

解説



自然言語理解のための知識表現と推論—知識表現†

浮田輝彦† 木下 聡†

1. はじめに

自然言語を機械によって処理し、その内容を理解させるには、言語に関する知識とともに話題としている分野に関する知識が重要な役割をもっている。そしてこの知識とよばれるものは、具体的な項目として記憶されるものと推論機能などの操作によって導き出されるものとに分けられる。本稿では、狭義の知識として、記憶されている知識の観点から、自然言語理解に必要な各種の知識を整理し、表現方法を中心に、その取扱いを述べる。

2. 自然言語理解のための知識

2.1 自然言語理解に必要な知識

図-1 に示すように、自然言語を理解するためには、言語についての語彙や文法に関する知識と、対象となっている分野に関する知識、さらに常識が必要である。

われわれが外国語で書かれた文章を理解しようとしたときに必要な知識を考えてみると、まず基本的な語彙や文法が必要である。たとえば、われわれが学校で学ぶ英語に関する知識が、このレベルの知識といえ

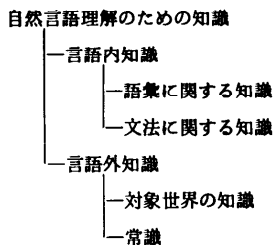


図-1 自然言語理解のための知識

† Knowledge Representation and Reasoning for Natural Language Understanding—Knowledge Representation by Teruhiko UKITA and Satoshi KINOSHITA (Toshiba Corporation, R & D Center).

†† (株)東芝総合研究所

る。このような言語に関する知識を言語内の知識と呼ぶ。

一方、ある学術分野や特定の趣味に関する文章を理解するためには、その分野における専門的な知識が必要となる。その中では、“専門的な”用語を知ることがもっとも基本的な知識として要求される。さらに、その分野で起こる事象について、どのようなことがあるのか、それはどのようなことを引き起こすのかといった分野固有の各種の因果的な関係の知識が必要になる。このような対象分野における知識、さらに常識と呼ばれる知識を言語外の知識と呼ぶ。

本稿では、言語内、言語外の知識に分けてその内容を整理した後に、言語外の知識に重点を置いて、表現方法などの取扱いを述べる。

2.2 言語内の知識

言語内の知識には、基本的な語彙に関する知識と文法に関する知識がある。

語彙に関する知識は、単語と指示対象との関係や単語間関係が基本的なものである。また文法の中における単語の働きとして、品詞や活用も語彙に関する知識に含まれる。単語から概念へのポイントや文法中での働きを記述するものに辞書がある。自然言語理解のための辞書には、文字列としての単語の表記を見出しとして、形態素レベル・構文レベルの解析に必要な品詞や活用を記述するとともに、各単語が示す概念へのポイントをもつ必要がある。たとえば、「動く」という動詞の場合、“物理的に移動する”という意味と“動作する”という二つの意味がある。このような多義の意味をもつ場合には、一つの見出しから二つの概念へのポイントが必要となる。また逆の場合もあり、同義語を機械システムで扱う場合には、細かな違いを捨て去って、複数の見出しから一つの概念へのポイントしかもたない場合もある。

単語が表す概念は、互に関係をもっており、バラバラに存在するものではない。まず、単語と単語間の制約として、格の制約と呼ばれるものがある。これ

は「食べる」の対象は「食物(有機物)」であるなどの制約である。この種の知識により、多義語の区別、たとえば、「トップに入れる」という場合、「トップ」は「会社のトップ」ではなく「車のトップギア」の意味であるといった区別などが可能となる。

さらに、単語の示す概念間の関係として意味的な近さがある。たとえば、

「すずめは人の身近で生きている。この鳥は…」

という文章で、「この鳥」がすずめを受けていることが分かるためには、「すずめ」と「鳥」との関係が必要である。このような概念レベルでの関係を整理したものの例として、意味的な近さによって、単語を分類した分類語彙表¹⁾や類義語辞典²⁾がある。しかし、これらは、単に意味的に近い語を分類しただけであり、語と語との関係は分類、整理されて記述されていない。分野を限定したときの体系づけが試みられているが、これに関しては次節で述べる。分野を限定しない一般的な単語に関しては、現在、大規模な辞書開発の一環として整理されている³⁾。

言語内の知識には、このほか形態素レベル、構文レベルの文法がある。これらは本特集の別の解説に詳細に述べられており、また知識の表現として特別な扱いは行われていないので、本稿では省略する。

