

解 説**様相論理とその情報処理への応用****(III) 知識情報処理と自然言語処理への応用†**

堂 下 修 司† 西 田 豊 明† 島 田 陽 一†

1. まえがき

本稿では、第1部¹⁾の様相論理、第2部²⁾のハードウェア・ソフトウェアへの応用に続き、このシリーズのしめくくりとして、様相論理の知識情報処理と自然言語処理への応用について解説する。

知識情報処理においては、知識をどのように表現し、またそれらの知識をどのようにして用いるかが重要な課題である。特に複数の人間（あるいはシステム）が協調して問題を解決する状況では、他人がどのような知識をもちどのような推論が行えるかということを推論できることが必要である。ある種の様相論理を使うと、可能世界モデルによって各人がもつさまざまな知識を表現することができる。

自然言語において古典論理の演算子ではうまく表現できないものがあった。様相論理を用いると自然言語に現れる時制や確信度などを表現することができる。また、モンテギュ文法では無あいまい言語の意味分析を行う際に内包論理を用いている。

2. 様相論理の知識情報処理への応用**2.1 様相命題論理による知識の表現**

知識情報処理における知識の表現方法は、大きく分類すると次の二つになるであろう。その一つは、知識としてのデータを対象として扱い、データの存在がその事柄を「知っている」という意味を表すというもので、たとえば“A:P, Q”というような形で、「Aは事柄PとQ（およびそれから導かれる事柄）を知っている」ということを意味する。この方法は非常に単純であり、かなりの場合に適用できるであろうが、

「Aは『AがPを知っている』ということを知っている」あるいは「Aは『BがPを知らない』ということを知っている」などの事柄は表現できない。

もう一つの方法は、事柄Pと「AがPを知っている」を同じレベルで扱うもので、これらの事柄は、たとえば“KNOW (A, P)”および“KNOW (A, KNOW (A, P))”というように表現される。

後者の表現方法について分析してみると、命題 KNOW (A, P) における述語 KNOW の引数に再び命題 P が現れているので、これは第1階述語論理における論理式ではないことが分かる。この KNOW は人物対象 A と命題 P から命題 KNOW (A, P) を作り出す演算子と見なすことができ、後述するように、これは一種の様相演算子（正確には引数 A を含めて）になる。

以下では、任意の人物 A、命題 P に対して、「AがPを知っている」という命題を $K_A P$ と表すこととする。この $K_A P$ には次のような諸性質がある^{3), 4)}。

$$(M1) \quad K_A P \rightarrow P$$

$$(M2) \quad K_A P \rightarrow K_A K_A P$$

$$(M3) \quad K_A (P \rightarrow Q) \rightarrow (K_A P \rightarrow K_A Q)$$

$$(M4) \quad \neg P \text{ ならば } \neg K_A P$$

(M1) は「AがPを知っていれば、Pは真である」ということを表す。そうすると、だれかに知られている事柄はすべて真実ということになり、必ずしも成立しないのではないかと思われるかもしれない。しかし、Pが偽である場合には、AはPを本当に知っているわけではなく、Pだと思い込んでいる（信じている）のであるので、この性質は成立すると考える。（必ずしも絶対的に真であることのみに限らず、考察の範囲内で真であると認めてよいものは「知っている」としてもよい。）

(M2) は「AがPを知っていれば、Aは自分がPを知っているということを知っている」ということを表す。すなわち、自分が「知っている」という事実

† Modal Logic and its Applications to Information Processing,
Part 3: Applications to Knowledge Information Processing
and Natural Language Processing by Shuji DOSHITA, Toyo-
aki NISHIDA and Youichi SHIMADA (Department of
Information Science, Faculty of Engineering, Kyoto
University).

