

意味論の証明論的転回

On Proof-theoretic Turn in Natural Language Semantics

戸次 大介^{*1}
Daisuke Bekki峯島 宏次^{*1}
Koji Mineshima金子 貴美^{*1}
Kimi Kaneko田中 リベカ^{*1}
Ribeka Tanaka谷中 瞳^{*2}
Hitomi Yanaka木下 恵梨子^{*1}
Eriko Kinoshita伊藤 友里菜^{*1}
Yurina Ito籾 有紀子^{*1}
Yukiko Yana^{*1}お茶の水女子大学 理学部情報科学科

Ochanomizu University, Faculty of Science, Department of Information Science

^{*2}東京大学大学院 工学系研究科 システム創成学専攻

The University of Tokyo, Faculty of Engineering, Department of Systems Innovation

Since Montague, model-theoretic semantics has been the main stream research paradigm in the field of natural languages semantics. There also exists, however, a lineage of proof-theoretic semantics originated in Martin-Löf. In recent years, empirical and computational advantages of proof-theoretic semantics over the model-theoretic ones have been established by theoretical progress including authors' own researches. In this paper, we briefly introduce the idea of Dependent Type Semantics (DTS), one of the central frameworks of proof-theoretic semantics of natural language, and discuss its linguistic significance, philosophical implicatures, and some applications to natural language processing.

1. モデル理論的意味論と証明論的意味論

Montague 以来、自然言語の意味論における主流はモデル理論的意味論であり、文の意味とはその真理条件 (truth-condition) であるとされてきた。一方で 1980 年代には E タイプ照応 [Evans 80] や (意味論的) 前提 [Heim 83b] といった一階述語論理や Montague の内包論理では説明できない現象が知られるようになり、談話表示理論 (DRT: Discourse Representation Theory [Kamp 81]) やファイル変更意味論 (FCS: File Change Semantics [Heim 83a]) の登場を動機付けた。1990 年代には、動的述語論理 (DPL: Dynamic Predicate Logic [Groenendijk&Stofhof 91]) が提案され、文の意味をその真理条件ではなく、CCP (context change potential) として捉え直す試みがなされ始めた。また、E タイプ照応と (意味論的) 前提の DRT による統一理論が [van der Sandt 92] によって提示され、CCP のような動的な意味の捉え方が自然言語にとって本質的である、という見解が受容されつつ、2000 年代以降に至っているように見受けられる。

言語哲学の末裔である形式意味論から生じたこれらの流れで興味深いのは、照応や (意味論的) 前提といった (普遍的現象であるとはいえ) 特定の言語現象の分析が、言語哲学の問題である「言語の意味とは何であるか」という問いに対して、特定の立場 (真理条件的意味論) を棄却することを要請していることである。しかしながら、その代替案たる CCP の受容が、照応や (意味論的) 前提といった言語現象が要請する唯一の結論であるか否かについては、より慎重に検討しなければならない。

その点において、自然言語の意味論に真理条件的意味論とは異なる流れが存在していることには、より多くの関心が寄せられるべきである。それは、Sundholm, Ranta, Cooper, Luo による証明論的意味論の流れ^{*1}である。モデル理論的意味論

が、文の意味を真理条件とする立場であるのに対し、証明論的意味論とは、文の意味を検証条件とする立場 [Dummett 75, Dummett 76] に由来する。真理条件的意味論は、Tarski による数学の意味論にその起源を持つが、検証条件的意味論は [Gentzen 35][Prawitz 65] らによる数学の意味論に遡る。

特に、理論装置として Martin-Löf の依存型理論 [Martin-Löf 84] を用いた場合は「証明」を表す式を論理式の中で用いることが可能となり、これは形式意味論の分野において動的意味論を導入する動機となった E タイプ照応や (意味論的) 前提といった現象に、まったく別の説明を与えることができるのである。

また、筆者らの近年の研究^{*2}において、Ranta らの証明論的意味論を合成的意味論として再構成できることが示され、動的意味論に対して経験的、計算的に優位であることも明らかにされつつある。意味論におけるこのような近年の展開を「証明論的転回」と呼ぶことにする。その経験的側面については第 2.2 項、計算的側面については第 3. 節において、それぞれ述べる。

2. 形式意味論の証明論的転回

依存型理論がはじめて自然言語の意味論に用いられたのは、[Sundholm 86] においてであり、いわゆるロバ文 [Geach 62] に適切な意味表示を与える可能性が示された。続いて [Ahn&Kolb 90] において DRT の意味表示 (DRS) から依存型理論の型への変換が可能であることが示された。

