

日本語文を想定した順序ソート論理による 知識表現法とその推論処理法

石川 勉

拓殖大学 工学部 情報工学科

[概要] 現在の自然言語処理技術の活用により自動変換がある程度可能な知識表現法 (WPL) とそれに対する効率的な推論処理法を提案する。WPL は日本語文を想定した一種の拡張型述語論理であり、単文、複文に係わらず一つの文は順序ソート論理を用いた一つの述語式 (素式) で表す。複文の場合には主節が述語式の基本を構成し、従属節は述語部あるいは引数部 (項) に埋め込んで表現する。ソートには従来の単純な概念でなく名詞句のような構造を持った概念を許容する (変数を含むことも可)。推論法については、構造を持ったソートを扱うため、Beierle 等によって提案されている拡張型順序ソート論理をさらに拡張する。具体的には、WPL において名詞句として一纏りとして扱っていたソートを、その内部構造まで立ち入って推論処理できるように、SL_p 節と呼ぶ一種の処理の繰り延べ項を導入し推論規則を拡張する。

A Knowledge Representation Scheme for Japanese Sentences and the Inference Mechanism on Order-sorted Logic

Tsutomu Ishikawa

Department of Computer Science, Faculty of Engineering, Takushoku University

[Abstract] We propose a knowledge representation scheme (called WPL) and an inference method for the scheme. In WPL, both simple sentence and complex sentence are represented in one atomic formula. Subordinate clauses in a complex sentence are embedded into the formula forming the main clause. WPL is an extended order-sorted logic that can deal with structured sort symbols consisting of multiple ordinary words like noun phrases. The inference processes for WPL is executed based on the resolution principle, semantically interpreting the sort symbols word by word. We extend the inference rules proposed by Beierle et al. in order to deal with complex sort symbols.

1 はじめに

人間と自然に対話できるロボットの実現は我々研究者の長年の夢である。対話システムはチケット販売等限定的な応用では実用的になりつつあるが、話題を限定しない場合は未だに Eliza の域を脱したとは言い難い。

一方、最近の Web 情報の爆発的な増加、普及に伴い、これを利用した質問応答システム、コンサルティングシステムへの高度な意味処理の適用が求められている。これに応えるべくセマンティック Web の研究も活性化し、RDF や XML およびそれらをベースとするオントロジー言語 OWL 等の整備により、Web 情報からの知識利用が可能になりつつある [1]。しかし、これはタグ付けされている情報に対してであり、既存の電子化文書のすべてにタグ付けがなされるとは考えづらい。すなわち、このような電子化情報の有効利用さらには前述の対話システムの高度化には、自然言語文を一定の知識表現へ変換しそれを用いて効率的に推論する技術の確立が要求されてくる。しかも実用上は、これらは一貫して自動化が可能でなければならない。

知識表現法としては、フレーム、意味ネット、ルールベース、述語論理が代表的であり、これまでそれらをベースとした多くの拡張形式が提案されている。最近では、Web 情報の国際的な利用のための UNL [2]、オントロジー記述への適用性を意識した DL [3] 等も注目されている。しかし、これらは知識利用の容易化や共通化に重きを置いており、ある程度強力な推論との結合を意識した場合には述語論理ベースの表現法が現実的と言える。したがって、推論法もこれが前提となるが、従来の単純な一階述語論理では表現能力だけでなく知識が大規模化したときの処理時間にも問題があり、自然言語文に適した何らかの拡張が必要になる。

このような背景から、本報告では、現在の自然言語処理技術の活用により自動変換がある程度可能な日常語ベースの知識表現法 WPL (Words-based extended Predicate Logic) とそれに対する効率的な推論処理法を提案する。WPL は順序ソート論理 [4] を用いた一種の拡張型述語論理であり、単文、複文ともに一つの述語式 (素式) で表す。複文の場合には主節が述語式の基本を構成し、従属節は述語部あるいは引数部 (項) に埋め込んで表現する。また、引数部には深層格を用い、引数自体はソート付きの定数、変数とし、ソー

トには名詞句のような構造を持った概念を許容する。

また、構造を持ったソートを扱うため、Beierle 等による順序ソート論理 [5] を拡張する。具体的には、WPL において名詞句として一纏りとして扱っていたソートをその内部構造まで立ち入って推論処理できるように、従来の推論規則を拡張する。

2 日常語ベースの知識表現法 WPL

2.1 研究の動機

(1) 自然言語文からの変換容易性

自然言語文はそれが持つ曖昧性のため、一定の知識表現への自動変換は極めて難しい [6]。しかし、完璧性を求めなければ、茶碗、南瓜等の解析ツールや EDR 電子化辞書等を用いた意味解析により、簡単な文では変換可能となりつつある [7]。最近ではさらに、Web 情報をコーパスとして利用した格解析の高精度化も進み [8]、少しづつではあるがこの可能性は高まっている。

しかし、変換先の知識表現を基本的な一階述語論理とすると、名詞句解析の難しさや表現能力の点から問題がある。例えば、「青年が外国の企業で働く」という文は、その中の一般名詞が何を指すかが問題になる場合、「働く $(x, y) \wedge$ 青年 $(x) \wedge$ 企業 $(y) \wedge$ 外国 $(z) \wedge$ 存在する (y, z) 」と表現する必要がある。すなわち、「外国の企業」の中の助詞「の」の意味を「存在する」と識別せねばならない。

また、表現能力に関しては、例えば、「太郎は花子が読んだ本を買った」も「花子は太郎が買った本を読んだ」も「買う $(太郎, a) \wedge$ 本 $(a) \wedge$ 読む $(花子, a)$ 」となる。すなわち、時制の概念を導入しないと、基本的な一階述語論理のままでは「読む」と「買う」との前後関係が表現できない。

(2) 順序ソート論理とその適合性

ソート論理は、一階述語論理における変数や定数を、ソートと呼ばれる限定されたドメインの 1 つの要素 (個体) であるとして扱う方法である。ソート s に属する個体 t をソート論理では $t : s$ のように表す。これにより、推論処理における単一化が効率化される。順序ソート論理では、さらにそのソート間に上位下位の階層関係 (ソート階層) が導入されている。これは、サブソート関係 (以下、この関係を記号 \sqsubseteq で表す) と呼ばれ、例えば、「医者」と「専門家」の間には、「医者 \sqsubseteq 専門家」という関係がある。ソート階層において上位下位の関係は集合論的に扱われ、下位のソートに含まれる要素は上位のソートに必ず含まれることになる。先の例の場合、「医者」であるならば誰もが「専門家」と言える。なお、最上位のソートはトップソートと呼ばれ、ここではこれを \top と表す。