† 京都大学工学部情報工学科

を自己内省的に知っているわけである。これに対して、

$$(M2)' \sim K_A P \rightarrow K_A \sim K_A P$$

「 A が P を知らなければ、 A は自分が P を知らないということを知っている」という命題は一般には成立しない。たとえば、実際は P であるのに A がそれを知らずに $\sim P$ だと信じている場合には、 A は自分が P を知らないということを知らないからである。ただし、扱う対象によってはこの性質を認めてよい場合がある。

(M3) は「 A が $P \rightarrow Q$ を知っていて、さらに A が P を知っていれば、 A は Q を知っている」ということを表す。すなわち、 A は自分の知識の範囲内で演繹できることはすべて知っていることになる。通常はこの命題が成立すると考えてもよいであろう。しかし、これを認めると、たとえば、チェスのルールを知っている人は、ルールから先手必勝かどうかを演繹できるため、先手必勝かどうかを知っているということになるが、実際にこの演繹を行うことは計算量の点から不可能であり、結果を知っているはずがないというような矛盾が起きる⁵⁾。したがって、この規則が適用できるのは理想的な場合（力学でいえば「摩擦のない場合」）に限られる。

(M4) は「 P が証明可能であれば、 $K_A P$ も証明可能」すなわち、普遍的な事実（証明可能な命題）はだれでも知っているということを表す。厳密には、「知っている」というよりも「知ることができる」という方が正しいであろう。したがって、この推論規則を適用する場合にも注意が必要である。

また「 A が P を信じている」という命題を $B_A P$ と表すことになると、 $B_A P$ では $K_A P$ のもつ性質（M1）～(M4) のうち (M1) のみが異なり、次のようになる⁶⁾。

$$(M1)' B_A P \rightarrow \sim B_A \sim P$$

これは A が同時に矛盾したこと (P と $\sim P$) を信じていないということである。さらに、 $K_A P$ と $B_A P$ の間には

$$K_A P \rightarrow B_A P$$

という関係が成り立つ。

ところで、上の性質 (M1)～(M4) において K_A を様相演算子 \square と見なすと、これは様相論理の S4 体系（第1部¹⁾ 参照）になってることが分かる（ただし、性質 (M2)' を含めると S5 体系になる）。したがって、これを可能世界意味論に基づいて解釈すれば、

次のような。

ある反射的かつ推移的なモデル構造上で、

可能世界 w において $K_A P$ が真

$$\Leftrightarrow w \text{ から到達可能な任意の可能世界 } w' \text{ において } P \text{ が真}.$$

ここで、「可能世界 w 」および「 w から到達可能な可能世界 w' 」をそれぞれ「現実の状態」および「 A の知識と無矛盾な状態」と見なせば、

現実の状態において $K_A P$ が真

$$\Leftrightarrow A \text{ の知識と無矛盾な任意の状態}$$

において P が真。

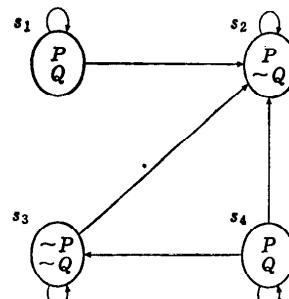
となる。たとえば図-1において、 s_1 が現実の状態であれば、 A の知識と無矛盾な状態が s_1 と s_2 であるから、実際には、 P と Q はともに真であるが、 A の知識としては「 P は（真であることを）知っているが、 Q については（真か偽か）知らない」ということになる。また、現実の状態が s_2, s_3, s_4 である場合には、それぞれ A は「 P と $\sim Q$ を知っている」、「 $\sim Q$ を知っている」、「何も知らない」ということになる。

また、複数の人物 A, B, \dots の知識に関するモデル構造では、可能世界は全員に共通であるが到達可能関係が各人それぞれに与えられ、現実の状態における各人の異なる知識が表現される。

2.2 様相述語論理への拡張における問題点

さて、以上では様相命題論理において扱ってきたが、これを様相述語論理に拡張しようとするいくつかの問題が生じる³⁾。

その一つは等号に関する代入可能性である。これは古典述語論理では成立するが、知識に関する様相述語論理では成立しない。たとえば、1引数述語 P に対して、 $K_A P(a)$ と $a=b$ とから $K_A P(b)$ を導けない。



s_i : 状態 $s_i \rightarrow s_j$: s_i から s_j へ到達可能
(状態内の記号はその状態で真である命題)

図-1 知識に関する可能世界モデル

* s_1 と s_4 では P と Q がともに真であるが、 A の知識が異なるので、これらは等価な状態ではない。

これは、「良夫が太郎の電話番号を知っていて、太郎の電話番号と愛子の電話番号が同じであっても、良夫が愛子の電話番号を知っているとは限らない」ということから明らかである⁴。これは一般的の様相論理において $\Box P(a)$ と $a=b$ から $\Box P(b)$ を導くことができないということに対応している(ただし、 $\Box P(a)$ と $\Box(a=b)$ とからは $\Box P(b)$ を導くことができる)。

