言葉の中間的なディスコース、議論のモデル Computational Dialectics 一など)、着眼(電子メールによる議論の交通整理というニーズの大きい課題)、可能性(人間がかなり援助できる、システム自体が議論の参加者ではないから完全な理解は不要など)から、どこまで進展しているのかわからないが、かなり気に入っている。

退院サマリーからの情報抽出も、テキストのすべての部分を理解する必要はない。このような応用システムから、障害者の援助システム、翻訳者を助ける TM(翻訳メモリ)の高度化まで、さまざまなシステムイメージが考えられよう。本稿の主題ではないが、「役に立つ」システムを世に出すことは、研究スポンサの信頼を獲得する、再構築の隠れた最大の課題であろう。

(2) シジフォス状況の解消

言語処理技術者が持つフラストレーションの一つには、専門辞書、部分言語用の文法といった言語知識の構築に多大の労力を要すること、したがって、将来にわたってこの状態が続いて、新しい応用や異なった部分言語が与えられるたびに、シジフォス的な労力があると感ずることである。

シジフォス状況を解決する提言は、簡単ではない。「言語リソース、ソフトウェアともに、モジュール化と再利用を図る」が基本である。ただ、ソフトウェア科学・工学を教育された技術者が、ソフトウェア設計論と高級言語を使っても現在の困難が残っているのは、言語処理に固有な原因があるからである。

その原因の大きなものは、すでに議論したように、1) 知識と言語の問題から、現時点では、意味や理解まで取り込んだ一般目的の文法や知識が作れないこと、および、2) 文法自体のコミュニケーション環境への依存である。この困難のために、再利用する場合に、個々のモジュールの内部に至るまで変更する必要があることが多い((4)項参照)。むしろ、モジュールの再利用よりも、再利用の際のモジュールの調整(adaptation)や新たな知識の獲得(knowledge acquisition)の技術が重要となる((5)項参照)。

この調整や獲得を容易にするためには、例えば、網羅的な巨大文法を共有するよりも、拘束の緩い、文法のコアだけを規定した文法を共有し、曖昧さ解消に必要な分野固有の制約や、言語と「概念」(あるいは、理解のコンポーネント)の相互関係などは、システムごとに調整・学習させるなどの工夫がある。共有される文法のコアとは何か、そもそも、そのコアは CFG の文法規則のようなものか、あるいは、例えば、HPSG の原則のようなものか、など、共有化と調整(adaptation)の容易性の観点から研究する必要がある((5)項参照)、辞書も、巨大な知識辞書ではなく、言語内の辞書(例えば、Closed-Class-Word の詳細な辞書など)を共用し、それ以外のは適応技術にまかせる。

ソフトウェアも同様で、例えば、個々のシステムごとに必要となる個別的な Robust-Parsing の機能が、パーシング過程のなかに追加できるようにする。すなわち、パーザ全体が一つのモジュールではなく、より粒度の細かいモジュール化の研究が望まれる。

(3) システムのアーキテクチャ

知識と理解の解決が、一般的に困難である以上、これに全面的に依存するアーキテクチャは避けるべきである。狭い分野に限定しても、テキストの意味と分野知識との間に完全な写像があることは、まれである。多くの場合、その分野の知識で解釈できない一般的な表現が、テキスト中に現れる。

例えば、理解を翻訳に取り入れるのであれば、全面的な理解を前提にした中間言語方式の翻訳システム^[60]よりも、部分的な理解を質の向上に漸進的に反映する ET-G^[61]の枠組みが良い。また、情報抽出 (Information Extraction) や会話への応用では、重要な情報が現れている部分については、知識に至る深い解析を行うが、そうでない部分は無視できるパーシング方式 (partial-parsing) をとる^[62]。これは、キーワードスポッティングと従来の解析手法の中間的な手法となろうが、その一般的な構成はまだ十分研究されていない。

(4) 知識・意味の取込み

知識や理解を取り込む際には、システムの目的に応じて、どのような理解が必要かを見極めることが、最も重要になる。この部分は個別的になるので、ここでは、「知識・意味」の処理が一般に必要とされる「曖昧さの解消」に焦点を当てて議論する。統語・語彙の曖昧さを「知識・意味」を避けて、例えば、統語構造の頻度的偏りで解消する方法もありそれなりに有効であるが、ここでは、この問題に「知識・意味」を取り込む手法に焦点を当てる。

手法は、単語と「概念」の図式で、「概念」(すなわち知識)の側の処理とするか、単語の側の処理とするかで、大きく二つに分けることができる。

1) 世界知識からの制約

Alshawi^[63]の「現在の言語処理システムは、言語の意味論的な制約よりも、語用論的な制約(すなわち、言語が表現している対象世界の持つ制約)を使って成功している」というコメントが、この立場を代表している。この立場からは、単語の持つ意味論的な制約は、曖昧性の解消に使うには弱い、とされる。この立場と、この立場に立ったときに解決すべき問題は何か、を具体例で見よう。

動詞“to match”は、分野を限定しないと、実にさまざまな事態を表現するのに使われ、日本語への翻訳を考えると、語彙的な曖昧さの高い単語である。ところが、Unix マニュアルに120回出現する用例を観察すると、「(かっこ)が別の(かっこ)と対応する」と「(文字列)が別の(文字列)と一致する」という二つの事態だけが、この動詞を使って記述されている。どちらの事態が記述されているかで、日本語動詞

を切り換えればよい。すなわち、この語彙的曖昧さの解消には、名詞(の指示するもの)をかつこと文字列という意味ソートに分類し、目的語がどちらのソートに属するかをチェックすればよい。これは、“to match”の持つ意味的な制約ではなく、「Unixの世界では、この単語は二つの事態しか表現できず、また、この二つの事態には、特定のクラスに属する・もの・しか関与できない」という語用論的な制約である。この種の制約が分野を限定すると可能であり、語彙的曖昧さだけでなく構造的曖昧さの解消にも、役に立つ。上の例は、分野限定が強い場合には、単語と「概念」の間の柔軟な写像は必要なく、これをバイパスして、単語と「概念」を直接リンクできる、という例になっている。

2) 浅い意味的連関

1)の手法は、対象世界が広がり、言語使用の幅が広がった応用システムには、使えない。記述対象の世界が持つ制約を言語レベルでの制約として使うために、言語表現の「対象世界からの相対的な独立性」が失われ、システムがぜい弱(fragile)になるためである。これに対して、例えば、異なった統語構造のコーパス中での頻度や語彙の異なった用法の頻度を使って、優先される解釈を選択するといった、意味や知識での処理を放棄する方法、あるいは、単語間の相互情報量などから優先される解釈を決めるなど、意味的な連関を間接的に単語(間)の統計量に反映させる一連の手法がある^[64, 65, 66]。「概念」領域を明示的には分析しない点で、ニューラルネットワークによる手法、例に基づく手法なども、ここに分類できる。

1)の手法は非常に強力であり、現実には多くのシステムで使われている。ただ、“to match”の例からもわかるように、与えられた限定世界がどれだけの「概念」からなり、単語と「概念」がどのように対応するか、また、「概念」がどのような制約に従うかは、自明ではない。システム開発時のジジフォース的状况の大きな原因は、このような制約が試行錯誤的にしか発見できないからである。したがって、この手法が工学的な方法として自立するためには、これらの概念やその間の制約関係に関する知識をコーパスから(半)自動的に獲得したり、ソート制約の粒度を自動的に調整するなどの技術が必要となる((5)項参照)。

また、語彙的な曖昧さに限っていうと、必ずしも、その語彙と統語構造で直接的に関係する語によって解消されるわけでもない。例えば、“After the strike, the president/umpire sent him away”中の“strike”(労働者のストライキと野球のストライク)の語彙的な曖昧さが、“president/umpire”で解消できるといったように^[67]、周辺の単語の存在が語彙の曖昧さを解消することも多い。このような現象には、言語の構造的側面に強く依拠する1)の手法は使えない。むしろ、構造にあまり重点を置かない2)のような処理が有効になる。

ただ、2)の手法は1)よりも「弱い」(したがって、誤りの多い)手法である。また、知識レベルの処理が必要な応用では、いずれにしても、単語と概念との写像は必要となり、2)の手法だけでは完結しない。例えば、情報抽出のような応用では、システムの目的にとって重要な部分は1)の手法、そうでない部分に対しては、2)の手法といった組合せが必要となろう。前項の partial-parsing 的な手法が、意味・知識レベルでも必要となる。また、1)の手法のせい弱さを回避し、かつ、2)の「弱さ」を補強するために、1)と同じような意味ソート間の関係を設定するが、あまり厳密でない言語シソーラスのレベルにとどめ、また、その関係も制約ではなく、統計量に基づく優先度として使うといった、1)と2)の中間的な方法も研究されている。有望な方向であろう。

人間の場合でも、“The astronaut married a star”で、いったん、“star”が「天体の星」に、その後、「人間のスター」に解釈される、といった現象を考えると、1)と2)の処理が別個に、しかも統合的に動作している可能性もある。

(5) 適応・学習の手法

これまでの議論からわかるように、言語処理の多くの困難の解決が、この適応・学習手法にかかっている。コーパススペースの研究が、ここ数年、非常に活発化したのは、多くの研究者がこの問題意識を共有しているためでもあろう。すでに、良い解説記事^[68]もあるので、ここでは、個別の手法には立ち入らず、特に気になっていること、および我々の研究グループの興味に限って議論する。

1) コーパスの選択とその量

現在、多くの研究が大量のコーパスを求めて、大量に入手可能な一般的なコーパスからの知識獲得を目指している。しかし、これまで議論してきたような、適用範囲と目的を限定した応用システムの開発・設計に、コーパスからの知識獲得手法を使う場合、あるいは、既存の言語リソースの適応(adaptation)に使う場合には、比較的小量のコーパスからも結果が得られるような手法が必要になる。応用分野を限定した際に、巨大なコーパスが手に入ることはまれである。小量ではあるが、そこでの言語使用が限定されているコーパス(例えば、上の Unix マニュアルや退院サマリー)からの知識獲得や言語リソースの適応技術を開発する必要がある。

2) 正解の基準

標準的な言語知識を前提にし、その知識がコーパスから獲得されたことをもって正解とするなら、結局、人間の直観に基準を置くことになり、我々の考え落しを少なくするというだけで、コーパスを使う意味はあまりない。必要なのは、標準的でな

い、その部分言語固有の言語知識を獲得することではないか？この場合には、我々があらかじめ期待する結果を基準とはできなくなる。

3) 理論への依存性

獲得する言語知識の抽象度が上がるに従って、知識の定義が理論依存になる。例えば、動詞の格構造を獲得するといった場合、動詞に格構造を想定すること自体、ある理論の枠組みに關与することになる^[69, 70]。しかも、どの理論に關与するかで、格構造自身の定義が変わる。同様に、言語の統語規則を獲得する、あるいは、それを部分言語に適應する手法を研究するといった場合、統語規則そのものをどう表現するかで、獲得・適應される知識の形が変わる。CFGを骨格とする文法と、HPSGのように Principle を中心にし、語彙項目に言語的知識を集約する文法とでは、大きな違いがある。この分野の研究は、そろそろこの種の問題を真剣に議論する時期にきたのではないか。

以上の三つの問題は、どうも密接に關係しているようである。例えば、少量データからの知識獲得をうまくブートストラップするためには、知識獲得のシステムはまったく白紙の状態から出発することはできない^[71]。特に、抽象度の高い、すなわち、理論への依存度の高い知識の獲得を目指すほど、この傾向が強くなる。この場合には、ブートストラップの最初の段階を、その理論に基づいて与えることになる。また、理論の選択は、獲得すべき知識の形態を規定し、同時に、正解の基準を与えることになる。また、少量データからの知識獲得では、人間の介在を含めた漸近的な獲得方法^[72, 73]を取る必要があると思われるが、これは、知識獲得過程を細かな段階に分けること、すなわち、人間の直観とコーパスでの言語使用とをより細かいステップで比較することにより、二つ目の困難をある程度避けることになる。

また、正解の基準を人間の直観に頼る場合には、その基準が安定しているところから出発すべきであろう。この点では、二言語対照の対訳コーパスから翻訳の知識を求める研究などは、コーパス自体に正解が明示されていることから比較的楽である^[74](それでも、一般化の問題は残るが)。そうでない場合には、人間の直観が安定しない一般用語に関する知識までを一度に獲得するのではなく、単語と「概念」の対応が安定している専門用語性の高い語の知識を獲得し、獲得結果を獲得研究の研究者ではなく、対象分野の専門家が評価する、などのきめ細かな配慮が必要になってきている、と思う^[75]。

理論と知識獲得、少量のコーパスという観点からは、Pustejovskyの研究^[76]などはもっと注目されてよい。この研究では、彼の Generative-Lexicon をその理論的な枠組みとし、待定分野の専門性の高い用語を中心に知識を獲得する。良い着想だと思う。

我々のグループでは、この専門用語に関する知識獲得^[77]のほかに、統語的な知識の獲得研究にも興味を持っている。この場合には、知識のブートストラップをどうするかが理論依存的になる。最初は、簡単な CFG 骨格のユニフィケーション文法を考え、その規則の部分集合から出発していた^[78]。現在では、種々の考慮から、メタ知識としての原理 (principles) とオブジェクトレベルの知識とを区別する HPSG のような枠組みのほうがよいのではないかと考えている。すなわち、原則などのメタ知識と Closed-Class-Word に関する知識をブートストラップ用に使い、Open-Class の単語に関する知識を獲得しようというわけである^[79]。この目的のために、HPSG をベースにしたパーザの高速化とその耐性を上げる研究を行ってきた^[80, 81]。そろそろ実際のコーパス処理に適用できる程度の速度と耐性を持つシステムになってきたので、知識獲得研究を始めようかと思っている。「乞う、ご期待」である。

(6) おわりに

言語処理と AI の本質的な差は、AI の理論がその分野の性質上、「概念」と筆者が呼んだ領域での理論構築に向かわざるを得なかったこと^[82]、また、知識工学もこの領域での処理を対象とせざるを得なかったこと、である。むしろ、筆者の主張は、AI-知識工学の失敗から、「言語処理は安易にこの領域での処理に期待してはいけないこと、むしろ、課題は、この領域での処理を部分的に取り入れて(あるいは避けて)、いかにシステムを設計するかにある」という点である。

また、知識工学の知識獲得も、「概念」領域での専門家の知識という、ほとんど観察手段がない知識の獲得を目指したのに対して、言語工学からの知識獲得は、テキストコーパスという観察可能な大量の実体から出発できる。獲得すべき知識も、「概念」領域にたどり着く以前の、言語の持つ規則性に関する言語知識が主体である。「概念」領域での知識も獲得する必要があるが、あくまで、言語現象と処理目的との関連での概念である。筆者自身は、知識工学からのオントロジー構築といった分野も、健全な方法論をとるためには観察可能な言語データ(コーパス)から出発するのがよいと思っている。

前述の「適応・学習」の議論は、一般性を目指すものとしての理論を個別性の高い処理システムの設計手法にどう反映するかの議論でもある。AI と知識工学が理論と工学との乖離から陥った不毛に、計算言語学と言語工学は陥ってはならない。

2.7 エージェント

エージェントの正確な定義については、研究者間で議論が続いており、明確な定義は存在しない。エージェント技術の現状を解説した文献^[87]でも、一般的なエージェントの概念をあげ解説しており、また、研究者のエージェント観をまとめておおよそそのエージェント観を見出した文献がある^[89]。この文献では、

麻生英樹、中島秀之、橋田浩一(電総研)

大沢英一、竹内彰一、長尾確(ソニー)

片桐恭弘(ATR)

桑原和宏(NTT)

北村泰彦(大阪市大)

西田豊明(奈良先端大)

山田誠二(大阪大)

横田一正(京都大)

(順不同敬称略)の意見をまとめたものであり、本文中には名字のみを表記して引用している。

ここでは、この文献を中心にエージェントの定義をはかり、最後にその標準化について動きを解説する。

2.7.1 エージェントの概念

(1) 現状を認識する

回答を分析すると、エージェントとは自律的なシステムの総称(長尾)と考えるのが一般的なようだ。しかし、それでは「エージェントとは何か」という問いを「自律性とは何か」という問いに言い換えたに過ぎない(橋田)。その問いに答える前に、まず現状認識を試みよう。エージェントという用語はさまざまな状況で、微妙に異なる意味をこめて用いられているようである。例えば、以下のような使い方がある(竹内、北村、西田、大沢)。

[概念レベルの用法]

1) 自律知能を目指す用法

a) Autonomous agent : 各自の意思決定原理、機構に基づき動作する。自律性を強調する場合に用いられる。

b) Intelligent agent : 例えば心的状態(メンタルステート)を持ち、問題解決や学習機能を有する。知性を強調する場合に用いられる。

2) 分散知能を目指す用法

- a) Society of mind^[84]：知性を実現する機能単位をエージェントと呼ぶ。脳と心の働きが特殊化された機能単位の相互作用で生じると考える。
- b) Multi-agent：個々の機能ではなく、協調や交渉などの相互作用を研究対象とする。エージェントは相互作用を生じさせる基本単位。

[応用レベルの用法]

1) Software agent

ネットワーク内に存在する自律的なソフトウェアの総称。利用者の電子秘書(代理プログラム)として働く、あるいはネットワーク内でプログラム間の仲介を行う。Network agent と呼ばれることもある。

2) Interface agent

計算機の新たな利用者インタフェース、利用者とコミュニケーションするソフトウェアがエージェントと呼ばれる。表情を持つなど擬人化されたものも多い。

3) Believable agent

迫真性を備えたエージェント。情感を持ち(持つように感じられ)、通常のソフトウェアを超えた存在感を有する。

[実装レベルの用法]

1) Agent oriented programming

プログラム方法論、および言語。オブジェクト指向の発展型としてエージェント指向を考える。

2) Mobile agent

ネットワーク内を自由に動き回る機動性を有し、利用者に必要な情報を収集する。

3) Telescript agent

General Magic 社の提供するスクリプト言語およびプロトコルネットワークを通じて送出され遠隔ホスト上で動作するプログラム(遠隔プログラミング)がエージェントと呼ばれる。

これほど多くの使い方があれば、単にエージェントというとなんか意味が曖昧になる(竹内)のは止むを得ない。以下では、冒頭の問いに戻って自律性とは何かを議論する。

(2) エージェントとは何か

自律的なシステムを内面から定義すると、やや間接的ではあるが、「その挙動を説明する際に、過度の複雑化を避けるためには信念、効用、指向性などの用語を用いる必要があるシステム(橋田)」、あるいは「振舞いを記述・予測・説明するのに知識・信念・意図などの心的態度を帰属させて、それを利用したほうが容易な対象(片桐)」となる。この定義に素直に従えば、エージェントは「意思決定原理・機構に基づき、外部から得られた情報に対して、自己の信念や興味(願望、意図)に応じて行動するモジュール(大沢)」として設計すべきであろう。しかし、自律性をどのように設計するかは明確ではなく、タスクやドメインによって達成すべき自律性の度合いは変わってくる(長尾)のが実状である。

一方、外面から定義としては、「系の外からは、自律的に挙動しているように見える機能単位(山田)」となる。「他のエージェントとの組合せ(協調、協働)によって、新しい機能を創出できる(麻生)」ことも重要である。認知的側面を推し進めれば、エージェントはメタファの一つで、人間的特性を(部分的に)備えたものとなる。すなわち、「視覚的、聴覚的に人間的な特性を表現することにより(つまりは、人間の音声や顔、表情を使うなど)、認知的理解のしやすさを改善しコミュニケーションを容易にするもの(竹内)」である。

応用レベルでは、「利用者の代理として動作するプログラム」(桑原)がエージェントと呼ばれる。複雑な仕事を利用者に代わって実行し、情報をフィルタにかけ、利用者が必要とするコミュニケーションを代行する(竹内)。Apple社の優れたコンセプトビデオに現れたKnowledge Navigatorのような高機能のものから、Knowbotのように情報フィルタとして働く単機能のプログラムまでの総称として用いられる。

エージェントの定義を「自律性を有するシステム」とすれば、Telescript^[85]のような「他計算機に送信されるスクリプト言語で書かれたプログラム」をエージェントと呼ぶのは抵抗があるかもしれない。しかし、代理プログラムも高機能なものには自律性が要求されるであろうから、どこを強調するかの違いで概念レベルの定義とそれほど矛盾するものではない(中島)。

実装レベルの定義はさらに難しい。「オブジェクト指向からエージェント指向へ」というスローガンを耳にする。エージェントは「自律性を持った計算主体」である。オブジェクトとの違いは、計算主体の複雑さだろうか(横田)。オブジェクト指向はプログラムの再利用などの必要性や、GUIなどの具体的なアプリケーションがあってブームになった。エージェント指向はプログラムの実行環境が複雑になり制御法を事前に設計しきれないという理由や、ネットワークやヒューマンインタフェースへの応用という具体的な問題があるために議論が活発になっている(長尾)。

旧来の自律的なシステムは“物理的”自律性を問題にしてきた(つまりロボット)が、エ

エージェントは“情動的”自律性を問題にしている。その意味ではオブジェクト指向の素直な延長線上にあって、実際並行オブジェクトとはあまり区別できないかもしれない(中島)。

エージェント指向の具体例としては、Shoham が AOP(Agent-Oriented Programming)^[80] を提唱し、信念や目標を記述可能な Agent0 と呼ばれる言語を提案している。しかし、今のところ応用システムの多くで採用されているという状況にはない。オブジェクト指向における Smalltalk に相当する言語は、現時点でエージェント指向には存在しない。そのためか、未成熟な概念であるエージェント指向と、かなり明確となったオブジェクト指向との相違に関する議論は発散しがちである。あえて相違を明確にしようとするれば、現状のコンセンサスを超えて、エージェント指向に過剰な定義を与えかねない。

エージェント指向がソフトウェア開発方法論や言語として定着するには、まだかなりの時間を要すると思われるが、手掛りがないわけではない。オブジェクト指向に比べ、エージェント指向とコミュニケーションの関係は密接である。異種の知識とデータベースの間でのコミュニケーションを実現するためのオントロジーや、エージェント間の交渉プロトコルの研究が盛んであることは、オブジェクト指向との相違である。こうした技術を核としてエージェント指向が定着する可能性はあるように思う。

2.7.2 エージェントの核技術は何か

エージェントに要求される技術には

自律性

知性

コミュニケーション

擬人性

パーソナリティ

などがある(竹内)。自律性に関しては、以下の技術が核となると考えられる。

- 環境認識・問題解決機構：

短期適応のための技術である。エージェント外部の状況を認識(perception)し、自らの行動計画(action)のなかに取り込む(北村)。認識技術は他のエージェントのモデリング(プラン認識)を含み、行為に関する技術は共同行為のプランニングなどを含む(長尾)。こうした技術を実現するためには、資源限定状況下での合理的な実時間推論(大沢)が重要となる。

- 学習機構：

長期適応のための技術である。単体の学習では、例えば Pattie Maes がデスクトップ環境で、学習機能を持つエージェントを実装し話題を提供した(竹内)。マルチエー

エージェントでは、プロトコル学習など集団の自己組織化が長期適応に相当する。現状では低レベルな技術が現実的かつ有効で、Animal to Animateの研究などが参考になる(山田)。

コミュニケーションの核技術には以下の2種がある。

- 知識共有：

エージェント間のメッセージを表現するための共通言語を設計する。さらに、エージェント間での連携を促進するために、情報ハブとしての仲介機能と共通オントロジーを構築する(西田)。

- 調整：

他エージェントと調整して、問題解決を効果的に行う。交渉や組織化のためのプロトコルが重要となる(北村)。

ブレークスルーの芽は環境との相互作用を考えるとところにある(中島)。自律性のシステムティックな設計法、自律性と可制御性の折合いをどうつけるかの研究が必要(橋田)である。また、情報の内容を扱うための枠組みとして、セマンティクスの研究(片桐)が必要である。しかし現時点で、ブレークスルーと呼べる技術が生まれているかとの問いには、否定的な回答が多い。商業的に一部企業(General Magic社のTelescript、Apple社のKnowledge Navigator)のキャッチフレーズが先行している(桑原)と危惧する声もある。

一方、ある程度研究が進んだ個別のテーマにブレークスルーを求めるのではなく、それらを統合することが課題だという見方もある。統合したものが実世界でパフォーマンスを出せるかというのはここ数年の共通問題意識である(竹内)。エージェントだけですべてを処理するのは不可能で、既存のソフトウェア技術(分散処理、分散オブジェクト指向など)との関係、融合が必要(桑原)だろう。問題を個別に撃破するよりプラットフォームを考える必要がある(横田)。エージェントのグループを一つのエージェントとみなす機能が必要(中島)という意見もこれに通じる。

(1) エージェントの応用は何か

エージェントの最大の応用は、ネットワークに基盤を置いたものとなるだろう。Internetなどのネットワークの普及、WWWなどのネットワークに分散した情報資源の増加(竹内)によって、発信される情報量が操作可能な情報量をはるかに超える事態となった。ネットワークのなかを自律的に動き回って利用者のほしい情報を集めてくる代理人エージェントにはマーケットがあるだろう(竹内)。電子秘書など、高度化したヒューマンインタフェー

スを有するコミュニケーション支援環境(桑原)や、ネットワークのなかで商品の売買を行う市場システム(北村)も普及するだろう。

代理人エージェントは擬人化されたインタフェースに結びつく。現在のヒューマンインタフェースの代表格であるウィンドウ系の基本理念は、ダイレクトマニピュレーションである。すなわち利用者には、物理世界と対応づけられた仮想イメージの世界で作業する環境が提供される。利用者はコンピュータの複雑で膨大なコマンド体系の学習からは解放されるが、反面、物理世界と同様の作業を自ら行わなければならない(西田)。エージェントによるインタラクティブシステムは、利用者をこうした作業から解放する。

試みにエージェントをエキスパートシステムと対比してみよう。エキスパートシステムが知識集約作業をねらったものとするれば、エージェントはどこをねらうのだ(竹内)。環境との相互作用を考えるとエキスパートシステムのように、情報がやってくるのを待つのではだめで、積極的に情報のある環境に入っていく必要がある(中島)。もし、人間のコミュニケーションネットワークへエージェントの組込みが成功すれば、その市場はエキスパートシステムの比ではない。今日の人間の仕事のほとんどが、このネットワークの管理・運営だから(橋田)である。しかし、エージェントはエキスパートシステムと同じほどには、まだマーケットは見えていない(竹内)。

エージェント指向が、システム構築のための新たな設計論を提供することも期待される(桑原)。情報化・ネットワーク社会では、ソフトウェアへの需要は高まる一方で生産には相変わらずコストと時間がかかる。そのような状況では、既存の優れた資産(レガシソフト、レガシデータ)を活用して、ソフトウェアの重複開発を避けるための共有再利用技術への期待が高まっている(西田)。そうした技術により、個人の手には負えない電子図書館のような大規模情報システムも実現可能となる。マーケットの尺度で計ることは難しいが、科学データベース(例えば遺伝子データベース)の重要性は人類の将来を左右しかねない(横田)。エージェント指向プログラミングが、エキスパートシステムシェルのように分野横断的に利用可能なツールとして広く応用される可能性はある(片桐)。

その他、エージェントの枠組みは災害発生時の情報の収集、整理、施策など、情報あるいは資源がもともと分散しており、それらを収集して判断し、結果を再度分散させる応用に適している(北村)。少量多品種生産の工場のプロセス管理や、リエンジニアリングなどの組織シミュレーションにも応用可能だろう。ロボットの制御(麻生)への応用も考えられる。

エージェントの基礎研究として、心の社会、創発計算、シナジェティクスなど。見掛け上高度で複雑な情報処理(例えば、脳の情報処理)が、多数の処理エレメントの単純な情報処理の相乗効果によって創発するという立場がある(西田)。しかし、純粋に研究者の興味からでてきた議論はすぐには具体的な応用には結びつかず、研究コミュニティを形成す

ることはあっても、直ちに社会的なインパクトを与えるのは難しいと思われる(長尾)。

(2) むすび

なぜ、いまエージェントに興味が集まるのだろうか。いくつかの異なる視点がありそうである。

1) 複雑系への興味：

ものごとを単純化したうえで扱うという方法でできることは、かなりやり尽くされてしまった。カオスをはじめ、複雑なものを複雑なままに扱いたいという傾向がある。エージェントもその流れに位置づけられる。自律的なシステムとみなさざるを得ないシステムは複雑なシステムだから(橋田)。

2) コンピュータビューマンインタラクション(CHI)への興味：

非常に多くの人々がコンピュータを使うようになった今日、CHIへの関心は高い。CHIではいままで、デスクトップメタファ、ダイレクトマニピュレーションといった方法論で成果を出してきたが、次が見えない。アランケイはかなり前に次はエージェント(主として代理人の意味)だと予言した。いまその方向へ皆が集まり始めている(竹内)。

3) ネットワークへの興味：

ネットワークの進歩で発信される情報量が急激に増えたので、案内情報やジャンクメールもどんどん送られてきてメールフォルダがあふれてしまう。特に、ハブとしての役割を果たしている人のところには電子メールが集中する。必要な情報や興味ある情報だけを探し出して、活用できるような形態に整理するばかりでなく、会合設定などのスケジュール調整や簡単な連絡を代行してくれる機能が求められる(西田)。

2.7.3 エージェントの標準化

エージェントシステムの実現のためにはエージェント、オブジェクト、既存のソフトウェアやハードウェア間のインタオペラビリティ(操作の共通性)が本質的な条件となる。このようなインタオペラビリティを確保するための一つの手段がインタフェースやプロトコルを標準化することである。エージェント技術の標準化を目指すFIPA(Foundation for intelligent Physical Agent)という国際組織が96年9月に設立され、活動している。FIPAは基本的には、エージェントの内部構造は標準化の対象としない。97年10月に第1版の

仕様をリリースした。FIPA97と呼ばれる最初の仕様は、7つの部分から成り立つ。エージェント技術に関する3つの規定の部分

- エージェント管理、
- エージェント間通信言語
- エージェント / ソフトウェア統合

と、規定の事柄をどのように適用できるかの例が記述された、4つの参考のアプリケーション

- 個人旅行支援
- 個人秘書
- 視聴覚娯楽および放送
- ネットワーク管理およびその提供

である。

全体として、3つのFIPA97の技術により、おそらく異なった開発者によって作成されたであろうさまざまなエージェントで構成されたエージェントシステムの構造や管理が可能になる。