2.3 言語外の知識

言語によらない知識として、対象世界の知識や常識と呼ばれるものがある。対象世界の知識は、話題となっている範囲に関する知識であり、常識は(あるコミュニティに属する)人間なら当然知っていると考えられる知識である。対象世界の知識は、対象分野における概念やそれらの関係としての出来事の関係などからなり、精密に表現される場合は、世界モデルと呼ばれる場合もある。

(1) 概念体系

ある対象の領域を決めて、話題となっている文章を理解するためには、その話題の分野における知識が必要である。この言語外の知識には、“専門分野の”語彙に関する知識と対象世界での物事の関係が知識として必要である。

対象分野での“専門用語”に関する知識は、概念的なレベルでの概念とそれらの間の関係により、表現される必要がある。また、辞書見出しからのポイントも同様に必要である。

概念間の関係付けの例として、JICST⁴⁾のソーラスがある。これは、理工学分野の専門用語約34,000語

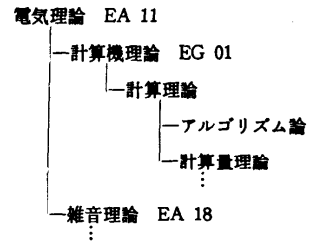


図-2 シソーラスの例⁴⁾
EA 11 などはカテゴリ番号を示す

を170の主題カテゴリに分け、その中で、各用語の関係を整理したものである。図-2にその一部を示す。JICSTのソーラスでは、上位-下位などの関係により、語と語の関係を体系的に表現している。

(2) 因果関係

対象世界での物事の関係として、出来事間の因果関係がある。たとえば、ある電気製品に関して、

「電源スイッチを入れる」

という表現があれば、これにより

「電源ランプが点灯し、番組が画面に映しだされる」

というような装置の動作が推論される。このような因果関係は、処理対象の文と文の間を理解するために必要となる。たとえば、

「電源スイッチを押した。ランプは点灯したが、画面には何も映らなかった」

という文章で、2番目の文の「ランプ」が、(複数種類ある)ランプのうち、どのランプであるのかを理解するには、上記のような因果関係に関する知識が要求される。

対象分野に関する知識は、ある特定の分野や対象においてだけ成立したり、分野によってある動作が引き起こす結果が異なったりすることがある、という性質をもつ。たとえば、同じ「電源スイッチを押す」という動作を行っても、テレビの場合は画面に番組が映し出されるであろうが、電気掃除機の場合では、モータが回転し空気を吸い取りはじめることになる。このように、分野固有の知識は、自然言語理解の対象を明確化した上で表現されている必要がある。

(3) 常識

一般に常識と呼ばれるもので、人間ならば、当然知っているかと仮定される知識がある。これは対象分野の知識の対象範囲を日常生活全般に拡大したものとして考えることもできる。常識を陽に記述するには、基本的な語彙の知識をもとに、それらの間の関係を状況ご

とに記述する必要がある。またスクリプト(3.2参照)などを常識の一種として考えることもできる。しかし、常識を取り扱う方法としては、知識を表現する立場よりも推論の立場から非単調論理の研究を中心に検討がすすめられている。

3. 知識の表現形式

本章では、自然言語理解に必要な知識がどのように表現され、利用されてきたかを整理する。

3.1 手続き的な知識表現

手続き的な知識表現とは、手続きを実現するプログラムそのものに各種の知識を埋めこんだものであり、自然言語理解においても利用されている^{5),6)}。推論機能をもったプログラミング言語を用いて、知識を記述する例としてSHRDLU⁶⁾がある。SHRDLUはPLANNER⁷⁾を用いて知識を表現し、それに基づく推論を行うことにより、図-3に示すような積木の世界に対する操作指示の文を理解する枠組みを示した。

SHRDLUにおける積木の世界は、形や色などの性質を述べたブロックの定義、ブロック間の位置関係、“ロボットの腕”が動作するための動作指定から記述されている。ブロック世界の状態を会話の推移とともに記憶し、その情報を使うことにより、入力される各種の文を理解する。入力できる文には、“find a block which is taller than the one you are holding and put it into the box”のような関係詞節や代名詞などの表現を含めることができる。これらの表現はそれぞれ専用の処理部により処理される。たとえば、上の文が入力されたときに、“ロボットの腕”がつかんでいるブロックを取り出すことにより、見つけるべきブロッ

