

AI マップ：形式と内容－内容指向人工知能研究の勧め

Form and Content

-- Invitation to Content-Oriented AI Research --

溝口理一郎

Riichiro Mizoguchi

大阪大学産業科学研究所

ISIR, Osaka University

8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567 Japan

1. まえがき

人工知能冬の時代と言われている．確かに人工知能研究の魅力は色褪せつつあるようにも思われる．今は，人工知能という学問分野をその存在意義も含めて考えて，人工知能研究の復権を考える時なのであろう．本稿では，人工知能研究の今後の進むべき方向とその在り方について，これまで知識処理の研究を進めてきた一研究者として意見を述べさせていただく．多少批判めいたことも書かせていただくがお許しいただきたい．

人工知能研究は純粋科学でない．従って，学問的な夢を追いつけるだけでは十分でない．実社会から期待される技術を提供しつつ，そのことを通して科学としての学問の進展を促進するという二つの側面は工学系の学問として成立するために不可欠な車の両輪であるということをまず確認しておきたい．

近年，これまで推論や論理などの形式的な課題を中心として扱ってきた人工知能研究に不足するものを補う意味で，知識の「内容」を研究の対象とする「内容指向人工知能研究」の必要性が高まっている．これは，現実に存在する課題の中で知識処理技術による解決が期待されるものの多くは，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との認識に基づいている．本稿では，理論的な美しさを持つ形式理論の研究に比べて，形式的議論では扱えない「内容」を対象とした研究が軽視されてきた歴史を振り返りつつ，「内容」指向研究の重要性を訴え，人工知能研究の一つの方向を示唆したい．

2. 人工知能研究の分類

これまでの人工知能研究を眺めてみると，形式指向の研究と内容指向の研究という二つの相対する研究を見ることができる．以下にその典型的な例を示す．

形式指向研究：(高階) 述語論理，非単調論理，定理 証明，類推，知識表現，探索，分散人工知能，構文解析，意味論，状況理論，etc，

内容指向研究：知識ベース，常識ベース，知識獲得，知識コンパイル，意味解析，知識共有・再利用，オントロジー，etc.

(1) 形式指向

形式指向の研究は有用性を除く，学問として持つべき全ての性質を兼ね備えており，これまで人工知能研究の本流として精力的に進められてきた．しかし，これまでの先人の努力にも拘わらず，人工知能の理論的研究においてマックスウェルの方程式に匹敵するほどの成果は見つかっていないし，筆者の直感とこれまでの乏しい経験から，今後そのようなものが見つかる可能性は極めて低いように思われる．すなわち，「非常に少ない言葉（概念）で現実を十分な精度を持って記述するモデルは人工知能の研究には存在しない」のである．この意味で，AI は他の分野とは異なり，理論によって解決できる部分が極めて少ないという特殊な性質を持つものと思われる[長尾，1993]．知能の本質は，形式理論で記述できないもやもやした部分にあるように思われる．

実際，形式指向の研究の代表例は，論理（知識表現）と推論の研究であるが，高階論理，様相論理，Yale 一斉射撃問題等に関する研究が具体的な問題の解決に貢献したという話は筆者は聞いたことがない．形式的理論は美しい．そこで扱われる概念は明確に定義され，実に整然としており，その存在価値は疑い様もない．理論の価値は，「分かる」ということに大きく貢献することであろう．しかし，弱い．残念ながら役に立つことが少ないのである．

(2) 内容指向

一方，内容指向研究の典型である知識ベース研究では推論や問題解決の枠組みの中で，そこに実装される「知識」を議論の対象とする．知識の内容を扱う研究はずっと日陰の身であった．その理由は，場当たりのためであり，一般性が低く，学問的な香が乏しくなりがちだからであろう．しかし，toy problem でなく，現実の問題を解こうとすると内容の問題に手を付けざるを得なくなり，そのようなものが大切であることは一部の人間には認識されていた．その代表的な例は「常識」であろう．コンピュータ（エキスパートシステム）は融通がきかない，脆いなどと批判されてきた．その原因の一つはコンピュータが常識を持っていないからだということは全ての人が認識している．しかし，常識推論に関する論文は山のように書かれたが，常識を捕まえて知識ベース化するという試みは Cyc[Lenat, 1994]の開発者である Lenat を除いて誰もしようとはしなかった．常識推論の研究がいくら進歩したとしても，コンピュータが常識を持つ日は決して来ないことは自明であるのにである．

また、知識ベース技術の将来は単に与えられた問題の解決だけではなく、問題解決を前提にしつつ、人間の英知、知恵の集積媒体／手段、即ち Knowledge medium（知識メディア）として進化することが期待されている。そのことを初めて指摘したのは M.Stefik であるが、私もこの考えの重要性を以前から指摘してきた[Stefik, 1986][溝口, 1988a]。そのためには知識とは何かという内容指向研究における本質的な問に答える努力が必要となる。

このように明確な性格の違いを持つ二つの研究課題であるが、それを反映して研究者の考え方も大きく異なる。両者の歩み寄りを期待することは容易ではないが、真剣に考えておかなければならない課題であることは間違いない。少なくとも言えることは、これまで実社会に貢献してきたエキスパートシステムは内容指向研究からの貢献が極めて大きかったことである。それにも拘わらず、これまで形式指向の研究の重要性が基礎研究の推進という名の下に盛んに主張され続けて来た。このことは再考する価値がある。即ち、内容指向の研究の重要性を正しく評価して内容指向の研究にも基礎研究はあることを認識し、人工知能研究全体の中での位置づけを明確にしなければならない。

