

# 型付きラムダ計算による自然言語の動的意味論

## Dynamic Semantics of Natural Language with Typed Lambda Calculus

戸次 大介  
BEKKI Daisuke

お茶の水女子大学 大学院人間文化創成科学研究科 理学専攻情報科学コース  
Ochanomizu University, Graduate School of Humanities and Sciences, Faculty of Science, Department of Information Science

### 1. 型付き動的論理：概要

型付き動的論理 (Typed Dynamic Logic: 以下 TDL) は、自然言語の意味論を記述するための論理体系である [Bekki 00b][Bekki 00c][Sato 06]。TDL には以下のような特徴がある。

1. TDL に基づく自然言語の意味論は、モンタギュー意味論 [Montague 73] の流れを汲むものであり、自然言語の真理条件の意味を論理言語で記述するというアプローチを採っている。
2. TDL は動的述語論理 [Groenendijk 91] の流れを汲む動的論理である。すなわち、[Kamp 81][Heim 82] らの動的意味論を語彙化 (lexicalize) したものであり、語彙の意味を記述し、それに基づいて文の意味を合成することができる。
3. しかし [Groenendijk 91] とは異なり、型付きラムダ計算によって定義された一種のマクロ言語であるため、型付きラムダ計算の証明論がそのまま適用される。したがって、モデル理論の意味論に頼らずに、証明論的に意味を定義することができる。しかし、型付きラムダ計算が圏論によってモデル理論の意味論を与えられうることは知られており [Bekki 08]、したがって TDL も圏によるモデル理論の意味論を与えることはできる。

本稿は、TDL に基づく言語理論の進捗状況報告として、理論の概要と、これまでに解決された問題について要約したものである。

### 2. 動的命題

動的意味論においては、「命題」という概念が、古典的意味論のそれとは異なっている。古典的意味論においては、「命題」は「真偽」を表す概念であるのに対して、動的意味論における「命題」は「文脈」から「文脈」への「部分関数」として考える。「部分関数」としては、以下のような意味である。

1. 「命題」は関数的である。すなわち、命題  $\phi$  に文脈  $G$  を与えたとき、任意の文脈  $H, H'$  について、

$$\begin{array}{l} G \xrightarrow{\phi} H \\ G \xrightarrow{\phi} H' \end{array}$$

ならば、 $H = H'$  である (同じ入力に対しては、出力が一意に決まる)。

2. 「命題」の関数としての定義域が必ずしも「文脈」全体ではなく、「文脈」の部分集合のいずれかである。すなわち、「命題」は全ての「文脈」に対して定義されているわけではない。このことは「命題」が「前提」を持つ場合に関係している。

部分関数を表記するには様々な方法があるが、「入力と出力のペア」の集合として表記するのは一般的な方法の一つである。「真偽」「文脈」を表す型 (タイプ) を、それぞれ  $t, c$  とすると、「命題」の型は  $(c \times c)t$  となり、一般化すると以下のような形式を持つことになる。ただし、 $G$  は「入力文脈と出力文脈のペア」を表す変数であり、 $\Phi$  は二つの文脈の関係を表すような、型  $t$  を持つ何らかの式であるとする。

$$\lambda G. \Phi(\pi_1(G), \pi_2(G)) : (c \times c)t$$

しかし上記のように、いちいち投射関数  $\pi$  を用いて書くと表記が煩雑になるので、TDL ではこれをカーリー化 (Currying) したものをを用いる。すなわち、命題の型を  $c(ct)$  とし、一般化すると以下のような形式を持つものとする。 $G$  は入力文脈、 $H$  は出力文脈を表す変数である。

$$\lambda G. \lambda H. \Phi(G, H) : c(ct)$$

「文脈」を構成するのは、指標 (index) とモノ (entity) である。これらは、型付きラムダ計算において型  $i$ 、型  $e$  のラムダ項を用いて表す。また、真偽 (型  $t$ ) とモノ (型  $e$ ) については、演算子として結び  $\vee$ 、交わり  $\wedge$ 、補元  $\neg$  が定義されており、ブール束の公理を満たすものと仮定する。

さて、認識内では言語の各要素は指標 (index) を割り振られていると考えられるが、言語の生成・理解には、指標をモノと結びつけるプロセスが関わっている。TDL では、指標とモノの対応を表すために「割り当て (assignment)」という概念を導入する。「割り当て」とは、指標をモノに割り当てる関数 (型  $ie$ ) である。たとえば、ある名詞句が指標  $x_1$  を持ち、モノとしてジョン、ビル、メアリーがそれぞれ  $j, b, m$  と表示されていると、「割り当て」には以下の 8 通りがあることになる。

