

先行推論による予測とその論理基礎

Prediction by Anticipatory Reasoning and Its Logical Basis

程 京徳
Jingde CHENG

概要

従来の反応的システムは、外部からの刺激に対して受動的にしか反応できないので、信頼性と安全性から見れば、いつも受け身になっており、災害や攻撃に事前に能動的に対処することができない。先行推論反応システムは、被害を未然に防ぐために、高信頼性高安全性を有する次世代反応的システムとして提案されたものであるが、本当に被害を未然に防ぐために、信頼度と精度の高い予測結果を時間的に十分早い段階で的確に予測しなければならない。本稿では、先行推論による予測とその論理基礎を解説するとともに、経験的理論モデルに基づく計算による予測と形式論理体系に基づく推論による予測とを比べて論じる。

1. はじめに

反応的システム (reactive system) とは、外部環境からの刺激 (要求) に反応し、適切なタイミングで要求に対して応答することを繰り返す過程を維持するシステムのことであり^{1,2)}。従来の反応的システムは、外部からの刺激に対して受動的にしか反応できないので、信頼性と安全性から見れば、いつも受け身になっており、災害や攻撃に事前に能動的に対処することができない。

Rosen は 1985 年頃先行システム (anticipatory system)³⁾ という新しい概念を提案した。時間の非可逆性を客観的に認めた状態遷移という観点から見れば (本稿は工学の立場に立っており、時間概念に関する哲学的議論に触れない)、従来のシステムとは、システムの過去状態の履歴と現在状態に基づいて次の状態に導く動作を決めるものである。これに対して、先行システム

とは、システムの過去と現在の状態ばかりではなく、システム自身とその環境に関する予測モデルに基づいて予測した将来の状態にも基づいて次の状態に導く動作を決めるシステムである³⁾。Rosen は、将来に対する予測の結果に基づいて振る舞う能力こそ、生物的システムと物理的システムの本質的な違いであると主張した³⁾。

確かに、我々人間も含むあらゆる生物が持っている身の危険に対する本能的な回避反応は、将来に対する予測に基づいた先行的な行為である。また、人間社会における経済、政治、戦争など様々な社会活動において、予測に基づいた先行的な決断は極めて重要な能力である。実に、紀元前の古代中国秦朝の時代に既に「先発制人、後発制於人。」(班彪, 班固, 班昭: 『漢書・項籍伝』, 紀元 82 年頃) という格言があった。

先行システムという新しい概念が提案された後、その本質、特徴、現実性、物理的システムとしての実現可能性について、哲学、数学、物理学、生物学、システム科学、計算機科学など

様々な学問分野において多くの学者によって議論されてきた。特に、Duboisは、システムの先行性を外部先行性 (exo-anticipation) あるいは弱先行性 (weak anticipation) と内部先行性 (endo-anticipation) あるいは強先行性 (strong anticipation) に分けるべきであると主張した⁴⁾。外部先行性 (弱先行性) は、システムの外部環境に対する先行性でありシステム自身とその環境に関する予測モデルに基づいて推測したシステムの将来の仮想的な状態に基づくものであり、内部先行性 (強先行性) は、システム自身の将来の振る舞いに対する先行性でありシステムの将来の真正的な状態に基づくものである (本稿は工学の立場に立っており、先行性に関する哲学的議論にこれ以上に触れない)。Duboisは、また、計算的先行システム (computing anticipatory system) を計算機システムを用いて実現する先行システムとして提案し⁵⁾、CASYS (International Conference on Computing Anticipatory Systems) という国際会議を1997年から、最初は毎年、現在は2年に一度、主催してきた。

筆者は、2002年4月に開催されたシステム科学に関するヨーロッパ国際会議の場で Dubois 教授により配付された CASYS 会議情報から先行システムと計算的先行システム概念を初めて知った。反応的システムの信頼性と安全性をソフトウェア工学と情報セキュリティ工学の立場から研究している筆者は、先行性という概念を反応的システムに導入すれば、受動的な反応よりむしろ能動的に被害を未然に防ぐという全く新しい観点から反応的システムの構成原理と実現技術を研究する分野を新たに開拓することができると思つた。そして、高信頼性高安全性を有する次世代反応的システムとして、先行推論反応システム (anticipatory reasoning-reacting system) という新しいタイプの反応的システムを提案した^{6,7)}。