また、限量の範囲についての問題がある。今、A が「B は何かが P であることを知っている」と言ったとき、B は具体的に何が P であるのかを知っているが、A はそれが何であるかを知らないという場合(1)と、B 自身も何が P であるのかを知らないが、それが存在することは知っているという場合(2)が考えられ、この文だけではいずれかに断定することができない。これらを論理式で表してみると次のようになる。

$$(1) \exists x K_B P(x) \quad (2) K_B \exists x P(x)$$

このように、あいまい性をもつ文を論理式で記述するときには注意を要する。

2.3 知識に関する推論の例

2.1 の知識に関する公理系(M1)～(M4)が具体的な推論においてどのように適用されるかをみるために、知識に関する推論の一例を示す。

【例1】 箱に同じ大きさの球が3個入っている。そのうち2個は白で1個は黒である。A と B の2人が箱から1個ずつ相手に見えないように取り出した。A は自分の取り出した球を見て、「私はあなたの取り出した球の色が分からぬ」と言った。このとき、B は A の取り出した球が白であると推論することができる。

なぜならば、もし、A の取り出した球が黒だとすると A は B の取り出した球が白だと分かるはずであるから、A の取り出した球は白でなければならない。

この推論を形式的に記述すると以下のようになる。「A の取り出した球が白である」という命題を P、「B の取り出した球が白である」という命題を Q とする。A は2人の取り出した球のうち少なくとも一つが白であるということを知っているので、 $K_A(P \vee Q)$ であり、さらに、そのことを B が知っているので

$$K_B K_A(P \vee Q) \quad (1)$$

となる。 $P \vee Q \equiv \sim P \rightarrow Q$ より、(1)は

$$K_B K_A(\sim P \rightarrow Q) \quad (2)$$

と表すこともできる。また、性質(M3)と(M4)より

$$K_B(K_A(\sim P \rightarrow Q) \rightarrow (K_A \sim P \rightarrow K_A Q)) \quad (3)$$

となり、(2)、(3)と(M3)より

$$K_B(K_A \sim P \rightarrow K_A Q) \quad (4)$$

が導かれる。この(4)は

$$K_B(\sim K_A Q \rightarrow \sim K_A \sim P) \quad (5)$$

と表すことができる。また、A が「私はあなたの取り出した球の色が分からぬ」と言ったということを B が知っているので、

$$K_B \sim K_A Q \quad (6)$$

であり、(5)、(6)と(M3)より

$$K_B \sim K_A \sim P \quad (7)$$

である。ところで、A は自分の取り出した球が黒ならばそれを知っているということ ($\sim P \rightarrow K_A \sim P$) を B は知っているので、

$$K_B(\sim P \rightarrow K_A \sim P)$$

すなわち

$$K_B(\sim K_A \sim P \rightarrow P) \quad (8)$$

である。したがって、(7)、(8)と(M3)より

$$K_B P$$

となる。これは「B は A の取り出した球が白であることを知っている(厳密には、推論により知ることができる)」ということを表している。(例1終わり)

2.4 知識に関する推論についての最近の研究

知識に関する推論についての最近の研究は Halpern⁶において詳細に説明されているのでそれを参照されたいが、ここではその一部を紹介する。

知識に関する推論への様相論理の応用の一つとして、並列分散システムにおけるプロセッサの状態を知識として表すというものがある⁷(この場合、様相論理のS5体系に対応するものになる)。たとえば、「プロセッサ1におけるローカル変数xの値が0であることをプロセッサ2が知っている」とは、プロセッサ1からプロセッサ2に対してなんらかの通信が行われ、プロセッサ2の状態を見るだけでプロセッサ1におけるローカル変数xの値が0であることを断定できるという意味である。

ところで、性質(M3)および(M4)のところでも説明したように、これらの性質が成り立つのは理想的な知覚者(ideal knower)の場合であって、実際には成り立たないことが多い。この状況を表すために、知識を明示的なもの(知っていると意識できるもの)と暗示的なもの(知っているものも含めて論理的に知る

