

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 9 月 6 日現在

機関番号：12611

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00301

研究課題名(和文) 型理論による形式意味論・語彙意味論・オントロジーの統合記述体系の確立

研究課題名(英文) Unified perspective for formal and lexical semantics based on type-theoretic semantics

研究代表者

戸次 大介 (Bekki, Daisuke)

お茶の水女子大学・基幹研究院・准教授

研究者番号：90431783

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、形式意味論の推論システムと統合された形式をもつ、語彙意味論および形式オントロジーの記述体系を策定することである。この統合を可能にするのは、近年形式意味論において、自然言語の意味論の記述体系として有望視されている依存型意味論(dependent type semantics)である。DTSは依存型理論に基づいて自然言語に合成的な証明論的意味論を与える体系である。DTSを用いた分析によって、語彙意味論にとって難題であった共述語化(copredication)、強制現象(coercion)、メタファー(metaphor)といった諸問題を統一的に解決することに成功した。

研究成果の概要(英文)：This research project aims at designing a formal theory for lexical semantics and formal ontology, the representations of which are integrated with the inference systems of formal semantics. This integration is enabled by adopting dependent type semantics (DTS), which is a prospective, compositional, proof-theoretic semantics of natural language based on dependent type theory. Our DTS-based analysis succeeds in uniformly explaining complex phenomena such as copredication, coercion, and metaphor, which have been major issues in lexical semantics.

研究分野：形式意味論

キーワード：選択制限 共述語化 強制現象 メタファー 依存型理論

1. 研究開始当初の背景

近年、機械学習に基づく自然言語処理の発展により、体系的な言語リソースへの需要が高まっている。その中で、日本語の「語の意味」についてのリソース、すなわち辞書資源については、日本語学の手法によって構築されたもの（旧日本電子化辞書研究所による EDR コーパス、NTT コミュニケーション科学基礎研究所による日本語語彙体系、国立国語研究所による KOTONOHA 計画、等）に加えて、語彙意味論の手法に基づいて構築されたもの（竹内らによる動詞項構造シソーラス、松林らによる日本語述語項構造コーパス、等）が登場しつつある。前者は日本語学における記述的手法によって語彙分類を集積したものであるが、後者は Jackendoff らの語彙概念構造 (Lexical-conceptual Structure: LCS) や Pustejovsky らの生成語彙論 (Generative Lexicon: GL) を理論的ベースとしたものである。しかし、これらの研究は現在、「深い意味処理」がもたらす要請によって、次のような課題に直面しつつある。

- (1) 語の意味から文の意味、談話の意味へと計算してゆく過程において、理論に断絶が生じる。その原因は、語彙意味論においては、「部分の意味から全体の意味への合成・計算」を研究対象とする形式文法、形式意味論の意味構造との整合性が考慮されていない点にある。このことは、生成意味論、概念意味論が、チョムスキーの生成文法へのアンチテーゼとして提唱された、という歴史的経緯に依るものであるが、形式意味論と語彙意味論の説明対象が相補的であることを考慮すれば、解消すべき断絶である。
- (2) 語彙意味論の記述は、分類的であって分析的ではない。文の意味は、形式意味論および言語哲学においては伝統的に「真理条件」として論じられてきたが、語彙意味論においては、語彙を含む文の意味についてどのような予測がもたらされるのかは明らかではないことが多い。語彙意味論では、語と語の差異／共通点を記述上の差異／共通点と対応させることが説明とされ、記述の各要素の「意味」は定義されていないためである。
- (3) 語彙意味論では記述に用いる体系についての数理的な基盤について研究する土壌がない。結果として、語彙概念構造や生成語彙論の理論的基礎は不明瞭であり、その知見が隣接他分野に敷衍しにくい。

このような状況において、Asher (2011) は型理論とその圏論的意味論に基づく語彙意味論 (TCL: Type Composition Logic) を提唱した。Asher (2011) では LCS, GL の経験的な問題点を指摘するとともに、トポス理論 (圏論において直観主義論理に相当する枠組み) による定式化によって数理的な基盤を明確にするとともに、DRT などの形式意味論の枠組みとシームレスに接続する体系を構築している。

