日常語をベースと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

A Knowledge Representation Scheme Using Ordinary Words and the Inference Mechanism on Order-sorted Logic

石川 勉

Tsutomu Ishikawa

拓殖大学工学部情報工学科

Department of Computer Science, Faculty of Engineering, Takushoku University

ben@cs.takushoku-u.ac.jp

keywords: knowledge representation, inference method, order-sorted logic, natural language

Summary

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. Each word in a sort symbol can represent a general concept or a particular object. If it is the latter, each word stands for a variable or constant having itself as a sort symbol. It may also be a proper noun or variable itself. 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. This paper also describes an application scheme of the proposed inference rules and an algorithm for judging the subsort relation between 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、Loebner コンテスト等からも分かるように未だに 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 の研究も活発化し、RDF(Resource Description Framework) や XML (Extensible Markup Language) およびそれらをベースとするオントロジー言語 OWL(Web Ontology language) 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 [Antoniou 07]。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 Web 情報や一般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(Universal Networking Digital Language)[UNL, 石塚 06]、オントロジー記述への適用性を意識した DL(Description Logic)[Brachman 84, 兼岩 03] 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、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となる。

このような背景から、ここでは多くの知識表現法の中から、①単一化に基づく強力な推論との結合という観点から述語論理ベースの表現法、②効率的な推論処理の観点から照合範囲を限定できるソート論理、③自然言語文に対する推論という観点から語彙知識と規則的知識の結合に有利な順序ソート論理、という絞込みにより順序ソート論理 [Walther 88, Cohn 87] を選ぶ。本論文では、その表現能力をさらに拡張した知識表現法 WPL(Words-based extended Predicate Logic) およびそれに対する効率的な推論処理法を提案する。これらは最終的には知識ベー

ス上での推論を目的としている。

WPL は、現在の自然言語処理技術の活用による自動変換を意識した日常語ベースの知識表現法であり、最大の特徴はソートに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点にある。この構造を持ったソートを用い、単文、複文に係わらず一つの自然言語文は一つの述語式（素式）で、かつ見通しがよい形で表わされる。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）に埋め込んで表現される。さらに従属節も述語式を使って表現するため循環構造を持った表現形式となる。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、そのソート中にも変数の使用を許容する。

WPL に対する推論法は、このような複雑な構造を持つソートを扱う必要があり、ここでは、Beierle らによって提案されている拡張型順序ソート論理 [Beierle 92] 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、導出処理に SLp 節と呼ぶ一種の処理の繰り延べ項を導入した推論規則を提案する。本推論法は、構造を持ったソートの意味的な包含関係を判定しながら導出処理を進めるもので、広い意味での解釈の一部が推論プロセス中に持ち込まれることになる。

本論文では、2 章で研究の動機および WPL の表現対象・構成・表現法について述べる。3 章では、WPL に対する推論法の基本的な考え方、Beierle らの推論規則およびその拡張について述べる。4 章では、拡張した推論規則の適用において重要となる、構造を持ったソート間のサブソート関係の判定法とそれに基づく SLp 節の生成法について述べる。また、5 章では本推論法の具体的な適用例を示し、6 章では従来の順序ソート論理に対する優位性、推論規則の健全性と完全性等について考察する。

2. 日常語ベースの知識表現法 WPL

2.1 研究の動機

本論文は 1 章で述べたように知識表現法とその推論法の提案であり知識への変換法の提案ではないが、これらは自然言語文を推論で扱う場合一貫性をもって捉える必要があるため、ここではまず後者について簡単にふれる。次に、前者のベースとなる順序ソート論理の概要とその拡張の必要性について述べる。なお、本論文で提案する WPL への変換法については別途報告する予定である。

(1) 自然言語文からの変換可能性

自然言語文の論理式表現については、モンタギュー文法 [Montague 73, 白井 85] 以降広く研究されてきた。しかし、情報伝達を目的としかつ曖昧性を有する自然言語と真偽を扱う論理とは本質的に相容れない面があり、極めて難しい課題である。従って、現在でも実用的なレベ

ルに達しているとは言い難いが、曖昧性の解消を目指した研究や、ACE[Fuchs 06] のように対象とする文を曖昧性の無い範囲に限定したアプローチ等がなされている [石川 07]。筆者らも、茶筌、南瓜 [松本 04] 等の解析ツールや EDR 電子化辞書 [EDR 96] 等を用いた自動変換法について研究しており、簡単な文については変換可能としている [佐々木 04]。最近はさらに、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 [黒橋 07]、少しずつではあるがこの可能性は高まっている。すなわち、完璧性を求めなければ実用に近づきつつあると言える。

(2) ソート論理と順序ソート論理

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（単一化）における照合範囲が限定されその効率化が図れる。

