

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

山形大学工学部電子情報工学科

小松 香爾 Koji KOMATSU

西原 典孝 Noritaka NISHIHARA

堀越浩司 Koji HORIKOSHI

従来、計算機上で知識を表現し、推論を実行するための土台として、命題論理や述語論理が用いられてきた。命題論理は命題構造を一切持たないため、接続関係以外は、自然言語文の構造を記述できない。また、述語論理は、命題を述語、関数、変数および限量子を用いて記述するが、記述能力の高さとの引き替えに、自然言語文の構造との対応が非常に取りづらくなっている。これは、電子コーパスからの自動的な知識ベース構築などの際に、ボトルネックになりかねない問題である。そこで我々は、自然言語文の構造表現に特化した命題構造を持つ、フレーム構造論理を提案した。フレーム構造論理では、自然言語の複合名詞に相当する複合オブジェクトを、オブジェクトと属性関係を要素として組み立てる。本論文では、属性名を関数名とする属性関数を新たに導入することにより、属性値をオブジェクトとして取り扱うことを可能にする。また、基本体系では東上に定義されていた意味論を、集合上に定義しなおすことにより、限量がついた属性関係の取り扱いも可能にする。さらに、このような拡張体系を公理体系 FS1 として構築する。

1. はじめに

自然言語は人間が知識を表現する際に用いる記号体系であるが、表現の自由度の高さ、多義性、曖昧性などの要因により、機械的な推論には適さない。それゆえ、計算機上の知識表現および推論の枠組みとして、主に述語論理が用いられてきた。述語論理は概念間の関係や複合概念を、個体集合上の関係として記述する体系である。例えば「風邪の学生」を述語論理的に解釈すると、風邪という性質を満たす集合と、学生という性質を満たす個体集合の積集合になる。一方、自然言語では「風邪」は「学生」に係る修飾語であり、「風邪」は「学生」が持つ属性として解釈される。このように、自然言語の意味記述法は、単語の係り受け関係に基づいているため、個体を前提とした述語論理の意味記述法とのギャップは大きいといえる。実際に、自然言語の文には、述語論理における個体変数に相当するものは存在しない。

一方、論理以外の知識表現法として、意味ネットワークが挙げられる。意味ネットワークの特徴は、概念間の関係を、ノード間のリンクを用いて構造的に記述できることにある。自然言語の意味記述法と対比すれば、ノードを単語、リンクを係り受け関係と見なすことができる。ところが、意味ネットワークは意味論が手続き的であり、表現可能な知識や推論の範囲が厳密には定まらない。特に、否定や限量が絡む知識に対して、厳密な推論が可能な意味ネットワークはこれまで提案されていない。

上記のような観点から、我々は複合概念の構造的表

現が可能で、かつ直言の意味論が存在するフレーム構造論理¹⁾を提案した。これまで、標準的な命題論理と一階述語論理以外に、様々な論理体系が提案されている。これらの非標準論理は、知識と信念の論理²⁾、時相論理³⁾等の新たな様相演算子を導入するタイプと、直観主義論理⁴⁾、多値論理⁵⁾、関連論理⁶⁾等の論理演算子の解釈が標準論理と異なるタイプに分類できる。ところが、いずれのタイプの非標準論理も、命題自体の構造は標準論理と同じである。命題論理の命題には一切の内部構造が存在せず、述語論理では、命題は個体変数と述語記号をもとに記述される。フレーム構造論理は、自然言語的な意味表現に特化した命題構造を持つ論理体系であり、以下の特徴がある。

- 複合概念をオブジェクトとして構造的に記述する。
- 概念間の関係を半順序関係と属性対で表現する。
- 公理体系に個体変数が現れない。

本論文では、フレーム構造論理の記述能力を高めるため、新たな属性関係を導入し、これを拡張体系 FS1 という公理的体系として構築する。

既存のフレーム構造論理の基本体系¹⁾では、「カーマニアはある車が好きである」等の特称限量の属性関係は扱えるが、「カーマニアは全ての車が好きである」等の全称限量の属性関係が扱えない。本論文では、「カーマニアが好きな全てのもの」に対応するオブジェクトを新たに導入し、これが、「全ての車」に対応するオブジェクトを包含するような場合に、前述の全称限量の属性関係が成立すると定義する。さらに、その定義で、「カーマニアは全ての車が好きである」等から「カーマニアはある車が好きである」等が導けることが保証されることも示す。

なお、フレーム構造論理の命名は、フレーム⁹⁾と同様の表現形式を持つことに由来するが、本体系の意味記述法の基本的なスタイルは、F-Logic¹⁰⁾および Quixote⁷⁾で提案された手法を採用している。これらの体系との違いに関する議論は、8 で述べる。

