

## 比較表現の意味解析と含意関係認識

春田 和泉<sup>†</sup> 峯島 宏次<sup>‡</sup> 戸次 大介<sup>\*</sup>

お茶の水女子大学

{g1520535<sup>†</sup>,bekki<sup>\*</sup>}@is.ocha.ac.jp mineshima.koji@ocha.ac.jp<sup>‡</sup>

## 1 はじめに

段階性 (gradability) をもつ形容詞や動詞, モーダル表現に関連する程度 (degree) という概念は, 自然言語理解において重要な役割を果たす. 例えば, (1) は段階的な形容詞 *expensive* の比較級を含む文であり, 二台の車の価格について, どちらの方が高価か, つまり高い程度をもつか, という比較をしている.

(1) My car is more expensive than your car.

(2) は形容詞の原級を用いた文であり, 車の値段を何らかの明示されていない基準と比較する文とみなせる.

(2) My car is expensive.

このように, 程度を表す表現は常に何かとの比較を伴うため, 程度を形式的に表現することによって, 比較表現の分析が可能となると考えられる. しかし, 比較表現には二つの複雑さがある.

第一に, 比較構文には多様性があり, (3) に示す様々な構文が存在する.

- (3) a. Mary is **tall**. (原級)  
 b. Mary is **taller** than Harry is. (節の比較)  
 c. Mary is **as tall** as Harry. (等価)  
 d. Mary is **2'' taller** than Harry. (差異比較)

(3b) の *than* 節は形容詞 *tall* の省略を含み, (3d) のように数量詞 *2''* を含む場合もある. 構成的な分析をするためには, 原級と比較級を整合的に扱う必要がある.

第二に, 推論の問題がある. 比較表現の推論は (4) の例が示すように, 数値や *tall/short* のような反意語を含むものがあり, 論理的には複雑なステップを伴う.

 $P_1$ : Mary is taller than 4 feet.(4)  $P_2$ : Harry is shorter than 4 feet. $H$ : Mary is taller than Harry.

この複雑さによって, 言語学における比較表現の研究の蓄積にもかかわらず, 計算的な観点から比較表現を伴う推論を扱う試みは十分に発展していない [1].

本研究では, 言語学と言語処理を接合する一つの試みとして, 比較表現の形式意味論的分析に基づいて, 文から適切な意味表示への構成的マッピングを与え, 比較表現の推論を計算的に扱う枠組みを提案する.

統語論の枠組みとしては組合せ範疇文法 (CCG) [2] を, 比較表現の意味表示として A-not-A 分析 [3, 4] に基づくものを用いる. CCG の導出木から意味表示への構

造的なマッピングを行う意味解析器を *ccg2lambda* [5] を用いて実装する (図 1a,b). CCG による比較表現の分析と A-not-A 分析については §3 で説明する. 次に, 1 階述語論理 (FOL) に比較表現の推論のために必要な公理を加えた公理系 COMP を提示する. FOL の定理証明器 Prover9 とモデル構築器 Mace4 を用いて推論システムを実装し (図 1c), 含意関係テストセット FraCaS [6] の比較表現のセクションを用いて, システムの評価を行った. このシステムは, 従来のシステムを上回る精度を達成した. COMP の公理と推論システムの詳細についてはそれぞれ §4 と §5 で述べる.

## 2 形式意味論における比較表現の扱い

形式意味論の先行研究で扱われる基本概念についてまとめる. 段階的な形容詞は, エンティティと程度の二項述語として分析する [7]. 例えば, *tall* は  $\mathbf{tall}(x, \delta)$  と分析され, これは「 $x$  の背の高さが少なくとも  $\delta$  である」を意味する. これにより, *Ann is 6 feet tall*. という文は,  $\mathbf{tall}(\mathit{Ann}, 6\mathit{feet})$  という意味表示をもつ.  $\mathbf{tall}(x, \delta)$  の解釈を「ちょうど程度  $\delta$ 」ではなく, 「程度  $\delta$  以上」とすることによって, エンティティの集合を  $\delta$  を境界とした, 2 つの領域に分割することができる.

(5) のような比較表現には大きく分けて 2 つの分析方法がある.

(5)  $A$  is taller than  $B$  is.

一つは, Maximality 演算子を用いた分析である [8, 9]. (5) は, (6) のように  $\max$  演算子を利用し,  $A$  が満たす程度の最大値と  $B$  が満たす程度の最大値の大小比較を行う文として分析される.

(6)  $\max\{\lambda\delta.\mathbf{tall}(A, \delta)\} > \max\{\lambda\delta.\mathbf{tall}(B, \delta)\}$ 

もう一つは, いわゆる A-not-A 分析である [3, 4, 10]. この分析では, (5) は (7) のように,  $A$  は満たすが  $B$  は満たさない程度の有無を表す文として扱われる.

(7)  $\exists\delta(\mathbf{tall}(A, \delta) \wedge \neg\mathbf{tall}(B, \delta))$ 

今回は, 論理式として扱いやすい A-not-A 分析を採用し, 様々な比較表現文に意味表示の割り当てを試み, 省略・数形容詞・反意語などに分析を拡張する.

## 3 比較構文分析の拡張

## 3.1 A-not-A 分析の意味表示

段階的な形容詞を含む様々な比較構文から意味表示 (論理式) へマッピングを行う. まず, A-not-A 分析の下での基本的な構文に対する意味表示を表 2 に示す.



