

# 自然言語処理に向けた記号論理体系

小 松 香 爾

## 1 はじめに

人工知能の研究全般に対し、実問題からは程遠い、いわゆる「トイプロブレム」だけを扱ってきたという批判がある。しかし、トイプロブレムさえ扱えないならば、実問題を解くことは不可能である。その意味では、トイプロブレムを解くことは無意味ではない。実際、ファジー理論、ニューラルネットと機械学習、サポートベクターマシン、強化学習など、実用化された非記号的な人工知能の基礎技術はいくつかある。それに対し、実用化された記号的な人工知能は、一部のエキスパートシステムしかない。人工知能の研究の初期段階に、人工知能プログラミング言語としてLispとPrologが開発されたが、現在、それらのプログラミング言語を利用した研究は非常に少なくなっている。記号的な人工知能に関しては、日本における第五世代コンピュータプロジェクト以降は、目立った研究はない。その主な理由は、「記号的な人工知能ではトイプロブレムしか扱えない」ということが、研究者の共通認識になったからである。なお、現在、インターネットでは、人間と対話するプログラムがあちこちのサイトに置かれているが、全て人工無能である。人工無能は、人間の入力を元に、予め登録されている語句を混ぜて回答文を生成するものである。オウム返しが露骨にならないように、マルコフ連鎖や、会話のログを利用するものなど、様々な工夫がなされている。人工無能は、実用化されている記号処理システムといえるが、推論エンジンを組み込んだものは未だに登場していない。

人工知能研究の初期には、「世界の全ての事象は記号で置き換えることができ、記号を操作することによって事象が説明できる」という物理記号システム仮説が提唱された。この仮説に従えば、一旦、事象を記号化すれば、記号の持つ意味をまったく考えずに記号操作のみで推論ができることになる。当時は、チューリング・テストに合格する「強い人工知能」の実現の可能性が信じられていた。確かに、事象を記号化した後の推論に関しては、記号論理の推論規則を利用すれば、計算機上で機械的に実行できる。古典論理の推論規則は、人間の推論からかけ離れているが、ファジー推論、確率推論、非単調推論、サーカムスクリプションなどによって、推論規則の見直しが行われてきた。一方、現実の事象を、記号論理で記述することは、二つの理由で非常に難しい。一つは、記号論理で記述可能な事象の範囲が、明らかに狭すぎることであり、もう一つは、論理式への変換自体が困難であることである。前者の問題に関しては、様相論理から発展した「知識と信念の論理」などが提案された。しかし、後者の問題に関しては、

過去の研究では、顧みられることが少なかった。人間の常識的な知識を記述する CYC プロジェクト [1], XML をベースとする Web オントロジ [2] など、最近の研究においても、知識の記号への変換は、人手で行っている。

本論文では、知識から記号への変換の容易性に重点を置いたフレーム構造論理の拡張体系を提案する。変換する知識の対象は、自然言語で書かれた文とする。近年のインターネット、および WWW の急激な普及によって、デジタル化された文書が急増した。しかし、デジタル文書から、知識ベースに自動的に変換する技術は実用化されていない。本論文では、体系 FS1 [3] に固有名詞の性質を持つ固体オブジェクトを導入し、体系 FL を構築する。2 節で、知識表現に用いられる記号論理を概観し、3 節で FL の表記法を定義する。4 節では、FL の公理と公理に基づく具体的な推論を提示する。

