

依存型意味論における modal subordination の記述の試み

Toward an Analysis of Modal Subordination in Dependent Type Semantics

田中 リベカ ^{*1} 戸次 大介 ^{*1*2*3}

Ribeka Tanaka

Daisuke Bekki

^{*1}お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科

Ochanomizu University, Graduate School of Humanities and Sciences

^{*2}国立情報学研究所

National Institute of Informatics

^{*3}独立行政法人科学技術振興機構, CREST

CREST, Japan Science and Technology Agency

In this paper, we analyze the phenomena known as “modal subordination” (MS) in terms of dependent type semantics (DTS), which is a proof-theoretic semantics of natural language based on dependent type theory. We extend DTS to intensional setting in order to take account of possible worlds and propose semantic representations for some examples of MS.

1. はじめに

人間の話す言語をコンピュータで扱うことを考えた場合、自然言語の文の意味を論理式などの形式言語で記述して扱うというアプローチがありうる。文の意味から自然に行われる推論や複数文の意味の統合など、人間が文の意味を理解する際に行っている処理を論理式のレベルで再現することで、言語の機械的な処理を可能にすると同時に、人間の言語理解の仕組みを理解することにつながると期待される。

自然言語には様々な言語現象があり、形式意味論ではその振る舞いを記述・説明できるような理論を構築するために、多くの分析が存在する。本研究で採用している依存型意味論 (dependent type semantics, 以下 DTS)[3] も、そのような自然言語の意味表示の記述に用いられる理論の 1 つである。DTS は依存型理論に基づいた自然言語の意味論であり、依存型理論のもつ「項に依存した型を記述することが可能である」という特徴を受け継ぎ、「他の文やフレーズの意味に依存して別の文の意味を記述することができる」という特徴がある。これにより、E タイプ代名詞を初めとした動的な言語現象の記述に威力を発揮する。

本研究では、英語の modal subordination (以下、MS) と呼ばれる現象に着目した。MS の分析はさまざまな枠組みで行われているが、DTS での記述はまだなされていない。そこで本稿では、MS の意味表示を依存型意味論の枠組みで与えることを試みた。次節でまず MS について解説し、依存型意味論について概要を述べた後、定式化を試みる。

2. modal subordination

Roberts (1997)[10] は、通常の文はスコープに関する以下の 2 つの制約に従って振る舞うように見えると述べている。

(i) 照応に関するスコープの制約:

名詞句 x が名詞句 y から参照可能であるとき、 x をスコープに含む量化要素は必ず y もそのスコープに含む。

(ii) 文に関するスコープの制約:

量化要素のスコープは、最大でもその量化要素が存在する文全体までである。

たとえば、(1) の文は上記 (ii) の制約に従っている。ここで、同じインデックス i がついた表現は同一の対象を指し、また文頭の「#」はその文が不適切であることを指す。つまり、後続する文の“he”は前半の文の“a man”を指すことはできない。

(1) $A \text{ man}_i \text{ might enter. \#He}_i \text{ will whistle.}$

ところが、以下のように *will* を *would* に変えた文では、上記の制約を満たさず、後続する文の“he”が前の文の名詞句を参照することができる。

(2) $A \text{ man}_i \text{ might enter. He}_i \text{ would whistle.}$

このような現象は“modal subordination”と呼ばれ、Roberts (1989)[9] をはじめとして Geurts (1995)[5], Van Rooij (2005)[12], Asher (2011)[1] などによるものなど数多くの分析が存在する。

Roberts (1989)[9] は、談話表示意味論の枠組みに様相記号 \diamond と \square を導入した。また、MS の裏にあるメカニズムは“accommodation”であるとして分析している。accommodation とは、適切な先行詞が見つからなかった場合に文脈に情報を補う操作のことである。この accommodation によって 2 文目の解釈の際に前の文の意味表示を補い、結果的に“he”が“a man”であるという解釈が導出される。これに対して Geurts (1995)[5] は、accommodation の仕組みを採用するといつても情報を補うことが出来てしまうため、より制限を与えるべきであるとし、MS の裏にあるメカニズムは照応であるとして分析を行っている。

3. 依存型意味論

ここでは、本研究で採用している依存型意味論 [3] について解説する。

依存型意味論 (dependent type semantics, DTS) は、依存型理論 (Martin-Löf, [6, 7]) に基づいた自然言語の意味論である。依存型理論は λ -cube[2] のインスタンスとして知られており、Coq や Agda などの証明器にも応用されている。また、自然言語の文に意味表示を与える際に依存型理論がうまく使えるということも、Sundholm (1986)[11] や Ranta (1995)[8] によって研究されている。

連絡先: 田中リベカ, お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科理学専攻戸次研究室, 東京都文京区大塚 2-1-1, tanaka.ribeka@is.ocha.ac.jp