先行推論反応システムとは、簡単に言うと、

従来の反応的システムに新たにシステム自身の振る舞いとシステムの外部環境に関する予測モデルおよび先行推論エンジンを付け加え、システムの内部状態と外部環境の変化を計測、監視しながら、システムの振る舞いと外部環境の変化に対して先行推論を用いて予測した結果に基づいて、システム自身が次のしかるべき動作を決める反応システムのことである。明らかに、先行推論反応システムは、本当に被害を未然に防ぐために、信頼度と精度の高い予測結果を時間的に十分早い段階で的確に予測しなければならない。筆者の研究室では、初めての先行推論反応システムとして、超高層ビルのエレベーター制御システムのプロトタイプを実現し、火災が発生したとき如何にできるだけ多くの人々を救出するかという視点から先行推論反応システムの有効性の実証を行った^{8,9)}。

本稿は、本特集のテーマに合わせて、先行推論による予測とその論理基礎を解説するとともに、経験的理論モデルに基づく計算による予測と形式論理体系に基づく推論による予測とを比べて論じる。

2. 論理に基づく推論による予測

予測とは、広辞苑によれば、「将来の出来事や有様をあらかじめ推測すること。前もっておしはかること。」ということである。

工学の様々な分野では一般的に予測を図1のような形で行う。まず、対象領域を抽象化、モデル化し、対象領域を抽象的 (数学的) に表現する理論モデルを構築し、従来の経験に基づいてまとめた経験則を理論モデルの枠組の中で記述する。また、理論モデルと経験則に基づいて予測計算方法 (プログラム) を開発する。そして、観察した現象を入力として予測計算方法 (プログラム) で計算し、出力として予測結果を得る。予測結果が現実的に起こらなかった、あるいは現実と大きく離れた場合、その原因を究明

し、理論モデル、経験則、あるいは予測計算方法（プログラム）を修正する。このような過程を繰り返して、予測結果がより正確、精確になる予測方法を得ることができる。理論モデルを用いて、未来のことを正確、精確に予測できれば、その理論モデルが有効で良い理論と言われる。しかし、一般的に、理論モデルは対象領域に対して抽象度が高ければ高いほどその応用範囲も広くなると共にその精度も低くなる。

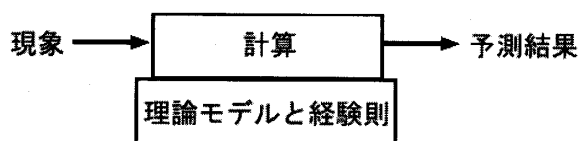


図1 経験的理論モデルに基づく
計算による予測

経験的理論モデルに基づく計算による予測方法では、経験的理論モデルと経験則（およびそれらに基礎づけるはずの論理基礎）が渾然一体となって予測計算プログラムで実現されているので、方法そのものは対象領域に完全に依存し、一般的に汎用性がない。先行推論反応システムを実現する際に、経験的理論モデルに基づく計算による予測方法を用いて、対象領域を事前限定した特定のシステムを開発することが可能であるが、一般的で汎用的なシステムを開発することができない。

推論 (reasoning) (すること) とは、与えられた前提（既知の事実や仮定した仮説）から、新しい結論を導き出すこと（過程）であり、一般的に、秩序の整う一連の論証 (argument) からなる。従って、推論とは、既に知っている事柄あるいは仮定からまだ知られていない事柄を導き出すことであり、我々の知識を広げる手段である。ここで言う「導き出す」ことをでたらしめるのは当然意味がなく何らかの基準に基づいて行うべきである。基づいた基準によっては様々な異なる推論が有り得る。しかし、最も基