98年10月には第2版のFIPA98が策定される予定である。

(1) エージェントの管理技術

FIPAで規定するエージェントはドメインと呼ばれる論理空間で活動し、管理される。図2.5はそのドメインの参照モデルを示す。各ドメインは、エージェントの管理を支援するための四つの管理機構によって定義される。

- 1) ドメインに存在するエージェントはACC (Agent Communication Channel) と呼ばれる専用通信チャネルを介してメッセージ通信を行う。
- 2) すべてのエージェントはDF(Directory Facilitator) と呼ばれる特殊エージェントに自分の情報を登録し、DFはその情報をもとにYellow Page サービス (エージェントの能力に基づく検索サービス) を提供する。
- 3) ANS(Agent Name Server) はエージェントに関するWhite Page サービス (エージェント名に基づく検索サービス) を提供する。

- 4) ARB(Agent Resource Broker)はエージェントにソフト財産に関する Yellow Page サービスを提供する。

そのほか、ライフサイクルやセキュリティに関する点について規定する。

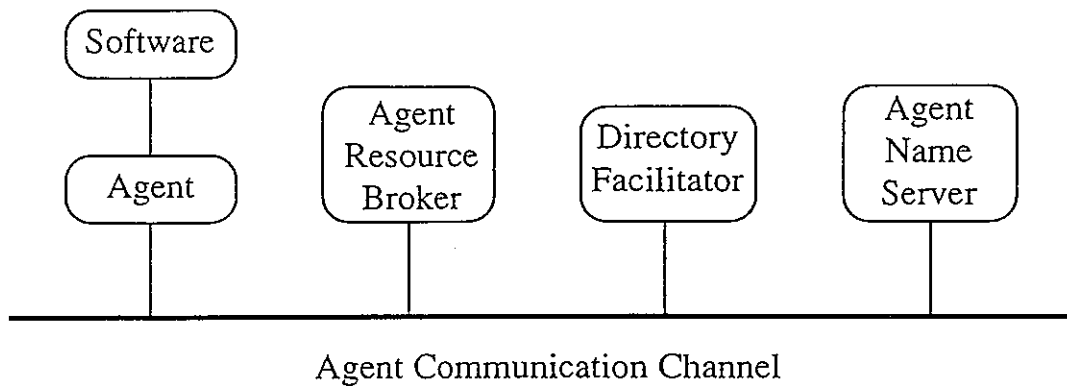


図 2.5 FIPA によるドメイン参照モデル^[87]

(2) エージェント間の通信言語

FIPA^[88]はフランスの CNET が開発した ARCOL(Artimis Communication Language)を標準言語として採択している。ARCOLは KQML のように発話行為理論をベースにしている。ARCOLの構文形式は EBNF(拡張 BNF)である。ARCOLは様相論理形式に基づいており、現在、FIPAは ARCOLと KQML間の交換性も考慮している。また、Client-server、Basic Contract Net、Suggestive Contract Net、English Auction、Market Place Auction のようなさまざまな共通プロトコルのライブラリの提供を規定している。

(3) エージェントと既存のソフトウェアとの統合

ここでは、既存のソフトウェア資産の活用のためのエージェントとソフトとのやり取りについて規定している。エージェントがアクセスできるすべてのソフトシステムは ARB に登録する必要がある。エージェントは ARB に対して自分の必要なソフトウェアサービスの提供を要請すると、ARBはそのサービスのロケーションを返す。エージェントまたはユーザは ARB に対してマネジメントインタフェースを介してソフトウェア資産の検索、登録、削除、定義ができる。そのほか、コネクションインタフェースを用いて実際のソフトウェアシステムに接続することができる。さらにソフトウェアシステムの固有の通信プロトコルの知らないエージェントのためのラッパインタフェースについても規定している。

2.8 ニューラルネット

ニューラルネットは、生物の神経系の特徴的な機能に着目し、そのモデル化を行ったものである。ニューラルネットの基礎的な原理を馬場の文献^[89]より解説する。

2.8.1 神経系とニューロンのモデル

生物の神経系は、多数のニューロン (neuron) が複雑に結合され、それぞれが並列処理を行っている。各ニューロンの大まかな構造は、図 2.6 に示すように入力端子である樹状突起 (dendrite)、出力端子である軸索 (axon)、ならびに本体の細胞体 (soma) から成り立っている^{[90]-[93]}。

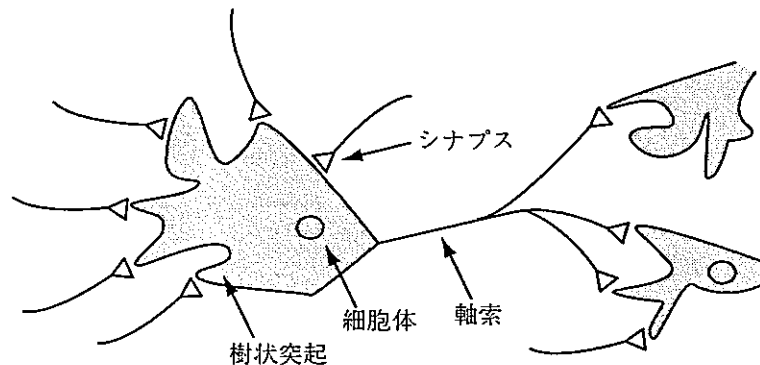


図 2.6 ニューロンの概略^[89]

各ニューロンの樹状突起は、シナプス (synapse) を通して他のいくつかのニューロンからの入力信号を受け取る。ニューロン間の信号伝達は、電気パルスによって行われ、ニューロンの状態が変化する。このニューロンの状態の変化は、シナプス結合の種類に依存する。(シナプス結合としては、興奮性、抑制性、ならびに前抑制と呼ばれる3種類が知られている。) 興奮性シナプスの場合には、入力信号が加えられることによって細胞体内の電位が上昇し、あるしきい値を超えるとニューロンは発火し(パルスを発生し)、軸索を通じてそのパルスが伝わり他のニューロンに刺激を及ぼす。

1943年に、McCulloch-Pitts^[91, 93]は、こうした生物系内のニューロンの動作原理に基づいて式(2.1)で示される非常に興味深いニューロンのモデルを提案した。

$$x_i(t+1) = 1\left[\sum_j w_{ij}x_j(t) - \theta_i\right] \quad (2.1)$$

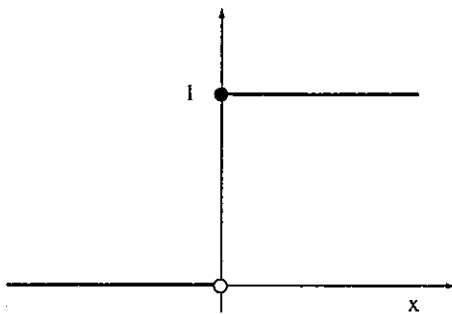
ここで、 x_j はニューロン j からの信号を、 w_{ij} はニューロン j からニューロン i へのシナプス結合強度を、 θ_i はニューロン i のしきい値を、さらに $1[x]$ は図 2.7 に示すように、 $x \geq 0$ のとき 1、 $x < 0$ のとき 0 となる単位ステップ関数を表している (1 は興奮状態、0 は静

止状態を示す)。式(2.1)は、ニューロン j から伝わった信号 $x_j(t)$ が重み付けられて加算され、ニューロンに達し、それがあるしきい値を超えるとニューロン i が興奮することを意味している。

式(2.1)は、非常に興味深いモデルではあるが、最近では、式(2.1)における $1[x]$ という単位ステップ関数の代わりに次の式(2.2)で表されるシグモイド関数がしばしば使用される(図2.8)。

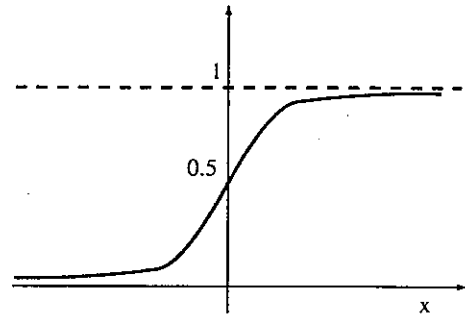
$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (2.2)$$

式(2.2)における x の代わりに $(x - \theta)$ とおくことによって、 $1/\{1 + \exp(-(x - \theta))\}$ なる関数が得られる。この関数は、図2.8のシグモイド関数を x 方向に θ だけ平行移動したものとなる(パラメータ θ はしきい値とも呼ばれる)。ニューラルネットを用いた応用を考える際には、しきい値 θ を含んだニューロンモデルが用いられることが多い。



$$1[x] = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$$

図 2.7 単位ステップ関数 [89]



$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)}$$

図 2.8 シグモイド関数 [89]

2.8.2 ニューラルネットのモデル

人工ニューロンをいくつか結合することによってニューラルネットのモデルができあがる。図2.9のように入力ユニットから出力ユニットまですべて順方向のみに結合されており、フィードバック結合などの相互結合の形態を持たないようなニューラルネットモデルを階層構造ニューラルネットモデル (multi-layered neural network model) と呼ぶ。

一方、ユニット間の結合が必ずしも順方向のみとは限らないようなモデルとして、相互結合ニューラルネットモデル (fully connected neural network model) がある(図2.10)。

これらのニューラルネットモデルを用いることにより各種予測やパターン認識が可能になるわけであるが、そのためにはまずニューラルネットモデルに含まれている結合強度化

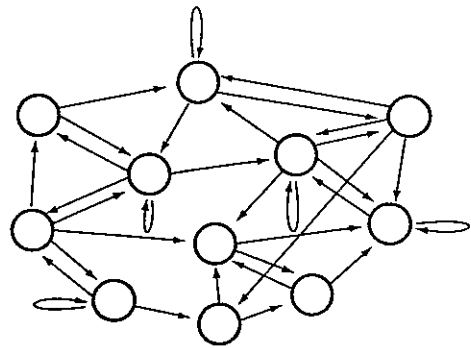
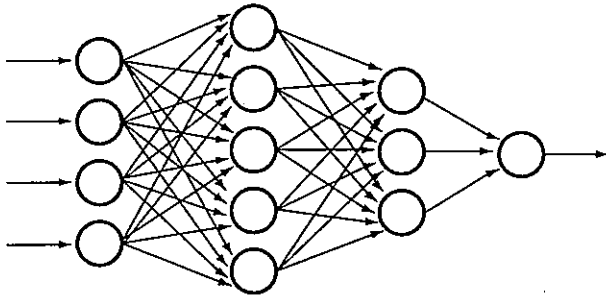


図 2.9 階層構造ニューラルネットモデル^[89] 図 2.10 相互結合ニューラルネットモデル^[89]

w_{ij} を適切な値に設定しなければならない。”何をもって結合強度 w_{ij} の値が適切であるのか。あるいは適切でないというのか？”、とか”適切な結合強度 w_{ij} の値をどのようにして求めるのか？”、といった様々な疑問を持たれる人もおられるのではないだろうか。ところで、これらの疑問に答えるためには、ニューラルネットの学習ということについて触れなければならない、次節に学習について簡単に説明する。

2.8.3 ニューラルネットの学習

いまや、ニューラルネットは、知能を有するシステムを構築するための最も有力な道具の1つとして多くの人々に認められつつある。ところで、どうしてニューラルネットがシステムの知能化に役立つのであろうか？それは、ニューラルネットが学習によって知能を獲得することができるからである¹¹。

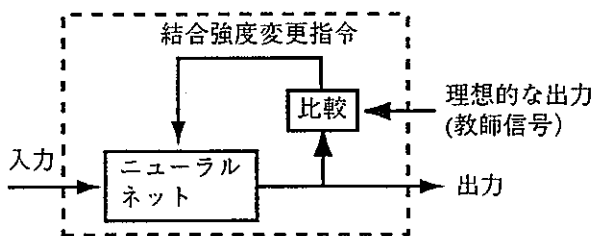


図 2.11 教師あり学習^[89]

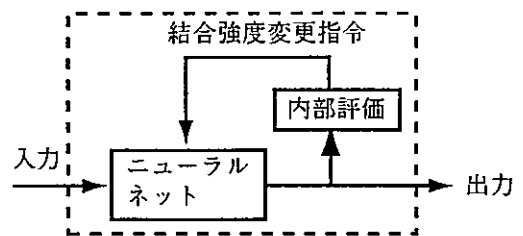


図 2.12 教師なし学習^[89]

ニューラルネットの学習方式としては、図 2.11 に示されているように入力データに対して理想的と考えられる出力値 (教師信号) が与えられている場合とそうでない場合 (図 2.12)

¹¹ニューラルネットが知能を獲得するという表現を用いたが、具体的には、学習によって適切な結合強度の値を見出すということである。

がある。前者の学習形態を教師あり学習 (supervised learning) と呼び、後者の学習形態を教師なし学習 (unsupervised learning) と呼ぶ^[92]。

教師あり学習の場合は、ニューラルネットからの出力と理想的な出力 (教師信号) を比較することによってその差をできるだけ小さくするように結合強度の値を変更する。一方、教師なし学習の場合は、理想的な出力は外部から与えられないので自分自身の評価基準を内蔵しておくことが必要となる。教師あり学習の代表的なものとしては、逆誤差伝搬法 (BP 法) があり、教師なし学習の代表的なものとしては、コホーネンの学習アルゴリズムがある。次にこれらについて説明する。

2.8.4 逆誤差伝搬法 (Back Propagation 法 : BP 法)

BP 法の概略を述べる。対象とするニューラルネットの第 p 入力パターンに対する第 $s-1$ 層第 j ニューロンの出力を y_{jp} 、第 s 層第 i ニューロンの出力を x_{ip} とし、ニューロンの入出力関係が次の式 (2.3) および式 (2.4) で与えられているものとする。

$$x_{ip} = h_i(z_{ip}) \quad (2.3)$$

$$z_{ip} = \sum_j w_{ij} y_{jp} \quad (2.4)$$

(ただし、 $h_i(\cdot)$ は、微分可能な非減少関数 (式 (2.2) で与えられるシグモイド関数がしばしば利用される) であり、 w_{ij} は、第 $s-1$ 層第 j ニューロンと第 s 層第 i ニューロンを結ぶ結合の重み (結合強度) (connection weight) を意味する。つまり、式 (2.3) と式 (2.4) は、第 $s-1$ 層の各ユニットからの出力が重み付けられて第 s 層に達し、総和され、シグモイド関数などを用いることによって変形され、第 s 層からの出力となることを示している。

いま、第 p 番目の入力パターンに対する出力層の i 番目のユニットから出力値を \bar{x}_{ip} し、教師信号 (teacher signal) を d_{ip} とする。このとき、第 p 番目の入力パターンに対する誤差関数 (error function) $E_p(w)$ およびすべての入力パターンに対する誤差 (総誤差関数) (total error function) $E(w)$ は、それぞれ、次の式 (2.5)、(2.6) で定義される。

$$E_p(w) = \frac{1}{2} \sum_i (\bar{x}_{ip} - d_{ip})^2 \quad (2.5)$$

$$E(w) = \sum_p E_p(w) \quad (2.6)$$

(w は、ニューラルネットの各結合強度 w_{ij} を成分として持つ結合強度ベクトルを表す。) 式 (2.5) は、第 p 番目の入力パターンに対するニューラルネットからの出力 \bar{x}_{ip} をこうであってほしいと願出力 (教師信号) d_{ip} にできるだけ近づけたいという願望を表している。また、式 (2.6) は、1つの入力パターンに対してだけでなく、全入力パターンに対してニューラルネットからの教師信号にできるだけ近づけたいという願望を表している。

BP法では、ニューラルネットの総誤差関数 $E(w)$ を最小化するため。各パターンに関する誤差関数 $E_p(w)$ の勾配ベクトルを計算し。その逆方向に w を改良するといういわゆる最急降下法 (steepest descent method) を利用する。

つまり、本当は総誤差関数 $E(w)$ の最小化問題を取り扱いたいのであるが、その代用として各パターンに対する誤差関数 $E_p(w)$ の最小化問題を考えようというわけである。

ここで、 w の値を次々と改良してゆき、十分総誤差関数 $E(w)$ の値が小さくなったところで計算をストップする。同時に、計算をストップさせた時点における結合強度ベクトル \bar{w} を記憶しておく。そして、 \bar{w} を結合強度ベクトルとして持つニューラルネットモデルを用いることによって、予測やパターン識別などの与えられた問題に対する答えを出すのである。

上記のアルゴリズムは、非常にわかりやすく高速計算にも向いているため工学や医学を中心とする様々な分野に置いて活用されてきたがいくつかの問題点をもっている。主なものを列挙すると、

- 1) w の初期値によっては、 $E(w)$ の大域的最小値 (global minimum) へ収束せずに局所的な最小値 (local minimum) へ収束する。
- 2) 元々のBP法は次元探索を行わないため。必ずしも総誤差関数 $E(w)$ の単調減少性が保証されない。
- 3) 元々のBP法は勾配法に基づいているが、非線形計画理論の分野でよく知られているように、この手法は収束性の点で共役勾配法や擬似ニュートン法などのアルゴリズムと比較して性能がやや劣る。

元々のBP法のこのような問題点を克服するため改良型アルゴリズムが今までいくつか提案されてきたおり、実用的でよく知られたものとして慣性項を用いたアルゴリズム^[95]と忘却を考慮に入れたアルゴリズム^[97]がある。

2.8.5 コホーネンの自己組織化モデル

教師なし学習の代表である、コホーネン (Kohonen) の自己組織化アルゴリズムと、学習ベクトル量子化法を説明する

(1) 自己組織化アルゴリズム

図 2.13の左方から入力される信号 $x = [x_1, x_2, \dots, x_M]^T$ は、ネットワークのすべてのニューロンに同時に提示され、入力ベクトルの要素子 x_j はそれぞれニューロンの結合強度

w_{ij} につながっているものとする。ここでは内積の操作を規格化された2つのベクトル x, w_i の差に置き換えた以下のアルゴリズムを実行する。

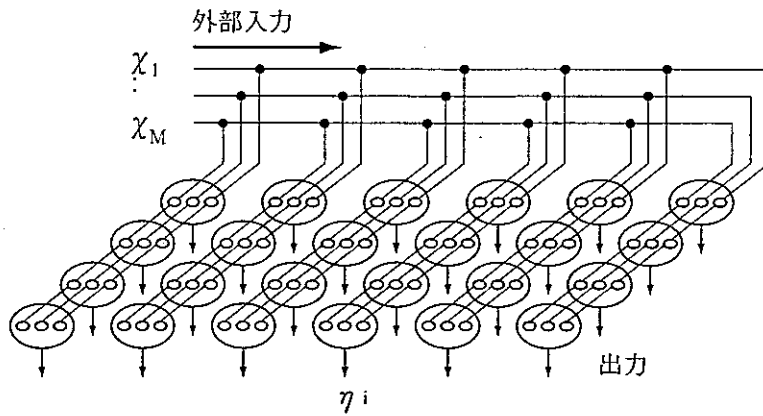


図 2.13 コホーネンネット [89]

[自己組織化アルゴリズム]

- 1) 興奮領域の中心 c の決定

$$\|x(t) - w_c(t)\| = \operatorname{argmin} \|x(t) - w_i(t)\|$$

- 2) 結合強度ベクトルの修正

$$\begin{aligned} w_i(t+1) &= w_i(t) + \alpha(t)(x(t) - w_i(t)) \text{ for } i \in N_c(t) \\ w_i(t+1) &= w_i(t) \text{ それ以外} \end{aligned} \tag{2.7}$$

ここで、 $\operatorname{argmin}(z_i)$ は添字 i に関して最小となる z_i を求める関数である。このアルゴリズムからわかるように、まず、入力ベクトルとの差が最小である (つまり、よく似た) 結合強度ベクトルをもつニューロンを c とし、これを中心とした近傍領域 $N_c(t)$ を設定する。図 2.13 のコホーネンネットでは、この $N_c(t)$ に含まれるニューロンが時刻 t において興奮していると考ええる。よって式 (2.7) に従って、興奮領域 $N_c(t)$ に含まれるニューロンの結合強度ベクトルのみ、時刻 t で提示された入力ベクトル x に近づくよう修正する。ただし、結合強度ベクトルはその大きさが一定となるよう、修正ごとに正規化されるものとする。式 (2.7) の $\alpha(t)$ は学習の効率を決定する係数で、時間に関して単調に減少させるのが一般的である。また、興奮領域 $N_c(t)$ の取り方はニューロンをいかに配置するかによって異なり、その例を図 2.14 に示しておく。なお、一般的に、 $N_c(t)$ の範囲を時間とともに狭くする方が、パターンの分類能力は向上する。

自己組織化アルゴリズムにおいて、興奮領域 $N_c(t)$ にあるすべてのニューロン対し、結合強度の修正が同様に行われることは重要である。これにより、類似の特徴をもつ2つの入力に対して、位置的に近いユニット同士が興奮するようになる。つまり、入力の特徴空間における類似関係が、配置されるユニットの距離関係に変換されるわけである。これは、トポロジカルマッピング(または、トポロジー保存写像)と呼ばれ、このような写像特性は生体の視覚野や聴覚野などでも多くみられる^[98]。

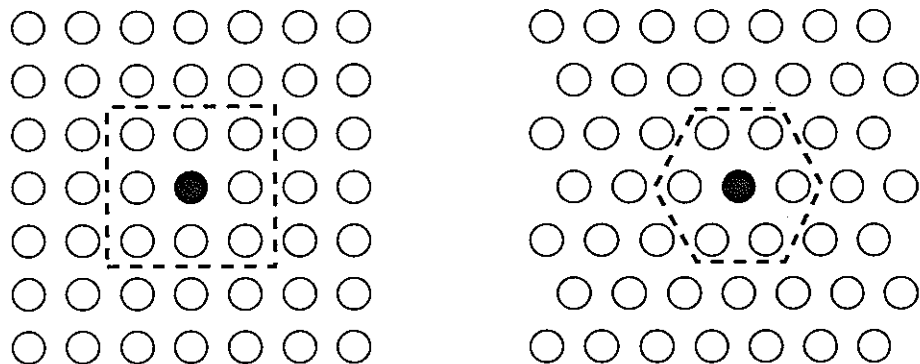


図 2.14 コホーネンネットにおける近傍領域の取り方^[89]

コホーネンによって提案された式(2.7)のアルゴリズムは、逆誤差伝搬法(BP法)などに代表される[教師あり学習]とは異なり、入力信号を分類する能力が自己組織的に獲得されていく点で[教師なし学習]といえる。また、この自己組織化アルゴリズムによって形成されたコホーネンのネットワークは、ニューロンの出力分布が入力の特徴空間の構造に対応するようになることから、Topological Feature Map もしくは Self Organizing Map と呼ばれることもある。コホーネンネットの特性を利用した工学的応用は、音声認識、ロボット制御、最適化問題など数多くみられる。

(2) 学習ベクトル量子化(LVQ)法

前節で述べたように、コホーネンネットでは、入力の特徴に応じて異なるニューロンが興奮するようになる。このことは、学習後のネットワークの結合強度ベクトルが図 2.15 に示すような入力の特徴空間を代表する点になっていることを示唆する^[99]。図 2.15 において、結合強度ベクトル、特徴空間入力の特徴空間とコホーネンネットの結合強度ベクトルの関係を分割する小領域はその結合強度ベクトルが代表する空間を表す。このように、入力の特徴空間を有限個の代表点で表す手法はベクトル量子化法(Vector Quantization、VQ)と呼ばれる。つまり、先に取り上げた、自己組織化アルゴリズムは、ベクトル量子化法における参照ベクトルを[教師なし]で獲得するための一手法と言い替えることもできる。

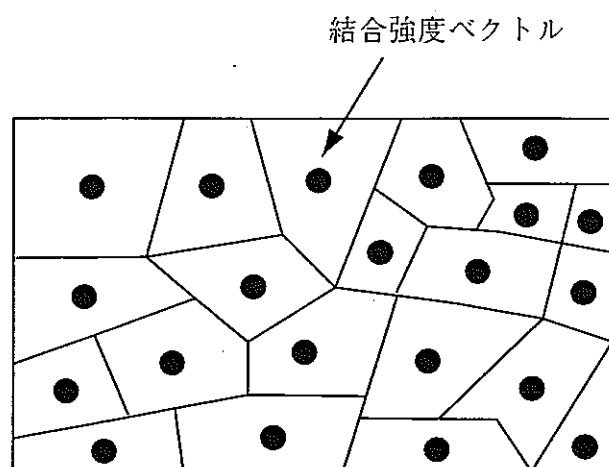


図 2.15 入力の特徴空間とコホーネンネットの結合強度ベクトルの関係 [89]

しかし、ある特定の問題（パターン認識など）に限って考えると、学習させる入力サンプルには、それが属するクラスの情報が与えられるケースも多い。このような場合、クラスに関する情報を捨ててしまうのは、いささか惜しい話である。そこで、与えられた学習サンプルにクラス情報が付加されている場合、より最適な参照ベクトルを獲得する手法として、コホーネンは学習ベクトル量子化法 (Learning Vector Quantization、LVQ) を提案している [100]。一般に、この方法によって、自己組織化モデルよりも強力なパターン分類器が構成される。

いま、LVQ 学習を行うネットワークとして図 2.15 のものを使うとしよう。また、与えられた学習サンプル（入力）のクラスを C_s 、入力ベクトルに最も類似した結合強度ベクトルをもつニューロンのクラスを C_n 、その結合強度ベクトルを w_n とすると、LVQ 学習は以下のように行われる。

[LVQ アルゴリズム]

- 1) クラス C_s とクラス C_n が等しい場合

$$w_n(t+1) = w_n(t) + \alpha(t)(x(t) - w_n(t))$$

- 2) クラス C_s とクラス C_n が等しくない場合

$$w_n(t+1) = w_n(t) + \alpha(t)(x(t) - w_n(t))$$

$$w_n \text{ 以外の結合強度ベクトルに対して } w_i(t+1) = w_i(t) \quad (2.8)$$

これからわかるように、入力のクラス C_s と最も反応したニューロンのクラス C_n が一致するとき、結合強度ベクトル w_n は入力ベクトル x に対して近づけられる。そうでないと

きは、今後なるべく反応しないよう、入力に対して遠ざけられる。また、 w_n 以外の結合強度ベクトル $w_{i \neq n}$ は変化させない。なお、1つのクラスには複数個の結合強度ベクトルを割り当てるのが一般的で、その場合、クラス当たり幾つの結合強度ベクトルを割り当てるかにより分類能力が異なる場合もあるので注意する。

この他にも、ベイズ判定の意味で最適に近づくような参照ベクトルを求める LVQ2^[98] や LVQ3^[99] も提案されている。このうち、LVQ2 のアルゴリズムを以下に簡単にまとめておく。

[LVQ2 アルゴリズム]

入力ベクトル x に最も近い結合強度ベクトル w_n のクラスを C_n とする。しかし、入力ベクトルはクラス $C_{s \neq n}$ に属しており、2番目に近い結合強度ベクトル w_i がこのクラス $C_{s \neq n}$ に属しているとき、以下のような変更を行う。

$$\begin{aligned} w_n(t+1) &= w_n(t) + \alpha(t)(x(t) - w_n(t)) \\ w_i(t+1) &= w_i(t) + \alpha(t)(x(t) - w_n(t)) \end{aligned} \quad (2.9)$$

それ以外のすべての結合強度ベクトルは変更しない。

2.9 創発システム

創発システムの定義を行い、その手法として使用される、遺伝的アルゴリズム、人工生命、進化的計算について述べる。

2.9.1 創発システムとは

創発システム・創発現象の研究においては、現象をもたらすメカニズム、原理の解明を主として理学的研究と、システムの応用を追及する工学的研究がある。もちろん、扱う対象が生物系や社会・経済系にまで広がっている創発システムの研究では両者の境界は明確ではない。ここでは創発システムの研究において、おもに工学の立場から、なされるべき議論の整理を試みる^[101]。

(1) 創発システム・創発現象に期待される機能

創発システム・創発現象に明確な定義を与えることは困難であるが、ここではその特徴として「システム(要素、相互作用)の記述には明示的には現れない挙動がシステムに発現すること一非明示性」をあけておく。このような非明示性をもつシステムに対する工学的な期待、すなわちシステムの機能としてはつぎのような事柄があげられる。

- 適応、学習：未知の環境に対応した行動を獲得する。
- 探索、最適化：広大な探索空間のなかから最良の点を発見する。
 - － 上記の2種の機能は類似点が多く、厳密に区別することにはあまり意味がない。
 - － これらの機能を支えるものとしてシステムが外界の変化に適応できるための「柔軟性や多様性の維持」という下位機能が要求される。
- 協調：多数のときには不定数の要素、サブシステムの挙動を協調させる。この機能はさらに以下のように詳細化される。
 - － 有効な協調を実現する「資源割当」。
 - － ある仕事を協調により分担する「機能分化」。
 - － 機能分化を逐次的に実現する「発生」。
 - － 耐故障性を実現する冗長な要素間での業務の「多重化・代替」。
 - － 要素の協調を実現するための「情報の交換(知識共有、言語の共通化)」。

上にあげた諸機能は、システムとそれをとりまく環境に関する知識が事前には完全ではなく、そのような状況のなかでシステムがなんらかの目的を創発現象を用いて達成しようというものとして特徴づけられる。

(2) 工学からの要求

創発システムの応用においては、先に述べたような諸機能の実現のためにシステムの設計をしなければならない。以下では、工学、すなわち設計の立場から要求を整理してみる。

- 合目的性

工学システムでは先に述べたような諸機能、すなわちなんらかの目的を前提としてシステムの設計が行われる。非明示的な挙動を示す創発システムの工学応用においては、システムの挙動の合目的性が確認されなければならない。

- 構成可能性

工学的な実現、すなわち、ハードウェアやソフトウェアが構成できるかどうかという問題である。応用対象によって工学的に利用可能な要素数、材料やエネルギーなど機械的な制約、情報処理・通信能力の限界、マン・マシン系での人間の能力の限界などが制約として現れる。

- 効率

工学システムでは資源の効率的利用が要求される。創発システムとその応用では、その性格から一定の非効率さは不可避であろうが、資源に対する要求が現実的でないといけない。