順序ソート論理は、近年、知識やデータを階層的に整理し利用する必要性が高まりつつあることから再び注目されており、ソート階層と論理式の結合 [5]、階層構造を持った多項述語への拡張 [9]、形式オントロジーの property 分類を導入した拡張 [10] 等々活発に研究されてきている。

このような特徴を有する順序ソート論理を用い、ソート

に名詞句をそのまま利用すると、前述の最初の例文は「働く $(x:青年, y:[z:外国] の企業)$ 」と表されることになる。また、後の例文は、従属節の部分述語式 (真偽ではなく修飾的機能) で表し、それにより修飾された名詞概念をソートに用いれば、それぞれ「買う $(太郎: \top, a:[本]\{読む(花子: \top)\})$ 」, 「読む $(花子: \top, a:[本]\{買う(太郎: \top)\})$ 」と表される。すなわち、このように構造を持ったソートを許容すると、効率的かつ正確に文意を表現可能となる。

2.2 WPL の構成

WPL は、前節で述べた問題や順序ソート論理の優位性を考慮し、これを複雑な構造を有するソートを扱えるよう拡張した知識表現法である。また、知識構成要素には日常語を用い、一つの文は単文、複文共に一つの素式 (以下、述語式と呼ぶ) で表す。ここでは、まず述語式 L を定義し、次にそれを利用した複文の表現法を示す。その後、ソートとして用いる概念 S (以下、ソート概念と呼ぶ) について定義する。

(1) 述語式

[定義 1] P を述語、 t_i を引数 (項)、 r_i を述語に対する引数の関係を表すラベルとしたとき、以下のように表現された式 L を述語式という。

$$L = P(r_1:t_1, r_2:t_2, \dots, r_n:t_n) \quad (1)$$

ここで、引数 t_i は、 S_i をソート、 x_i を変数、 c_i を定数としたとき、以下のように表現される。

$$t_i = x_i : S_i \text{ or } c_i : S_i \text{ or } x_i : \top \text{ or } c_i : \top$$

この述語式において、述語部 P には動詞、形容詞、名詞のいずれかを用い、名詞の場合にはそれが個体を示し得る場合には次に定義するソート概念 S を用いる (この場合の述語式を以下、ソート述語と呼ぶ)。引数 t_i は、以上に定義したようにソート付の変数または定数であるが、この定数には固有名詞を含める。すなわち、固有名詞は個体の識別子であるから定数の一種として扱う。例えば、「太郎」という固有名詞は「太郎 : \top 」と表す (ソートが分かっている場合はそれをソート概念として用いる)。また、ラベル r_i は述語部の品詞により異なり、動詞の場合は agt (主格)、obj (対象格)、plc (場所格) 等の深層格を、形容詞や名詞の場合は sbj、inst のような新たに設定したラベルを用いる [11]。

(2) 複文の表現法

複文は、主節と名詞節、連体節、連用節、並列節に分類される従属節よりなる。ここでは、従属節が名詞節、連体節、連用節 (条件文を除く) の場合は文全体を一つの述語式で表現し、従属節は後に定義する節付概念 w_p 内の L_p (以後、節述語と呼ぶ) として表し、主節を表す述語式の述語部あるいは引数部の一部として埋め込んで表現する。一方、並列節の場合は、意味的には主従の関係を持つことが少なく、主節と従属節をそれぞれ独立の文として扱ってよい場合が多い。したがって、節毎に述語式を用いて表し、文全体としてはその連言で表す。

節述語は、構成上は定義 1 の述語式 L と同様であるが、意味は全く異なる。すなわち、述語式は「真」または「偽」

をその値とするが、節述語は従属節で述べられている現象や状況等の事柄を表している。したがって、節述語は L ではなく L_p で表すこととする。また、節述語が名詞を修飾している場合は、被修飾名詞と述語部の動詞とは格関係で意味的に連結されている場合が多い。したがってこの場合には、 L_p 中の対応するラベルの引数部に格関係の存在を示す記号“#”を記すこととする。

(2) ソート概念

WPLにおいてソートとなり得る概念をソート概念と呼ぶ。このソート概念 S およびその構成要素となる諸概念を以下に定義する

[定義 2] 以下の構成から成る概念をそれぞれ、基本概念 w 、節付概念 w_p 、個体概念 g_s 、複合概念 G 、ソート概念 S と呼ぶ。

- $w =$ (副詞 *or* 形容詞 *or* 名詞)_{*0} + 名詞
- $w_p = [S]\{L_p\}$
- $g_s = [x : S] \text{ or } [c : S] \text{ or } [x : T] \text{ or } [c : T]$
- $G =$ (修飾概念 + 助詞)_{*1} + 主概念

ここで、修飾概念 = w *or* w_p *or* g_s
主概念 = w

- $S = w$ *or* w_p *or* G

ここで、*₀、*₁ はそれぞれ、0 回以上、1 回以上の繰り返しを表す。

これら各概念はすべて個体を示し得る概念であり、基本概念は名詞単語または複合語である。形容詞で修飾された概念もこれに含める。節付概念は、従属節により修飾された概念を表すための形式で、節述語 L_p およびそれにより修飾されるソート概念 S (この部分を先行詞部と呼ぶ) よりなる。例えば、「青年が買った本」では、「本」が S で、「青年が買った」が L_p により表現される。

また、複合概念は、いわゆる名詞句一般を表すための概念であり、修飾概念と助詞の繰り返し (修飾部) とそれにより修飾される主概念よりなる。ここで、主概念はその名詞句の大本の概念であり、基本概念 w に限定する。一方、修飾概念は、基本概念 w や節付概念 w_p の一般的な概念 (以後、複合概念を含めこれらを一般概念と呼ぶ) だけでなく、特定の個体を指している場合もある。後者の場合をここでは個体概念 g_s と呼ぶ。この個体概念はソート付の変数または定数であり、表現上は述語式の項と同一である。