依存型を用いた本格的な自然言語の意味の理論は [Ranta 94] による Type-Theoretical Grammar (TTG) を待つことになる。ここでは、ロバ文を始めとして、さまざまな照応現象、(意味論的) 前提の一部、テンスやモダリティに至る言語現象が依存型を用いてうまく表示されることが示され、依存型による

連絡先: 戸次大介, お茶の水女子大学基幹研究院, 自然科学系情報科学専攻, 東京都文京区大塚 2-1-1

^{*1} 依存型理論に基づいた自然言語の意味の研究としては、

[Sundholm 86][Ranta 94][Cooper 05][Luo 12] 等が知られている。依存型理論以外の体系に基づく自然言語の証明論的意味論には [Francez&Dyckhoff 10][Francez 15] 等があり、また依存型理論を用いた自然言語のモデル理論的意味論には [Grudzinska&Zawadowski 14] 等があるが、これらとの比較については別の機会に述べたい。

^{*2} [Bekki 14][Bekki&Mineshima 16][Bekki&Mineshima 17] を参照。

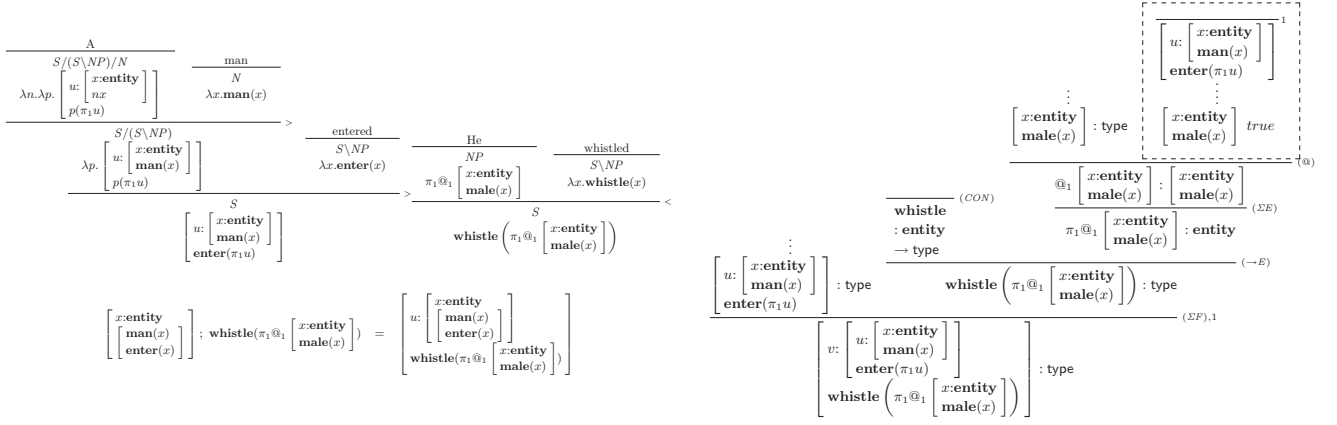


図1 A man entered. He whistled. の統語計算と意味合成 (左図)、型検査 (右図)

意味理論の一つのランドマークとして知られる。

2.1 依存型意味論 (DTS)

TTG はそれまでの研究と比較して、より広範囲な言語現象に依存型理論による分析を与え、依存型理論による自然言語の意味論の可能性を示したといえるが、合成原理 (principle of compositionality) を満たしていないという点において、形式意味論の理論としての基準を満たしていないものであった^{*3}。依存型意味論 (dependent type semantics: DTS [Bekki 14][Bekki&Mineshima 16][Bekki&Mineshima 17]) は依存型理論に未指定項 (underspecified term) と呼ばれる構文を追加することで、TTG など依存型理論に基づく自然言語の意味論を、合成原理を満たす体系として再構築したものである。

DTS による分析の例として、E タイプ照応の例 *A man entered. He whistled.* を考える。統語理論には、ここでは統語計算の過程を明示するために組み合わせ範疇文法 [Steedman 96] を仮定するが、意味部門としての DTS は統語部門としての CCG に依存しておらず、語彙化文法であればどのような理論を仮定しても構わない。

一文目と二文目の統語構造および意味合成過程は、図1の左図の通りである^{*4}。最下段には、それぞれの文の意味表示が現れており、これらは Σ 型を用いて (連言として) 接続し、一文目、二文目を合わせた談話の意味表示となる。