- 信頼性

工学システムではシステムの動作に対して、一定の信頼性が要求される。創発システムでは、システムの挙動について理論的な予測が困難なものが多く、理論的な方法で信頼性を保証しにくい。したがってシミュレーション、テストなど経験的な方法に頼ることになる。このような状況で、信頼性という要求をどのようにとらえ、対応するかは重要な課題である。従来、人が機械を信頼する際には、機械の構成や動作原理を熟知し、その挙動が十分予測可能であることを信頼をおく根拠としてきた。一方、人は人をその構成や動作原理について十分に理解していないにもかかわらず、一定の信頼をおく。後者のような信頼性の考え方が創発システムの信頼性を考える糸口になるかもしれない。

以上、工学の立場からの要求として4つの項目をあげたが、そのうち合目的性と効率に関してさらに検討を試みる。

(3) 創発システムと合目的性

工学システムではシステムはなんらかの目的をもって設計される。しかしながら、この目的については、それを把握し、システムの性能として追求するうえでいくつかの問題点がある。

- 目的を明示的に記述できるとはかぎらない。たとえば感性などに訴えるものの設計・制作では、目的の明示化、定量化は著しく困難である。また、一般に設計者と利用者は異なっており、設計者が利用者の目的を十分に把握しているとはいえない。
- システムが複数の目的を同時に追及しなければならない。複数の目的間の相対的な重要度、望ましい妥協点などの明示化、定量化が困難な場合が多い。
- システムが個々の目的を追及する複数のサブシステムから構成される。個々のサブシステムが非協力的に目的を追及することにより、効率低下やデッドロックなどが生じる。

これらの問題に対して、それぞれ対話的システム、多目的理論、ゲーム理論などのシステム技法・理論が開発されてきたが、問題の困難さを考えればその成果は十分とはいえない。これらの問題に対して創発システムの応用が試みられており、その成果が期待されている^{[102]~[107]}。

合目的性の観点から、主要な創発システムを以下のように3通りに類型化して考える。

1) 協同現象・散逸構造型創発システム

要素やそれらの相互作用として、比較的単純で、均質な系が扱われており、システムのミクロな記述と発現するマクロな秩序の関係づけを行うというかたちで研究が進められている。このようなシステムでは合目的性が内生化されていない。

工学的応用は系の構成(要素、相互作用)の単純さや挙動の明確さなどの理由から研究されている。合目的性が内生化されていないため、システムの挙動が目的にあうように設計することは設計者に委ねられる。この型の創発システムの工学応用においては、要求する機能の明確化と、それを実現する設計法の整備が求められる。

2) 適応・進化型創発システム

ある評価基準に基づいた適応、進化の機構をシステムに組み込んだ創発システム。合目的性が内生化するされており、設計者は「目的」の設定というメタレベルにおいてシステムに介入する。しかしながら、「目的」を達成する「効率」がしばしば問題になるため、システムのミクロな構成についても検討対象となる。

3) ゲーム型創発システム

目的が内生化されているが、個々に目的をもつ要素(エージェント)間の相互作用があるため、システム全体の挙動は複雑になる。たとえば、非協力的な状況での利己的な目的追及が効率低下を生じる状況が発生しうる^[108]。一方、適応・進化を加速する手法としての共進化の利用なども考えられている^[109, 110]。また、対象として「目的をもつエージェント」の存在を前提としなければならないシステム(社会・経済システムなど)のモデル化やそれを用いた「制度」などの設計も広い意味で工学であり、重要な創発システムの研究対象である。

(4) 創発システムと効率

創発システムの応用が、「環境に関する知識が事前には完全ではない状況に対応する諸機能」であるため、効率の問題はしばしば重要になる。たとえば

- 最適化

探索空間をすべて探すことなく、より少ない探索回数でよりよい解を得たい。

- 学習

学習すべき課題のすべての事例を経験することなく、より少ない事例から、より正確な推論を行いたい。

これらの要求は、環境に対する先験情報がまったくない場合には無意味である。一方、先験情報により環境がかなり限定できるなら高い効率が実現できるが、利用可能な範囲も制限される。したがって、環境についての先験情報をどの程度使えるものと想定するのが重要になる。創発システムの応用における効率化を考えるうえで注意すべき点を以下に整理する。

- 環境についての先験情報はどのようなものか。
- 先験情報をうまく規定・記述する方法があるのか。
- 先験情報の妥当性の効果的な検証方法はあるのか。

- システムを効率化するための方策にはどのようなものがあるのか。特に、環境内でシステムが動作することにより環境についての情報をどのように獲得し、それをどのように活用するか。

上記にあげた点のうち、最後の項目については、情報収集のための行動と、過去に得た情報の活用とのトレードオフ (Exploration Exploitation Trade-off) をどのように調整するのが問題となる。

学習、適応など環境に実際に働きかけるオンライン的状况では、情報収集を重視した行動は当座の利得の損失を招く。現在の利得の損失を押さえつつ、将来の利得を増大させるという意味でよりよく環境を同定するための情報収集を実現しなければならない。

一方、多くの最適化計算は、通常、モデル化された環境を対象にオフライン的に行われる。この場合、環境はモデル化はされているが、最適解をみいだすという意味では必ずしも環境のモデルはよく理解されているわけではない。そこで、最適解の試行錯誤的な探索においては、探索過程で得た対象の情報をいかに以後の探索に活かして探索を効果的なものとするのが重要となる。

2.9.2 遺伝的アルゴリズム^[112]

遺伝的アルゴリズムは、ミシガン大学の John H.Holland により適応・進化のモデルとして考案されたものであるが、今日では最適化の手法としての利用が盛んであり、その面での応用研究が進んでいる。

(1) 一般的な動作

ここで、一般に用いられている遺伝的アルゴリズムを定義しておこう。

- 1) 初期個体群の生成
- 2) 個体の適合度 (適応度ともいう) を計算する
- 3) 選択
- 4) 交叉
- 5) 突然変異
- 6) 適合度の計算
- 7) 終了条件が満たされていれば終了、そうでなければ3)に戻る。

遺伝的アルゴリズムでは交叉が重要な操作であることは確かであるが、突然変異の確率はこのアルゴリズムの性格を決める、慎重に決めるべきパラメータである。突然変異がないと初期収束という現象が起こることがある。個体群の中で個体の多様性が小さいと、組み換えても新しい個体が生じない。例えば特定のビットの値がたまたま0の個体ばかりが最初に生成されたら、その後いくら交叉を繰り返しても決してそのビットが1の個体は生じない。一方、突然変異確率が高すぎるとせっかく交叉をしても突然変異で大抵破壊されてしまい、結局ランダムな個体を生成しているのと大差ないことになる。このように突然変異の確率を大きくすることは進化を遅くするが、個体評価に時間がかかるような問題では個体数をあまり大きくすることができず、やむを得ず個体数を少なく設定する場合がある。個体数が少ない場合には個体の多様性を確保することが最重要であるから、突然変異確率をある程度大きくして多様性を確保し、しかも少ない回数で良い値を保持するためにはある程度の局所探索能力も高める必要があるので、最良の個体を次の世代に無条件に送り込むエリート戦略を取り入れることも多い。

(2) 挙動解析

遺伝的アルゴリズムの挙動を解析する方法としては、Hollandによるスキーマ理論がある。スキーマとは、個体の中の部分列であり、指定された遺伝子座の値以外はすべての遺伝子がそのスキーマに該当するコードである(図2.16)。

$$\begin{array}{l}
 1 \\
 \text{スキーマ}
 \end{array}
 \iff
 \left\{ \begin{array}{l}
 010 \\
 011 \\
 110 \\
 111
 \end{array} \right\}$$

図 2.16 スキーマと個体^[112]

スキーマ定理とはスキーマの評価値に基づいたルーレット選択による増殖確率によって、各スキーマに属する個体数の期待値がどのように増減するかを不等式で示したものである。ただ、このスキーマ定理は最初に個体群をランダムに生成した時点から数世代先までしか予測できない欠点を持っている。スキーマ定理は交叉や突然変異で破壊されるスキーマには着目しているが、新しく生成される個体は考慮に入れられておらず、さらに、「最適解がどれくらいの時点で現れるのか」、「問題に対応してどのように交叉確率、突然変異確率、個体数などのパラメータを設定するのが良いのか」といった、遺伝的アルゴリズムを

使う時に本当に知りたい問いには答えていない。遺伝的アルゴリズムの基本形である simple GA にはある程度解析が試みられているが、simple GA に少し手を加えたアルゴリズムにおいてその挙動を解析したり、最適なパラメータを求めたりする理論的な考察は困難であると言わざるを得ない。

(3) 応用方法

遺伝的アルゴリズムに関する基礎を見てきたが、ここで応用に関するコメントを行っておこう。

近年、実に多くの分野で遺伝的アルゴリズムが用いられるようになった。遺伝的アルゴリズムが頻繁に用いられるのは次のような要因が考えられる。

- 適合度さえ返せば、問題の記述の方式にとらわれず自由な形式の問題に適用可能である。
- 必ずしも最適解まで得られないが、かなり大域性に優れた解が得られる。
- ファジィ、ニューロ、制御理論などとの組み合わせが比較的容易。変数の選択、ネットワーク構造の決定、むだ時間の決定など、他の方法での決定が困難な問題に適用される。

つまり、複雑な産業界の問題にも応用が可能であって、最適解がたとえ得られなくても、満足解を得ることで十分であるというニーズにマッチしたという見方ができるだろう。

2.9.3 人工生命

人工生命 (Artificial Life) とは、単純な動作メカニズムを持つ個体が多数集まり集団を形成した際に、集団として複雑な挙動が発現する現象 (創発: emergence) について解析する研究の総称のことである^[14]。

研究分野としての「人工生命」は1987年に米国ニューメキシコ州ロス・アラモスで開催された人工生命ワークショップに始まるといって良からう。主催者である C.G.Langton は、生命という複雑な現象に人工物を用いる合成の科学の方法論によって切り込もうと云うたい文句を掲げ、生物学のみならず、計算機科学、精密機械、哲学など関連する分野で既にこの方向に繋がる研究を行なっている研究者を一同に集めた。

ここでは、畝見の文献^[15]から人工生命技術の研究分野について報告する。

(1) ウェットウェア

ハードウェア、ソフトウェアなどのことばに対応して、フラスコの中の化学反応を利用した方法をウェットウェア (wetware) アプローチと呼ぶ。ミラーの無機物質からのタンパク質合成の実験もこれに繋がるものであるが、現在の主流は、RNA ワールドや DNA コンピューティングに見られる進化の実験と、人工細胞による自己増殖系の研究がある。

(A) RNA ワールドと DNA コンピューティング

1992年の第3回人工生命国際ワークショップでは、G.JoyceのRNAスープによる進化実験の報告があり。放射線による突然変異率の調節で進化のプロセスが変化する模様が示された。この種の研究はDNAによる計算機構、特に計算機上での遺伝的アルゴリズムに代わる最適化計算の枠組としてここ数年研究が活発化しつつあり、国際会議も開催されるようになった。

DNA コンピューティングは、DNAの塩基配列を遺伝的アルゴリズムの遺伝型と同じように解候補に対応させ、農学や医学分野への応用研究が活発な遺伝子操作の技術を使って、集団サイズが 10^{20} 以上の並列最適化計算を実現しようとするものである。ICGA'97でも招待講演の1つとして当該分野の気鋭の若手研究者であるAndrew Ellington博士から最近の動向と彼自身の研究紹介があり、巡回セールスマン問題などへの応用の方法について解説がされた、塩基配列に対する意味付けや、遺伝操作の設計が計算機で実行するように自由にはできないが、桁違いに大きな集団を桁違いの並列度で実行できるという点でシリコンベースでない計算機の大きな可能性をもつ手法である。

(B) 人工細胞

生命の起源については様々な説があるが、単細胞原核生物の起源については、RNA起源説と細胞膜起源説が主な対立する仮説であろう。細胞膜起源説ではまず自己増殖可能なカプセルの出現がRNAの自己複製をも可能にしたという立場をとる。膜構造の自己成長を実現する媒体として1つには Na_3PO_4 水溶液に浸した $CaCl_2$ の結晶による錯体の膜の成長などもあるが、名古屋大学の宝谷らは、微小構造の膜構造を作り上げる方法から人工リポソームの研究を行なっている。埼玉大学の伏見の研究にもあるとおり、このような微小膜構造は医薬品のデリバリーなどへの応用の可能性もあり、人工生命としてよりは、実用的な応用の方向へ進展しつつある。

(2) 自己組織系と発達システム

生命の起源を数理的な視点から考察するには、まず空間パターンの自己複製を繰り返し実行する自己増殖機械について考えるのが常套手段である。

(A) セル構造オートマトン

J.von Neumann の仕事の1つであるセル構造オートマトンとそれによる自己増殖機械の研究は、人工生命の創始者である C.Langton の研究、Mathematica の作成者でもある S.Wolfram による複雑さの4クラス分類、そして S.Kaufmann らの Edge of chaos の考え方へと繋がっている。最小自己増殖機械の研究も進み、Neumann の自己増殖機械では29のセル状態を使っていたが、その後8状態の自己増殖機構も発見されている。

(B) 植物の発達モデル

L-System を中心として種子植物や巻貝にみられるフラクタル構造を数理的に記述し、コンピュータ・グラフィックスの画像として描画する技術は、今では公園の景観シミュレーションなど様々な分野で実用になっているが、さらに細胞間の力学的相互作用を考慮したモデルなどが研究され続けている。

ECAL'97 では種子植物の根からの養分吸収と葉での光合成による有機物合成という代謝を考慮した単純なシミュレーションの発表があり、隣接する個体間での競合についての数値的な考察が報告された。空間を2次元の粗いグリッド空間としてある点などモデルが単純であり、実際の植物との類似性を見るにはまだ拡張が必要である。

(C) 線虫の発達モデル

多細胞生物の中で発達過程における細胞分裂の系統が全て解明されているものとして C.elegance という線虫がいる。Sony の北野は慶応大学と共同で、この線虫の発達過程を計算機上で再現して見せようというプロジェクトを開始した。ECAL'97 での発表によれば、卵細胞から分裂開始10時間後までのシミュレーションが実現されたとのことである。基本的には既知の力学的および化学的影響をできる限り考慮したモデルの構築と実行を目標としているが、計算を高速化するために、細胞の膨張と細胞間の接着と滑り、細胞膜の不均質さ等の力学的相互作用については、かなり簡素化されている部分もあり、どこまで詳細な再現が可能かは、今後の動向を見守る以外にない。

(D) 神経回路の発達モデル

人間の知能を実現しているハード・ウェアの中心的存在である脳の構造から、人工知能を構築するヒントを得ようとする研究は人工ニューラルネットの研究など古くから行なわれているが、大脳における神経回路網の接続関係を全て調べることはほぼ困難であり、もし、解明されたとしても、それと同等の機能を実現するために人工的に結線を行なうことは、その複雑さからほとんど不可能であろうと予測される。人間が直接、結線を行なう代わりに、実際に人間の脳が胎児から乳児にかけて行なっているように脳細胞の分裂、移動、繊維の伸長によって自動的に回路を形成するという目論見の元に、幾人かの研究者が神経回路の発達過程のモデル化に取り組んでいる。ATRのJ.WaarioやPixar社のK.Fleishefは、化学物質の濃度勾配に沿って成長する神経繊維のモデルを組み立て、細胞間の結合を自律的に実現する方法と、その性質について調べている。またATRのH.de Garisは、セル構造オートマトンを並列に実行する専用マシンを使って、複数のセルから構成される神経細胞モデルが、自己増殖系の中で回路を組み上げるという方法について試している。

(3) 生態系と貫同行動

生物個体群の挙動については、植物の群落の構造、社会性昆虫の生態、異種個体間の競争および共生、食物連鎖、群れ行動、人間社会の諸活動など、様々なテーマがある。

(A) ゲーム型生態系(囚人のジレンマ)

セル構造オートマトンと共に J.von Neumann の業績の1つであるゲーム理論もまた人工生命研究の重要な要素技法である。異種個体間の捕食や寄生、共生、といった生態学的視点からの関係、あるいは、人間社会の経済活動における取り引き関係などを数学的に抽象化するとゲーム理論になる。ゲームの戦略を遺伝情報として、ランダムな戦略で初期化された多くのプレーヤから開始し、何回かのプレイの後の合計得点を適応度みなし、進化的計算を適用すれば、進化するゲーム型生態系となる。松尾、Axelrod、Lindgrenらのシミュレーション実験によって様々な戦略のコード化方法や、対戦のモデルなどが試されてきており、戦略の安定性や進化プロセスについての考察が加えられている。人工生命では、プレーヤの地理的な分布や観測ノイズなどの導入により、生物界の生態系に近いモデルを用いた研究が多い。

(B) ティエラ

第2回国際ワークショップで紹介されたT.Rayのティエラ(Tierra=スペイン語で大地の意)は、もっとも生命らしい人工生命とも言われている。仮想マシンの上で並列に実行

される自己複製機械語プログラム群の進化生態系である。最初に自己複製機能をもつ簡単なプログラム1つから始め、たまに起きるコピーエラーによって突然変異体が生まれ、そのなかに他より効率良く自己複製する能力があるものがあれば、それが広まる。メモリ空間の大きさは一定であり、新たな複製を作るときに必要な空きメモリがないときは古いプログラムから消されていく。メモリコピーの部分をサブルーチン化したプログラムから実行を開始すると、他人のサブルーチンを使う短いプログラムが現れる、これは、他人の資源を一部利用しているので、ある種の寄生である。寄生生物は宿主がいなければ繁殖できないから、すべてが寄生になることはなく、ある比率で安定する。すると今度は、寄生してきたプログラムの実行権を奪って、自分をコピーさせる重寄生が現れる。そのようにして、共生やチーターといった、実世界の生物生態系に見られるような様々な異種間関係が発生する。このモデルは細胞をもたないRNAワールドに相当する世界である。

ATRに本拠地を移したRayは数年前から多細胞化の概念を取り込むべく、ネットワーク・ティエラのプロジェクトを進めている。RNAワールドでは、進化が進むにしたがって1つのプログラムの長さがどんどん短くなり、単純化の方向へ向かう。複雑な形態を発生させるには、多細胞化が必要であろうというのがRayの意見である。単細胞では、空間的な構造の発生について限界があることは明らかであろう。ネットワーク・ティエラでは、インターネットに接続された複数の計算機に、ティエラを実行するための仮想マシンと、移住のプロトコルを解釈するデーモンを含むディエラサーバを置き、資源を効率良く使って自己複製するプログラムを進化させる。1つの細胞をプロセスと考え、並列プロセスによって多細胞化を実現する。人間が自然の生物から木材や肉などの部分を利用しているように、多様なプログラムの切れ端の中から、人間には思いも付かなかったコードが発見できれば、工学的応用へも繋がることであろう。

(C) 群行動

C.Reynoldsによる魚と鳥の群のシミュレーションを用いたCGアニメーション作品以来、個々のエージェントに単純な運動規則を入れるだけで複雑で自然にちかい群行動を実現するBOIDの技法は、計算機の高速度大容量化とCG技術の発展にともなって、今では完成された技術としてハリウッドでの映画作りに多く利用されている。代表的なところでは、ディズニーのライオンキングの暴走するヌーの群、バットマン・リターンズのコウモリの群、ジュラシック・パークの駆け回る恐竜の群などがある。生物の群と、気体分子や天体のような物理現象との違いは、個々の移動体の反応に遅れがあるかどうかである。物理的実体では物体間に働く力の作用にはほとんど遅れがないのに対して、動物では、視覚などの感覚情報を基に行動を決定するため、どうしても反応に遅れが生じ運動が収束しない場合が

多くなる。最近の研究としては、現実に近いモデルの導入や、エージェントの質量差による群の形態の相転位現象の理論などが取り組まれている。

(4) ハードウェア進化

自己複製可能なハードウェア実現の困難さから、人工生命研究におけるロボットや電子回路のハードウェアの進化に関する研究は、設計図とシミュレーションによる評価が主となる。しかし、ハードウェアの柔軟性の意味で、Lego ブロックのような汎用部品の組み合わせや、光効果樹脂による3次元構造造形による試みもなされている。電子回路については、近年 ASIC を経て FPGA(Field Programmable Gate Array) が登場し、ハードウェアとソフトウェアの境界があいまいになってきており、進化的な電子回路の創発の実験も行なわれつつある。

(A) 設計の最適化とシミュレーション

進化的計算法はパラメータ最適化だけでなく、探索空間の柔軟性から、構造を持ったデータの最適化にも適用可能である。これを利用して、ハードウェアの基本構造自体を最適化しようという試みがいくつかある。例えば、センサの位置と個数などを遺伝情報としてコード化する。残念ながら、各個体の遺伝情報に従ったハードウェアを一つ一つ製作し、その性能を評価するわけにはいかないので、計算機シミュレーションを利用することになる。実世界で動作するシステムの中には、評価の目的に十分耐え得るシミュレータを作れる場合とそうでない場合がある。いずれにせよ、実世界でのセンサのノイズやアクチュエータの揺らぎ、微妙な特性のずれのために、真に正確なシミュレータを作成することは困難である。実機とシミュレーションの差を埋める方法として、シミュレーションによって十分に進化させた後に実機で数世代の進化を行なって微調整するという方法も提案されている。

(B) FPGA の回路の進化

FPGA は電氣的に結線を変更可能な LSI チップである。電子回路記述のために設計されたハードウェア記述言語 (HDL) を使って、回路を遺伝情報として記述し、与えられた仕様との整合性と回路の単純さを評価基準として進化的計算を適用すれば、効率の良い電子回路を見つけ出すことができる。FPGA が登場するより以前は、回路シミュレーションにより仕様の満足度をはかっていたが、FPGA を使えば、その場で回路を構成し、試すことが可能になる。

(C) コンピュータの軟化革命

筑波大の星野は、FPGA を積極的に使うことで、コンピュータの基本設計と利用方法に革命が起きる可能性があるという。少量の専用チップの作成やプロトタイプ回路の作成のために考案された FPGA であったが、回路の可塑性を積極的に生かし、回路設計自身を進化させる仕掛けを組み込む試みが始まった。第 1 段階は進化の基本サイクルである選択と遺伝を FPGA とは別のコンピュータに行なわせることだが、FPGA の自己進化についてはまたこれからであり、工学システムと生物システムの違いをどう乗り越えるかが大きな課題となろう。

(5) 進化ロボティクス

未知環境や変動する環境で動作する、あるいは、解析が困難な複雑な環境で動作するロボットを設計する手法として、学習や適応と名付けられた様々な枠組が提案されている。典型的な接近法の 1 つは、制御規則を進化的に変更する機構をロボットに持たせることである。人工ニューラルネットや分類子システム、さらには遺伝的プログラミングを用いた方法などが試されている。ただし、これらの研究は単体のロボットを対象としており、進化的計算の枠組を単なる最適化手法の 1 つとして利用したものに過ぎない。進化とは、本来、適応的变化が集団で行われるものであるから、複数のロボットによる自律分散型のシステムの適応的性能向上にこそふさわしいと考えることもできる。

(A) マルチエージェント進化

マルチエージェントに対する進化的計算の応用はいくつか試みられている。1 つの方法は、単一エージェントの場合と同様に、進化的計算の枠組を最適化手法の 1 つと捉え、複数の集団についてそれぞれの性能を評価し、選択する方法である。つまり、1 つのエージェント集団を進化における 1 つの個体に対応させる。Agah らはこの手法を分散ロボットシステムの制御則の発見に応用した。L.Bull らは 1 つのロボットを複数の不均質なエージェントで制御するという枠組のもとで、この手法を試している。

一方、個々のエージェントを進化における個体とみなすやり方は、動物集団における自然界の進化と相似である。人工生命の立場から動物集団から形成される生態系の進化をシミュレートしようとするれば、必然的にこの形態をとることになる。人工アリや、さらに抽象的なレベルでの研究もいくつかなされている。

ここでは、工学的な応用を目標に、人工生命の研究に多くみられる後者の形態でのマルチエージェント進化の枠組を提案する。ダーウィン進化の基本要素は変異を伴う自己複製と自然選択の組合せである。自然界の生物は自己の体を複製することができるが、人工の

ロボットにハードウェアの自己複製を行わせる技術の確立には、まだ多くの困難があると思われる。ここでは、その困難さを回避するためにソフトウェアレベルでの進化を対象とする。また、自然界では適合度は、すなわち繁殖成功率である。しかし、工学的応用では設計者である人間の意図を反映する必要がある。つまり、適合度は自己複製能力ではなく、あらかじめ与えられたタスクの達成度で計られなければならない。

ロボットなどの制御則の発見に進化的手法を応用する場合に生じる大きな困難の1つは、膨大な数の性能評価をこなさなければならないという点である。多くの場合、実機による評価には多くの時間と労力が必要となるため、シミュレーションによる評価が採用される。しかし、シミュレーションと実際との相違、あるいは、精密な物理シミュレーションを実現することの困難さから、しばしば適用が困難な場合も生じる。シミュレーションと実機での評価の組合せについての、Miglino らの実証的な研究では、シミュレーションと実機の差は回避できないものの、シミュレーション結果を実機で調整するという方向で、十分実用になることが示されている。また、単体のロボットの実機による進化は Floreano らによって試みられている。これは、ロボットを制御するエージェントが複数が時間分割により交互に実機の制御を行い、障害物回避戦略を獲得しようとするものである。移動ロボットの障害物回避のような比較的単純なタスクなら、実機でも十分進化が可能であることが示されている。ここで提案する方法も、いかに素早く十分な性能を獲得できるかが1つの鍵になる。

分散したエージェントを個体とみなす進化的計算は、超並列計算機や分散計算環境での高速実行を念頭においた分散 GA あるいは並列 GA の1種と見ることもできる。最適化手法としての分散 GA の性質については理論的にも調べられつつあり、通常の GA における大域的な選択方法と比較して収束が遅い分、多様性の維持については優れていることが示されている。ここで提案する手法は、分散移動ロボット上での分散 GA とみなすこともでき、分散 GA の性質の多くの部分を引き継ぐことが予想される。

2.9.4 進化的計算法

創発に使用される進化的計算法と呼ばれているものに次のような方法がある。

- 進化戦略 (Evolution Strategy : ES)

ベルリン工科大学の I.Rechenbegg や H.P.Schwefel らにより開発された方法で、ランダムウォークにおいて変化量として与える正規乱数のパラメータを動的に変化させる。2世代分の個体群から次の世代を選ぶ方法と、世代間の重なりのない方法が提案されている。選択に関しては、確定的な操作が使われている。

- 遺伝的プログラミング (Genetic Programming : GP)

J.R.Koza が命名した遺伝的プログラミングは LISP などで使われるリストを操作することにより自動プログラミングを目指したものであるが、プログラムに限らず、部品構造、空間分割などにも木構造は現れる。木構造の遺伝的操作はカットする部分より下の枝を同時に扱う必要がある。

- 進化的プログラミング (Evolutionary Programming : EP)

D.B.Fogel により開発された進化的プログラミングは進化戦略同様実数コード土の最適化を行う方法であるが、交叉は行わず、個体毎に正規乱数を用いて確率的に変化させ、分散のパラメータを動的に進化させるように設計する。選択ではエリート戦略でありながら確率的な効果を出すように工夫がされている。

これらは総括して進化的計算法と呼ばれている。近年、ファジィ集合の考案者 L.A.Zadeh らの提唱により、進化的アルゴリズム、ファジィ、ニューラルネットなどを総称してソフトコンピューティングという呼び方が広まりつつある。これは、人の意思決定や知識などを定量的に扱う際に、数値的に厳密な計算を要求する従来の最適化手法を流用するのではなく、知識とデータを融合して大きな不確実性に立ち向かう新しい流れである。

2.10 高次推論

2.10.1 高次推論の定義

基本的とも言うべき推論に演繹的推論 ($A \rightarrow B$ と A より B を導く型の推論) がある。演繹的推論は、そのメカニズムが大方解明され知識システムに利用されてきた。一方、完全な知識を対象にした従来の演繹的推論では、知識獲得の問題があるため、不完全な知識を扱い演繹的推論を超える知能のメカニズムを解明し、定式化する研究が行われている。このような推論を一般的に高次推論と呼んでいる^[113]。石塚の文献^[114]では、完全な知識に対して、不完全な知識(常に正しいわけではないような知識)を扱う次世代知識ベースシステムを高次推論機能として捉えそのアプローチを示している。

高次推論の明確な定義はないが、概ね以下のような推論方式を挙げることが出来る。

- 事例ベース推論 (2.4.1項参照)
- 類推 (2.4.2項参照)
- 定性推論 (2.4.3項参照)
- 仮説推論

常に成立する知識に加え、他の知識と矛盾の可能性を持つ仮説という知識を扱い、与えられたゴールを説明するのに必要な仮説の集合を求めるもの。実用上は推論速度が問題となるためその高速化の研究^[117]が行われている。

また、生体の免疫系の抗原認識機構を応用した自律分散診断アルゴリズムもある。免疫系は一つ一つの免疫細胞に注目してみると自律分散的に機能しているが、免疫系全体としては、システムレベルで抗原に対抗している。このアルゴリズムを診断応用に適用している例がある^{[115][116]}。

2.10.2 応用例

大規模かつ複雑な原子力プラントなどにおいては、大量の知識や情報から”これだけは確実にいえる”という正確性(確実性)のある情報を迅速に運転員や経営者に導く技術に関する研究が必要であると考えられている。

また、用意された知識群に内在する局所的欠陥に対して頑健で、かつ結論に求められる精度や詳細さに妥協が認められる場合に、それに応じて計算資源を低減できるようなシステム化が求められている。

両者とも知識、情報の絞り込み、利用方法へのAI技術の適応がキーポイントである。このような目的に近い研究例を次に示す。

(1) 原子カプラント知的診断における多様性評価基準 [118]

この研究は、情報の正確性の向上を図った研究である。

原子カプラントの運転支援システムが実際の現場で有効性を発揮していない理由の一つとして支援システムが導く結論の信憑性の問題があげられる。この問題を解決する手段として、利用する方法や情報に多様性を持たせ、それらに基づく結果を相補的かつ知的に総合化することによって導出する結論の信憑性をあげることを検証している。また、この手法により、より複雑で高度な診断が要求される状況にも対応可能になることを想定している。

