

# Modal DTS による様相従属化の分析再考

飯村葵 水野輝之 戸次大介

お茶の水女子大学

{iimura.aoi, bekki}@is.ocha.ac.jp

mizuno.teruyuki@ocha.ac.jp

## 概要

本論文は、自然言語の意味の理論である依存型意味論を通して、様相従属化に分析を与えることを目指す。様相表現を説明の対象とするために、依存型意味論に様相表現のための型を追加し、拡張する試みがこれまでなされてきたが、拡張した枠組みおよび分析は、いずれも理論的、経験的な面で課題が残る。そこで本論文は「可能性を表す型をどのように定義するか」と「様相表現の文脈をどのように分析に反映するか」の二点に着目し、従来の枠組みにおける型と規則を再定義した提案を行う。さらに、提案した枠組みから様相従属化に分析を与える、依存型意味論が対象とする言語現象の拡大を試みる。

## 1 はじめに

自然言語には、意味の解釈に関わる様々な言語現象が存在する。形式意味論では、これらの複雑な言語現象に対して明示的な説明を与えるために、数多くの理論的枠組みが提案されてきた [1, 2]。そのような枠組みの一つに、本研究が採用する依存型意味論 (dependent type semantics, DTS) [3] がある。DTS は、依存型理論 (dependent type theory, DTT) [4] に基づく自然言語の意味論であり、文の意味表示が DTT における型と対応する。「項に依存した型」を記述する、という DTT の性質により、DTS は照応や前提が絡む複雑な言語表現に対応可能であることが示されてきた。DTS は、複雑な意味現象に分析を示すことに強みを有する一方で、様相表現を伴う文に説明を与える試みは、依然として検討の余地がある。DTS には、様相表現のための変数を加え拡張した枠組み [5] と、型を加え拡張した枠組み [6] が存在するが、本論文では後者に焦点を当てる。後者の枠組みにおける問題を議論したのち、追加する型を再定義した提案を行い、様相表現を伴う文に統一的な説明を与えることを試みる。

様相表現は、物事の可能性や必然性に関わる言語表現であり、形式意味論における主要な研究対象である。様相表現を伴う言語現象の一つに、様相従属化 (modal subordination) がある。様相従属化は、様相表現を伴う談話における照応現象であり、形式意味論では多数の分析が試みられてきた [7, 8, 9, 10, 11]。様相従属化の例を以下に示す。

- (1) [A wolf]<sub>i</sub> might come in. It<sub>i</sub> would growl.
- (2) [A wolf]<sub>i</sub> might come in. #It<sub>i</sub> growls.
- (3) [A wolf]<sub>i</sub> might come in. #It<sub>i</sub> may growl.

様相表現を伴う談話では、(2) や (3) の二文目が示すように E タイプ照応 [12] が常に到達可能であるとは限らない。一文目において、仮想の世界を文脈とする様相表現 *might* の作用域内で導入された *A wolf* は「仮想的な実体」を談話にもたらず。この実体を二文目の代名詞 *It* が参照するためには、後件の談話がその実体が存在すると仮定される「仮想的なシナリオ」と一致する必要がある。そのため、*might* と同じく仮想の世界を文脈とする様相表現 *would* の使用により、後件の談話を一致させた (1) は、代名詞 *It* が *A wolf* を先行詞とすることができる。一方で、二文目に様相表現を伴わない (2) や、現実的な世界を文脈とする様相表現 *may* を伴う (3) は、後件の談話が前件の「仮想的なシナリオ」と一致しないことから、代名詞 *It* は *A wolf* を先行詞とすることができない。様相従属化に説明を与えることは、これらの場合それぞれに対して分析を示すことが求められる。

しかしながら、先行研究 [6] では、枠組みそのものに対する理論的な問題を抱えるほか、「後件の様相表現がどのような世界を文脈とするか」という情報を分析に反映することができず、(3) のような文に対して、代名詞 *It* は *A wolf* を先行詞とする、という説明を与えてしまう。以上の問題をふまえ、本研究では、異なる世界を文脈とする様相表現が同時に現れる文を分析の対象に加えることを目指した。