## 2 記述言語としての記号論理

記号論理学と計算機の関係は密接である。命題論理を代数化したブール代数は、19世紀から研究されてきた。ブール代数は、命題論理を代数化した体系であり、電子計算機登場以前の19世紀から研究されてきた。電子計算機のデジタル回路はブール代数によって記述されている。したがって、記号論理学は、計算機の理論的な基礎であると言える。また、Lisp や Prolog などのプログラミング言語は、それぞれ、高階論理、述語論理がベースとなっている。Prolog に関しては、後に、論理プログラミングという一大分野が形成された。特に帰納論理プログラミングによる帰納推論は、人工知能研究において重要な位置を占める。帰納論理プログラミングは、データからの関連性の抽出した上で、分類問題を解決する。したがって、今日の重要な研究課題であるデータマイニングの一手法とみなせる。述語論理の計算機科学への貢献はこれだけではない。他に代表的なものは、知識表現における貢献である。実際、これまでの、形式論理を用いた知識表現の研究のほとんどは、述語論理をベースとしている。さらに、意味ネットワークをはじめとする論理体系以外の知識表現形式でも、述語論理のサブセットを用いる場合がほとんどである。知識表現において、記号論理を用いる利点は、計算機による自動的な推論が可能であることである。記号的な人工知能の研究は下火になったにも関わらず、最近の人工知能の代表的な教科書において、いまだに記号論理に多くのページが割かれているのは、この利点があるからである。

記号論理には大きく分けて、命題論理と述語論理が存在する。命題論理には、取り扱いが容易で、決定手続きが存在するという利点がある。しかし、その反面、自然言語的な知識を表現するには、あまりにも記述力が貧弱である。なぜなら、命題論理では、「命題 (文) どのの関係」しか記述できないからである。フレーゲは、命題論理の枠組みに、「変数」、「関数」、「限量子」など、数学的な方法論を導入し、述語論理の枠組みを構築した。述語論理の登場により、命題論理では不可能であった「命題 (文) の中身」が記述できるようになった。また、述語論理の体系は、記述力が高いだけでなく、緻密でもある。実際に、フレーゲは、「概念

記述に関する様々な誤解は、人間が使用する言語の不完全さによって生じる」という信念を持ちつつ、数学全体を述語論理で記述するという大作業を試みた。その試み自体は失敗するが、数学の形式論理による記述という目標は、ラッセルの「プリンキピア・マテマティカ」で実現された。

数学的な知識の記述には、述語論理は適している。しかし、人工知能で取り扱う問題は、必ずしも数学的に記述できるとは限らない。人間の知識は、むしろ、自然言語によって記述されることが多い。たとえ数学的に記述できる場合でも、まず、自然言語で記述してから、あらためて、数学的なモデルに書き換えることが多い。したがって、知識表現用の記述言語には、自然言語からの変換が容易であることが、強く求められる。これまでに、自然言語から記号論理の論理式への自動変換を計算機で実現した研究はなかった。

### 3 FLの構文

本節ではフレーム構造論理の体系FLの概要を説明する。フレーム構造論理は、自然言語を記述するために構築された記号論理の体系である。以下に、自然言語の固有名詞を表現できるように拡張したフレーム構造論理の体系FLを簡単に記述する。

#### 3.1 体系FLの構文

##### (1) 基本記号

- [1] 属性名： $l_1, l_2, \dots$
- [2] オブジェクト記号： $\pi, \varepsilon, a, b, c, \dots$
- [3] 固体記号： $i, j, k, \dots$
- [4] オブジェクト演算子： $\cdot, \_$
- [5] オブジェクト関係記号： $<, /, \text{En}$
- [6] 論理記号： $\Rightarrow, \sim$

オブジェクト記号のうち $\pi$ を全称オブジェクトと呼ぶ。 $\varepsilon$ を空オブジェクトと呼ぶ。直感的には、前者は「あらゆる概念を包含する概念」、後者は「なんの概念も含まない概念」を表す。論理記号は命題論理で用いられる含意( $\Rightarrow$ )と否定( $\sim$ )である。