2. フレーム構造論理の構文

本節では、フレーム構造論理の体系 FS1 の構文とその直観の意味を説明する。厳密な意味論は次節で述べる。

定義 2.1 (構文)

<基本記号>

属性名： l_1, l_2, \dots

オブジェクト記号： π, a, b, c, \dots

オブジェクト演算子： \cdot

オブジェクト関係記号： \leq, E_n

論理記号： \Rightarrow (含意), \sim (否定)

オブジェクト記号のうち π を全称オブジェクトと呼ぶ。直観的には、「あらゆる概念」を表す。

<オブジェクト>

- (1) t がオブジェクト記号のとき、 t はオブジェクトである。

- (2) α, β がオブジェクトのとき, $(\alpha \cdot \beta)$ はオブジェクトである*.
- (3) t がオブジェクト記号のとき, $t[ap_1, \dots, ap_n]$ ($n \geq 1$) はオブジェクトである. これは「属性として " $ap_1 \dots ap_n$ " を持つような t 」という意味を表す. 各 ap_i は以下のいずれかの形をしたもので, α はオブジェクト, θ はオブジェクトの集合. Lb は属性名を表すものとする.

$$ap_i = \begin{cases} Lb \rightarrow \alpha & \dots \text{ (i)} \\ Lb \rightarrow \theta & \dots \text{ (ii)} \\ Lb \leftarrow \theta & \dots \text{ (iii)} \end{cases}$$

(i) を固有属性対, (ii) を集合属性対, (iii) を全称集合属性対と呼ぶ. また, $[ap_1, \dots, ap_n]$ を属性リストと呼ぶ. なお, 基本オブジェクト以外のオブジェクトを複合オブジェクトと呼ぶ.

- (4) Lb が属性名, α がオブジェクトのとき, $Lb(\alpha)$ はオブジェクトである. 直観的には, 「 α がもつ属性 Lb の値」を表す. また, このような属性名を, 特に属性関数と呼ぶ.

<オブジェクト関係>

α, β がオブジェクトのとき, 以下はオブジェクト関係である. オブジェクト関係は体系 FS1 の原子式に相当する.

- (1) $\alpha \leq \beta$
 (2) $En(\alpha)$
 (1) の直観的な意味は「 α is a β 」であり, これを is-a 関係と呼ぶ. (2) は α に対応する概念が実在することを表す.

<論理式>

- (1) P がオブジェクト関係のとき P は論理式.
 (2) P, Q が論理式のとき, $(P \Rightarrow Q), \sim(P)$ は論理式.

ただし, 論理記号 $\vee, \wedge, \Leftrightarrow$ は, 命題論理と同様に \Rightarrow, \sim から定義する. \square

定義 2.2 (拡張記法) α, β をオブジェクト, $[\dots]$ を属性リストとする.

- (1) $\alpha / [\dots] \stackrel{dcf}{=} \alpha \leq \pi[\dots]$
 (2) $\alpha =_o \beta \stackrel{dcf}{=} \alpha \leq \beta \wedge \alpha \geq \beta$
 (3) $\alpha \leq \bar{\beta} \stackrel{dcf}{=} \sim En(\alpha \cdot \beta)$
 (4) $\alpha / [\dots] \stackrel{dcf}{=} \alpha \leq \pi[\dots]$ \square

(1) でオブジェクトと属性リストの関係を表す“/”^{***}, (2) でオブジェクトの等価性を表す“=”, (3) でオブジェクトの否定を表す“ $\bar{}$ ”, (4) で属性リストの否定を表す“ $[\dots]$ ”を定義する. なお“/”を has-property-of 関係, “=”を等価関係と呼ぶ.

例 2.1 (属性対)

- (1) [好き \rightarrow 車] \dots 好きの値は車のみ
 (2) [好き \rightarrow {車}] \dots 好きの値に車を含む

- (3) [好き \leftarrow {車}] \dots 好きの値に車全体を含む
 (1) は「ある車のみが好き」, (2) は「少なくともある車が好き」, (3) は「少なくとも全ての車が好き」を表す. (2), (3) は, 車以外に好きなものが存在する可能性を否定しないのに対して, (1) は, 車以外に好きなものが存在しないことまで表す.

