

令和 6 年 4 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K19868

研究課題名（和文）形式意味論と言語処理の融合による構成的言語モデルの開発

研究課題名（英文）Compositional Inference Systems based on Formal Semantics and Natural Language Processing

研究代表者

谷中 瞳 (Yanaka, Hitomi)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授

研究者番号：10854581

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：深層学習を用いた自然言語処理の研究が活発に進められている。しかし、深層学習のモデルは、文の構成的な意味の扱いが明らかでなく、未知のデータに対する頑健性が不透明である。そこで本研究では、形式意味論と自然言語処理の知見を融合して、深層学習のモデルの文の意味の扱いを明らかにし、文の構成的な意味を考慮した言語処理技術の開発に取り組んだ。具体的には、英語と日本語の推論ベンチマークを構築し、現在のモデルの汎化性能の課題を特定した。さらに、文の意味を構成的に解析し文間の推論を行う推論システムの開発を進めた。得られた成果の一部は自然言語処理のトップ国際会議ACL、トップジャーナル誌TAACLに採択された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の中で特定された深層学習のモデルの文の意味における汎化性能の課題は、大規模言語モデルの信頼性に関わり、社会的影響が大きいものである。また、既存の自然言語推論ベンチマークの多くは英語であり、日本語の自然言語推論ベンチマークの枯渇は日本語の言語処理技術の発展に向けて深刻な問題である。本研究の一部である日本語の自然言語推論ベンチマークは、いずれも研究利用可能な形で公開しており、大規模言語モデルの基礎解析や日本語の言語処理技術の評価に貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：Deep learning models have been well studied in natural language processing. However, the extent to which models capture the compositional meaning of sentences is not clear, and their robustness to unseen data is uncertain. In this study, we investigate the extent to which models capture the compositional meaning of sentences, and develop inference systems that consider the compositional meaning of sentences. Specifically, we constructed English and Japanese benchmarks to analyze whether models capture the compositional meaning of sentences based on the systematicity of inference, and identified the generalization capacity of current deep learning models. Furthermore, we developed inference systems that map sentences into their semantic representations based on compositional semantics and perform inference. Some of the results were accepted by top international conferences and journals, such as ACL and TAACL. Our benchmarks and inference systems have been made available for research use.

研究分野：自然言語処理

キーワード：自然言語推論 体系性 構成性 深層学習 自然言語処理 形式意味論 意味解析

## 1. 研究開始当初の背景

一方の文が他方の文の意味を含むか否かを自動判定する含意関係認識(自然言語推論)の実現は、計算機が自然言語の意味を真に理解するために解決すべき最重要課題の一つである。文間の含意関係を正しく判定するためには、まず文の意味を計算処理可能な形式で表す必要がある。たとえば、There is a soccer game with multiple males playing という文は Some men are playing a sport という文の意味を含意するが、この含意関係を示すためには、sport が soccer game の上位概念であるといった、語そのものの意味から定まる語彙的な意味と、任意の語 X において some X は with multiple X を含意するといった、文の構造から定まる構造的な意味の双方を捉える必要がある。この2種類の自然言語の意味を構成的に計算し、含意関係を判定する手法は未だ発展途上である。近年、自然言語処理においては、深層学習の手法が活発に研究されている。深層学習の手法では、文字や単語を単位としたベクトルを入力として、ニューラルモデル上で文の意味ベクトルを合成し、高精度で含意関係を予測する。一方で、形式意味論の研究では、文の意味を論理式で表し、論理的に妥当な推論が行われるかによって文の意味を分析する手法が成熟しつつあり、自然言語処理への応用が期待されている。

## 2. 研究の目的

本研究では、形式意味論と自然言語処理の知見を融合して、深層学習に基づくモデルの文の構成的な意味における表現力の可能性と課題を明らかにする。さらに、現在のモデルの文の構成的な意味の扱いにおける課題を解決できるような言語処理技術の実現を目指す。