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）が導入される。これはサブソート関係（以下、この関係を記号 $\subseteq$ で表す）と呼ばれ、例えば「医者」と「専門家」の間には、「医者 $\subseteq$ 専門家」という関係がある。この場合、「医者」は「専門家」のサブソートであるという。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。先の例で言うならば「医者」であるならば誰もが「専門家」でもあるということである。したがって、順序ソート論理では、ソート $s_1 \subseteq s_2$ なら、 $\forall x[Q(x:s_2) \rightarrow Q(x:s_1)]$ の関係が成り立つ。例えば Q が「賢い」という述語だとすると、先の例では、「すべての専門家 x が賢ければ医者 c は賢い」ということになり、これは真である。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、以上の説明からも分かるように階層性を有する語彙知識と論理式で表される規則的知識との結合に適している。このため近年、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きており、ソート階層と論理式の密な結合 [Beierle 92]、階層構造を持った多項述語への拡張 [Kanejwa 04]、形式オントロジーの property 分類を導入した拡張 [兼岩 05] 等々活発に研究されてきている。

(3) 拡張の必要性

順序ソート論理は、以上のように語彙知識の活用が不可欠な自然言語文の推論処理に適しているが、従来の表現法では必ずしも十分とは言えない。例えば「青年が外国の企業で働く」という文は、「働く $(x:\text{青年}, y:\text{企業}) \wedge$ 存在する $(y:\text{企業}, z:\text{外国})$ 」と表現することとなる。この場合、名詞句「外国の企業」の中の助詞「の」の意味を「存在する」と識別する必要があるが、その自動変換は容易ではない。また、これを避けるため「の」の意味を識別せずに、「働く $(x:\text{青年}, y:\text{企業}) \wedge$ の $(y:\text{企業}, z:\text{外国})$ 」の

ように表現することも可能であるが、名詞句の構造が複雑な場合には見通しの良い(その表現を見て意味が分かりやすいという意)表現法とは言えない。

また、表現能力に関しても、例えば「太郎は花子を読んだ本を買った」も「花子は太郎が買った本を読んだ」も、「買う(太郎:T,a:本) ∧ 読む(花子:T,a:本)」と同一の表現になってしまう。すなわち、時制論理の概念を導入しないと、従来の表現法では「読む」と「買う」との前後関係が表現できない。勿論、関数を用いて、それぞれ「買う(太郎:T,f₁(花子:T):本)」、「読む(花子:T,f₂(太郎:T):本)」と表すことも可能であるが、これらも見通しの良い表現とは言えない(ここで関数 f₁(x)、f₂(x) は、それぞれ「x が読んだ本」、「x が買った本」を意味する)。関数と構造を持ったソートとの本質的な違いは 6 章で述べる。

これら問題は、従来の順序ソート論理においては名詞句のような構造を持ったソートを扱えない(扱う場合はひとつの概念として定義)ことに起因する。すなわち、これを扱うように拡張すれば、最初の例文は「働く(x:青年,y:[z:外国]の企業)」と表すことができる。また、後の例文は、従属節の部分を述語式(真偽ではなく修飾の機能)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:T,a:[本]{読む(花子:T)})」、「読む(花子:T,a:[本]{買う(太郎:T)})」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、単文だけでなく複文も正確にかつ見通し良く表現可能となる。また、意味解析が難しい名詞句を知識表現上一纏まりとして扱うと、自動変換上も有利である。WPL はこのような表現を可能とする知識表現法である。

2.2 WPL の表現対象

WPL では以下の条件を満たす自然言語文を表現対象とする。

- ①主語・述語の明確な文
- ②文の表現主体からは独立な、対象にかかわる文

①は、自然言語処理ツールによる自動変換を意識しているため、当然の条件である。また、②は、変換された知識を推論処理で使うことを想定しているため、文の表現主体にかかわる文は有用性が少ないと考えられるからである。以下これについて簡単に説明する。

文献[益岡 00]では、文はその表現主体から独立した対象にかかわる文と表現主体にかかわる文とに分けられ、さらに、前者は一般的な事態を表す文と個別的な現象を表す文に、一方後者は主体の判断を表す文と事態あるいは判断を表現・伝達する文に分けられるとしている。これらをそれぞれ「事態命名のレベル」、「現象のレベル」、「判断のレベル」、「表現・伝達のレベル」と呼び、こうした文のまとまりを支える概念の諸段階を「文の概念レベル」と呼んでいる。これら概念レベルの文を例示すれば、それぞれ「春は雨が降る」、「昨日は雨が降った」、「今