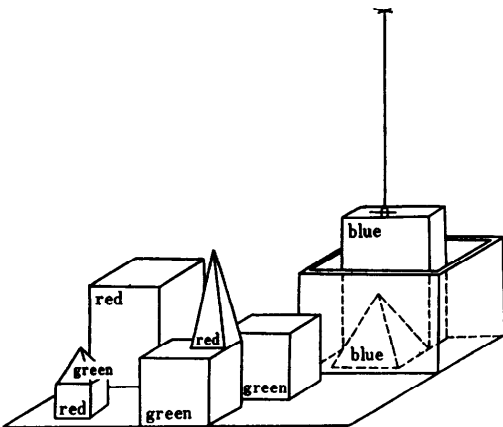


図-3 SHRDLUの積木の世界⁶⁾

クの高さの探索範囲を決めるようになっている。

このような手続き的な知識表現とネットワーク表現を代表とする宣言的な表現との優劣は、1970年代に盛んに議論された⁸⁾。しかしそれぞれ一長一短があり、有意義な結論は得られないままに、議論は中断されている。

3.2 ネットワークによる知識表現

(1) 意味ネットワーク

意味ネットワークは、1968年にQuillianによって、言葉の意味を表現するための記憶のモデルとして、最初に開発された知識の表現方法であり⁹⁾、自然言語理解システムにも利用されている¹⁰⁾。図-4のグラフ表現に示すように、ネットワークの節点と枝のラベルに情報を対応させることにより、言葉の概念とその間の関係を表す。このような概念間のネットワークを構成することにより、ある概念から、間接的であっても関連がある他の概念を取り出せることになり、連想記憶のモデルになっている。

ネットワークの枝に対応している概念間の関係は、AND、ORなどを始めとして、人にとって分かりやすい関係を定義付けすることができる。しかし意味ネットワークに表現されたものそれ自体は、単にラベルに過ぎず、表現されたネットワークを解釈する推論系を合わせて初めて本来の意味が生じる。Quillianによって提案された利用方法に、二つの節点を与えられたときに、ネットワーク中で二つの節点間の関係を取り出す方法が知られている。このような関係の抽出だけではなく、一様なネットワークでは扱いにくい表現、たとえばスコープをもった限量表現を扱うために、ネットワークを分割し、分割された部分の間でア

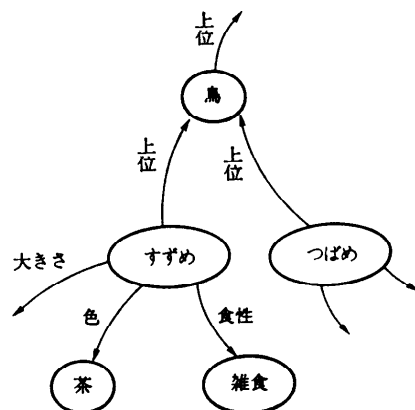


図-4 意味ネットワークの例

(太郎	(AKO (\$VALUE 人間))
(身長 (" 170 cm))	
(体重 (" 60 kg))	
(髪の色 (" 黒))	
(人間	(AKO (\$VALUE は乳類))
(身長)	
(体重)	
(髪の色)	

図-5 フレームによる概念の表現例

クセスに方向性をもたせた分割型意味ネットワーク (partitioned semantic network) が考えられている¹¹⁾。また最近では、意味ネットワークの記述にまとまりをもたせたフレーム表現がよく利用される。

(2) フレーム

フレームは、1975年に Minsky により提案された知識表現の理論である¹²⁾。図-5の表現例に示すように、各フレームは、そのフレームに記述される概念の名称を表す1個のフレーム名と、その概念に関する知識を記述するための複数のスロットからなり、個々のスロットは、さらに複数のファセットから構成される。図に示した知識では、身長や体重、髪の色というような各人間固有の性質 (属性) を表現するためのスロットが用意されている。知識をフレームで表現することの意義は、われわれは個々の概念がもつ属性や関係をあらかじめ知っていて、それらの中で未知の部分埋めるトップダウンな処理により、物事の認識を行っているという考えにある。