例 2.2 (オブジェクト)

- (1) 学生 \dots 「学生」
 (2) 学生 [状態 \rightarrow {風邪}] \dots 「風邪の学生」
 (3) (男性 \cdot 学生) \dots 「男性かつ学生 (男子学生)」
 (4) ペット (学生) \dots 「学生が飼っているペット」
 (5) (ペット (学生) \cdot 犬 [性別 \rightarrow オス, 好物 \rightarrow {肉, 魚}]) \dots 「性別がオスで, 肉と魚が好物の, 学生のペットである犬」

例 2.3 (オブジェクト関係の具体例)

- (1) 山形大生 \leq 学生 [ペット \rightarrow {犬}]
 (2) 山形大生 / [ペット \rightarrow {犬}]
 (3) 山形大生 / [ペット \rightarrow {犬}]
 (4) 男子学生 $=_o$ (男性 \cdot 学生)
 (1) は「山形大生はペットに犬がいる学生である」という is-a 関係を表すのに対し, (2) は「山形大生はペットに犬がいる」という has-property-of 関係を表す^{***}. (3) は「山形大生は“ペットに犬がいる”ということはない」, すなわち, 「山形大生はペットに犬がいない」という属性の否定を表す. (4) は「男子学生は男性かつ学生と等しい」というオブジェクトの等価性を表す.

例 2.4 (論理式)

- (1) (男性 \cdot 学生) \leq 学生
 (2) (男性 \cdot 学生) \leq 学生 \wedge 学生 \leq 人間 \Rightarrow (男性 \cdot 学生) \leq 人間

3. フレーム構造論理の意味論

本節では体系 FS1 の形式的意味論を定義する. 次に, 属性関係に関する定理を考察することで, 本体系の意味記述能力を示す.

定義 3.1 (解釈)

O : オブジェクト記号の集合

N : 属性名の集合

とおく. さらに U を空でない可算集合とする.

体系 FS1 のある解釈とは, 以下の $I = (U, \phi, \psi)$ である.

- (1) $\phi: O \rightarrow 2^U$ はオブジェクト記号を空でない U の部分集合に割り当てるある関数である. ただし, $\phi(\pi) = U$ とする.
 (2) $\psi: N \rightarrow (U \rightarrow 2^U)$ は属性名を関数 $U \rightarrow 2^U$ に割り当てる関数である.
 今後, $Lb \in N$ のとき, 写像 $\psi(Lb)$ を単に ψ_{Lb} と書くこともある. 属性名 L と U の要素 x に対

* 今後, 混乱が生じない限りオブジェクトの一番外側の $()$ を省略することもある.

** $\pi[\dots]$ は “ \dots ” という性質をもつもの全体を表す.

*** 拡張記法の定義 2.2 の (1) により, “山形大生 $\leq \pi$ [ペット \rightarrow {犬}]” に置換され, 「山形大生はペットに犬がいるようなものである」という意味になる.

して, $\psi_{Lb}(x)(= \psi(Lb)(x))$ の値は U のある部分集合となる. 直観的には, x の属性 Lb の値を表す.

以上のように定義された関数をもとに, 解釈 I は以下のように任意のオブジェクト, 属性対および属性リストを U の要素に割り当てる.

- (3) 固有属性対に対する割り当て
 $I(Lb \rightarrow \alpha) = \{x \mid \psi_{Lb}(x) \subseteq I(\alpha) \text{ かつ } \psi_{Lb}(x) \neq \phi\}$
- (4) 集合属性対に対する割り当て ($k \geq 1$)
 (a) $I(Lb \rightarrow \{\}) = U$
 (b) $I(Lb \rightarrow \{\alpha\}) = \{x \mid \psi_{Lb}(x) \cap I(\alpha) \neq \phi\}$
 (c) $I(Lb \rightarrow \{\alpha_1, \dots, \alpha_n\}) = I(Lb \rightarrow \{\alpha_1\}) \cap \dots \cap I(Lb \rightarrow \{\alpha_k\})$
- (5) 全称集合属性対に対する割り当て ($k \geq 1$)
 (a) $I(Lb \leftarrow \{\}) = U$
 (b) $I(Lb \leftarrow \{\alpha\}) = \{x \mid I(\alpha) \subseteq \psi_{Lb}(x)\}$
 (c) $I(Lb \leftarrow \{\alpha_1, \dots, \alpha_n\}) = I(Lb \leftarrow \{\alpha_1\}) \cap \dots \cap I(Lb \leftarrow \{\alpha_k\})$
- (6) 属性リストに対する割り当て ($n \geq 1$)
 $I([ap_1, \dots, ap_n]) = I(ap_1) \cap \dots \cap I(ap_n)$
- (7) オブジェクトに対する割り当て ($n \geq 1$)
 (a) $I(t) = \phi(t)$
 (b) $I((\alpha \cdot \beta)) = I(\alpha) \cap I(\beta)$
 (c) $I(t[ap_1, \dots, ap_n]) = I(t) \cap I([ap_1, \dots, ap_n])$
 (d) $I(Lb(\alpha)) = \bigcup_{x \in I(\alpha)} \psi_{Lb}(x)$
- (8) オブジェクト関係への真理値の割り当て
 α, β を任意のオブジェクト.
 (a) $I(\alpha \leq \beta) = \mathbf{T}$ iff $I(\alpha) \subseteq I(\beta)$
 (b) $En(\alpha) = \mathbf{T}$ iff $I(\alpha) \neq \phi$
 上記以外の場合は \mathbf{F} を割り当てる.
- (9) 論理式への真理値の割り当て
 命題論理の論理式への真理値の割り当てと同様.

