

エキスパートシステムのための 知識表現に関する基礎的考察

— 自然言語からのアプローチ —

杉本 英二

0. はじめに

(頭脳労働の増大)

人類は自己の様々な苦役を家畜や機械に置き換え、労働を軽減してきた。産業革命によって肉体労働の多くを機械に置き換え、人間の苦役が軽減されたかに見えたが、現実には新たな労働の増大に悩まされている。調査、研究、開発、企画、評価、調整、管理、教育、組織化などがそれである。専門的知識や訓練が必要なこれらの頭脳労働は、今日の労働の特徴であるが、新製品の開発競争やハイテク技術の進行で陳腐化する。頭脳労働の増大と陳腐化によって企業体の人材難がいつそう深刻化している。

(知識の機械化)

頭脳労働の軽減には、機械化を図る以外に道はないであろう。事務作業のシステム化、あるいは情報機器を導入した事務作業の機械化などの様々の企業努力によって事務処理の効率化が図られている。

しかし頭脳労働といえは、その知的な部分の働きが特に特徴的である。この部分を機械に置き換える（つまり知識の機械化）ことができなければ、頭脳労働を軽減することにはならない。すなわち、知識を蓄積し、問題を解析し、知識を問題の解決に適用することが可能なように知識を機械化するのである。こ

のようなシステムとして智能工学 [Tak] の分野でエキスパートシステムが研究 [Hay] されている。これは、ある特定の分野に限られた知識を機械化したシステムであるが、しかし「人類のもつ知識自身の開発、明確化、拡張の加速という影響を社会にもたらす」 [Hay] ものと期待されている。

(言葉がわかるコンピュータ)

知識の機械化が実現しコンピュータがいかに専門的知識を搭載しても、それを使う人間とのコミュニケーションに人間の言葉が使えなければ、人間の社会的な頭脳労働を軽減するような大量の使い方はできないであろう。知識にはメタ知識という知識自身を操作する知識も含まれているので、それらを操作するには複雑な命令が必要になるだろう。そのような命令に人間の言葉が使えなければ、機械は無用の長物となる。やはりコンピュータが人間の言葉を直接理解することも当然なことであろう。

1. 知識の機械化

文を論理式に変換し、それをコンピュータで処理するという方法で、初期に使われた最もポピュラーな教科書はニルソン [Nil] のテキストに違いない。この教科書の例を用いて、文の翻訳にかかわる問題を考える。

(ニルソンの例)

ニルソンは問題を(1)の様に書き、それを(2)のように論理表現している：

- (1) "If Marcia goes where John goes, and John is at school, where is Marcia?"
- (2) a $(\forall X) \{at(john, X) \Rightarrow at(marcia, X)\}.$
 b $at(john, school).$
 c $(\exists X) at(marcia, X).$

テキストの中で、ニルソンは論理式(2)を得た後、導出原理 [Rob] を使っ

て Marcia が学校にいることを証明している。(2)は証明に十分な情報を持つ論理的なひとまとまりの完結した公理系となっている。

(翻訳が原文と同じでない)

言葉にこだわって、(2)を(1)の文章と比較してみるとかなり違いがある。述語論理の述語は単文の動詞に対応しているので、自然言語表現(1)を論理式(2)に書換えるには複文を単文に分解し、それぞれを対応する述語に変換し論理記号で複文の意味を表現するように合成することになる [脚注1]。条件は次の(2' a), (2' b) が and で結合されているが、それぞれを別の公理として独立させても、論理学としては問題がない。質問内容は(2' c)である。

- (2') a Marcia goes where John goes.
 b John is at school.
 c Where is Marcia?

(3)は、(2')で使われている動詞にこだわって論理式に翻訳したものである。単文の翻訳方法はあらためて2.で扱う。

- (3) a $(\forall X) \{ go(john, X) \Rightarrow go(marcia, X) \}$.
 b $at(john, school)$.
 c $(\exists X) \{ at(marcia, X) \}$.