* 第1部でみたように、これは内包論理を用いて厳密に記述することができる。

ことが可能なもの)に分け、後者において(M 1)-(M 4)が成り立つとするというものがある^{8),9)}。このほかに、可能世界間の到達可能関係を用いないもの^{10),11)}もある。

また、対話などにおいて、全員が共通にもっている知識(common knowledge)を論理的に表そうという研究も数多く行われている^{7),12)-14)}。

3. 様相論理の自然言語処理への応用

3.1 自然言語の論理分析

論理学は自然言語に含まれる論理的側面のモデル化が研究動機の一つになっている。論理学では、論理的推論、様相性、内包性など、自然言語に内包される現象を抽出し、理想化し、形式的体系として体系化することを試みてきた。しかし、広い範囲にわたる自然言語の分析が本格化したのは 1970 年代になって、R. Montague がモデル論を使った自然言語の論理分析の理論(モンテギュ文法)^{20),30),37),38),47)}を提案してから、とされている。1970 年代にはこの方面的研究は活発に行われ、広い範囲の現象が取り扱われた。詳細については別稿⁴⁴⁾を参照されたい。

3.2 モンテギュ文法

モンテギュ文法は論理の意味論の手法を自然言語の意味分析に適用したものである。モンテギュ文法では、自然言語そのものを分析するのではなく、文法体系を使って自然言語のもつ特性を部分的に反映した人工言語(断片(fragment)と呼ばれる)を定義する。この断片に含まれる表現の意味は図-2 のように与えられる。

自然言語と論理式との違いの一つは自然言語にはあいまい性が含まれるという点である。モンテギュ文法において自然言語のあいまい性を説明するための一つのトリックは、断片と無あいまい言語(disambiguated language)との間の対応関係を 1 対多にすることである。

無あいまい言語の統語は範疇文法(categorial grammar)によって記述される。範疇文法では、表現には一意的に一定の範疇が与えられる。基本語彙と形成規則から再帰的に複合表現が定義されてゆく。形成規則

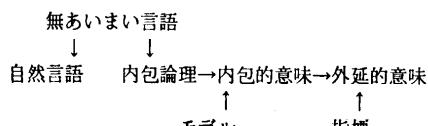


図-2 モンテギュ文法の枠組

の例を下に示す。

S 1: $\alpha \in Vt, \beta \in NP$ ならば,

$$F_1(\alpha, \beta) \equiv \alpha \beta \in Vi.$$

S 2: $\alpha \in NP, \beta \in Vi$ ならば,

$$F_2(\alpha, \beta) \equiv \alpha \beta \in Formula.$$

モンテギュ文法の範疇文法では統語変数が許されており、それを使った導出が可能である。

S 3: $\alpha \in NP, \phi \in Formula$ ならば,

$$F_{10,n}(\alpha, \phi) \in Formula,$$

ここで $F_{10,n}(\alpha, \phi)$ は、次のようなものである: α が he_n の形式をしているときは、 ϕ 中のすべての he_n または him_n の出現をそれぞれ he_n または him_n に置き換えたもの、そうでないときは、 ϕ 中の最初の he_n または him_n の出現を α で置き換え、それ以降の he_n または him_n の出現をそれぞれ { he_n , she_n , it } または { him_n , her_n , it } で置き換えたもの

この規則を用いると、断片の一つの表現には一般に無限個の無あいまい言語の表現が対応づけられることになる。たとえば、“John walks”に対応づけられる無あいまい言語表現は、次のようである:

$$F_2(John, walks)$$

$$F_{10,0}(John, F_2(he_0, walks))$$

$$F_{10,1}(John, F_{10,0}(he_1, F_2(John, walks)))$$

...