	$x_1$
$g_0$	$\perp$
$g_1$	$j$
$g_2$	$b$
$g_3$	$m$
$g_4$	$j \vee b$
$g_5$	$b \vee m$
$g_6$	$m \vee j$
$g_7$	$j \vee b \vee m$

このような「割り当ての集合」を「文脈」と呼ぶことにする。すなわち、「文脈」とは型  $(ie)t$  である。以下は「文脈」の例である。

集合論的表記	型付きラムダ計算による表記
$\{\}$	$\lambda g. \perp$
$\{g_1, g_2\}$	$\lambda g. (g = g_1 \vee g = g_2)$
$\{g_2, g_4, g_5\}$	$\lambda g. (g = g_2 \vee g = g_4 \vee g = g_5)$

ここで、「命題」とは「文脈」から「文脈」への部分関数であったことを思い出すと、「命題」の型は  $((ie)t)((ie)t)t$  となる。ここまで導入した概念の型をまとめておく。

**定義 2..1** (割り当て、文脈、命題).

$$a(ssignment) \stackrel{def}{=} ie$$

$$c(ontext) \stackrel{def}{=} (ie)t$$

$$p(roposition) \stackrel{def}{=} ((ie)t)((ie)t)t$$

では動的命題とは入力文脈に対して、どのような文脈を出力するのであろうか。たとえば、 $boy(x_1)$  という命題を考える。ここで、 $x_1$  は指標 (型  $i$ ) であり、 $boy$  は一項述語 (型  $et$ ) である。この命題に上記の文脈が与えられると、以下のように「文脈」をフィルタリングするのである。

	$x_1$	
$g_0$	$\perp$	$\xrightarrow{boy(x_1)}$
$g_1$	$j$	
$g_2$	$b$	
$g_3$	$m$	
$g_4$	$j \vee b$	
$g_5$	$b \vee m$	
$g_6$	$m \vee j$	
$g_7$	$j \vee b \vee m$	

	$x_1$
$g_1$	$j$
$g_2$	$b$

一方、同じ文脈を命題  $girl(x_1)$  に与えると、フィルタリングによって別の文脈となる。

	$x_1$	
$g_0$	$\perp$	$\xrightarrow{girl(x_1)}$
$g_1$	$j$	
$g_2$	$b$	
$g_3$	$m$	
$g_4$	$j \vee b$	
$g_5$	$b \vee m$	
$g_6$	$m \vee j$	
$g_7$	$j \vee b \vee m$	

	$x_1$
$g_3$	$m$

また、同じ文脈を命題  $dog(x_1)$  に与えると、結果は空集合になってしまう。

	$x_1$	
$g_0$	$\perp$	$\xrightarrow{dog(x_1)} \emptyset$
$g_1$	$j$	
$g_2$	$b$	
$g_3$	$m$	
$g_4$	$j \vee b$	
$g_5$	$b \vee m$	
$g_6$	$m \vee j$	
$g_7$	$j \vee b \vee m$	

このように、フィルタリングの結果として、「割り当て」が一つでも残れば、その動的命題は「真」である。したがって、 $boy(x)$  と  $girl(x)$  は真であり、 $dog(x)$  はそうではない。以下の定義によって、動的命題 (型  $p$ ) の真偽と、静的命題 (型  $t$ ) の真偽が関係付けられる。

**定義 2..2** (動的命題の真偽).

$$true(\phi) \text{ under } G \stackrel{def}{=} \exists H. (\phi GH \wedge H \neq \emptyset)$$

$$false(\phi) \text{ under } G \stackrel{def}{=} \exists H. (\phi GH \wedge H = \emptyset)$$

$$defined(\phi) \text{ under } G \stackrel{def}{=} \exists H. (\phi GH)$$

$$undefined(\phi) \text{ under } G \stackrel{def}{=} \neg \exists H. (\phi GH)$$

これらの概念に基づき、TDL の動的命題は図 1 (p.3) のように定義される。各形式の詳細については、[戸次 (forthcoming)] を参照のこと。

### 3. 遅延量化

動的論理における量化は、静的論理のそれとは必然的に異なる。TDL における量化の仕組みは遅延量化 [Bekki 00c] と呼ばれる仕組みに基づいている。

**定義 3..1** (スライス : Slice). 文脈  $G$  の指標  $x$  によるスライス  $G/x$  は、 $G$  のメンバーが指標  $x$  に割り当てるモノの結び (join) である。

$$G/x \stackrel{def}{=} \bigvee (\lambda d. G|_{x=d} \neq \emptyset)$$

**定義 3..2** (自由指標/束縛指標). 任意の  $x \in \mathcal{V}ar^i$  について、

$$free(x) \stackrel{def}{=} \lambda G. \lambda H. (H = G) \wedge x \notin FI(G)$$