(対象世界についての知識)

ところが、(3)では、述語 go と述語 at がかみ合わないために、マーシャの居所を証明することができない。それは、(3a)が移動 go の言葉で書かれているのに(3b)が存在 at の言葉で書かれていることに起因している。我々は、現実の世界では「移動すると存在の場所も移動先に移る」ことを知っているので、違う言葉が使われても2つの言葉を関係付けることができ、(3)の情報から正

[脚注1] ここでは論理式の形式論を展開するつもりはないので省略するが、普通に使われている記号を使う。ただし定数は英小文字で始る名前とする。

しい推論ができるのだが、機械ではそうはいかない。そこで、移動と存在の関係を公理として与える必要がある。その定義は(4)で、翻訳は(4')である。

問題が提起される世界を対象世界といい、個別の問題を解く際に、その世界についての知識が必要になることが多い。(4)(4')などは問題(3)を解くために必要になる John と Marcia がいる世界についての知識である。

- (4) a 「XがYに行く (go) と、XはYに存在する。」
 b 「XがYに存在しているのは、XがYへ来たからである。」
- (4') a $(\forall X)(\forall Y)\{go(X, Y) \Rightarrow at(X, Y)\}$.
 b $(\forall X)(\forall Y)\{at(X, Y) \Rightarrow go(X, Y)\}$.

(エキスパートシステムとの関連)

エキスパートシステムは、専門的分野を対象世界として選び、その世界に関する知識を搭載したものである。そのような専門的分野として、医学診断、有機化学、金属材料、鉱物探査、画像分析、コンピュータシステム配置計画などが実現されている [Tak][Hay]。こうして蓄積された知識を一般に知識ベースと呼んでいる。

エキスパートシステムの構成は、大きく2つに分けることができる。1つは知識ベースであり、もう1つは推論システムである。推論システムは知識ベースの情報を使って推論を進める。従って、知識を適用して問題を解くためには、推論システムに適合した記録形式を、知識ベースは持っていないといけない。

知識を表現する形式として、論理式、意味ネット、フレーム、プロダクションルールなど様々であるが、これらの表現のうちどれを採用するのかは、問題に応じてどのような推論が問題解決に最適なのかを判断して決めねばならない。上記の例では、知識や問題の表現に論理式が使われ、推論システムには導出原理が採用されていたのである。

2. 自然言語と述語論理

われわれが、生活のために生れながらに持っている言語を自然言語という。この言語を使って、われわれはものごとを認識し、それらを文章で表現し、記録する。従って、エキスパートシステムの開発では、自然言語で書かれた知識と直面するはずである。

知識を機械化しようとするれば、自然言語で書かれた文からその文が持っている意味を抽出し機械化された知識として表現する方法が確立されていなければならない。ここでは上記の例を使って、素朴な翻訳方法をみることにする。

(1 階述語論理を用いた表現)

述語論理の特徴は、対象と呼ばれる n 個の集合 S_1, S_2, \dots, S_n を考えるところである。述語というのは、適当な集合を k 個、重複を含めて選んでできる次の関数のことである。また述語 ϕ の名前を述語名という。

$$(5) \quad \phi : S_{i_1} \times S_{i_2} \times \dots \times S_{i_k} \rightarrow \{\text{真}, \text{偽}\}$$

我々は述語論理表現の応用において、この述語名と述語のパラメータ（述語の定義域）を次の様に対応させて現実世界のモデル化を行う。つまり、この対象集合を現実世界の人物の集合や場所の集合に対応させ、述語をその世界の有様を表現する文の述語（動詞などの）に対応させるのである。英語の場合では、基本文型(6a)は(6b)のようにパターン化される。

- (6) a 主語 + 動詞 + 補語
 b 動詞 (主語, 補語)

これを上の例でみると、John や Marcia などの人の集合が主語、school などの場所の集合が補語となっている。この表現に似た考えがすでに「論理文法」[脚注2]としてあり、それによると(7)のように表現することになっている。