多様性規範に基づく診断システムは図 2.17で示す 3つの要素で構成される。

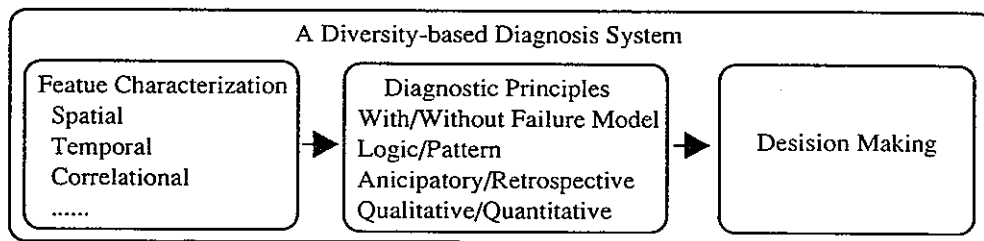


図 2.17 多様性診断システムのフレームワーク [118]

1) 症候特徴づけ (Feature Characterization)

計装センサ信号を取り込み、種々の症候情報を抽出する。ここの情報処理の多様性を”情報の多様性 (Information Diversity)”と呼んでいる。

2) 複数診断原理 (Diagnostic Principles)

得られた症候情報は様々な異常診断手法に入力され、各手法ごとにそれぞれの診断結果が出力される。ここの情報処理の多様性を”方法の多様性 (Methodology Diversity)”と呼んでいる。

3) 意思決定 (Decision Making)

複数の診断結果が一定の過程を通じて1つの意思決定としてまとめあげられる。

“情報の多様性”の導入によって、異なった種類の症候群に着目した処理が行われ、たとえ同一の診断手法を適用しても、異なる根拠に基づく複数の結果がもたらされる。また、“方法の多様性”により、異なる仮定や意味付けの下での診断が行われ、たとえ同一の情報源を用いたとしても、異なる診断プロセスによる複数の結果がもたらされる。この2種類の多様性の下で、症候抽出と診断手法との適宜な組合せのおのおのが、互いに相補的な

関係を有する診断モジュールを構成する。このようにして得られた複数の診断結果の提供だけでも、運転員には診断材料として有用である。また、運転員の大局的判断と処理負担の軽減のために、さらに一歩進めて総合的な結論を導出し、提示することも重要である。したがって、多様性規範における診断システムのフレームワークの一部として、次に述べる“統合化意志決定 (Unified/Integrated Decision Making)”を提唱している。

統合化意志決定：多様性規範の下で与えられた複数モジュールの処理またはそれらの結果の相補的統合を図る機能。

この実現方法としては、例えば始めに各モジュールの個別の結果を導出し、それら複数の結果を各モジュールの自己評価に基づき統合ないしは取舍選択する統合化された意思決定法が考えられ、著者らはすでにこの方法の有効性を確認している。

上記の“情報の多様性”、“方法の多様性”について実際に実現可能な多様性について検討し、その選択基準についても検討しニューラルネットを用いた原子力プラントの異常診断応用に適用し具体的有効性の検証を行った。その結果以下の知見が得られた。

- 1) 単一の症候情報では、多くの異常事象を診断することは難しい。
- 2) 複数種類の症候情報を使用することで診断の範囲および信憑性を向上させることが出来る。
- 3) いずれの手法を用いるにせよ、着目症候の選択組合せには配慮が必要であり、そのための指針、評価基準が得られた。

(2) プラント運転操作訓練支援システムのための学習者モデル構築手法^[119]

この文献では、発電プラントの運転において想定外事象への対応操作において運転員が用いる知識のモデルに基づいて訓練システム開発のための要素技術の学習モデルを構築する手法を提案し検証したものである。ここでは、想定外の状況への対応をどのような知識モデルを使用して行っているかを説明する。

想定外事象への対応では、既定の操作手順だけでなくプラントの振舞いの理解に基づく操作手順の導出が必要となるため、操作に関する知識ばかりでなくプラントの振舞いに関する知識が必要となる。前者を操作知識、後者を機構知識とよぶことにする。古田らは、運転員が持つ知識を TH(Task Hierarchy：タスク階層) と QC(Qualitative Causality：定性因果) 層の2層構造からなる知識モデルによって表現することを提案し、実験によってその表現としての十分性と妥当性を確認している。図 2.18はこの知識モデルを概念的に示したものである。

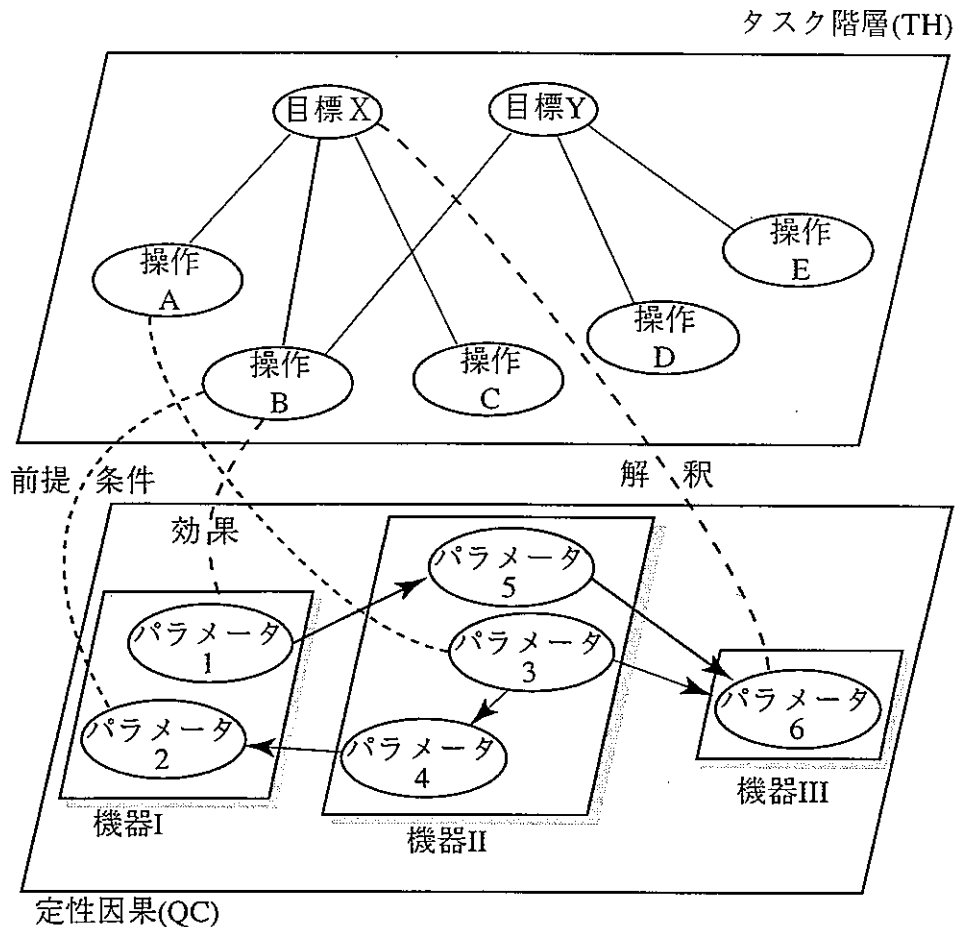


図 2.18 プラント運転員の知識モデル [119]

このモデルにおいて、TH層はプラントの運転操作に関する浅い知識を手段目標関係を中心に表現したもので、TH層の各ノードは操作の目標、副目標、あるいは特定の運転操作を意味している。こうした手段目標関係が、目標駆動型の合理的行動のために必要な基本的知識であることはすでによく知られている [120]。運転員は、手段目標解析によって目標駆動的に操作手順を導出するためにこの知識を用いるほか、定型的操作手順を表現するテンプレートとしてそのまま想起・実行することもある。

一方、プラントの振舞いに関する深い知識を現象論的に表しているのがQC層である。QC層の各ノードはプラントパラメータを表し、物理的因果関係を介してパラメータ間で変化がいかに拡がるかという視点からプラントの振舞いが理解される。認知的負荷を抑えるために人間は定量的表現よりも定性的表現を好む傾向があるので、因果関係の表現も多くの場合は定性的になる。そうした定性的因果関係は、人間が複雑な物理システムの振舞いを理解するための重要概念であることが指摘されている [121]。そこで本研究でも、プラントの振舞いに関する知識を、パラメータ間の定性的因果関係によって表現することにし

た。

さらに、TH層のノードとQC層のノードも解釈、効果、前提条件の3つのリンクによって関連づけられており、これらのリンクも運転員の知識を構成する。まず、解釈リンクはTH層の目標をQC層のパラメータと関連づけており、パラメータのある状態が目標の達成を意味することを表す。また、効果リンクはTH層のある操作の実行がQC層の特定パラメータの変化を引き起こすことを表しており、前提条件リンクはある操作の実行が特定パラメータがある状態であることを事前に要求することを表している。この2層構造の知識モデルが意味するところは二点ある。まず、QC層の因果関係の経路がTH層の個々の手段目標関係の裏づけとなるので、目的論的で表層的な知識を現象論的、原理的な知識で説明することができる。すなわち、QC層の知識はTH層の知識の深い理解を提供する。もう一点は、事前にTH層に記述されていない操作手順であってもQC層の因果関係をたどることによって新たに導出できることで、これが運転員の想定外の状況への対応を可能にしていると考えられる。

QC層の知識からTH層の知識を導出する処理は、一種の知識コンパイルに他ならない。知識コンパイルについてはこれまでも多数の研究が行われてきたが、たとえば、大和田らは定性シミュレーションから予測される対象システムの挙動を使って、医療診断に用いるルールを導出する手法を提案し^[122]、山口らは5種類の深い知識から機械の故障診断に用いる故障木を導出するシステムを開発している^[123]。ただし、これら多くのシステムが故障診断やシステムの挙動理解を目的としているのに対し、本研究では深い知識からの手順生成が目的であり、さらにこのモデルを想定外事象対応訓練における学習者モデルの構築に適用する。また、あらかじめ浅い知識にコンパイルしておくのではなく、浅い知識では問題が解決できない場合にそのつど深い知識を用いた推論に切り替えると考えるので、深い知識と浅い知識の共用に分類できる。

(3) その他

2.3節で解説したオントロジーの研究も大量の知識や情報から正確性（確実性）のある情報を迅速に導くための技術要素の一つと言える。オントロジーの記述により、従来隠されていた様々な本質的な情報が明示され、それを参照することにより従来なかったシステムの開発が可能になる。即ち、システム自身が何を知っているか、どのような世界モデルに基づいて自分の知識が構成されているか、各知識を構成する基本概念体系はどのようになっているかなど、知識処理を行うシステムとして持つべき基盤知識、およびメタ知識が明示化され、それらを対象とする高度な推論実行が可能になるからである。

2.11 米国の国家プロジェクトにおける取り組み

米国で1992年から1995に行われたHPCC(High Performance Computing and Communication)では、その研究要素の1つIITA(Information Infrastructure Technology and Applications)において、高レベルのユーザーインタフェースの研究として知的インタフェースの開発がおこなわれた。知的インタフェースには、以下の要素が含まれる。

- コンピュータ・ビジョンとイメージの理解
- 言語、スピーチ、手書きおよび印刷物の理解
- 知識ベースの処理
- マルチメディアコンピューティングとビジュアライゼーション

HPCCの後継研究計画のCIC R & D (Computing Information and Communications R & D)では、HuCS(Human Centered System)において人工知能関連の研究が行われている。HuCSは幅広いユーザー・コミュニティ(科学者、工学者、教育者、学生、就労者、一般公衆など)がコンピューティング・システムおよび通信ネットワークに対して、より容易にアクセスし、利用できるシステムを開発するために、以下の技術を研究している。

- 大量のマルチメディアおよびマルチソース情報を管理、分析および出し入れするための知識倉庫と情報エージェント。
- 知識倉庫へのアクセスを提供し、知識の共有、グループ著作、および遠隔器材の制御を容易にする共同制作・研究環境(共同研究室)。
- 会話、ジェスチャーなどの認識と、合成を含むマルチモードのヒューマン・システム、相互作用などを可能にするシステム。
- 科学研究、健康、医療、マニファクチャリングおよびトレーニングを含む各種分野のバーチャルリアリティ環境とそれらのアプリケーション。

3 産業界での導入および応用例

3.1 概要

本章では、アプリケーションの分類から見た応用例を紹介する。最近の論文から、診断、制御、判断支援と大きく分類しどのようなAI技術を使用して、どのような効果を得ているかを報告する。

それぞれの応用例と要素技術との関係を表 3.1 に示す。

表 3.1 応用例と要素技術の関係

項目	文 献	知識獲得	オントロジー	推論	機械学習	自然言語処理	エージェント	ニューラルネット	創発システム
診 断	ニューラルネットによる操業知識のモデル化とプロセス診断への応用							○	
	ペトリネットによる原子力プラントの離散事象モデル	○		○					
	大規模システム事故事例データベースからの知識獲得法に関する検討	○							
制 御	連続およびバッチプラントにおける AI による運転支援事例	○		○				○	
	エージェントによる次世代生産システムの課題と展望						○		
	AI・アドバンスト制御の技術動向と富士電機の取り組み	○		○				○	
判 断	電力系統事故時復旧支援における事例ベースの洗練化	○		○					
	知的訓練システム Smart Trainer における訓練タスクオントロジー		○						
支 援	機械学習を用いた変電所機器構成設計システム	○			○				
	強化学習を用いた発電プラント起動スケジューリング				○				○

3.2 診断への応用例

3.2.1 ニューラルネットによる操業知識のモデル化とプロセス診断への応用

圧延設備の異常診断に熟練者の操業知識をモデル化する手法としてニューラルネットを用いた研究である^[124]。

圧延プロセスの異常原因と結果から IF-THEN 形式の診断ルールを作成する。このルールをニューラルネットを用いてモデル化する。条件、結果を整理していき、ルールの条件を入力に、結果を出力とするニューラルネットを構成する。ここで、「複数の結果が同時に生じた場合に適用できるルールを優先的に用いる」という診断方針を立て、この方針に属するルールのみを設備診断に用いている。

用意された学習用教師データに対して、100%の認識率を持つニューラルネットを設備異常原因の推論エンジンを用意した。システム構成を図 3.1 に示す。システムの動作は以下の 6 ステップで構成される。

- 1) Field Data を設備 DB の定常状態の値と比較し、閾値判定することにより、正常か異常かを判断する。
- 2) 異常と判定されたセンサがルールのどの属性に相当するのかをエンジニアリング DB を参照し決定する。
- 3) ニューラルネットに入力し、設備異常を推定し、結果を出力する。
- 4) 人間が推定結果を見て、満足できない結果がでた場合は入力と満足できる出力の組を新たな学習用教師データとして、追加学習することをシステムに命じる。
- 5) システム側で矛盾の無い形でルール群を再構築し、ニューラルネットを再学習する。
- 6) 3) と同じ入力をシステムに入力することにより、既存ルールでは正しく推定できていなかったデータを新たなルールを追加学習することにより正しく学習できたことを確認する。

熟練者の操業知識をニューラルネット使用してモデル化したことにより、設備異常診断システムに適用でき、知識の学習を容易にすることができている。

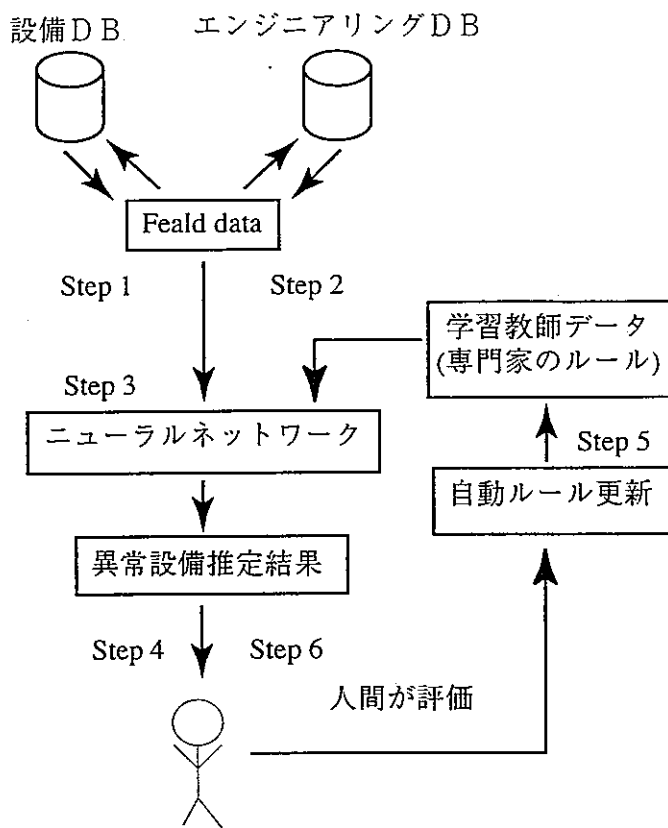


図 3.1 圧延設備異常診断システムの流れ [124]

3.2.2 ペトリネットによる原子力プラントの離散事象モデル

ペトリネットを用いることによって、一般的な定性推論と、推論結果の矛盾を解くための特殊な制約とを全て含んだ完全なモデリング法を提案している [125]。モデリングの対象として PWR(加圧水)型原子力プラントの冷却システムを考え、提案した方式でモデル化し、定性推論を行った結果を評価している。

定性モデリングの表現は次のようにしている。パラメータ (たとえば温度や発熱量など) は連続な数値を取る場合があるが、そのような連続変数を次のように定性的に取り扱う。パラメータがプラントにおいて正常であれば "0"、異常に値が高い場合は "+"、異常に値が低い場合は "-" と表す。変化の傾向についても同じように定性的に表現し。変化していなければ "Std"、増加していれば "Inc"、減少していれば "Dec" と表す。また、ある変数 X の変化の傾向を D(X) と表記する。

対象とする原子力プラントの冷却系を図 3.2 に示す。各パラメータを定性的な状態と変化の傾向を組み合わせたモデルで表す。ただし、連続変数であっても、システム外部から影響を受けない限り変化しないもの (Q0in、T2cold 等) については定性的な状態のモデル

のみで表す。また各系の持つ熱量については変化の傾向のモデルのみで表わすが、“Std”の状態について、これ以上まだ変化する場合(非熱平衡状態)と、もうこれ以上変化しない場合(熱平衡状態)の2つを用意する。これら2つの“Std”の状態への遷移の条件は $D(Q0)$, $D(Q1)$, $D(Q2)$ がそれぞれ“0”であれば熱平衡状態、“0”でなければ非熱平衡状態とする。系が熱平衡状態となったならば、その系に関する温度の定性値はその時点での値とし変化の傾向は“Std”とする。

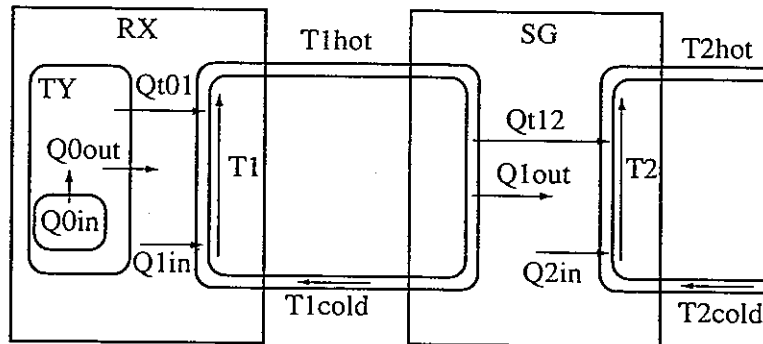


図 3.2 冷却システムの概要 [125]

このようにしてモデル化した各パラメータを、制約式にしたがって互いに連結していくわけであるが、ここで因果関係と優先度を考慮にいれなければならない。因果関係は、以上の制約式については右辺から左辺への影響のみを考える。優先度については、 $T1hot + T1cold$ 等の同種のパラメータの数値的演算については優先度を、最も高くする。また1つの制約式中であっても、それぞれのパラメータについて右辺から左辺への影響の、優先度を考慮にいれなければならない。例えば、冷却材の出口側温度($T1hot$)へは、受け取る熱量($Q1in$)からよりも、冷却材自身が最初に持っている温度($T1cold$)からの変化の伝わり方のほうが早いと考えられる。よって $T1hot$ への許可アークの優先度 $Q1in$ からよりも $T1cold$ からのものを高くする。このようにして制約式中のパラメータ間、あるいは制約式間に優先度をつけていく。

問題の起こったパラメータのプレースに異常な初期トークンを与え、発火可能なトランジションがなくなるまで発火を繰り返した結果、影響の伝播は以下ようになった。

1) 一次系冷却材流量減少

$T1$ (一次系冷却材通過時間)を[+]としてシミュレーションを行うと、以下のような結果となった。

Q_t0	T_f	Q_t01	$T1h$	$T1c$	Q_t12	$T2h$	Q_t23
0	0	0	+	-	0	0	0

2) 蒸気発生器熱伝達率降下

Hsg(蒸気発生器伝熱率)を[-]としてシミュレーションを行うと、以下のような結果となった。

Qt0	Tf	Qt01	T1h	T1c	Qt12	T2h	Qt23
0	+	0	+	+	0	0	0

提案したペトリネット定性シミュレーション方式で、原子力プラントの異常伝播を推論したところ、専門家が行った結果と一致するものが得られた。また、モデルの構築には定性的に表現する知識しかいらず、シミュレーションの過程においては矛盾を無くすために外部から人間の感覚が操作する必要もなく、自動的に正しい解が生成された。

今後の課題としては、プラントの詳細な部分までモデル化し、多種多様な故障を診断できるようなモデルの構築を考えている。

3.2.3 大規模システム事故事例データベースからの知識獲得法に関する検討

大規模機械システムの故障診断応用を目的として、異常事象やトラブル事例報告からの知識獲得を試みた研究である^[126]。

一次情報源である不定形、自由記述形式で記述された異常事例報告文書(公開)の定型化・構造化処理法と、その定型化に際して採用された故障生起過程の汎化知識モデルという考え方、そして汎化モデルに基づく構造化データベースの構築法を中心としている。提案する手法は応用対象を限定するものではないが、この研究では具体的対象としては原子力発電所を取り上げている。

原子力発電所の異常事象は定期的に公開文書の形で要約、公刊されている。その文書では必要に応じて機器や系統の図面を参照しつつ、事象の発生当時のプラント状態、第一発見事象、事象推移と収束手続き、原因同定、対応措置、影響重大さの評価などの項目が簡潔に説明されるのが特長である。この自由記述形式文書の定型化作業を、全自動計算機処理によってではなく、ある程度の人間の介入を前提としつつ、効果的に遂行しようとするのがこの研究の目標である。その際の方針として事故生起連鎖の階層モデルと、多段階状態通移過程表現という基本構造を提唱している。

提唱する考え方に立って実際にプロトタイプデータベース構築を行い、原子力発電所トラブル事例報告文書(原子力発電所運転管理年報^[127]から故障事例222件)に適用した結果から、この提案手法の有効性を確認している。この報告で示した適用例は課題としては領域固有のものであるが、提唱された事故生起連鎖の階層モデルと、多段階状態通移過程表現という基本構造は、獲得される知識の包括性、汎用性という意味で他分野での成立も期待できる領域独立性の高いものと考えられる。今後広範な事例への適用を通して提案手法の有

効性を確認するとともに、知識獲得の下流側(知識の発見、処理、活用)についても実用性の高い手法の開発を進めていく計画である。

3.3 制御への応用例

3.3.1 連続およびバッチプラントにおける AI による運転支援事例

化学プラントへの AI 応用についての文献である [128]。

従来のオペレータによる制御と AI による制御の関係を図 3.3 の様に示している。化学プラントでは、ベテランオペレータのノウハウがプラント制御に重要なものであった。そこで、このノウハウを AI 技術で置き換えることでプラント制御に適用していくことができる。ここで、"AI 技術は個々には万能選手ではない" という観点に立って、ファジーや、ニューラルネットワークといった種々の技術を組み合わせて総合的な判断を行う仕組みを構築することを計画している。

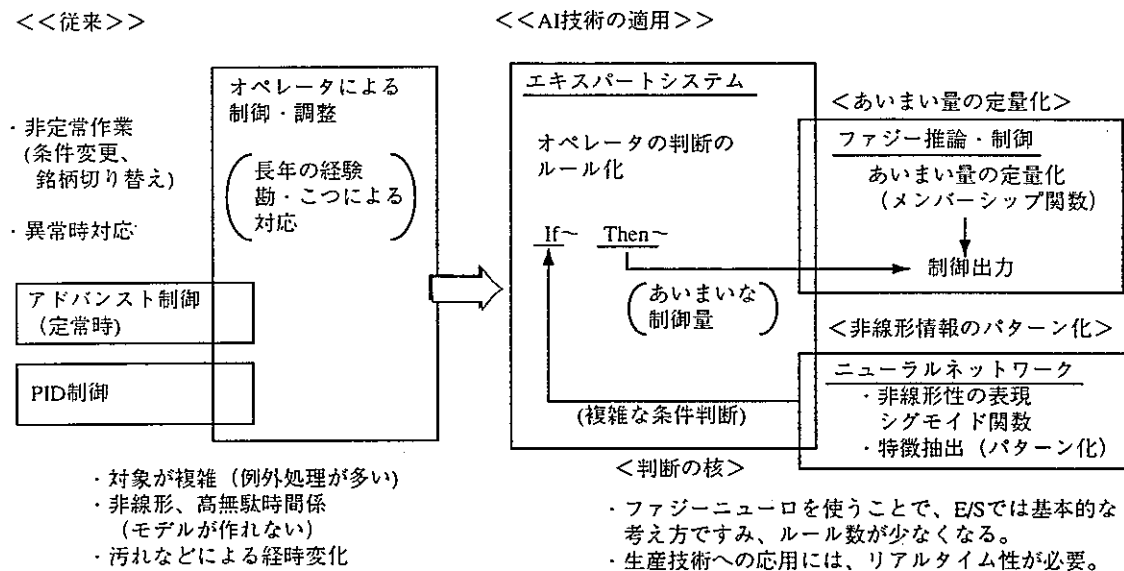


図 3.3 AI 技術の適用によるオペレータノウハウの自動化 [128]

システム例として連続重合プラント制御を上げている。連続重合プラントにおいては、数時間毎に測定される物性値をもとに運転条件の調整を行っている。これは、原料組成変動などの外乱によって最適値から外れた運転条件を補正しているのである。ところが、代表的な重合物性は分析装置の制約から、リアルタイムでの測定が困難なため制御に使えるだけの頻度では測定できない。そのため、これまでもいろいろな重合物性を推定する試みが行われてきたが、プロセスモデルが、非線形で複雑なため、いずれも精度の面で制御では使えなかった。

そこで、ニューラルネットワークを使って物性を予測し、その情報をもとに制御するシステムを構築した。その概念を図 3.4 に示す。このシステムでは、エキスパートシステムを中心として物性実測値と推定値をもとにファジーおよびエキスパートルールによって制御

が行われるようになっている。このシステム化によって、定期的な物性測定負荷を軽減できるとともに、安定した運転と製造コスト削減が期待できる。

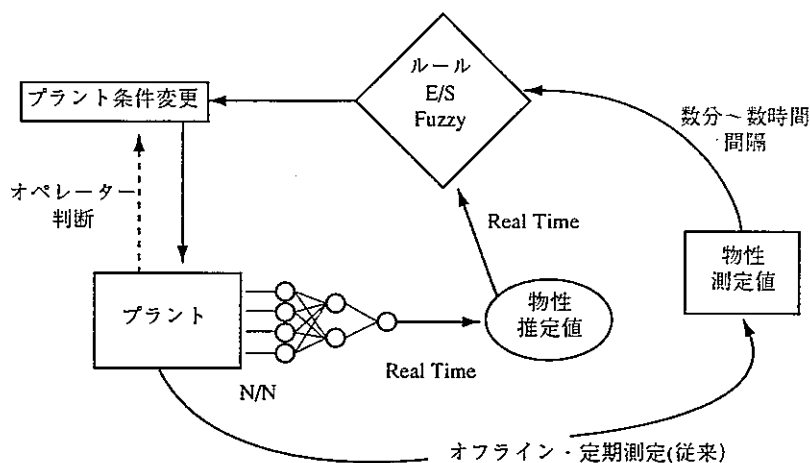


図 3.4 連続重合プラントにおける物性制御システム [128]

3.3.2 エージェントによる次世代生産システムの課題と展望

「生産物中心の柔軟な生産システム」というコンセプトを実証するために、米国カーネギーメロン大学ロボティクス研究所内のラピッドプロトタイピング製造実験設備用に、Java 移動エージェントを応用した生産制御システムを開発した事例 [129] を解説する。

実験システムの開発の目標は、

- 1) 個々の生産物の製造手順 (レシピ) を製品エージェントが保有することにより、一品ごとに異なった試作品の生産を可能とする。
- 2) 次工程の装置選択を装置エージェントと製品エージェント間で動的に決定し、システム内で装置を追加、停止、削除してもシステム全体には影響を与えずに、増改造ご保守を可能とする。
- 3) すべてのエージェントは操作・監視用 PC により現在のステータスが監視できる。

である。

次にシステムの実装について説明する。本実験システムで開発した製品エージェントは、生産物ごとに対応し、その生産に必要な工程と各工程において使用される処理やパラメータを保持し、自律的に工程ルートを選択できる。また、各工程に設置されている装置を、製品エージェントの指示にもとづいて制御するための装置エージェントを開発した。

製品エージェントが保持する生産に必要な工程や処理等の情報をレシピで表現し、装置エージェントが保持する装置制御の方法をスクリプトで表現することで、様々な分野の製品やその生産に必要な装置への対応が可能になった。製品エージェントが、次に移動する装置を選択する装置ディスパッチングについては、製品エージェントがシステム上に次工程で必要としている作業名をブロードキャストして、それに対して受け入れ可能な装置エージェントの応答を到着順に選択することとした。

本システムは、管理エージェント、製品エージェント、装置エージェントおよび操作・監視用ユーザインタフェースで構成される。(図 3.5参照)

生産制御システムのみには留まらない拡張性と、相互運用性を確保することを目指し、エージェントは、既に入手可能なエージェント・インフラストラクチャ上で動作するように開発を行い、本エージェントの実装は、Java 仮想マシン上で動作する移動エージェントインフラをベースとして、Java で開発した。したがって本エージェントは、Java 仮想マシンが搭載されている動作環境であれば、基本的にハードウェアの種類を問わず利用できるものであり、広くオープンなシステムを構築することができる。