##### (2) オブジェクト

- [1]  $t$ がオブジェクト記号であるとき、 $t$ はオブジェクトである。
- [2]  $t$ が固体記号であるとき、 $t$ はオブジェクトであり、特別に固体オブジェクトと呼ぶ。
- [3]  $a$ がオブジェクトであるとき、 $\underline{a}$ はオブジェクトである。
- [4]  $\alpha, \beta$ がオブジェクトであるとき、 $(\alpha \cdot \beta)$ はオブジェクトである。
- [5]  $t$ がオブジェクト記号であるとき、 $t[\text{ap}1, \dots, \text{ap}n]$  ( $n$ は1以上)はオブジェクトである。各 $\text{ap}i$ は以下のいずれかの形をしたものである。

- ①  $L \rightarrow \alpha$
- ②  $L \rightarrow \{\alpha_1, \dots, \alpha_n\}$

$$\textcircled{3} \quad L \leftarrow \{a_1, \dots, a_n\}$$

ただし、上記で $a$ はオブジェクト、 $\{a_1, \dots, a_n\}$ はオブジェクトの集合、 $L$ は属性名を表すものとする。①を固有属性対、②を集合属性対、③を全称属性対と呼び、 $[a_1, \dots, a_n]$ を属性リストと呼ぶ。

(3) オブジェクト関係

$a, \beta$ がオブジェクトであるとき、以下はオブジェクト関係である。

$$[1] a < \beta$$

$$[2] a / [a_1, \dots, a_n]$$

$$[3] \text{En}(a)$$

直感的な意味は、 $[1]$ は「 $a$ は $\beta$ である」、 $[2]$ は「 $a$ は $[a_1, \dots, a_n]$ という性質を持つ」、 $[3]$ は「 $a$ に対応する概念が存在する」である。

(4) 論理式

$[1] P$ がオブジェクト関係のとき、 $P$ は論理式である。

$[2] P, Q$ が論理式のとき、 $(P \Rightarrow Q), \sim(P)$ は論理式である。

ただし、論理記号「 $\wedge, \vee, \Leftrightarrow$ 」は、命題論理と同様に「 $\Rightarrow$ 」と「 $\sim$ 」から定義する。

### 3.2 体系 FL の拡張記法

以下の(1)で選言的オブジェクト演算子“ $:$ ”，(2)でオブジェクト間の等価関係を表すオブジェクト関係“ $=_o$ ”，(3)で属性リストの否定を表す“ $[a_1, \dots, a_n]$ ”がメタ記号として定義される。

【定義3.1】

$$(1) \quad (a : \beta) \stackrel{\text{def}}{=} (a \cdot \beta)$$

$$(2) \quad a =_o \beta \stackrel{\text{def}}{=} a < \beta \wedge \beta < a$$

$$(3) \quad a / [a_1, \dots, a_n] \stackrel{\text{def}}{=} a < \pi[a_1, \dots, a_n]$$

### 3.3 体系 FL のオブジェクト

以下にオブジェクトの具体例を挙げる。(1)は「組織」、(2)は「組織で無いもの」、(3)は「組織でありかつ法人であるもの」、(4)は「企業と法人」、(5)は、「少なくとも、財務省と、国土交通省に関係がある、大規模な企業」を表す。

(1) 組織

(2) 組織

(3) (企業・法人)

(4) (企業：法人)

(5) 企業 [関係省庁  $\rightarrow$  {財務省, 国土交通省}, 規模  $\rightarrow$  大]

### 3.4 体系 FL のオブジェクト関係

以下にオブジェクト関係の具体例を挙げる。(1)は「企業は組織である」、(2)は「組織で無いものは企業ではない」、(3)は「トヨタは規模が大きい企業法人である」、(4)は「トヨタの規模は

大きい], (5)は, 「トヨタの規模は小さくない」を表す。(6)は, 「主要な自動車メーカーはちょうどトヨタ, ホンダ, ニッサンである」を表す。

- (1) 企業<組織
- (2) 組織<企業
- (3) トヨタ<(企業・法人) [規模→大]
- (4) トヨタ/[規模→大]
- (5) トヨタ/[規模→小]
- (6) 主要自動車メーカー=0 (トヨタ:ホンダ:ニッサン)