下位の概念に共通な性質は、上位概念のフレームに記述しておき、下位のフレームでは必要に応じてその上位のフレームに記述された知識を参照できるようにすることで、知識ベース全体の記述量を抑えることができる。このように、下位のフレームが上位のフレームに記述された知識を参照することを知識の継承 (inheritance) と呼ぶが、このような推論機能は、フレームの解釈系がこの例では AKO (A Kind Of) スロットで表現されている概念階層をたどることで実現される。

ところで、一般に推論に必要な値が不明のときに、暗黙に使用する値のことをデフォルト値 (default value) と呼ぶ。自然言語理解においても、十分な情報が得られていない対象に関する文を理解する際には、このデフォルト値の使用が有効な場合も多い。このデフォルト値の宣言は、そのためのファセットを用いて行われる。このように、個々のスロットにデフォ

ルト値を設けることで、そのクラスに属する個体の典型例 (プロトタイプ) を表現することができる。

さらに、推論や問題解決を行うために必要な手続き (プログラム) をスロットに付加しておき、スロット値の参照や設定、削除に応じてそれらの手続きを起動する枠組みも設けられている (手続きをスロットに付加することを「手続き付加 (procedure attachment)」と呼ぶ)。

フレームの特徴の一つは、知識記述のモジュラリティの良さにある。意味ネットワークでは、種々の概念に関するすべての知識が一つのネットワークとして表現されるのに対し、フレームでは、知識は、概念ごとにフレームにまとめて記述されるため、他の概念との境界が明らかである。

意味ネットワークと同様、フレームも知識を表現するための枠組みであるため、そのデータを解釈する解釈系が必要であり、FRL¹³⁾を始めとする知識表現言語が開発されてきた^{14), 15)}。また最近では、フレームで表現した知識を論理表現に変換し、推論に論理の枠組みを利用する試みもある¹⁶⁾。

フレームを利用した自然言語理解システムの代表的なものに、旅行の計画を対話によって行う GUS¹⁷⁾がある。このシステムでは、日時や目的地といった旅行に必要な項目をスロットとして用意しておき、値の埋まっていないスロットを順次利用者に質問するという形で対話を行っている。この方法は、対話の対象分野がきわめて限定されていたので、それなりの成果を納めたが、対象が大きくなると、こういった単純な方法で対話を制御することは困難になる。

(3) スクリプト

スクリプト (script)¹⁸⁾ は、Schank らによって、談話理解に必要な知識を表現するための形式として提案された。われわれは、ある出来事について述べられた事柄を理解する際、その事柄に付随して起こっていると思われる事柄も、たとえ発話されていなくとも理解することができる。それは、典型的な事象の連鎖に関する知識をもっているからであり、スクリプトは、このような知識を表現するための形式である。表現形式の点では、フレームの一種として扱われる場合も多いが、自然言語理解の側面からみた場合には、フレームでは対象分野における知識を個々の概念ごとに記述するのに対し、スクリプトではこのように典型的な事象の連鎖を表現したものであり、表現する知識の内容自体が大きく異なっている。

スクリプト：レストラン
 道具：テーブル、メニュー、食物、請求書、お金
 役割：客、ウェイト、コック、レジ係、オーナー
 適用条件：客は空腹であり、かつお金を持っている
 結果：客のお金は減り、空腹でなくなり、満足する
 オーナーのお金は増える
 シーン1：店に入る
 客はレストランに入る、テーブルに目をやる、
 すわる、テーブルを決める、…
 シーン2：注文する
 テーブルにメニューがあれば、客はメニューをとる
 (なければ、ウェイトを呼びたのむ)、
 メニューを見る、料理を選ぶ、…
 シーン3：食べる
 …

図-6 スクリプトによる表現例
 文献16)より抜粋

図-6は、スクリプトとして表現される知識の一例である。このレストラン・スクリプトは、レストランで食事する際の典型的な行動の連鎖を記述したもので、「まずレストランに入り、注文をし…」といった行動のほか、そのシーンに現れる要素や登場人物の役割、スクリプトを使用する際の前提条件、行為がすべて行われた際の結果などが記述されている。

スクリプトを利用したシステムに、新聞記事の文章を理解するシステム SAM (Script Applier Mechanism) がある。確かに人間はスクリプトのような知識をもち、これで自分の置かれた状況の中でそれにもっとも合うスクリプトを参照し、次に起こるであろう事象を予測しながら行動している面がある。しかし、SAMでの処理は、予測のみに基づいているため、その予測に合わない事象は処理できないという問題がある。その後、この問題を解決するため、スクリプトを動的に獲得する枠組みの研究¹⁹⁾や、物語の登場人物の意図を推論し、予測に合わない行動を説明しようという研究²⁰⁾などが行われている。