日は雨が降るだろう」、「昨日は雨が降ったようだ」といった文が挙げられよう。この例から分かるように、事態命名のレベルの文は、クラス・インスタンスの関係で考えればクラスに相当し、現象のレベルの文はインスタンスに相当する。この種の文は知識化したとき、一般に前者は規則的知識(問題知識)として、後者は事実知識として推論処理において利用できることは明かである。一方、残りの 2 つの概念レベルの文は、各種の問題解決を主目的とする推論処理では、不可能とは言えないまでも有用性は少ないと言えよう。よって、ここでは表現対象を②の文、すなわち、事態命名のレベルの文と現象のレベルの文に限定する。

2.3 WPL の構成

WPL は、一つの文(単文および複文)を定義 1 に規定する一つの述語式により表す、順序ソート論理ベースの知識表現法である。その述語式中のソートは定義 2 で規定されるソート概念である。また、WPL での論理式は一般的な一階述語論理の場合と同様に、述語式を連言、選言、含意等の論理演算子で結合し、全称限量子、存在限量子で量化したものである。

(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)。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(主に EDR 辞書で用いられているラベルを想定)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[石川 04]。

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こととする。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:T」と表す(ソートが分かっている場合は T でなくそれをソート概念として用いる)。なお、従来の順序ソート論理では引数に関数を用いることができるが、WPL では定義 2 の構造を持ったソート概念により表現できるため、基本的には不要である(関数を利用する場合には

定義 1 の変数, 定数を関数とみなせばよい. 3 章の推論法は関数の使用をも想定したものである).

(2) ソート概念

[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.

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

ここで, 修飾概念 = $w \text{ or } w_p \text{ or } g_s$
主概念 = w

- $S = w \text{ or } w_p \text{ or } G$

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. また, L_p は複文における従属節を表すための述語式 (以下, 節述語と呼ぶ) であり, 構成上は定義 1 の述語式 L と同一である. ただし, L は“真”または“偽”をその値とするが, L_p は従属節で述べられている現象や状況等の事柄を表わす.

この定義中の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. 形容詞等で修飾された名詞もこれに含める. 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, 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. 助詞は「の」「から」, 「への」等々名詞の連結に用いられるものなら何でもよい. 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. 例えば, 「社長の船の模型」という名詞句では, 「模型」が主概念である. 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 のいずれかであり, 以上から分かるように再帰的な構造をとる. これは, 名詞句の意味がそれを構成する概念 (語彙) が何を指しているかにより大きく異なるからである. 例えば, 先の名詞句は, “[c_1 :社長] の船の模型”, “[c_1 :社長] の [c_2 :船] の模型”, “[c_2 : [c_1 :社長] の船] の模型” 等々と表現され得る. それぞれ, “社長である太郎の普通の船の模型”, “社長である太郎の戦艦大和の模型”, “社長である太郎が所有するタロー号の模型” を指するような場合である. すなわち, 名詞句の意味は, 助詞の意味だけでなく, 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により異なってくる. 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.

2.4 具体的な表現法

ここでは, WPL による自然言語文の具体的な表現法, 表現例, 表現範囲について述べる.

§1 表現法と表現例

(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: c_1 : [c_2 :車] の鍵)

- ② “太郎は田舎の医者である”

[c_1 : 田舎] の医者 (inst: 太郎:T)

- ③ “太郎は優秀である”

優秀 (sbj: 太郎:T)

- ④ “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. 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 を用い, 特性を表す概念 (主に形容詞を名詞化したような概念) の場合には③のようにラベル 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④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 [石川 04] を参照されたい.

(2) 複文

複文は, 名詞節, 連体節, 連用節, 並列節に分類される従属節と主節とよりなる. 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する. これら従属節は前述のように L_p で表し, 先行詞部を付加した節付概念 w_p の形で, 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.

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. 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: c_1 :刑事,

obj: c_2 : [家] { 隠れる (agt: c_3 :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 : c_1 :[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 : c_1 :会社,

tme : c_2 :[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”

[c_1 :[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、節述語と被修飾名詞である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節述語内に#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。

§2 表現範囲

2.2 節で述べた表現対象とする文のうち WPL で表現できるのは、定義 2 のソート概念を用いて定義 1 の述語式で表現できるすべての文である(自動変換の可能性は別問題)。したがって、前節の表現例からも分かるように表現対象とするほとんどの文(個体についてだけ述べたすべての文)が扱える。また、当然これらについては提案する推論法ですべて処理できる。

WPL で表現できない(あるいはしづらい)文は、個体の性質あるいは個体間の関係についての陳述ではない文である。これは WPL 特有の問題ではなく従来の順序ソート論理さらには一階述語論理でも同様である。前にも述べたように、真偽を問題とする論理と情報伝達を目的とする自然言語とは本質的に相容れない面があるからである。このような文としては、例えば、“太郎は医者になるために勉強する”のような文(個体についてでなく目的について述べている)が挙げられよう。この文を強引に WPL で表せば、“勉強する (agt : 太郎:T, gol : c_1 :[目