ソート概念 S は、基本概念 w 、節付概念 w_p 、複合概念 G のいずれかである。表記上同じ名詞句でも、それを構成する名詞が一般的な概念を指すか特定の個体を指すか、あるいはそれらの係り受け関係により全体の意味が異なってくる。したがって、これを表現できるように S は再帰的な構造をとる。ただし、個体概念 $[x : S]$ における S の中には変数 x は含まないとする。無限にループすることになり S が定まらないためである。

2.3 表現例

(1) 単文

述語式の形式は、対象となる文の述部の品詞により決定

する。具体的には述部となる品詞には動詞、名詞 (“...である”の文型)、形容詞があり、述語式ではそれらを述語部とし、それ毎に異なる引数のラベル付けを行う。以下に表現例を示す。

- ① “太郎は車の鍵を探している”
⇒ 探す (agt : 太郎:T, obj : c₁:[c₂:車] の鍵)
- ② “太郎は田舎の医者である”
⇒ [c₁ : 田舎] の医者 (inst : 太郎:T)
- ③ “花子は美しい”
⇒ 美しい (sbj : 花子:T)

述語部が動詞の場合には①のように引数には深層格をとる。そのラベルとしては、現在、自然言語文からの自動変換に EDR 辞書を利用しているため、主にそこでのラベルを用いている。名詞の場合には、それが個体を示し得るソート概念の場合には②のようにラベル inst を使い、特性を表す概念の場合にはラベル sbj を用いる。また、形容詞の場合には、基本的にはラベル sbj を用い③のように表す。述部が形容詞となる文にはその他多くの文型があるが詳細は文献 [1] を参照されたい。

(2) 複文

複文は、前述のように基本的に一つの述語式で表す。以下に表現例を示す。

- ① “刑事は犯人が隠れている家を探している”
⇒ 探す (agt : c₁:刑事,
obj : c₂:[家]{隠れる (agt : c₃:犯人, plc : #)})
- ② “花子は太郎が犯人である事実を知っている”
⇒ 知る (agt : 花子:T,
obj : c₁:[事実]{犯人 (inst : 太郎:T)})
- ③ “太郎は花子が帰宅するときに会社へ行く”
⇒ 行く (agt : 太郎:T, gol : c₁:会社,
tme : c₂:[とき]{帰宅する (agt : 花子:T, tme : #)})
- ④ “花子は太郎が経営している会社の社員である”
⇒ [c₁:[会社]{経営する (agt : 太郎:T, obj:#)}]
の社員 (inst : 花子:T)

①と②は従属節が連体節の場合である。連体節は、被修飾名詞と連体節の述語との間に何らかの格関係が存在する場合と、単に連体節が被修飾名詞の内容を表す等価の関係の場合がある。①は前者の場合であり、節述語と先行詞部との間にラベル plc(場所格)で格関係があるためそこに#を付している。これに対し②は後者の場合であり、格関係が存在しないため#は付さない。②の例文において「事実」が「こと」や「の」に変わると名詞節となる。名詞節は節全体が名詞として機能する。したがって、節述語で名詞節を表せば先行詞部は不要となるが、後述する推論処理の都合上、形式的に概念「こと」を先行詞部に置く。③は連用節の場合であり、時間格 (ラベル tme) として表現すれば先行詞部は不要となるが、同様に概念「とき」を先行詞部に置く。④は従属節が述語式の引数部でなく述語部で表現される例である。

以上は、文が個別的な事象を表す (知識化したとき事実知

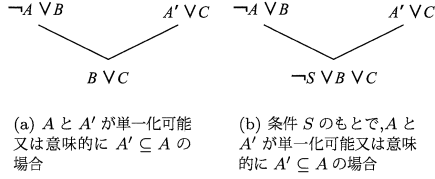


図1 推論処理の基本的な考え方

識となる) 場合の表現例であるが, 一般的な事象を表す(問題知識となる) 場合には, 基本的には以下のように個体を示す定数 (c_i) を変数 (x_i) に置き換えればよい.

- ⑤ “都会の会社で働く労働者は裕福である”
 ⇒ 裕福 (sbj : x_1 :{労働者}{働く (agt : #, plc : x_2 :{ x_3 :都会} の会社)})

なお, 述語式中の引数のラベルおよび#は, 説明上必要な場合以外は記述が複雑になるため以後省略する.

3 推論処理法

3.1 基本的な考え方

(1) 推論メカニズム

推論処理は図1に示すような導出処理を繰り返し用いることで行う. この処理の基本的な考え方は, 2つの親節 $\neg A \vee B$ と $A' \vee C$ から, A と A' が単一化可能または A が A' を意味的に包含しているならば導出節 $B \vee C$ を導き(図1(a)), あるいはそうなるための $\neg A$, A に含まれるソート間の条件 S をこれに付加して導出節とする(図1(b))というものである. したがって, S は処理の繰返す項として機能することになる. 例えば, A と A' がそれぞれ “賢い(太郎:T)”, “賢い(x :青年)” の場合, “青年(太郎:T)” が S となる. Beierle 等はこの条件 S (以下, SL 節と呼ぶ) を定式化し, これを用いた3つの推論規則を提案している.

本推論法は, この推論規則を構造を持ったソートも扱えるよう拡張したものである. さらに, 従来の順序ソート論理では, そこで用いられる各ソートのサブソート関係(ソート階層)が定義されているが, WPLにおけるソートは無数の構造(名詞句)がとり得るためすべてを定義しておくのは非現実的と言える(対話システムへの応用等では不可能). したがって, 本推論法では構造化されたソートの意味を予め定めた規則の下に解釈しながらその判定を行う.

(2) Beierle 等の推論規則

Beierle 等は前述のSL節を以下のように定式化している.

$$SL(\sigma) = \bigwedge \{S_i(\sigma(x)) \mid sort(\sigma(x)) \not\subseteq sort(x), \text{ where } x \in dom(\sigma), S_i = sort(x)\} \quad (2)$$

ここで, σ は単一化における代入, $sort(x)$ は代入される変数 x のソート, $sort(\sigma(x))$ は代入結果(代入する側)のソート, $dom(\sigma)$ は代入 σ に関する変数のドメインである. また, \wedge

は連言を表す. 本来, 単一化における代入は, 代入側のソートが代入される側のサブソートの場合(well-sortedness)に適切な代入であることが保証される. これに対し, そうでない場合(ill-sortedness)にも個体が両ソートに共通に属する場合があるので, それを定式化したのがSL節といえる. すなわち, SL節は, 変数 x への代入結果のソートが x のソートのサブソートでない($sort(\sigma(x)) \not\subseteq sort(x)$)ときに, x のソートを述語部, その代入結果を引数とするソート述語(代入される変数が複数ある場合はそのソート述語の連言)である. 例えば, $P(x_1:S_1, x_2:S_2)$ と $P(c_1:S'_1, c_2:S'_2)$ の単一化では, $\sigma = \{x_1 = c_1, x_2 = c_2\}$, $dom(\sigma) = \{x_1, x_2\}$ であり, $SL(\sigma) = S_1(c_1:S'_1) \wedge S_2(c_2:S'_2)$ となる($S'_1 \not\subseteq S_1, S'_2 \not\subseteq S_2$ の場合).