また筆者は、Bekki and Asher (2013) において、TCL の理論をさらに発展させ、高階多相型理論と、形式文法理論である組合せ範疇文法 (CCG: Steedman (1996), 戸次 (2010)) の関数合成規則を融合することによって、語彙意味論における課題であった共述語化の問題 (Section 3.1 参照) を解決した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、形式意味論の推論システムと統合された形式をもつ、語彙意味論および形式オントロジーの記述体系を策定することである。研究分野としては、形式意味論、語彙意味論、形式オントロジー、計算意味論等の境界領域にあたる。

この統合を可能にするのは、近年形式意味論において、自然言語の意味論の記述体系として有望視されている依存型意味論 (dependent type semantics) (Bekki, 2014) である。DTS は Bekki and Asher (2013) が用いた多相型理論より強力な体型である依存型理論 (dependent type theory) (Martin-Löf, 1984) に基づく体系である。依存型とは、主にプログラミング意味論において、レコード型等のデータ構造を型理論の枠内で扱うために提唱された概念であるが、自然言語の意味論においても近年、その記述力が注目されている。DTS によって、語彙意味論の難題である共述語化 (copredication), 強制現象 (coercion), メタファー (metaphor) 等の諸問題を統一的に解決し、形式意味論、語彙意味論、形式オントロジーの基礎理論を統一することを目指した。

3. 研究の方法

3.1 共述語化 (copredication)

英語の普通名詞 “bank” は「office としての bank を表しているか」「land としての bank を表しているか」による多義性を持つが、以下の (1) に示すように、一つの “bank” をその両方の意味で用いることはできない。なお、# は文が不適切であることを表す。

- (1) # Every bank that closes at 18:00 is muddy

and slippy.

一方、英語の普通名詞 “book” は「information (以下 **Info**) としての book を表しているか」「physical object (以下 **PhyObj**) としての book を表しているか」による多面性を持つが、以下の (2) に示すように、文の中で一つの “book” をその両方の意味で用いることができる。これを共述語化 (copredication) という。

- (2) a. John burned every book that he memorized.
b. John memorized and burned the book.

したがって、“bank” の多義性は、語彙項目の曖昧性に由来すると考えられる一方で、“book” の多面性は、一つの語彙項目から派生したものであると考えられる。

共述語化における語の多面性の表示と計算過程は Asher (2011) 以前には未解決問題であった。しかし、実テキストには共述語化の例が頻出し、“book” のような語をオントロジー (ontology) にアンカーする際に問題となる。すなわち、**Book** クラスは **Info** クラスのサブクラスか、それとも **PhyObj** クラスのサブクラスか、という問題である。ここで **Info** と **PhyObj** の両方のサブクラスである、とする多重継承を行うことは、**Info** と **PhyObj** の共通部分は空であるという事実と矛盾する。また、**Book** クラスが **Info** クラスと **PhyObj** クラスの直積 (いわゆる dot type) であるという分析は “counting problem” に直面する。

これに対して Bekki and Asher (2013) では、**Book**, **Info**, **PhyObj** をそれぞれ別の型として扱い、**Book** → **Info**, **Book** → **PhyObj** という型を持つアスペクト関数 (aspect function) を仮定する方法を提案した。アスペクト関数は形式オントロジーにおいてクラス間を横断するエッジに相当する。共述語化という現象の重要性は、単純なアスペクト変換によって項の型 **Book** を **Info** または **PhyObj** に変換すると、二つの述語のうち一方の選択制約 (selectional restriction) しか満たせない、という問題が生じる点にある。Asher (2011) においては、これを圏論でいう pullback を用いることで解決したが、不必要に複雑な枠組みを導入しており推論システムが定義できない。この問題を、Bekki and Asher (2013) においては、アスペクト関数と CCG (戸次 (2010)) の関数合成を組み合わせることで、型理論の枠内で解決している。