的]{ なる (agt : 太郎:T, gol : c_2 :医者)})”となる。「目的」も個体の一つと言えないこともないが若干不自然さがある(“太郎は食べるために働く”のような文ではもっと不自然)。さらにこの種の文を提案する推論法で処理すると直感とずれた結果がでるという問題もある(6 章 (3) を参照)。

また、量等に関する等値関係を述べた文も WPL には適さない(当然従来の順序ソート論理でも同様)。例えば、“男性の平均身長は 170cm である”は、WPL で表そうとすれば“等値 (atr : c_1 :男性の平均身長, val : 170cm:T)”となり、あまり自然な表現とは言えない。さらに、このように知識化しても、“人間の平均身長は 170cm である”を知識化したものとの照合が取れるわけでもない(“男性 $\subseteq$ 人間”というサブソート関係を推論で利用できない)。すなわち、こういった関係を述べた文は、例えば“等値 (atr : 男性の平均身長, val : 170cm)”と一般の一階述語論理で表し、推論もその枠組みで行うべきと言える(WPL と混在しても推論時に別個に扱えば問題はない)。

3. 推 論 処 理 法

3.1 基本的な考え方

WPL で表現された知識に対する推論法の基本的なメカニズムおよび本手法のベースとなる Beierle らにより提案された推論規則 [Beierle 92] について説明する。

(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、そのようになるための $\neg A$, 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。すなわち、ある条件が成立すれば推論を進められる場合、その条件を導出節に付加して推論を進めるという考え方である。したがって、条件 S は処理の繰延べ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。この場合、この知識 S が存在すれば A と A' は単一化可能となるので、これらを消去し、 S を導出節として推論を進めることになる。Beierle らはこの条件 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 3.2 節のような構造を持ったソートを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(言語の定義に含まれる)、WPL におけるソートは無数の構造(名詞句)が採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

図 1 推論処理の基本的な考え方

図 2 本推論法の枠組み

たがって、従来の推論処理では前述の意味的な判定をその定義に基づき直接行えばよいが、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。すなわち、図 2 に示すように、従来の論理では言語を定義しそれに基づいて知識を書き下しそれをういて推論するが、本推論法では知識中のソートの意味を解釈しながら推論する枠組みとなる。自然言語文を対象とし具体的な応用を意識した場合、必然的に同図の枠組みなると考えられる。

(2) Beierle らの推論規則

Beierle らは前述の SL 節 ($SL(\sigma)$) を以下のように定めている。

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

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、代入する側のソートが代入される側のソートのサブソートの場合 (well-sortedness) のみ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 と L_2 と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。なお、これら規則の適用において、 $sort(\sigma(x)) \subseteq sort(x)$ の場合には σ は適切な代入 (well-sortedness) であり、当然導出は行われるが SL 節は生成されない。

3.2 推論規則の拡張と適用法

前節で示した推論規則を、一般的には変数を含む名詞句となる定義 2 のソート概念を扱えるように拡張する。この場合、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。

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

この一般式において、 $y = \{y_1, y_2, \dots\}$ 、 $z = \{z_1, z_2, \dots\}$ 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、2.3 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 (次の EOS の適用例を参照)、“ $x_i \in S_j$ 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 (後の SUBS の適

用例を参照)，“ $z_i \in y$ ”，“ $y_i \in z$ ”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． $P[x](x)$ 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 SL_p 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 SL_p 節と呼ぶ．

例えば，“ $S_1=[x:\text{社長}]$ の船”，“ $S_2=[c:\text{青年}]$ 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 ($c:\text{青年}$)” が SL_p 節となる．この SL_p 節については次章で詳述するが，3つの推論規則のうち SUBS と ER はこれを用いて拡張される．

§1 EOS

EOS は，以下に示す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．

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

where $x \in \text{dom}(\sigma), S_i = \sigma(\text{sort}(x))$

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，前述したように代入 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．

EOS の具体的な適用法について例を用いて説明する．式 (7) において， $A = B = 0$ で， L_1' と L_2 がそれぞれ，“働く ($x_1:\text{青年}, x_2:[\text{企業}]\{\text{営む } (y_1:[x_1:\text{青年}] \text{ の親戚})\}$)” と “働く ($c_1:\text{専門家}, c_2:[\text{会社}]\{\text{営む } (c_3:\text{政治家})\}$)” としよう．この場合， $\sigma = \{x_1 = c_1, x_2 = c_2\}$ であり，第一引数の変数 x_1 が第二引数のソートに含まれているためその代入も行われ，

“ $SL(\sigma) = \text{青年 } (c_1:\text{専門家}) \wedge [\text{企業}]\{\text{営む } (y_1:[c_1:\text{専門家}] \text{ の親戚})\}(c_2:[\text{会社}]\{\text{営む } (c_3:\text{政治家})\})$ ”