本的な基準は論理（学）基準である。なぜなら、論理学はあらゆる推論・論証の正しさを評価するために不可欠な普遍基準を体系的に研究する学問だからである。なお、推論には演繹推論や帰納推論や仮説生成推論などいろいろな形があるが、本稿では、演繹推論だけを考えることにする。

予測がどのような方法で行われるとしてもその目的は未来のことを推測することであるので、いかなる予測も推論であると言える。逆に、推論は必ずしも未来のことを導き出すことではないので、すべての推論は必ずしも予測ではない。一方、様々な予測方法には共通の部分があるか。あるとすればそれは何であろうか。いかなる予測も推論であれば、推論の最も基本的な基準も予測の最も基本的な基準であるはずであろう。すなわち、様々な予測を共通的に基礎づけているのは論理（学）基準であろう。

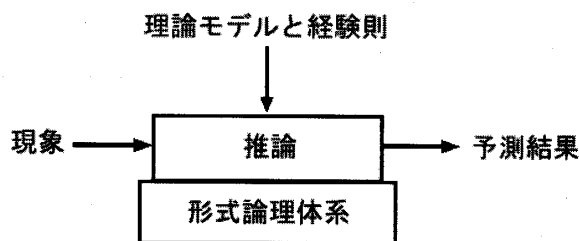


図2 形式論理体系に基づく推論による予測

形式論理体系 (formal logic system) に基づく推論による予測は一般的に図2のような形で行う。まず、対象領域を抽象化、モデル化し、従来の経験に基づいて経験則をできるだけ多くまとめる。そして、観察した現象、理論モデルおよび経験則を論理式で記述し、それらを前提として一般的に妥当な形式論理体系に基づいて推論し、新しい結論として予測結果を得る。予測結果が現実的に起こらなかった、あるいは現実と大きく離れた場合、その原因を究明し、理論モデルと経験則を修正する。このような過程を

繰り返す結果、予測は段々より正確、精確になる。勿論、たとえ前提とした現象、モデルおよび経験則が同じとしても、論理基礎である形式論理体系が異なるならば、一般的に、結論としての予測結果も異なる。しかし、論理基礎である形式論理体系を変えなければ、予測方法そのものは対象領域に全く依存せず汎用性がある。

形式論理体系に基づく推論による予測方法における推論は、一般的に推論エンジンと呼ばれるプログラムによって実行する。その入力は、観察した現象、理論モデルおよび経験則を表現した論理式であり、出力は予測結果である。しかし、経験的理論モデルに基づく計算による予測方法の計算プログラムと違って、推論エンジンは対象領域に全く依存せず汎用性のあるプログラムとして開発されるものである。

3. 先行推論による予測の論理基礎

先行推論 (anticipatory reasoning) とは、与えられた前提から、推論を行う時点でその発生と真偽が確実ではない将来の事柄に関する結論を導き出す推論である⁷⁾。従って、先行推論は、必ず1つの時間点を参照点としており、その時間点に対して先行推論の結論はすべて予測結果になる。

哲学および論理学においては、従来、様々な哲学的な観点から様々な目的で多くの論理体系が提案されてきた。しかし、必ずしもどのような論理体系も先行推論による予測の論理基礎に成り得るわけではない。先行推論による予測を基礎づける論理体系は、少なくとも幾つかの基本要件を満たさなければならない⁷⁾。

まず、推論の妥当性の一般的な基準として、その論理体系は、拡充的推論 (ampliative reasoning)、相関的推論 (relevant reasoning)、および真理値保存的推論 (truth-preserving reasoning) を基礎づけるなければならない。(ある論理体系はある性質を持つ推論を基礎づける

とは、その論理体系に基づいて妥当であると見なされる任意の推論が必ずその性質を持つことである。) 拡充的推論とは、結論の真理性が決して前提に含まれていない推論であり、相関的推論とは、結論が必ず前提と関係している推論であり、真理値保存的推論とは、前提が真であれば結論も必ず真である推論である。与えられた前提から新しい結論を導き出すことこそ推論であると定義すると、この基本要件で保証する推論の拡充性、相関性、および真理値保存性のどれも先行推論にとって本質的に重要で不可欠な性質であり、信頼度の高い予測結果を得るためにも極めて重要である。拡充性がなければ、推論は同語反復になり新しい結論を得られなく、当然、予測にもなれない。相関性がなければ、推論の結論は前提と無関係なことになり、意味のある結果を得られなく、当然、信頼できる予測結果にもなれない。真理値保存性がなければ、推論の結論の真理性が保証されず真の結果を得られなく、当然、信頼できる予測結果にもなれない。