## 2 依存型意味論

DTS は DTT の性質に基づき、「項に依存した型」すなわち依存型を記述することができる。自然言語を扱う上で重要な依存型の一つに  $\Sigma$  型の表記を図 1 に示す。

$$\left[ \begin{array}{c} x : A \\ B \end{array} \right] \quad (x : A) \times B$$

図 1  $\Sigma$  型の垂直表記 (左) と水平表記 (右)

$\Sigma$  型は、第二要素の型  $B$  において第一要素の型  $A$  を持つ変項  $x$  に依存した記述が可能である。また、直積型  $A \wedge B$  の一般化であるほか、存在量化  $(\exists x : A)B$  に対応する型である。

DTS は、照応解決や前提投射などの言語現象について、証明探索の問題に還元し分析を与えるという特徴を持つ。本節では分析例として *A wolf came in. It growled.* を取り上げ、代名詞 *It* の先行詞の意味表示を構成する、照応解決の過程を解説する。

DTS では、未指定型  $(x@A) \times B$  [13] を用いて、代名詞 *It* の先行詞が明らかになる前の未指定の部分を含む意味表示をまず生成し、それを文脈に基づいて具体化する、という流れで照応を解決する。未指定型を用いた意味表示を図 2 に示す。  $\pi_1$  は  $\Sigma$  型の項の第一要素を取り出す操作である。

$$\left[ \begin{array}{c} v : \left[ \begin{array}{c} u : \left[ \begin{array}{c} x : \text{entity} \\ \mathbf{wolf}(x) \end{array} \right] \\ \mathbf{comein}(\pi_1(u)) \end{array} \right] \\ \left[ \begin{array}{c} w@ \left[ \begin{array}{c} z : \text{entity} \\ \neg \mathbf{human}(z) \end{array} \right] \\ \mathbf{growl}(\pi_1(w)) \end{array} \right] \end{array} \right]$$

図 2 *A wolf came in. It growled.* の意味表示

未指定型  $(x@A) \times B$  において、 $x$  は型  $A$  を持つ項を表すプレースホルダーである。すなわち、未指定型が形成されるためには、文脈に基づいて型  $A$  を持つ項を構築する必要がある。そのため、本節の例では文脈として一文目の意味表示が与えられた状態で、型  $(z : \text{entity}) \times (\neg \mathbf{human}(z))$  を持つ項を探索するという証明探索の問題に帰着する。

$$v : \left[ \begin{array}{c} u : \left[ \begin{array}{c} x : \text{entity} \\ \mathbf{wolf}(x) \end{array} \right] \\ \mathbf{comein}(\pi_1(u)) \\ \vdots \\ ? : \left[ \begin{array}{c} z : \text{entity} \\ \neg \mathbf{human}(z) \end{array} \right] \end{array} \right]$$

図 3 *A wolf came in. It growled.* の照応解決過程

証明探索の結果、未指定型に伴うプレースホルダー  $w$  が型  $(z : \text{entity}) \times (\neg \mathbf{human}(z))$  を持つ項で置き換えられ、未指定型が形成される。すなわち、未指定部を含む意味表示が具体化され、図 4 の表示を得る。

$$\left[ \begin{array}{c} v : \left[ \begin{array}{c} u : \left[ \begin{array}{c} x : \text{entity} \\ \mathbf{wolf}(x) \end{array} \right] \\ \mathbf{comein}(\pi_1(u)) \\ \mathbf{growl}(\pi_1\pi_1(v)) \end{array} \right] \end{array} \right]$$

図 4 *A wolf came in. It growled.* の照応解決結果

図 4 より  $\mathbf{growl}$  の引数である  $\pi_1\pi_1(v)$  は一文目の意味表示における  $x : \text{entity}$  に対応する。これは、一文目における  $\mathbf{wolf}$  であるという述語を満たす  $\text{entity}$  すなわち *A wolf* であり、代名詞 *It* が *A wolf* を先行詞とする読みに相当する意味表示である。このように、型環境と型が与えられた状態で項を探索するという点で、未指定型に伴う分析は証明探索に帰着する。