従来のトップダウン CIM に代表されるパッシブなアーキテクチャに代り、自律的に振る舞うエージェントによるボトムアップでアクティブなアーキテクチャを実現でき、また生産制御システムとして期待される柔軟性・拡張性・信頼性を実現できる。

システムの柔軟性については、製品エージェントが生産物ひとつひとつの製造手順をレシピとして保有することで、一品生産が可能になり、装置エージェントが装置ごとに存在することで、装置の追加・削除においてもシステム全体への影響を最小限に押さえることができた。信頼性においては、エージェント間でハートビートを相互に取り交わすことで、どのエージェントが異常状態にあるかを検知できるようにできた。

今後の課題として動的なスケジューリングの最適化、共有資源の競合を調停したりするためのエージェント間の協調機能等をあげている。

3.3.3 AI・アドバンスト制御の技術動向と富士電機の取り組み

AI 技術の動向と富士電機で取り組んで来た AI 応用システムに関する文献である^[130]。表 3.2 に応用事例とそこで使用されている手法を示す。分野に関わらず制御に AI 応用を取り込んでいることがわかる。

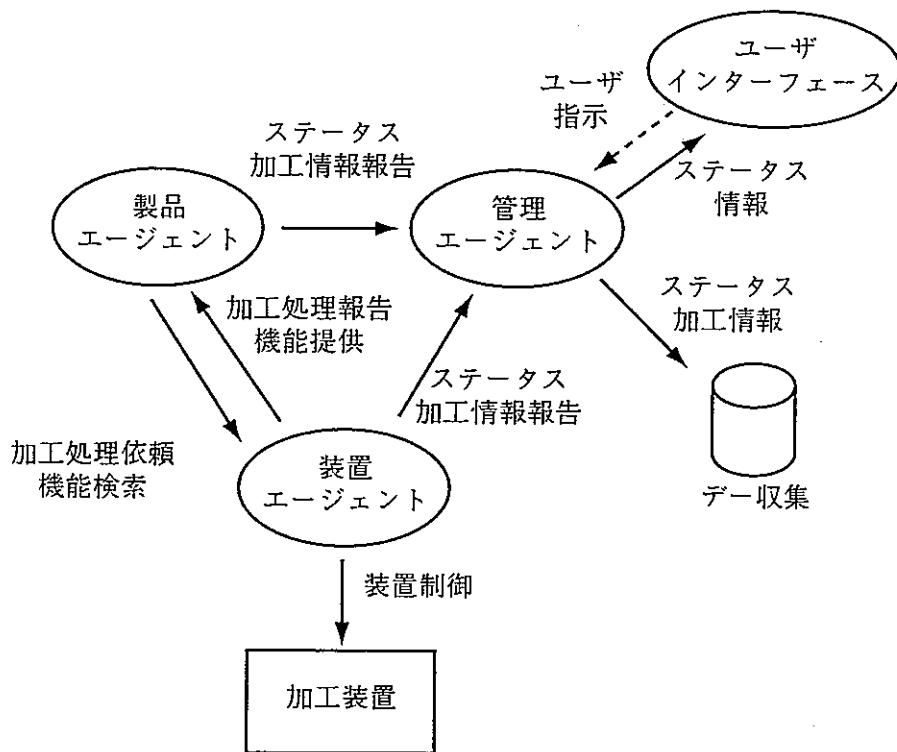


図 3.5 システムの構成 [128]

表 3.2 AI・アドバンスト制御の応用事例^[130]

適用分野	応用事例	制御手法
鉄鋼	製鉄所エネルギーセンタ自動運転	逆ナイキスト法、最適化制御、AI
	酸素プラント制御	最適化制御、AI
	高炉炉況診断・制御	最適レギュレータ、AI
	製鉄所転炉排ガス回収制御	最適レギュレータ、ゲインスケジューリング制御
	棒鋼圧延ラインのループ制御	H ∞ 制御、オブサーバ
上下水道	需要予測・水運用制御	カルマンフィルタ、最適化制御
	浄水場薬品注入制御	モデル予測制御、ファジィ制御
	配水圧力制御	ゲインスケジューリング制御、最適化制御
	下水ポンプ場制御	ファジィ制御、ニューロ予測
道路	トンネル換気制御	ニューロ
電力	同期発電機制御	適応制御、最適レギュレータ
	水力発電所の水位調整制御	ゲインスケジューリング制御
	系統運用文援、事故判定、復旧	AI、ファジィ制御、遺伝アルゴリズム
	最大電力予測、ダム流入量予測	ニューロ、ファジィ
セメント	キルン制御	最適レギュレータ、ファジィ制御、AI
	原料調合制御	最適レギュレータ
化学・ 石油	重合プロセス制御	モデル予測制御
	培養プロセス制御	ファジィ制御
	樹脂製造プラント異常予測	ファジィ測度
電動力 応用	駆動制御	適応制御、オブサーバ
	クレーンの振止め・位置決め	制御ファジィ制御
	軸ねじり振動抑制制御	H ∞ 制御、オブサーバ
	炭坑巻上機制御	H ∞ 制御
自動車	車両空転滑走制御	外乱オブサーバ
	生産管理	スケジューリング
機器	マニプレータの位置決め制御	学習制御、適応制御
	自動販売機塩素発生器制御	ファジィ制御
	オープンショーケース除霜制御	ファジィ制御

3.4 判断支援への応用例

3.4.1 電力系統事故時復旧支援における事例ベースの洗練化

事例ベース中の事例を一般化することにより、事例ベースの内容を洗練化する方法についての文献である^[131]。事例ベースの洗練化の大きな目的は、事例ベースの肥大化を抑え、検索効率の低下を防ぐことである。

電力系統をとりまく環境は常に変化しており、負荷電力の増加や新しい電力設備の増設により、過去に適切だった事例が新しい状況の下では適さなくなったり、事例の適切な適用範囲が変化すると考えられる。これに対処するために、事例の一般化のみでなく、事例の特殊化、すなわち事例の通用範囲を環境変化に適應させ、提案する手法による検索処理の効率化、環境条件の変化の対応を検証するために、実規模大のモデル系統において計算機シミュレーションを行っている。ここでは、電力系統の運用・制御のうち事故直後の停電状態から系統を復旧する復旧案の作成を対象としている。作成する復旧案の基本方針は、停電電力の最小化、停電時間の短縮、最適な復旧案の生成にある。

事故時復旧支援システムの構成を図 3.6 に示す。主要構成部について以下に述べる。

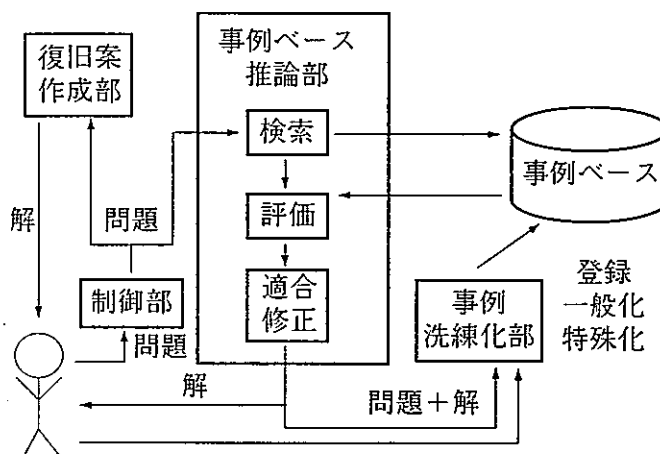


図 3.6 システム構成 [131]

1) 制御部

全体の制御を行う部分である。この部分は事例ベース推論部、網羅的な復旧案作成部に対する制御を行う。

2) 網羅的な復旧案の作成部

この部分はルールベース推論を用いて、系統のトポロジーや電源容量を考慮して網羅的に復旧案を生成するアルゴリズムが組込まれている。ここで得られた復旧案の

中から事例ベースに登録する復旧案を選定する。復旧案の選定にあたっては、一般的には前述の方針に従うが、部分系統に依存した特殊な事柄を考慮すべきであれば、豊富な知識と経験をもつ運転員の判断に合致する復旧案を事例とする。

3) 事例ベース推論部

2) 項で得られた復旧案のうち、前述の方針や熟練運転員の判断に合致する復旧案を事例として計算機に蓄え、これを直接利用することにより、復旧案の迅速な作成を図る。事例ベースには復旧案の事例を。その他の事故情報と共にフレームの形で記憶する。事例ベース推論部は事例ベースから類似の事故情報を持つ事例を複数検索し、それらの詳細な評価を行い、選択された事例の復旧案を適合修正することによって、現事故に対する復旧案を作成する。

4) 事例ベース洗練化部

新事例を事例ベースに登録する際に、既存の事例と一般化が可能であれば、事例の一般化を行う。また、現問題への適用に失敗した事例の特殊化を行う。事例は一般に問題記述と解記述から成るが、解記述が等しい複数の事例の問題記述をまとめることにより、事例の適用範囲が広げられる。このように事例の適用範囲を広げることここでは事例の一般化と呼ぶ。反対に事例の適用範囲を狭めることを事例の特殊化と呼ぶ。

提案された手法を、実規模大のモデル系統を用い、事故点を限定してシミュレーションを実施して評価したところ、以下のような結果を得た。

- 1) 新事例を次々と追加する場合に比較して、事例数、問題解決時間ともに数%に削減できた。
- 2) 環境変化がある場合には、新事例を次々に登録する場合に比較して、最優先事例で最適解を得る割合を高めることができた。
- 3) また、事例一般化により、人間が見た場合に事例の適用範囲が理解しやすくなる。

以上の結果から、事例ベースが洗練化されたことがわかる。今後の課題として、より詳細なシミュレーションを行うとともに、事例の一般化と特殊化を行う本手法と事例の忘却機構の組み合わせ方法について検討をあげている。

3.4.2 知的訓練システム Smart Trainer のにおける訓練タスクオントロジー～訓練課題の構成とその動的制御～

原子力発電所などの大規模プラントでは、自動化が進み、運転員に求められる能力が増大しており、このような能力の育成のために、熟練運転員の知識をオントロジーの考え方を適用し、訓練課題の構成とその動的制御を試みた文献である^[132]。

訓練問題の目的とその目的を達成するためのプロセスを明示するためのオントロジーを訓練タスクオントロジーと呼ぶ。具体的には、

- 業務フロー：熟練運転者の業務の全体象
- バックボーンストリーム：業務に対するバックボーンストリーム
- 出題意図：バックボーンストリームを構成する知識の単位としての設問、制御を司る出題意図
- リブストリーム：誤りに対処するリブストリーム
- 教授戦略：リブストリームを構成する対処法となる教授戦略

に分類される。これらを整理し訓練課題の作成、制御を行う。

課題作成の手順は、業務フローに基づき事故発生から事故復旧までのフローを作成し、バックボーンストリームを構成する様々な設問、選択肢、出題意図、教授戦略を作成する。課題の動的制御は、仮説に基づいて設定された選択肢からユーザの理解状況を推定し、その誤りに対する教授戦略(状況の異なる部分のハイライト等)を提示する。

これらにより、訓練タスクオントロジーに基づいた教材の構成ができ、訓練もオントロジーに忠実な動的制御を可能としている。

今後の課題として、専門家がシステム構築する際のオーサリング過程支援環境のオントロジーの拡充、それを基盤とした訓練課題の実装をあげている。

3.4.3 機械学習を用いた変電所機器構成設計システム

機械学習で獲得した知識の利用により、効率的に母線の定格電流が必要最小限となる変電所構成の最適化を行うシステムの開発についての文献である^[133]。

専門家からのインタビューからは獲得困難な知識を多数必要とするため、説明による学習(EBL)、類似による学習(SBL)を使用し、組み合わせ最適化の問題解決時にそれぞれ候補の絞り込み、候補の評価手順の決定に利用することで、目的関数の値が最小の解を見落とさずに問題解決を効率的に行う。

最適解を確保するために全ての事故ケースを想定して網羅的にコストを算出するという方法があるが、この方法では、評価件数の組合せの爆発という問題があり、評価件数の絞り込みが必要となる。ここで、図 3.7に知識の利用方法を示す。

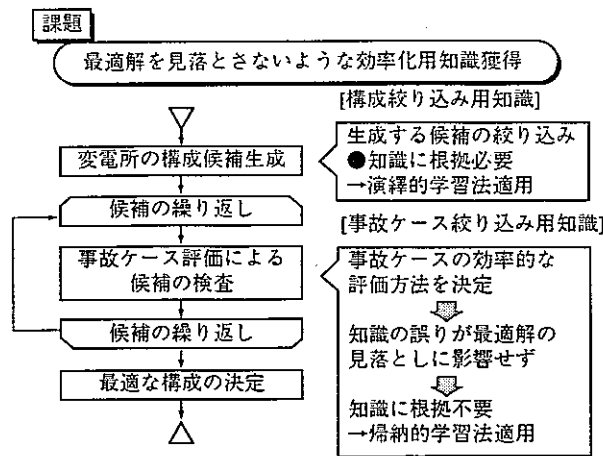


図 3.7 機械学習法適用のアプローチ [133]

まず、解の候補を生成し、次に各候補が最適解となりえるかどうか評価する。ここで、生成する解の候補である変電所構成の絞り込みに説明による学習を、各構成の目的関数計算のための評価すべき事故ケース数の絞り込みに類似による学習を適用する。

EBLには、予め学習システムにその背景知識が入力されていることが必要であり、このことは不完備問題といわれ、EBLの課題であるが、ここでは、背景知識を学習過程に自動生成することによりこの問題を解決している。

実用上最大規模の設計問題を例題として開発したシステムの検証をおこなったところ、数千個の背景知識を網羅的に入力する代わりにこの手法のフレーム 8 個、フレームの具体化手続き 7 件を入力することにより、構成絞り込みのための厳密な知識 486 個を自動的に獲得できた。また、獲得した知識の利用により最適な変電所構成を見落とすことなく、問題解決における計算回数を 1/100 に、処理時間を 1/90 に削減できた。

今後の課題として、開発した手法の有効範囲を明確にし、他の組合せ最適化問題への適用の検討をあげている。

3.4.4 強化学習を用いた発電プラント起動スケジューリング

火力発電プラントの起動スケジューリングに強化学習を適用してスケジューリングの最適化問題を支援する研究の文献である [135]。

火力発電プラント起動スケジューリングとは、起動時間の最短化を図ると同時に、起動過程に発生するタービンロータの最大熱応力を制限することである。昼夜間の電力需要の

変動に対する負荷調整のため、近年、毎日起動停止の火力発電プラントが多くなってきている。起動時間の短縮は、起動損失の軽減、電力需要に対する供給側の追随性の向上などが期待できる。さらに、任意に与えられる制限熱応力に対応した最適起動スケジュールをオンラインで提供することにより、より柔軟な運転が可能となる。この問題は組合せ最適化問題として定式化されるが、制約条件である最大熱応力を計算するためのタービンシミュレーション計算時間がかかり、オンライン探索問題として探索サイズが大きく、いくつかの局所的最適解を持っている。オンラインで短時間内に最適解または近似最適解を探索するためには、より効率的な探索が要請される。

学習により、問題解決能力の向上が期待できる。強化学習は、探索と学習能力を持ち合わせているので、強化学習を本問題に適用して、学習効果により効率的な探索モデルを構築することが期待できる。そこで、要求されるオンライン探索性能を満足するため、この研究ではスケジューリング問題に対して強化学習の導入を図り、強化学習の学習効果により、より効率の良い探索モデルを構築することを試みている。

神谷らは、強制操作と近傍探索戦略を導入した GA を用いて (図 3.8(b) の部分)、探索効率の改善をはかってきた^[138]がこの手法でも、目標とされる 30 秒以内に最適解または近似最適解を探索するというオンライン探索性能を満足することができなかった。

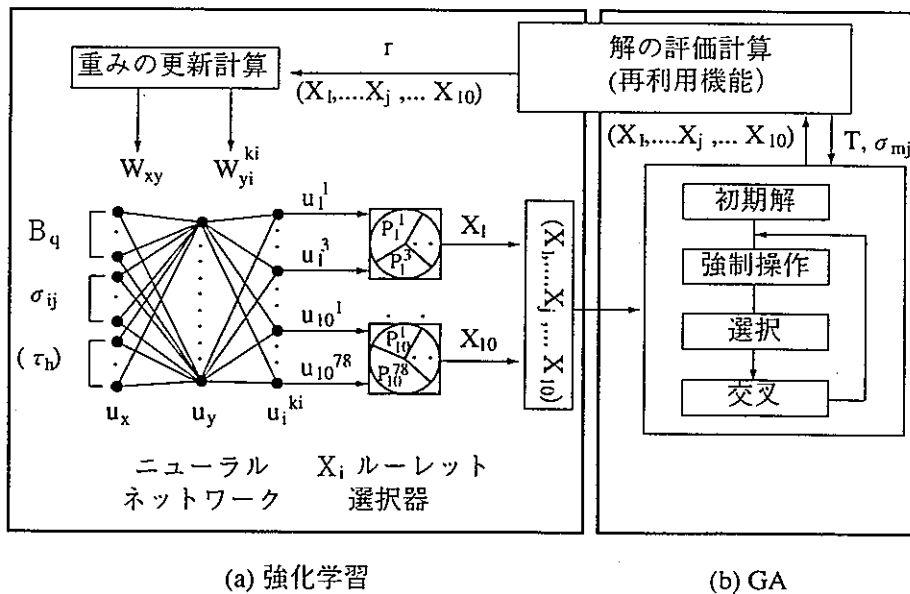


図 3.8 強化学習と GA の融合モデル^[135]

強化学習は、ニューラルネットワークを用いて、代表的な起動条件 τ_h ($h = 1, \dots, 4$) と制限熱応力 σ_{lj} ($j = 1, \dots, 4$) に対応する最適起動スケジュールをあらかじめ探索・学習し、プラント起動時では、学習効果とニューラルネットワークの汎化能力により、任意に

与えられる起動条件と制限熱応力に対応する有望な起動スケジュールを生成し、最適解または近似最適解の探索を行う。木村^[137]は中間層を含まない線形ニューラルネットワークに基づいた確率傾斜法による強化学習モデルを提案した。本問題は非線形性が強いので、提案されたモデルに対して、図 3.8(a) に示されるように中間層を導入し、逆伝播法による非線形の強化学習モデルを構築し、さらに、学習の安定化を図るため、momentum 項を導入した。

また、探索空間サイズの大きい問題において、強化学習の加速を図るため、人間の教示 (teaching) により、強化学習を有望な領域で探索と学習する提案を行った。本問題領域では、探索の目標である最適解が未知のため、人間の教示による強化学習の加速ができない。ここでは、神谷は「強制操作を組み込んだ GA による強化学習の加速^[138]」と「最適解の再現による強化学習の加速^[139]」を図った。

処理時間の制約が要求されるオンライン探索性能を満たすため、強化学習を導入し、代表的な制限熱応力について学習を行った結果、最適解または近似最適解探索に必要な CPU 時間は、平均 1-8 秒、最大 1-58 秒となり、目標とされる性能をほぼ達成できたことが確認された。

4 ニーズ

4.1 概要

AI 技術へのニーズを

- 技術要素
- 応用例
- 専門家へのインタビュー

という切口でまとめた。

4.2 各技術要素の対するニーズ

4.2.1 知識獲得

AI 技術の根源である知識獲得は、ニーズという観点からすれば、全ての基本となる技術のため重要性は明かである。

4.2.2 オントロジー

知識の共有、表現の共通な枠組を定義するオントロジーの考え方は、今後の知識利用の発展に欠かせない技術といえる。

4.2.3 推論

知識をルールで表して利用するルールベース推論から、事例を基に推論して行く事例ベース推論へ流れが移って来ている。このように知識利用の推論部分はより正確な解を求めるための手法をもとめて今後もそのニーズは高いものである。

4.2.4 学習

学習する事により、より正確な解を導出することが可能となって行くシステムはあらゆる分野でニーズがある。このため学習手法の研究は今後も盛んにおこわれて行くだろう。

4.2.5 自然言語処理

自然言語による対話は、コンピュータと人間のインタフェースの向上に不可欠であり、この分野のニーズは大きい。MIT Artificial Intelligence Laboratory では、HCI(Human

Computer Interaction) の研究テストベッドであるインテリジェントルーム^[140]の要素技術として、自然言語理解をあげている。

4.2.6 エージェント

先に説明した通り、エージェント自体の定義が難しいが分散環境でそれぞれがエージェントとして動作して何かの判断をして行くような環境でニーズがある。

インターネットの発達により、情報検索をおこなうソフトウェアエージェントへの AI 技術の応用が増えてきている。

4.2.7 ニューラルネット

学習の手段として色々な応用をされている。今後もこのような利用のされ方をして行くだろう。

4.2.8 創発システム

遺伝的アルゴリズムは、最適化問題への利用へのニーズがあるが、人工生命等はニーズよりもどのように応用して行けるかを模索している状態である。

4.3 応用例からわかる AI 技術へのニーズ

3章の応用システムの例から AI 技術へのニーズとして以下の3点をあげることが出来る。

1) 熟練技術者の減少による診断等の知識の継承の問題を克服すること

異常診断等の技術者の経験による判断が必要な分野で、その技術者の減少や、経験が文章化されずその経験がうまく継承されていないような状況のなかで、熟練技術者の知識をいかしていくために AI 技術へのニーズが要求されている。これは、古くからのエキスパート・システムへのニーズである。このニーズに応えるためには、AI の課題である、知識獲得、表現、利用に関する技術の発展が必要である。これに対して、ニューラルネットやさまざまな AI 技術の単体または組合せにより、これまでは困難だった領域への応用が図られている。

2) 最適な解を発見、作成するための時間的な制約を克服すること

計画問題等で最適解発見が組合せ爆発の問題である時に従来手法では時間的制約で応用が難しかった分野で、最適解の探索範囲をせばめ利用可能な時間内で解の発見をするために、AI 技術のニーズがある。遺伝的アルゴリズムや、過去の事例等を利用することによりこの問題を解決する試みが行われている。

3) 過去の事例を有効利用すること

過去の事例が文書化されており、人間がそれを参照することにより種々の問題解決に利用できるような状況で AI 技術のニーズがある。

ハードの進歩により、大規模なデータの扱いが可能になり、この大規模データから知識獲得を行うことや、事例を利用して問題を解決する事例ベース推論の研究がこのような問題に利用されてきている。

4.4 専門家へのヒアリング

4.4.1 その1

電子総合技術研究所の技術者に AI 技術のニーズを中心に話を伺った。

(1) 知識獲得とデータマイニング

知識獲得とデータマイニングは現在のはやりである。知識獲得とデータマイニングは、他の AI 技術のベースとなるものである。知識表現は 1960～70 年から研究されており、10 年前くらいにエキスパートシステムで流行したが、人間の代わりをしようとして失敗した。従来の知識表現では、99% 位は答えが出せるがあと 1% がつめきれなくて挫折している。

しかし、現在の知識獲得とデータマイニングは、人間が不得手で計算機が得意な大量のデータ処理を行なっているため、正しい発展過程の流れに乗っているものと思われる。現在のこの分野の研究は、統計処理や概念形成の考えを応用したものであり、計算機が 100% やろうとすることをあきらめた結果、いい成果が出てきている。すこし前までは、大量のデータではうまくいかなかったものが、うまくいくようになったということで、大きな進歩である。100～1000 位のデータを処理することは可能ではあるが、100 万個のデータを扱う場合は色々問題があり、研究の対称となる。これらは、すべて、半自動でやることが前提であり、完全な自動化ではない。これらに対して社会のニーズも出てきている。データから、人間が見て面白い知識をいかに取り出すかが研究の価値がある。

(2) エージェント

エージェントとは自立(自分で判断する)したものである。判断には低級なものから高級なものまである。現在のネットワークエージェント(ネットワークで探す)が最も低級なエージェントであろう。もっとも高級なエージェントは、ロボットやヒューマノイドである。マルチエージェントは、エージェントの集まりであるが、これが、エージェントの上位の

概念か下位の概念かは研究者の解釈によって異なる。ロボカップのエージェントはヒエラルキーのあるエージェントである。各プレイヤーは、一つのエージェントであり、プレイヤーは5つのサブエージェントで構成されている。知的エージェントについては、昔は神の目で見えていたが、現在は、エージェントの目でものを見ることができるようになった(エージェント view)。

エージェントは、単体で種々の判断をおこなうものと、複数で全体の目的を果たす物がある。中島氏のイメージではマルチエージェントは低級な機能のエージェントの集まりというイメージがある。

(3) 自然言語

自然言語については、かなり使用できるようになってきた。文章翻訳、音声理解で場面を限定すれば実用化のレベルになってきた。現在日本語の処理で辞書が50～100であるが、本当の実用には、5000くらいの辞書が必用である。これは、日本語の方が英語よりも難しいということもあって、英語ではIBM等で既に実用化されている。

(4) 推論

事例ベース推論と定性推論と非単調推論は、同じ分類で考えていい。10年前くらいまでは、原理的にできるというレベルであったが、現在では、実用的な時間で処理できるというレベルにまでなろうとしている。単に答えが出るというだけでなく、時間的、資源的制約のうえでいかに推論を行なうかが課題となって来ている。事例ベース推論と定性推論と非単調推論は、論理に基づく推論ではないところがキーポイントである。一方、帰納推論については、知識獲得やデータマイニングに近く、大量のデータから推測しようという方向である。

(5) オントロジー

浅い知識(鳥は飛ぶ)はすぐに摘要できるが融通がきかない。深い知識(鳥は...だから飛ぶ)は使い道が豊富である。オントロジーは、知識について議論する場合の共通なプラットフォーム(語彙)を決めて行き、共通化をはかるものである。知識の素粒子論である。自然言語の知識に素粒子があるという考えもあるが、そうでないという人もいる。ロジャー・シャックさんが自然言語に素粒子があるといった。翻訳の技術でもずっと決着のついていない問題である。あるかないかについては、中島氏はないとの考えである。それは人種によって、緑と青の境界の波長は異なることと同じである。ただし、人間の仕組み(知識のコアイメージ)は同じなのでそれが素粒子だといえれば、素粒子はあるのかもしれない。

(6) ニューラルネット等について

これらの技術については、シンボル処理を否定した方法であり、人間の知識を記述する技術ではない。

(7) 創発システム

これについては、人工知能であるという人もいるし、人工知能とは同じレベルの分野かもしれない。ニーズがあってやっている研究ではない。

(8) ETLの研究について

人工知能の研究は、インテグレーションに向かっている。昔はロボットはハンドとアイを別々に研究していた(研究することがあった)が、現在では、ハンドアイシステムとなっている。また推論と音声で独立にかなりのレベルまでできるようになったので、合わせて何ができるかを研究するようになってきた。マルチモーダル対話音声、画像、対話の技術を利用して、人と話す、法律相談、事情通ロボットができてきた、事情通ロボットの当面の目的は、人間のいるエレベータにひとりで乗ることである。たとえば、エレベータに載せると電波がとどかない等の難しさがある。

(9) ニーズとシーズについて

自動車に対するニーズというのは明確である。たとえば、低公害車の開発である。一方、情報系のニーズというのは明確ではない。したがって、ニーズとシーズという分け方はよくない。情報系では新しいニーズを作り出すことが重要である。たとえば、webでもニーズがあったわけではない。unixもニーズがあったわけではない。過去の発展形態もそうであった。研究自体は、自己のニーズ(興味)主体で行なっている。

(10) 社会的受容性について

医者の診断システムの誤診等に問題がある。ただし、機械に責任を取らせることはできない。あくまでも支援システムである。助手、訓練用のツールとしては受け入れられて行く。

以下は、情報に関するものすべてにおいていえることであるが、情報のコピーのしやすさというのは、他のものと異なる。これまでの物に基づいた経済とは異なった形態が必要ではないか? 将来的には自由にコピーできるような体制になり、物が動くと金が入ってく

る仕組みにする必要があるのではないかと考えている。これらは、ウイルス等で技術的には可能であると考えている。これらの問題は、哲学者や法律家が考えているのではないかと考えている。

4.4.2 その2

主に自然言語処理を研究している大学関係者に話を伺った。

(1) 機械翻訳について

- 機械翻訳は AI の分野では最も製品化されている分野である。
- インターネットと結びつくことによりニーズが生じている。インターネットで機械翻訳の技術が加速された。
- ただし、翻訳結果の品質はまだ満足できるレベルではない。機械翻訳で英日はいいが、日英はまだ品質に問題がある。
- 例から似たような文例を探してきて編集して使用するアプローチのものは、全体としてまとまりを保つとは出来ないが、個々の文の翻訳では満足のいくレベルの翻訳ができる。
- 機械翻訳(日英)は対訳コーパスの方法がいい。事例が5000では使えないが、novaの事例が50000のもの(「英語でemail」)は使える。
- ここで、使用する文例の著作権が問題となる。
- 社会に浸透している AI 技術の一番は機械翻訳である。エキスパートシステムはそれほどではない。
- 英語以外の母国語を持つ国が英語の支配を危惧している

(2) その他について

- 時間割のシステムは GA で推論されていて、他の方法では難しい問題である。多くの制約条件があり、実用レベルの製品はない。現状では3～5年の経験を積んだ人が試行錯誤で作成している。看護婦のスケジューリングシステムを使用して作成を試みたがうまくいかず、遺伝的アルゴリズムを適用したシステムを開発中である。
- 遺産相続エキスパートシステムは身近なところで望まれるものである。

4.4.3 その3

AI関連の製品を扱っていた商社の方にインタビューした。

(1) エキスパートシステムがうまく浸透しなかった理由

- ESを作成するよりも、知識を持っている人の人のネットワークを作った方が良い。例えば、鹿島建設の建築現場の穴堀のESでは、誰かに聞いた方がはやく普及しなかった。
- 米国はマニュアル化が進んでいたが、日本はそのような文化がなく、専門家の知識表現能力、ES作成者の知識獲得技術が未熟だったため知識の獲得がうまくいかなかった。このため、研究用のベーシックなESは作成できたが、実用のものは難しかった。
- 日本では、応用研究には予算がつき研究されるが、基礎研究的なものはあまり研究されなかった。したがって、AIに対しても予算がつきにくい。
- 従来のAI技術にはセンシング技術が欠けていた。
- 職人的なものには向いていなく、形式的な問題に向いていた。第一次AIブームにおいては、センシングすることが難しいため職人芸に近い分野はESにならなかった。AIは判断に利用すべきであった。(現在は、センシングの技術が発達したので、もうすこしいける)
- AI技術を包括的に捉えられる技術者がいなかった。自分の技術領域に固執しすぎた。
- マーケットサイズを意識した技術展開が足りなかった。応用技術に絞った方がいい。