3.1 依存型理論

単純型理論 [2] においては、項と型がいわば異なるレベルに存在しており、相互作用は起きない。これに対し依存型理論では、「項に依存した型」を定義することができる。たとえば、長さが $n : \text{int}$ であるようなリスト $l : \text{List}(n)$ を考えることが可能である。型 $\text{List}(n)$ は項 n に依存した型となっている。

依存型理論では、型の構成子として Σ と Π が用意されている。 Σ はプロダクト型と対応しており、型に対する存在量量子のように振る舞う。また、式 $(\Sigma x : A)B$ において型 B が項 x に依存しない場合、これは一階述語論理の命題 $A \wedge B$ と対応する。^{*1} Π は関数型と対応しており、型に対する全称量量子のように振る舞う。式 $(\Pi x : A)B$ において型 B が項 x に依存しない場合、これは一階述語論理の $A \rightarrow B$ と対応する。

3.2 依存型意味論の特徴

さて、上で述べたような依存型理論の性質を踏まえて、それを元に構築された自然言語の意味論について解説する。なお、依存型理論の統語論の定義は以下の通りである。

$$\begin{aligned} \Lambda := & x \mid c \mid (@_i : \Lambda) \\ & \mid (\Pi x : \Lambda)\Lambda \mid (\lambda x : \Lambda)\Lambda \mid \Lambda\Lambda \mid (\Sigma x : \Lambda)\Lambda \mid (\Lambda, \Lambda) \\ & \mid \pi_1(\Lambda) \mid \pi_2(\Lambda) \mid \text{eq}_\Lambda(\Lambda, \Lambda) \mid \gamma_\Lambda(\Lambda, \Lambda) \\ & \mid \mathbf{s}(\Lambda) \mid \mathbf{R}(\Lambda, \Lambda, \Lambda) \end{aligned}$$

3.2.1 簡単な例

DTS では例文 (3) の意味表示は (4) のようになる。

$$\begin{aligned} (3) \quad & \text{A man entered.} \\ (4) \quad & (\lambda c)(\Sigma u : (\Sigma x : \text{Entity})\text{Man}(x))\text{Enter}(\pi_1(u)) \end{aligned}$$

ここで、 π_1 というのは組の第一要素を取り出す操作であり、以下のような規則をもつ。

$$\begin{aligned} (\Sigma E) \quad & \frac{P : (\Sigma x : A)B}{\pi_1(P) : A} & (\Sigma E) \quad & \frac{P : (\Sigma x : A)B}{\pi_2(P) : B[\pi_1(P)/x]} \end{aligned}$$

上の例だと、 u はすなわち $(\Sigma x : \text{Entity})\text{Man}(x)$ のことであり、これは型 Entity である項 x と、その項 x に依存した型 $\text{Man}(x)$ からなる組を表しているため、 $\pi_1(u)$ はその第一要素、すなわち Entity を指している。

証明論的意味論の立場では、文 (3) が真となるためには、以下の 3 つのものが同時に必要である：

- Entity (何らかの実体)
- その Entity が man であることの証明
- その Entity が enter したことの証明

この 3 つの証明からなる組 (三つ組み) が 1 つでも存在すれば、(3) は真であるといえる。これは、「(4) に示したような型をもつ項が存在するときまたそのときのみ (3) は真である」と言い換えることもできる。

また、例文 (5) の意味表示は (6) のようになる。

$$\begin{aligned} (5) \quad & \text{Every man entered.} \\ (6) \quad & (\lambda c)(\Pi u : (\Sigma x : \text{Entity})\text{Man}(x))\text{Enter}(\pi_1(u)) \end{aligned}$$

文 (5) が真となるためには、 Entity が man であるという証明が存在するとき、その Entity が enter したことの証明も存在しなければならない。このような関数型、すなわち (6) の型をもつ項が存在することが、上の文が真となる必要十分条件である。

*1 カリー・ハワード同型対応から、論理における命題は型理論における型に、論理における証明は型理論における項に対応するため、このような表現が可能となる。

3.2.2 文と文の接続と照応

次のような 2 つの連続する文からなる、より複雑な例について考える：

$$(7) \quad \text{A man}_i \text{ entered. He}_i \text{ whistled.}$$

依存型意味論では、2 文の接続はダイナミクスを考慮して以下のように定義される。

$$(8) \quad M; N \equiv (\lambda c)(\Sigma u : Mc)N(c, u)$$

ある文の意味表示 M においては、その文より前の文脈の情報を使用することができるため、これを引数 c として受け取る。その文に後続する文の意味表示 N においては、 M より前の文脈の情報 c に加えて、 M で述べられた情報も使用することが出来る。そのため、 N にとっての文脈は組 (c, u) の形で表される。