## 3. 研究の方法

これまでの深層学習のモデルの評価では、評価対象を定めてクラウドソーシングや専門家がデータセットを構築し、データセットを学習データと評価データに分割して評価する手法が標準的である。しかし、これまでの学習データと評価データの分布を合わせる評価の枠組みでは、あるデータセット上でモデルが高精度を達成したとしても、モデルがデータセットにオーバーフィットしている可能性がある。そこで、深層学習のモデルの文の構成的な意味の扱いを評価するためには、形式意味論の理論に基づいて、文を構成する語彙と統語構造を学習データと評価データでコントロールして評価する手法を検討する必要がある。さらに、語彙と統語構造のコントロールの仕方は、扱う意味理解のタスク、対象言語、言語現象、推論現象によって当然異なり、ここでも形式意味論の知見の活用が必要となる。

文の構成的な意味の扱いにおける課題を解決できる言語処理技術の実現に向けては、形式意味論で検討されてきた構成的意味論の理論に基づき、文の語彙と統語構造に基づいて文の意味を論理式に翻訳し、論理式間の推論を実現するアプローチを採用する。このアプローチは計算機上での頑健な解析に課題があるが、深層学習のアプローチを組み合わせることで解析の頑健性の担保を試みる。

## 4. 研究成果

以下に、代表的な研究成果について紹介する。

### 研究成果 1. monotonicity (単調性) の推論に基づく深層学習のモデルの汎化性能の分析

現行の深層学習のモデルが学習データからどの程度言語の性質を汎化して学習しているかについて、形式意味論において重要な言語現象の一つである monotonicity (単調性) の推論を用いて分析する手法を開発した。開発した手法で現行の深層学習のモデルを評価した結果、一部のモデルでは様々なパターンから構成される文の意味を暗記できる可能性は残されているものの、現行のモデルは学習データから否定や量化などの言語現象の組み合わせや、関係節のような再帰的な構文構造を伴う文の意味を体系的に学習することに課題があることを明らかにした。本研究成果は自然言語処理のトップ国際会議 ACL2020 に採択された。

### 研究成果 2. 推移性に基づく深層学習のモデルの推論の体系性の分析

研究成果 1. を踏まえて、現行の深層学習のモデルが学習データから自然言語の推論を体系的に学習できているか分析するため、推移性 ( $A \rightarrow B$ ,  $B \rightarrow C$  から  $A \rightarrow C$  を導く推論) を捉えているかに着目してモデルを分析する手法を開発した。開発した手法を用いて現行の深層学習の基本的なモデルを評価した結果、研究成果 1 の結果と整合性のある結果が得られ、現行のモデルは体系的に推移性を学習できていない傾向が示唆された。本研究成果は自然言語処理のトップ国際会議 EACL2021 に採択された。

### 研究成果 3. 意味解析タスクに基づく深層学習のモデルの汎化性能の分析

研究成果 1、研究成果 2 では自然言語推論のタスクを用いて現在の深層学習モデルの汎化性能を分析する手法を開発したが、深層学習モデルが文の意味を体系的に学習できていないのか、文間の推論に必要な推論規則を学習できていないのかを切り分けて分析することが課題として残

されていた。そこで、文に対して一階述語論理式、変数を除去した論理式、談話表示構造、といった様々な形式の意味表示に変換する意味解析のタスクを用いて、深層学習のモデルの汎化性能を分析する手法を開発した。開発した手法を用いて現行の深層学習の基本的なモデルを評価した結果、現行のモデルは意味解析のタスクにおいても否定や量化などの言語現象の未知の組み合わせや、関係節のような再帰的な構文構造を伴う文に対しては性能が低下する傾向がみられ、深層学習のモデルは文の意味の体系的な学習に課題があることを明らかにした。本研究成果は自然言語処理のトップ国際会議 ACL2021 に採択された。