形式指向研究者は閉じられた世界における理論の美しさに陶醉して現実から逃避してはならない。理論が圧倒的な支配力を持つ物理学ですら実験物理学があることを忘れてはならない。また内容指向研究者は泥臭い仕事に埋もれて一般性を見失ってはならない。理論のような研究成果の蓄積ができるような方法論の確立が望まれる。内容を扱うと避けられない量の問題を恐れてはいけない。量の問題に立ち向かう勇気が必要である。スケーラビリティを高める研究をすれば良いのである。量の問題は逃げていたら時間と共に蓄積すべき情報が増え、ますます難しい問題となってしまう。

3．視点／論点

ここでは、人工知能研究の将来を考える上で筆者が重要と考える視点について論じる。

3．1 学問の健全性

果たして人工知能は健全な学問であろうか？設定した目標に着実に近づく方法論（手段）を人工知能研究は持っているのだろうか？

私がわざわざ指摘するまでもなく、新しい学問が生まれるときには、新しいゴール（問題）が生まれ、それを解決するための努力がなされ始める。やがてその問題に適した方法論が提案され、それが高度で複雑であればあるほど、その方法論や手法自身の進展がゴールの達成に貢献するという期待の下に、方法論の発展を目指した研究が盛んになる。そして学問が健全であるためには、その方法論の進歩が着実に当初のゴールの達成に貢献することが実感できなければならない。しかし、残念ながらそのよ

うな健全さに欠ける学問もありうる。即ち、方法論自体の研究が一人歩きを始め、それがゴールの達成に貢献するかどうかの保証がない場合でも、その研究が面白い限りはどこまでも研究が続けられるのである。

高すぎるゴールは研究を健全に進めることに貢献しない。不健全さは様々な問題を引き起こす原因となる。筆者には「人工知能」を作るなどというだけそれたことを言わない方がいいように思われる。「人工知能」は遠すぎる目標であることを明言してはどうだろう。その認識を共有し、そこから始まる健全な研究に期待したい。「ある制限された問題に対して知的に振る舞うシステムを作るための理論と技術に関する研究」で十分ではないだろうか。

学術活動の活性化にはエネルギーが必要である。その最大の原動力は研究の面白さにある。しかし、それだけでは不十分である。学術活動に対する周囲からの要求に応えることも同じように必要である。学問には、宇宙物理学のように「分かる」事だけで人類の知的好奇心が満たされ、それが「何の役に立つのか？」という質問に答える必要がない学問と、その質問を無視することができない学問があり、人工知能研究は残念ながら後者に属するのである。

形式指向の研究が内容指向の研究より好まれる理由の一つに評価の問題がある。評価の問題は学問に必要不可欠なものであるが、評価が容易な研究を選び、評価が困難な研究対象を避けるのは良くないことである。人工知能には評価が難しい研究課題が山積みなのである。概念を厳密に定義できないままに用いなければいけない問題が多いことも特徴である。典型的な例が「知識」である。「知識」とは何か？ という問に答えられるときは、それはある意味で人工知能の研究が終了することにも匹敵するほどの成果が得られた時であろう。厳密な定義を持つ概念とそれらの間の厳密に定義された関係や操作に関する形式的な議論を進めることは、確かに堅実であり、評価が容易であることから学問としての形態を取りやすい。しかし、形式化のために余りにも多くのものを失っているとしたら、学問として成立しても工学としては意味がなくなってしまう。評価が難しい課題の中に極めて重要なものが多いことが人工知能研究の特殊性の一つであることを認識すべきである。

3.2 記号処理は終わった？

「記号処理に基づく（古典的）人工知能の終焉」などと主張することの必要性が筆者には理解できない。そういうセンセーショナルな発言は控えるべきであろう。いやしくも研究者たるものは、いたずらに時流に流されることなく、必要な物ははっきりと必要であると主張する勇気を持たねばならない。記号処理に基づく人工知能が必要でなくなるなどということをまじめに考える研究者はいないはずである。その重要性は疑いようもない。ただ、それだけで人工知能がつくれると思うところに問題があるだけなのである。

人工生命も北野の人工知能革命[北野, 1993]も非常に興味深いものである。しかし,「古典的」人工知能と同様,極めて高い目標を設定しており,人々を魅惑する力を持つが,ゴールに到達する可能性の低い研究であり,上で述べた健全さに欠けるといふ点では,人工知能と同様の大きな問題を持っていると思われる。「古典的人工知能」が辿った道と同じ道を辿らないように細心の注意が必要であろう。

3.3 現実との交流

人工知能研究が置かれている現実に注意を向ければ,今,実社会の多くの領域において知的システムに関する技術が強く望まれており,人工知能研究者が活躍する場面はいくらでもあることに気づく。IMS (Intelligent Manufacturing Systems), 設計における AI, 教育における AI, メディア統合における AI, 企業統合(Enterprise integration)における AI, 等様々な新しい分野での人工知能技術の展開が期待されている。それに応えることは学会の使命でもある。

「応用」を軽んじないようにしよう。工学は役に立たなければ意味がない。基礎研究の重要性が強調されすぎたのではないと思われる。基礎研究ただ乗り論の裏返しで,応用を軽視する傾向が一段と強くなったことは憂慮すべきことである。現実の世界から切り離された工学は存在しえない。現実には研究課題の宝庫であり,現実との交流から学問は進歩するものである。

しかし,応用人工知能という言葉があるが,これは筆者は嫌いな言葉である。人工知能における研究の正しい状況を表現していない。知識工学は応用人工知能の一つの領域として位置づけられている。しかし,筆者は知識工学に関する研究において,現時点までに得られた人工知能理論の成果の恩恵に浴したことはほとんどないといっても過言ではない。「応用」できるような理論はなかった。