これらの無限個の表現は意味解釈の過程で有限個の意味対象に縮退するのであるが、自然言語解析システムを作成する場合には問題になる。

無あいまい言語の表現が得られた後は、論理の意味分析と同様の手法によって意味分析が行われる。この過程を分かりやすくするために、通常無あいまい言語の表現はいったん高階の内包論理式に変換されるのであるが、これはモンテギュ文法においては本質的な部分ではないとされている。

無あいまい言語から内包論理式への変換規則は無あいまい言語の形成規則の例を示す。

$$T 1: F_1(\alpha, \beta) \Rightarrow \alpha' (\wedge \beta')$$

$$T 2: F_2(\alpha, \beta) \Rightarrow \alpha' (\wedge \beta')$$

$$T 3: F_{10,n}(\alpha, \phi) \Rightarrow \alpha' (\wedge \lambda x_n. \phi')$$

これらの変換規則は形成規則と、S 1 に対して T 1, S 2 に対して T 2… というように、1 対 1 に対応する。これはモンテギュ文法における統語論と意味論の並行性への要請によるものである。

3.3 モンテギュ文法の限界

言語分析におけるモンテギュ文法で用いられた手法にはいくつかの本質的限界がある。第一は、統語論と意味論の準同型写像が存在するように展開されてきたので、意味論に本質的な影響を与えることなく統語論を置き換えることが可能である。範疇文法のかわりに、変形文法、GPSG²³⁾、LFG³⁴⁾、HPSG⁴⁵⁾などがうまく使用できることが指摘されている。逆にこれらの統語理論の研究はモンテギュ文法に動機づけられている。上に述べた統語論と意味論の「並行性」のおかげで、これらの統語理論の研究者は意味論の存在を仮定し、統語論の開発に専念できた。

第二の問題は意味論の問題である。モンテギュ文法をナイーブな形で自然言語の意味解析に使おうすると、対象世界に関するトータルなモデルを用意しなければならないことになるが、これは明らかに不可能である。言語を発話し受理するわれわれ人間が世界に関してあらゆることを知っていて、それに基づいて文の意味を、たとえば可能世界の集合から真理値への集合への写像として、理解しているとはとうてい考えられない。人間の文の意味理解の過程は、世界に関してすでに知っている部分的な情報に基づいて行われると考えたほうが妥当である。このような問題から現在、言語の意味分析では知識の不完全性(partiality)を仮定して行われている¹⁷⁾。

3.4 様相論理に基づく自然言語処理システム

様相論理も含み、一般に論理に基づいて自然言語処理システムを構成することの利点は、言語がどのように解析されるかに関係なく、言語とはどのようなものか非手続き的に記述できることである。同時にこのアプローチの欠点は言語解析のための戦略が記述できないことである。論理の外側にモジュラリティを保った形で手続き的な知識を記述できるかどうかは未解決の課題である。

論理に基づくアプローチにおいてさらに様相論理を使用すると、様相論理は時間、様相、内包、信念などを記述するための豊富な概念を含んでいるから、自然言語との対応づけが容易になるという利点がある。しかし、同時に様相論理の上での定理証明は困難であるという問題がある。

3.4.1 モンテギュ文法のシミュレータ

様相論理に基づく最も直接的な自然言語処理システ

ムは、モンテギュ文法のシミュレータ^{22), 32)}である。このようなシステムは主として、モンテギュ文法に基づく文法を検証するためや、言語学の学生にモンテギュ文法を教えるための教材として使われる。

3.2 で述べた問題のため、モンテギュ文法のシミュレータの作成はみかけほど簡単ではない。ATNG をベースとする J. Friedman らのパーサ²¹⁾では、統語変数(代名詞)への代入の記録を保持し、上(3.2)の S3 のような代入規則が本質的に新しい意味解釈を生成しない、空(vacuous)の適用となる場合をチェックしている。一方、異なる意味解釈はすべてパーサの出力に含まれることが保証されている。また、ここでは対話的に部分的モデルを定義できる。

3.4.2 意味論を自然言語処理に適した形に修正して使用するアプローチ

一般にはモンテギュ文法の一部を処理に適した形に修正して自然言語処理に使用される。一つの立場は、モンテギュ文法を自然言語から内包論理式への変換の理論として利用することである。自然言語解析では自然言語の表現にどのような論理式をどのような手順で対応づけたらよいかはかねてから問題であった。モンテギュ文法はこの問題に意味論に基づいた一定の指針を与えるばかりでなく、一定の原則に沿って自然言語の表現を論理式に変換する機械的方法を与えていている³¹⁾。