次に、その論理体系は、準完全推論 (paracomplete reasoning, reasoning under uncertainty, reasoning with incomplete knowledge) と準整合推論 (paraconsistent reasoning, reasoning under inconsistency, reasoning with inconsistent knowledge) を基礎づけるなければならない。準完全推論とは、与えられた前提はすべての情報を含んでいることを仮定しない推論であり、準整合推論とは、与えられた前提は矛盾を含んでいないことを仮定しない推論である。少し専門的な言葉で言い換えると、準完全推論とは、閉世界仮説 (closed world assumption) (真か偽かわからないものは全て偽であると見なす) を仮定しない推論であり、準整合推論とは、爆発原理 (the principle of explosion) (矛盾から何を導き出してもよい) を仮定しない推論である。この基本要件は、意図的に綺麗に定義された理想世界における物事ではなく現実世界における

物事に関する先行推論にとって重要で不可欠であり、予測のための推論にとって特に重要である。現実世界では、我々が完全で無矛盾な情報に基づいて推論したり予測したりすることがむしろまれで、常に不完全、場合によって暗黙に矛盾がある情報に基づいて推論し予測しなければならない。

最後に、その論理体系は、時間的推論 (temporal reasoning) を基礎づけなければならない。時間的推論とは、時間に関する様相命題 (modal proposition) およびそれらの間の関係に関する推論である。この基本要請は、そもそも概念的に時間に関係する先行推論にとって本質的に重要で不可欠であり、予測のための推論にとって特に重要である。

それでは、現存の多くの論理体系にはどのような論理体系が上記の三つの基本要請をすべて満たすかについて考察してみよう。

まず、論理学、数学、計算機科学、人工知能など様々な分野で形式証明の記述に広く使われている古典数理論理は、上記の三つの基本要請の何れも満たすことができないので、先行推論による予測を基礎づける論理体系として使えない。

古典数理論理は論証に関する古典的妥当性 (classical account of validity) に基づいて構築された論理体系であり、古典的妥当性 (論証が妥当である必要十分条件は前提が真のとき結論が偽にならないであること) の形で論証の真理値保存性だけを要求し、拡充性と相関性を要求していないので、証明をある意味で基礎づけることができるが推論を基礎づけることができない。

例えば、古典数理論理では、いかなる推論にとっても不可欠な条件関係 (conditional) を外延的真理値関数である実質含意 (material implication) で表現しているので、推論における拡充性を保証できない。我々が日常生活でもよく使っている推論規則の1つである前件肯定 (Modus Ponens) 規則を実例として見よう。前件

肯定規則を自然言語で表現すれば「もし P ならば Q である。P である。よって、Q である。」という推論規則である。古典数理論理では、条件関係を実質含意で表現するので、前件肯定規則を古典数理論理で表現すれば「 $P \rightarrow Q$. P. よって、Q.」となる。しかし、実質含意「 \rightarrow 」の外延的真理値関数意味は、「前件が真のとき後件が偽になれば偽であり、それ以外の場合は真である。」ということである。P が真であることだけを知っている (仮定している) としても、Q の真偽を知らなければ (仮定しなければ) $P \rightarrow Q$ の真偽を知る (仮定する) ことができない。ゆえに、実質含意を使って「推論」する場合、Q の真偽を「推論」するためにまず Q の真を知る (仮定する) 必要がある。これは拡充的な推論ではなくまさに同語反復にほかならない。