このSL節を用い, “EOS resolution rule(EOS), Subsort resolution(SUBS), Elimination rule(ER)” と呼ばれる3つの推論規則が以下のように定式化されている.

$$EOS: \frac{\neg L_1 \vee A, L_2 \vee B}{\sigma(A \vee B) \vee \neg SL(\sigma)} \quad (3)$$

ここで, L_1 と L_2 は述語部が同一の素式である.

$$SUBS: \frac{\neg S_1(t_1) \vee A, S_2(t_2) \vee B}{\sigma(A \vee B) \vee \neg SL(\sigma)} \quad (4)$$

ここで, $S_1(t_1)$ と $S_2(t_2)$ は $S_2 \subseteq S_1$ であるソート述語, σ は項 t_1, t_2 間の代入である

$$ER: \frac{\neg S_1(t_1) \vee A}{\sigma(A) \vee \neg SL(\sigma)} \quad (5)$$

ここで, $S_1(t_1)$ はソート述語, σ は項 t_1 に関する代入, また $sort(\sigma(t_1)) \subseteq S_1$ である.

EOS は, 述語部が同一の素式 L_1, L_2 を含む親節間における推論規則であり, 融合における最も基本的な規則である. SUBS は, 単一化する部分 S_1 と S_2 が共にソート述語の場合の規則であり, S_2 が S_1 のサブソートの場合に適用される. ER は, 代入処理後のソート述語を消去するための規則であり, 代入を行った結果のソートが述語部のソートのサブソートの場合に適用される.

3.2 推論規則の拡張と適用法

前節で示した推論規則を, 定義2のソート概念を扱えるように拡張する. 定義1の述語式を一般的に表すと以下ようになる. 述語部 P に変数 z が含まれるのはソート述語の場合である. また, ソート述語は単項述語とする.

$$L = P[z](x_1 : S_1[y], x_2 : S_2[y], \dots) \quad (6)$$

上式において, $y = \{y_1, y_2, \dots\}$, $z = \{z_1, z_2, \dots\}$ とし, 各変数の包含関係について規定する. まず, 変数 x_i と y の関係については, 2.2節の最後で述べたように S_i の y が x_i を含むことは禁止する. ただし, 他の引数のソート S_j が変数 x_i を使うことはあり得 “ $x_i \in S_j$ の y ” の関係は許容する. また, y と z の関係については, 同じ変数を用いて P や S_i を記述することはごく普通に起こるため, “ $z_i \in y$ ”,

“ $y_i \in z$ ”の関係も許容する。一方、変数 x_i と z の関係については、 z が x_i を含むことは禁止する。 Px は意味的に $x : P[x]$ と等価であるからである。

規則の拡張においては、単一化代入（引数間での代入）において生成される SL 節の他に、ソート概念内の変数に関する代入等の操作について規定することになるが、この際以上の変数の包含関係を考慮する必要がある。ここではまず規則の拡張に必要な SLp 節を以下のように定義する。

[定義 3] 二つのソート概念 S_1, S_2 について、 $S_2 \subseteq S_1$ となり得るための、 S_1, S_2 中の個体概念が指す個体が満たすべき条件（ソート述語の連言）を SLp 節と呼ぶ。

例えば、“ $S_1=[x:\text{社長}]\text{の船}$ ”、“ $S_2=[c:\text{青年}]\text{の船}$ ”の場合、青年である個体 c が社長でもあれば、 $S_2 \subseteq S_1$ を満たし得る。したがって、“社長 (c :青年)”が SLp 節となる。

3.2.1 EOS

EOS は以下のように基本的に前節の式 (3) と同じである。

$$[EOS]: \frac{\neg L_1' \vee A, L_2 \vee B}{\sigma(A \vee B) \vee \neg SL(\sigma)} \quad (7)$$

ただし、単一化の対象となる述語式 L_1', L_2 の述語部についてはそれらが同一であるか、前者のそれが後者の上位概念であり、また引数部については前者の引数と同一のラベルの引数が必ず後者にも含まれているとする。すなわち、 L_1' と L_2 が同一の場合だけでなく前者が後者を意味的に包含する場合を含むように拡張する。下位概念で成り立てばその上位概念で成り立つことは当然であり、また、述語式において引数が増えることはその意味をより限定することになるからこれは自然な拡張と言える。

また、 σ はその単一化における引数間の代入であり、 $SL(\sigma)$ はその代入に伴い生成される SL 節である。これは式 (2) から以下のように変更される。

$$SL(\sigma) = \bigwedge \{S_i(\sigma(x)) \mid \sigma(\text{sort}(\sigma(x))) \not\subseteq \sigma(\text{sort}(x))\} \\ \text{where } x \in \text{dom}(\sigma), S_i = \sigma(\text{sort}(x)) \quad (8)$$

式中の記号の意味は式 (2) と同様である。SL 節の生成条件 (| の右側の式) と S_i が、代入 σ に関する変数がソート内に含まれることがあるため変更されている。

以下、EOS の具体的な適用例について説明する。式 (7) において、 $A = B = 0$ で、 L_1' と L_2 がそれぞれ、“働く (x_1 :青年, x_2 :[企業]{ 営む (y_1 : x_1 :青年] の親戚)})” と “働く (c_1 :専門家, c_2 :[会社]{ 営む (c_3 :政治家)})” としよう。この場合、 $\sigma = \{x_1 = c_1, x_2 = c_2\}$ であり、第 1 引数の変数 x_1 が第 2 引数のソートに含まれているためその代入も行われ、“ $SL(\sigma) = \text{青年 } (c_1:\text{専門家}) \wedge [\text{企業}]\{\text{営む } (y_1:[c_1:\text{専門家}]\text{の親戚})\}(c_2:[会社]\{\text{営む } (c_3:\text{政治家})\})$ ” となり、 $A = B = 0$ なのでこの SL 節が導出節となる。