Hobbs と Rosenschein のシステム²⁴⁾では意味解釈を内包 Lisp 上で実行する。西田と堂下の LOGICS では意味解釈の過程で意味ネットワークを用いる³⁹⁾。Jones と Warren のシステム³³⁾は、意味解釈の結果、Schank の概念依存構造を生成する。

佐伯、米崎、榎本らによる TELL/NSL^{29), 46)} は上位のレベルの表現が下位のレベルの表現で記述されるという階層性をもった、疑似自然言語によるソフトウェアの要求仕様記述に基づくものである。ここでは、各レベルの疑似言語表現はモンテギュ文法の手法を用いて第1階述語論理式に変換されることによって厳密な意味づけが行われる。また、第1階述語論理を Prolog プログラムに変換して実行する試みも行われている。ここでは使用の段階的詳細化のために語彙分解という手法が用いられているが、同様の方法はモンテギュ意味論でも意味の同義性を定義するために行われている¹⁹⁾ことをここで付け加えておく。

西田と堂下の機械翻訳システム^{40)~43)}では原言語を

解析して得られた内包論理式の意味解釈を目的言語の統語領域上で実行することによって翻訳を行う。Landsbergen らの Rosetta プロジェクト^{15), 16), 18), 35), 36)}もモンテギュ文法の手法を機械翻訳に適用したものである。ここでは、モンテギュ文法を単純化して計算論的に取り扱いやすくした同型な M 文法 (isomorphic M-grammars) という考え方を導入している。主としてモンテギュ文法の言語表現と無あいまい言語との対応づけの部分を利用している。

3.4.3 様相論理を直接使用しないアプローチ

SRI International の J. Hobbs らは様相論理を用いて第 1 階述語論理による TACITUS と呼ばれる自然言語理解システムの構築を進めている²⁷⁾。第 1 階述語論理の範囲内で様相性や内包性を取り扱うために、彼らの意味論では多様なタイプの対象を認めている (存在論的雑然性: ontological promiscuity)^{28), 29)}。

TACITUS の特徴は、集合論から、時間、空間、因果律、信念など常識的知識を表現した公理系に基づいて推論を行うことである。そしてこのアプローチによって、文解析に留まらず談話 (discourse) や語用論 (pragmatics) にも重点がおかれている。定理証明には、M. Stickel の開発したコネクショングラフ型の定理証明器⁴⁷⁾を用いている。言語解析はスコアを用いた優先度解釈を行っており、任意の時点でもっとも確からしい解釈が一つ出力される。

このシステムで興味あるのはメトニミー問題の取り扱いである。メトニミー問題とは、たとえば、“alarm” という単語は本来は物体であるが、同一の単語がそこから発生される音を参照するために使われる現象を指す。このようなことは談話ではよく起きるが、適切な解釈を行うためにはなんらかの工夫が必要である。

彼らは coerce という一般的な技法を用いてこの問題を解決している²⁸⁾。coercion は以下のように定義される。まず述語 p には次のような形で引数への要求 r が対応づけられている：

$$p(x, y) : r(x, y).$$

文の論理形式において、 $p(A, B)$ が出現すると、coercion 用変数 k_1 と k_2 が導入され、次の質問が定理証明器に送られる：

$$\exists k_1, k_2, q_1, q_2 [r(k_1, k_2) \wedge q_1(k_1, A) \wedge q_2(k_2, B)]$$

A は coercion 関数 q_1 によって k_1 に coerce される、 B に対しても同様のことが行われる。

この質問は 2 階であり、実質的に任意の関数が coerc-

tion 関数となり得るが、インプリメンテーションでは、述語変数 q_1, q_2 ではなく、述語定数 rel が使われる。すなわち、証明されるべき式は、

$$\exists k_1, k_2 [r(k_1, k_2) \wedge \text{rel}(k_1, A) \wedge \text{rel}(k_2, B)]$$