そして、たとえ古典的に妥当な論証で得た真とされる結論であっても、それが実質含意で表現された条件命題であれば、相関性の見方からみれば真ではないことも有り得る。すなわち、古典的妥当性の形で保証された論証の真理値保存性は、相関性の見方からみれば意味がない。例えば、古典数理論理では、 $P \rightarrow (Q \rightarrow P)$ という論理定理がある。この論理定理と前件肯定規則を使って、前提として与えられた事実 (仮定) P から $Q \rightarrow P$ や $R \rightarrow P$ や $S \rightarrow P$ などを幾らでも「推論」することができる。しかし、ここでは相関性の見方からみれば結論にある Q や R や S などは前提 P と何の関係もなく、普通、我々は「もし Q ならば P である」や「もし R ならば P である」や「もし S ならば P である」などを決して言わない。なお、 $P \rightarrow (Q \rightarrow P)$ のような、条件関係と実質含意との意味上の違いにより生じた、常識からみれば不自然な論理定理が実質含意のパラドックス (paradoxes of material implication) と呼ばれる^{10,11)}。

さらに、古典数理論理は、爆発原理を受け入れており矛盾から何を導き出してもよいので、準整合推論を基礎づけることができない。実は、

古典数理論理の論理定理の1つである $(P \wedge \neg P) \rightarrow Q$ は、爆発原理そのものの表現であり、最も「悪名の高い」実質含意のパラドックスの1つである。現実世界における推論と予測では、前提に矛盾が暗黙に存在することも有り得るので、爆発原理を受け入れる古典数理論理のような爆発的論理体系 (explosive logic system) ではなく、爆発原理を認めない準整合的論理体系 (paraconsistent logic system) を論理基礎としなければならない。

最後に、古典数理論理では、時間に関する様相概念が明確に定義されていないので、時間的推論を基礎づけることも難しい。

それでは、古典数理論理以外の論理体系を考察してみよう。実質含意は条件関係を正しく表現していない、そして、妥当な論証の前提と結論との間に何らかの相関性 (relevance) が存在すべきといった哲学的な動機から、相関論理 (relevant logic, relevance logic)^{10,11)} が提案された。相関論理では、条件関係を内包的基本論理結合子である相関的含意 (relevant implication) あるいは論理的帰結 (entailment) で表現しており、条件関係における前件と後件との変数共有 (variable-sharing) を妥当な含意命題の必要条件の1つとして要求し、古典数理論理における実質含意のパラドックスを相関論理体系から排除した。その結果、相関論理に基づいた推論は、拡充的、相関的、真理値保存的である。また、相関論理は爆発原理を認めない準整合的論理体系であるので、準整合推論を基礎づけることができる。

しかし、相関論理体系は、推論に対してある意味で弱い相関性しか保証できない。例えば、相関論理では、 $(P \Rightarrow Q) \Rightarrow ((P \wedge R) \Rightarrow Q)$ (\Rightarrow は相関的含意あるいは論理的帰結を表現することにする) という論理定理がある。この論理定理と前件肯定規則を使って、前提として与えられた事実(仮定) $P \Rightarrow Q$ から $(P \wedge R) \Rightarrow Q$ や $(P \wedge S) \Rightarrow Q$ や $(P \wedge T) \Rightarrow Q$ などを推論することができる。し

かし、ここでは結論にある R や S や T などは前提 $P \Rightarrow Q$ と何の関係もなく、普通、我々は「もし P ならば Q である」だからといっても「もし P かつ R ならば Q である」や「もし P かつ S ならば Q である」や「もし P かつ T ならば Q である」などを決して言わない。

一方、相関論理では、古典数理論理と同じように、時間に関する様相概念が明確に定義されていないので、時間的推論を基礎づけることは難しい。

次に、時間論理 (temporal logic)^{12,13)} を考察しよう。時間論理は、時間に関する様相演算子とそれらの性質に関する公理を古典数理論理に導入し拡張した論理体系である。従って、時間論理は時間的推論を基礎づけることができる。しかし、時間論理は、古典数理論理の保存拡張であるため、古典数理論理における論証に関する古典的妥当性や実質含意概念や爆発原理などをそのまま継承している。その当然な結果として、推論に関しては古典数理論理と同じ問題点がある。