確かにエキスパートシステムはプロダクションルールやフレームのお世話になった。しかし,それは新しいアルゴリズムの開発のためにアルゴリズム記述言語を提供したほどの効果しかなく,新しいアルゴリズムの設計への貢献度は決して大きくはない。エキスパートシステムの成功への最大の貢献は,理論から決別して現実を直視して地道に知識ベースを構築することを目標に設定したことである。プロダクションルールで専門知識を記述すると一口で言っても,実際には専門家を含む種々の知識源から知識を抽出し,ルールの形式に整理する作業は膨大なものであり,この肝心の,しかも最も手間がかかる部分を支援する技術は既存の人工知能には何もなかった。

知識工学は応用人工知能ではない。過去の人工知能基礎技術の具体的な問題への応用ではなく,専門家を初めとする様々な知識源に潜む知識を抽出し,整理し,再利用可能性を考慮して組織化し,Operational な知識ベースにまでもって来るまでに必要な全ての過程を研究の対象とする新しい学問なのである。

3.4 真理は中庸にある

「古典的」人工知能の研究者は、「記号主義の限界を指摘された」などと言ってショックを受けてはいけない。記号主義の人工知能は決して死んではないし、その重要さは微塵も失われていない。人工知能研究の初期の頃に予想していたよりは、記号主義が通用する範囲が狭かったということは正しい。しかし、それにとって替わるものは現在には存在していないし、今後も現われないであろう。

言うまでもなく、記号だけで人間の全ての知的行動を真似ることはできないし、ニューラルネットワークだけでも全てではできない。記号処理が不得意な問題をニューラルネットワークを使えば簡単にできるからと言って、記号処理におき替わるような印象を与えることは学問の進歩にとっては不健全なのである。

記号かニューラルネットワークかという二者択一的な議論は筆者は好まない。アメリカを中心とする西欧的発想なのであるが、それに惑わされてはいけない。例えば、CAI の分野でも同様に、ほとんど無意味とも思える議論が長年繰り返されてきた。教育支援システムのパラダイム論争である。環境型 CAI、ドリル型 CAI、(教え込み型) ITS、マルチメディア CAI など実に多くの型のシステムが提案されては、それぞれの提案者が他のシステムにおき変わるべきすばらしさを持っていると主張する。実は、ほとんど全てのパラダイムは、対象とする学習者のレベルと学習のフェイズ、そして教育の目的を明確にすれば何ら抵触しない、それぞれが意味のあるパラダイムなのである。一言で言えば、教育のゴールを決めさえすれば自らそれに適したパラダイムは決まり、ゴールに応じて各々のパラダイムの棲分けが可能なのである。ただ、教育というものは極めて多様なものであるので、一つのパラダイムだけでは統一的には扱えないという特殊性を持っている。このことはおそらく全ての人が分かっているにも拘わらず、不毛な議論が繰り返される。

筆者は真理は中庸にあると考えている。何か新しい提案をする時には、過去のもの全てを否定して作り直すようなことが多いが、筆者は好まない。記号処理とニューラルネットワークそれぞれには得意な問題があり、相補的な関係にある。それ以上でも以下でもない。

3.5 パラダイムシフト

これまでの情報処理の研究では、コンピュータによる高度な処理と人間とコンピュータとのインタフェースとの2つに分離されて研究が行なわれてきた。もちろん、いずれにおいても著しい進歩はあったが、二つが分離されていることが現在の情報処理研究の行き詰まりの原因の一つになっているとも考えられる。それは過度の自動化の追及とインタフェースの重要性の過度の強調という現象に現われている。両者は独立に研究するのではなく、人間を系の中に取り込んで処理とインタフェースを融合した一つの系として考えるという新しいパラダイムが必要になってきている。通産省の先

導技術調査研究「ヒューマンメディア」プロジェクトでは人間とコンピュータを同じ一つのエージェントという情報スペースの一構成員として扱い、「ヒューマンメディア＝人間指向，情報指向，内容指向の概念に立脚する新しい統合メディア」の概念の確立を目指している[VLKB, 1995]．その背景には，これまでの研究がコンピュータ指向，処理指向，かつ入れ物（形式）指向に重点が置かれ過ぎていたことへの反省がある．人間指向，情報指向[Nishida, 1993]，内容指向の考えは，高度情報処理の今後の発展を支える基本思想と位置づけられるのではないだろうか．

3.6 エージェント指向

最近のエージェント指向という言葉の氾濫ぶりは目を覆うばかりである．不用意に使っている方々には，強く反省を促したい．人工知能におけるエージェント指向研究は遠い将来を見た思想的な提案である．筆者が理解しているその中心的な思想は，

- (1)（半）永続的に存在する自律的なソフトウェアであって，自己の経験の増加を含む環境の変化に適応していくことができる．
- (2) 従来のソフトウェア（モジュール）程の明確な機能定義を与えられておらず，状況に応じて適切な機能を発揮することができる．
- (3) 他のエージェントとの通信によって協調的に行動し，全体として調和の取れた組織を形成することができ，個々のエージェントでは解くことができない大きな問題を解くことができる．

の3つにあると考えている．立派な思想であり，筆者も興味がそそられる大変面白い課題である．しかし，これは人工知能の別の側面，即ち人間の知能の社会的，あるいはマクロ的な側面を強調した思想であり，人工知能の実現に匹敵する困難なゴールである．実現には多くの年月を要する高邁な目標であり，そのために必要な技術はほとんどわかっていないのが現状であろう．