3.3 論理による知識表現

論理学は古来より人間の思考を表現する枠組みとして研究されてきた。論理には、命題論理に始まり多種多様の論理の体系があるが、以降特に断わりのないかぎり一階述語論理を指すものとする。

論理による知識表現では、知識は、その論理体系の公理として与えられる。その公理から推論規則を使って定理を導くことが推論となる。

論理による知識表現の特徴は、その意味論が体系として厳密に定義されているところにある。そして、知識として与えられる公理から証明できる事柄に関し、完全性や健全性が証明されているとともに、導出原理

(resolution principle)²¹⁾のような機械的証明手続きが示されており、解釈機構が確立されている。これは、データを操作する解釈機構をシステム的设计者が自由に定められるフレームシステムなどとは大きく異なる点である。また、知識の表現上の特徴として、第1に「すべてのAはBである」とか「あるAはBする」といった限量表現が可能であること、第2に「二つ以上の命題のうちどれかが成り立っている」という形の選言的な言明の取扱いが明解であることがあげられる(そういった表現が、意味ネットワークやフレームで表現できないわけではないが、容易ではない)。

最近論理表現が注目されている理由の一つは、Prolog²²⁾を代表とする論理型プログラミング言語が開発され、論理による知識表現の環境が整ってきたことによるところが大きい。しかしながら、現在のところ、形態素解析や構文解析での応用は進んでいるものの^{23),24)}、対象世界の事象に関する推論を述語論理で行うことは、これまでの処理系では処理時間の点で現実問題として利用が困難であったこともあり、大規模な知識を述語論理だけで記述した例は知られていない。

述語論理で知識を記述する際に問題となるのは、次のような点である。まず第1に、上位-下位関係や部分全体関係といった階層構造を表現するのが難しく、この結果、先のフレームによる表現に比べ、表現すべき概念ごとの知識のモジュラリティが悪いことがあげられる*。そして第2に、自然言語による表現によく現れる、様相概念や時間をともなった事柄をうまく表現できないことがある(これについては4.2参照)。また、自然言語の解釈を表現するうえで欠かせない内包を扱うことができないといった問題もある**。

エキスパートシステムにおける知識処理機構として広く使われているプロダクションシステム^{25),26)}は、人間の問題解決過程をモデル化したものであり、知識が条件と結論の組として記述されている点で、表現上は論理に近い。しかし、知識の内容は基本的に、問題解決を行うための手続きを表現したものであり、知識を宣言的に表現していないという点で、普通論理表現とは別に扱われる。

* 述語論理に階層構造を表現するための機能を付加したものととして、多ソート論理 (many sorted logic)²¹⁾ や多層論理 (many layered logic)²⁴⁾ などがある。

** 内包を扱う論理として内包論理²⁷⁾がある。

4. 最近の研究動向

4.1 マルチパラダイムによる知識の扱い

前章で述べたように、意味ネットワークによる知識表現では、論理的な言明の表現が難しいなどの問題点があり、論理表現では、階層的知識の表現が難しいなどといった問題があった。このような理由から、対象世界の多種多様な知識を、一つの表現形式だけで表現するのは困難であり、それらの表現形式を組み合わせることでそれらの特徴を活かした知識表現が行われるようになってきた。このことは、複数の知識表現パラダイムを用いるという意味で、マルチパラダイムであるとかハイブリッドな知識表現と呼ばれる。知識処理システム向けのエキスパートシステム構築用ツールもこの傾向にある。

マルチパラダイムによる知識表現の先駆的システムは Krypton³⁰⁾ で、図-7 は、そこでの知識表現の概略を示したものである。Krypton では、知識は TBOX と ABOX と呼ばれる二つの部分により構成される。TBOX における表現は、意味ネットワークを用いて行われており、語彙によって表現される概念固有の知識や、概念間の包含関係などが記述される。それに対し、ABOX には、TBOX によって表現されている各概念を用いて構成される論理的な言明を記述するのに用いられる。

Krypton 以降同種の知識表現システムとして、KL-TWO³¹⁾ や SPHINX³²⁾ といったシステムが開発されている。フレームとルールにより、対象分野の知識を表し³³⁾、それを使って会話文を理解する対話システムの研究も行われている³⁴⁾。