#### 研究成果 4. 深層学習のモデルの構成的な意味理解能力を評価する日本語ベンチマークの開発

研究成果 1、研究成果 2、研究成果 3 では英語を中心に深層学習のモデルの推論の体系性を分析する手法を開発してきたが、英語以外の言語を含めて深層学習のモデルの言語理解能力を分析する手法が求められている。そこで、英語の語彙的、統語的、意味的な言語現象の構成的な組み合わせの理解を必要とする含意関係・類似度ベンチマーク SICK を人手で日本語に翻訳し、さらに日本語の特性を考慮して語順や助詞を入れ替えた問題を追加した日本語の含意関係・類似度ベンチマーク JSICK を構築し、一般公開した。JSICK を用いた分析によって、現在の深層学習に基づく言語モデルは日本語の助詞の扱いに課題があるが、データ拡張によって改善する可能性が示唆された。本研究成果は自然言語処理のトップジャーナル論文誌である Transactions of the Association for Computational Linguistics (ACL) に採択された。

さらに、JSICK の構築手法を様々なタスクや言語現象に応用して、日本語の敵対的推論ベンチマーク、日本語時間推論のベンチマーク、日本語敬語理解のベンチマークを構築した。いずれの研究成果も自然言語処理の国際会議・国際ワークショップに採択された。

#### 研究成果 5. 言語学的に妥当な日本語組合せ範疇文法ツリーバンクの構築

形式意味論の構成的意味論の理論にしたがって、日本語の文の意味をその構成要素と構造に基づいて頑健に解析するためには、理論的に妥当な組合せ範疇文法のツリーバンクを用いて文の構文解析を行う必要がある。しかし、既存の日本語組合せ範疇文法ツリーバンクには、理論的な課題が残されていた。そこで本研究では、日本語の組合せ範疇文法の理論に基づく構文解析器と既存の日本語の範疇文法ツリーバンクを組み合わせることで、言語学的に妥当な日本語組合せ範疇文法ツリーバンクを生成する手法を開発した。本研究成果は自然言語処理のトップ国際会議 EACL2023 Student Session に採択された。

#### 研究成果 6. 日本語の時間的順序を考慮した構成的推論システムの構築

形式意味論の構成的意味論の理論に基づいて日本語の文の意味を自動で解析し、時間的順序に特化した推論システムを構築した。構築したシステムは現在の深層学習のモデルを用いた推論システムよりも高い精度で時間的順序に関する含意関係認識が行うことができることを示した。本研究成果は自然言語処理のトップ国際会議 ACL2022 Student Session に採択された。