$$bound(x) \stackrel{def}{=} \lambda G. \lambda H. (H = G) \wedge x \in FI(G)$$

**定義 3..3** (指標導入命題). 任意の  $i \in \Lambda^i, x \in \mathcal{V}ar^i, \phi \in \Lambda^p$  について、

$$\varepsilon^i x. \phi \stackrel{def}{=} free(i); \phi[i/x]$$

$$\rho^i x. \phi \stackrel{def}{=} bound(i); \phi[i/x]$$

これらの概念に基づき、TDL の動的量化は図 2 (p.3) のように定義される。各形式の詳細については、[戸次 (forthcoming)] を参照のこと。

基本述語 (Atomic Predicate)	$R(x_1, \dots, x_n)$	$\stackrel{def}{\equiv}$	$\lambda G. \lambda H. H = G \cap \lambda g. (\langle gx_1, \dots, gx_n \rangle \in R)$
合成 (Composition)	$\phi; \psi$	$\stackrel{def}{\equiv}$	$\lambda G. \lambda H. \exists K. (\phi GK \wedge \psi KH)$
内部否定 (Internal negation)	$\sim \phi$	$\stackrel{def}{\equiv}$	$\lambda G. \lambda H. \exists K. (\phi GK \wedge H = G \cap (\lambda g. K = \emptyset))$
外部否定 (External negation)	$\approx \phi$	$\stackrel{def}{\equiv}$	$\lambda G. \lambda H. H = (G \cap \lambda g. (\phi G \emptyset \vee \neg \exists K. \phi GK))$
連言 (Conjunction)	$\phi \otimes \psi$	$\stackrel{def}{\equiv}$	$\lambda G. \lambda H. \exists K. \exists J. (\phi GK \wedge \psi GJ \wedge H = (K \cup J) \cap \lambda g. (K \neq \emptyset \wedge J \neq \emptyset))$
選言 (Disjunction)	$\phi \oplus \psi$	$\stackrel{def}{\equiv}$	$\lambda G. \lambda H. \exists K. \exists J. (\phi GK \wedge \psi GJ \wedge (H = K \cup J))$
分割文脈 (Strip context)	$G _{x=d}$	$\stackrel{def}{\equiv}$	$\lambda g. (g \in G \wedge gx = d)$
分配 (Distribution)	$\Delta x. \phi$	$\stackrel{def}{\equiv}$	$\lambda G. \lambda H. (H = \lambda g. \exists d. \exists K. (g \in K) \wedge \phi(G _{x=d}K))$
前提 (Presupposition)	$\partial(\phi)$	$\stackrel{def}{\equiv}$	$\lambda G. \lambda H. (H = G) \wedge \phi GH$
等号 (Equation)	$x \approx y$	$\stackrel{def}{\equiv}$	$\lambda G. \lambda H. H = G \cap \lambda g. (g(x) = g(y))$
含意 (Implication)	$\phi \Rightarrow \psi$	$\stackrel{def}{\equiv}$	$\sim(\phi; \sim\psi)$

図1 型付き動的論理 (TDL) の動的命題

全称量化 (Universal Quantification)	$Ax.(\phi)$	$\stackrel{def}{\equiv}$	$\lambda G. \lambda H. \exists K. (\phi GK \wedge (H = K \cap \lambda g. G/x = K/x))$
照応 (Anaphora)	$ref^i(x)[\phi][\psi]$	$\stackrel{def}{\equiv}$	$\rho x. (\partial(\psi); Ax.(\phi))$
一項量化 (Unary Quantification)	$N(x)$	$\stackrel{def}{\equiv}$	$\lambda G. \lambda H. (H = G \cap \lambda g. \#(G/x, N))$
二項量化 (Binary Quantification)	$Q(x)[\phi][\psi]$	$\stackrel{def}{\equiv}$	$\varepsilon x'. \varepsilon x''. \left( \begin{array}{l} \phi[x'/x]; \\ \phi[x''/x]; \\ \Delta x''. \psi[x''/x]; \\ \lambda G. \lambda H. (H = \lambda g. (g \in G \wedge Q(G/x', G/x''))) \end{array} \right)$