## 3 先行研究

著者らは、様相表現を DTS の説明対象とするために、様相表現のための型を加え拡張した Modal DTS を提案した [6]。Modal DTS は、 $\Psi$  を文脈として、可能性に対応する  $\langle \Psi \rangle$  型と、必然性に対応する  $[\Psi]$  型を Contextual Modal Type Theory (CMTT) [14] から取り入れた枠組みである。Modal DTS における意味表示の例を図 5 に示す。

$$\left[ \begin{array}{c} v : \langle \Psi \rangle \left[ \begin{array}{c} u : \left[ \begin{array}{c} x : \text{entity} \\ \mathbf{wolf}(x) \end{array} \right] \\ \mathbf{comein}(\pi_1(u)) \end{array} \right] \\ [\Psi] \left[ \begin{array}{c} w@ \left[ \begin{array}{c} z : \text{entity} \\ \neg \mathbf{human}(z) \end{array} \right] \\ \mathbf{growl}(\pi_1(w)) \end{array} \right] \end{array} \right]$$

図 5 *A wolf might come in. It would growl.* の意味表示

Modal DTS では文脈を用いて可能世界に言及する。たとえば図 5 において、可能性にあたる  $\langle \Psi \rangle$  型は文脈  $\Psi$  において *A wolf comes in.* となる世界が存在することを表し、必然性にあたる  $[\Psi]$  型は文脈  $\Psi$  のすべての世界において *It growls.* であることを表す。

照応や前提と様相表現の相互作用について、DTS の枠組みに基づく統一的な分析を可能とする Modal DTS だが、二つの問題を抱えている。一つ目は、前件の様相表現が *might* のような可能性の場合に、「後件の様相表現がどのような世界を文脈とするか」という情報を分析に反映することができない、という問題である。すなわち、後件の様相表現が *might* や *would* である容認可能な文と、*may* や *will* である容認可能でない文に分析の差がなく、どちらの文も容

認可能な文として説明を与えてしまう。二つ目は、CMTT に由来する *poss* の定義が先行研究 [14, 15] における定義と一致しない、という問題である。 *poss* は可能世界に対する存在量化を表す。たとえば、分析において  $A \text{ poss}\langle\Psi\rangle$  のように使われ、これを命題化したものが  $\langle\Psi\rangle A$  である。しかしながら、従来の Modal DTS では *poss* を型のように定義しており、本来の定義と整合しない。

## 4 提案

§ 3 において論じた Modal DTS の問題を解決すべく、様相表現のための型を再定義した新たな枠組みを提案する。先行研究 [6] との違いは、様相表現のための型の形成則と *poss* の規則にある。依存型の枠組みでは、形成則、導入則、除去則という三つの規則を用いて型を定義しており、形成則は対象の型が well-formed であるための条件を示す規則、導入則は対象の型がどのように構築できるかを示す規則、除去則は対象の型がどのように使用できるかを示す規則である。

様相表現のための型の形成則を変更することは、§ 3 において論じた一点目の問題を解決することにつながる。具体的には、図 6 と図 7 に示すように、 $\langle\Psi\rangle$  型と  $[\Psi]$  型の形成則の上段を、従来の  $A : \text{type}$  からそれぞれ  $A \text{ poss}\langle\Psi\rangle : \text{type}$  と  $A \text{ valid}[\Psi] : \text{type}$  に変更することで、様相表現の文脈が証明に引き継がれ、「後件の様相表現がどのような世界を文脈とするか」という情報を分析に反映することが可能となる。ここで、前述の通り  $A \text{ poss}\langle\Psi\rangle$  を命題化したものが  $\langle\Psi\rangle A$  であり、 $A \text{ valid}[\Psi]$  を命題化したものが  $[\Psi]A$  である。いずれも CMTT に由来する。

$$\frac{\Psi \text{ context} \quad \Gamma, \Psi \vdash A : \text{type}}{\Gamma \vdash \langle\Psi\rangle A : \text{type}} \quad (\diamond F)$$

$$\frac{\Psi \text{ context} \quad \Gamma, \Psi \vdash A : \text{type}}{\Gamma \vdash [\Psi]A : \text{type}} \quad (\square F)$$

図 6 先行研究における様相表現のための型の形成則

$$\frac{\Psi \text{ context} \quad \Gamma, \Psi \vdash A \text{ poss}\langle\Psi\rangle : \text{type}}{\Gamma \vdash \langle\Psi\rangle A : \text{type}} \quad (\diamond F)$$

$$\frac{\Psi \text{ context} \quad \Gamma, \Psi \vdash A \text{ valid}[\Psi] : \text{type}}{\Gamma \vdash [\Psi]A : \text{type}} \quad (\square F)$$

