依存型意味論によるモダリティと照応の統一的分析に向けて

飯村 葵（指導教員：戸次大介）

1　はじめに

自然言語には様々な言語現象が存在しており，形式意味論では数多くの理論が分析を与えてきた．そのような理論の一つに，本研究で採用する，依存型意味論 (dependent type semantics, DTS)[1] がある．DTS は依存型理論 (dependent type theory, DTT)[2] に基づく自然言語の意味論である．本研究は，DTS により，様相 (modality) の分析を試みる．DTS は，照応など複雑な言語現象を扱う理論だが，モダリティとの関係に着目する研究はあまりなされていない．

本稿が対象とする modal subordination は，モダリティを伴う談話における照応現象であり，Roberts [3] により指摘された．modal subordination の例を (1)(2) に示す．

(1)　A wolf might come in. #It growls.

(2)　A wolf might come in. It would growl.

モダリティを伴う談話では，E タイプ照応 [4] が到達可能ではなくなることがある．たとえば，(1) では，代名詞 *it* が E タイプ照応の先行詞として *a wolf* を指すことはできない.[1] 一方，2 文目にモダリティ *would* を加えた (2) では，*would* の使用により，前半の文で *might* のスコープ内に導入された *a wolf* を，代名詞 *it* が E タイプ照応の先行詞として参照できる．

本研究は，DTS による modal subordination の分析を念頭に，モダリティと照応を同時に扱うことができるよう，様相型である可能性 (possibility) と必然性 (necessity) を DTS に加え，拡張した体系として Modal DTS を提案する．照応の理論である DTS の特徴を活かし，一般的な照応解決 (anaphora resolution) に還元することを目指す．

2　提案手法

2.1　Modal DTS

Modal DTS は，既存の依存型に possibility と necessity の型を加えた体系である．新たに定義される型は，possibility に対応する ◇ (dia) と ◆ (bkdia)，necessity に対応する □ (box) と ■ (bkbox) が該当する．*might* や *would* のようなモダリティは，◇ と □ により表される．◆ と ■ は 2 文目の意味表示に作用し，「1 文目のモダリティ内の命題の証明が，2 文目の証明で使用できる条件」を与える役割を担う．

2.2　Contextual Modal Type Theory

Modal DTS の ◇ と □ は，Contextual Modal Type Theory (CMTT)[5] の定義に従う.[2] CMTT は，直観主義様相論理 (Intuitionistic Modal Logic) に対して，構成的な手法で possibility と necessity に意味の説明を与える理論である．◇ と □ の規則群を，CMTT が提案する Intuitionistic Contextual Modal Logic (ICML) と Contextual Possibility から取り入れる．

[1] 文頭に置かれた「#」は続く文が不適切であることを示す

[2] 付録 (C) を参照されたい

2.3　規則群

DTS に新たに追加する規則群は 3 種類に分けられる．CMTT の構造規則，◇ と □ に関する規則，◆ と ■ に関する規則である．CMTT の構造規則は，Contextual Possibility に由来する **poss** 規則，hypothetical judgement に由来する **hyp** 規則，Contextual Validity に由来する **ctxhyp** 規則である．◇ と □ に関する規則は，形成則を新たに作成し，導入則と除去則を CMTT から取り入れる．◆ と ■ に関する規則は，Modal DTS において独自に定義したものである．

3　Modal DTS による分析

3.1　談話関係

modal subordination は，対象の 2 文が図 1 に示す談話関係に入ることで初めて可能となる．記号を縦に並べた記法は，複数の規則を纏めたものである．1 文目と 2 文目にモダリティを伴うことが，談話関係に入る形式的な条件のため，(1) のように後件にモダリティを含まない場合や 2 文が離れる場合は，modal subordination が起きることはない．

$$\Diamond M_1 \,;\, \genfrac{}{}{0pt}{}{\Box}{\Diamond} M_2 \quad\equiv\quad \Diamond M_1 \times \blacklozenge \genfrac{}{}{0pt}{}{\Box}{\Diamond} M_2$$

$$\Box M_1 \,;\, \genfrac{}{}{0pt}{}{\Box}{\Diamond} M_2 \quad\equiv\quad \Box M_1 \times \blacksquare \genfrac{}{}{0pt}{}{\Box}{\Diamond} M_2$$

図 1: Modal DTS における談話関係

3.2　分析例

本稿では分析例として，図 1 上段の規則を取り上げる．これは，前件が possibility の場合であり，具体的に以下の 2 文を対象とする．ここでは，意味表示における後件のモダリティをまとめて，図 2 のように扱う．π_1 は組の第一要素を取り出す操作である．

(2)　A wolf might come in. It would growl.