図2 型付き動的論理 (TDL) の遅延量化

## 4. 言語学の問題

TDL に基づく意味論によって解決される言語学上の問題としては、以下のようなものが挙げられる。

### 4.1 束縛変項照応・Eタイプ照応

[Bekki 00c] では、束縛変項照応 (Bound Variable Anaphora) と E タイプ照応 (E-type Anaphora: [Evans 80]) は、代名詞的表現 (指示詞+名詞等含む) の現れる統語的環境によって区別されるのであって、元々代名詞的表現の意味表示自体に二種類の区別があるわけではないと主張した。それらは排他的な統語環境において現れるが、意味計算の過程が一見大きく異なるため、先行研究においては、いずれか一方に特殊な演算子 (DRT における  $\Sigma$  演算子等) を導入せざるを得なかった。しかし TDL では、一般化量子子が分配的解釈をもたらす C 統御領域を  $\Delta$  演算子で表し、代名詞的表現は *ref* 命題で表すことによって、統一的分析が可能となっている。この分析では、先行詞が他の一般化量子子のスコープに埋め込まれている場合や、[Krifka 96] で議論されている以下の場合など、複雑なケースを正しく説明することから、自然言語の量化・照応システムの根本に関わる一般化であると考えられる。

- a. Most students wrote an article.
- b. They *{each}* $\{\emptyset\}$  sent *it* to JSAI.

その観点から云えば、量化と照応に関する経験的妥当性では、複数形の E タイプ照応が構成的に分析できる理論自体が少ない。[Kamp 93] の DRT、FCS スタイルの [Does 96]、動的論理では [Berg 90]、独自のアプローチとして [Krifka 96] 等があるが、従属照応 (dependent anaphora) まで考慮した場合、分析が

可能なのは TDL を除いては DRT、[Krifka 96]、[Nouwen 03] のみである。それらの分析との差異については、経験的な議論を今後積み重ねていく必要がある。

### 4.2 累積的量化

TDL における演算子は数量子の意味論において「分配」と「量化」を分離する。これらは古典論理の解釈では不可分な概念であるが、その不可分性が自然言語の累積的解釈の分析にとっての難点であった。TDL においては「量化」が「分配」を前提としないため、数量子の意味表示は「分配」の有無について曖昧であり、数量子が演算子を含まないときには分配がなく、累積的解釈を生じることが構成的に示される [Bekki 00a]。なお、一般化量子子 (二項量子子) は必然的に  $\Delta$  演算子を含むため、累積的解釈が生じないことが正しく予測される。

### 4.3 構成的イベント意味論

[Davidson 67] から [Parsons 90] を経て発展してきたイベント意味論は、動詞の意味表示を述語として捉える古典的アプローチと比べて、副詞の真理条件や動名詞の意味論など、いくつかの重要な現象の説明上優位であることが認められてきている。しかし、構成的分析においては、イベントの存在量化と、「二回」などのイベント量化の対立の問題があり、[Landman 00] で示されたような、VP における存在閉包と量子子繰り上げ理論 (Quantifier Raising: [May 77], Quantifier Storage: [Cooper 83]) の組合せ以外では解決していない。TDL による文法理論 [戸次 (2003a)] は量子子繰り上げを用いない分析であるが、指標 (index) の扱いの独自性によって、この問題がそもそも起こらないことが示されている。

#### 4.4 前提と照応

[Sandt 91] は前提 (Presupposition) を照応 (Anaphora) と見なす PIA 仮説を提示したが、DRT を用いた形式化では、前提条件が否定のスコープに含まれている場合などに問題が生じる。TDL による分析 [戸次 (2003b)] では、イベント意味論との相互作用によって、前提条件の大部分を「イベント照応」と見なすことによって、上述の問題を回避できる。もし PIA 仮説が正しいとするならば、DRT に対する TDL の照応モデルとしての優位性が、そのまま前提条件モデルとしての優位性となるのである。

#### 4.5 大規模な日本語文法との統合

形式意味論の文献では紙面の都合もあり、分析に用いられた文の導出が完全に提示されることは少ないが、そのことが形式意味論の統語論を弱体化させている嫌いがある。[戸次 (forthcoming)] では、組合せ範疇文法 (CCG: [Steedman 96, Steedman 00]) を元にした統語理論を定義し、用言の活用・助動詞・接尾語・態の扱いから複文構造に至るまで、日本語の広範な統語構造について網羅的かつ形式的な文法理論を提示した。