なお、 σ と関係しない変数に関してはソート間では代入（先の例では y_1 への c_3 の代入）は行わない。SL 節と単一化可能な知識が存在した場合、それを用いてそのまま推論を進められるからである。それが存在しない場合には、この

代入は後述する ER の段階で行われることになる。

3.2.2 SUBS

SUBS は定義 3 の SLp 節を加え以下のように拡張される。

$$[SUBS]: \frac{\neg S_1(t_1) \vee A, S_2(t_2) \vee B}{\sigma\sigma_p(A \vee B) \vee \neg SL(\sigma\sigma_p) \vee \neg SLp} \quad (9)$$

ここで、 S_1, S_2 が単一化の対象となるソート述語である。 σ はその単一化における引数間の代入であり、 σ_p は S_1, S_2 のみに含まれる変数に対する代入である。 $SL(\sigma\sigma_p)$ は代入 σ, σ_p に伴い生成される SL 節である。また、 $\sigma\sigma_p(x)$ は $\sigma(\sigma_p(x))$ を意味するが、本節の冒頭で述べた変数の包含関係から σ と σ_p は互いに独立な代入となり、 $\sigma\sigma_p(x) = \sigma\sigma_p(x)$ である。SUBS は本来、 $S_2 \subseteq S_1$ の場合に適用される規則であり、上式はそうなるためのソートの条件である SLp 節の否定を導出節に付加したものである。

また、SUBS では SL 節は以下のように表される。

$$SL(\sigma\sigma_p) = \bigwedge \{S_i(\sigma(x)) \mid \sigma_p(\text{sort}(\sigma(x))) \not\subseteq \sigma_p(\text{sort}(x))\} \\ \text{where } x \in \text{dom}(\sigma), S_i = \sigma_p(\text{sort}(x)) \quad (10)$$

記号の意味はこれまでと同様であり、式 (8) の σ の一部が σ_p に置き換わった形になっている。式 (6) において z_i が y に含まれることがあるためである。

以下、SUBS の適用例を示す。式 (9) において、 $A = B = 0$ で、 S_1 と S_2 がそれぞれ、“ $[z_1:\text{会社}]$ の後継者 ($x_1:[y_1:[z_1:\text{会社}]]$ の社長]の子供)” と “[日芝:T]の後継者 ($c_1:[c_2:[日芝:T]]$ の重役]の親戚)” としよう。この場合、 $\sigma_p = \{z_1 = \text{日芝}\}$ 、 $\sigma = \{x_1 = c_1\}$ であり、式 (10) から SL 節は、

“ $SL(\sigma\sigma_p) = [y_1:[日芝:T]]$ の社長]の子供 ($c_1:[c_2:[日芝:T]]$ の重役]の親戚)”

となる。一方、SLp 節については、 σ_p が適切な代入であるためには個体“日芝”が z_1 のソートに属している必要がある。したがって、

“ $SLp = \text{会社 } (日芝:T)$ ”

となり、 $A = B = 0$ なのでこれら SL 節と SLp 節の連言が導出節となる。

3.2.3 ER

ER は SUBS と同様に以下のように拡張される。

$$[ER]: \frac{\neg S_1(t) \vee A}{\sigma\sigma_p(A) \vee \neg SL(\sigma\sigma_p) \vee \neg SLp} \quad (11)$$

ここで、 S_1 が消去対象のソート述語であり、 σ はその項 t に対する代入、 σ_p はその代入結果のソートと S_1 間での代入である。 $SL(\sigma\sigma_p)$ は、代入 σ, σ_p に伴い生成される SL 節であり、式 (10) と同じ式となる。ER は本来、 $\text{sort}(\sigma(t)) \subseteq S_1$ の場合に適用される規則であり、 SLp はその関係を満たすための条件であり、SUBS の場合と同じように生成される。

以下、ER の適用例を示す。式 (11) において、 $A = 0$ 、 $S_1 = [z_1:\text{先進国}]$ の関係 ($x_1:[z_1:\text{先進国}]$ の財閥) で、変数 x_1 に対して “ $x_1 = c_1$: [日本:T] の関係” が代入 (σ) されたとしよう。この場合 σ により、 S_1 は “[z_1 :先進国] の関係 (c_1 : [日

本:T]の関係)となり, “[日本:T]の関係 \subseteq [z₁:先進国]の関係”なら真となり消去される。このためには, $\sigma_p = \{z_1 = \text{日本}\}$ が適切な代入となる必要があり, SL_p節は, “SL_p=先進国(日本:T)”となる。また, SL節は以上の代入 σ, σ_p により, “SL($\sigma\sigma_p$)=[日本:T]の財閥(c₁:[日本:T]の関係)”となり, $A = 0$ なのでこれらの連言が導出節となる。

ERは, 主にEOSやSUBSの適用で生成されたSL節やSL_p節を消去するための規則とも言える。したがって, 実際の推論処理ではまずEOSやSUBSを先に適用し, その後その導出節に対してこの適用を行うことになる。ただし, EOSやSUBSの適用の直後ではなく, そこで発生するSL節が直接満たされない(知識中にそれと同じ節がない)ことを確認した後に適用すべきである。なお, これら推論規則の健全性と完全性に関する厳密な証明については別途報告する予定である(健全性の概略的な証明のみ付録に示す)。

4 サブソートの判定法とSL p節の生成法

4.1 サブソート関係の判定法

サブソート関係は, ソートである概念間の意味的な包含関係(包摂)である。3.1節で述べたように, 本推論法では構造を持ったソートについてはその関係は未定義であり推論プロセスの中で判定する。この厳密な判定は, 2章で述べたように名詞句の意味解析が難しいことから, 極めて困難と言える。ここでは, 以下の仮定の下での判定基準を提案する。

- ① 助詞を含めすべての概念は同じ表記であれば同じ意味を持つ。
- ② 概念 a, b, c, d において, $sort(a) \subseteq sort(c)$ かつ $sort(b) \subseteq sort(d)$ のとき $sort(ab) \subseteq sort(cd)$ 。