である。この定理証明のため、システムには、

$$\forall x, y [\text{partof}(x, y) \rightarrow \text{rel}(x, y)]$$

のような形で、どのような場合に coercion を行ってよいか規定する公理群と、

$$\forall x [\text{rel}(x, x)]$$

のように coercion の不要な場合を規定した公理が登録されている。

4. む す び

「様相論理とその情報処理への応用」というテーマで 3 回にわたり解説を行ったわけであるが、様相論理は非常に幅広い分野であるので、今回解説できなかつたことも多い。また、おもに初学者を対象としたため、高度な部分についてはあまり触れなかった。しかし、情報科学においては古典論理のみでなく様相論理も非常に有用なものであるということが分かっていただけのことと思う。もし、本解説によってこの分野に興味をもたれた方々がおられるならば、様相論理に関する数々の解説書を参照されることにより、この分野の発展に大きく寄与されることを望む次第である。

参 考 文 献

- 1) 堂下、西田、三浦：様相論理とその情報処理への応用(I)，情報処理，Vol. 29, No. 1 (1988).
- 2) 堂下、西田、島田：様相論理とその情報処理への応用(II)，情報処理，Vol. 29, No. 2 (1988).
- 3) Moore, R. C.: A Formal Theory of Knowledge and Action, in: Hobbs, J. R. and Moore, R. C. (eds.): Formal Theories of the Commonsense World, Ablex Series in Artificial Intelligence, Ablex Publishing Corporation, pp. 319-358 (1985).
- 4) 内田種臣：様相の論理, p. 259, 早稲田大学出版部 (1978).
- 5) Konolige, K.: Belief and Incompleteness, in: Hobbs, J. R. and Moore, R. C. (eds.): Formal Theories of the Commonsense World, Ablex Series in Artificial Intelligence, Ablex Publishing Corporation, pp. 359-403 (1985).
- 6) Halpern, J. Y.: Reasoning About Knowledge: An Overview, in: Halpern, J. Y. (ed.): Theoretical Aspects of Reasoning About Knowledge, Proc. 1986 Conference, Morgan Kaufmann pp. 1-17 (1986).
- 7) Halpern, J. Y. and Moses, Y. O.: Knowledge