(7) 連繋部 (対象, 内容)

以上, これまでの考え方を(8)の例でまとめる。(8a), (8b)のような自動詞の場合は, 補語を取らない。3人称現在の一致や動詞活用などの詳細は, 文の意味には直接関係がないので省略する。従って, "John is big"の表現の述語名は is ではなく, BE 動詞で表現した。しかし e の例の場合までも be (John, school) で表すと "John is a school" になりかねないので, be.at (上の例(2)などでは at) と表した。

- | | | | |
|-----|---|------------------------|--------------------------|
| (8) | a | John works. | work(john). |
| | b | Marcia eats. | eat(marcia). |
| | c | John is big. | be(john, big). |
| | d | John is a man. | be(john, man). |
| | e | John is at school. | be.at(john, school). |
| | f | Marcia is in the pool. | be.in(marcia, the.pool). |

3. 自然言語の意味

(文の意味を取り出す研究)

われわれは, 自然言語で書かれた文であっても少し複雑になると, 直ちには文の意味を理解することができないことがある。その場合, 文法に従って前後の語彙を点検し, 文法に頼って意味を把握しようとする。自然言語から論理式への翻訳においても, 直感に頼らず, 形式的な手続で翻訳を行えるようにすべきである。

[脚注2] 言語学の分野での文法理論に, 述語論理を文法の基本とした「論理文法」という文法がある。自然言語の文と論理式の関係付けについて述べているので興味深い: 「『このようにあらゆる命題は必然的に2つの辞項を包蔵する。一方は主部と呼ばれ, 人が断言する対象であり, 他方は述部と呼ばれ, 断言する内容である。さらにこれら2つの辞項を結ぶ連繋部がある』.... この論法を進めると, たとえば, She sings は She is a singer と同じである, というところまでいく。」 [Tan]

ここまで実現することができれば、知的労働の代行が可能となるといえる。この目的のために、自然言語で書かれた文自身の意味を取り出す研究が必要である。

(変形文法による文の理解)

言語学にはチョムスキーから始まる変形文法（もしくは生成文法）という理論がある。これは、深層の構造を使って表層の構造を説明するのが特徴の理論である。その場合、文の中心になる部分に着目して考察する。例えば、これまで1つの文だと思われていた文が、文の中に文を含むという構造になっていることがわかる。含まれている方の文を補文という。日本語文は補文によって、使役文、受動文、可能文や難易文などを作っていることがわかった [Ino]。これによって、使役文、受動文、可能文、難易文などのパターン化された鋳型を用意することができ、それにある事柄を表す文を補文としてはめ込めば、その文に対する所定の意味付けができることになる。

(構文解析と意味解析)

単文の意味を取り出すことができるとすれば、これが補文となっている上記の様々なパターンの文の意味も取り出せると予想される。これを実現するのが、構文解析や意味解析である。変形文法は、原理的には変形規則と生成規則が機械的であるので、計算機化することに大きな困難は少ないと思われるが、これまで変形文法に従った構文解析システムはない。最近では、語彙部門の情報に文法上の情報を含ませることによって、文法規則を少なくした LFG (Lexical Functional Grammar) [Bre] や論理文法である DCG (Definite clause Grammar) [Per] の流れをくむものがあるが、これらは意味解析には対応していない。

意味解析の手法として確立されたものはないが、案としては幾つかある。意味の深層格を採用する Fillmore の格文法 [Fil] を応用したり、井上の基底の格 [Ino] を使って文法を補強することや、あるいはシャンクの CD (conceptual dependency) 理論 [Sch] に従って意味の原始構造を設定し、これから意味

を合成するなどがある。また、一貫した形式論で意味論を展開できるというモントギュー文法もある。しかし「桜が散る」を「桜は散る桜だ」と翻訳しなくてはならない [Sak] のならば、形式が美しくても、それで実装された内容までも確からしくなる訳ではないようで、決定的な手法がない。いずれにしても、言語と語彙の研究を進めながら、泥臭い方法ではあっても、ひとつひとつ意味を調べていかなければならないようだ。