同じような現象はエキスパートシステムにも多く見られた．とてもエキスパートシステムとは言えないようなものが，当時の流行語であった「エキスパートシステム」の美名のもとに盛んに提案されていた．しかし，誤解を恐れずに言えば，エキスパートシステムにはプロダクションシステムという他の技術とは異なる明確な技術があった．人工知能の分野で議論されているエージェント指向にはエキスパートシステム，あるいは近い関係にあるオブジェクト指向に見られるような明確な技術が提示できているとは思われない．そのような技術が現われるまでは，単なるモジュール構造と呼んで差しつかえないものを「エージェント指向に基づいて構築された」と表現することは慎んだほうが賢明であろう．とくに，「従来法では構築が困難であったシステムがエージェントを使って構築できた」という主張は厳に慎むべきであろう．それができればエージェント指向の研究はほとんど終わったようなものであるから．

3.7 保守化の勧め

全然できそうにないことを目標にすることは終りにしようと言った．同時にすぐに答えが出るものばかりを追うのも止めよう．高い目標を持つ新しい課題は華々しくて，しかも一般に初めは易しい問題がたくさんあるので進歩が目に見えて，元気もであるが，少し研究が進むと難しい問題が残っていることになって，研究は停滞気味になる．そこで新しい課題が提案されるとそちらに移りたくなることは理解できる．しかし，軽々しく流行を追うのは止めよう．一つの目標で少し行き詰まると新しい目標を求めてさまよい，アメリカで流行っている次の夢を見に急ぐ，というパターンから早く脱却したい．行き詰まればそれを打破する意気込みを持った若い研究者の参加があちてもいいはずである．エキスパートシステム，ニューロ，ファジー，感性，マルチメディア．．．一つのテーマが終らないうちに，次の新しいテーマを捻出すというのは好ましくない．「新しいテーマを食い散らかしている」ような研究のやり方には大きな抵抗を感じる．

魅力的ではあるが極めて高い目標を設定して一般大衆を味方につけ，ブームを作っ
て元気を付けるという手法はそろそろ終りにできないものであろうか．そのような方法ではなく，着実に進歩を見ることが出来る課題を設定しても，その価値を多くの人が見いだせるような時代に現在はあるのではなかろうか？ブーム作りも度を越すと人工知能研究全体が社会からの信用を失いかねない．もう少し保守的にならうではないか．

4. 内容指向人工知能研究

さて，これまで内容指向の研究の重要性を主張しつつ，人工知能研究全体の在り方に関する私見を述べてきた．本節では，内容指向の研究の具体的なイメージを明らかにするために，筆者が研究協力者と共にこれまで進めてきた研究とその背景を述べた後，諸外国で行なわれている内容指向の研究を紹介し，最後に現在育ちつつある研究の芽といえるものについて述べる．

4.1 筆者の経験

1) 深い知識と知識コンパイラ(注)((注)この研究は現在静岡大学工学部の山口高平助教授の貢献が大きい.)

経験則(浅い知識)に基づくエキスパートシステムの様々な欠点を克服するために新しい知識の在り方が考察され，その結果得られたのが深い知識である．筆者等は深い知識を浅い知識の正当性を説明するときに必要な知識として定義し，対象のモデルと領域の原理的知識をタスクに独立に組織化した．更に診断タスクを対象として，これら2種類の知識に加えて3種類の知識(解釈知識，制御知識，故障メカニズム知識)を同定し，それらを用いた診断方式と浅い知識の生成(知識コンパイル)方式を確

立した．深い知識に基づくエキスパートシステムは問題を深く理解しているため，浅い知識に基づくシステムに比べて高いタスク実行能力を持っている．深い知識の効用はシステムの性能だけではなく，専門家からの知識獲得というもっとも困難なフェーズの負担を軽減すると共に，知識の再利用性が高く，知識ベース構築の方法論としても優れている[山口，1987][山口，1992]．

深い知識自体の考えは筆者等の独創ではないが，その定義と，コンパイルによって浅い知識を生成する方式，及びタスク依存の深い知識の同定等は筆者等のグループの成果であり，知識ベースが蓄積すべき新しい知識の内容に関する明確な指針を与えた．この研究は1983年頃から始められたが，筆者等の内容指向の研究の発想の原点となっている．

2) 対象モデルの構築

深い知識に基づくモデル構築を容易にするためには，再利用性の高い部品ベースの整備と部品合成によるモデル生成方式の検討が必要となる．部品の再利用性を考慮してその振る舞いと機能に関する考察を進めるにつれて，振る舞いと機能に関する理解が不十分であることに気付き，この課題はドメインオントロジーに関わる基本的な研究へと発展した．振る舞いとは何か，機能とは何か，振る舞いと機能の差異はどこにあるのか？扇風機とスクリュー，あるいは電気抵抗と電熱器とは振る舞いは同じであるのに機能は全く異なる．これらの相違を統一的に説明することはできないのか？振る舞いのシミュレーション結果から機能の語彙を用いた説明の生成をするにはどのような知識を用意すればいいのか？これらの疑問に応えながら，筆者等は標準的な部品の振る舞いと機能を記述し，シミュレーションや診断，そして説明生成などの様々なタスクのためのモデル構築に共通に使えて，しかも多様な対象の記述に再利用できる部品の機能モデル記述言語 F B R L を現在開発中である[Sasajima, 1994][Sasajima, 1995]．