(3)　A wolf might come in. It might growl.

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

図 2: 照応解決前の意味表示

DTS は，未指定型 (underspecified type)[6] を DTT に加えることで照応解決を可能にする．文の意味表示の型は，DTT における type でなければならないという制約 (semantic felicity condition) がある．そのため，型検査 (type checking) を行うことで，この制約を満たすか調べる．型検査の過程で，未指定項@を具体的な証明に置き換える操作が，照応解決にあたる．

対象となる 2 文の型検査を図 3 に示す．前述の制約を満たすか調べるため，図 3 の証明図を下から追う．

$$
\dfrac{\begin{matrix}\vdots\\ \Psi : \mathrm{type}\ \ \mathbf{poss}\ \langle\Psi\rangle\end{matrix} \qquad \dfrac{\begin{matrix}\vdots\\ \begin{bmatrix} z : \mathbf{entity} \\ \neg\, \mathbf{human}(z) \end{bmatrix} : \mathrm{type}\end{matrix} \qquad \begin{matrix}\vdots\\ \begin{bmatrix} z : \mathbf{entity} \\ \neg\, \mathbf{human}(z) \end{bmatrix}\ \mathbf{poss}\ \langle\Psi\rangle\ \ \mathit{true}\end{matrix}}{\begin{bmatrix} w@\begin{bmatrix} z : \mathbf{entity} \\ \neg\ \mathbf{human}(z) \end{bmatrix} \\ \mathbf{growl}(\pi_1(w)) \end{bmatrix} : \mathrm{type}\ \ \mathbf{poss}\ \langle\Psi\rangle}\,(@)}{\dfrac{\begin{matrix}[\Psi]\\ \langle\Psi\rangle\end{matrix}\begin{bmatrix} w@\begin{bmatrix} z : \mathbf{entity} \\ \neg\ \mathbf{human}(z) \end{bmatrix} \\ \mathbf{growl}(\pi_1(w)) \end{bmatrix} : \mathrm{type}\ \ \mathbf{poss}\ \langle\Psi\rangle}{\blacklozenge\Psi \begin{matrix}[\Psi]\\ \langle\Psi\rangle\end{matrix}\begin{bmatrix} w@\begin{bmatrix} z : \mathbf{entity} \\ \neg\ \mathbf{human}(z) \end{bmatrix} \\ \mathbf{growl}(\pi_1(w)) \end{bmatrix} : \mathrm{type}}\,(\blacklozenge F)}\,\begin{matrix}(\square F)\\(\lozenge F)\end{matrix}
$$

図 3: 前件のモダリティが possibility である場合の型検査

最下段は，図 2 に示した照応解決前の意味表示で第二要素にあたる 2 文目の意味表示である．DTT において，Σ 型の意味表示全体の型を type とするには，第一要素と第二要素の型がそれぞれ type でなくてはならない．1 文目のモダリティ *might* は，$\blacklozenge$ として 2 文目に作用しており，この $\blacklozenge$ が ($\blacklozenge$ F) により「1 文目のモダリティが 2 文目の証明で使用できる条件」にあたる **poss** $\langle\Psi\rangle$ を与える．($\square$ F) と ($\lozenge$ F) により，2 文目の意味表示からモダリティ部分を分けられた後，@型の推論規則である@規則を適用する．図 3 の証明図より，**poss** $\langle\Psi\rangle$ 環境下において「何らかの entity z が ¬ human (z) である」という型の証明項が存在すれば，型検査は全体の文の意味表示の型が type であるという制約を満たす．

証明探索を行った結果は，付録 (A) を参照されたい．2 文目は 1 文目に依存して良いことから，1 文目の意味表示が利用できる．また，CMTT から採用した ($\lozenge$ E) はモダリティが外れた 1 文目の意味表示を仮定する役割を担い，**poss** 規則は **poss** $\langle\Psi\rangle$ 環境に作用する．その結果，モダリティを含まない一般的な証明探索に帰着する．つまり，依存型の規則のみを使用して「何らかの entity z が ¬ human (z) である」という型の証明項を探索すれば良い．その際,「wolf ならば human でない」という情報を関数 f として文脈に用いる．ドット (.) は，CMTT の記法であり，左右でスコープを分ける．