図 7 本提案における様相表現のための型の形成則

*poss* の規則を変更することは、§ 3 において論じた二点目の問題を解決することにつながる。従来は *poss* に対して、形成則、導入則、除去則を与え、型のように定義していた。具体的には、CMTT におい

て定義された *poss* 規則を導入則として採用し、形成則と除去則を独自に定義していたが、本提案では、CMTT において定義された *poss* 規則のみとすることで、本来の定義に従う枠組みを実現した。

## 5 分析

本節では、§ 4 において提案した枠組みを用いて様相従属化を対象とした分析を示し、様相表現と照応の相互作用について説明を与える。

まず、容認可能な文 (4) を取り上げ、代名詞 *It* の先行詞の意味表示が構成できることを示す。図 8 は未指定部を含む (4) の意味表示である。

(4)  $[A \text{ wolf}]_i \text{ might come in. It}_i \text{ might growl.}$

$$\left[ \begin{array}{l} v: \langle\Psi\rangle \left[ \begin{array}{l} u: \left[ \begin{array}{l} x: \text{entity} \\ \text{wolf}(x) \end{array} \right] \\ \text{comein}(\pi_1(u)) \end{array} \right] \\ \langle\Psi\rangle \left[ \begin{array}{l} w@ \left[ \begin{array}{l} z: \text{entity} \\ \neg \text{human}(z) \end{array} \right] \\ \text{growl}(\pi_1(w)) \end{array} \right] \end{array} \right]$$

図 8 A wolf might come in. It might growl. の意味表示

§ 2 と同様の流れで、未指定型を形成することを目指す。これは、一文目の意味表示が与えられた状態で、型  $(z : \text{entity}) \times (\neg \text{human}(z)) \text{ poss}\langle\Psi\rangle$  を持つ項を探索する、という証明探索の問題に帰着する。後件の様相表現が可能性を表す *might* であることから分析の過程で  $\langle\Psi\rangle$  型の形成則が適用される。これにより、二文目の意味表示は後件の様相表現 *might* の文脈  $\Psi$  を用いて *poss* $\langle\Psi\rangle$  環境に導入される。

$$v: \langle\Psi\rangle \left[ \begin{array}{l} u: \left[ \begin{array}{l} x: \text{entity} \\ \text{wolf}(x) \end{array} \right] \\ \text{comein}(\pi_1(u)) \end{array} \right] \\ \vdots \\ ? : \left[ \begin{array}{l} z: \text{entity} \\ \neg \text{human}(z) \end{array} \right] \text{ poss}\langle\Psi\rangle$$

図 9 A wolf might come in. It might growl. の照応解決過程

証明探索の結果、前件に伴う様相表現の文脈  $\Psi$  を用いて、型  $(z : \text{entity}) \times (\neg \text{human}(z)) \text{ poss}\langle\Psi\rangle$  を持つ項が探索され、代名詞 *It* の先行詞の意味表示が構成された図 10 を得る。  $D$  は *poss* $\langle\Psi\rangle$  環境に導入された一文目の意味表示を型として持つ項である。

$$\left[ \begin{array}{l} v: \langle\Psi\rangle \left[ \begin{array}{l} u: \left[ \begin{array}{l} x: \text{entity} \\ \text{wolf}(x) \end{array} \right] \\ \text{comein}(\pi_1(u)) \end{array} \right] \\ \langle\Psi\rangle \text{ growl}(\pi_1 \pi_1(D)) \end{array} \right]$$

図 10 A wolf might come in. It might growl. の照応解決結果

次に、後件に様相表現を伴わないことから、容認可能でない文 (2) を取り上げ、代名詞 *It* の先行詞の意味表示が構成できないことを示す。図 11 は未指定部を含む (2) の意味表示である。

$$\left[ \begin{array}{c} v: \langle \Psi \rangle \left[ \begin{array}{c} u: \left[ \begin{array}{c} x: \text{entity} \\ \mathbf{wolf}(x) \end{array} \right] \\ \mathbf{comeIn}(\pi_1(u)) \end{array} \right] \\ w@ \left[ \begin{array}{c} z: \text{entity} \\ \neg \mathbf{human}(z) \end{array} \right] \\ \mathbf{growl}(\pi_1(w)) \end{array} \right]$$