自然言語処理においても、語の意味をオントロジー上のクラスと関連づけることは、日常推論の解明、あるいは

はその計算機上での実現において急務である。自然言語に現れる文と文には、そのままでは (論理的に厳密な意味での) 演繹を完成しないようなギャップが多々存在する。たとえば、歴史の教科書などにおける (3) の記述から、我々は (4) の結論を導くことができる。

- (3) 皇帝シャー・ジャハーンがタージ・マハルを建造した。
(4) タージ・マハルは人工物である。

ところが、(3) の意味表示である $build(SJ, TM)$ から、(4) の意味表示である $artifact(TM)$ を導く演繹には、

- i) 述語 build は目的語が building の下位型であるという選択制約を持つこと
ii) 形式オントロジー上で型 building が型 artifact の下位型であること

が必要になる。このように、日常推論は最も論理的な部類のものであっても、多くの常識によって補完されており、それを表す理論装置には少なくとも (どう獲得されているかは別問題として) 形式オントロジーが備わっていると考えられる。したがって、語の意味をオントロジーにアンカーするタスク、およびそのための表現形式の確立は、言語における推論の問題の解明、計算機上での実現に大きく関わるものである。

3.2 強制現象 (coercion)

(5a)(6a) に見られるように、他動詞 “enjoy” は、目的語に対する選択制約として「イベント」(event) の下位型であることを要求するが、一方で、目的語位置に (5b)(6b) のように「イベント」の下位型ではない名詞が現れる場合がある。

- (5) a. John enjoyed smoking.
b. John enjoyed cigarette.
(6) a. John enjoyed reading the book.
b. John enjoyed the book.

(5b)(6b) が容認可能である時の意味解釈のメカニズムは、他動詞 “enjoy” と目的語の間の型の mismatch が、「本」の型から「イベント」(この場合、読書) の型への強制的な変更を引き起こしている、と考えられる。結果的に、(5b)(6b) は (5a)(6a) と同じ意味となる。このような「強制」を、アスペクト関数を用いて説明付けられるか否か、という課題がある。なお、同様の強制現象は (7) のように日本語にも見られる。

- (7) a. 太郎はその本を読むのを楽しんだ。

b. 太郎はその本を楽しんだ。

しかしながら、(6b)(7b)に相当する構文は、たとえば中国語には存在しないことが知られている。この事実は、強制現象が(認知意味論が主張するような)普遍的な認知機構の作用によって説明されるべきことではなく、各言語に現れる意味表示の性質から、言語の問題として説明されるべきことであることを示唆している。

解決法としては、(5b)においては **Tobacco** → **Event**, (6b)においては **Book** → **Event** という型を持つ証明項を、証明探索の手法で探索することである。その結果、たとえば以下のような証明項を見つけることができれば、それによって“cigarette”, “the book”の意味表示を変換すればよい。

$$\lambda y : \mathbf{Tobacco}.ie : \mathbf{Event}.(\mathit{smoking}(e) \wedge \mathit{theme}(e, y))$$
$$\lambda y : \mathbf{Book}.ie : \mathbf{Event}.(\mathit{reading}(e) \wedge \mathit{theme}(e, y))$$

3.3 メタファー (metaphor)

動詞 “think” は主語に対する選択制約として「有生」(animate)の下位型であることを要求するが、(8)のような文における無生主語は、ミスマッチではなく(地球が生きている、という)メタファーとして用いられる。

(8) Our planet thinks that we can change.