探索した証明項は型検査の証明図に代入される．未指定型に伴う変項 w が再帰的に置き換えられた結果，2 文目の代名詞 *it* の具体的な指示対象が判明し，図 4 の意味表示を得る．Modal DTS による照応解決は，以上である．前件のモダリティが necessity の場合は，付録 (B) を参照されたい．

$$
\begin{bmatrix} v\!: \langle\Psi\rangle \begin{bmatrix} u : \begin{bmatrix} x : \mathbf{entity} \\ \mathbf{wolf}(x) \end{bmatrix} \\ \mathbf{comein}(\pi_1(u)) \end{bmatrix} \\ \blacklozenge\Psi \begin{matrix}[\Psi]\\ \langle\Psi\rangle\end{matrix}\ \mathbf{growl}(\ \mathit{letdia}(v, \langle\Psi, v'\rangle.\langle\sigma, \pi_1\pi_1(v')\rangle)\ ) \end{bmatrix}
$$

図 4: 照応解決後の意味表示

4 おわりに

本研究は，様相型である possibility と necessity を DTS に加え，拡張した枠組みとして，Modal DTS を提案した．拡張にあたり，CMTT から一部の規則群を採用した．また，Modal DTS を用いて modal subordination を対象に分析を与え，モダリティを伴う照応の解決過程を示した．

今後の課題は，まず Modal DTS の様相論理としての形式的性質を明らかにすることが挙げられる．また，形式意味論では動的意味論をはじめ，数多くの理論が modal subordination の分析を与えており，これらの理論と Modal DTS の経験的な比較を行う必要がある．さらに，modal subordination 以外のモダリティを伴う言語現象について，本分析が拡張できるかどうかも検討を要する．

謝辞

本研究は，JST CREST JPMJCR20D2 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] Daisuke Bekki and Koji Mineshima. Context-passing and underspecification in dependent type semantics. In Stergios Chatzikyriakidis and Zhaohui Luo, editors, *Studies of Linguistics and Philosophy*, pp. 11–41. Springer, 2017.

[2] Per Martin-Löf. Intuitionistic type theory. Vol. 17. Bibliopolis, 1984.

[3] Craige Roberts. Modal subordination and pronominal anaphora in discourse. In *Linguistics and Philosophy*, Vol. 12, pp. 683–721. Springer, 1989.

[4] Gareth Evans. Pronouns. Vol. 11, pp. 337–362. 1980.

[5] Frank Pfenning Aleksandar Nanevski and Brigitte Pientka. Contextual modal type theory. In *ACM Transactions on Computational Logic*, Vol. 9, pp. 1–49. 2008.

[6] Daisuke Bekki. A proof-theoretic analysis of weak crossover. In *Proceedings of the 18th International Workshop on Logic and Engineering of Natural Language Semantics*. 2021.

付録

A　前件のモダリティが possibility である場合の証明探索

$$
\dfrac{
v \ : \ \langle\Psi\rangle \begin{bmatrix} u : \begin{bmatrix} x : \textbf{entity} \\ \textbf{wolf}(x) \end{bmatrix} \\ \textbf{comein}(\pi_1(u)) \end{bmatrix}
\qquad
\dfrac{
\overline{\sigma : \Psi}^{\,1}
\qquad
\begin{array}{c}
\overline{v' \ : \ \begin{bmatrix} u : \begin{bmatrix} x : \textbf{entity} \\ \textbf{wolf}(x) \end{bmatrix} \\ \textbf{comein}(\pi_1(u)) \end{bmatrix}}^{\,1} \\
\vdots \\
(\pi_1\pi_1(v'), f(\pi_1(v'))) \ : \ \begin{bmatrix} z : \textbf{entity} \\ \neg\ \textbf{human}(z) \end{bmatrix}
\end{array}
}{
\langle\ \sigma, (\pi_1\pi_1(v'), f(\pi_1(v')))\ \rangle \ : \ \begin{bmatrix} z : \textbf{entity} \\ \neg\ \textbf{human}(z) \end{bmatrix} \ \textbf{poss}\ \langle\Psi\rangle
}\ (\mathit{poss})
}{
\mathit{letdia}(\ v, \langle\Psi, v'\rangle.\langle\sigma, (\pi_1\pi_1(v'), f(\pi_1(v')))\rangle\ ) \ : \ \begin{bmatrix} z : \textbf{entity} \\ \neg\ \textbf{human}(z) \end{bmatrix} \ \textbf{poss}\ \langle\Psi\rangle
}\ (\ \Diamond\ E\ ), 1
$$