#### 4 FLの公理体系

体系FLの公理, 推論規則, 定理を定義し, 具体的な推論例を提示する。

##### 4.1 体系FLの図式, 推論規則, 定理

体系FLの公理, 推論規則, 定理を以下に定義する。ここで,  $t$ は任意のオブジェクト記号あるいは固体記号,  $\alpha, \beta, \gamma$ は任意のオブジェクト,  $\phi$ は任意の固体オブジェクト,  $L$ は任意の属性名,  $ap_i$ は任意の属性対,  $[ap_1, \dots, ap_n]$  ( $n > 0$ )は任意の属性リスト,  $P, Q$ は任意の論理式を表す。

- (1) 公理図式
  - [1] 命題論理の公理
  - [2]  $\alpha < \pi$
  - [3]  $\alpha < \alpha$
  - [4]  $\alpha < \beta \wedge \beta < \gamma \Leftrightarrow \alpha < \gamma$
  - [5]  $\pi / [L \rightarrow \{\}]$
  - [6]  $\alpha / [L \rightarrow \{\beta\}] \wedge \beta < \gamma \Rightarrow \alpha / [L \rightarrow \{\gamma\}]$
  - [7]  $\alpha < (\beta \cdot \gamma) \Leftrightarrow \alpha < \beta \wedge \alpha < \gamma$
  - [8]  $\alpha / [L \rightarrow \{\beta_1, \dots, \beta_n\}] \Rightarrow \alpha / [L \rightarrow \{\beta_1\}] \wedge \dots \wedge \alpha / [L \rightarrow \{\beta_n\}]$
  - [9]  $\alpha < t[ap_1, \dots, ap_n] \Leftrightarrow \alpha < t \wedge \alpha / [ap_1] \wedge \dots \wedge \alpha / [ap_n]$
  - [10]  $\alpha < \beta \Rightarrow L(\alpha) < L(\beta)$
  - [11]  $L(\alpha) < L(\pi[L \rightarrow \{\pi\}] \cdot \alpha)$
  - [12]  $\alpha / [L \rightarrow \{\beta\}] \Rightarrow \alpha / [L \rightarrow \{L(\alpha) \cdot \beta\}]$
  - [13]  $\alpha < L(\beta) \Rightarrow \alpha < L(\pi[L \rightarrow \{\alpha\}] \cdot \beta)$
  - [14]  $\alpha / [L \rightarrow \beta] \Rightarrow L(\alpha) < \beta \wedge \alpha / [L \rightarrow \{\beta\}]$
  - [15]  $L(\alpha) < \beta \wedge \alpha / [L \rightarrow \{\gamma\}] \Rightarrow \alpha / [L \rightarrow \beta]$
  - [16]  $L(\alpha) < \beta \Rightarrow (\pi[L \rightarrow \{\pi\}] \cdot \alpha) / [L \rightarrow \beta]$
  - [17]  $En(t)$
  - [18]  $\alpha / [L \rightarrow \{\beta\}] \wedge En(\alpha) \Rightarrow En(\beta)$

$$[19] \text{En}(L(a)) \Rightarrow \text{En}(a)$$

$$[20] \text{En}(a) \wedge a < \beta \Rightarrow \text{En}(\beta)$$

$$[21] \sim \text{En}(a) \Rightarrow a < \beta$$

$$[22] \pi / [L \leftarrow \{\}]$$

$$[23] a / [L \leftarrow \{\beta\}] \wedge \gamma < \beta \Rightarrow a / [L \leftarrow \{\gamma\}]$$

$$[24] a / [L \leftarrow \{\beta_1, \dots, \beta_n\}] \Rightarrow a / [L \leftarrow \{\beta_1\}] \wedge \dots \wedge a / [L \leftarrow \{\beta_n\}]$$