最近、日本語は英語のように主語が強力な文法ではない [Mik] ので、動詞を中心にして、これと他の名詞句などとの間の係り受け関係を調べる文法が注目されている。格文法や依存文法もしくは結合価文法 [Ish] と呼ばれる文法である。また、語彙に多くの情報を持たせて変形規則や生成規則をできるだけ少なくする方向の研究が多いのも最近の特徴である。

(補文を利用した論理表現の例)

1階述語論理の証明システムである Prolog 言語を使って、時制や態や様相などを Prolog 言語で表現する LFL (Logical Form Language) [McC] [脚注3] と呼と呼ばれている方法がある。以下にその典型的な表現を列挙し、新しいアプローチとして考えたい。

(9) SV 文型

a John laughs.

[脚注3]

- ①Prolog では定数は英小文字で始る名前を表す。そのため氏名が小文字で始っている。変数はイニシャルが英大文字の名前である。
- ②多くの場合、動詞には複数の意味がある。同じ語彙でも違った意味を区別するために、(9), (10)の laugh 1, see 1 のように意味の番号を付ける。この番号は、辞書に書かれている動詞の意味の順番で選ばれている。
- ③受動態は能動態表現に受け身のマーク be-passive を付け、さらにどれが受け身の対象になっているかを明確にするために、その対象を第1引数に記す。
- ④時制は、時制を付けない中立的な表現に時制マーク付加する。例(12)。
- ⑤直接・間接の目的語も引数として並べる。例(13)。
- ⑥文を名詞と同様に扱う。例(14)。

b laugh 1 (john).

(10) SVO 文型

a John sees Mary.

b see 1 (john mary).

(11) 態表現 (受動態)

a Mary is seen by John.

b be_passive(mary, see1(john, mary)).

(12) 時制表現 (過去)

a John saw Bill.

b past(see 1 (john, bill)).

(13) SVOO 文型

a John gives Fido to Mary.

b give 1 (john, fido, mary).

(14) 補文表現

a John believes that each man knows Bill.

b believe 1 (john, each(man 1 (X), know 2 (X, bill))).

この言語は、文の意味を記述するものである。従って、それぞれの a の英文の意味を b のように表せるというのである。

(考察)

ここで注目すべきことは、変形文法にしたがって、(11), (12)のように態や時制に補文が使われていること。また(14)のように名詞句扱いの補文が使われていることである。補文は1階の対象ではないので、従来の1階述語論理では取扱えないものである。このLFL言語の処理系では、これらの表現を述語と見なさず、構造化されたデータとして評価している。この評価方法に意味の計算方法が実現されていて非常に興味深い、ここでは割愛する。

4. 自然言語としての法令文の意味

法令文の知識表現を考えると、法的知識が直接法文に表れないことが多いので、単なる自然言語の知識表現以上に大変である。ここでは、法的知識を切り離し、常識的な普通文として観察することにする。筆者は先に民法の相続法の一部を、格表現で意味表現することを試みた [Su]。ここでは不足していた考察を補うことにする。

(素朴な述語論理表現からの考察)

次の(15)の文の意味を、1階述語論理で考える。人の集合を対象集合Pとし、この集合でつくられる関係を述語で表現する。H, XをPの要素を表す変数とすると、2.の素朴な翻訳方法では(15)を(16)のように表せるだろう。

(15) 被相続人の子は、相続人となる。

(16) $\forall H \forall X$ (被相続人である (H) and 親子である (H, X))
 \Rightarrow 相続人である (X, H))