□

定義 3.2 (論理的帰結) S を論理式の集合, P を論理式とする. S の全ての論理式を \mathbf{T} にする解釈の下で P も \mathbf{T} になる場合に, P を S の論理的帰結と呼び $S \models P$ と書く. 特に S が空集合のとき, すなわち $\models P$ は, P が恒真式であることを表す. □

4. 意味論の直観的説明

属性対, 属性リスト, オブジェクトおよびオブジェクト関係の解釈について直観的な説明を与える.

4.1 属性対

固有属性対 " $Lb \rightarrow \alpha$ ", 集合属性対 " $Lb \rightarrow \{\alpha\}$ ", 全称集合属性対 " $Lb \leftarrow \{\alpha\}$ " は, 各々以下のような性質を満たす.

- (1) 山形大生/[友人 \rightarrow 男性], 山形大生/[友人 \rightarrow 学生] \models 山形大生/[友人 \rightarrow (男性 \cdot 学生)]
- (2) 外車 \leq 車 \models 学生 [好き \rightarrow 外車] \leq 学生 [好

き \rightarrow 車]

- (3) 外車 \leq 車 \models 学生 [好き \rightarrow { 外車 }] \leq 学生 [好き \rightarrow { 車 }]
- (4) 外車 \leq 車 \models 学生 [好き \leftarrow { 車 }] \leq 学生 [好き \leftarrow { 外車 }]

(1) は山形大生にとって, 「男性」と「学生」は同一人物であるという, 固有属性による潜在的な概念合成を表している. (2) は「外車が車であるなら, 外車のみが好きな学生は, 車のみが好きな学生である」を, (3) は「外車が車であるなら, 外車が好きな学生は, 車が好きな学生である」を, (4) は「外車が車であるなら, 全ての車が好きな学生は, 全ての外車が好きな学生である」を, それぞれ表す.

また, 属性値が複数存在する集合属性対, 例えば, “好き \rightarrow { アメ車, ドイツ車 }” は, $I(\text{好き} \rightarrow \{\text{アメ車}\}) \cap I(\text{好き} \rightarrow \{\text{ドイツ車}\})$ のように, 複数の属性対を \cap で合成した複合概念として解釈される. これは, “好き \leftarrow { アメ車, ドイツ車 }” 等の全称集合属性対についても, 同様である.

4.2 属性リスト

属性リスト $[ap_1, \dots, ap_n]$ は, $I(ap_1) \cap \dots \cap I(ap_n)$ と解釈される. すなわち, 全ての属性関係の共通概念として解釈される.

4.3 オブジェクト

オブジェクト記号は, 関数 ϕ によって, U の部分集合に割り当てられる. $(\alpha \cdot \beta)$, $t[ap_1, \dots, ap_n]$ などの複合オブジェクトの解釈は, 複合オブジェクトを構成する, 各々のオブジェクトや属性対の解釈を “ \cap ” で合成することにより定義される.

4.4 オブジェクト関係

is-a 関係を表すオブジェクト関係 “ \leq ” は, 集合の包含関係 “ \subseteq ” に対応する. 包含関係の推移律によって, 以下のようなオブジェクト間の階層関係が成立することになる.

犬 \leq 動物, 動物 \leq 生物 \models 犬 \leq 生物

さらに, $\alpha/[\dots]$ (α has-property-of “ \dots ”) は $I(\alpha) \subseteq I(\pi[\dots])$ に対応する*. よって, is-a 関係と同様に, 属性継承もオブジェクト関係の一種として容易に実現できることになる.

犬 \leq 動物, 動物/[性質 \rightarrow { 死ぬ }]
 \models 犬/[性質 \rightarrow { 死ぬ }]

5. フレーム構造論理の基本体系との比較

体系 FS1 は基本体系¹⁾ の属性関係を強化した拡張体系である. 基本体系の意味論は, 束上に定義されている. ところが, 束の要素に対して, それを構成する原子元 (集合における要素に相当する) は, 定まっているとは限らない. それゆえ, 束を意味論の土台とすると, 限量のとり扱い, 固有属性と集合属性の間の関

* 定義 2.2 の (1) 参照

係などの記述が、非常に困難であった。そこで、体系 FS1 は、集合を意味論の土台とする。FS1 で拡張した点を明らかにするため、まず、以下の二つの集合表記された複合概念について考察する。