ここで, ab とは a が b を修飾していることを意味する。また, $sort(g)$ は概念 g のソートを表す。①は多義性は扱わないということである。②は, ある概念 a が他の概念 b を修飾するとき, a は b の意味範囲を限定する働きを持ち, a の意味範囲が広ければ限定の度合いは小さく, 狭ければ大きくなるとの考えに基づいた仮定である。

定義2で示したようにソート概念 S は基本概念 w , 節付概念 w_p , 複合概念 G のいずれかであり, 以下これら毎のサブソート関係について考える。これら相互間については, 修飾部分の意味に依存することが多く判定が微妙になるため(例えば, “医者”と“偽の医者”の関係), ここではサブソート関係は無いとして扱う。

(1) 基本概念間

複合語間については修飾部と被修飾部の関係が多様であるだけでなく慣用的な表現もあり, 上記の②の仮定が成り立たない場合が少なくない。例えば, “貿易会社”と“取引会社”, “トラック会社”と“自動車会社”では, それぞれにおいて構成概念自体は前者が後者の下位概念あるいはサブソートであるが全体ではそうならない。このような関係は

修飾概念が特性や動作を表す概念の場合(主に property 分類における非ソート)に多いが, 後者の例のようにごく一般的なソートに属していてもあり得る。

したがって, ここでは複合語は単語と同様の一つの概念として扱う。なお, 単語間のサブソート関係は全ての概念間の判定の基本となるが, これについては予め定義されているとする。

(2) 節付概念間

節付概念 $[S]\{L_p\}$ は節述語 L_p により先行詞部 S を修飾した概念であり, 集合論的に見れば, ソート S に属する個体の集合を L_p により限定したものである。したがって, 一般的には②の仮定が成り立たつと考えられる。さらにその関係は両者の間に存在する格関係を示す記号“#”のラベルにより識別可能であり, 以下のような判定基準が設定できる。ここで, 比較する二つの節付概念を $w_{p_a} = [S_a]\{L_{p_a}\}$, $w_{p_b} = [S_b]\{L_{p_b}\}$ とする。また, L_{p_a} , L_{p_b} の述語部をそれぞれ, P_a , P_b とする。

・節付概念の判定基準

以下をすべて満たしたとき, $sort(w_{p_a}) \subseteq sort(w_{p_b})$ 。

- i) 既定義あるいは複合概念の判定基準または本判定基準により, $sort(S_a) \subseteq sort(S_b)$ かつ $sort(P_a) \subseteq sort(P_b)$ (述語部が動詞の場合は w_{p_b} 側が w_{p_a} の上位概念)。
- ii) L_p の引数部について, w_{p_b} 側の引数と同一のラベルの引数が w_{p_a} 側に含まれ, かつそれら引数が同一個体を示す。また, 記号“#”のラベルが同一。

i) は当然の条件であり, 予め定義されている基本概念間のサブソート関係あるいは次に示す複合概念の判定基準を用い判定する。また, 先行詞部がさらに節付概念の場合は本判定基準を再帰的に適用する。ii) の最初の条件は, 引数の数が多い方がより限定的な意味となるからであり, 次の条件は, 同一個体に関する節述語でない先行詞部に対する制限範囲が異なってくるからである。

この基準では例えば, “[乗用車]{製造する(c₁:工具,#, c₂:[工場])} \subseteq [自動車]{作る(c₁:青年,#)}”, となる。

(3) 複合概念間

複合概念 G は主概念を修飾概念と助詞の繰り返しにより修飾した概念であり, 助詞の多義性を無視すれば修飾部と被修飾部の関係は一義的に定まることが多い。また, 複合語と異なり慣用的な表現も少ない。したがって, 一部の修飾概念を除いて②の仮定が基本的に成り立たつ。

また, 複合概念では構成概念間の関係が複雑で, 修飾概念が後続の修飾概念を修飾し直接主概念を修飾しない場合もある。したがって, 厳密にはこの関係が解析できない限り全体のサブソート関係は判定できないが, ここでは比較する複合概念の構造が同一なら修飾関係も同一と仮定する。

以上を考慮し, 複合概念間のサブソート関係について以下のような近似的な判定基準を設定する。ここで, 修飾概念および主概念を g , 助詞を p とし, 比較する二つの複合概念

念 G_a, G_b を以下で表す.

$$G_a = (g_{a_1} + p_{a_1})(g_{a_2} + p_{a_2}) \cdots g_{a_m}$$

$$G_b = (g_{b_1} + p_{b_1})(g_{b_2} + p_{b_2}) \cdots g_{b_n}$$

・複合概念の判定基準

以下のすべてを満たしたとき, $sort(G_a) \subseteq sort(G_b)$.

- i) G_a と G_b が同数の修飾概念を持つ ($m = n$).
- ii) 対応するすべての助詞が同一 ($p_{a_i} = p_{b_i}$).
- iii) 修飾概念の中に修飾範囲を絶対的に限定できない概念を含まない.
- iv) 対応するすべての修飾概念および主概念について $sort(g_{a_i}) \subseteq sort(g_{b_i})$.

ただし, 修飾概念がともに個体概念の場合それらが示す個体が同一.

i) と ii) は構造が同一となるための条件である. iii) は冒頭で述べた一部の修飾概念について規定したもので, 具体的には, すべての修飾概念は被修飾概念に依存せずかつ絶対的に個体を特定できる概念に限られるということである. iii) に該当する概念としては, “大型”, “優秀” 等の特性 (主に程度) を表す概念が挙げられる. 例えば, “大型の金魚” と “大型の魚” の関係では, “金魚” は “魚” のサブソートであるが全体ではそうならない. “大型” という概念は被修飾概念に依存して相対的にその範囲が定まるからである. 文献 [10] では概念の property 分類を行っているが, そこでの準ソートや信念依存の概念の一部がこの種の問題となる.

iv) は構成要素である修飾概念毎にサブソート関係が成り立つという条件である. 修飾概念が節付概念の場合は先の判定基準とこの判定基準とを繰り返し適用する. また, iv) の後半の条件は, 修飾する個体が異なれば限定される範囲も異なることによる. この場合, 個体が同一なら当然そのソートの違いは判定に影響しない.

この基準では例えば, “[c_1 :女優] から [c_2 :青年] への手紙 \subseteq 芸能人から [c_2 :社長] への連絡”, となる.