ここで $@$ 記号は未指定項 $@_i A$ (ただし $i \in \mathbb{N}$ は異なる未指定項を区別するための指標、 A は型) を構成するために用いられる。未指定項のための規則は $@$ 規則と呼ばれ、「 A が型であり、かつ型 A に何らかの証明項が存在するとき、 $@_i A$ を A 型の項として用いることができる」という意味を与える。直観的には、これは「 A であるような項」として用いる。

この意味表示に含まれる照応詞の先行詞を解決するには、図1右図のように型検査を行う。依存型理論には、決定可能な型検査アルゴリズムをもつ断片が存在しており、自然言語の意味表示はその断片を用いて記述することができる。詳細は [Bekki&Sato 15b] を参照されたい。

2.2 証明論による形式意味論の展開

冒頭で述べたように、依存型理論を用いた自然言語の意味の分析はいくつか存在するが、DTS の特長は合成原理を満たすという点にある。この特長により DTS では、Montague 意味論と同じように、これまで形式意味論で論じられてきた幅広い言

語現象を分析することができる。

[van der Sandt 92] は照応と (意味論的) 前提が同質の現象であることを指摘し、DRT に基づく統一理論を提示したが、[Bekki&Mineshima 17] ではその証明論版ともいえる分析を展開することが可能であることを示した。加えて [Bekki&McCready 15a] では、慣習的含み (conventional implicature: CI [Potts 05]) について、従来の (意味論的) 前提と表示の次元を区別する立場ではなく、同一の次元で表示する分析を提案している。

また、DTS によって捉えうる現象の射程は、一階述語論理を越えると考えられる言語現象にまで広がっている。たとえば [Tanaka 14] では一般化量子 (Generalized Quantifier; GQ [Barwise&Cooper 81]) について、[Tanaka et al.15] では叙実的前提 (factive presupposition) について、それぞれ分析を行っている。前者については [Sundholm 89] において依存型理論を用いた分析が提案されているが、ロバ文の strong/weak readings の導出については問題点が残るとし、その修正案について議論している。後者については DRT での分析が難しいことが知られている。

さらに、[Tanaka et al.16] では複数性 (plurality) の扱いについて、特に一般化量子が複数形照応詞の先行詞となる場合について論じている。[Kinoshita et al.16] では述語の選択制限を一種の (意味論的) 前提と見なす立場に立ち、DTS を用いた分析を与えている。[Kaneko&Bekki 14][Kaneko et al.16] では談話関係 (discourse relation) の分類と、それに基づくアノテーションガイドラインを策定し、実テキストに対するアノテーションを行っている。

3. 意味処理の証明論的転回

「自然言語の意味に関わる情報のかなりの部分が、一階述語論理の記述力の範囲では表現できない」という事実は、Montague 意味論の初期の研究において指摘されて以来、幾度となく議論されてきた。それ以降の形式意味論は、高階論理である Montague の内包論理 (Intensional Logic: IL) を拡張する形で進展しており、高階論理を用いることがほぼ通例である。

一方、Montague 自身の意味論が内包論理の証明論とともに提示された [Montague 70] のに対し、その後の形式意味論においてはモデル理論のみが受け継がれて主流となった。そのことは、形式意味論を用いた意味の分析が、「計算」という側面においてどのように振る舞うかを不透明にしたきらいがある。

同時に、高階論理による意味表示は、これまで計算面では「一階述語論理による意味表示に対して不利である」と信じられてきた。しかし、著者らの近年の研究によって、この点には再考

^{*3} この点を修正しようとする試みとして、[Dávila-Pérez 95] による Montague 文法と TTG の融合があるが、このアプローチの問題点については [Bekki 14] を参照されたい。

^{*4} DTS では自然言語の意味表示を見やすくするために、依存型に一部独自の記号を用いる。詳しくは [Bekki&Mineshima 17] を参照されたい。