- (1) $\{x \mid x \leq \text{カーマニア}, x / [\text{好き} \rightarrow \{\text{車}\}]\}$
 (2) $\{x \mid x \leq \text{車}, \text{カーマニア} / [\text{好き} \rightarrow \{x\}]\}$

(1) は「 x はカーマニアである」と「 x は車が好き」という、文の主部に相当する二つの概念を合成した複合概念を表すのに対し、(2) は「 x は車である」と「カーマニアは x が好き」という、主部に相当する概念と、述部に相当する概念の複合概念を表している。従来の基本体系では、(1) は、カーマニア $[\text{好き} \rightarrow \{\text{車}\}]$ と記述することができたが、(2) は記述できなかった。そこで本論文では、属性関係の属性値を、オブジェクトとして抽出するために、属性名に関数的役割を新たに持たせた。例えば、上記の (2) の属性名“好き”を属性関数として使用すると、“好き(カーマニア)”と記述でき、これは「カーマニアの好きなもの」を表す。このように、本体系では属性名“好き”は

- オブジェクト間の属性関係
カーマニア $[\text{好き} \rightarrow \{\text{車}\}]$
- 属性値を返す属性関数
好き(カーマニア)

のように、二つの役割を同時に持つことになる。

属性名を属性関数とすることにより、上記の (2) に相当する概念も、(車・好き(カーマニア)) のように、オブジェクトの合成で記述できる。なお、体系 FS1 では以下の式は恒真式である。

$$\begin{aligned} \text{山形大生} &\leq \text{学生} \Rightarrow \\ \text{好き}(\text{山形大生}) &\leq \text{好き}(\text{学生}) \end{aligned}$$

すなわち、「山形大生が学生であるならば、山形大生が好きなものは学生が好きなものである」などの関係の成立が保証されている。このような属性名の関数として使用は、表現能力の強化という点だけではなく、表記の簡潔性という点でも利点がある。例えば、「偶数の次が奇数であり、かつ奇数の次が偶数ならば、偶数の次の次は奇数である」という知識に対応する以下の式は、全て恒真式になる。

- (1) 次(偶数) \leq 奇数 \wedge 次(奇数) \leq 偶数 \Rightarrow
次(次(偶数)) \leq 偶数
 (2) 数[次 \rightarrow 偶数] \leq 奇数 \wedge 数[次 \rightarrow 奇数] \leq 偶数 \Rightarrow 数[次 \rightarrow 数[次 \rightarrow 偶数]] \leq 偶数
 (3) 数[次 \rightarrow {偶数}] \leq 奇数 \wedge 数[次 \rightarrow {奇数}] \leq 偶数 \Rightarrow 数[次 \rightarrow 数[次 \rightarrow {偶数}]] \leq 偶数

ところが、(2)、(3) のように、属性関数を使用せずに、従来の属性関係で奇数や偶数を表現すると、“数”という、本来不必要なオブジェクトが必要になる。さらに、“偶数の次”を“ある偶数だけの次にある数”として記述するか、“少なくともある偶数の次にある数”として記述するかという選択を行う必要も生じる*。

* “偶数の次”を“数[次 \leftarrow {偶数}]”として記述した論理式は

次に、属性関係の表現能力に関して、体系 FS1 と基本体系とを比較する。基本体系では、属性関係の解釈の領域が束であるため、“ある”、“すべて”の区別が困難であった。それに対し、体系 FS1 では、解釈の領域は集合とすることにより、「ペットに“全ての”犬がいる」のように、属性値が全称限量されている場合が扱えるようになった。全ての属性対の解釈を属性関数で定義したことにより、各属性対間の関係を表す以下のような関係が表現できるようになった。

- (1) $\text{カーマニア} / [\text{好き} \leftarrow \{\text{車}\}] \models \text{カーマニア} / [\text{好き} \rightarrow \{\text{車}\}]$
 (2) $\text{カーマニア} / [\text{好き} \rightarrow \text{車}] \models \text{カーマニア} / [\text{好き} \rightarrow \{\text{車}\}]$
 (3) $\text{カーマニア} / [\text{好き} \rightarrow \text{車}] \wedge \text{車} \leq \overline{\text{電車}} \models \text{カーマニア} / [\text{好き} \rightarrow \{\text{電車}\}]$

(3) は「カーマニアは車のみを好きで、かつ車は電車ではないならば、カーマニアは電車が好きではない」という固有属性の排他性を表す。これは、本質的には、固有属性による潜在的な概念合成と等しい。