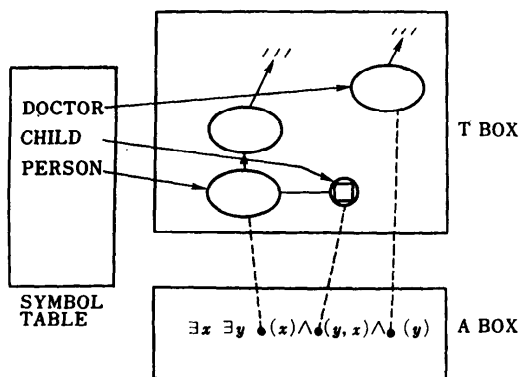


図-7 Krypton による表現の枠組み
文献 24) より引用

4.2 拡張された論理による知識の表現

(1) 様相論理

ある命題で表現される事柄が、注目している一つの世界（たとえば現在の世界）で成り立つだけでなく、どのような世界でも常に成り立つとき、その命題は必然的に真であるという。そのような必然性や偶然性、可能性といった概念は様相概念* と呼ばれ、これらの概念をともなった命題を形式的に扱うことができる論理を様相論理³⁵⁾と呼ぶ。

3.3 で述べた古典論理と様相論理との最大の違いは、古典論理ではある注目する一つの世界において成り立っている関係を表示したり推論するのに対し、様相論理ではさまざまな世界の存在が仮定されており、これらの世界間に成り立つ関係（たとえば推移性や反射性）の違いによって異なる論理体系として定義される。

時制論理 (tense logic) は、時間軸上での出来事の生起に関する必然性や可能性の概念が、様相論理における必然性や可能性の概念として捉えることができることから、様相論理の一つとして研究されてきた。この論理における時間の形式化は、時間に関してわれわれがもっている素朴な観念の一面をうまく表しているといえる。

自然言語で表現される命題には実際種々の様相概念が含まれているため、意味論の観点からみた様相論理の重要性は大きい。しかしながら、知識表現の点では、プログラムの検証や合成の手段として利用されている例もあるが、この論理で記述した知識を自然言語理解に応用している例は少ない。

(2) 時間論理

時制論理が、離散した世界での時間的な概念を扱っているのに対し、時間論理 (temporal logic) では、命題に対し陽にその命題の成り立つ時刻や時区間をパラメータとして付加した表現を採用して形式化を進めている³⁶⁾⁻³⁸⁾。この論理は、状態が動的に変化する対象をモデル化して、それを表現する場合には必要不可欠である。

(3) 非単調論理

知識を表現すべき対象が多くなると、必ず問題となるのが「例外」の扱いである。この種の不完全な知識を扱う方法として、フレーム表現でデフォルト値を利用して表現する方法を紹介した。最近では論理の枠組

*ここで述べた様相概念は、真理様相と呼ばれるもので、このほかにも「知っている」とか「しても良い」といった認識様相や規範様相といった種々の様相概念がある。

みでも、そういった不完全な知識を扱うための定式化が試みられている^{39)~41)}。その代表例が非単調論理 (non-monotonic logic) である。

これまで述べてきた論理では、自分が知っている事実 (公理) から証明できる事柄 (定理) は完全であり、その正しさは常に保証されているため、公理が増加するとそれにともなって定理も単調に増加するという性質をもつ。それに対し、非単調論理では、公理が増加しても定理がそれにともなって単調に増加するとはかぎらない。

たとえば、「たいていの鳥は飛ぶ」という知識を非単調論理では、次のように表現する。

$$\forall x \text{ bird}(x) \wedge M\text{fly}(x) \rightarrow \text{fly}(x)$$

ここで M は様相記号といい、 Mp が真となるのは、命題 p の否定が証明できない場合である。したがって、上記の論理式は、「 x が鳥であって、飛べないという事実が分かっているならば、飛べるものとみなす」という知識を述べているのである。この知識を用いると、鳥であると分かっているある動物について話をしているときに、ペンギンなどのように生まれながらにして飛べないとか、羽根にけがをしていて飛べないというように、例外であることが分からないかぎり、とりあえず飛べるものとして話を進め、後になって、もし飛べないということが事実として分かった場合には、先ほどの仮説に基づいて推論した部分をやりなおすといったことが必要になる。