図 11 A wolf might come in. It growls. の意味表示

まず未指定型を形成することを試みる。後件に様相表現を伴わないことから、一文目の意味表示が与えられた状態で、型  $(z: \text{entity}) \times (\neg \mathbf{human}(z))$  を持つ項を探索する、という証明探索の問題に帰着する。

$$v: \langle \Psi \rangle \left[ \begin{array}{c} u: \left[ \begin{array}{c} x: \text{entity} \\ \mathbf{wolf}(x) \end{array} \right] \\ \mathbf{comeIn}(\pi_1(u)) \end{array} \right] \\ \vdots \\ ? : \left[ \begin{array}{c} z: \text{entity} \\ \neg \mathbf{human}(z) \end{array} \right]$$

図 12 A wolf might come in. It growls. の照応解決過程

しかしながら探索される項は、(4) の分析の通り、前件に伴う様相表現の文脈  $\Psi$  を用いて  $\text{poss}\langle \Psi \rangle$  環境に導入された意味表示を型として持つ項である。すなわち未指定型が形成されず、代名詞 *It* の先行詞の意味表示が構成できない、という説明が与えられる。

最後に、現実的な世界を文脈とする様相表現を伴うことから、容認可能でない文 (3) を取り上げ、代名詞 *It* の先行詞の意味表示が構成できないことを示す。図 13 は未指定部を含む (3) の意味表示である。

$$\left[ \begin{array}{c} v: \langle \Psi \rangle \left[ \begin{array}{c} u: \left[ \begin{array}{c} x: \text{entity} \\ \mathbf{wolf}(x) \end{array} \right] \\ \mathbf{comeIn}(\pi_1(u)) \end{array} \right] \\ (\Theta) \left[ \begin{array}{c} w@ \left[ \begin{array}{c} z: \text{entity} \\ \neg \mathbf{human}(z) \end{array} \right] \\ \mathbf{growl}(\pi_1(w)) \end{array} \right] \end{array} \right]$$

図 13 A wolf might come in. It may growl. の意味表示

二文目の意味表示は、可能性を表す後件の様相表現 *may* の文脈  $\Theta$  を用いて  $\text{poss}\langle \Theta \rangle$  環境に導入される。そのため一文目の意味表示が与えられた状態で、型  $(z: \text{entity}) \times (\neg \mathbf{human}(z)) \text{ poss}\langle \Theta \rangle$  を持つ項を探索する、という問題に帰着する。しかしながら、(2) の分析と同様に、探索される項が一致しない。すなわち未指定型が形成されず、代名詞 *It* の先行詞の意味表示が構成できない、という説明が与えられる。

$$v: \langle \Psi \rangle \left[ \begin{array}{c} u: \left[ \begin{array}{c} x: \text{entity} \\ \mathbf{wolf}(x) \end{array} \right] \\ \mathbf{comeIn}(\pi_1(u)) \end{array} \right] \\ \vdots \\ ? : \left[ \begin{array}{c} z: \text{entity} \\ \neg \mathbf{human}(z) \end{array} \right] \text{ poss}\langle \Theta \rangle$$

図 14 A wolf might come in. It may growl. の照応解決過程

異なる世界を文脈とする様相表現が同時に現れる文を分析の対象とした本提案であるが、(1) の分析には課題が残る。(1) は容認可能な文であり、代名詞 *It* の先行詞の意味表示を構成する必要がある。ゆえに、未指定型が形成されなくてはならない。

$$v: \langle \Psi \rangle \left[ \begin{array}{c} u: \left[ \begin{array}{c} x: \text{entity} \\ \mathbf{wolf}(x) \end{array} \right] \\ \mathbf{comeIn}(\pi_1(u)) \end{array} \right] \\ \vdots \\ ? : \left[ \begin{array}{c} z: \text{entity} \\ \neg \mathbf{human}(z) \end{array} \right] \text{ valid}\langle \Psi \rangle$$