ソート概念 S のサブソート関係の判定では, それが再帰的な構造をとる場合, 以上の 2 つの判定基準を比較する概念の種類に応じて繰り返し適用する.

4.2 SLP 節の生成法

SLP 節は定義 3 で示したように, $S_2 \subseteq S_1$ あるいは $sort(\sigma(t)) \subseteq S_1$ を満たすために, それらのソート概念中の個体概念が示す個体が満たすべき条件として生成される. 具体的には, 節付概念の判定基準の ii) の条件が引数における変数の代入により, また複合概念の判定基準の iv) の条件が個体概念間の変数の代入およびみなし代入により満たされ, これらによりソート概念全体のサブソート関係が満たされるときに生成する. ここで, みなし代入とは, 一般概念と個体概念間の比較において, その個体が一般概念に含まれるとするとする操作を言うこととする. 例えば, “若者の家” と “[太郎:T] の家” というソート間では, 若者 (太郎:T) なら前者が示し得る個体の集合は後者のそれを包含することにな

る. ただし, みなし代入は, S_1 側が一般概念, S_2 あるいは $sort(\sigma(t))$ 側が個体概念の場合のみの操作とする (逆の場合は包含関係が成り立たない).

これらの代入が適切になる条件を述語式の連言として表現したものが SLP 節であり, 個体概念間の変数の代入を σ_p , みなし代入における一般概念を g_b , 個体概念を $t : g_a$ としたとき, 以下のように表される.

$$SLP = \bigwedge \{ S_i(\sigma_p(z)) | \sigma_p(sort(z)) \not\subseteq \sigma_p(sort(z)) \}$$

$$\text{where } z \in dom(\sigma_p), S_i = \sigma_p(sort(z))$$

$$\bigwedge S'_i(t) \text{ where } S'_i = \sigma_p(g_b) \quad (12)$$

第 1 項が個体概念間の代入により生成される節, 第 2 項がみなし代入による節である. 第 1 項における $sort(\sigma_p(z))$ や $sort(z)$ および第 2 項における g_b に代入 σ_p を作用させているのは, それらに含まれる変数がその代入に関与する場合があるからである.

みなし代入は厳密には代入ではなくその部分の概念間だけの置換えである. したがって, SLP 節の生成だけに関し推論規則の他の部分には影響しない.

また, 2 章で定義したようにソート概念は再帰構造となるため, それに含まれる変数は多層にネストした形となり得る (3.2 節の EOS での例を参照). したがって, この変数に関する代入操作が問題となるが, これについてはネスト構造の変数のうち, 代入可能な最も外側の変数に対して行う (その内側の層の変数の代入は後の推論規則適用時に行う). 以下に SLP 節の生成例を示す.

- ① $S_1 = \text{都会の専門家 } (x:\text{賢者})$
 $S_2 = [\text{東京:T}] \text{ の医者 } (太郎:T)$
 $\cdots \text{ SLP} = \text{都会 } (東京:T)$
- ② $S_1 = [\text{政治家}] \{ \text{支持する } (x:\text{青年}) \}$ から [x :青年] への連絡
 $S_2 = [c_1:\text{社長}]$ から [c_2 :学生] への手紙
 $\cdots \text{ SLP} = \text{青年 } (c_2:\text{学生})$
 $\wedge [\text{政治家}] \{ \text{支持する } (c_2:\text{学生}) \} (c_1:\text{社長})$
- ③ $S_1 = [x:\text{企業}] \{ \text{営む } (y:\text{富豪}) \}$ の従業員 (z :青年)
 $S_2 = [c_1:\text{会社}] \{ \text{営む } (c_2:\text{青年}) \}$ の社員 (太郎:T)
 $\cdots \text{ SLP} = [\text{企業}] \{ \text{営む } (y:\text{富豪}) \} (c_1:\text{会社}) \{ \text{営む } (c_2:\text{青年}) \}$

4.3 推論処理の具体例

推論処理の流れの例を図 2 に示す. この例では拡張した EOS, ER, SUBS が順次適用され推論が進められている.

5 まとめ

日本語文向きの順序ソート論理を用いた知識表現法 WPL とその推論法について提案した. WPL は, 既存の辞書やツールを利用した自然言語文からの自動変換を意識した知識表現法であり, 単文, 複文とも一つの述語式で表現される. ソートには従来の単純な概念でなく, 名詞句のような構

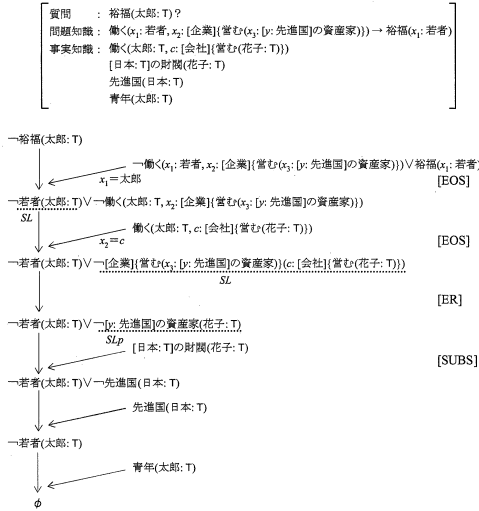


図 2 推論処理の流れ

造 (変数を含むことも可) を持った概念を許容する。また、WPL に対する推論法は、ソート内の変数に対しても代入操作を行い、それが適切になる条件を導出節に付加し推論を進めるよう、従来の推論規則を拡張したものである。

ここで提案した推論法は、サブソート関係を判定しながら推論を進めるもので、従来の推論法 (この関係が既定義) とは基本的に異なる枠組みと言える。その健全性と完全性はこの判定の正確さに依存することとなるが、自然言語の持つ曖昧性を考慮したときこれを厳密に追及することはあまり現実的ではないと考える。すなわち、自然言語を対象とした推論は概略的なものにならざるを得ないと言え、こういった視点も今後重要と考える。

参考文献

[1] Antoniou, G. and Bikakis, A.:DR-Prolog:A System for Defeasible Reasoning with Rules and Ontologies on the Semantic Web, IEEE Trans. Knowledge and Data Engineering, Vol.19, No.2, pp.233-245 (2007)

[2] Universal Networking Digital Language (UNDL), <http://www.undl.org/>

[3] Brachman, R. J. and Levesque, H. J.:The tractability of subsumption in flame-based description language, Proc. National Conf. on Artificial Intelligence, pp.34-37 (1984)