図 5: 前件のモダリティが possibility である場合の証明探索結果

B　前件のモダリティが necessity である場合の照応解決

$$
\dfrac{
\begin{array}{c} \vdots \\ \Psi \ : \ \text{type} \end{array}
\qquad
\dfrac{
\dfrac{
\begin{array}{c} \vdots \\ \begin{bmatrix} z : \textbf{entity} \\ \neg\ \textbf{human}(z) \end{bmatrix} \ : \ \text{type} \end{array}
\qquad
\begin{array}{c} \overline{\sigma : \Psi}^{\,1} \\ \vdots \\ \begin{bmatrix} z : \textbf{entity} \\ \neg\ \textbf{human}(z) \end{bmatrix} \ \mathit{true} \end{array}
}{
\begin{bmatrix} w@ \begin{bmatrix} z : \textbf{entity} \\ \neg\ \textbf{human}(z) \end{bmatrix} \\ \textbf{growl}(\pi_1(w)) \end{bmatrix} \ : \ \text{type}
}\ (@)
}{
\begin{matrix} [\Psi] \\ \langle\Psi\rangle \end{matrix} \begin{bmatrix} w@ \begin{bmatrix} z : \textbf{entity} \\ \neg\ \textbf{human}(z) \end{bmatrix} \\ \textbf{growl}(\pi_1(w)) \end{bmatrix} \ : \ \text{type}
}\ \begin{matrix} (\ \Box\ F\ ) \\ (\ \Diamond\ F\ ) \end{matrix}
}{
\blacksquare\Psi \begin{matrix} [\Psi] \\ \langle\Psi\rangle \end{matrix} \begin{bmatrix} w@ \begin{bmatrix} z : \textbf{entity} \\ \neg\ \textbf{human}(z) \end{bmatrix} \\ \textbf{growl}(\pi_1(w)) \end{bmatrix} \ : \ \text{type}
}\ (\ \blacksquare\ F\ ), 1
$$

図 6: 前件のモダリティが necessity である場合の型検査

$$
\dfrac{
v \ : [\Psi] \begin{bmatrix} u : \begin{bmatrix} x : \textbf{entity} \\ \textbf{wolf}(x) \end{bmatrix} \\ \textbf{comein}(\pi_1(u)) \end{bmatrix}
\qquad
\begin{array}{c}
\dfrac{
\overline{v' \ :: \ \begin{bmatrix} u : \begin{bmatrix} x : \textbf{entity} \\ \textbf{wolf}(x) \end{bmatrix} \\ \textbf{comein}(\pi_1(u)) \end{bmatrix} [\Psi]}^{\,2}
\qquad
\overline{\sigma : \Psi}^{\,1}
}{
\mathit{clo}(v', \sigma) \ : \ \begin{bmatrix} u : \begin{bmatrix} x : \textbf{entity} \\ \textbf{wolf}(x) \end{bmatrix} \\ \textbf{comein}(\pi_1(u)) \end{bmatrix}
}\ (\mathit{ctxhyp}) \\
\vdots \\
(\ \pi_1\pi_1(\mathit{clo}(v', \sigma)), f(\pi_1(\mathit{clo}(v', \sigma)))\ ) \ : \ \begin{bmatrix} z : \textbf{entity} \\ \neg\ \textbf{human}(z) \end{bmatrix}
\end{array}
}{
\mathit{letbox}(\ v,\ v'.(\pi_1\pi_1(\mathit{clo}(v', \sigma)), f(\pi_1(\mathit{clo}(v', \sigma))))\ ) \ : \ \begin{bmatrix} z : \textbf{entity} \\ \neg\ \textbf{human}(z) \end{bmatrix}
}\ (\ \Box\ E\ ), 2
$$