これまでメタファーは主に認知意味論によって「形式意味論では説明しえない現象」と主張されてきたが、本研究では Asher (2011) の精神を踏襲し、型理論による解決を試みる。具体的には、メタファーを「選択制約に対する前提適応 (accommodation)」と位置付ける。前提適応とは形式意味論の重要な概念であり、話者の発話において前提 (presupposition) とされていることを聞き手の知識において満たすことができないとき、聞き手が妥協する操作であるが、この考え方を(8)のような型のミスマッチに適用することにより、「our planet を有生として解釈することで妥協する」ことが起こる。たとえば(8)の “Our planet” の意味表示 $p : \mathbf{Inanimate}$ を、 $f(p) : \mathbf{Animate}$ に変換する関数 $f : \mathbf{Inanimate} \rightarrow \mathbf{Animate}$ によって前提適応を行う(もちろん聞き手には、この操作を取らず、単に型のミスマッチとして(4)を容認不能とする選択肢も存在する)。型理論に基づく分析では、このプロセスを記述的な一般化としてではなく、計算として定義することができる。

4. 研究成果

4.1 平成 27(2015) 年度

平成 27 年度の研究成果として、第一に、文や談話を分析するために用いられてきた依存型意味論の枠組みを語彙意味論に拡張するための最初の試みを行った。推論を行う際は語彙の意味の分析と、オントロジーで記述された知識の両方を使う必要があるため、オントロジーについても依存型意味論で記述する方法を提案した。[雑誌論文 5][学会発表 12]

第二に、共述語化、強制現象の現象を分析する枠組みを、依存型意味論に基づいて提案した。この枠組みにおいては、述語の選択制約と名詞の論理的多義性についての知識は、オントロジーの概念を用いて記述することができる。また、論理的多義性を持つ名詞についての共述語化や強制構文が容認可能であるということは、述語と項の間に何かしらの意味の変換があるということを示唆している。そこで、オントロジーによって記述された知識に基づいて依存型意味論に動詞と名詞間の意味変換を行う演算子を導入することで、論理的多義や強制現象がもたらす問題点の解決を試みた。[学会発表 7]

4.2 平成 28(2016) 年度

平成 28 年度には自然言語における伝統的な問題の一つである「述語の選択制約」の問題に立ち戻り、取り組んだ。「述語の選択制約」とは、たとえば動詞「注ぐ」に対するヲ格名詞句は「液体」でなければならない、という制約であり、言語処理における曖昧性解消タスクでは「職人が注ぐヒマワリから採れた油」の理解において、職人が注ぐのは「ヒマワリ」ではなく「油」である、というような判断を行う上で必要である。一方、それを解決する理論は、「惜しみなく愛情を注ぐ」とはどういう意味か、「愛情」に「液体」の性質を付与していることになるか、「惜しみなく援助を注ぐ」とはいえないのは何故か、といった問いにも答える必要がある。

本研究では、上の例における動詞「注ぐ」がヲ格名詞句に課す意味的制約が意味論的前提 (presupposition) であるという比較的古典的な立場を、依存型意味論の証明論的意味論の枠組みによって捉え直し、上に述べたような諸問題を直観主義型理論における証明探索の問題に還元するという分析を試みた。たとえば、「注ぐ」はヲ格名詞句 y に対して、 y が液体である、という前提をトリガーする。これが満たされない場合は前提違反となるが、一方前提適応の仕組みによって、メタファーの場合には逆にヲ格名詞句が「液体」の性質を帯びる、という意味を

持たせることができる。このような仕組みにより、選択制約、メタファーといった現象を前提・照応と統一的に計算する機構を提案した。[雑誌論文 2][雑誌論文 4][学会発表 7]

たとえば、動詞 “think” は主語に対する選択制約として「有生」(animate)の下位型であることを要求するが、たとえば文 “Our planet thinks that we can change.” における無生主語は、ミスマッチではなく（地球が生きている、という）メタファーとして用いられる。この理論の新規性は、メタファーの問題を型推論の問題に還元できるという点にある。

4.3 平成 29(2017) 年度

平成 29 年度は、前年度の成果である依存型意味論 (DTS) を用いた選択制限の分析を踏まえ、分析の対象を当初の研究計画に従って強制現象、メタファーといった現象に拡張する研究を行った。この研究成果を論文としてまとめ、CoPo2017 国際学会に投稿し、査読を経て採択されるに至った。CoPo 国際学会においては共著者の木下・峯島両氏が口頭発表を行った。[学会発表 2]