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．すなわち，EOS では引数自体の変数に関する代入 σ のみを行い，ソート内の変数に関してはそれが引数の変数でもある場合のみ同代入が行われる．また，当然式 (7) 中の A, B 内のソートの変数についてもこの代入 σ は行われる．

§2 SUBS

SUBS は定義 3 の SL_p 節を加え以下のように拡張される．

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

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， $\sigma\sigma_p(x) = \sigma_p\sigma(x)$ 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 SL_p 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．

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

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

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 に置き変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．

SUBS の具体的な適用法について説明する．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 ($x_1:[y_1:[z_1:\text{会社}] \text{ の社長}]$ の子供)” と “ $[\text{日芝:T}]$ の後継者 ($c_1:[c_2:[\text{日芝:T}] \text{ の重役}] \text{ の親戚})$ ” としよう．この場合， $\sigma_p = \{z_1 = \text{日芝}\}$ ， $\sigma = \{x_1 = c_1\}$ であり，これらを式 (10) に適用すると SL 節は，

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

となる．一方，SL_p 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，

“ $SL_p = \text{会社 } (\text{日芝:T})$ ”

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.

SUBS は前述したように, $S_2 \subseteq S_1$ の場合に適用される規則であるから, これらに対しすべての代入操作 (σ と σ_p および次章で述べるみなし代入) を行ってもこの関係が満たされない場合には適用されない. また, EOS の場合と同様に, 引数のソートにおいては σ_p 以外の代入は行わない (この例では y_1 に c_2 を代入しない).

§3 ER

ER は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, $sort(\sigma(t)) \subseteq S_1$ 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.

ER の具体的な適用法について説明する. 式 (11) において, $A = 0$, $S_1 = [z_1:先進国]$ の関係 ($x_1: [z_1:先進国]$ 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 $\subseteq [z_1:先進国]$ の関係” なら真となり消去される. このためには, $\sigma_p = \{z_1 = 日本\}$ が適切な代入となる必要があり, SLp 節は以下ようになる.

“ $SLp = 先進国 (日本: T)$ ”

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 ($c_1: [日本: T]$ 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 も SUBS と同様に, $sort(\sigma(t)) \subseteq S_1$ が満たされない場合は適用されない. また, 代入 σ を行わず代入 σ_p だけを行ってソート述語 S_1 を消去してもよい. その場合は当然 SL 節は生成されない.

ER は, 主に EOS や SUBS の適用で生成された SL 節や SLp 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.

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のサブソート関係は未定義であ

り推論プロセスの中で判定を行う. この判定はソートに対する一種の解釈とみなされるが, 名詞句の意味解析が難しいことから, その完璧性の追求は非現実的と言える. 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, 概念 a が概念 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 の意味範囲が広げ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” の関係では後者は前者のサブソートとは言い難い), 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. すなわち, 複合語は慣用的な表現や造語も多く, その意味解析は一部 [竹内 02] を除き一般の名詞句以上に難しいと言える.

したがって, ここでは複合語は単語と同様に一つの概念として扱う (サブソート関係が定義されていない場合はその関係はないとする). 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 (シソーラス情報の利用も含め) 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 $w_{pa} = [S_a]\{L_{pa}\}$, $w_{pb} = [S_b]\{L_{pb}\}$ とする. また, L_{pa} , L_{pb} 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, 後の条件は, 同一個体に関する節述語でないと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 (c_1 :工具,#, c_2 :工場)}] $\subseteq$ [自動車]{ 作る (c_1 :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. 勿論, 比較する複合概念間において, その構成概念のあらゆる対応関係を求め, それ毎に推論することも不可能ではないが, 探索空間の爆発につながり実用的とは言えないからである.

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 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 [兼岩 05] 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概念となる.

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して行うこととなる.

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.

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

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

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

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 節の生成だけに関与し推論規則の他の部分に影響しない (σ_p に含まれるものではない).

また, 2.3 節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 $S_1 = \text{都会の専門家}(x: \text{賢者})$
 $S_2 = [\text{東京: T}]$ の医者 (太郎: T)
 $\cdots$ SLp = 都会 (東京: T)
- ② $S_1 = [\text{政治家}] \{ \text{支持する}(x: \text{青年}) \}$ から $[x: \text{青年}]$ への連絡
 $S_2 = [c_1: \text{社長}]$ から $[c_2: \text{学生}]$ への手紙
 $\cdots$ SLp = 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 ($z: \text{青年}$)
 $S_2 = [c_1: [\text{会社}] \{ \text{営む}(c_2: \text{青年}) \}]$ の社員 (太郎: T)
 $\cdots$ SLp = $[\text{企業}] \{ \text{営む}(y: \text{富豪}) \} (c_1: [\text{会社}] \{ \text{営む}(c_2: \text{青年}) \})$

①は単純なみなし代入の例, ②は g_b に代入 σ_p を作用させる例である. ③は変数がネストしている場合の例であり, 代入 σ_p は $\{x = c_1\}$ のみで y への c_2 の代入は行わない. この代入は, 3.2 節の最後に述べた場合と同様にこの SLp 節が直接満たされない場合に ER を適用する段階で行う.