最後に、強相関論理 (strong relevant logic, strong relevance logic)^{14,15,16)} は、相関的推論を基礎づける論理体系として筆者が相関論理を改良した形で提案したものである。その基本的な考えは、妥当な論理的帰結関係の前件には後件と関係のない余計な連言項を含むべきではなく、妥当な論理的帰結関係の後件には前件と関係のない余計な選言項を含むべきではないということである。強相関論理体系は、推論に対して、相関論理より強い相関性を保証することができる。しかし、古典数理論理や相関論理と同じように、時間に関する様相概念が明確に定義されていないので、時間的推論を基礎づけることは難しい。

上記の考察から分かるように、古典数理論理、相関論理、時間論理、および強相関論理は、それぞれの問題点があり、どれもそのまま先行推論による予測を基礎づける論理体系として使

えない。

筆者が提案した時間相関論理 (temporal relevant logic)⁷⁾は、時間に関する様相演算子とそれらの性質に関する公理を強相関論理に導入し拡張した論理体系であり、先行推論による予測を基礎づける論理体系に対する三つの基本要請をすべて満たしている。

4. 予測の信頼度と精度について

経験的理論モデルに基づく計算による予測方法を用いて得た予測結果の信頼度は、明らかに理論モデルと経験則の正確性（およびそれらの理論モデルと経験則を基礎づけるはずの論理基礎の妥当性）、理論モデルと経験則に基づいて作成した計算プログラムの信頼性に依存する。

また、理論モデルと経験則は対象領域を数値的に十分な精度で表現し、計算プログラムによる誤差も一定の範囲以内に収めることができれば、予測結果は高い精度に達することもできる。

一般的に、工学の様々な分野におけるどのような対象領域に対しても最初から良い理論モデル、経験則および予測計算方法を完璧に構築することはほぼ不可能であり、試行錯誤と改良を繰り返してはじめて良い予測方法を得ることができる。しかし、経験的理論モデルに基づく計算による予測方法では、理論モデルと経験則（およびそれらに基礎づけるはずの論理基礎）が渾然一体となって予測計算プログラムで実現されているので、予測結果が現実的に起こらなかった、あるいは現実と大きく離れたとき、問題になる原因を洗い出すことはそんなに簡単なことではない。予測計算プログラムが大規模で複雑なものである場合は特にそうである。

さらに、予測と言っても、事柄の性質が既に正確で明確に認識されており単なるその事柄が実際にいつか発生するかしらないかをあらかじめ推測することや、性質が既に分かった事柄が発生する際の数量的程度をあらかじめ推測するこ

とや、大まかにしか分かっていない事柄の性質をあらかじめ推測することや、推測の時点で何も全く分からない将来の事柄を前もっておしはかるなど様々な形態がある。経験的理論モデルに基づく計算による予測方法は、対象領域を抽象的に表現する理論的モデルという閉じた世界において計算によって行うことであり、理論的モデルの範囲を超えたもっと大きな範囲で信頼度と精度の高い結果を予測することは原理的に不可能である。従って、経験的理論モデルに基づく計算による予測方法で、大まかにしか分かっていない事柄の性質をあらかじめ推測することや、推測の時点で何も全く分からない将来の事柄を前もっておしはかるなどのような予測を行うのは難しい。極端的に簡単な言葉で言うと、予測計算プログラムの開発者すら明確に分かっていない事柄の性質は、そのプログラムをどのように使って計算しても分かるはずがない。

一方、形式論理体系に基づく推論による予測方法を用いて得た予測結果の信頼度は、理論モデルと経験則の正確性、先行推論エンジンの信頼性、論理基礎である形式論理体系の妥当性に依存するが、理論モデルと経験則とそれらを基礎づける論理基礎との分離によって、理論モデルと経験則は先行推論エンジンの単なる入力となっている。従って、予測結果に対して疑問が生じたとき、問題になる原因を洗い出すことは、少なくとも理論モデルと経験則とそれらの論理基礎とをそれぞれで分かれた形で行うことができ、渾然一体の形で行うことより簡単になるはずである。