[4] Walthor, C.:Many-sorted unification, J.ACM Vol.35, No.1, pp.1-17 (1988)

[5] Beierle, C., Hedtstuck, U., Pletat, U., Schmitt, P. H., Siekmann, J.:An order-sorted logic for knowledge representation systems, Artificial Intelligence, Vol.55, pp.149-191 (1992)

[6] 石川勉:自然言語文からの論理式生成と推論, 人工知能学会誌, Vol.22, No.5, pp.613-620 (2007)

[7] 佐々木智彦, 石川勉:連結定数で結合された素式群による複文の述語知識表現法とそれへの変換法, FIT2004, E-017 (2004)

[8] 黒橋禎夫:言語コンピューティング, 人工知能学会誌, Vol.22, No.5, pp.711-720 (2007)

[9] Kaneiwa, K.:Order-sorted logic programming with pred-

icate hierarchy, Artificial Intelligence 158 pp.155-188 (2004)

[10] 兼岩憲, 溝口理一郎:形式オントロジーと順序ソート論理の拡張, 人工知能学会論文誌, Vol.20, No.6, pp.387-395 (2005)

[11] 石川勉, 佐々木智彦, 佐藤雅彦:言葉ベースとする拡張型述語論理形式の知識表現法, 人工知能学会ことば工学研究会資料 SIG-LSE-A303 pp.25-32 (2004)

付録 A 健全性の証明

最も複雑な SUBS (本文中の式 (9) と (10)) について証明する。まず以下を証明する。

$$\frac{\neg S_1(t_1) \vee A, S_2(t_2) \vee B}{\sigma'_p[\neg S_1(t_1) \vee A], \sigma'_p[S_2(t_2) \vee B]} \vee \neg SLp$$

ここで、 $\sigma'_p = \sigma_p + \delta$ (δ はみなし代入) であり、 $SLp = \wedge s_i(\sigma_p(z)) \wedge s'_i(t)$ とする (第 1 項は σ_p による、また第 2 項は δ による SLP 節 (ソート述語の連言))。

上式は、

$$\forall x_1 : s_1 \cdots \forall x_m : s_m \forall z_{m+1} : s_{m+1} \cdots \forall z_n : s_n [\neg S_1(t_1) \vee A]$$

$$\forall x_1 : s_1 \cdots \forall x_m : s_m \forall z_{m+1} : s_{m+1} \cdots \forall z_n : s_n [S_2(t_2) \vee B]$$

を充足するモデルを G としたとき、この G が以下を充足すれば成り立つ。

$$\forall x_1 : s_1 \cdots \forall x_m : s_m [\sigma'_p[\neg S_1(t_1) \vee A], \sigma'_p[S_2(t_2) \vee B]] \vee \neg SLp$$

ここで、 x_i は項の変数であり、 z_i は S_1, S_2 中の変数である。

モデル G において、 $dom(\sigma_p)$ 内のある変数 z_i について

$$\models_G \neg s_i(\sigma_p(z))$$

あるいは、みなし代入 δ におけるある個体概念について

$$\models_G \neg s'_i(t)$$

とすると、これらは $\neg SLp$ に含まれるので当然、以下が言える。

$$\models_G \neg SLp$$

一方、すべての変数 z_i について

$$\models_G s_i(\sigma_p(z))$$

および、みなし代入 δ におけるすべての個体概念について

$$\models_G s'_i(t)$$

とすると、これらの代入操作をもとの $\neg S_1(t_1) \vee A$ と $S_2(t_2) \vee B$ に対して行った結果も充足される。すなわち、

$$\models_G \sigma'_p[\neg S_1(t_1) \vee A, S_2(t_2) \vee B].$$

したがって、モデル G は、

$$\forall x_1 : s_1 \cdots \forall x_m : s_m [\sigma'_p[\neg S_1(t_1) \vee A], \sigma'_p[S_2(t_2) \vee B]] \vee \neg SLp$$

を充足し最初の式が成り立つ。

次に上式は、みなし代入 δ が S_1, S_2 だけを対象とするので、

$$[\sigma'_p[\neg S_1(t_1) \vee A], \sigma'_p[S_2(t_2) \vee B]] \vee \neg SLp$$

$$= [\neg \sigma'_p[S_1](\sigma_p[t_1]) \vee \sigma_p[A], \sigma'_p[S_2](\sigma_p[t_2]) \vee \sigma_p[B]] \vee \neg SLp$$

$$= [\neg S'_1(t'_1) \vee A', S'_2(t'_2) \vee B']$$

と変形できる。ここで、 $S'_1 = \sigma'_p[S_1], t'_1 = \sigma_p[t_1], A' = \sigma_p[A] \vee \neg SLp, S'_2 = \sigma'_p[S_2], t'_2 = \sigma_p[t_2], B' = \sigma_p[B] \vee \neg SLp$ である。

SLP 節は定義 3 から $S_2 \subseteq S_1$ を満たすための条件であるから、 σ'_p を適用した S'_1, S'_2 間では $S'_2 \subseteq S'_1$ が成り立ち、上式に対し Beierle 等の SUBS (式 (4)) を適用できる。この結果、

$$\sigma(A' \vee B') \vee \neg SL(\sigma) \text{ が導かれる。} A', B' \text{ をもとに戻すと}$$

$$\sigma(A' \vee B') \vee \neg SL(\sigma)$$

$$= \sigma((\sigma_p[A] \vee \neg SLp) \vee (\sigma_p[B] \vee \neg SLp)) \vee \neg SL(\sigma).$$

変数 x は S_1, S_2 に含まれず SLP 節にも含まれないので、 $\sigma(SLp) = SLp$ であり、

$$= \sigma \sigma_p(A \vee B) \vee \neg SLp \vee \neg SL(\sigma).$$

これにより式 (9) は証明された。

また、上式における $SL(\sigma)$ は、 σ が項の変数に対する代入であり、そのソート部には代入 σ_p が作用されているので、式 (2) 中の $sort(\sigma(x))$ および $sort(x)$ に σ_p を作用させる必要がある。これにより式 (2) は式 (10) と同一になり、式 (10) が証明された。

なお、EOS (式 (7), (8)), ER (式 (11)) の健全性も同様に証明できる。