#### 研究成果 7. 日本語症例テキストの複合語を対象とした構成的推論システムの構築

日本語の症例テキストでは一般的なテキストと比較して病名や治療方法などの複合語が多く含まれており、複合語内の意味関係を構成的意味論に基づいてどのように扱うかが課題であった。そこで本研究では症例テキストの複合語の意味を組合せ範疇文法と構成的意味論に基づいて解析し、テキスト間の推論を行うシステム MedC21 を開発した。本研究成果は自然言語処理論文誌に採択された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Ishida Mana, Yanaka Hitomi, Bekki Daisuke	4. 巻 30
2. 論文標題 Medc21: Compound-Word Analysis and Inference System for Japanese Clinical Texts	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Natural Language Processing	6. 最初と最後の頁 935 ~ 958
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5715/jnlp.30.935	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 谷中 瞳、峯島 宏次	4. 巻 31
2. 論文標題 AIは言語の基盤を獲得するか：推論の体系性の観点から	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 認知科学	6. 最初と最後の頁 27 ~ 45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11225/cs.2023.078	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yanaka Hitomi, Mineshima Koji	4. 巻 10
2. 論文標題 Compositional Evaluation on Japanese Textual Entailment and Similarity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Transactions of the Association for Computational Linguistics	6. 最初と最後の頁 1266 ~ 1284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1162/tacl_a_00518	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Sugimoto Tomoki, Yanaka Hitomi	4. 巻 -
2. 論文標題 Compositional Semantics and Inference System for Temporal Order based on Japanese CCG	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 60th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics: Student Research Workshop	6. 最初と最後の頁 104-114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18653/v1/2022.acl-srw.10	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hitomi Yanaka, Koji Mineshima, Kentaro Inui	4. 巻 -
2. 論文標題 SyGNS: A Systematic Generalization Testbed Based on Natural Language Semantics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Findings of the Joint Conference of the 59th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 11th International Joint Conference on Natural Language Processing (ACL-IJCNLP2021)	6. 最初と最後の頁 103,119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18653/v1/2021.findings-acl.10	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Mita Masato, Yanaka Hitomi	4. 巻 -
2. 論文標題 Do Grammatical Error Correction Models Realize Grammatical Generalization?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Findings of the Joint Conference of the 59th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 11th International Joint Conference on Natural Language Processing (ACL-IJCNLP2021)	6. 最初と最後の頁 4554, 4561
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18653/v1/2021.findings-acl.399	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yanaka Hitomi, Mineshima Koji, Bekki Daisuke, Inui Kentaro	4. 巻 1
2. 論文標題 Do Neural Models Learn Systematicity of Monotonicity Inference in Natural Language?	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL2020)	6. 最初と最後の頁 6105,6117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18653/v1/2020.acl-main.543	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yanaka Hitomi, Mineshima Koji, Inui Kentaro	4. 巻 1
2. 論文標題 Exploring Transitivity in Neural NLI Models through Veridicality	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 16th conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics (EACL2021)	6. 最初と最後の頁 920,934
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計30件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Asa Tomita, Hitomi Yanaka, Daisuke Bekki
2. 発表標題 Reforging: A Method for Constructing a Linguistically Valid Japanese CCG Treebank
3. 学会等名 Proceedings of the EACL2024 Student Research Workshop (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 黒澤友哉, 谷中瞳
2. 発表標題 文字系列情報による性能への影響からニューラルモデルが有する言語的な傾向を見出せるか
3. 学会等名 言語処理学会第30回年次大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 富田朝, 谷中瞳, 戸次大介
2. 発表標題 言語学的に妥当な日本語CCGツリーバンクの構築と評価
3. 学会等名 言語処理学会第30回年次大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Tomoki Sugimoto, Yasumasa Onoe, Hitomi Yanaka
2. 発表標題 Jamp: Controlled Japanese Temporal Inference Dataset for Evaluating Generalization Capacity of Language Models
3. 学会等名 Proceedings of the ACL2023 Student Research Workshop (SRW) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 黒澤友哉, 谷中瞳
2. 発表標題 多言語DRS意味解析における文字系列情報の性能分析
3. 学会等名 人工知能学会第37回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 富田朝, 谷中瞳, 戸次大介
2. 発表標題 言語学的に妥当なCCGツリーバンク構築の試み
3. 学会等名 人工知能学会第37回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Daisuke Bekki, Hitomi Yanaka
2. 発表標題 Is Japanese CCGBank empirically correct? A case study of passive and causative constructions