また、形式論理体系に基づく推論による予測方法では、観察された現象と共に理論モデルと経験則も推論の前提とされており、推論の結論としてこれらの前提のすべての論理的帰結を原理的に得ることができる。従って、形式論理体系に基づく推論による予測方法で、大まかにしか分かっていない事柄の性質をあらかじめ推測することや、推測の時点で何も全く分からない

将来の事柄を前もっておしはかるなどのような予測を行うことができる。理論モデルと経験則の構築者すら明確に分かっていない事柄とその性質は、先行推論によってはじめて分かることも有り得る。さらに、形式論理体系により保証される推論過程の妥当性は対象領域に依存せず一般的に成立するものなので、与えられた前提が正しければ、妥当な推論過程に基づいて導き出した結論も必ず正しくそのまま信じてよい。従って、形式論理体系に基づく推論による予測方法で得た予測結果の信頼度は、一般的に、前提として与えられた観察された現象、理論モデルおよび経験則の信頼度より低いことは決してない。

しかし、論理学（体系）は、特に2値論理の場合、前提から結論を導き出す過程の妥当性だけを対象としており、前提や結論そのものの正確さと精確さを対象としていない。前提が正しくなければ、たとえ妥当な推論過程に基づいて導き出した結論も必ずしも正しくない。また、前提や結論がどれほど正しいかどれほど精確なものであるかについて数値的な評価基準が論理体系にはない。従って、形式論理体系に基づく推論による予測方法で、信頼度が高いばかりではなく精度も高い予測結果を求める場合に、観察された現象、理論モデルおよび経験則に関する数値的性質を論理式の形でうまく表現できるように工夫しなければならない。原理的には、数値的にしか表現できない事柄を原子命題の内容で表現すれば、これらの事柄の間の関係を推論することができるが、対象領域により、事柄あるいはそれらの間の関係は連続関数のような数学的道具でしか表現できない場合、大変煩雑で難しい。

5. おわりに

本稿では、先行推論反応システムという研究背景の下に、先行推論による予測とその論理基

礎を解説したとともに、経験的理論モデルに基づく計算による予測と形式論理体系に基づく推論による予測とを比べて論じた。

時間相関論理に基づく先行推論による予測方法は、先行推論反応システムのような具体的なシステムだけではなく、工学の様々な分野、さらに工学以外の様々な分野においても原理的に応用できる、信頼度の高い予測方法である。しかし、精度の高い予測結果を求める場合、対象領域における事柄の数値的性質を如何に論理式の形でうまく表現するかについて工夫しなければならない。

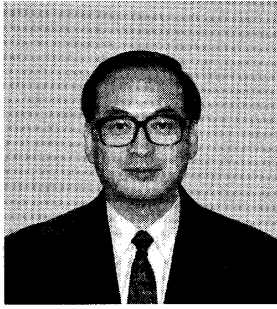
謝辞

本稿の背景になる研究（先行推論に基づく永続的反応システムの構成原理と実現技術）は、セコム科学技術振興財団、電気通信普及財団、カシオ科学振興財団、財団法人テレコム先端技術研究支援センター、および日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究(B) No. 18300005）からの援助を受けたことをここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) D. Harel and A. Pnueli: On the Development of Reactive Systems, in K. R. Apt (Ed.), "Logics and Models of Concurrent Systems," Springer-Verlag, pp. 477-498 (1985)
- 2) A. Pnueli: Specification and Development of Reactive Systems, in H.-J. Kugler (Ed.), "Information Processing 86," IFIP, North-Holland, pp. 845-858 (1986)
- 3) R. Rosen: Anticipatory Systems - Philosophical, Mathematical and Methodological Foundations, Pergamon Press (1985)
- 4) D. M. Dubois: Mathematical Foundations of Discrete and Functional Systems with Strong