このような推論は、われわれ人間がまさに日常行っている推論の一つであり、言語理解の過程における推論をモデル化するうえでの利用が期待される。

5. おわりに

本稿では、自然言語理解に必要な知識の内容と、知識の表現に用いる表現形式およびその最近の研究動向について概観した。これまでの自然言語理解においては、比較的狭い範囲に対象分野を限定したうえで、その分野に関する文章や対話を理解させることを目的として研究が行われてきた。そのため、表現されていた知識自体もそれに応じて対象分野に依存した小規模のもので、表現形式としては古典的ともいえる意味ネットワークやフレームなどが利用される場合が多かったといえる。今後、自然言語理解の適用範囲を拡げていくには、これまでのような対象分野固有の概念に関する知識に加え、より広い範囲の概念に関する知識、すなわち、常識と呼ばれるような知識を表現していく必要

がある。表現形式の点からは、前章で述べたように、表現すべき知識の性質に応じた表現形式を組み合わせることで知識を表現するマルチパラダイム化の傾向は当然の流れであろう。また、拡張された論理として紹介した種々の論理で扱われているような様相や時間などの概念に関する知識や不完全な知識を表現し、それを理解に役立てていく必要性も大きくなると思われる。しかしながら、そういった知識をいかに収集するかといった知識獲得の問題や、それらの種々の知識を自然言語理解の過程でいかに効率良く使用するかといった利用面での問題など、解決すべき問題も多く、今後の研究の発展が期待される。

参考文献

- 1) 国立国語研究所：資料集 6 分類語彙表，秀英出版 (1964)。
- 2) 大野 晋，浜西正人：類義語国語辞典，角川書店 (1985)。
- 3) 横井俊夫：日本語の情報化技術 6, bit, Vol. 21, No. 7 (1989)。
- 4) 日本科学技術情報センター：JICST 科学技術用語シソーラス，1975年第1版 (1975)。
- 5) Winograd, T.: Understanding Natural Language, Academic Press (1972) (淵, 田村, 白井訳：言語理解の構造，産業図書 (1976))。
- 6) 長尾, 辻井, 田中：意味及び文脈情報を用いた日本語文の解析一名詞句・単文の処理—および一文脈を考慮した処理—, 情報処理, Vol. 17, No. 1 (1976)。
- 7) Hewitt, C.: PLANNER: A Language for Proving Theorems in Robots, Proc. 2nd IJCAI (1972)。
- 8) Winograd, T.: Frame Representation and the Declarative-Procedural Contraversy, in Bobrow and Collins (Eds.) Representation and Understanding, Academic Press (1975)。
- 9) Quillian, M.R.: Semantic Memory, in M. Minsky (Ed.) Semantic Information Processing, The MIT Press (1968)。
- 10) Carbonell, J.R.: AI in CAI: An Artificial-Intelligence Approach to Computer-Assisted Instruction, IEEE Trans. Man-Machine Systems, Vol. MMS-11, No. 4, pp. 190-202 (1970)。
- 11) Hendrix, G.G.: Expanding the Utility of Semantic Networks through Partitioning, Proc. 5th IJCAI (1977)。
- 12) Minsky, M.: A Framework for Representing Knowledge, in Winston, P.H. (Ed.) The Psychology of Computer Vision, McGraw-Hill (1975) (白井, 杉原訳：コンピュータビジョンの心理，産業図書 (1979))。