(2) AIのPAについて

- 自覚しているかどうかの問題。知らない中に利用されている。
- 命に関わるような問題に適用される場合には抵抗があるだろう。

(3) 今後の展開

- AI技術は、ファジーの例の用にチップ化されることにより広がって行く。音声認識はもう少しでそこまでいきそうである。
- 音声認識、画像認識、翻訳等が、MMIIの高度化の要素技術として有望である。

- 勤務計画等のスケジュール問題、クレジットカードの審査
- ネットワークの fire wall のようなダイナミックに条件を変更して行かなければならないような制御をうまくやるために AI 技術が役立つのでは。
- 以前 AI 技術を中心に活躍していた会社とその適用分野を見つけることにより存続している例がある。(inference 社 音声認識技術を通信産業へ展開)
- AI のひとつの分野であったロボティクス等がひとつの大きな分野になりつつある。

5 人工知能の社会的受容性

5.1 概要

本章では、社会的受容性について一般論を述べた後に、原子力分野での社会的受容性の資料を、原子力分野以外での社会的受容性に関する資料をまとめた。また、専門家に対して社会的受容性に関するヒアリングを実施したので、そのヒアリング内容について記述する。その概要は、つぎの通りである。

- 社会的受容性の一般論については、総合研究開発機構の報告書にいくつかの記述がある。この内容をもとに、まず社会的受容性に関する定義(パブリックアクセプタンスやテクノロジーアセスメントを含む広い概念と定義)し、企業における社会的受容性の認識の実体を示し、その対策について記述した。
- 原子力分野での社会的受容性については、科学技術庁原子力委員会の専門部会のひとつの高レベル放射性廃棄物処分懇談会における報告書と通産省の審議会報告資料のひとつである総合エネルギー調査会原子力部会中間報告についてまとめた。また、各国の社会的受容性を高めるための活動については、経済協力開発機構(OECD)の報告書にある原子力発電パブリック・アクセプタンスに関する国家政策及び諸活動に関する報告をまとめた。
- 原子力分野以外での社会的受容性については、バイオテクノロジー技術、情報化技術、自動運転技術等のいくつかの先端的な分野での議論がある。これらの議論を、パブリックアクセプタンスとテクノロジーアセスメントの観点からまとめた。
- 社会的受容性に関するヒアリングとして、社会情報システム学を研究する国立大学の教授にヒアリングを行った。社会情報システム学は人間知能と機械知能の統合やその統合によって初めて可能となる方法論の確立をめざしている学問であり、教授はその研究の一部として各種の状況下での組織のシミュレーションの研究を行っている。

これらの内容を5.2～5.5節に記述し、内容のまとめについては他の章と同様に6章に記述した。

5.2 社会的受容性に関する一般論

本節は、総合研究開発機構(NIRA)の報告書「エレクトロニクスの発展過程に関する分析」^[141]および「技術開発において企業がかかえる諸問題」^[142]の内容をまとめたものである。本節では、まず社会的受容性に関する定義し、企業における社会的受容性の認識の実体を示し、その対策について記述した。また、日本科学技術振興財団による「産業技術の発展と社会的受容方策に関する調査研究」^[143]および「高精細度映像技術の社会的受容に関する調査研究」^[144]等も参考にした。最後に、技術導入と社会的受容性という内容で本節をまとめた。

5.2.1 社会的受容性の定義

社会的受容(social acceptance)は文字通り、ある技術やその成果である製品が社会の中にどれだけ受け入れられ、そして定着していくかに関する概念である。テクノロジー・アセスメント(TA)やパブリック・アクセプタンス(PA)も、それらを広義に解釈した場合、内容的には類似した概念であるが、一般的にはその中で社会的受容はもっとも広い意味を持つと考えられる。ここでは、社会的受容性を

- 技術的・経済的視野よりも、社会的視野や利用者の使い易さから技術やその成果を評価する概念。
- PAに特徴的にみられる地域住民の合意形成過程といったマクロな点だけでなく、個々の人間の受容過程にも注目する概念。
- TAに特徴的にみられる受容に対する事前の分析だけでなく、導入後のより広く受容されていく過程にも注目する概念。
- 負のインパクトの有無や過程を評価するだけでなく、望ましい技術発展の方向を指し示すという積極的意味をも含む概念。

と定義する^[141]。

5.2.2 社会的受容性の認識と取り組み

企業における現在の社会的受容性の認識と今後の取り組みの方向性と問題点について文献^[141]の内容を記述する。

(1) 企業における認識の現状

技術の社会的受容性ということが問題になる場合が多くなってきている。これまで社会的受容性がどの程度問題になったか、また今後はどうなるかという点に関するアンケート調査の結果を表5.1、図5.1^[44]に示す。全産業では、これまで社会的受容性が問題になったことが「しばしばあった」とする企業は24.9%で、両者を合わせて約30%である。それに対して、今後については「しばしばあるだろう」が9.9%、「ときどきあるだろう」が36.7%と増加しており、両方合わせると46.6%で約半数の企業が今後何らかの形で社会的受容性が問題になることがあるだろうと考えている。

産業別に見て、これまで「しばしばあった」、「ときどきあった」の合計の比率が高いのは、水産・農林、建設業、食料品、繊維、化学工業、石油・石炭製品、ゴム製品、金属製品、輸送用機器、その他製造業などである。そして、すべての産業において、今後「しばしばあるだろう」と「ときどきあるだろう」の合計の比率が従来のそれよりも増加している。企業規模や成長性、収益性などによっては明確な差異はほとんど認められない。ただ、「従来」の収益性ランク別の結果を見ると、収益性の高い企業群において「まったくなかった」とする比率が収益性の低い企業群に比べて高くなっているが、「今後」で見るとこの差はほとんどなくなっている。

表5.2、図5.2は、企業が今後重視しようとする研究開発分野と社会的受容性が今後どの程度問題になるかということとの関連を示したものである。これで、今後社会的受容性が問題となることが「しばしばあるだろう」と「ときどきあるだろう」の合計が全産業のそれよりかなり高いものを拾うと、各エネルギー関連、食糧資源関連、保険・医療関連、住宅関連、材料関連、新生産プロセス、ライフサイエンス、加工・加工方式関連、漁労・飼育・栽培などの分野である。一方、この値が全産業よりかなり低いものは、災害予知・防止関連、情報処理・通信関連、教育関連、自動化・省力化などである。この結果は、直接各分野の社会的受容性が問題になるかどうかを問うたものではないが、一応の目安になる。

表 5.1 分野別技術の社会的受容性^[14]

Q 2 5 社会的受容性 (今後)	1. 問し 題ば にし なば る	2. 問と 題き にど なき る	3. にあ なま らり な問 い題	4. なま らだ な問 い題 に
Q 1 5 重点を置く分野				
1. 各エネルギー関連	9.8	45.1	35.2	9.8
2. エネルギー開発	14.3	28.6	38.1	19.0
3. 省資源	16.3	31.4	38.4	14.0
4. 食糧費源開発	12.0	48.0	40.0	0.0
5. 水、森林、鉱物資源開発	8.3	33.3	50.0	8.3
6. 公害防止	11.6	38.4	41.9	8.1
7. 災害予知・防止関連	0.0	33.3	61.9	4.8
8. 日常商品の安全性向上	20.0	26.7	46.7	6.7
9. 家庭用商品関連	16.7	29.4	45.1	9.8
10. 保健・医療関連	11.8	45.6	27.9	14.7
11. 輸送・交通関連	14.9	31.1	40.5	13.5
12. 情報処理・通信関連	5.4	28.4	50.0	16.2
13. 教育関連	10.0	20.0	60.0	10.0
14. 土木工事・建設関連	14.3	40.0	35.6	7.1
13. 住宅関連	10.1	44.9	40.6	4.3
16. 自動化・省力化	6.7	29.6	43.7	20.0
17. 材料関連	12.1	45.5	36.4	6.1
18. 新生産プロセス	11.3	42.3	39.4	7.0
19. 宇宙開発関連	0.0	33.3	50.0	16.7
20. 海洋開発関連	4.5	40.9	22.7	31.8
21. ライフサイエンス	9.1	47.7	34.1	9.1
22. ソフトサイエンス	11.1	22.2	44.4	22.2
23. 貯蔵	0.0	42.1	52.6	5.3
24. 加工・加工方式関連	9.4	43.4	39.6	7.5
25. 漁労、飼育、栽培	5.6	50.0	33.3	11.1
26. その他	0.0	37.5	50.0	12.5
全体	10.2	37.6	40.1	12.1

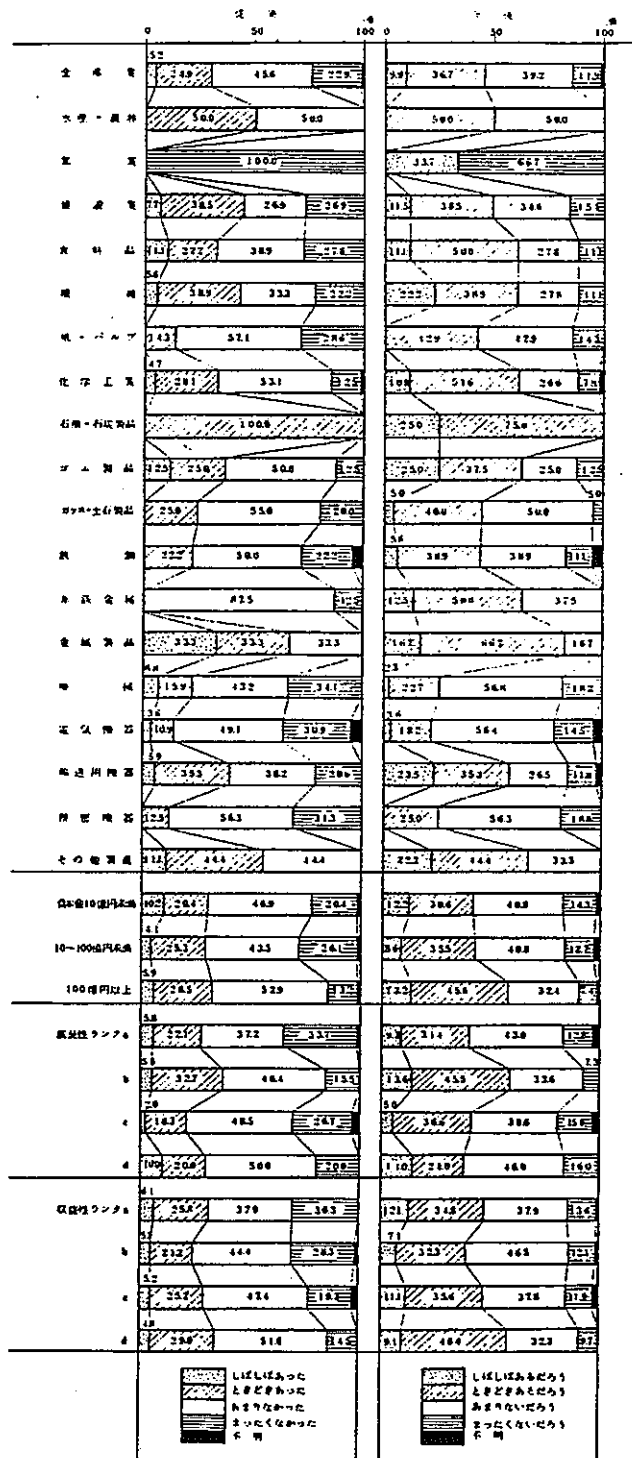


図 5.1 技術の社会的受容性 [141]

表 5.2 テクノロジーアセスメントの導入についての検討状況 [141]

内 訳	比率 (%)
外部機関に調査委託を実施済または実施中	2.0
自社内で実施済または実施中	4.4
具体的実施計画を検討中	4.4
資料・情報の収集を行なっている	19.0
とくに具体的な動きはないが関心を持っている	57.0
全く関心がない	10.2
その他	2.9
計	100.0

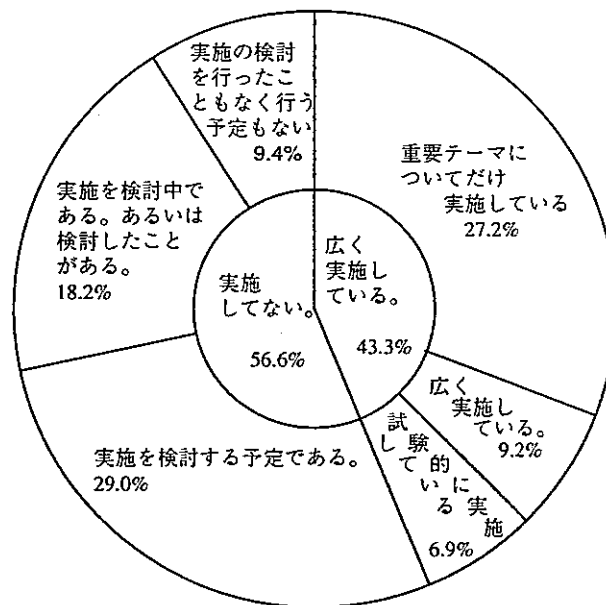


図 5.2 テクノロジーアセスメントの実施状況 [141]

(2) 技術開発後の実証の必要性

従来、技術の社会的受容性の問題は環境問題、安全性の問題などが中心であった。環境問題については、種々の環境規制や環境アセスメントの実施によってかなりの改善が見られた。また、安全性の問題についてもすでに種々の厳しい規制や基準が設けられ、安全性の向上がはかられている。今後の技術開発は当然これらの規制や基準に沿ったものでなければならないが、それだけで社会的受容性の問題が解決することにはならないであろう。むしろ、今後問題となる社会的受容性の問題は、規制や基準によって処理できないものが多くなると考えられる。たとえば、都市ごみ資源化の技術システムを考えた場合、その技術システムが技術的、経済的にフィージブルで、しかも安全性や環境の点についても問題がないとしても、それだけで必ずしも社会的に受容可能とはならない。この社会的受容性の獲得は必ずしも技術的手段によって達成されるものではないが、技術開発過程の一環として重視されねばならない。「技術開発に対する社会的反応に関する調査」^[145]では、開発(Development)のあとに実証(Demonstration)の過程を導入することを提案している。これは、開発の終了した技術の実規模最小単位で一種の社会実験を行ない、技術的、経済的、社会的フィージビリティを実際に証明しようとするものである。今後開発される技術でとくに消費者や地域住民と深い関わり合いを持つような技術、たとえば流通・サービス技術、都市施設技術、医療技術、交通関連技術、情報処理・通信関連技術などにおいては、この実証過程の導入が不可欠となるものが多いであろう。

(3) 社会的受容性に関する費用負担

技術の社会的受容性を確立するために実証過程を実施する場合、必要な費用を誰が負担するか、どこでそれを行なうか、といった点が問題になるであろう。この実証過程は技術の開発側(たとえば企業)が技術を社会に押し込むために行うものではない。社会にとって望ましいと考えられる技術でも、その利用方法(受け入れ方法)を誤まると思わぬ摩擦や弊害を生じる場合があり、このような摩擦や弊害を起こさないような利用形態を検討することが実証過程の目的である。実証過程の導入の効果は開発側のみが享受するものではなく、受け入れ側(会社の側)にとっても大きな効果をもたらすものである。したがって、その実施は開発側のみの負担によって行われるべきものではなく、受益者の側としての社会あるいは個人も当然その費用を負担すべきであろう。実証の実施は開発側(企業)と受け入れ側(社会)との協力によって始めて可能になるものであり、その具体的な実施方法や費用負担の配分などはケースごとに適宜検討されねばならない^[142]。

5.2.3 技術導入と社会的受容性

これまで何らかの形で社会的受容性が問題となったとする企業は全体の30%を占める。さらに、今後についても約半数近くの企業が社会的受容性が問題になるだろうと考えている。これまでの技術の社会的受容性の問題は、環境問題や安全性の問題が中心であったが、これらは環境規制や安全性基準の設定によって改善されてきた。今後はこれらの規制や基準では処理できない問題が多くなるであろう。技術の社会的受容性を確立するための1つの方向は、開発された技術の実証（デモンストレーション）を行うことである。これは、一種の社会実験であり、技術的、経済的フィージビリティのみならず、社会的フィージビリティを証明しようとするものである。とくに、消費者や地域住民と深い関わりを持つ技術については、この実証過程の導入が不可欠となるであろう^[14]。

5.3 原子力分野における社会的受容性

本節では原子力分野における社会的受容性について記述した。原子力分野における社会的受容性については、多くの文献^{[146]–[158]}がある。ここでは、原子力分野の社会的受容性に関する公開されている代表的な文献としては、科学技術庁原子力委員会の専門部会のひとつの高レベル放射性廃棄物処分懇談会における報告書、と通産省の審議会報告資料のひとつである総合エネルギー調査会原子力部会中間報告をまとめた。また、各国の社会的受容性を高めるための活動として、経済協力開発機構(OECD)の報告書^[158]にある原子力発電パブリック・アクセプタンスに関する国家政策及び諸活動に関する報告をまとめた。

5.3.1 原子力委員会専門部会報告

科学技術庁原子力委員会の専門部会のひとつの高レベル放射性廃棄物処分懇談会における報告書に高レベル放射性廃棄物処分の社会的受容性に関する背景、対策、事例等の検討の記述があり、本節ではこれをまとめる。ここでは、社会的受容性を高めるため、には長期に地下に置いておいても大丈夫だということを住民に納得してもらうことが最重要課題であり、そのためには技術開発および情報公開などが必要な条件であることが記述されている。

(1) 現状の認識

社会的、政治的な面が重要なのは技術者が信用されていないせいか、科学的事実が信用されていないせいか、研究成果が活用されないとの懸念があるせいかとの問題については、つぎのような意見がある。研究開発の結果が納得いく内容でなければサイト選定はうまくいかないのは勿論であるが、地元の人々の中にはその研究結果を理解する科学的知識が十分でないことから科学を信頼していない人もあり、一般の人が何を考えているかを知ることが重要である。

このような問題に対するひとつの参考となる事例としてスウェーデンのオスカーシャムの若い人の処分場に対する受容レベルが相対的に高いという事例があり、この理由は次のような教育方法による。高レベル放射性廃棄物のリスクの基本的な理解能力の養成が学校時代に得られるよう、原子力産業界は6年生から12年生くらいの層を対象に全国的に資料を提供している。その中には原子力産業界以外からのものも入れて比較してもらうようにしている。また、ローカルレベルでは学校の先生、PTAとの対話、相互交流を重視している。また、カナダでは原子力産業界が先入観を持たせようとしているとの非難を避けるため、公の情報源により情報が公開されるようにし、原子力産業界や政府がつくったファクトシートに基づきマスコミや教員団体などがそれぞれ資料をつくっている。

また、サイトの住民には「迷惑施設」が来るという意識については、スウェーデンには原子力施設だけではなく環境に被害を与え得るような施設の立地でも優遇税制措置等をとる伝統はない。施設の立地は国益には沿うが直接関わりたくないというのが人々の考えだが、ほとんどの国民はそれでも施設はどこかに必要だという認識をもっている。不都合が生じたときの何らかの保障、減税措置、教育投資等の必要性は、まだ議論の段階である。ただし、カナダでは基本的には優遇措置はないものの立地を受け入れる際の交渉で良い条件を引き出すことには関心をもっている。施設の雇用者は安全と思うから働くのであって、犠牲者であるとの意識がある。

(2) 処分場必要性の議論の必要性

今後の原子力開発とは一応無関係に、既に、現時点で、廃棄物処分場を我が国に選定することが必要であることについての、適切な情報を国民に率直に提供することである。言い換えれば、今後の我が国の原子力政策とは別に、我が国の何処かに、高レベル放射性廃棄物処分場を設置しなければならないという点について、国民に対する十分な情報の提供が先行していることが必要である。これがないと、立地場所以外の国民は、問題を他人視するか、賛成、反対いずれにせよ、情緒的反応を示すこととになりかねない。高レベル処分問題について、国民は殆ど知らないのが現状であり、まず、処分の必要性について国民的合意を得ることが必要であると考えられる。

高レベル放射性廃棄物処理の必要性に関して、一般の人々の理解を深める必要があり、これを十分議論する必要がある。この問題は将来のエネルギー問題に深く関係するので長期計画の議論とも深く関係する。廃棄物処分の必要性や地層処分についての国民の理解が不十分であることから、パブリックアクセプタンス活動に積極的に取り組むべきである。関係者の総力を上げたパブリックアクセプタンスが不可欠であり、危機感をもったパブリックアクセプタンスの積極的な再検討及びその見直しによる実行が望ましい。30%以上の電力が原子力発電で賄われているという現実を踏まえ、その安全性、更に万一事故が起きた時の対策までも含めて、これを国民に納得できる形で示す必要がある。原子力発電に関連する諸問題についての国民の最大の関心は、安全性の確保であり、高レベル処分についても、その安全性に対する懸念が払拭されなければ、国民の合意を得ることは難しく、処分場の選定にも困難が予想される。万が一、事故が発生した場合の対処方法や責任の所在の明確化等についても、明らかにされる必要がある。技術的にも社会的にも、信頼される実施主体を設立し、責任の所在を明確にすることが大前提である。国民をお客様にせず、共に解決策を探る方向づけをすることも重要である。原子力発電に関する問題は、たまたまその立地対象となった地域の人々だけの問題として捉える傾向があるが、国民一人一人が

自らのくらしの問題として考える必要があり、政府として考える必要があり、政府としても国民的課題として、国民に呼びかけることが必要である。

(3) 施設閉鎖後措置検討の必要性

地層処分については、閉鎖後に制度的管理に依存しないことが国際的な考え方となっているが、社会的受容性の観点から、管理を全く行わない方法が日本でも適当か否かについて、海外の動向も踏まえつつ、十分に検討する必要がある。高レベル廃棄物の影響が超長期に及ぶことから、国民は不測の事態に対する不安を持っていると考えられる。したがって、制度的管理の要否とは別に、閉鎖後は国が直接の責任を負うことを法的に担保することなども検討していく必要がある。また、制度的担保による社会的安心感を獲得することが必要であり、ほぼ永久的に、モニタリングに基づく管理のシステムを組み込むという姿勢なり方策が不可欠であり、閉鎖後の管理は社会的にみても必要である。(別の面から、処分という名称および考え方を変えない限り、社会的受容を得ることは困難という意見もある。)したがって、閉鎖後の事業は、国による継承が望ましい。

(4) 情報公開の必要性

すべての技術情報、政策措置を公開することにより、推進側は有利な情報しか公表しないという不信感を払拭すること。すべての情報が公開されて初めて国民的な議論が可能になる。基本的立場として、国民生活に密接な関わりをもつ原子力発電に関連する問題の解決については、国民の理解と納得を得て進めることが大前提。そのためには、情報公開と国民の意見の聴取、および国民合意に基づく決定が必要。巻町の住民投票を見ても、もはや住民の意思は無視できないと考える。全ての情報を公開して国民に考えさせること。原子力問題の難しさを訴えること。スウェーデンの啓発システムについて、日本では国民レベルで現地を訪ねた人は少ない。ぜひ委員会メンバーによるスウェーデン視察を提案する。机上の論理では現実に対応する対策は生まれにくい。また、政策スタッフも現地を訪ね、専門の立場で深く知見を得ることが日本の財産となる。日本の原子力の論じ方は暗い。啓発のアプローチの仕方を再検討すべき。スウェーデンには、負のイメージはない。国民がきちんと理解しているので、原子力を理性で論じることができる。日本での議論は感情が全面に出ているが、これは国民の情報不足に起因する。

(5) 国民への働きかけの必要性

スウェーデンではサイトは先端技術が集約される場所 (Kompetens)、文化が生まれる (Kultur) 場所、コミュニケーションが整備される (Kommunikation) つまり交通、下水、環境な

どのインフラストラクチャーが整う場所という考え方が浸透している。原子力政策全体特に高レベル処分問題の最大の障害は、現在原子力関係者を含め国民全体に広く抱かれている原子力関係者自身の意識や感情の改革がなければ何事も進まないのではないか。サイト選定が、上からないし外からの押しつけではなく、地元的意思・イニシアティブで行われることが最大の方策であり、社会心理学的にいう効力感（efficacy）を満足させることが必要・有効である。

以前原子力発電に関して調査した結果では、アメリカは、絶対賛成と絶対反対が5%ずつ、90%が働きかけによって変わりうる人々、ドイツは、絶対賛成と絶対反対が30%ないし3分の1ずつ、残りの40%ないし3分の1が variability 人々と言われていた。日本は、アメリカとドイツの中間にあり、10%ずつが絶対賛成・絶対反対であり、残りの80%が variability 人々ではないかという意見であった。全員が処分施設の受け入れに合意することなど現実的にはありえないことは明白であり、理解と合意を峻別しての認識・アプローチがなされなければならない。情報を公開し周知徹底を図り、PR活動や認識・理解を高める活動を行ったとしても、当初から何が何でも反対という人々が存在し、全員合意はありえない。むしろ元々賛成/反対の意見を持ち、それを換えようとしぬ人々、どちらとも意見を決めていない、あるいは情報提供や教育や働きかけによって意見を変える可能性のある人々、各々のシェアを見極めることが重要である。そして、広く全体として理解を求めていくだけではなく、この層の人々に積極的・重点的に働きかけていく具体的戦略・戦術が、きめ細かく構想・実施されて行くべきである。

国民ないし地元の人々の合意の形成を前提に推進することは非現実的であるとの認識の下に、もっと焦点を・対象を絞った戦略的・戦術的な方策をとっていく必要性があろう。

(6) 実施主体検討の必要性

広報活動が成功裡に進められたスウェーデンにおいては、実施主体が私企業であるという事実を受け、実施主体については、国や公企業が中心的な役割を果たすのみならず、多角的な観点から検討されている。

電気事業者は私企業であるため、原子力施設等の立地活動において、地元に対する信頼性に乏しいのではないかと考えられる。このため、処分場の立地活動においては、国も中心的な役割を果たすことが望まれる。一方、米軍演習場の移転問題等から見ても、立地問題は必ずしも、公的私的観点から割り切れるものではないとの面もある。また、地域振興方策等については、各国における、立地方策やその成り立ち、仕組み等について、事例を参照に十分分析すべきである。社会的受容を得ていく上で、周辺住民が長期に原子力施設に慣れ親しみ、安全性を体感して行くことは大切である。スウェーデンのオスカーシャム

の地下研究施設の周辺地域においては、同じ地域にある原子力発電施設の長年の運転実績が、住民の同研究施設及び処分に対する受容の形成に寄与した。

(7) 社会的受容性を得るための方策

(A) 広報

処分場が思ったよりはるかに安全で、魅力的な事業であることを全国の人に知ってもらうことが重要である。高レベル放射性廃棄物ガラス固化体や使用済燃料について、実物を見ることによりその性質と安全性をより効果的に実感することができることから、我が国においても、現在貯蔵されている実物や施設の見学などを通して、住民や国民の理解を得ることが重要である。安心など心理的側面に関する広報については、それを行う人物や態度、喋り方は重要な要素であり、また、同じ内容を説明する場合でも数字等の表現ぶりを若干違えることによって理解に大きな差が出ることもあるため、受け手の理解と納得の観点を重視して対応すべきである。そこでは、現地を見学してもらうだけでなく、ビデオも作り、駐車場や金庫業より、農業や工場、スーパーマーケットの誘致より儲かるし、清潔な事業であることを知ってもらい、是非と名乗り出たくなるような魅力を全国に伝えることが目標である。そのために、国民の信頼を得るには、理論で説得するのは無理であり、現場を見せることが重要である。その意味では、地下研究施設が完成すれば受容性への寄与は大きい。また、先進国であるスウェーデンの担当者を招いてのシンポジウムを開催するという手段も考えられる。

(B) 情報の開示

情報の開示も重要である。そのためには国民の理解を促進するようなわかりやすく、且つ継続的な情報提供が求められ、形式的あるいは一方的な情報開示にならないよう留意が必要である。原子力関連では事故ばかりを取り上げるマスコミの報道姿勢にも問題があるかも知れないが、原子力委員会は情報公開の姿勢を徹底するとともに、様々なメディアを活用していくことが重要ではないか。特にテレビの影響力は大きい。(この懇談会でこのような論議がなされつつあることを、ほとんどの国民(電気利用者)は認識していないであろう。)役所で作るビデオなどはどうしてもPR色が強く、観る側も不信感をもって観てしまう傾向がある。学校教育の段階からの積み上げではすでに時期を失っているので、より積極的にマスメディアを通じての情報提供策を考える必要がある。社会的必要性とのバランスの上で判断する資料を示すことが望ましい。これに際しては、中学、高等学校における理科教育まで考える必要があるのではないか。技術的安全性を社会に早期にアピールできるように、データを整備することが必要。また、報告書の官庁用語を平易にするよ

う努めること。

(8) 具体的方策の決定方法

- 広告、宣伝の専門家、実務家を主体に、原子力立地の専門家と素人で小委員会を構成する。
- つぎの項目について検討する。
 - － 社会的不安の分析と制度的担保の在り方
 - － パブリックアクセプタンスにおける関係機関の役割分担とツール
 - － 制度的担保方策(閉鎖後管理の方法と期間、国による継承の方法、鉱区禁止区域の設定等)
- スウェーデンのプログラム等の海外での動向を参考にする。また、スウェーデンのような地下研究施設を日本にも一日も早く作るべきである。その投資をし、国民に現場を見せなければ、国民はいつまでもかたくなに反対しか言えない。国民は日本の場合、感情で理解をし、原子力を理性でとらえきれていない。

5.3.2 総合エネルギー調査会原子力部会報告

後者は、核燃料サイクルのいくつかの選択肢を社会的受容性の面から比較している。ここでは、社会的受容性について最初に示した2つの文献を中心にまとめる。

通産省 審議会報告書資源エネルギー庁原子力産業課の総合エネルギー調査会原子力部会中間報告には、放射性廃棄物処分の社会的受容性についてつぎのような記述がある。ここでは、