3) タスク分析による問題解決エンジンのコンパイル

知識ベースを構築するための知識獲得は大雑把にはタスク解析とドメイン知識の獲得に分れるが，筆者等はタスク解析システム MULTIS に関する研究を1987年頃からは行なってきた．MULTIS は専門家とのインタビューを通して専門家の問題解決過程のモデルを構築して，タスクの構造を反映した問題解決エンジンを生成する．これらの機能を実現するためには，タスク知識とドメイン知識の分離，専門家の問題解決過程をモデル化するために必要な語彙／概念の体系，即ちタスクオントロジーの設計とそれを用いたタスク分析インタビュー，そして問題解決エンジンの半自動合成の研究，概念レベルからインプリメントレベルまでの連続性を保った知識表現などが重要な課題となる．MULTIS の研究ではこれらの課題を一貫して追及してきた．タスクオントロジー

の例としてはスケジューリングタスクを取り上げ、動詞（割り付ける、選択する等）、名詞（スケジュールの資源、スケジュールの受け手、納期等）、形容詞（未割付の、暫定的な等）、タスク固有概念（ゴール、制約語彙等）の下に組織化を行なうと共に、自作のオントロジー記述言語で厳密に記述した。スケジューリングエキスパートシステムの開発経験を持つ複数の知識工学者等による評価を行ない、タスクオントロジーとしての有用性を確認した。タスクオントロジーの概念は筆者らの考案した概念であり、問題解決知識のモデル化を行なうために必要なオントロジーの新たな展開に貢献した[Mizoguchi, 1992] [Tijerino, 1993][テヘリノ, 1993]。

4) 知識再利用とオントロジー

深い知識に関する研究を契機として、新しい知識ベース構築方法論[溝口, 1988b]を構築するという目標の下に問題解決知識の内容に関する考察を進めてきた。とくに注目した観点が知識の再利用である。再利用の観点からの考察は知識ベースの開発効率の向上に貢献し、産業界へ与える影響も大きい。そればかりではなく、知識、とりわけ問題解決に用いられる知識の本質に関する理解を深めることに貢献する。研究を進める際の中心概念がオントロジーであった。知識の再利用には知識の根底に横たわっている世界観の明示的な記述と合意が必要であるからである。哲学のオントロジーは純粋科学としての「存在に関する理論」であるが、筆者等は知識の再利用という具体的な工学上のゴールを設定して、それを達成するためにはどのようなオントロジーがあればいいかを考察した。その結果、極端に一般的な議論になったり発散したりすることを防ぐことができた。その成果の一部が上述のタスクオントロジーであり、振る舞いと機能に関するオントロジーである。

また、現在諸外国で行なわれているオントロジー設計を眺めて、オントロジーを考察する際の視点や立場を整理した。オントロジーに関する理解は我が国ではまだ十分とは言えないが、この研究成果はオントロジーとは何かという基本的な問題を明らかにすると共に、我が国におけるオントロジー研究の先駆けとなったと考えている[Mizoguchi, 1993][Mizoguchi, 1995a] [Mizoguchi, 1995b]。

具体的な問題として変電所運転支援システムを取り上げて、ドメイン固有のオントロジーの開発を通して再利用可能な知識ベースを構築する方法論の開発を行なった。これは MULTIS の方法論を拡張し、一般化したものである。再利用の様々な形態を整理すると共に、設計した方法論に従って、実際に多様な変電所の構造の知識、領域の理論、そしてタスクに依存する知識がそれぞれ適切に再利用可能であることを確認することができた。実際の規模の問題において知識の再利用を確認できたことは例がなく意義深いと考えている。[Takaoka, 1994][高岡, 1995]

知的教育システムにおけるフレームワークと教授知識の分類に関する研究も行なったが紙面の都合で省略する[Ikeda, 1994]。

このように筆者等は一貫して知識の内容に関する研究を続けてきたが、知識を扱うメカニズムの研究も大に行なってきた。メカニズムと内容とは表裏一体の関係にあり、お互いに大きな影響を及ぼすからである。例えば、知識コンパイラにおける定性推論方式[Kitamura, 1994][Kitamura, 1995]、タスク分析におけるインタビューエンジン、知的教育システムにおける非単調帰納推論による学習者モデル構築[池田, 1989][Ikeda, 1993][Kono, 1994]などである。また、知的教育システムを除くほとんどの研究では企業との共同研究を通して実問題を例題として考察を行なうと共に、成果を実問題に適用して feedback を得るという形態を踏襲してきた。研究成果が多少なりともあったとするならば、それは実問題との交流という研究形態の成果であるところが大いと考えている。

4.2 諸外国での例：

ここでは、内容指向の研究が筆者の独断に基づくものではないことを示すために諸外国での活動を少し紹介しよう。問題解決知識のモデル化に関しては、Chandrasekaran の汎化タスクの研究[Chandra, 1986]、ヨーロッパの ESPRIT プロジェクトの KADS[Wielinga, 1992]などで盛んに行なわれてきた。そしてその成果が問題解決知識の理解と取り扱いに関する基盤技術の発達を促進した。また、既に周知のように MCC における CYC プロジェクトでは常識を対象として基本的なオントロジーを整備し、実際に巨大な常識ベースを構築している[Lenat, 1994]。CYC の評価に関しては賛否両論の別れるところであるが、常識とは何かということ、そして大規模知識ベースの構築に関する貢献は多大なものがある。