ここまで述べてきたことをまとめると、基本体系と比較すると本体系には以下の利点がある。

- 全称の属性関係が表現できる。
- 各属性対の解釈の定義が統一され、それらの間の関係の記述が可能である。
- 属性関数を使用すれば属性関係の記述が簡潔になる場合がある。
- 属性関数を使用すれば属性値の限量に関する曖昧性を考慮する必要がない。

6. フレーム構造論理の公理体系

前節では、体系 FS1 の意味論を定義した。本節ではこれを公理体系として構築する。ここで、 t は任意のオブジェクト記号、 α, β, γ は任意のオブジェクト、 Lb は任意の属性名、 $[\dots]$ は任意の属性リスト、 ap_i は任意の属性対、 P, Q は任意の論理式を表すものとする。なお本体系の健全性および完全性は証明済であるが、本論文では省略する。

定義 6.1 (公理体系)

<公理図式>

- (1) 命題論理の公理
 (2) $\alpha \leq \pi$
 (3) $\alpha \leq \alpha$
 (4) $\alpha \leq \beta \wedge \beta \leq \gamma \Leftrightarrow \alpha \leq \gamma$
 (5) $\pi / [Lb \rightarrow \{\}]$
 (6) $\alpha / [Lb \rightarrow \{\beta\}] \wedge \beta \leq \gamma \Rightarrow \alpha / [Lb \rightarrow \{\gamma\}]$
 (7) $\alpha \leq (\beta \cdot \gamma) \Leftrightarrow \alpha \leq \beta \wedge \alpha \leq \gamma$
 (8) $\alpha / [Lb \rightarrow \{\beta_1, \dots, \beta_n\}] \Leftrightarrow \alpha / [Lb \rightarrow \{\beta_1\}] \wedge \dots \wedge \alpha / [Lb \rightarrow \{\beta_n\}]$
 (9) $\alpha \leq t[ap_1, \dots, ap_n] \Leftrightarrow \alpha \leq t \wedge \alpha / [ap_1] \wedge \dots \wedge \alpha / [ap_n]$

恒真式にならないが、これは、“少なくとも全ての偶数の次にある数”が有り得ないことから明らかである。

- (10) $\alpha \leq \beta \Rightarrow Lb(\alpha) \leq Lb(\beta)$
 (11) $Lb(\alpha) \leq Lb(\pi[Lb \rightarrow \{\pi\}] \cdot \alpha)$
 (12) $\alpha/[Lb \rightarrow \{\beta\}] \Rightarrow \alpha/[Lb \rightarrow \{Lb(\alpha) \cdot \beta\}]$
 (13) $\alpha \leq Lb(\beta) \Rightarrow \alpha \leq Lb(\pi[Lb \rightarrow \{\alpha\}] \cdot \beta)$
 (14) $\alpha/[Lb \rightarrow \beta] \Rightarrow Lb(\alpha) \leq \beta \wedge \alpha/[Lb \rightarrow \{\beta\}]$
 (15) $Lb(\alpha) \leq \beta \wedge \alpha/[Lb \rightarrow \{\gamma\}] \Rightarrow \alpha/[Lb \rightarrow \beta]$
 (16) $Lb(\alpha) \leq \beta \Rightarrow (\pi[Lb \rightarrow \{\pi\}] \cdot \alpha)/[Lb \rightarrow \{\beta\}]$
 (17) $En(t)$
 (18) $\alpha/[Lb \rightarrow \{\beta\}] \wedge En(\alpha) \Rightarrow En(\beta)$
 (19) $En(Lb(\alpha)) \Rightarrow En(\alpha)$
 (20) $En(\alpha) \wedge \alpha \leq \beta \Rightarrow En(\beta)$
 (21) $\sim En(\alpha) \Rightarrow \alpha \leq \beta$
 (22) $\pi/[Lb \leftarrow \{\}]$
 (23) $\alpha/[Lb \leftarrow \{\beta\}] \wedge \gamma \leq \beta \Rightarrow \alpha/[Lb \leftarrow \{\gamma\}]$
 (24) $\alpha/[Lb \leftarrow \{\beta_1, \dots, \beta_n\}] \Leftrightarrow \alpha/[Lb \leftarrow \{\beta_1\}] \wedge \dots \wedge \alpha/[Lb \leftarrow \{\beta_n\}]$
 (25) $En(\alpha) \wedge \alpha/[Lb \leftarrow \{\beta\}] \Rightarrow \beta \leq Lb(\alpha)$
 (26) $En(\beta) \wedge \alpha/[Lb \leftarrow \{\beta\}] \Rightarrow \alpha/[Lb \rightarrow \{\beta\}]$
 (27) $\sim En(\alpha) \Rightarrow \pi/[Lb \leftarrow \{\alpha\}]$