また “He whistled.” の意味表示は次のように書ける。

$$(9) \quad (\lambda x)W((@_0 : \gamma_0 \rightarrow \text{Entity})(c))$$

代名詞 “he” の意味表示は、 $@$ オペレータを用いて記述される。 $@$ オペレータは照応や前提トリガの意味記述に用いられるオペレータで、たとえば上の例では受け取ったコンテキストから先行詞として適切な Entity を取り出す働きをしている。これは、代名詞 “he” が前方で既に述べられている何らかの実体を指すということと対応している。

ここで (7) の 2 文全体での意味表示は、以下のようになる。

$$(10) \quad (\lambda c)(\Sigma v : (\Sigma u : (\Sigma x : \text{Entity})\text{Man}(x))\text{Enter}(\pi_1(u)))\text{Whistle}((@_0 : \gamma_0 \rightarrow \text{Entity})(c, v))$$

上記の意味表示において、

$$(@_0 : \gamma_0 \rightarrow \text{Entity}) = (\lambda c)\pi_1\pi_2\pi_2c : \gamma_0 \rightarrow \text{Entity}$$

とすると、該当箇所はコンテキストから先行文の “A man entered.” を満たす Entity を取り出すように機能する。 $@$ オペレータはこのように、受け取ったコンテキストと投射 π_1 または π_2 のみで定義される。DTS では、投射と DNE 規則の組み合わせでコンテキストから取り出せるもののみが、参照可能な表現であるとする。

3.3 証明論的な推論

DTS では意味表示が依存型理論の型と対応しているため、意味表示レベルで論理の証明を行うことができる。そのため、モデルを考えずに証明論的な推論を行うことが可能である。ここでは解説しないが、詳細は Bekki (2013)[3] を参照されたい。

以上をまとめると、本研究で意味表示の記述に採用している依存型意味論は、依存型理論に基づく自然言語の意味論である。構成的 (compositional) であり、動的束縛を表現することが可能で、意味表示の型のレベルで推論が可能である。

4. modal subordination の依存型意味論による意味表示

MS のような様相が関わる意味表示を記述するにあたって、文の意味表示の形式を、内法的意味論に拡張する。たとえば (11) の文には (12) の意味表示が与えられる。

$$\begin{aligned} (11) \quad & \text{A man entered.} \\ (12) \quad & (\lambda c)(\lambda w) \\ & (\Sigma u : (\Sigma x : \text{Entity}(w))\text{Man}_w(x))\text{Enter}_w(\pi_1(u)) \end{aligned}$$

ここで、DTS の述語については、 $\text{Man} : \text{Entity} \rightarrow \text{type}$ から $\text{Man} : (\Pi w : \text{World})(\text{Entity}(w) \rightarrow \text{type})$ という形式に変更する。また、2 文の接続も以下の定義に従って行う。

$$(13) \quad M; N \equiv (\lambda c)(\lambda w)(\Sigma u : Mcw)N(c, u, w)$$

前方から現在の世界を引数 w を受け取り、意味表示中の Entity を世界に依存する型としている。これにより、各可能世界ごとに、存在する Entity の集まりが区別されるようになる。

この形式に従って、最初に示した MS の例文に意味表示を与える。^{*2}

- (14) $\underline{A\ man}_i$ might enter. He_i would whistle.
 (15) $(\lambda c)(\lambda w)(\Sigma u : \Sigma w' : W)$
 $(\Sigma v : wRw')(\Sigma x : E(w'))(\text{Man}_{w'}(x) \wedge \text{Enter}_{w'}(x))$
 $\text{Whistle}(\pi_1((@_0 : \gamma_0 \rightarrow (\Sigma w'' : W)wRw'')(c, v)))$
 $((@_1 : \gamma_1 \rightarrow E((@_2 : \gamma_2 \rightarrow W)(c, v)))(c, v))$

次に、後続する文から *would* を取り除いた、参照が失敗するような例についてもその振る舞いを記述する。

- (16) $\underline{A\ man}_i$ might enter. # He_i whistles.
 (17) $(\lambda c)(\lambda w)(\Sigma u : (\Sigma w' : W)$
 $(\Sigma v : wRw')(\Sigma x : E(w'))(\text{Man}_{w'}(x) \wedge \text{Enter}_{w'}(x))$
 $\text{Whistle}_w((@_1 : \gamma_1 \rightarrow E((@_2 : \gamma_2 \rightarrow W)(c, v)))(c, v))$

例文では、1文目が“might”で述べられているのに対し、2文目は“*He whistles.*”という様相の入っていない形になっている。これにより、2文目の“*he*”が1文目の“*a man*”を参照することは許されない。

式中では *Whistle* の引数 $(@_1 : \gamma_1 \rightarrow E((@_2 : \gamma_2 \rightarrow W)(c, v)))(c, v)$ は、先行文脈で述べられているいずれかの世界に存在する実体となっている。“*he*”が“*a man*”を参照するように解釈しようとすると、*Whistle* の引数は最終的には「与えられた世界 w から到達可能な世界 w' に存在する実体」となる。しかし *Whistle* は与えられた世界 w における述語であるため、世界 w' の実体についてこの述語を用いることはできない。従って2文目の“*he*”が1文目の文の“*a man*”を指すことはできない。これは我々の直観と合っている。

また、Roberts (1997)[10] は以下のような例を MS に関連する現象として扱っている。

- (18) John tries to find a unicorn _{i}
 and wishes to eat it _{i} .
 (19) #John wishes to find a unicorn _{i}
 and tries to eat it _{i} .