- and Common Knowledge in a Distributed Environment, Proc. 3rd ACM Conference on Principles of Distributed Computing, pp. 50-61 (1984).
- 8) Levesque, H. J.: A Logic of Implicit and Explicit Belief, Proc. National Conference on Artificial Intelligence, pp. 198-202 (1984).
 - 9) Fagin, R. and Halpern, J. Y.: Belief, Awareness and Limited Reasoning, Proc. 9th International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 491-501 (1985).
 - 10) Montague, R.: Universal Grammar, *Theoria* 36, pp. 373-398 (1970).
 - 11) Vardi, M. Y.: On Epistemic Logic and Logical Omniscience, in: Halpern, J. Y. (ed.): Proc. Conference on Theoretical Aspects of Reasoning About Knowledge, Morgan Kaufmann (1986).
 - 12) Lewis, D.: Convention, A Philosophical Study, Harvard University Press (1969).
 - 13) Clark, H. H. and Marshall, C. R.: Definite Reference and Mutual Knowledge, in: Joshi, A. K., Webber, B. L. and Sag, I. A. (eds.): Elements of Discourse Understanding, Cambridge University Press (1981).
 - 14) Perrault, C. R. and Cohen, P. R.: It's for Your Own Good: A Note on Inaccurate Reference, in: Joshi, A. K., Webber, B. L. and Sag, I. A. (eds.): Elements of Discourse Understanding, Cambridge University Press (1981).
 - 15) Appelo, L.: A Compositional Approach to the Translation of Temporal Expressions in the Rosetta System, Philips Research M. S. 13.677 (1986).
 - 16) Appelo, L., Fellinger, C. and Landsbergen, J.: Subgrammars, Rule Classes and Control in the Rosetta Translation System, Philips Research M. S. 14.131 (1987).
 - 17) Barwise, J. and Perry, J.: Situations and Attitudes, The MIT Press (1983).
 - 18) de Jong, F. and Appelo, L.: Synonymy and Translation, Philips Research M. S. 14.269 (1987).
 - 19) Dowty, D. R.: Word Meaning and Montague Grammar, Reidel (1979).
 - 20) Dowty, D. R., Wall, R. E. and Peters, S. P.: Introduction to Montague Semantics, Reidel (1981).
 - 21) Friedman, J. and Warren, D. S.: A Parsing Method for Montague Grammar, *Linguistics and Philosophy* 2, pp. 347-372 (1978).
 - 22) Friedman, J., Moran, D. and Warren, D. S.: Evaluating English Sentences in a Logical Model: A Process Version of Montague Grammar, Abstract 16, *Information Abstracts*, COLING 78 (1978).
 - 23) Gazdar, G.: Phrase Structure Grammar, Jacobson, P. and Pullum, G. K. (eds.): *The Nature of Syntactic Representation*, D. Reidel, pp. 131-186 (1982).
 - 24) Hobbs, J. R. and Rosenschein, R. J.: Making Computational Sense of Montague's Intensional Logic, *AI* 9, pp. 287-306 (1978).
 - 25) Hobbs, J.: Ontological Promiscuity, in Proc. 23rd Annual Meeting of the ACL, pp. 61-69 (1985).
 - 26) Hobbs, J.: The Logical Notation: Ontological Promiscuity (personal communication).
 - 27) Hobbs, J.: The TACITUS Commonsense Knowledge Base (personal communication).
 - 28) Hobbs, J. (personal communication), Sep. 1987.
 - 29) 市川他: 自然言語に基づく静的システムの仕様のプロトタイププログラムへの変換手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 27, No. 11, pp. 1112-1128 (1986).
 - 30) 池谷: モンテギュ一文法入門(1), (2), (3), 情報処理, Vol. 22, No. 3, 4, 5 (1981).
 - 31) Indurkhy, B.: Sentence Analysis Program Based on Montague Grammar, Thesis submitted to the Netherlands Universities Foundation for International Cooperation.
 - 32) Janssen, T. M. V.: Simulation of a Montague Grammar, *Annals of Systems Research*, 7, pp. 127-140 (1978).
 - 33) Jones, M. A. and Warren, D. S.: Conceptual Dependency and Montague Grammar: A Step toward Conciliation, in Proc. AAAI-82, pp. 79-83 (1982).
 - 34) Kaplan, R. M. and Bresnan, J.: Lexical-Functional Grammar: A Formal System for Grammatical Representation, in: Bresnan, J. (ed.): *The Mental Representation of Grammatical Relations*, The MIT Press, pp. 173-281 (1982).
 - 35) Landsbergen, J.: Montague Grammar and Machine Translation, Philips Research M. S. 14.026 (1987).
 - 36) Leermakers, R. and Rous, J.: The Translation Method of Rosetta, Philips Research Laboratories, M. S. 13.701 (1986).
 - 37) Montague, R.: Universal Grammar, in: Thompson (ed.): *Formal Philosophy*, Yale University, pp. 222-246 (1974).
 - 38) Montague, R.: Proper Treatment of Quantification in Ordinary English, in: Thompson (ed.): *Formal Philosophy*, Yale University, pp. 247-270 (1974).
 - 39) 西田, 清野, 堂下: モンテギュ一文法に基づく英日機械翻訳システムの試作, 情報処理学会論文誌, Vol. 23, No. 2, pp. 107-115 (1982).
 - 40) Nishida, T. and Doshita, S.: An English-

- Japanese Machine Translation System based on Formal Semantics of Natural Language, in : Horecky (ed.) : COLING 82, North Holland, pp. 277-282 (1982).
- 41) Nishida, T. and Doshita, S. : An Application of Montague Grammar to English-Japanese Machine Translation, in Proc. Applied Natural Language Processing, pp. 156-165 (1983).
- 42) Nishida, T. : Studies on the Application of Formal Semantics to English-Japanese Machine Translation, Doctoral Thesis, Kyoto University (1983).
- 43) 西田, 堂下: 計算言語学と論理学, 情報処理, Vol. 27, No. 8, pp. 876-886 (1986).
- 44) Pollard, C. : Phrase Structure Grammar without Metarules, in Proc. the Fourth West Coast Conference on Formal Linguistics (1985).
- 45) 佐伯, 米崎, 模本 : 自然言語の語彙分割による形式的仕様記述, 情報処理学会論文誌, Vol. 25, No. 2, pp. 204-215 (1984).
- 46) 白井 : 形式意味論入門, 産業図書 (1985).
- 47) Stickel, M. : A Nonclausal Connection-Graph Theorem Proving Program, Proceedings AAAI-82, pp. 229-233 (1982).

(昭和 62 年 12 月 3 日受付)