3. 学会等名 Proceedings of the 21st International Workshop on Treebanks and Linguistic Theories (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 戸次大介, 谷中瞳
2. 発表標題 日本語CCGBankは言語学的に妥当か
3. 学会等名 言語処理学会第29回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 杉本智紀, 谷中瞳
2. 発表標題 時間的順序を考慮した日本語論理推論システムの構築
3. 学会等名 人工知能学会第36回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上裕太, 谷中瞳
2. 発表標題 共起確率を用いた構文木の自動選択による推論システムの改善
3. 学会等名 NLP若手の会第17回シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田村鴻希, 土井惟成, 西田直人, Junjie Chen, 谷中瞳
2. 発表標題 サブライザルを利用した日本語の流暢性フィルタリングの試み
3. 学会等名 言語処理学会第29回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中井優, 中野雄介, 徳永優也, 上田亮, 谷中瞳
2. 発表標題 説明可能な検索ベースの文書分類手法の提案
3. 学会等名 言語処理学会第29回年次大会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 Hitomi Yanaka
2. 発表標題 Revisiting the Systematicity Argument through Analyzing Deep Neural Networks
3. 学会等名 Aspects of Logic Study, celebrating World Logic Day (WLD2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hitomi Yanaka
2. 発表標題 Exploring the Generalization Ability of Neural Models through Natural Language Inference
3. 学会等名 the 6th International Workshop on Symbolic-Neural Learning (SNL2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷中 瞳
2. 発表標題 論理に基づく推論システムの再訪
3. 学会等名 情報処理学会第253回自然言語処理研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷中 瞳
2. 発表標題 JSICK: 構成的推論・類似度データセットSICK日本語版の紹介
3. 学会等名 NLPコロキウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷中瞳
2. 発表標題 形式言語学の知見を活用した自然言語推論
3. 学会等名 第31回ステアラボ人工知能セミナー（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoki Sugimoto, Hitomi Yanaka
2. 発表標題 Logical Inference System for Temporal Order based on Japanese CCG
3. 学会等名 the ESSLLI2022 Workshop Natural Logic Meets Machine Learning (NALOMA2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷中瞳, 峯島宏次
2. 発表標題 JSICK: 日本語構成的推論・類似度データセットの構築
3. 学会等名 人工知能学会第35回全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荒井ひろみ, 和泉悠, 朱喜哲, 辻大介, 仲宗根勝仁, 谷中瞳
2. 発表標題 ワークショップ: 哲学の応用と社会実装 ヘイトスピーチをめぐる 文理共創研究の可能性と課題
3. 学会等名 応用哲学会第十三回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yu Izumi, Hiromi Arai, Hitomi Yanaka, Katsuhito Nakasone, Heechul Ju
2. 発表標題 Abusive Tweets in Japanese during the COVID-19 pandemic
3. 学会等名 the 3rd International Workshop HATE SPEECH IN ASIA AND EUROPE Pandemic, Fear, and Hate (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitomi Yanaka, Koji Mineshima, Kentaro Inui
2. 発表標題 Do Neural Models Learn Transitivity of Veridical Inference?
3. 学会等名 the IWCS2021 Workshop Natural Logic Meets Machine Learning (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitomi Yanaka
2. 発表標題 Revisiting the Systematicity Argument through Analyzing Deep Neural Networks
3. 学会等名 Aspects of Logic Study, celebrating World Logic Day (WLD2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷中 瞳, 峯島 宏次, 乾 健太郎
2. 発表標題 ニューラルネットが学習する意味表現は体系性を持つか
3. 学会等名 言語処理学会第27回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三田雅人, 谷中瞳
2. 発表標題 文法誤り訂正モデルは訂正に必要な文法を学習しているか
3. 学会等名 言語処理学会第27回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷中瞳, 峯島宏次, 戸次大介, 乾 健太郎
2. 発表標題 ニューラルネットワークによる自然言語推論の可能性
3. 学会等名 人工知能学会第34回全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷中瞳, 峯島宏次, 戸次大介, 乾 健太郎
2. 発表標題 ニューラルネットは自然言語推論の体系性を学習するか
3. 学会等名 言語処理学会第26回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三田雅人, 谷中瞳
2. 発表標題 文法誤り訂正モデルは文法知識を汎化しているか
3. 学会等名 NLP若手の会第15回シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 関澤瞭, 谷中瞳
2. 発表標題 日本語敬語理解タスクにおけるChain-of-Thoughtプロンプティングの有用性の検証
3. 学会等名 NLP若手の会第15回シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryo Sekizawa, Hitomi Yanaka
2. 発表標題 Analyzing Syntactic Generalization Capacity of Pre-trained Language Models on Japanese Honorific Conversion
3. 学会等名 Proceedings of the 12th Joint Conference on Lexical and Computational Semantics (*SEM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 和泉 悠, 仲宗根勝仁, 朱喜哲, 谷中 瞳, 荒井ひろみ	4. 発行年 2021年
2. 出版社 岩波書店	5. 総ページ数 17
3. 書名 AIはレイシズムと戦えるのか 自然言語処理分野におけるヘイトスピーチ自動検出研究の現状と課題	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>JSICK  <a href="https://github.com/verypluming/JSICK">https://github.com/verypluming/JSICK</a>  ccgtemp  <a href="https://github.com/ynklab/ccgtemp">https://github.com/ynklab/ccgtemp</a>  JaNLI  <a href="https://github.com/verypluming/JaNLI">https://github.com/verypluming/JaNLI</a>  Japanese honorifics  <a href="https://github.com/ynklab/japanese_honorifics">https://github.com/ynklab/japanese_honorifics</a>  JAMP  <a href="https://github.com/ynklab/jamp">https://github.com/ynklab/jamp</a></p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------