<推論規則>

P と $P \Rightarrow Q$ から Q を導く。(分離規則)

<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。 □

このような公理体系を構築することにより、5における個体変数を用いない複合概念の意味表現にとどまらず、それらに関する推論も個体を想定せずに実行できることが保証される。

6.1 体系 FS1 における具体的な定理の例

体系 FS1 において、「カーマニアは全ての車が好き」、「日産車は車である」「日産車は、愛知県民が好きな車とは限らない」、という三つの前提から「愛知県民がカーマニアであるとは限らない」が導ける。

定理 6.1 前提となる式を、

- (1) カーマニア/[好き ← {車}]
 (2) 日産車 ≤ 車
 (3) \sim (日産車 ≤ 好き(愛知県民)・車)

とおくと、

$$(1) \wedge (2) \wedge (3) \\ \Rightarrow \sim(\text{愛知県民} \leq \text{カーマニア})$$

は、FS1 の定理である。

証明 6.1

- [1] カーマニア/[好き ← {日産車}]…前提 (1,2), 公理 1, 24
 [2] \sim (愛知県民/[好き ← {日産車}])…前提 (3), 公理 1, 18, 26
 [3] \sim (愛知県民 ≤ カーマニア)… [1,2], 公理 1, 4 □

7. 述語論理の意味記述法との比較

体系 FS1 は、自然言語で表された知識を、自然言

語の構造を反映した形式で記述することができる。以下では、FS1 の意味記述法の特徴を述べる。

述語論理の意味論では、ある概念は、ある性質を満たすような全ての個体の集合として表される。複合概念は、その集合間の何らかの関係を満たすような集合として組み立てられる。例えば、「友人に男性がいる学生」に対応する述語論理の複合概念は、

$$\lambda x(\text{学生}(x) \wedge \exists y(\text{友人}(x, y) \wedge \text{男性}(y)))$$

のように、複数の基本命題を論理記号で結合したもものとして記述される*。上式では、“男性”という集合に属する、少なくとも一つの個体 y との間に、“友人”という関係が成立して、かつ“学生”という集合に属するような x として、“友人に男性がいる学生”が記述されている。このように、述語論理では、個体変数間に成立する関係を、述語と論理記号で表現することにより、複合概念が組み立てられる。

それに対して、フレーム構造論理では、複合概念を簡潔かつ構造的に記述できる。例えば、上記の例の複合概念は、

$$\text{学生}[\text{友人} \rightarrow \{\text{男性}\}]$$

として、一つの複合オブジェクトとして記述される。意味論上では、“学生”と“友人に男性がいるもの”が、それぞれ集合に割り当てられ、その複合概念は、それらの積集合に割り当てられる。このように、フレーム構造論理では、“学生”や“ペットに男がいるもの”など自然言語における名詞概念を、一つのオブジェクトとして記述、解釈することにより、個体変数や論理記号を用いずに複合概念を組み立てることができる。

8. 従来研究との比較

5 で体系 FS1 とフレーム構造論理の基本体系との比較、7 で述語論理との比較について述べたが、本節では、他のオブジェクト、およびオブジェクトの演算を導入した体系と比較する。フレーム構造論理は、F-logic¹⁰⁾や Quixote⁷⁾で提案されたフレームに基づく意味記述法を採用している。F-logic は、意味論が東上に定義される論理体系であるが、述語論理と同等の記述能力を持たせるために、複合概念の意味記述に個体変数が用いられる。また固有属性と集合属性を表現できるが、それらが完全に独立して定義されている。そのため、例えば、「太郎の友人が次郎だけ」から「太郎の友人に次郎がいる」が導けない。また、F-Logic は数学的な論理体系としてではなく、クラス間の性質の継承可能性などを取り扱える、オブジェクト指向データベースの記述言語として発展している¹¹⁾。

Quixote は、個体変数を用いずに複合概念を表現することができるが、意味論の定義¹²⁾に、意味ネット

* 述語論理では、名詞的な概念を単独で記述することはできないので、便宜的にラムダ記法を用いる。

ワークと同様に手続き的な部分が含まれる*。また文献 13) で、自然言語処理の枠組みとして Quixote が紹介されているが、状況推論などを取り入れ、自然言語の複雑な現象まで取り扱うことを目標としている。本論文の目的は、自然言語の一部分を、数学的厳密さを保って、簡潔かつ完全に論理式として表現できる純粋な論理体系の提案にある。

一方、知識表現システム DOT⁸⁾ では、DOT 記法を用いて、個体変数を一切用いずに複合概念を記述する。さらに、意味論¹⁴⁾も半順序の上に定義される。DOT では、表現能力よりむしろ、推論の計算可能性に重点が置かれている。そのため、FS1 における属性関数を用いた表現でしか、属性関係が記述できない。さらに、体系 FS1 のオブジェクト演算子に相当する演算子が存在しないため、「男性かつ学生」などの複合概念が記述できない。