(17) 人Hが被相続人であり、かつ人XがHの子であるなら、
 XはHの相続人である。

逆に、論理式(16)から我々の言葉に直訳すと、(17)のようになろう。この翻訳で気づくことは、もとの文(15)にあった「となる」という表現が(16)では消えてしまっている。述語論理にはもともと時間概念がないので、いままで相続人でなかった者が、父親の死によって、突然「相続人となる」というような時間的变化を直接的に表すことができない。時間的变化の因果関係の代わりに時間軸の中で変化した関係に注目し、その関係を表す述語の真理値の違いで、時間的变化の前と後の状態を区別するという工夫によって、間接的に時間

的变化を表現する以外に方法がない。上の例では「被相続人である (H)」が変化を表す述語である。つまり x の父親 h が死亡すると、(18)を公理に追加することで、変化後の新しい状態を表すのである。

(18) 被相続人である (h)

この新しい公理によって、(16)の左辺が真となるので、「x が h の相続人である」という右辺の(19)を得ることができる。ここで英小文字の x, hなどは変数ではなくて、ある特定の人物を表す定数である。

(19) 相続人である (x, h)

こうした方法では、ある時点での変化を表現する「となる」が、論理式でなく(18)を公理に追加するような別の手続きとして実現されることになり、表現の一貫性を保つことが難しくなる問題をはらんでいる。時刻が本質的な事象の表現には、それが自然に表現できる様相を許す論理で表現することが望ましい。最近では、時刻の変化を考慮した論理学「時相論理学」が提案されてきている [Do]。

(「となる」の意味の考察)

奥津は、(20)の例を持ち出し、「ニナル」「ニスル」を述語とする文を変化文と称し、『「ダ」型文を補文とする埋め込み構造と考え』 [Oku] ている。即ち、「AはBだ」というような文を「ダ」型文といい、「なる」の深層の意味としては、変化した状態を説明する文を「ダ」型文の形で必ず持っているというのである。つまり(20)を(21)のような意味にとらえるのである。

(20) 武は医者になった。

(21) 武が(武が医者だ) になった。

ところで「医者になる」の「ニ」, 「医者となる」の「ト」は同じ「ダ」の連用形とみなし, 「トナル」「トスル」も同様に扱うことができるので, (15)の深層の意味は(22)のようになる。

(22) 被相続人の子が(被相続人の子が相続人だ)なる。

奥津は「ダ」型文の性質を種々論じている[Oku]が, (22)の場合は be の意味である。つまり「ダ」の起源が古語の「である」とみなすのである。この解釈によると, 相続人でなかった者が, 突然相続人という状態になることが明瞭になる。以上の解釈の下で, (15)を拡張格構造を使って表すと(23)となる。但し, 格標識の記号Φは, 空の格標識を意味している。これを比較のため [Su]の結果を(24)に採録する。

(23)

[なる	:	[格要素:	[格関係:	動作主格	体言句:	被相続人の子	格標識:	は]
		格要素:	[格関係:	対象格	補文:			
[である:	[格要素:	[格関係:	動作主格	体言句:	被相続人の子	格標識:	が]	
	格要素:	[格関係:	対象格	体言句:	相続人	格標識:	Φ]]]	
						格標識:	Φ]]]	
]

(24)

[なる	:	[格要素:	[格関係:	動作主格	体言句:	被相続人の子	格標識:	は]
		格要素:	[格関係:	対象格	体言句:	相続人	格標識:	と]]]

(23)(24)を比較すると, 面倒になっただけのようだが, そうではない。例えば(25)の例で表記が統一的に可能になることを示そう。(25)の表現に(26a)(26b)の2通りがあり得る。しかし(26b)では「東京から」が方向格として

「なる」を連用修飾している。ところが、「東京からなる」とは言えないので、「東京から」は「なる」に係ってはいないことがわかる。するとこの係先は「遠く」となるが「東京から」が結果格「遠く」に係ることになり、格が格を修飾するという文法的な矛盾となる。従って、(26a)のように「東京から遠い」＝「東京から遠くだ」と言えるから、こちらの解釈が正しい。