- 再処理を行う場合
- 使用済燃料を直接地層処分する場合

について、放射性物質の量と資源の有効利用という2つの面で比較し、そのメリットが多いほうが社会的受容性が大きいと判断している。以下は、報告書における記述内容である。

再処理を行う場合と、使用済燃料自体を高レベル放射性廃棄物とする場合(ワンス・スルー)と比較し、高レベル放射性廃棄物が1/2以下に減容されたガラス固化体となり、高レベル放射性廃棄物処分事業に対する負担を軽減できる。また、使用済燃料を直接地層処分する場合、廃棄物には半減期が超長期のプルトニウムと燃え残ったウランという有用な資源を多く含むこととなる。これらの点から、我が国においては、使用済燃料を直接処分することは再処理後のガラス固化体を地層処分することよりも、社会的受容性の観点から困難度がより高いと予想される。

なお、再処理プロセス等から発生する低レベル放射性廃棄物等を含めた放射性廃棄物総量は、直接処分の場合よりも大きくなると推定されているが、海外における減容処理技術の開発状況等にかんがみれば、相当程度減容できる可能性がある。また、再処理工程で使用済燃料中に含まれる放射性核種の一部が環境中に拡散放出されるとの批判があるが、例えば六ヶ所再処理工場の安全審査では、それによる公衆の被曝線量当量は日常生活で人間が受ける自然放射線による線量当量の約1/50のレベルに評価されており、人の放射線環境に有意な変化を与えるものではない。

5.3.3 各国の社会的受容性のための方策

(1) 一般論

パブリックアクセプタンスのための方法として一般論としてつぎのような考えがある。これは、「未来を拓く放射線教育 PA による社会教育」^[47]よりの抜粋である。この文献は、パブリックアクセプタンスと社会教育、特徴、対応の仕方について、経験に基づいて考察した文献であり、原子力パブリックアクセプタンスの意義、社会教育とパブリックアクセプタンス、一般公衆に対するパブリックアクセプタンスのあり方としての情報とその問題点、これからの原子力・放射線パブリックアクセプタンスのあり方について、基礎知識とトピックスを示した文献である。ここでは、これからの原子力・放射線パブリックアクセプタンスのありかたとして

- 関心事は何か (アンケート調査等)
- 原子力・放射線についてわかりやすく説明できる人材の確保
- 情報交換連絡会 (専門家、オピニオン・リーダー、一般公衆を含む) の定期的開催
- 見学会、基礎的またはより高度な勉強会等の定期的、定常的な提供
- 多くの人が容易に理解できる解説書、パンフレットの広範で、継続的で、かつ繰り返しを意識した提供
- 情報の視覚化
- 学校教育内容の充実

を注意する。また、パブリックアクセプタンスでの対応としては

- 魅力的な接触にする
 - － 人を惹きつける工夫をする (講師からの質問)
 - － 多様なマスメディア、必ずしも良ならず
 - － 中間に立って、聴衆と講師をアレンジする人の情報が正確でなく、聴衆像をばやけさせ、見誤らせることがある。その様な時、接触状況は最悪
 - － 個人から出た意見等は、聴衆全部を代表していると考えると誤ることが多い
- 聴衆の知識等のレベル
 - － 聴衆の中でも最も低いレベルのグループに合わせる事が肝要

- 低いレベルの接触を、繰り返すこと
- 聴衆の中の高いレベルのグループは講演等を自分達の参考、洗練のために聴いてもらう

がいられている。以下は、経済協力開発機構 (OECD) の報告書^[158]にある原子力発電パブリック・アクセプタンスに関する国家政策及び諸活動に関する報告をまとめたものである。この報告書は、OECD 加盟国の原子力発電パブリック・アクセプタンスに関する国家政策及び諸活動に関する調査結果について紹介した後、本調査結果の総括について述べた。その中で、原子力採用に対する積極的な政府のリーダーシップ、長期にわたるエネルギー教育の努力、情報公開の政策等を通して、公衆の原子力に対する疑念を解決できること等を示唆すると共に、地方レベルでの関係当局と公衆との間のコミュニケーション改善に役立ついくつかの方法について注意を喚起している文献である。

(2) ベルギー

1977年、電力会社および原子力産業界は、政府、報道陣、公衆それぞれを対象とした情報プログラムを設定した。

政府機関の各長官、そのスタッフ、および議会のメンバーに対しては、エネルギーに関する諸問題を討議する情報会報が UEEB (Union des Exploitants Electriques Belgique) により刊行された。

一方、ベルギー原子力産業会議は定期的にジャーナリストのグループを招き、情報セミナーへの出席、ベルギー国内および国外の原子力施設の訪問、さらに施設のスタッフとの討論の機会を持つことなどを呼びかけている。これらの計画は成功する見込みが大きいと見られているが、それは概してジャーナリストは専門家の意見に耳を傾ける傾向が強く、また原子力をめぐる各種問題のレポートがこれまでよりもはるかにバランスのとれたものになるがためである。

モルにある原子力研究センターもまた、エネルギー問題に関する雑誌“コンセンサス”を刊行している。同センターはさらにプレス・グループおよび専門家グループのために、特定主題に関する情報セッションを設けるなどの配慮を払っている。公衆に対する情報提供の重要な特徴は、運転中の発電所を訪問すべく刺激をあたえるという点にある。学校、協会等の団体を含み、年間およそ3万人がドールおよびチアンジュの施設を訪問している。訪問者には原子力発電およびエネルギーに関する各種刊行物、パンフレット等が利用可能となっているが、これら出版物は要求すれば、公衆も入手することができることになっている。

最後に、原子力発電所運転中に発生した事故に関しては、その詳細内容が逐一国の該当

機関に速報されるとともに、新聞、ラジオ、テレビ等報道機関にもただちに報知される。このことは、いったん確立されてしまうと、その根絶がなかなか容易でない誤報や流言のたぐいを、ある程度防ごうとするためのものである。政府当局は国民の選出した議員諸氏に、議会の通例手順、つまり質疑応答、説明要求、審議——これらは通常プレスに反響するものであるが——を通じ、原子力の各部門における情報を常にあたえておくことも、また留意を払わなければならない点である。

(3) カナダ

民間企業はもとより多くの政府関係機関が公衆に対し原子力発電の情報を供給することに参加している。これは原子力の平和利用開発の責任を有する連邦政府所有の会社であるカナダ原子力公社（AECL）が率先して行なっている。同公社はオンタリオ、ケベック、ノバスコシアおよびアニトバの各州におけるサイトにおいて情報サービスを行なっている。視聴覚用、印刷物、ポスター、映画、技術的研究報告および一般情報も含めた広範囲の情報資料が作られている。又、教師の支援や学生に対する学校の計画とともに教師用のプログラムもある。実業界、協会、自治体のグループに対し講演者も提供している。高レベル廃棄物の処分計画に関連してマニトバ州では目下特別の努力が払われている。廃棄物管理計画に対する公衆の認識の程度を評価し、それ以上の情報の必要性や、また計画の各段階におけるパブリック・アクセプタンスの程度を知るために公衆の意見調査が6ヶ月ごとに実施されている。AECLのこの情報作業に対する予算は年間300万～400万ドルである。

同様な支出（300万ドル）がオンタリオ・ハイドロ社によりその原子力発電計画を支援するため行なわれている。一般に対する情報の公開がピッキングおよびブルース原子力発電所の現地で行われている。学校むけのプログラムでは、多くの教師への支援と隔月発行の教師のためのエネルギー雑誌に加えて教師のためのワークショップおよび会議が用意されている。その他の原子力発電会社であるハイドロ・ケベック社およびニューブランズウィック電力でも、より限られてはいるが同様の活動がなされている。

原子力情報プログラムを有するその他の政府機関には、エネルギー・鉱山資源省、外務省、カナダ原子力管理委員会、それとカナダにおいてウラン精錬を行うとともに採掘および販売を行う政府所有のエルドラド・リソーセズ社が含まれる。環境省は公衆に対し情報の一般的提供を行うことに加え国際計画の情報はもとより、要求に応じ科学刊行物、環境の質に関し通常集められたデータ、および環境規制に従って集められたデータも提供している。できる限り情報は無料である。

民間側においても、ウラン採掘の会社は公聴会で操業に関する情報を提供するように求められてきた。さらに、サスカチュワン採掘開発公社、土着の子供も含め、北部の学校の

児童にむけて季刊の雑誌を作成している。カナダ原子力協会もまた産業界が適度に資金を出している情報計画の調整に一役買っている。

(4) フランス

原子力庁 (CEA) の情報政策は伝統的に国全体にわたるものであり、教育的な役割も含めて特殊な情報と公衆に対する一般情報から成っている。それが与える地方の情報はその地方の中心 (グルノーブルの原子力研究センターやカダラッシュ・センター) により与えられ、それらはその所在地に特定の問題を有するものである。これらのセンターは情報および技術を伝える形で地方の科学的、技術的開発に対し貢献している。地域のレベルでは地方のセンターが選ばれた代表、経済、社会、文化的指導者および報道機関 (地方の出来事、開放日、展示、討論等) と契約を結んでいる。フォントネオローズの文書センターの高度の作業により公衆に情報を伝える上で特別な役割を果たしており、それは原子力の安全性と防護についての国の情報を専門としている。

CEA は主に原子力分野の人々や、情報および教育にたずさわる組織に対する情報提供に関係している。それで、その専門的情報サービスは研究、産業、大学、医学界等と接触をもつよう意図している。このようにして、CEA は定期的な会議を組織し、シンポジウム、展示会をひらき、研究者を他の組織 (CEA/CNRS, INSERM, EURATOM 等) と交換し、国際共同プロジェクト (JET) に参加している。

CEA はまた政府機関へも情報を届けている。例えば議会の質問に答える資料を提供し、産業・研究省による情報作業 (科学的刊行物への共同参加) に協力している。CEA の教育的役割は限られた数の論文契約 (大学院の教育、工学博士号、国の博士号) や訓練の終わった *ph.D.* をそれ自信を補充しない配置につける政策によって明らかに認められている。それはまた国家教育省、大学程度の学校、国立の科学、技術研究所と関係して他の多くの教育的仕事を実施している。これはその研究所へ開発途上国から訓練を受ける者や研究者を引き受けることも含んでいる。さらに、学校が要求するならば、専門情報の公開日、教室における講義、大学程度のセミナー等も組織する。公衆への情報は CEA シリーズ (科学的、技術的、一般書籍) の公的刊行物 (年間ほとんど 2,000 種類) の形でなされる。CEA はまた常に路上で行なう移動展示館も有しており、パレ・デ・ラ・テューベルトやムゼー・ド・ラ・ビレットに「原子力室」を設けてきた。多くの行事が毎年行なわれており (会議、シンポジウム、展示会)、オレセイ大学はそれが行う一般講義や科学映画クラブにより文化センターとして活動している。

(5) ドイツ

原子力エネルギーに関する公衆の討論が激しくなるのに応じて、連邦研究技術省は1974年秋に公衆に対する情報ならびに公衆討論の運動を開始したがこれは、パブリック・アクセプタンスを明白に増加してはいないとはいえ原子力問題の理解の浸透を促進したように思われる。

1975年に計画を開始して以来、連邦政府は原子力のパブリック・アクセプタンスに関係したプロジェクトに2,680万ドイツマルクを費やしてきた。これには、情報集会、会議等の組織、原子力発電所の訪問、展覧会や展示のスタンド、パンフレット、広告、学校の教材、廃棄物管理の特別情報プロジェクト、映画を含んでいる。成人教育センター、政治団体、労働組合、教会のグループが連邦政府の提供する技術的、財政的援助により力づけられてそれぞれの組織内で討論を行った。情報計画は原子力発電の反対者に彼等の見解を述べ反対意見を表わす機会を提供するように準備された。しかしその結果は、統一のない見解が述べられる場合に想定されるように、情報活動が公衆の原子力に対する態度をいずれか一方にするほどには影響を与えていなかった。情報の調査では人口の大きな部分—1978年の調査では、3分の1までが—がいずれとも定めないままであった。

(6) ポルトガル

公衆が原子力選択を考えるために必要な原子力のパブリック・アクセプタンスに関する情報活動は小規模ではあるが行われている。いろいろな面からみた原子力についてのパンフレットを作成し、またIAEA刊行印刷物のポルトガル語版を刊行して、必要に応じて配布している。

1976年には、議会における原子力論争についての白書を作成した。1978年には公衆にも利用できるように白書を出版した。1978年に政府は公衆への広報手段を考える委員会を発足させた。委員会の活動計画として、原子力についてポルトガル公衆が不安を感じている事項の調査と調査結果に基づく広報活動が取り上げられた。

しかしながら、ポルトガル政府は、これらの活動を実際に開始するのは国家エネルギー計画が作成されるまで待った方が良く考えた。この計画ができれば、原子力発電計画の承認を求める活動と同時に広報活動も行うことができるからである。1982年には、産業エネルギー省によって原子力一般に関する資料と“原子力問答集”が発行された。国家エネルギー計画と政府の決断に関する勧告に引き続き、原子力発電に関する広報活動についての提案がワーキング・グループから出されている。

(7) スペイン

議会における国家エネルギー計画（PEN）に関する論議はまだ、いつ行われるか決まっていない。国家エネルギー計画は、国家が実際に必要とするエネルギーの供給に影響を与え、これが承認されれば、今まであいまいであったスペインの原子力発電所建設の見通しも明確となる。発電容量が過剰にならないように、さまざまなエネルギー計画が立てられる中で原子力発電計画は次第に縮小される傾向にあるが、これは、反原子力運動に対して政府が原子力推進をためらっていることを反映しているものと思われる。そしてこれが公衆の原子力への疑いを増加させ、反対運動を助長する結果を招いているのである。

エネルギー問題に関する公報はいつでも入手できるが、スペインでは、責任を持って公衆の疑問に答えて適切な情報を提供するところはどこにもない。原子力発電所へ燃料を供給する会社は大きな電力会社、あるいは原子力産業会議などはいずれも広報部門を持っているが、公衆に十分な情報を与えることには成功していない。

5.4 原子力分野以外における社会的受容性

5.4.1 既存の事例

原子力分野以外における社会的受容性を議論されている例について、表5.3に示す。科学技術についてはつぎの通りである。自動車自動運転導入については、自動車技術会シンポジウムで議論されている。情報については、情報機器導入について通産省報道資料「市街地の整備改善および商業等の活性化」において、発信電話番号表示サービスについては、郵政省「日本電信電話株式会社の発信電話番号表示サービスに係る電気通信審議会答申」に議論がある。また、エネルギーに関する文献は多いが、原子力および電源立地以外では核融合に関し、プラズマ・核融合学会誌で「実用核融合炉の社会的受容性確保のための方策」についてみられる。また、環境問題については、多くの例があり、温暖化における通勤交通やCO2排出権取り引きおよびごみ焼却場問題等には、記述がある。また、バイオテクノロジーについても、多くの議論がある。例えば、日本総合研究所研究報告の「バイオテクノロジーの環境利用と社会的受容性」にある。社会問題に関しては、給与問題の社会的受容性に関する問題や、情報に関する治安維持について警察庁が「情報セキュリティ調査研究報告書」にまとめている。

表 5.3 原子力分野以外における社会的受容性の事例

分類	項目	内容	
科学技術	機械工学	自動車自動運転導入 自動車技術会シンポジウム「AVCSの現状と課題」等	
	情報	情報機器導入	通産省報道資料「市街地の整備改善および商業等の活性化」等
		発信電話番号表示サービス	郵政省「日本電信電話株式会社の発信電話番号表示サービスに係る電気通信審議会答申」等
	エネルギー	核融合	プラズマ・核融合学会誌「実用核融合炉の社会的受容性確保のための方策」等
	環境問題	温暖化における通勤・通学交通	環境庁国立環境研究所「地球環境研究総合推進費による研究」等、
		CO2 排出権取り引き	三菱総合研究所研究報告「排出権取り引きの論点」等
		ごみ焼却場	NEDO「超臨界水処理による焼却炉飛灰の無害化実験」等
生命	バイオテクノロジー	日本総合研究所研究報告「バイオテクノロジーの環境利用と社会的受容性」等	
社会	人事	給与	人事院「平成9年度人事院給与勧告」等
	治安	情報に関する治安維持	警察庁「情報セキュリティ調査研究報告書」等

5.4.2 パブリックアクセプタンス (PA) に重点をおいた例

パブリックアクセプタンスに重点をおいた例として、バイオテクノロジーの例をとりあげる。バイオテクノロジーに関しては、いくつかの文献がある。文献^[159]では、組換え DNA 技術を中心に、パブリックアクセプタンス (I) の促進などに関する私見を述べ、かつ農林水産省における今年度からの取り組みの概要を紹介した。主要な項目、1) I の重要性、2) I についての基本的考え方と推進に当たっての留意事項、および 3) 具体的な対策の手法について述べている。文献^[160]では、バイオテクノロジーの安全性とパブリックアクセプタンスに関して、ガイドラインを含めた現在までの国内、国外における対応の流れについて述べた。厚生省が平成 3 年に出した「バイオテクノロジー応用食品・食品添加物の安全確保のための基本方針」に対して、その解釈と見解を述べた。また、組換えトマトでの安全性評価実験の例や環境に対するバイオテクノロジー応用技術の安全性についても解説している。文献^[161]では、組換え DNA 技術による組換え体 (I) の産業利用は I の安全性が十分に評価され、かつ隔離されている閉鎖系と I を直接農業や環境などの野外に放出し利用する開放系に分類される。本稿では組換え技術の閉鎖系における安全性確保の実際と開放系における野外実験の現状を紹介した。各種 I を直接開放系で利用するタイミングは目前に迫っており、着実な本技術に対するパブリックアクセプタンスを得る努力の必要性を強調した以下の内容は、文献^[162]をまとめた内容である。

(1) アメリカでの事例

アメリカにおいては、遺伝子操作微生物の環境導入は法律によって規制されているため、まだ実施されていないものの、在来微生物の活性化と天然の外来微生物の環境導入については、商業レベルで実施されている。

すなわち在来微生物の活性化に関してはとくに制約はなく、天然の外来微生物の環境導入に関してもアメリカ本土から分離された微生物であれば、人に対する病原性や毒性がない限り、その使用に関する法的な制約はない。アメリカではこれまでに 150 件以上のバイオレメディエーションの実施例が報告されている。このうち、付近の住民の反対で実施できなかつたり、作業が滞った例は 1 件もなく、社会的受容性がバイオレメディエーション実施の障害となったことはないとみられる。これは、単にアメリカ人の国民性に起因するものではなく、バイオレメディエーションを普及させるために様々な施策が講じられたことによるものである。

アメリカ環境保護庁は、バイオレメディエーションの有効性の科学的評価や化学物質の微生物分解物の安全性評価等を行っているが、それとともに目を引くのが、一般市民に対する啓蒙・普及活動である。環境保護庁は、バイオレメディエーション委員会を設置して、

技術の方向性を政府の立場からオープンに議論するとともに、その有用性や安全性を社会に訴えてきた。また、市民のために「バイオレメディエーション・ガイドブック」を作成して技術の概要を紹介したり、一般市民の素朴な質問に答えることによって、技術に対する信頼を獲得してきた。個々のプロジェクトの実施に際しては、行政が初期の段階から事業の監視役として関与する一方、付近の住民への情報公開を積極的に行うことで信頼を獲得してきた。これらの努力があってこそ、社会的受容性がスムーズに獲得できたものと考えられる。

(2) 社会的受容性の方策

一般に、過去に経験のない新しい技術の社会的受容性を獲得するためには、

- 技術の必要性と有用性の認識
- 実施主体および管理側に対する信頼感
- 生活環境および自然環境への影響
- 人の健康影響と安全性
- 技術の公平性
- 適用過程における合意プロセス

などに関する合意が重要といわれている。アメリカでの成功例を参考にすると、わが国において微生物の環境利用に関する社会的受容性を獲得するためには、技術の有用性についての認識の形成と信頼感の醸成が必要である。そのためには、まず有効性データおよび人の健康への影響や安全性に関する科学的なデータを蓄積することが不可欠である。そのうえで、それが適正に評価された結果であることを保証し、かつ、一般に公表し議論していくためのシステムを確立していくことが必要である。すなわち、微生物の環境利用を検討するためのガイドライン作りに一刻も早く着手することが望まれる。また、一般市民レベルでは、バイオテクノロジーに対する漠然とした不安から、いまだにバイオ規制を求める声がる。21世紀に向けた健康増進、食糧増産、環境維持・改善などで、期待されるこの技術の確実な発展と大きな市場規模への拡大を目指すには、これからのバイオテクノロジーに関するパブリック・アクセプタンス努力が不可欠であろう。

5.4.3 テクノロジーアセスメント (TA) に重点をおいた例

参考文献「エレクトロニクスの発展過程に関する分析」^[142] テクノロジーアセスメントについて、技術の社会的受容性、すなわちその社会に固有な文化（仕事、生活）がどのようにして固有な技術を育てつつあるのかの一端を明らかにするため、4つのケース・スタディを行っている。

ここでは文化を仕事の側面と生活の側面の2つに分けて考え、人々と技術とのかかわりについては人々の技術に対する認識と技術の人々へのインパクトの両面を考える。表5.4に示すように、これを横軸、縦軸にとってマトリックスを作ると、4つの欄が出来る。このそれぞれの欄に当てはまるケース・スタディを行なった。

表 5.4 ケース・スタディの位置づけ^[142]

	人々の技術に対する認識	技術から人々へのインパクト
仕事	MIS (新技術への期待感)	新聞自動編集システム (雇用・労働問題)
生活	電子レンジ (安全性、有用性の問題)	自治体オンライン (プライバシー問題)

第1は仕事に関して、人々の技術に対する認識がどの様に変化してきたかという問題である。ケース・スタディとしてMIS（マネジメント・インフォメーション・システム）を採りあげる。コンピュータがビジネスに広く使われるようになったのは今から20年ほど前からであるが、この間、ビジネスの特性に応じてコンピュータを使いこなすという経験がいくつかの失敗を含みながら積み重ねられてきた。MISは失敗例として有名であるが、それをコンピュータという技術への過信と自分の業務に対する理解不足という点から検討する。ここでは反省が現在どの様に生かされつつあるかが問題となる。

第2は、生活に関連して人々がどの様に技術を問題にしてきたかという問題で、ケース・スタディとして電子レンジを採りあげる。消費者にとって、技術（製品）がどの様に自分の生活にとって有用であり、安全であるかが関心の的になる。電子レンジはその有用性、安全性に対して多くの問題を提起した例である。そこではどの様に問題が生じ、メーカーと消費者の対応はどうであり、その結果メーカー、消費者の技術に対する認識にどの様な変化あるいは教訓をもたらしたのかを検討する。ここでは技術に対する期待度、納得度が色々な問題を経過しながらいかに変化し育っていくかがうかがわれる。

第3は、仕事に関連して人々が技術から受けるインパクトの問題である。この分野では労働・雇用の問題が大きい。特にマイクロ・エレクトロニクスの導入による失業、配置転

換、職場秩序の変化などの問題が指摘されている。ここでは、新聞社の自動編集システムをケース・スタディとして採りあげる。科学技術の急速な進展に伴って、労働現場の変化は著しいものがある。しかしそれに対応して行われるべき職場環境のあるべき姿、人間にとっての労働の意味などに関する検討はまだ始まったばかりである。技術変化による強力なインパクトに身をさらしながら、労働現場ではそれを自分の問題としてどの様に理解しどのような対応をとっているのかを検討する。

第4は、生活の場面での技術によるインパクトの問題である。現在の情報化社会の進展につれて問題になっているのがプライバシーの問題で、そのケース・スタディとしてここでは自治体オンラインを採りあげる。コンピュータによる情報処理をどのようなルールのもとで行なうかというまさにそれぞれの社会に固有の問題である。ここでは、社会的ルールの形成が技術を主体的に使いこなすことと密接な関連を持つことが明らかとなる。

5.4.4 PA と TA に重点を置いた例

パブリックアクセプタンスとテクノロジーアセスメントの双方に重点を置いた例として、自動車の自動運転の例がある。この技術は現在開発中であり、技術的には完全な自動運転のレベルには達していないが、その技術が普及する場合の問題点について、議論がはじまりつつある。以下の内容は、服部彰らの日本における自動運転について考えるシンポジウムにおける「AVCSの現状と課題」^[163]の内容をまとめたものである。

自動運転システムの導入を考える上で、それによりシステムとドライバの責任分界点があいまいになる可能性が発生すると考えられる。先般の名古屋空港における中華航空機墜落事故は記憶に新しいが、自動運転及び運転支援が高度に進んでいる航空機でさえ、事故発生原因の追究の過程において、その発生原因が人的なものかシステム的な故障であるかの判断が単純には行なえないケースが存在する。逆に言えば、自動運転及び運転支援が高度に進んでいるからこそ、システムと操縦者の責任分界点があいまいになると言えるだろう。

今ここで、ブレーキを踏むという単純な例を考える。車を止めようとするときにはドライバはブレーキを踏む。短い距離で停止したい場合には通常より強く踏む。これは自動車がブレーキを踏むと制動装置が働いて、車両を停止させる事が可能であり、その停止させる力はブレーキを踏む踏力に比例する事をドライバが知っているからである。何故なら、自動車は全てそのように作られており、その操作方法についてドライバが教習所で十分な教育を受けているからである。又、同時にブレーキが万能でないことも知っている。つまり、このような条件や過程を経て、ドライバにブレーキのメンタルモデルが形成されたと考えられる。

以前の検討において、自動車を含め、機械を操作する場合には操作に対する良いメンタルモデルが十分に形成されている事が重要となることが示されている。ここで良いメンタルモデルとは人間の操作感覚及び操作に対する動作の期待値と、機械の反応に一貫的な整合性があるという事である。又、逆に形成されたメンタルモデルとシステムの反応のギャップを「違和感」と定義した。つまり、違和感無く操作できるものが良いメンタルモデルを持ったシステムであり、自動車においてもそのようなシステムでないとドライバ及び社会的受容性が得られにくいと言えるだろう。

5.5 専門家へのヒアリング

社会的受容性に関するヒアリングとして、社会情報システム学を研究する国立大学の教授にヒアリングを行った。社会情報システム学は人間知能と機械知能の統合やその統合によって初めて可能となる方法論の確立をめざしている学問であり、教授はその研究の一部として各種の状況下での組織のシミュレーションの研究を行っている。このため、情報システムとの関連性に注目した現代社会における組織的社会的活動を、集合知能としての組織知能の高度化や人工実現社会の構築について、ヴァーチャルなモデルの構築を行うことによって、理論、実態、方策の三面から検討している。社会情報システムを把握するための理論的な枠組みの構築と、その基礎となるモデルについて検討を行い、操作的組織モデルにもとづく展開を図るとともに、個の規則にもとづく集合体での創発現象に関するシミュレーションを行っている。

(1) 現状の認識

計算機により雇用の機会が確実に減少している。したがって、単純労働や中間管理職が不要になる。ただし、新しい雇用が創製されているため、これまでは問題にはならなかった。ただ雇用が減少しているのではなく、知識労働者以外の雇用では。そして、新たな分野(情報処理分野等)の雇用が増大しており、全体としては大きな減少とはなっていない。

知識労働者しかいらなくなってくるというのがマクロトレンドであろう。現在の米国がこのような状況である。景気がよくなっても失業率が減少しなかった。現在の日本はこのような状況にさしかかる段階である。これまで日本では緩やかな変動であったため気がつかないが、労働の質はゆっくりと変化している。現在ではリストラという名の首切りがさかんに行われている。労働の質の転換が出来ない人が失業の対象となってくる。

(2) 情報技術と社会

計算機は virtual corporation を可能とした。従来の階層システム(官僚のヒエラルキー型の社会)がオープンなネットワーク型の社会に変革される段階である。情報の伝達コストがやすくなり、また情報の提供検索がネットワークの普及により容易になったため、ネットワーク型の社会に移行して来ている。MIT CCS(Center for coordination science)の研究では21世紀のシナリオとして、virtual organization(4～50人での映画作成)および丸抱え疑似国家(なんでもある昔の炭坑の町のイメージ)の2種類の社会を提言している。上記のどちらかの社会が形成されると予測している。

情報革命により流通の中抜き論もあり、あるていど実現している。実際に、ABBという会社は157カ国に200人の社員がいて、基幹では利益の確保のみを管理している。例え

ば、情報のネットワークによりプラントの見積もりは日本が1ヵ月かかるところを1週間で、見積もり価格も日本が4～50%高い。これからは、権限のあるところにアクセスするのではなく、知識のあるところにアクセスするようになる社会になるであろう。webでの検索でシェークスピアの研究をやり、大家と同等の研究成果を挙げた例もある。将来的に本の出版はwebでということになるだろう。リクルートがそのような流れを作っている。デジタルドキュメントも普及してきている。

また、情報技術による情報の普及により、指導者との立場が変化している。例えば医者と患者(薬の内容がわかる等)や教師と生徒の関係が、距離が近くなっている。これは、一般の人が医学の知識等をWEBの発達により簡単に取得できる情報システムの発達のためである。このように専門家との知識のギャップは縮まって来ている。

(3) AI技術と社会

ロボティクスについては、ロボットは2種類あり、生産の現場で利用されるロボット、日常生活をサポートするロボットの2種類がある。前者は職人の学習ロボットまで実用化されており、普及している。後者は人に危害を加えないという課題があり普及していない。AIが社会に受け入れられるかという問題より、AIと哲学の問題である。例えば、ペンローズの「機械に人間の代わりはできない」「AIなんてとんでもない」というような主張は哲学的なものであり、社会にはとうてい受け入れられない。現在世の中にAI技術はこっそりとはいつてきている。ワープロの学習機能等で代表されるように簡単ではあるが機械の知能に置き換えられている部分がある。AI研究は現在基礎研究に動いている。AIの実用化でもっと期待できることは検索技術である。現在の膨大な情報を処理するための検索技術が世の中で必要とされている。

(4) 社会情報学について

社会情報学は新しい学問である。計算機と経営、組織の問題を検討する学問である。例えば、官僚組織とネットワーク型組織の強みと弱みや、混乱の波及等のシミュレーションを行う。個人の問題解決能力よりも組織の問題解決能力がはるかに上回った例として昔の日本のQCサークルがあげられる。このような現象に興味がある。組織として知能を発揮する、組織知能工学の研究している。