CYC 以外のところでも、更に基礎的な内容指向の本質とも言えるオントロジーに関する深い論議が行なわれている。最近マスコミを賑わせている EDI (Electronic Data Interchange)は CALS(Compter Asisted Logistic System; Commerce At the Light Speed)や EC (Electronic Commerce)などの一環として行なわれている経済行為に関わる応用的色彩の強いものだと考えている読者が多いことと推察されるが、EDI 関連の活動はもっと深い。例えば、ISO と IEC(the International Electrotechincal Commision)は共同で、「データエレメントの標準化と仕様作成」の委員会 SC14 を構成し、ISO/IEC 11179 と呼ばれる標準化案を作成中である[Hawes, 1994]。この活動は極めて基本的で包括的であり、その影響力は大いと思われる。SC14 の活動は現状の電子データ交換における種々の問題点、例えば

- (1) 地球規模のデータ獲得と交換、特に異分野間での交換を支えるメカニズムがない。
- (2) 標準データ要素を指すユニークな名前がない。
- (3) 完全自動のデータ共有を実現するために必要な、データ要素の記述のドキュメントがない。

(4) 標準データ要素は EDI メッセージの内容となるべきものであるので、それが未確立であると EDI の地球規模での実施が行なわれない。

などの認識に基づいてそれを抜本的に改善することを目的としている。

EI (Enterprise Integration) の動きも活発である。その中でも企業活動のオントロジーを確立する研究が行なわれている。トロント大学の TOVE プロジェクト [Gruninger, 1994], エディンバラ大学 AIAI 研究所の Enterprise プロジェクト [Ushold, 1995] が代表的である。1992 年には Enterprise Integration Modeling の国際会議も開かれている。[Petrie, 1992]。

もう一つの例としては、CCAT (Conceptual Catalog/Ontologies) の動きが注目される [Lehmann, 1994]。近年、データベース一般を対象として、全てのデータベース間のデータ共有を行なうために必要な概念スキーマ記述の統一問題 (Conceptual Schema Modeling Facility: CSMF) が ISO や ANSI で論じられているが、CCAT ではこれらの動きや EDI などを視野に入れた活発な活動が行われている。具体的には、課題ごとにワーキンググループを構成して、核オントロジーとして、抽象代数、離散数学、時間空間、因果関係、部分/全体関係など、その他のオントロジーとして、地理、デジタルシステム、情報システム、Enterprise モデル、通信、感情、定性物理などの基本概念と関係に関する深い議論、筆者の言う内容オントロジー [Mizoguchi, 1993] の議論が行われている。

上述の動きから理解されるように、データや知識の変換 (交換) とその標準化という情報処理の本質的な点に関わる内容指向の研究が急速に進んでいる。日本人には、自ら進んで標準化案を作ろうとしない、そしてアメリカの標準化案にはすぐに乗るという二つの意味で標準化に弱いという欠点があるが、目先の技術に目を奪われていて、このような本質的なところを真剣に議論する場で貢献していないとすれば、由々しき問題であろう。

4.3 新しい芽

今後推進しなければならない内容指向の研究課題はたくさんあるが、紙面の関係でその中の3つを挙げる。

(1) 知識の共有と再利用

既に述べたが、知識再利用の実現は緊急の課題と言える。知識再利用の阻害要因は大きく次の2つに大別される。

1) 知識の表現形式の問題

2) 知識の内容の問題

まず、用いる表現言語が異なることが原因の一つであることは明らかであろう。しかし、異なる言語間のトランスレータが作られたとしても、それは知識の再利用や共

有の困難さの本質的な改善にはなっていない．たとえ表現言語が同じであっても，ある問題のために書かれた知識が別の問題の解決にはそのままでは使えないことが多く，再利用するためには構文レベルより深い，内容に関わるもっと複雑な問題を解決しなければならない．問題解決のタイプ（タスクの種類）や問題解決過程が形成するコンテキスト等の変動，そしてそれらの影響を受けて必要なドメイン知識が変化することなどが原因となって再利用が阻まれているのである．この問題を解決する概念がオントロジーであることは既に述べた通りである．これまで実に多くの知識ベースが構築されてきたが，どれ一つとして既存の知識ベースの上に新しい知識を積み上げることによって作られたものはない．もし，この「積み上げる技術」が存在していれば，今頃はかなり大規模な知識ベースが実現されているはずである．大規模知識ベースへの一つの着実なアプローチは，この知識ベースの「積み上げる技術」を支える知識の共有と再利用技術の開発であり，そのためのオントロジー研究は今後の新しい知識処理研究の基盤研究となろう．

（２）分散・協調システム

分散協調システムでは，協調するには「何を交信すべきか」即ち，交信の内容に踏み込んだ議論が不可欠である．この種の議論は，ドメイン依存性が高くなるにつれて議論の一般性が低下し，理論的色彩が弱まるため注意が必要であるが，極めて重要な課題であるので強力に推進されなければならない．とくに，協調自体をタスクと見なした立場からの深い理解，協調して解くべき問題の類型化，交信すべき内容の類型化，そして交信メッセージのオントロジーの検討などの研究課題は大変興味深いものであり，今後の成果が大いに期待される．

（３）メディア統合

マルチメディアは現在注目の的であるが，単に全てのメディア表現がデジタル化されたということだけでは早晩限界が現われることは明らかである．現在コンピュータが行なっていることは情報圧縮だけと行っても過言ではない．メディア処理の本質は明らかに内容を理解することを通したメディア統合にある．これまで相互の関連を考慮することなく個別に利用されている多種多様なメディア、すなわちテキスト、音声、図、静止画像、動画像等によって表現されている知識を、各種メディア間での変換、要約、統合等を行う基盤技術が開発されなければならない．このためには、「内容」に踏み込んだ研究が不可欠である．上述のヒューマンメディアプロジェクトの研究課題の一つに挙げられているが、「理解によるメディア統合」は緊急の課題であろう．