図 7: 前件のモダリティが necessity である場合の証明探索結果

C　Modal DTS における規則群（抜粋）

C.1　Π 型

$$(\Pi F),i\ \frac{A : \mathsf{type} \qquad \begin{array}{c}\overline{x : A}^{\;i} \\ \vdots \\ B : \mathsf{type}\end{array}}{(x{:}\,A) \to B : \mathsf{type}} \qquad (\Pi I),i\ \frac{A : \mathsf{type} \qquad \begin{array}{c}\overline{x : A}^{\;i} \\ \vdots \\ M \ : \ B\end{array}}{\lambda x.M : (x{:}\,A) \to B} \qquad (\Pi E)\ \frac{M : (x{:}\,A) \to B \quad N : A}{MN : B[N/x]}$$

C.2　Σ 型

$$(\Sigma F),i\ \frac{A : \mathsf{type} \qquad \begin{array}{c}\overline{x : A}^{\;i} \\ \vdots \\ B : \mathsf{type}\end{array}}{(x : A) \times B : \mathsf{type}} \qquad (\Sigma I)\ \frac{M : A \quad N : B[M/x]}{(M, N) : (x : A) \times B} \qquad (\Sigma E)\ \frac{M : (x : A) \times B}{\pi_1(M) : A} \qquad (\Sigma E)\ \frac{M : (x : A) \times B}{\pi_2(M) : B[\pi_1(M)/x]}$$

C.3　CMTT の構造規則

$$(hyp)\ \frac{\Delta\, ;\ (\Gamma, x : A, \Gamma')}{x : A} \qquad (ctxhyp)\ \frac{\begin{array}{c}u :: A[\Psi] \\ \vdots \\ \sigma : \Psi\end{array}}{clo(u, \sigma) : A} \qquad (poss)\ \frac{\sigma : \Psi \quad M : A}{\langle \sigma, M\rangle : A\, poss\langle \Psi\rangle}$$

C.4　◇型

$$(\Diamond\ F)\ \frac{\Psi\ ctx \quad M : \mathsf{type}}{\langle \Psi\rangle M : \mathsf{type}} \qquad (\Diamond\ I)\ \frac{E : A\, poss\langle \Psi\rangle}{dia(E) : \langle \Psi\rangle A} \qquad (\Diamond\ E),i\ \frac{M : \langle \Psi\rangle A \qquad \begin{array}{c}\overline{\Psi}^{\;i} \quad \overline{x : A}^{\;i} \\ \vdots \\ E : B\, poss\langle \Theta\rangle\end{array}}{letdia(M, \langle \Psi, x\rangle.E) : B\, poss\langle \Theta\rangle}$$

C.5　□型

$$(\Box\ F)\ \frac{\Psi\ ctx \quad M : \mathsf{type}}{[\Psi] M : \mathsf{type}} \qquad (\Box\ I),i\ \frac{\begin{array}{c}\overline{\Psi}^{\;i} \\ \vdots \\ M : A\end{array}}{box(\Psi.M) : [\Psi]A} \qquad (\Box\ E),i\ \frac{M : [\Psi]A \qquad \begin{array}{c}\overline{u :: A[\Psi]}^{\;i} \\ \vdots \\ N : C\end{array}}{letbox(M, u.N) : C}$$

C.6　◆型

$$(\blacklozenge\ F)\ \frac{M : \mathsf{type}\ \ poss\langle \Psi\rangle}{\blacklozenge \Psi\ M : \mathsf{type}} \qquad (\blacklozenge\ I)\ \frac{M : A}{bkdia(M) : \blacklozenge\ A} \qquad (\blacklozenge\ E),i\ \frac{M : \blacklozenge\ A \qquad \begin{array}{c}\overline{x : A}^{\;i} \\ \vdots \\ N : B\end{array}}{cased_x(M, N) : B}$$

C.7　■型

$$(\blacksquare\ F),i\ \frac{\begin{array}{c}\overline{\sigma : \Psi}^{\;i} \\ \vdots \\ M : \mathsf{type}\end{array}}{\blacksquare \Psi\ M : \mathsf{type}} \qquad (\blacksquare\ I)\ \frac{M : A}{bkbox(M) : \blacksquare\ A} \qquad (\blacksquare\ E),i\ \frac{M : \blacksquare\ A \qquad \begin{array}{c}\overline{x : A}^{\;i} \\ \vdots \\ N : B\end{array}}{caseb_x(M, N) : B}$$