の余地があることが明らかになりつつある。

3.1 高階論理に基づく含意関係認識

[Mineshima et al.15][Martínez-Gómez et al.16] では、組合せ範疇文法に基づく頑健な構文解析 (C&C パーザ [Clark&Curran 07]) と、様々な意味的現象に対して推論・証明手続きを与える高階論理による意味論を接続することにより、実世界の大規模テキストに対して頑健かつ高速に意味計算を行う含意関係認識システム ccg2lambda を開発した*5。

ccg2lambda では、自然言語文の構文解析木を得たのち、 λ 計算に基づいて高階論理の意味表示を計算し、定理証明器 Coq による自動推論を行う。検証は FraCaS テストセット [Cooper et al.96] によって行っており、一階述語論理に基づく推論システムとして 2015 年当時最高であった Nutcracker の正解率 50 % に対して、69 % の正解率を達成した。また、それまで高階論理による推論は速度の点で非効率であると考えられていたが、[Mineshima et al.15] では機能語に対する 80 個の語彙項目、内容語に対する 57 個の語彙テンプレート、および (一般化量子や内包性を含む) 高階の公理群を用いて、Nutcracker の速度 11.23 秒/問に対して速度 3.72 秒/問を達成している。

さらに [Mineshima et al.16] では、Jigg [Noji&Miyao 16] に付属の日本語 CCG パーザに対しても同様の高階論理による意味合成・含意関係認識システムの構築を行い、JSeM テストセット [Kawazoe et al. 15] を用いて日本語含意関係認識の評価を行った。一般化量子など複雑な言語現象を伴う推論課題 523 問に対して、速度 3.58 秒/問で正解率 75% を達成した。このように ccg2lambda の性能は、英語用・日本語用ともに含意関係認識器の state-of-the-art に匹敵するものである。

さらに [Martínez-Gómez et al.17] では、ccg2lambda の推論において語彙的知識が必要になった際に、WordNet や word2vec を用いて、動的に公理を生成する技術を提案した。分散表現の合成的意味論の評価のために構築された SICK データセット [Marelli et al.14] を用いて含意関係認識タスクの評価実験を行った結果、従来の一階述語論理や自然論理に基づくシステム [Bjerva et al.14, Abzianidze 15] の性能を上回る正解率 (83%) を達成している。

これらの研究は、高階論理が自然言語の含意関係認識の計算において、記述面のみならず、速度面においてもむしろ有利となりうることを示しており、意味処理においてどのような表現形式が妥当であるか、という問題に対して一石を投じるものである。たとえば、高階論理による意味表示は、自然言語の意味のうち一階述語論理を越えた記述力を要求する (典型的には一般化量子やモダリティが関わる) 情報に対して、性質の良い「圧縮」を与えていることを示唆している。すなわち、これらの情報が頻繁に要求する証明過程に短い計算過程を割り当てることによって、一階述語論理によって書き下した意味表示が冗長な、そしてより強力な計算リソースを要求するのに比して、効率的な計算を可能とする、ということである。

謝辞 この研究は、JST CREST「ビッグデータ統合利活用のための次世代基盤技術の創出・体系化」領域「知識に基づく構造的言語処理の確立と知識インフラの構築」プロジェクトの支援を受けたものである。

参考文献

[Abzianidze 15] Abzianidze, L.: A Tableau Prover for Natural Logic and Language, in *EMNLP2015*, pp. 2492–2502 (2015)