- 13) Goldstein, I. R. and Roberts, R. B.: Nudge, a Knowledge-based Scheduling Program, Proc. 5th IJCAI, pp. 257-263 (1977).
- 14) Bobrow, D. G. and Winograd, T.: An Overview of KRL a Knowledge Representation Language, Cognitive Science, Vol. 1, No. 1, pp. 3-46 (1977).
- 15) Stefik, M.: An Examination of a Frame-Structured Representation System, Proc. 6th IJCAI, pp. 845-852 (1979).
- 16) 田中穂積, 小山晴生, 奥村 学: 知識表現形式 DCKR とその応用, コンピュータソフトウェア, Vol. 3, No. 4, pp. 12-20 (1986).
- 17) Bobrow, D. G., Kaplan, R. M., Kay, M., Norman, D. A., Thompson, H. and Winograd, T.: GUS, A Frame-Driven Dialog System, Artificial Intelligence, Vol. 8, pp. 155-173 (1977).
- 18) Schank, R. C. and Abelson, R. P.: Scripts, Plans, Goals and Understanding, Lawrence Erlbaum (1977).
- 19) Schank, R. C.: Language and Memory, Cognitive Science, Vol. 4, pp. 243-284 (1980).
- 20) Wilensky, R.: Planning and Understanding, Addison-Wesley (1983).
- 21) Robinson, J. A.: Logic: Form and Function, Edinburgh University Press (1979).
- 22) Colmeraure, A.: Metamorphosis Grammar, in Bolc (Ed.), Natural Language Communication with Computers, Springer-Verlag, pp. 133-190 (1978).
- 23) Pereira, F. and Warren, D.: Definite Clause Grammar for Language Analysis—A Survey of the Formalism and a Comparison with Augmented Transition Networks, Artificial Intelligence, Vol. 13, pp. 231-278 (1980).
- 24) Sugimura, R., Hasida, K., Akasaka, K., Hatano, K., Kubo, Y., Okunishi, T. and Takizuka, T.: A Software Environment for Research into Discourse Understanding Systems, Proc. of FGCS '88, pp. 285-295 (1988).
- 25) Cohn, A. G.: Improving the Expressiveness of Many Sorted Logic, Proc. of AAAI '83, pp. 84-87 (1983).
- 26) 大須賀節雄: 多層論理—モデル記述の為の述語論理, Proc. of the Logic Programming Conference '83, 4.1 (1983).
- 27) Montague, R.: The Proper Treatment of Quantification in Ordinary English, in Thompson, R. H. (Ed.), Formal Philosophy, Yale University Press (1974).
- 28) Newell, A. and Simon, H. A.: Human Problem Solving, Prentice-Hall (1972).
- 29) 小林重信: プロダクションシステム, 情報処理, Vol. 26, No. 12 (1985).
- 30) Brachman, R. J. and Levesque, H. J.: KRYPTON: A Functional Approach to Knowledge Representation, IEEE Comput., Vol. 16, No. 10, pp. 67-73 (1983).
- 31) Vilain, M.: The Restricted Language Architecture of a Hybrid Representation System, Proc. 9th IJCAI, pp. 547-551 (1985).
- 32) Han, S. and Cho, J. W.: Sphinx—A Hybrid Knowledge Representation System, Proc. of FGCS '88, pp. 1211-1220 (1988).
- 33) 木下, 佐野, 浮田, 住田, 天野: 文脈理解のための知識の表現と推論, Proc. of the Logic Programming Conference '88, 12.2 (1988).
- 34) Ukita, T., Sumita, K., Kinoshita, S., Sano, H. and Amano, S.: Preference Judgement in Comprehending Conversational Sentences Using Multi-Paradigm World Knowledge, Proc. of FGCS '88, pp. 1133-1140 (1988).
- 35) Hughes, G. E. and Creswell, M. J.: An Introduction to Modal Logic, Hethuen and Co. Ltd. (1968) (三浦, 大浜, 春藤訳: 模相論理入門, 恒星社 (1981)).
- 36) McDermott, D.: A Temporal Logic For Reasoning About Processes and Plans, Cognitive Science, Vol. 6 (1982).
- 37) Allen, J. F.: Towards a General Theory of Action and Time, Artificial Intelligence, Vol. 23 (1984).
- 38) Kowalski, R. and Sergot, M.: A Logic-Based Calculus of Events, New Generation Computing, Vol. 4 (1986).
- 39) Hanks, S. and McDermott, D.: Nonmonotonic Logic and Temporal Projection, Artificial Intelligence, Vol. 33 (1987).
- 40) Reiter, R.: A Logic for Default Reasoning, Artificial Intelligence, Vol. 13 (1980).
- 41) McCarthy, J.: Circumscription—A Form of Non-Monotonic Reasoning, Artificial Intelligence, Vol. 13, pp. 27-39 (1980).
- 以下の文献もあわせて参考にされたい。
- 42) 特集計算言語学, 情報処理, Vol. 27, No. 8 (1986).
- 43) 特集知識工学, 情報処理, Vol. 26, No. 12 (1985).
- 44) 長尾 真, 淵 一博: 論理と意味, 岩波書店 (1983).
- 45) 辻井潤一: 知識の表現と利用, 昭晃堂 (1987).
- 46) 特集非標準論理とその応用, 情報処理, Vol. 30, No. 6 (1989).

(平成元年6月7日受付)