5. 推論処理の具体例

以下のような自然言語文による問題を想定した, 推論処理の流れの例を図3に示す.

- ・ 若者が先進国の資産家が営む企業で働いているなら, その若者は裕福である.
- ・ 太郎は花子が営む会社で働いている.
- ・ 花子は日本の財閥である.
- ・ 日本は先進国である.
- ・ 太郎は青年である.
- ・ 太郎は裕福ですか?

これらの文は WPL では同図のような表現となる.

図3 推論処理の流れ

推論は, 同図から分かるように拡張した EOS, ER, SUBS を順次適用し, 適宜代入とみなし代入を行い, SL 節や SLp 節を作成しつつ進められる. なお, 提案手法は基本的に日本語以外にも適用可能である [Kitano 06].

6. 考察

(1) 従来の順序ソート論理に対する優位性

従来の順序ソート論理における関数と本論文で提案した構造を持ったソートとの差異について考察し, 本手法の推論処理上の優位性について述べる.

関数は個体あるいはいくつかの個体を他の一つの個体に写像する機能であり, 関数自体はその写像された個体を表す. これに対し, ここで提案した構造を持ったソートは, 主概念のソートが対象とする個体の領域を修飾概念により限定するものであり, それ自体はあくまで個体の領域を表す. すなわち, 関数とは本質的に異なり, 推論処理上以下のような優位性を持つ.

推論において関数を扱う場合, 個体間の写像関係をあらかじめ求めておくか, 必要になった時点 (単一化時) でその関係を求めるかのいずれかとなる. 前者の場合には写像関係を示すテーブルを, 後者の場合には関数毎にその値を計算するルーチンを用意することとなる. これは, 構成の複雑さだけでなく, 対話システム等実時間の応用を想定した場合には非現実的と言えよう (名詞句を含む文が入力される毎にこれらを作成する必要がある). これに対し提案手法では, 4章のサブソート関係の判定ルーチンだけ用意すればよい (なお, 2.3 節でも述べたが提案手法では基本的に関数は不要).

さらに推論能力についても以下のような優位性を持つ.

例えば提案手法では、 L'_1 と L_2 がそれぞれ、“裕福 ($x:[z:$ 会社] の経営者)”、“裕福 ($c:[c_1:$ 企業] の経営者)” のときに EOS を適用すると、SL 節として “[$z:$ 会社] の経営者 ($c:[c_1:$ 企業] の経営者)” が作られ、この否定が導出節となる。従って、もし “[$c_2:$ 会社] の経営者 ($c:[c_1:$ 企業] の経営者)” という事実知識 (c が c_1 という企業の経営者であり、かつ、 c_2 という会社の経営者でもある) があれば、SUBS により空節が導かれることになる。この事実知識がなくても、上記の SL 節に ER を適用し、SL_p 節として “会社 ($c_1:$ 企業)” が作られ、これが満たされればやはり空節が導かれる (この適用順については 3.2 節の最後の記述を参照)。

一方、これら L'_1 , L_2 中の名詞句を関数を用いて表すと、それぞれ “裕福 ($f(z:$ 会社):経営者)”、“裕福 ($f(c_1:$ 企業):経営者)” となる (f は “括弧内の個体の経営者” を意味する関数)。これらを従来の順序ソート論理 (Beierle らの EOS) で処理すると、SL 節として “会社 ($c_1:$ 企業)” が作られ、この否定が導出節となるだけである。すなわち、これが満たされない限り (c_1 が会社でない限り)、空節は導けないことになる (c_1 という企業の経営者が c_2 という会社の経営者であったとしても)。すなわち、提案手法では空節が導けるのに対し、従来のソート論理では導けない場合があることになる。

さらに、当然のことだが、名詞句を関数で表わす場合それが全く同一でなければ単一化の対象とならないが、提案手法では名詞句の構造さえ同一ならその対象となり、4 章のサブソート関係の判定で推論処理可能である。例えば、複文を表すときの節述語 L_p の述語部が異なる場合でも、提案手法ではその階層関係を判定でき単一化の対象となり得る。一方、関数を用いれば必然的に異なる関数となってしまう、単一化の対象にならず推論処理できない。