(25) 家が 東京から 遠く なった。

(26) a 家が (家が 東京から 遠い) なった。

[なる : [格要素 : [格関係 : 動作主格 体言句 : 家 格標識 : が]
 格要素 : [格関係 : 対象格 補文 :
 [遠い : [格要素 : [格関係 : 動作主格 体言句 : 家 格標識 : が]
 格要素 : [格関係 : 対象格 体言句 : 東京 格標識 : から]]]
 格標識 : Φ]
 法要素 : [法関係 : 完了時制 法標識 : た]]]

b* 家が 東京から 遠く なった。

[なる : [格要素 : [格関係 : 動作主格 体言句 : 家 格標識 : が]
 格要素 : [格関係 : 方向格 体言句 : 東京 格標識 : から]
 格要素 : [格関係 : 結果格 体言句 : 遠く 格標識 : Φ]
 法要素 : [法関係 : 完了時制 法標識 : た]]]

以上の様に、文法的な考察をしっかりとした上で翻訳をしないと、「なる」の翻訳が気ままに(26)の a や b になりかねず、同じ意味でも異なった意味に解釈されて知識ベースとして役に立たなくなるであろう。こうしたことから、自然言語からのアプローチはエキスパートシステム開発においても極めて重要なアプローチである。

参 考 文 献

- [Bre] Bresnan, J. (1982): Lexical-Functional Grammar: A Formal System for Grammatical Representation, IN "The Mental Representation of Grammatical Relations," MIT Press, 1982.
- [Do] 堂下, 西田, 三浦 (1988): 様相論理とその情報処理への応用 (I, II), 情報処理, Vol.29, No.1-2, 1988.
- [Fil] Fillmore, C. (1980): 格文法の原理, 三省堂, 1980.
- [Hay] Hays-Roth, F., Waterman, D. A., Lenat, D. B., (1983): Building Expert Systems, Addison-Wesley, 1983, (和訳) エキスパートシステム, 産業図書, 1985.
- [Ino] 井上和子 (1976): 「変形文法と日本語」, 大修館, 1976.
- [Ish] 石綿敏雄ほか (1983): 結合価から見た日本文法, 「文法と意味 I」朝倉書店, 1983.
- [Mat] Matumoto, Y. et.al (1983): BUP-A Bottom up Parser Embedded in Prolog, New generation Computing, Vol.1, No.2, 1983.
- [Mik] 三上章 (1972): 「続・現代語法序説」, くろしお出版, 1972.
- [McC] McCord, M.C. (1987): Natural Language Processing in Prolog, In "Knowledge System and Prolog," ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, INC.
- [Nil] NILS J. NILSSON (1971): "Problem-Solving Methods in Artificial Intelligence," McGRAW-HILL BOOK Co., INC., 1971. (和訳) 人工知能, コロナ社, 1973.
- [Oku] 奥津敬一郎 (1978): 「『ボクハウナギダ』の文法」, くろしお出版, 1987.
- [Per] Pereira, F.C.N, and Warren, D.H.D (1980): Definite clause grammars for Language analysis - a survey of the formalism and a comparison with augmented transition networks, Artificial Intelligence, 13, 1980.
- [Rob] Robinson, J.A. (1965): A Machine-Oriented Logic Based on the Resolution Principle, J.ACM, Vol. 12, No.1, 1965.
- [Sak] 坂井秀寿 (1979): 「日本語の文法と論理」, 勁草書房, 1979.
- [Sch] Schank, R. C. (1975): "Conceptual Information Processing," North-Holland Publishing Co., 1975.
- [Su] 杉本英二 (1990): 法律エキスパートシステムのための知識表現に関する考察, 商学討究, Vol.40, No.4, 1990.
- [Ta 1] 田中穂積 (1989): 「自然言語解析の基礎」, 産業図書, 1989.

[Tak] 田中幸吉編集 (1984): 「知識工学」, 朝倉書店, (1984).

[Tah] 田中晴美ほか (1975): 「言語学入門」, 大修館書店, 1975.