$$[25] \text{En}(a) \wedge a / [L \leftarrow \{\beta\}] \Rightarrow \beta < L(a)$$

$$[26] \text{En}(\beta) \wedge a / [L \leftarrow \{\beta\}] \Rightarrow a / [L \rightarrow \{\beta\}]$$

$$[27] \sim \text{En}(a) \Rightarrow \pi / [L \leftarrow \{a\}]$$

$$[28] \varepsilon < a$$

$$[29] a \cdot \underline{a} < \varepsilon$$

$$[30] \sim (\phi < \varepsilon) \wedge (\phi < a \vee (\phi \cdot a) < \varepsilon)$$

$$[31] a < \pi[L \rightarrow a] \Leftrightarrow a < \pi[L \rightarrow \{a\}] \cdot \pi[L \rightarrow \{a\}]$$

## (2) 推論規則

P と  $P \Rightarrow Q$  から Q を導く。

## (3) 定理

公理あるいは定理に推論規則を有限回適用して得られる論理式。

### 4.2 体系 FL の特徴

公理に命題論理の公理を含んでいること、およびオブジェクト関係の存在により、記述能力は命題論理よりは高い。固体変数、量子が存在しないため、述語論理の記述能力よりは低い。しかし、その半面、自然言語からの変換の容易性という点では、述語論理より有利である[4]。本論文で最も重要な拡張は「固体」の取り扱いである。「固体」は自然言語では「固有名詞」であり、自動要約の際に「固有名詞」は特別扱いされることが多い。形態素解析においても、「固有名詞」が「普通名詞」と区別されている。述語論理では、固体変数がそのまま「固体」を表すが、フレーム構造論理は、オブジェクトが単位であるため、固体の導入は、それほど自明なことではない。4.1の(1)の公理[31]が、固体オブジェクトに関する公理であり、4.3で固有名詞が表現できていることを示すため、実際に公理を使った推論例を挙げる。

### 4.3 体系 FL での具体的な推論例

以下で“自動車メーカー”、“大企業”をオブジェクト，“トヨタ”“ホンダ”“ニッサン”“光岡”をオブジェクト，“アイシン精器”“愛知県”を固体オブジェクト，“取引先”，“所在地”を属性名とする。(1)の(a)~(d)の前提に，4.1の公理を適用することにより，(2)の結論が導かれる。

#### (1) 前提

(a) 自動車メーカー = o (トヨタ : ホンダ : ニッサン : 光岡)

(b) アイシン精器 / [取引先 → 自動車メーカー]

- (c) アイシン精器/[取引先→大企業 [所在地→ {愛知県}]]
- (d) ホンダ/[所在地→ {愛知県}]
- (e) ニッサン/[所在地→ {愛知県}]
- (f) ~ (光岡<大企業)

(2) 結論

アイシン精器/[取引先→トヨタ]

## 5 まとめ

フレーム構造の拡張体系 FL を提案した。記号論理による記述のメリットは、論理式を記述した時点で、推論まで可能であるという点にある。しかし、知識を論理式で記述しにくい場合、知識の入力は人手に頼るしかない。体系 FL は、自然言語からの変換の容易性があり、かつ自然言語の固有名詞を表現できる拡張体系である。

## 参考文献

- [1] Lenat, D. B.: *CYC a large-scale investment in knowledge infrastructure*, Communications of the ACM, Vol.38, No.11, pp.33-38 (1995).
- [2] 浦本直彦: Web における情報統合, 情報処理, Vol.44, No.7, pp.707-712 (2003).
- [3] 小松香爾, 西原典孝, 堀越浩司: 多様な属性関係を表現できるフレーム構造論理の拡張体系, 第12回情報基礎論シンポジウム (2000)
- [4] 小松香爾: フレーム構造論理を用いた XML からの知識ベースの構築, 文京学院大学経営論集, Vol.14, No.1, pp.127-138 (2004).