*5 ccg2lambda は、github 上で公開されている。
<https://github.com/mynlp/ccg2lambda>

- [Ahn&Kolb 90] Ahn, R. and Kolb, H.-P.: Discourse Representation meets Constructive Mathematics, in Kalman, L. and Polos, L. eds., *Papers from the Second Symposium on Logic and Language*, Akademiai Kiado (1990)
- [Barwise&Cooper 81] Barwise, J. and Cooper, R.: Generalized Quantifiers and Natural Language, *Linguistics and Philosophy*, Vol. 4, pp. 159–219 (1981)
- [Bekki 14] Bekki, D.: Representing Anaphora with Dependent Types, in Asher, N. and Soloviev, S. V. eds., *LACL2014, Toulouse, France, June 2014 Proceedings*, *LNCS 8535*, pp. 14–29, Toulouse (2014)
- [Bekki&McCready 15a] Bekki, D. and McCready, E.: CI via DTS, in *New Frontiers in Artificial Intelligence*, Vol. LNAI 9067, Springer (2015)
- [Bekki&Sato 15b] Bekki, D. and Sato, M.: Calculating Projections via Type Checking, in *TYpe Theory and LEXical Semantics (TYTLES), ESSLLI2015 workshop*, Barcelona, Spain (2015)
- [Bekki&Mineshima 16] Bekki, D. and Mineshima, K.: An Introduction to Dependent Type Semantics. A course lecture at 28th European Summer School in Logic, Language and Information (ESSLLI2016) (2016)
- [Bekki&Mineshima 17] Bekki, D. and Mineshima, K.: Context-passing and Underspecification in Dependent Type Semantics, in Chatzikyriakidis, S. and Luo, Z. eds., *Modern Perspectives in Type Theoretical Semantics*, *Studies of Linguistics and Philosophy*, pp.11–41, Springer (2017)
- [Bjerva et al.14] Bjerva, J., Bos, J., Goot, van der R., and Nissim, M.: The Meaning Factory: Formal Semantics for Recognizing Textual Entailment and Determining Semantic Similarity, in *SemEval 2014*, pp. 642–646 (2014)
- [Clark&Curran 07] Clark, S. and Curran, J. R.: Widecoverage efficient statistical parsing with CCG and log-linear models, *Computational Linguistics*, Vol. 33, No. 4, pp. 493–552 (2007)
- [Cooper et al.96] Cooper, R., Crouch, R., Eijck, van J., Fox, C., Genabith, van J., Jasper, J., Kamp, H., Pinkal, M., Poesio, M., and Pulman, S.: FraCaS – a framework for computational semantics, Technical report (1996)
- [Cooper 05] Cooper, R.: Austinian truth, attitudes and type theory, *Research on Language and Computation*, Vol. 3, pp. 333–362 (2005)
- [Dávila-Pérez 95] Dávila-Pérez, R.: *Semantics and Parsing in Intuitionistic Categorical Grammar*, Ph.d. thesis, University of Essex (1995)
- [Dummett 75] Dummett, M.: What is a Theory of Meaning?, in Guttenplan, S. ed., *Mind and Language*, pp. 97–138, Oxford University Press, Oxford (1975)
- [Dummett 76] Dummett, M.: What is a Theory of Meaning? (II), in Evans, and McDowell, eds., *Truth and Meaning*, pp. 67–137, Oxford University Press, Oxford (1976)
- [Evans 80] Evans, G.: Pronouns, *Linguistic Inquiry*, Vol. 11, pp. 337–362 (1980)
- [Francez&Dyckhoff 10] Francez, N. and Dyckhoff, R.:

- Proof-theoretic semantics for a natural language fragment, *Linguistics and Philosophy*, Vol. 33, No. 6, pp. 447–477 (2010)
- [Francez 15] Francez, N.: *Proof-theoretic semantics*, Proof-theoretic semantics (2015)
- [Geach 62] Geach, P.: *Reference and Generality: An Examination of Some Medieval and Modern Theories*, Cornell University Press, Ithaca, New York (1962)
- [Gentzen 35] Gentzen, G.: Untersuchungen über das logische Schliessen I,II, *Mathematische Zeitschrift*, Vol. 39, pp. 176–210, 405–431 (1935), Translated as ‘Investigations into Logical Deduction’, and printed in M.E. Szabo, *The Collected Works of Gerhard Gentzen*, Amsterdam: North-Holland, 1969, pp. 68–131.
- [Groenendijk&Stofhof 91] Groenendijk, J. and Stokhof, M.: Dynamic Predicate Logic, *Linguistics and Philosophy*, Vol. 14, pp. 39–100 (1991)
- [Grudzinska&Zawadowski 14] Grudzinska, J. and Zawadowski, M.: System with Generalized Quantifiers on Dependent Types for Anaphora, in *TTNLS*, pp. 10–18, Gothenburg, Sweden (2014)
- [Heim 83a] Heim, I.: File Change Semantics and the Familiarity Theory of Definiteness, in Bauerle, R., Schwarze, C., and Stechow, von A. eds., *Meaning, Use and the Interpretation of Language*, pp. 164–190, Walter de Gruyter, Berlin, New York (1983)
- [Heim 83b] Heim, I.: On the Projection Problem for Presuppositions, in *the West Coast Conference of Formal Linguistics II*, pp. 114–126 (1983)
- [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*, Amsterdam (1981)
- [Kaneko&Bekki 14] Kaneko, K. and Bekki, D.: Toward a Discourse Theory for Annotating Causal Relations in Japanese, in *PACLIC28*, pp. 460–469, Thailand (2014)
- [Kaneko et al.16] Kaneko, K., Sugawara, S., Mineshima, K., and Bekki, D.: Annotation and Analysis of Discourse Relations, Temporal Relations and Multi-Layered Situational Relations in Japanese Texts, in *the 12th Workshop on Asian Language Resources (ALR12), Coling2016 Workshop*, pp. 10–19, Osaka, Japan (2016)
- [Kawazoe et al. 15] Kawazoe, A., Tanaka, R., Mineshima, K., and Bekki, D.: An Inference Problem Set for Evaluating Semantic Theories and Semantic Processing Systems for Japanese, in *LENLS12*, pp. 67–73, Tokyo-Yokohama, Japan (2015)
- [Kinoshita et al.16] Kinoshita, E., Mineshima, K., and Bekki, D.: An analysis of selectional restrictions with Dependent Type Semantics, in *LENLS13*, pp. 100–113 (2016)
- [Luo 10] Luo, Z.: Type-theoretical semantics with coercive subtyping, in *Semantics and Linguistic Theory 20 (SALT 20)*, Vancouver (2010)
- [Luo 12] Luo, Z.: Formal Semantics in Modern Type Theories with Coercive Subtyping, *Linguistics and Philosophy*, Vol. 35, No. 6 (2012)
- [Marelli et al.14] Marelli, M., Menini, S., Baroni, M., Benvivogli, L., Bernardi, R., and Zamparelli, R.: A SICK cure for the evaluation of compositional distributional semantic models, in *LREC2014*, pp. 216–223 (2014)
- [Martin-Löf 84] Martin-Löf, P.: *Intuitionistic Type Theory*, Vol. 17, Italy: Bibliopolis, Naples (1984), Sambin, Giovanni (ed.)
- [Martínez-Gómez et al.16] Martínez-Gómez, P., Mineshima, K., Miyao, Y., and Bekki, D.: ccg2lambda: A Computational Semantics System, in *ACL2016*, pp. 85–90, Berlin (2016)
- [Martinez-Gomez et al.17] Martinez-Gomez, P., Mineshima, K., Miyao, Y., and Bekki, D.: On-demand Injection of Lexical Knowledge for Recognising Textual Entailment, in *EACL2017*, Valencia, Spain (2017)
- [Mineshima et al.15] Mineshima, K., Martínez Gómez, P., Miyao, Y., and Bekki, D.: Higher-order logical inference with compositional semantics, in *EMNLP2015*, pp. 2055–2061, Lisboa, Portugal (2015)
- [Mineshima et al.16] Mineshima, K., Tanaka, R., Martinez-Gomez, P., Miyao, Y., and Bekki, D.: Building compositional semantics and higher-order inference system for a wide-coverage Japanese CCG parser, in *EMNLP2016*, pp. 2236–2242, United States (2016)
- [Montague 70] Montague, R.: Pragmatics and intensional logic, *Synthese*, Vol. 22, pp. 68–94 (1970)
- [Noji&Miyao 16] Noji, H. and Miyao, Y.: Jigg: A framework for an easy natural language processing pipeline, in *ACL2016*, pp. 103–108 (2016)
- [Potts 05] Potts, C.: *The Logic of Conventional Implications*, Oxford University Press (2005)
- [Prawitz 65] Prawitz, D.: *Natural Deduction: A Proof-Theoretic Study*, Dover Publications, Mineola, New York (1965)
- [Ranta 94] Ranta, A.: *Type-Theoretical Grammar*, Oxford University Press (1994)
- [van der Sandt 92] Sandt, van der R.: Presupposition projection as anaphora resolution, *Journal of Semantics*, Vol. 9, pp. 333–377 (1992)
- [Steedman 96] Steedman, M. J.: *Surface Structure and Interpretation*, The MIT Press, Cambridge (1996)
- [Sundholm 86] Sundholm, G.: Proof theory and meaning, in Gabbay, D. and Guenther, F. eds., *Handbook of Philosophical Logic*, Vol. III, pp. 471–506, Kluwer, Reidel (1986)
- [Sundholm 89] Sundholm, G.: Constructive Generalized Quantifiers, *Synthese*, Vol. 79, pp. 1–12 (1989)
- [Tanaka 14] Tanaka, R.: A Proof-Theoretic Approach to Generalized Quantifiers in Dependent Type Semantics, in Haan, de R. ed., *the ESSLLI 2014 Student Session*, pp. 140–151, Tübingen, Germany (2014)
- [Tanaka et al.15] Tanaka, R., Mineshima, K., and Bekki, D.: Factivity and Presupposition in Dependent Type Semantics, in *TYpe Theory and Lexical Semantics (TYTTLES), ESSLLI2015 workshop* (2015)
- [Tanaka et al.16] Tanaka, R., Mineshima, K., and Bekki, D.: On the interpretation of dependent plural anaphora in a dependently-typed setting, in *LENLS13*, pp. 86–99 (2016)