(2) 推論の健全性と完全性

ここで提案した推論法は、基本的には Beierle らの手法 [Beierle 92] の拡張であり、定義 3 で規定した SL_p 節が正しく生成できればその健全性と完全性は保たれる (概略的な健全性の証明のみ付録に示す)。しかし、4 章で提案したサブソート関係の判定法さらにはそれに基づく SL_p 節の生成法は、多義性や係り受けの曖昧性を考慮しない近似的なものである。したがって、これらを考慮した場合には健全性と完全性は保たれるとは言えなくなる。例えば、“会社のパソコン”と“企業のパソコン”では“の”の意味が同じなら前者は後者のサブソートとなるが、実際的な問題においてはそれらの同一性は保証されない。すなわち、すべてのソート概念のサブソート関係が一義に定まる場合 (予め定義されている等) を除き、本推論法は概略的な推論法とならざるを得ない。これは、3.1 節でも述べたように自然言語文の意味を扱う推論においては本質的に避けられない問題である。

なお、推論規則自体の健全性・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。

(3) ソート階層の解釈

ソート概念間のサブソート関係は単語間のそれに基づいて判定することになり、実用上は既存のシソーラス情報 [EDR 96, 池原 02] の利用が想定される。しかし、シソーラスは基本的に固定的な is-a や a-kind-of の関係であり、順序ソート論理に適用する場合、我々の感覚とズレが生じることがある。例えば、“太郎は機械を直せます。太郎は時計を直せますか？”では、順序ソート論理で考えると 時計 $\subseteq$ 機械 とすれば答えは “yes” となる。時計は機械の一種なので一般的に考えれば正しいが、直感的には、普通の機械が直せても構造が精巧で緻密な時計は直せないとも考えるかもしれない (むしろ常識的には “no” あるいは “分かりません” が妥当)。すなわち、サブソート関係は視点に応じて動的に変化させるべきといえる。例えば、この例では “直す” という視点に立てば 時計 $\subseteq$ 機械 とは言えなくなる。

また、2.4 節で例示した “太郎は医者になるために勉強する” という文があり、“太郎は専門家になるために勉強するのですか？”という問いがあったとする。この場合、順序ソート論理で考えると 医者 $\subseteq$ 専門家 なので答えは “yes” となる。“yes” でよいとも言えるが、上記の例と同様に “目的” という視点に立てば答えは “no” とも言える。

すなわち、このような視点を考慮した動的な判定は今後の重要な課題と言える。

(4) 推論の高速化

SL 節や SL_p 節を生成して推論を進める手法は、本質的に解が得られる可能性は高まるが、探索空間の拡大によりソート論理の利点の一つである高速性を損なうことになる。したがって、これらの過剰な生成は押さえるべきであり、そのためにはソート間の排他性 [兼岩 02] のチェックが必要と言える。また、述語のソート階層 [Kaneiwa 04] を考慮した階層的な推論法 [Tenenbergs 89] との結合も有効と考えられる。

(5) 構造を持ったソートに関する研究

これについてはいくつかの研究例があるが、これらは主にソートを論理積や論理和等により結合した構造を対象としていた [Pletat 89, Nebel 89]。ソートにより規定される個体を集合論的に扱え、その範囲において曖昧性が介入しないからである。しかし、自然言語文から論理式への自動変換をも含めて考えたとき、文中からこのような構造を抽出し前述のような結合に変換するのは現時点では極めて困難と言える。

7. ま と め

名詞句のような構造を持ったソートを許容する順序ソート論理ベースの知識表現法 WPL とその推論法について提案した。従来の順序ソート論理においては、知識表現時および推論時にこのような構造を持ったソートもひと

つの概念 (言語内でソート階層として定義される) として扱っていた。これに対し提案手法は, 知識表現時にはひとつの概念として扱うが, 推論時にはその内部構造まで立ち入って導出処理を行える推論法およびそれを可能とする知識表現法と言える。

WPL は, 知識構成要素を日常語とする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, 構造を持ったソートを用い単文だけでなく複文もひとつの述語式で見通し良く表現される。これにより, 基本的に関数の利用も不要となる。また, これに対する推論法では, ソート内の変数に対する代入操作および一般概念に対するみなし代入を行い, 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に, Beierle らの推論規則を拡張した。

また, この推論法は, サブソート関係を判定 (構造を持ったソート間のサブソート関係はそれを構成する基本概念間のソート階層を基に判定) しながら推論を進めるもので, この関係が既定義な従来の推論法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 ◇