このように見てくると多くの高度情報処理の本質的な部分で内容指向の研究が必要とされていることが理解される．今こそ，内容指向人工知能研究を推進する時なので

ある．

5．Knowledge Factory 研究の提唱

以上人工知能研究の将来に関わる問題に対する私見を述べてきたが，これまでの考察に基づいて，人工知能を作るなどというだけそれたものでなく，段階的に現実世界に成果を還元しながら研究を進めることができ，遠い将来を見通せる範囲での高い目標を持つ研究として「Knowledge Factory（知識工房）」なる研究を提唱したい．

「Knowledge Factory」はデータ，知識，問題を入力として，新しい知識，大規模知識ベース，再利用可能知識ベース，共有可能知識ベース，オントロジー，問題解決（IA: Intelligence Amplifier）システムなどを生産する．完全自動工場ではなく，人間とコンピュータを含めた複数のエージェント（注）

（（注）エージェント指向で使われるエージェントではなく，単に人間とコンピュータとを一般化した動作主という意味である．ちなみに，筆者が使うエージェントはいつもこの意味である．）

の協調的作業の「場」である．実体としての組織は不可欠ではなく，ネットワーク上で構成される「仮想研究所」であっても良い．多くの経歴を持った人々が時間と空間の制約から開放されて共同できる新しい研究環境の方がむしろ好ましいかも知れない．

最近行なわれた知識処理工学の体系化の作業における体系化の一つの視点として「知識のライフサイクル」に着目した筆者の案が採用されている[大須賀，1995]．それは知識の動的側面に着目したものであり，知識の生成から，組織化，蓄積，（現実の問題への）適用など，実世界の活動によって知識が生まれてから再び実世界へ帰ってくるまでのサイクルを全体として捉え，その各々のフェーズに関連して様々な研究課題が体系化される．この考えは基礎と応用という従来の2分法的考えを捨て去り，「応用」を研究と実世界との接点として捉え，「応用研究」の重要性を高めるとともに，知識処理工学全体が実世界と遊離してしまわないようにしっかりとつなぎ止めておく働きをする．

「Knowledge Factory」はこの知識のライフサイクルの全フェーズをサポートする．そこでは，データからの問題解決知識生成，データベースからの知識獲得，データ要素の標準化とEDI，オントロジーの開発と標準化，各種知識ベースの変換，メディア変換，メディア統合，知識ベースの流通，知識の標準化，などの知識の創成，変換，継承，蓄積，通信などの「知識メディア」[Stefik, 1986][Mizoguchi, 1988a][溝口，1994][西田，1994]に関わる基盤技術の開発とそれに関わる基礎研究を行なう．詳細は紙面の都合で省略するが，現在オントロジー工学序説ともいふべき論文を執筆中であるので，そちらを参照していただきたい．

6. むすび

知能の原理を理論的に探ることは確かに興味深い。しかし、「人間の賢さは所有する知識にある」という Feigenbaum の知識原理は工学の立場から見れば正しい考え方であって、コンピュータが知識の内容を自在に操作できるようにすることも、知能の原理を追及することと等しく重要な研究課題であると思うのである。

本稿では AI マップの主旨に従って言いたい放題のことを言わせていただいた。読み直してみると、かなり直接的な表現を使っているところが気にならなくはないが、それも筆者の個性であると考えて敢えて修正をしないことにした。読者諸氏の率直な御意見をお待ちする次第である。

謝辞：いつも熱心に討論してくれている良き研究協力者、池田満助手、ならびに来村徳信助手に深謝する。

参考文献

- [Chandra, 1986] Chandrasekaran, B.: Generic tasks in knowledge-based reasoning: High-level building blocks for expert system design", IEEE Expert, pp.23-30, Fall, 1986.
- [Gruninger, 1994] Gruninger and M. Mark S. Fox: The design and evaluation for enterprise engineering, Proc. of the ECAI94 Workshop on Comparison of Implemented Ontologies, pp.105-128, 1994.
- [Hawes, 1994] ISO/IEC standard 11179: Specification and standardization of data element, Working Draft 5, ISO/IEC SC14, 1994.
- [池田, 1989] 池田満, 溝口理一郎, 角所収: 学生モデル記述言語 SMDL と学生モデルの帰納推論アルゴリズム SMIS, 電子情報通信学会論文誌 DII, Vol.J72-DII, No.1, pp.112-120, 1989.
- [Ikeda, 1993] Ikeda, M., Kono Y., and Mizoguchi, R.: Nonmonotonic model inference - A formalization of student modeling -, Proc. of IJCAI'93, Chambéry, pp.467-473, 1993.
- [Ikeda, 1994] M. Ikeda and R. Mizoguchi: FITS: A Framework for ITS -- A Computational Model of Tutoring, J. of AI in Education, Vol.5, No.3, pp. 319-348, 1994.
- [Kitamura, 1994] Kitamura, Y., M. Sasajima, M. Ikeda, and R. Mizoguchi: Model building and qualitative reasoning, for diagnostic shell, Proc. of Japan/Korea Joint Conference on Expert Systems: JKJCES94, pp.41-46, 1994.
- [Kitamura, 1995] Kitamura, Y., M. Sasajima, M. Ikeda, S. Yoshikawa, A.