この例では、動詞が“...try...wish...”の順で出現する上の例では参照が可能だが、“...wish...try...”の順で出現すると参照不可能となる。このような例では、“try よりも wish の方が、実現可能性の低い事柄に対して使われる”といった知識を用いる。すなわち、try と wish の間には、到達可能な世界に包含関係が存在するとする。

- (20) $(\lambda c)(\lambda w)(\Sigma v : (\Pi w' : W)(\Pi u : wR_{try}w')$
 $(\Sigma x : E(w'))(\text{Unicorn}_{w'}(x) \wedge \text{Find}_{w'}(j, x))$
 $(\Pi w'' : W)(\Pi g : wR_{wish}w'')$
 $\text{Eat}_{w''}(j, \pi_1 v w''(\text{tw } w w'' g))$

ただし $\text{tw} \equiv (\Pi w)(\Pi w')(wR_{wish}w' \rightarrow wR_{try}w')$

上の tw の式が、“try”といったときに到達可能な世界は“wish”といったときに到達可能な世界を含んでいるということを表している。このような知識を予め記述しておくことにより、代名詞“it”の照応解決の際に推論に用いることが可能となり、結果として、2文目の“it”は“a unicorn”を参照することができる。try と with を逆にした場合には、世界の包含関係を表す tw のような式が存在しないため、“it”が“a unicorn”を指すような推論は失敗する。

*2 Entity を E と、World を W と略記する。

5. まとめと今後の課題

本稿では、依存型意味論による MS の定式化を行った。ここで定式化を試みた例は先行研究でも扱われているため、他の理論に対する DTS の優位性や問題点を示すには至らなかった。今後、既存の分析で指摘されている問題となる例の分析を進めていく必要があると考えている。

また、本稿では依存型意味論を内法的意味論に拡張したが、現時点では Geach (1967)[4] による“intentional identity”に関する例を適切に扱うことができない。

- (21) Hob thinks a witch _{i} has blighted Bob's mare,
 and Nob wonders whether she _{i} killed Cob's sow.

(21) のような例に意味表示を与えるには、異なる可能世界に存在する実体間の対応関係を扱えなければならない。将来的には、そのような対応関係を記述することが可能な意味論へと拡張する必要があると考えている。

参考文献

- [1] Nicholas Asher, Sylvain Pogodalla, et al. A montagovian treatment of modal subordination. In *20th Semantics and Linguistic Theory conference-SALT2010*, 2011.
- [2] Hank P. Barendregt. Lambda calculi with types. In S. Abramsky, Dov M. Gabbay, and T.S.E. Maibaum, editors, *Handbook of Logic in Computer Science*, Vol. 2, pp. 117–309. Oxford Science Publications, 1992.
- [3] Daisuke Bekki. Dependent type semantics: An introduction. In *the 2012 edition of the LIRa yearbook: a selection of papers*. University of Amsterdam, to appear.
- [4] Peter Geach. Intentional identity. *Journal of Philosophy*, Vol. 64, pp. 627 – 632, 1967.
- [5] Bart Geurts. *Presupposing*. PhD thesis, University of Stuttgart, 1995.
- [6] Per Martin-Löf. An intuitionistic theory of types: Predicative part. *Studies in Logic and the Foundations of Mathematics*, Vol. 80, pp. 73–118, 1975.
- [7] Per Martin-Löf and Giovanni Sambin. *Intuitionistic type theory*, Vol. 17. Bibliopolis Naples, 1984.
- [8] Aarne Ranta. *Type-theoretical grammar*. Oxford University Press, 1995.
- [9] Craige Roberts. Modal subordination and pronominal anaphora in discourse. *Linguistics and philosophy*, Vol. 12, No. 6, pp. 683–721, 1989.
- [10] Craige Roberts. Anaphora in intensional contexts. In *Handbook of Contemporary Semantics*, pp. 215–246. Blackwell, 1997.
- [11] Göran Sundholm. Proof theory and meaning. In *Handbook of philosophical logic*, pp. 471–506. Springer, 1986.
- [12] Robert Van Rooij. A modal analysis of presupposition and modal subordination. *Journal of Semantics*, 2005.