研究計画時の見通しは正しく、選択制限、強制現象、メタファーのような認知意味論分野において形式意味論の枠組みにおける自然言語の意味の把握の限界を示すために取り上げられてきた言語現象を、DTS の枠組みの強みを生かすことによって、意味論的前提と前提適応、およびそれらのもたらす含みとして分析することに成功した。これによって、形式意味論の全体としての統合性と掌握範囲は大きく改善されたと考えられる。このような統一分析を提示するにあたっては、いくつかの技術的困難に直面した。最たるものは Transfer Frame (TF) という Kinoshita et al.(2018) の分析の中核を為す概念の定義であった。この分析は CoPo2017 国際ワークショップにおいて一定の評価を得ることができ、ワークショップ発表からの selected papers としてジャーナルに雑誌論文として投稿中である（2018 年 4 月現在査読中）。

また、この研究から派生して、前提適応を意図的に引き起こす発話行為についての研究を行った。この成果は Ito et al.(2017) として論文にまとめ、IASM2017 国際ワークショップに投稿し、発表を行った。[雑誌論文 1]

参考文献

Asher, N. (2011) *Lexical Meaning in Context — a web of words* —. Cambridge University Press.
Bekki, D. (2014) “Representing Anaphora with Dependent Types”, In the Proceedings of N. Asher and

S. V. Soloviev (eds.): *Logical Aspects of Computational Linguistics (8th international conference, LACL2014, Toulouse, France, June 2014 Proceedings)*, LNCS 8535. Toulouse, pp.14–29, Springer, Heiderburg.

Bekki, D. and N. Asher. (2013) “Logical Polysemy and Subtyping”, In: Y. Motomura, A. Butler, and D. Bekki (eds.): *New Frontiers in Artificial Intelligence (JSAI-isAI 2012 Workshops, LENLS, JURISIN, MiMI, Miyazaki, Japan, November and December 2012, Revised Selected Papers)*, Vol. LNAI 7856. Heidelberg, Springer, pp.17–24.

Martin-Löf, P. (1984) *Intuitionistic Type Theory*, Vol. 17. Naples, Italy: Bibliopolis. Sambin, Giovanni (ed.).

Steedman, M. J. (1996) *Surface Structure and Interpretation*. Cambridge, The MIT Press.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

1. Yurina Ito, Koji Mineshima, Daisuke Bekki (2017) *Indirect Answers to QUD*, In Proceedings of Integrating Approaches to Social Meaning (IASM) workshop, in the 29th European Summer School in Logic, Language and Information (ESSLLI 2017), Toulouse, France.
2. Eriko Kinoshita, Koji Mineshima, Daisuke Bekki (2017) *An Analysis of Selectional Restrictions with Dependent Type Semantics*, In New Frontiers in Artificial Intelligence. JSAI-isAI 2016, Kurahashi S., Ohta Y., Arai S., Satoh K., Bekki D. (eds), Lecture Notes in Computer Science, vol 10247, pp.19-32, Springer, Cham
3. Daisuke Bekki, Koji Mineshima (2017) *Context-Passing and Underspecification in Dependent Type Semantics*, Modern Perspectives in Type-Theoretical Semantics, S.Chatzikyriakidis and Z.Luo (Eds.), Studies of Linguistics and Philosophy, Springer. pp.11-41.
4. Eriko Kinoshita, Koji Mineshima, Daisuke Bekki (2016) *An analysis of selectional restrictions with Dependent Type Semantics*, In Proceedings of the 13th International Workshop on Logic and Engineering of Natural Language Semantics

(LENLS13), pp.100-113.

5. Ayako Nakamura, Koji Mineshima, Daisuke Bekki (2015) *Towards Modeling Natural Language Inferences with Formal Ontology and Lexical Semantics*, In Proceedings of the FOFAI session of the Joint Ontology Workshops (JOWO), July 25-27th, Buenos Aires.