図 15 A wolf might come in. It would growl. の照応解決過程

二文目の意味表示は、必然性を表す後件の様相表現 *would* の文脈  $\Psi$  を使用して  $\text{valid}\langle \Psi \rangle$  環境に導入される。そのため、一文目の意味表示が与えられた状態で、型  $(z: \text{entity}) \times (\neg \mathbf{human}(z)) \text{ valid}\langle \Psi \rangle$  を持つ項を探索する、という証明探索の問題に帰着する。しかしながら、様相表現 *might* を伴う一文目の意味表示から探索される項は  $\text{poss}\langle \Psi \rangle$  環境に導入された意味表示を型として持つ項であり、未指定型が形成されない。このように、先行研究 [6] における様相表現の型を再定義したことで新たな問題が生じている。

## 6 おわりに

本研究は、依存型意味論を通して、様相表現を伴う文に統一的な説明を与えることを目指し、先行研究 [6] における様相表現の型を再定義した。これにより、先行研究 [6] が抱える問題の解決を試みたほか、提案した枠組みを通して様相従属化を対象とした分析を与え、異なる世界を文脈とする様相表現が同時に現れる文を新たに説明の対象とした。

しかしながら、提案した枠組みは、様相表現と照応の相互作用を説明するにあたり、依然として課題が残る。今後はまず、型理論と可能世界意味論の間に存在する隔たりを明らかにし、様相表現の文脈に着目した枠組みの改良を行う。将来的には、様相従属化を対象とした様々な分析 [5, 7, 8, 9, 10, 11] と経験的な比較を行うことが望ましい。

## 謝辞

本研究は、JST CREST JPMJCR2565, および JSPS 科研費 JP23H03452 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] Richard Montague. The proper treatment of quantification in ordinary english. In **Approaches to Natural Language**, pp. 221–242. Dordrecht, 1973.
- [2] Hans Kamp. A theory of truth and discourse representation. In **Formal methods in the study of language**. Mathematical Centre, 1981.
- [3] Daisuke Bekki and Koji Mineshima. Context-passing and underspecification in dependent type semantics. In **Studies of Linguistics and Philosophy**, pp. 11–41. Springer International Publishing, 2017.
- [4] Per Martin-Löf. Intuitionistic type theory. Vol. 17. Bibliopolis, 1984.
- [5] Ribeka Tanaka, Koji Mineshima, and Daisuke Bekki. Resolving modal anaphora in dependent type semantics. In **New Frontiers in Artificial Intelligence**, pp. 83–98. Springer, 2015.
- [6] Aoi Iimura, Teruyuki Mizuno, and Daisuke Bekki. Modal subordination in dependent type semantics. In **Proceedings of the Workshop on the Bridges and Gaps between Formal and Computational Linguistics**, pp. 15–19, 2025.
- [7] Craige Roberts. Modal subordination and pronominal anaphora in discourse. In **Linguistics and Philosophy**, Vol. 12, pp. 683–721. Springer, 1989.
- [8] Anette Frank and Hans Kamp. On context dependence in modal constructions. In **Proceedings of Semantics and Linguistic Theory**, Vol. 7, pp. 151–168. Linguistic Society of America, 1997.
- [9] Stefan Kaufmann. Dynamic context management. In **Formalizing the Dynamics of Information**, pp. 171–188. The University of Chicago Press, 2000.
- [10] Robert van Rooij. A modal analysis of presupposition and modal subordination. In **Journal of Semantics**, Vol. 22, pp. 281–305. Oxford University Press, 2005.
- [11] Nicholas Asher and Eric McCready. Were, would, might and a compositional account of counterfactuals. In **Journal of Semantics**, Vol. 24, pp. 93–129. Oxford University Press, 2007.
- [12] Gareth Evans. Pronouns. **Linguistic Inquiry**, Vol. 11, pp. 337–362, 1980.
- [13] Daisuke Bekki. A proof-theoretic analysis of weak crossover. In **New Frontiers in Artificial Intelligence**, pp. 228–241. Springer, 2023.
- [14] Aleksandar Nanevski, Frank Pfenning, and Brigitte Pientka. Contextual modal type theory. In **ACM Transactions on Computational Logic**, Vol. 9, pp. 1–49. Association for Computing Machinery, 2008.
- [15] Frank Pfenning and Rowan Davies. A judgmental reconstruction of modal logic. **Mathematical Structures in Computer Science**, Vol. 11, pp. 511–540, 2001.