- and Weak Anticipations, in M. V. Butz, O. Sigaud, and P. Gerard (Eds.), "Anticipatory Behavior in Adaptive Learning Systems: Foundations, Theories, and Systems," Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 2684, Springer-Verlag, pp. 110-132 (2003)
- 5) D. M. Dubois: Introduction to Computing Anticipatory Systems, International Journal of Computing Anticipatory Systems, Vol. 2, pp. 3-14 (1998)
 - 6) J. Cheng: Anticipatory Reasoning-Reacting Systems, Proc. International Conference on Systems, Development and Self-organization, pp. 161-165 (November 2002)
 - 7) J. Cheng: Temporal Relevant Logic as the Logical Basis of Anticipatory Reasoning-Reacting Systems, in D. M. Dubois (Ed.), "Computing Anticipatory Systems: CASYS 2003 - Sixth International Conference, Liege, Belgium, 11-16 August 2003," AIP Conference Proceedings, Vol. 718, American Institute of Physics, pp. 362-375 (August 2004)
 - 8) F. Shang, S. Nara, T. Omi, Y. Goto, and J. Cheng: A Prototype Implementation of an Anticipatory Reasoning-Reacting System, in D. M. Dubois (Ed.), "Computing Anticipatory Systems: CASYS 2005 - Seventh International Conference, Liege, Belgium, 8-13 August 2005," AIP Conference Proceedings, Vol. 839, American Institute of Physics, pp. 401-414 (June 2006)
 - 9) S. Nara, F. Shang, T. Omi, Y. Goto, and J. Cheng: An Anticipatory Reasoning Engine for Anticipatory Reasoning-Reacting Systems, International Journal of Computing Anticipatory Systems, CHAOS, to appear (2006)
 - 10) A. R. Anderson and N. D. Belnap Jr.: Entailment: The Logic of Relevance and Necessity, Vol. I. Princeton University Press (1975)
 - 11) A. R. Anderson, N. D. Belnap Jr., and J. M. Dunn: Entailment: The Logic of Relevance and Necessity, Vol. II. Princeton University Press (1992)
 - 12) Y. Venema: Temporal Logic, in L. Goble (Ed.): The Blackwell Guide to Philosophical Logic, Blackwell, pp. 203-223 (2001)
 - 13) J. P. Burgess: Basic Tense Logic, in D. Gabbay and F. Guentner (Eds.): Handbook of Philosophical Logic, 2nd Edition, Vol. 7, Kluwer Academic, pp. 1-42 (2002)
 - 14) J. Cheng: The Fundamental Role of Entailment in Knowledge Representation and Reasoning, Journal of Computing and Information, Vol. 2, No. 1, 828-848 (June 1996)
 - 15) J. Cheng: A Strong Relevant Logic Model of Epistemic Processes in Scientific Discovery, in E. Kawaguchi, H. Kangassalo, H. Jaakkola, and I. A. Hamid (Eds.), "Information Modelling and Knowledge Bases XI," Frontiers in Artificial Intelligence and Applications, Vol. 61, IOS Press, pp. 136-159 (February 2000)
 - 16) J. Cheng: Strong Relevant Logic as the Universal Basis of Various Applied Logics for Knowledge Representation and Reasoning, in Y. Kiyoki, J. Henno, H. Jaakkola, and H. Kangassalo (Eds.), "Information Modelling and Knowledge Bases XVII," Frontiers in Artificial Intelligence and Applications, Vol. 136, IOS Press, pp. 310-320 (February 2006)
- (てい きょうとく／埼玉大学)



程 京徳

1982年7月中国清華大学計算機科学技術系卒業。
1986年3月九州大学大学院工学研究科修士課程
情報工学専攻修了。1989年3月同博士後期課程
情報工学専攻修了。工学博士。1989年4月九州
大学工学部助手。1991年1月同助教授。1996年
5月九州大学大学院システム情報科学研究科教授。
1999年4月埼玉大学大学院理工学研究科教授。
ソフトウェア工学，知識工学，及び情報セキュ
リティ工学の研究に従事。情報処理学会，日本
ソフトウェア科学会，日本データベース学会，
ACM，IEEE-CS，IEEE-SMC，IEEE 各会員。