- [Antoniou 07] 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)
- [Beierle 92] Beierle, C., Hedtstück, U., Pletat, U., Schmitt, P. H., Siekmann, J.:An order-sorted logic for knowledge representation systems, Artificial Intelligence, Vol.55, pp.149-191 (1992)
- [Brachman 84] 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)
- [Cohn 87] Cohn, A. G.:A more expressive formulation of many sorted logic, Journal of Automated Reasoning, Vol.3, pp.113-200 (1987)
- [EDR 96] 日本電子化辞書研究所:EDR 電子化辞書 (1996)
- [Fuchs 06] Fuchs, N. E., Hoefer, S., Kaljurand, K., Kuhn, T., Schneider, G., Schwertel, U.:Discourse Representation Structures for ACE 5, Technical Report ifi-2006.10, Department of Informatics, University of Zurich pp.1-51 <http://www.ifi.unizh.ch/attempto> (2006)
- [池原 02] 池原, 宮崎, 白井, 横尾, 中岩, 小倉, 大山, 林:日本語語彙大系, 岩波書店 (1997)
- [石川 04] 石川勉, 佐々木智彦, 佐藤雅彦:言葉を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会資料 SIG-LSE-A303 pp.25-32 (2004)
- [石川 07] 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)
- [石塚 06] 石塚満:自然言語テキストの共通的概念記述, 人工知能学会誌, Vol.21, No.6, pp.691-698 (2006)
- [兼岩 00] 兼岩憲, 東条敏:ソートと述語の二つの階層をもつ論理のホーン節計算の完全性, 電子情報通信学会論文誌 Vol.J83-D-I, No.12, pp.1239-1248 (2000)
- [兼岩 02] 兼岩憲, 東条敏:否定的意味が内在するソートを含んだ

ソート階層の論理, 情報処理学会論文誌, Vol.43, No.5, pp.1505-1517 (2002)

- [兼岩 03] 兼岩憲, 佐藤健:DL:Description Logic, 人工知能学会誌, Vol.18, No.1, pp.73-82 (2003)
- [Kaneima 04] Kaneima, K.:Order-sorted logic programming with predicate hierarchy, Artificial Intelligence 158 pp.155-188 (2004)
- [兼岩 05] 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)
- [Kitano 06] Kitano, M., Nishita, S. and Ishikawa, T.:Inference Scheme for Order-Sorted Logic Using Noun Phrases with Variables as Sorts, Proc. 5th Mexican Int. Conf. on Artificial Intelligence, Springer-Verlag LNAI 4293, pp.49-58 (2006)
- [黒橋 07] 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)
- [益岡 00] 益岡隆志:複文, くろしお出版 (2000)
- [松本 04] 松本裕治, 高岡一馬, 浅原正幸, 工藤拓:茶筌と南瓜による日本語解析 - 構文情報を用いた文の役割分類 -, 人工知能学会誌, Vol.19, No.3, pp.334-339 (2004)
- [Montague 73] Montague, R.:The Proper Treatment of Quantification in Ordinary English, in J. Hintikka, J. Moravcsik and P. Suppes (eds.), Approaches to Natural Language, Reidel, Dordrecht, pp.221-242 (1973)
- [Nebel 89] Nebel, B. and Smolka, G.:Representation and Reasoning with Attributive Descriptions, Springer-Verlag LNAI Vol.418, pp.112-139 (1989)
- [Pletat 89] Pletat, U. and von Luck, K.:Knowledge Representation in LILOG, Springer-Verlag LNAI Vol.418, pp.140-164 (1989)
- [佐々木 04] 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)
- [白井 85] 白井賢一郎:形式意味論入門 - 言語・論理・認知の世界 -, 産業図書 (1985)
- [竹内 02] 竹内孔一, 内山清子, 吉岡真治, 影浦峯, 小山照夫:語彙概念構造を利用した複合名詞内の係り関係の解析, 情報処理学会論文誌, vol.43, No.5, pp.1446-1456, (2002)
- [Tenenber 89] Tenenber, D. J.:Abstracting first-order theories, in Change of Representation and Inductive Bias, pp.67-79, Kluwer Academic (1989)
- [UNL] Universal Networking Digital Language (UNDL), <http://www.undl.org/>
- [Walther 88] Walther, C.:Many-sorted unification, J. Association for Computing Machinery, Vol.35, No.1, pp.1-17 (1988)

〔担当委員: 兼 岩 憲〕

2008 年 2 月 19 日 受理

◇ 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。

$$\frac{\neg S_1(t_1) \vee A, S_2(t_2) \vee B}{[\sigma'_p[\neg S_1(t_1) \vee A], \sigma'_p[S_2(t_2) \vee B]] \vee \neg SLp} \quad (A.1)$$

ここで, $\sigma'_p = \sigma_p + \delta(\delta$ 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))。

式 (A.1) 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,

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

を充足し式 (A.1) 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, $\sigma(A' \vee B') \vee \neg SL(\sigma)$ が導かれる. A', B' 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.

著者紹介

石川 勉(正会員)

1970 年電気通信大学電気通信学部応用電子工学科卒業. 同年現 NTT 入社. 1995 年拓殖大学工学部情報工学科教授. 柔らかな情報処理のための人工知能の研究に従事. 工学博士. 電子情報通信学会, 情報処理学会, IEEE 各会員.