#### 参考文献

- [Bekki 00a] Bekki, D.: Delayed Quantification for Cumulative Readings, in *SINN UND BEDEUTUNG V (12/18/2000)*, University of Amsterdam (2000)
- [Bekki 00b] Bekki, D.: *Typed Dynamic Logic for Compositional Grammar*, Doctoral dissertation, University of Tokyo (2000)
- [Bekki 00c] Bekki, D.: Typed Dynamic Logic for E-type Link, in *Third International Conference on Discourse Anaphora and Anaphor Resolution (DAARC2000)*, pp. 39–48, Lancaster University, U.K. (2000)
- [Bekki 08] Bekki, D.: Monads and Meta-Lambda Calculus, in *the Fifth International Workshop on Logic and Engineering of Natural Language Semantics (LENLS2008) in Conjunction with the 22nd Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence 2008*, pp. 56–78, Asahikawa, Japan (2008)
- [Berg 90] Berg, van den M.: A Dynamic Predicate Logic for Plurals, in Stokhof, M. and Torenvliet, L. eds., *the Seventh Amsterdam Colloquium*, pp. 29–51, Amsterdam (1990), ITLI
- [Cooper 83] Cooper, R.: *Quantification and Syntactic Theory*, Reidel, Dordrecht (1983)
- [Davidson 67] Davidson, D.: The logical form of action sentences, in Rescher, N. ed., *The Logic of Decision and Action*, University of Pittsburgh Press, Pittsburgh (1967)
- [Does 96] Does, van der J.: An E-type Logic, in Seligman, J. and Westerståhl, D. eds., *Logic, Language and Computation*, CSLI Lecture Notes Number 58, pp. 555–570, CSLI Publications (1996)
- [Evans 80] Evans, G.: Pronouns, *Linguistic Inquiry*, Vol. 11, pp. 337–362 (1980)
- [Groenendijk 91] Groenendijk, J. and Stokhof, M.: Dynamic Predicate Logic, *Linguistics and Philosophy*, Vol. 14, pp. 39–100 (1991)
- [Heim 82] Heim, I.: *The Semantics of Definite and Indefinite Noun Phrases*, Ph.d dissertation, University of Massachusetts (1982), Published 1989 by Garland Press, New York
- [Kamp 81] Kamp, H.: A Theory of Truth and Semantic Representation, in Groenendijk, J., Janssen, T. M., and Stokhof, M. eds., *Formal Methods in the Study of Language*, Mathematical Centre Tract 135, Amsterdam (1981)
- [Kamp 93] Kamp, H. and Reyle, U.: *From Discourse to Logic*, Kluwer Academic Publishers (1993)
- [Krifka 96] Krifka, M.: Parametrized Sum Individuals for Plural Anaphora, *Linguistics and Philosophy*, Vol. 19, pp. 555–598 (1996)
- [Landman 00] Landman, F.: *Events and Plurality*, Studies in Linguistics and Philosophy, Kluwer Academic Publisher (2000)
- [May 77] May, R.: *The grammar of quantification*, Unpublished ph.d., MIT (1977), Reproduced by Garland (1991)
- [Montague 73] Montague, R.: The Proper Treatment of Quantification in Ordinary English, in J. Hintikka, J. M. and Suppes, P. eds., *Approaches to Natural Language*, pp. 221–242, Reidel, Dordrecht (1973)
- [Nouwen 03] Nouwen, R.: *Plural pronominal anaphora in context : Dynamic Aspects of Quantification*, LOT, Utrecht (2003)
- [Parsons 90] Parsons, T.: *Events in the semantics of English: A study in subatomic semantics*, The MIT Press, Cambridge MA (1990)
- [Sandt 91] Sandt, van der R. and Geurts, B.: Presupposition, anaphora, and lexical content, in Herzog, O. and Rollinger, C.-R. eds., *Text Understanding in LILOG*, pp. 259–296, Springer, Berlin (1991)
- [Sato 06] Sato, M., Bekki, D., Miyao, Y., and Tsujii, J.: Translating HPSG-style outputs of a robust parser into Typed Dynamic Logic, in *the COLING/ACL 2006 Main Conference Poster Sessions*, pp. 707–714, Sydney (2006)
- [Steedman 96] Steedman, M. J.: *Surface Structure and Interpretation*, The MIT Press (1996)
- [Steedman 00] Steedman, M. J.: *The Syntactic Process (Language, Speech, and Communication)*, The MIT Press (2000)
- [戸次 (2003a)] 戸次大介. 2003. 「型付き動的論理 (TDL) によるイベント量化の分析」, 情報処理学会研究報告 2003-NL-154, pp.23-30, 徳島大学
- [戸次 (2003b)] 戸次大介. 2003. 「型付き動的論理 (TDL) による前提条件と照応の統一的分析」, 第 37 回言語・音声理解と対話処理研究会資料 SIG-SLUD-A203, pp.7-13, 立教大学
- [戸次 (forthcoming)] 戸次大介. forthcoming. 「日本語文法の形式理論－活用体系・統語構造・意味計算－」, ころしお出版より出版予定.