(5) ヒアリングのまとめ

本ヒアリングをまとめると

- 計算機が空間を形成する。計算機の性質がかわってくる。これを読み間違えると経営も社会も大変なことになる。
- 広く情報技術一般や情報システムについて心理的な反発はなくなってきているのではないか。むしろそのような技術と人間が共存する方向を探る段階ではないか。
- 社会は利用価値のある技術はどんどん受け入れられていく。したがって、AI技術はが社会に受け入れられて行くだらう。

である。

6 結論

6.1 技術動向

次の3点が近年の人工知能技術動向の特徴である。

- 知識表現 (ルール型から事例型へ)

論理を一つ一つ積み上げていくルール型の知識表現から、類似事例を活用し、推論、学習を実現する手法の研究が多くなってきている。

- 大規模データベースからの知識獲得

ハードの発達により大規模なデータを扱うことが可能になってきたため、大規模データから知識を獲得するデータマイニングの研究が盛んである。これにともない、知識の共通に扱うためのオントロジーの研究も行われてきている。

- 手法の組み合わせ

また、ニューラルネット、遺伝的アルゴリズム等、複数の手法を組み合わせる目的とするアプリケーションを構成するシステムが多くなってきている。その中で、各手法の改良、評価をおこなっている。

6.2 産業界での導入及び応用例

従来の手法では解決が難しかった診断や設計問題へ前節で述べた手法を適用させたシステムの開発が行われている。解決しようとする問題にどのようなAI技術を適用させ、正しい結果を導くかが実用システムへの課題となっている。

6.3 ニーズ

人工知能技術に対し次の2点のニーズが大きい。

- 既存データベースの活用

これまで蓄えられて来たデータの活用のために、データマイニング、事例ベース推論のニーズがある。

- 分散協調

分散環境で協調的に計画/推論/実行するソフトウェアエージェントを実現するための技術開発が求められている。

6.4 社会的受容性

● 原子力分野等の事例

原子力分野では、情報の公開と技術の広報により、社会的受容性を得る努力が行われている。原子力以外の分野での科学技術の社会的受容性については、バイオテクノロジー、情報化技術等で代表されるいろいろな分野で議論されている。これらの分野では、原子力分野で利用されている方法と同時に技術の実証段階を経ることにより社会的受容性の課題を解決してきた。

● 情報分野での事例

人工知能の分野を含む広く情報の分野では、これまで新しい情報技術により既存の職を必要としなくなる等の事例があった。このような問題に対しては、社会に対して緩やかに技術が浸透していくことで社会的受容性の課題が解決されてきた。

● 今後の方向

今後の必要となると考えられる人工知能技術の社会的受容性の課題を解決していくためには、

- － 対象とする技術が必要があり、十分に利用できるまでに技術が成熟した時点で、その技術を緩やかに社会に浸透させることで社会的受容性の課題を解決する。
- － これまで実施されたパブリックアクセプタンスに方策を参考にし、技術の必要性等を広報等とあわせ十分に議論し、関連する情報を公開することで、社会的受容性の課題を解決する。

の2面から検討していく必要がある。

6.5 まとめ

自律型プラントのための分散協調知能化システムの開発および原子力施設における知的活動支援の方策に関する研究に資することを目的に、原子力人工知能の技術動向調査をおこなった。

応用システム開発の動機付けは、ニーズと技術の両者から発生するものであり、お互いが補間しあいなされていく。その技術の有用性、実用性が認めら、自然に社会へ受け入れられて行くために、人工知能技術に対する社会的受容性についての課題を解決する必要がある。(図 6.1参照)

人工知能技術は、今後も種々のシステムの複雑化、高度化へ対応するための技術として必要不可欠な技術である。

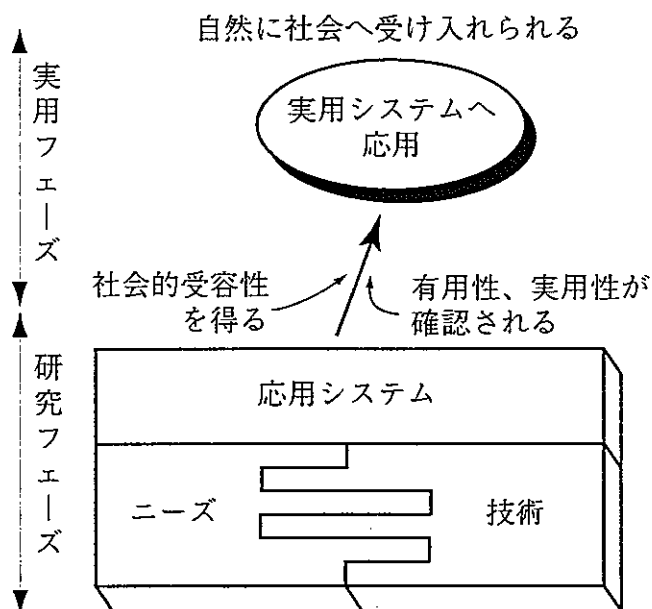


図 6.1 AI システムの開発構造

参考文献

- [1] 河野浩之, "知識発見とデータマイニング", 日本ファジー学会誌, Vol.9, No.6, pp851-860, 1997.
- [2] 河野浩之, "データベースからの知識発見の現状と動向", 人工知能学会誌, Vol.12, No.4, pp497-504, 1997.
- [3] 沼尾雅之, 清水周一, "流通業におけるデータマイニング", 人工知能学会誌, Vol.12, No.4, pp528-535, 1997.
- [4] 津本周作, 田中博, "データマイニングの医療応用", 人工知能学会誌, Vol.12, No.4, pp536-543, 1997.
- [5] 落田美紀他, "製造業におけるデータマイニングの応用と課題", 人工知能学会誌, Vol.12, No.4, pp544-549, 1997.
- [6] 寺野隆雄, "KDD ツールの動向と課題", 人工知能学会誌, Vol.12, No.4, pp521-527, 1997.
- [7] U. M. Fayyad, "Data Mining and Knowledge Discovery in Databases: Application in Astronomy and Planetary Science", National Conference on Artificial Intelligence, Vol.13, No.2, pp1590-1592, 1996.
- [8] U. M. Fayyad et al, "Advances in Knowledge Discovery and Data Mining", AAAI/MIT Press, 1996.
- [9] Agrawal R., et al, "An Interval Classifier for Database Mining Applications", Proceedings The 18th International Conference on Very Large Data Bases, pp560-573, 1998.
- [10] Cheung D. W et al, "Efficient Mining of Association Rules in Distributed Databases", IEEE Transaction on knowledge and Data Engineering, Vol.8, No.6, pp911-922, 1996.
- [11] Han J, et al, "Knowledge Discovery in Databases : An Attribute-Oriented Approach", Proceedings The 18th International Conference on Very Large Data Bases, pp547-669, 1992.
- [12] Han J, et al, "Discovery of Multiple-Level Association Rules from Large Databases", Proceedings The 21th International Conference on Very Large Data Bases, pp420-431, 1995.
- [13] Srikant R., Agrawal R, "Mining Quantitative Association Rules in Large Relational Tables", Proceedings The 21th International Conference on Very Large Data Bases, pp407-419, 1995.
- [14] 穂鷹良介, "特集データベース関連技術の標準化", 情報処理, Vol.37, No.7, 1996.
- [15] Fisher D, "Optimization and Simplification of Hierarchical Clusterings", Proceedings First International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, pp118-123, 1996.
- [16] Samet H, Aref W G, "Spatial Data Models and Query Processing", Modern Database Systems, ACM press, pp338-360, 1995.

- [17] Knorr E.M, Ng R.T "Finding Aggregate Proximity Relationships and Commonalities in Spatial Data Mining", IEEE Transaction on Knowledge and Data Engineering, Vol.8, No.6, pp864-897, 1996.
- [18] Kaufman L, Rousseeuw P.J, "Finding Groups in Data: an Introduction to Cluster Analysis", John Wiley & Sons, 1990.
- [19] Yao F.F, "Computational Geometry : Handbook of Theoretical Computer Science", Elsevier Science Publishers B.V, 1990.
- [20] Gravano L, Garcia-Molina H, "Generalizing GLOSS to Vector-Space Databases and Broker Hierarchies", Proceedings The 21th International Conference on Very Large Data Bases, pp78-89, 1995.
- [21] Etzioni O, "The World-Wide Web: Quagmire or Gold Mine?", Communications of the ACM, Vol.39, No.11, pp65-68, 1996.
- [22] 溝口理一郎, "形式と内容-内容指向人工知能研究の勧め-", 人工知能学会誌, Vol.11, No.1, pp50-59, 1996.
- [23] 溝口理一郎, 池田満, "オントロジー工学序説-内容指向研究の基盤技術と理論の確立を目指して-", 人工知能学会誌, Vol.12, No.4, pp559-569, 1997.
- [24] 溝口理一郎, "オントロジー工学への道", 人工知能学会誌, Vol.13, No.1, pp9-10, 1998.
- [25] Feigenbaum, E.A, "The art of artificial intelligence: I. Themes and case studies of knowledge engineering.", Proc. of IJCAI-77, pp1014-1029, 1977.
- [26] 小林重信, "事例ベース推論の研究動向に関する報告書", 新世代コンピュータ技術開発機構報告書, TM0938, 1991.
- [27] 小林重信, 中村孝太郎, "新しい問題解決方式としての実用化が期待される事例ベース推論", 日経AI 別冊, 1991 春号, pp40-49, 1991.
- [28] 小林重信, "事例ベース推論の現状と展望", 人工知能学会誌, Vol.7, No.4, pp559-565, 1992.
- [29] Risebeck C K, Scanh R C, "Inside Case-based Reasoning", Lawrence Erlbaum Associates, 1989.
- [30] 半田剣一, 松原仁, 石崎俊, "学習におけるアナロジー", 人工知能学会誌, Vol.2, No.1, pp44-51, 1987.
- [31] 松原仁, "推論技術の観点からみた事例に基づく推論", 人工知能学会誌, Vol.7, No.4, pp567-575, 1992.
- [32] Holland J H, et al, "Induction", MIT Press, 1986.
- [33] Carbinell J G, "Learning by analogy: formulation and generating plans from past experience", Machine learning:an artificial intelligence approach II, Tioga, pp137-161, 1983.
- [34] Carbinell J G, "Derivational analogy: a theory of reconstructive program solving and expertise acquisition", Machine learning:an artificial intelligence approach II, Morgan Kaufmann, pp371-392, 1986.

- [35] 跡見真児, 東条敏, "定性推論による物理解モデルの研究", 人工知能学会人工知能基礎研究会資料, Vol.32, pp109-114, 1998.
- [36] 西田豊明, "定性推論とその応用", シミュレーション, Vol.7, No.2, pp73-82, 1988.
- [37] Toyoaki Nishida, "Qualitative Reasoning for Automated Exploration for Chaos", Proceedings of the 20th National Conference on AI, AAAI94, pp1211-1216, 1994.
- [38] Benjamin Kuipers, "Qualitative Simulation", Artificial Intelligence, Vol.28, pp289-388, 1986.
- [39] 溝口文雄, 新谷虎松, 沼尾正行, 畝見達夫, "ソフトウェア研究の将来を見つめた EAGL プロジェクト主要分野の将来展望 AI", ソフトウェア研究の将来を見つめた EAGL プロジェクト産学の熱きコミュニケーション7年のあゆみ EAGL 総括報告書第二部展望編平成10年", 1998
- [40] D.H.Fisher, editor, "Machine Learning", Proc. the Fourteenth Inte'l Conference, Morgan Kaufmann, 1997
- [41] G.G.T.well and J.W.Shavlik, "Refining symbolic knowledge using neural networks.", Machine Learning, Vol.4, pp405-429, 1994.
- [42] R. Setiono and H. Liu. Neurolinear, "A system for extracting oblique decisionrules from neural networks.", Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol.1224, pp221-233, 1997.
- [43] H.Tsukimoto, "Extracting propositions from trained neural networks", Proc. IJCAI 97, Morgan Kaufmann, pp1098-1105, 1997
- [44] N.Lavrac and S.Dzeroski, editors, "Inductive Logic Programming", Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol.1297, Springer Verlag, 1997.
- [45] Xiolonlg Zhang and Masayuki Numao, "Learning and revising theories in noisy domains", Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol.1316, pp339-351, 1997.
- [46] B.Kijsirikul, M.Numa, "Discrimination-based constructive induction of logic programs", In AAAI 92, pp44-48, 1992.
- [47] 古川康一, "帰納論理プログラミングーチュートリアル", 人工知能学会誌, Vol.12, No.5, pp655-664, 1997.
- [48] R. kohavi and C. Kunz, "Option decision trees with majority votes", In Proc.ML97, Morgan Kaufmann, pp161-169, 1997.
- [49] 溝口文雄, "帰納論理プログラミングの適用方法について", 人工知能学会誌, Vol.12, No.5, pp675-682, 1997.
- [50] R. S. Michalski and G. Tecuci, editors, "Machine Learning: A Multistategy Approach Vol.IV", Morgan Kaufmann, San Ffancisco, CA, 1994.
- [51] 辻三郎, "感性情報処理の情報学・心理学的研究", 平成4年度~6年度文部省科学研究費補助金(重点領域研究) 研究成果報告書(課題番号222), 1995.
- [52] 石塚満, "計算的知性と計算的感性", 情報処理学会第100回人工知能研究会, pp57-62, 1995.

- [53] M.Numao, M.kobayashi, and K.Sakaniwa, "Acquisition human feelings in music arrangement", Proc. IJCAI 97, Morgan Kaufmann, pp268-273, 1997
- [54] 大谷紀子, 河辺真吾, 沼尾正行, "複数の情報媒体を用いた学習の過程—プログラミング言語 prolog を題材として", 認知科学, Vol.2, No.1, pp72-85, 1995.
- [55] 岡夏樹, 寺野隆雄, 沼尾正行, 中川裕志, 平原誠, 森反則, 吉村宏之, "多戦略学習と創発計算による情報統合", 人工知能学会全国大会(第10回) 論文集, pp67-70, 1996.
- [56] 沼尾正行, 秋元俊昭, "異種メディア対の予測方法及びその装置", 特願 2931090017, 1997
- [57] <http://www.crt.atr.co.jp>
- [58] 辻井潤一, "視点の変換—言語の理論から設計の理論へ", 人工知能学会誌, Vol.11, No.4, pp530-541, 1996.
- [59] Gordon, T. F, "Computational Dialectics,", Computer as Assistants—New Generation of Support Systems, Lawrence Erlbaum Associates, pp186-203, 1996.
- [60] Nirenburg, S. and Carbonell, J., et al, "Machine Translation : A Knowledge Based Approach", Morgan Kaufmann, San Mateo, 1992.
- [61] Alshawi, H, et al, "1991. ET-6 Final Report", CEC, DG, XIII, Luxemburg, 1991.
- [62] Jensen. K, et al, "Natural Language Processing", The PLNLP Approach, Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [63] Alshawi, H, "The Core Language Engine", MIT Press, 1992.
- [64] Fukumoto, F. and Tsujii, J, "Automatic Recognition of Verbal Polysemy", Proc.15th Coling, pp762-768, 1994.
- [65] Fukumoto, F. and Tsujii, J, "Automatic Recognition of Verbal Polysemy", J. Information Processing Society of Japan, Vol. 37, No. 8, 1996.
- [66] Hindle. D, and Rooth. M, "Structural Ambiguity and Lexical Relations", Computational Linguistics, Vol.19, No.1, pp103-120, 1993.
- [67] Quillian. R, "Word Concepts : A Theory and Simulation of Some Basic Semantic Capabilities.", Behavioral Science, Vol.12, pp410-430, 1967.
- [68] 宇津呂武仁, 松本裕治, "コーパスを用いた言語知識の獲得", 人工知能学会誌, Vol.10, No.2, pp197-204, 1995.
- [69] Manning. C. D, "Automatic Acquisition of a Large Subcategorization Dictionary from Corpora", Proc. 31st ACL , pp235-242, 1993.
- [70] Ushioda. A, and Evans. D. A, et al, "The Automatic Acquisition of Frequencies of Verbcategorization Frames from Tagged Corpora", Proc. Workshop on Acquisition of Lexical Knowledge from Text, pp95-106, 1993.
- [71] Pinker. S, "Learnability and Cognition", MIT Press , 1991.
- [72] Tsujii. J and Ananiadou. S, et al, "Linguistic Knowledge Acquisition from Corpora", Proc. FGSLP, Manchester, pp61-81, 1992.
- [73] Tsujii. J and Ananiadou. S, "Epsilon : The Tool Kit for Knowledge Acquisition based on a Hierarchy of Pseudo-Texts", Proc. NLPRS 93, Fukuoka, 1993.

- [74] Kaji. H, and Kida. Y, et al, "Learning Translation Templates from Bilingual Text", Proc. 14th Coling, pp672-678, 1992.
- [75] Ananiadou. S, and McNaught. J, "Term are not alone", J. Aslib Proc., Vol.47, No2., pp47-60, 1995.
- [76] Pustejovsky, J., et al, "Lexical Semantic Techniques for Corpus Analysis", Computational Linguistics, Vol. 19, No. 2, pp331-358, 1993.
- [77] Frantzi. K, and Ananiadou. S, "Extracting Nested Collocations", Proc. Coling96, 1996.
- [78] Kiyono. M and Tsujii. J, "Hypothesis Selection in Grammar Aquisition", Proc. Coling 94, pp837-841, 1994.
- [79] Horiguchi. K, Torisawa. K, and Tsujii. J, "Automatic Acquisition of Content Words using an HPSG based Parser", NLPRS 95, 1995.
- [80] Torisawa. K and Tsujii. J, "Off-line Raising, Dependency Analysis and Partial Unification", Workshop on HPSG, 1996.
- [81] Torisawa. K and Tsujii. J, "Computing Phrasal Signs in HPSG prior to Parsing", Proc. Coling, 1996.
- [82] Fodor. J.A, "The Modularity of Mind : An Essay on Faculty Psychology", MIT Press, 1983.
- [83] 石田亨, "エージェントを考える", 人工知能学会誌, Vol.10, No.5, pp663-667, 1995.
- [84] Minsky, M, "The Society of Mind", Simon and Schuster, 1987
- [85] Telescript Technology, "The Foundation for the Electronic Marketplace", General Magic White Paper, 1994
- [86] Shoham Y, "Agent-Oriented Programming", Artificial Intelligent, Vol.60, No.1, pp51-92, 1993.
- [87] 金淵培, "エージェント技術の現状と実用化", 人工知能学会誌, Vol.12, No.6, pp850-860, 1997.
- [88] <http://fipa.comtec.co.jp/fipa/>
- [89] 馬場則夫, 小島史男, 小澤誠一, "ニューロネットの基礎と応用", 共立出版, 1994.
- [90] 船橋, "ニューロコンピューティング入門", オーム社, 1992.
- [91] W.S. McCulloch and W.H. Pitts, "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity", Bull. Math. Biophys, Vol. 5, pp155-133, 1943.
- [92] 中野他, "ニューロコンピューティング入門", コロナ社, 1990.
- [93] 西川, "ニューロコンピューティングについて", システム制御情報学会第 32 回大会予稿集, チュートリアルセッション, pp9-16, 1988.
- [94] 中野他, "入門と実習ニューロコンピュータ", 技術評論社, 1989
- [95] R.A. Jacobs, "Increased rates of convergence through learning rate adaptation", Neural Networks, Vol.1, pp295-307, 1988.
- [96] 石川真澄, "忘却を用いたコネクショニストモデルの構造学習アルゴリズム", 人工知能学会誌, Vol.5, No.5, pp595-603, 1990.

- [97] T. Kohonen, "The Neural phonetic typewriter", IEEE computer, Vol.21, No.3, pp11-22, 1988.
- [98] 塚原(編), "脳の情報処理", 朝倉書店, 1984
- [99] T. Kohonen, G.Barna, and R.Chrisley, "Statical pattern recognition with neural networks: benchmarking studies", Proc. ICNN, Vol.I, pp61-68, 1988
- [100] E. McDermott, "LVQ3 for phoneme recognitin", ASJ, Spring Conf, pp151-152, 1990.
- [101] 喜多一, "工学の立場から見た創発システム", 計測と制御, Vol.35, No.7, pp532-535, 1996.
- [102] R. Dawkins, "The Blind Watchermaker", Norton, 1986.
- [103] R. Dawkins, "Evolution of Evolvability", Airtificail Life, pp201-220, 1989.
- [104] K. Sims, "Airtificial Evolution for Computer Graphics", Computer Graphics , Vol.25, No.4, pp319-328, 1991.
- [105] K. Sims, "Airtificial Evolution of Dynamical Systems", Toward a Practice of Autonomus Systems, Proc. 1st ECAL, pp171-178, 1992.
- [106] 畝見達夫, "人工生命が作ったアートの世界", 人工生命の近未来, 時事通信社, 1994.
- [107] 玉置久, "遺伝的アルゴリズムと多目的最適化", 北野(編), 遺伝的アルゴリズム 2, 産業図書, 1995.
- [108] R. Axelrod, "The Evolition of Cooperation", Basic Book Inc, 1987.
- [109] W.D.Hillis, "Co-evolving Parasites Improve Simulates Evolition as an Optimization Procedure", Phisica D, Vol.42, pp228-234, 1990.
- [110] K. Sims, "Evolving 3D Morphology and Behavior by Competition", Airtificial Life, IV, pp28-39, 1994.
- [111] Brooks. R(ed.), "Aritificial Life", IV, MIT Press, 1994
- [112] 田中雅博, "遺伝的アルゴリズム", Computer Today, No.81, pp40-49, 1997.
- [113] 石塚満, "特集「高次人工知能へのパラダイム」について", 人工知能学会誌, Vol.2, No.1, pp4-5, 1987.
- [114] 石塚満, "不完全な知識の操作による次世代知識ベース・システムへのアプローチ", 人工知能学会誌, Vol.3, No.5, pp552-562, 1988.
- [115] 石田好輝, "免疫型並列分散モデルによるプラントのセンサ自律診断", システム制御情報学会論文誌, Vol 7, No.1, pp1-8, 1994.
- [116] Yoshiteru Ishida, "The Immune System as a Self-Identification Process: a survey and a proposal" International Workshop on the Immunity-Based Systems 1996 (IMBS'96), 1996.
- [117] 松尾豊、二田丈之、石塚満, "SL 法：線形・非線形計画法の併用によるコストに基づく仮説推論の準最適解計算", 人工知能学会誌, Vol.13, No.6, pp953-961, 1998.
- [118] 鷲尾隆他, "原子力プラント知的診断における多様性評価基準", 日本原子力学会誌, Vol.37, No.12, pp1128-1136, 1995.

- [119] 古田一雄他, "プラント運転操作訓練支援システムのための学習者モデル構築手法", 人工知能学会誌, Vol.13, No.5, pp811-821, 1998.
- [120] Newell, A. and Simon, H.A., "Human Problem Solving", Prentice Hall, 1972
- [121] Wenger, E., "Artificial Intelligence and Tutoring System", Morgan Kaufmann, 1987
- [122] 大和田勇夫他, "定性的シミュレーションの基づく診断システムの構築方法", 人工知能学会誌, Vol.3, No.5, pp617-626, 1988.
- [123] 山口高平他, "対象モデルと故障モデルに基づく知識コンパイラ II の構築と評価", 人工知能学会誌, Vol.7, No.4, pp663-674, 1985.
- [124] 藤岡亮介, 小西正躬, "ニューラルネットによる操業知識のモデル化とプロセス診断への応用", 第7回インテリジェント・システム・シンポジウム, pp111-114, 1997.
- [125] 斎藤貴光他, "ペトリネットによる原子力プラントの離散事象モデル", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.19, No.471, pp17-22, 1996.
- [126] 高橋信他, "大規模システム事故事例データベースからの知識獲得法に関する検討", システム・情報合同シンポジウム講演論文集, pp227-232, 1997.
- [127] "原子力発電所運転管理年表", 社会法人火力原子力発電技術協会, 1989-96
- [128] 富岡英俊, "連続およびバッチプラントにおける AI による運転支援事例", 化学工学, Vol.62, No.2, pp77-79, 1998
- [129] 星哲夫, "エージェントによる次世代生産システムの課題と展望", 第9回合同研究会"AIシンポジウム'98", pp5-10, 1998
- [130] 黒谷憲一, "AI・アドバンス制御の技術動向と富士電機の取り組み", 富士時報, Vol.71, No.3, pp149-152, 1998
- [131] 渡辺博芳, 奥田健三, 山崎勝弘, "電力系統事故時復旧支援における事例ベースの洗練化", 電気学会論文誌, B, Vol.116, No.8, pp939-946, 1996.
- [132] 左野利史他, "知的訓練システム Smart Trainer のおける訓練タスクオートロジー～訓練課題の構成とその動的制御～", 人工知能学会全国大会, pp540-543, 1997.
- [133] 松田聖他, "機械学習を用いた変電所機器構成設計システム", 情報処理学会研究報告人工知能 93-14, pp103-110, 1994.
- [134] 吉田哲也他, "強化学習を利用したマルチエージェントの制御", 人工知能学会人工知能基礎論研究会資料, pp68-73, 1997.
- [135] 神谷昭基, "強化学習を用いた発電プラント起動スケジューリング", 人工知能学会誌, Vol.12, No.6, pp837-844, 1997.
- [136] 神谷昭基他, "強制操作とタブ戦略を導入した進化型計算による発電プラント起動スケジューリング", 人工知能学会誌, Vol.12, No.1, pp100-110, 1997.
- [137] 木村元他, "部分観測マルコフ決定過程下での強化学習: 確率傾斜法による接近", 人工知能学会誌, Vol.11, No.5, pp761-768, 1996.
- [138] 神谷昭基他, "適応的探索による火力発電プラント起動スケジューリング", 電学論(C), Vol.117-C, No.7, pp829-836, 1997.

- [139] kamiya A, et al, "Power Plant Start-up Scheduling:A Reinforcement Learning Approach Combined with Evolutionary Computation", J. Intelligence and Fuzzy Systems.
- [140] 大和淳司, "インテリジェントルーム", 技術と経済, 12月号, pp32-35, 1996.
- [141] 総合研究開発機構, "エレクトロニクスの発展過程に関する分析", NRC-80-14, 総合研究開発機構報告書(1983)
- [142] 総合研究開発機構, "技術開発において企業がかかえる諸問題", NRC-80-14, 総合研究開発機構報告書(1978)
- [143] 日本科学技術振興財団, "産業技術の発展と社会的受容方策に関する調査研究昭和 63 年度", 日本科学技術振興財団報告書(1989)
- [144] 森田昌夫, 吉井博明, 小林弘忠, 佐久川日菜子, 福原綾子, "高精細度映像技術の社会的受容に関する調査研究", 62-00-01 未来工学研究所報告書(1987)
- [145] 財) 日本科学技術振興財団, "技術開発に対する社会的反応に関する調査", 日本科学技術振興財団報告書(1977)
- [146] 隅田幸生, "原子力 PA に関する私見", 日本原子力学会誌, VOL. 39, NO. 6 PAGE. 448 - 450 (1997)
- [147] 阿部道子, "未来を拓く放射線教育 PA による社会教育", 保健物理, VOL. 31, NO. 1 PAGE. 16 - 23 (1996)
- [148] 石渡尚夫, "原子力発電所の見学による PA 効果について原子力発電所見学会アンケート集計結果より", FAPIG, NO. 142 PAGE. 7 - 12 (1996)
- [149] 第一原子力産業グループ, "FAPIG における原子力 PA 活動について原子力発電所見学会における PA 観点よりの成果", FAPIG, NO. 133 PAGE. 67 - 71 1993
- [150] 荒木由季子, "原子力広報と原子力 PA", 日本原子力学会誌, VOL. 34, NO. 11 PAGE. 1055 - 1058 1992
- [151] 大西輝明, "人々の態度変容に関するセルオートマトンシミュレーション: 原子力 PA 問題への適用", シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス発表論文集, VOL. 11th PAGE. 161 - 164 (1992)
- [152] 関義辰, "原子力 PA への一考察プルトニウム騒動", 核物質管理学会年次大会論文集, VOL. 14th PAGE. 163 - 168 (1993)
- [153] 関義辰, "原子力 PA への一考察(放射線嫌い, 原子力いまいちにどう対応するか)", 核物質管理学会年次大会論文集, VOL. 15th PAGE. 119 - 125 (1994)
- [154] 関義辰, "原子力 PA への一考察(集団無意識と個人自意識)", 核物質管理学会年次大会論文集, VOL. 16th PAGE. 176 - 182 (1995)
- [155] 関義辰, "原子力 PA への一考察オニ漫画はどうか", 核物質管理学会日本支部年次大会論文集, VOL. 18th PAGE. 68 - 70 (1997)
- [156] 安部浩平, "原子力 PA(パブリック・アクセプタンス)の展開に想う", エネルギー, VOL. 21, NO. 10 PAGE. 56 - 57 (1988)
- [157] 経済協力開発機構, "原子力発電と世論 I 原子力発電のパブリック・アクセプタンスに関する国家政策および諸活動", 原子力資料, NO. 169 PAGE. 1 - 44 (1985)

- [158] 経済協力開発機構, "原子力発電と世論 II 原子力発電のパブリック・アクセプタンスに関する国家政策および諸活動", 原子力資料, NO.170 PAGE.1 - 42 (1985)
- [159] 戸谷亨, "植物のバイオセイフティバイオテクノロジーのパブリックアクセプタンスの促進について", 月刊組織培養, VOL.21, NO.9 PAGE.310 - 313 (1995)
- [160] 守弘栄一, "バイオテクノロジーの現状と展望 [II] バイオと安全・PA", 食品工業, VOL.37, NO.22 PAGE.55 - 56, 57 - 59 (1994)
- [161] 渡部耕司, "バイオテクノロジーの安全性確保の実際", 千代田技報, VOL.14, NO.3 PAGE.87 - 98 1993
- [162] 日本総合研究所, "バイオテクノロジーの環境利用と社会的受容性", Japan Research Review, (1994)
- [163] 服部彰ら, "AVCS の現状と課題", 日本における自動運転について考えるシンポジウム、自動車技術会(1996)