論理プログラミングの分野では、LOGIN¹⁵⁾において、属性継承が可能な複合概念 ϕ 項が提案されている。 ϕ 項は、体系 FS1 の複合オブジェクトと、ほぼ同様に記述、解釈される。しかしながら、属性関係が、体系 FS1 における集合属性に限られるうえに、DOT と同様に、オブジェクトに対する直接的な演算子が存在しないという違いが存在する。

上記の既存体系に対して、本体系は以下の特徴を持つ。

- (1) 論理式中に個体変数が現れない。
- (2) 属性関係もオブジェクトになりうる。
- (3) 厳密な意味論が存在する。
- (4) 意味論の下で完全な公理体系が存在する。

(1) の特徴により、自然言語文の構造により近い形で意味表現ができる。(2) の特徴により、オブジェクトを合成することで様々な複合概念を簡潔かつ構造的に記述することができる。(3) の特徴により、固有属性対、集合属性対、全称集合属性対の各々の性質とそれらの間に成り立つべき関係、概念の階層関係、属性継承などを真偽値に基づいて厳密に検証できる。(4) の特徴により、意味表現だけではなく推論も、個体を想定せずに実行できることが保証される。

9. むすび

属性関数を導入することにより、多様な属性関係を表現できるフレーム構造論理を提案し、これを公理体系 FS1 として構築した。フレーム構造論理は、純粋な記述能力では、命題論理には勝るが述語論理より劣る。その反面、変数を用いずに複合概念を構造的に記述できるため、自然言語から論理式への翻訳が容易であるという特徴を持つ。自然言語処理への本格的な適用を考慮した場合、今後の課題として、動詞を含む文、またそれを連体修飾句化した複合概念の記述があげら

れる。

参考文献

- 1) 佐藤朋信, 西原典孝, 鎌田拓, 横山晶一, “フレーム構造論理を用いた名詞句「A の B」の意味解析,” 電子情報通信学会技術報告, NLC97-3, pp.17-24, 1997.
- 2) Hintikka, J., “Knowledge and Belief,” Cornell University Press, Ithaca, 1962.
- 3) Prior A. N., “Past, Present and Future,” Clarendon Press, Oxford, 1967.
- 4) Heyting A., “Intuitionism: An Introduction,” North-Holland, Amsterdam, 1956.
- 5) Rescher, N., “Many-valued Logic,” McGraw-Hill, 1969.
- 6) Anderson, A. R. and Belnap N. D., “Entailment: The Logic of Relevance and Necessity,” Vol.1, Princeton University Press, 1975.
- 7) 森田幸伯, 羽生田博美, 横田一正, “Quixote のオブジェクト識別性,” 情報処理学会研究会資料, データベース・システム 80-12, 人工知能 73-12, pp.109-117,
- 8) 塚本昌彦, 西尾章治郎, “正規表現を用いた継承システム,” 人工知能学会誌, Vol.9, No.3, pp.447-454, 1994.
- 9) Minsky M., “A Framework for Representing Knowledge,” P.H.Winston(ed.), The Psychology of Computer Vision, McGraw-Hill, pp.211-277, 1975.
- 10) Kifer, M. and Lausen, G., “F-logic: A Higher-Order Language for Reasoning about Objects, Inheritance, and Scheme,” Proc. ACM SIGMOD, pp.134-146, 1989.
- 11) Kifer, M., Lausen, G. and Wu, J., “Logical Foundations of Object-Oriented and Frame-Based Languages,” Journal of ACM, Vol.42, No.4, pp.741-843, 1995.
- 12) 西岡 利博, 小島 量, 津田 宏, “演繹オブジェクト指向データベース言語 Quixote の手続き的意味論,” 情報処理学会研究会資料, データベースシステム 94-1, pp.1-10, 1993.
- 13) 東条敏, 津田宏, 安川秀樹, 横田一正, 森田幸伯, “言語情報処理の枠組みとしての QUIXHOTE,” 人工知能学会誌, Vol.9, No.6, pp.863-874, 1994.
- 14) 塚本昌彦, 西尾章治郎, “ドット記法と IS-A 関係を用いた継承推論のための完全システム,” 人工知能学会誌, Vol.10, No.2, pp.279-287, 1995.
- 15) Ait-Kaci, H. and Nasr, R., “LOGIN: A Logic Programming Language with Built-In Inheritance,” Journal of Logic Programming, Vol.3, pp.185-215, 1986.

* Quixote は論理体系というよりも、論理プログラミング言語として提案されているので、これは決して欠点というわけではない。