[学会発表] (計 23 件)

1. 戸次 大介 (2018) 理論言語学と自然言語処理と, 言語処理学会第 24 回年次大会 (岡山大学) 招待講演, 2018/3/15.
2. Eriko Kinoshita, Koji Mineshima, Daisuke Bekki (2017) *Coercion as Proof Search in Dependent Type Semantics*, In Proceedings of Workshop on Approaches to Coercion and Polysemy (CoPo 2017), University of Oslo, Norway.
3. 伊藤 友里菜, 築 有紀子, 戸次 大介 (2017) 依存型意味論による自然言語の証明論的意味論 II, 東海意味論研究会, 名古屋学院大学, 2017/10/29
4. 戸次 大介, 峯島 宏次, 金子 貴美, 田中 リベカ, 谷中 瞳, 木下 恵梨子, 伊藤 友里菜, 築 有紀子 (2017) 意味論の証明論的転回, 第 31 回人工知能学会全国大会論文集, 2B3-OS-07a-4, ウィンクあいち, 2017/5/23-26.
5. Daisuke Bekki, Koji Mineshima (2016) *An Introduction to Dependent Type Semantics*, A course lecture at 28th European Summer School in Logic, Language and Information (ESSLLI2016), Bolzano-Bozen, Italy, 2016/08/15-19.
6. 木下 恵理子, 峯島 宏次, 戸次 大介 (2016) 依存型意味論と形式オントロジーによる述語の選択制約の分析, 第 30 回人工知能学会全国大会論文集, 北九州国際会議場, 2016/6/6-6/9.
7. 木下 恵梨子, 中村 絢子, 戸次 大介 (2016) 依存型意味論とオントロジーを用いた論理的多義とコーション現象の分析に向けて, 言語処理学会第 22 回年次大会発表論文集, D2-4, 東北大学, 2016/3/7-11.
8. Daisuke Bekki (2015) *Anaphora and Presuppositions in Dependent Type Semantics*, Invited talk at Colloquium in Philosophy, Logic and Philosophy of Science, Munich Center for Mathematical Philosophy (MCMP), Ludwig-Maximilians-University, Munich, Germany, 2015/12/2.

9. Daisuke Bekki (2015) *Anaphora and Presuppositions in Dependent Type Semantics*, Invited talk at Dynamic Semantics: Modern Type Theoretic and Category Theoretic Approaches, Ohio State University, United States, 2015/10/24-25.
10. Daisuke Bekki (2015) *Introduction to Dependent Type Semantics*, A talk at New York University, United States, 2015/10/27.
11. Daisuke Bekki (2015) *Contexts in Dependent Type Semantics*, Invited talk at the Second International Workshop on Linguistics of BA, Future University Hakodate, 2015/7/4.
12. 中村 絢子, 峯島 宏次, 戸次 大介 (2015) オントロジーを用いた型理論的な語彙意味論の試み, 第 29 回人工知能学会全国大会論文集, 2M1-2, はこだて未来大学, 2015/5/30-6/2.

[図書] (計 4 件)

1. Mihoko Otake, Koji Mineshima, Daisuke Bekki (2017) *In New Frontiers in Artificial Intelligence (JSAI-isAI 2015 Workshops, LENLS, JURISIN, AAA, HAT-MASH, TSDAA, ASD-HR, and SKL, Kanagawa, Japan, November 16-18, 2015, Revised Selected Papers)* Lecture Notes in Artificial Intelligence 10091, Springer
2. 戸次 大介 (2017) 人工知能学事典 項目「形式意味論」, pp.632-635, 人工知能学会.
3. Tsuyoshi Murata, Koji Mineshima, Daisuke Bekki (2015) *In New Frontiers in Artificial Intelligence (JSAI-isAI 2014 Workshops, LENLS, JURISIN, and GABA, Kanagawa, Japan, October 27-28, 2014, Revised Selected Papers)* Lecture Notes in Artificial Intelligence 9067, Springer

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件) ○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

戸次 大介 (BEKKI, Daisuke)

お茶の水女子大学・基幹研究院・准教授

研究者番号: 90431783