- Endou, O. Kakusyo, R. Mizoguchi: A method of qualitative reasoning for model-based problem solving and its application to a nuclear plant, J. of Robotics and CIM, 1995(to appear).
- [北野, 1993] 北野宏明: AI における科学革命, 人工知能学会誌, Vol.8, No.6, pp.744-751, 1993.
- [Kono, 1994] Kono, Y., Ikeda M., and Mizoguchi, R.: THEMIS: A modeling method for students with contradictions, Journal of Artificial Intelligence, Vol.5, No.3, pp. 371-413, 1994.
- [Lenat, 1994] Guha, R.V. and D.B.Lenat: Enabling agents to work together, CACM, Vol. 37, No.7, pp.127-142, 1994.
- [Lehmann, 1994] Lehmann, F.: CCAT: The current status of the conceptual catalogue group, with proposals, Proc. of the Third Peirce Workshop, A Conceptual Graph Workbench, ICCS-94, Melbourne, 1994.
- [長尾, 1993] 長尾真: AI マップー自然言語へのアプローチ, 人工知能学会誌, Vol.9, No.4, pp.530-536, 1994.
- [溝口, 1988a] 溝口理一郎, 角所収: " エキスパートシステムにおける新しい研究動向 ", 情報処理, 28, 2, pp.207-217, 1987.
- [溝口, 1988b] 溝口理一郎, 山口高平, 角所収: " エキスパートシステム構築方法論について ", 人工知能学会知識ベースシステム研究会資料, SIG-KBS-8801-2, 1988 .
- [溝口, 1994] 知識の共有と再利用研究の現状と動向, 人工知能学会誌, Vol.9, No.1, pp.3-9, 1994.
- [Mizoguchi, 1992] Mizoguchi, R. Tijerino, Y., and M. Ikeda: Proc. of the 2nd Japanese Knowledge Acquisition for Knowledge-Based Systems Workshop: JKA92, Kobe and Hatoyama, pp., 1992.
- [Mizoguchi, 1993] Mizoguchi, R.: Knowledge acquisition and ontology, Proc. of the KB&KS'93, Tokyo, pp. 121-128, 1993.
- [Mizoguchi, 1995a] Mizoguchi, R. and J. Vanwelkenhuysen: Task ontology for reuse of problem solving knowledge, Proc. of KB&KS'95, pp.46-59, 1995.
- [Mizoguchi, 1995b] Mizoguchi, R., M. Ikeda, K. Seta, and J. Vanwelkenhuysen: Ontology for modeling the world from problem solving perspectives, Proc. of the IJCAI95 Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing, Montreal, 1995.
- [Nishida, 1993] Nishida, T. and H. Takeda: Towards the knowledgeable community, Proc. of the KB&KS'93, pp.157-166, 1993.
- [西田, 1994] 西田豊明: 知識コミュニティー, 人工知能学会全国大会(第8回) S2-3, pp.77-80, 1994.

- [大須賀, 1995] 大須賀節雄, 岡田直之: 知識科学の体系化に向けてー中間報告ー, 人工知能学会誌, Vol.10, No.4, pp.521-530, 1995.
- [Petrie, 1992] Petrie, C.J.: Enterprise Integration Modeling, Proceeding of the First International Conference, MIT Press, 1992.
- [Sasajima, 1994] Sasajima, M., Y. Kitamura, M. Ikeda, and R. Mizoguchi: An Investigation on Domain Ontology to Represent Functional Models, Proc. of the Eighth International Workshop on Qualitative Reasoning QR94, pp.224-233, 1994.
- [Sasajima, 1995] Sasajima, M., Y. Kitamura, M. Ikeda, and R. Mizoguchi: FBRL: A Function and Behavior Representation Language, Proc. of IJCAI'95, Montreal, pp. 1830-1836, 1995.
- [Stefik, 1986] Stefik, M: The next knowledge medium, AI Magazine, Vol.7, No.1, pp.34-46, 1986.
- [Takaoka, 1994] Takaoka, Y. et al.: Towards a methodology for identifying ontologies for building reusable knowledge base, Proc. of the 3rd Japanese Knowledge Acquisition for Knowledge-Based Systems Workshop: JKAW94, Hatoyama, pp.49-63, 1994.
- [高岡, 1995] 高岡良行, 広部建治, 溝口理一郎: 再利用可能知識ベースの構築ー変電所事故復旧問題を例としてー, 人工知能学会誌, Vol. 10, No.5, pp,1995.
- [Tijerino, 1993] Tijerino, A. Yuri and R. Mizoguchi: MULTIS II: Enabling end-users to design problem-solving engines via two-level task ontologies, Proc. of the EKA'93 (1993).
- [テヘリノ, 1993] テヘリノ・ジュリ・A, 池田満, 北橋忠宏, 溝口理一郎: タスクオントロジーと知識再利用に基づくエキスパートシステム構築方法論ータスクインタビュシステム MULTIS の基本思想ー, 人工知能学会誌, Vol.8, No.4, pp.476-487 (1993).
- [Uschold, 1995] Uschold, M. et al.: The enterprise ontology, Artificial Intelligence Application Institute, Edinburgh University, <http://www.aiai.ed.ac.uk/~enterprise/enterprise/ontology.html>.
- [VLKB, 1995] 大規模知識ベースに関する調査報告書, 日本情報処理開発協会, 1995.
- [Wielinga, 1992] Wielinga, B.J., et al.: A modeling approach to knowledge engineering, Knowledge Acquisition, Vol.4, No.1, pp.5-53, 1992.
- [山口, 1987] 山口高平, 溝口理一郎, 田岡直樹, 小高浩, 野村康雄, 角所収: 深い知識に基づく知識コンパイラ的设计", 人工知能学会誌, Vol.2, No.3, pp. 333-340, 1987.
- [山口, 1992] 山口高平, 溝口理一郎, 中村比呂記, 小沢稔弘, 鳥越章夫, 野村康雄

，角所収：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，pp.663-674（1992）．