表 4: CCG による語彙項目

| PF                | 統語範疇  | 意味表示   |
|-------------------|---|--|
| tall              | $AP = S \setminus NP \setminus D$                             | $\lambda\delta.\lambda x.\mathbf{tall}(x, \delta)$   |
| Mary              | $NP^\dagger = S / (S \setminus NP)$                           | $\lambda p.p(m)$   |
| is                | $S \setminus NP / (S \setminus NP)$                           | $id$   |
| 4'                | $D$   | $4'$   |
| than <sub>1</sub> | $S / S$   | $id$   |
| than <sub>2</sub> | $D / D$   | $id$   |
| than <sub>3</sub> | $S \setminus NP / (S \setminus NP / NP^\dagger) / NP^\dagger$ | $\lambda Q.\lambda K.\lambda x.Q(\lambda y.K(\lambda P.P(y)))(x)$  |
| pos               | $S \setminus NP / AP$   | $\lambda A.A(\theta_A)$  |
| er <sub>1</sub>   | $S \setminus NP / NP^\dagger \setminus D \setminus AP$        | $\lambda K.\lambda A.\lambda x.\exists\delta.(K(\delta)(x) \wedge \neg A(K(\delta)))$                          |
| er <sub>2</sub>   | $S \setminus NP / (S \setminus D) \setminus AP$               | $\lambda K.\lambda A.\lambda x.\exists\delta.(K(\delta)(x) \wedge \neg A(\delta))$                             |
| er <sub>3</sub>   | $S \setminus NP / D \setminus AP$                             | $\lambda\delta'.\lambda A.\lambda x.\exists\delta(A(\delta)(x) \wedge (\delta > \delta'))$                     |
| er <sub>4</sub>   | $S \setminus NP / NP^\dagger \setminus D \setminus AP$        | $\lambda K.\lambda\delta'.\lambda A.\lambda x.\forall\delta.(A(K(\delta - \delta')) \rightarrow K(\delta)(x))$ |
| as <sub>1</sub>   | $S \setminus NP / NP^\dagger \setminus D \setminus AP$        | $\lambda K.\lambda A.\lambda x.\forall\delta.(A(K(\delta)) \rightarrow K(\delta)(x))$                          |
| as <sub>2</sub>   | $S / S$   | $id$   |
| more <sub>1</sub> | $S \setminus NP / NP^\dagger / AP$                            | $\lambda K.\lambda A.\lambda x.\exists\delta.(K(\delta)(x) \wedge \neg A(K(\delta)))$                          |
| more <sub>2</sub> | $S \setminus NP / D / AP$                                     | $\lambda\delta'.\lambda A.\lambda x.\exists\delta(A(\delta)(x) \wedge (\delta > \delta'))$                     |

で、うまくスコープの違いに対応している。よって、(14a) から *Mary is taller than Harry.* を推論できる。

- (13) a. Mary is taller than Harry and Bob.  
 b.  $\exists\delta(\mathbf{tall}(m, \delta) \wedge \neg\mathbf{tall}(h, \delta))$   
 $\wedge \exists\delta(\mathbf{tall}(m, \delta) \wedge \neg\mathbf{tall}(b, \delta))$
- (14) a. Mary is taller than Harry or Bob.  
 b.  $\exists\delta(\mathbf{tall}(m, \delta) \wedge \neg(\mathbf{tall}(h, \delta) \vee \mathbf{tall}(b, \delta)))$

#### 4 比較構文の推論

§3.1 で各文に与えた意味表示を用いて推論の成立を判定する含意関係認識システムを構築するため、新たな公理系 COMP を導入する。公理を表 5 に示す。ここで、 $\mathbf{F}$  は任意の段階的な述語とし、*tall* などの正の述語を  $\mathbf{F}^+$ 、*short* などの負の述語を  $\mathbf{F}^-$  で表す。

表 5: COMP の公理

|       |  |
|-------|--|
| (TH)  | $\theta_{F^+} > \theta_{F^-}$  |
| (CP)  | $\forall x\forall y(\exists\delta(\mathbf{F}(x, \delta) \wedge \neg\mathbf{F}(y, \delta)) \rightarrow (\forall e(\mathbf{F}(y, e) \rightarrow \mathbf{F}(x, e))))$ |
| (LP)  | $\forall e\forall x(\mathbf{F}^-(x, e) \leftrightarrow \forall\delta((\delta \geq e) \rightarrow \mathbf{F}^-(x, \delta)))$  |
| (GP)  | $\forall e\forall x(\mathbf{F}^+(x, e) \leftrightarrow \forall\delta((\delta \leq e) \rightarrow \mathbf{F}^+(x, \delta)))$  |
| (INN) | $\forall e\forall x(\mathbf{F}^-(x, e) \leftrightarrow \forall\delta((\delta > e) \rightarrow \neg\mathbf{F}^+(x, \delta)))$                                       |
| (INP) | $\forall e\forall x(\mathbf{F}^+(x, e) \leftrightarrow \forall\delta((\delta < e) \rightarrow \neg\mathbf{F}^-(x, \delta)))$                                       |
| (IN)  | $\forall e\forall x(\neg\mathbf{F}^-(x, e) \leftrightarrow \forall\delta((\delta \leq e) \rightarrow \mathbf{F}^+(x, \delta)))$                                    |
| (IP)  | $\forall e\forall x(\neg\mathbf{F}^+(x, e) \leftrightarrow \forall\delta((\delta \geq e) \rightarrow \mathbf{F}^-(x, \delta)))$                                    |

(CP) は一貫性の公理 (Consistency Postulate) として Klein によって導入された公理である。これは、 $x$  が  $y$  よりも大きい程度ならば、 $y$  が満たす程度は  $x$  も満たすということを表している。また、(INN)(INP)(IN)(IP) の 4 つの公理は、反意語間の述語関係を形式化したものである。これによって、反意語の変換が可能になり、§1 で紹介した (4) のような複雑な推論の成立も証明することができる。

COMP で表 6 の意味表示から推論が証明される過程を図 5 に示す。ここでは、図 4 で提示した、(CP) から導出された派生規則 (CP\*) を用いた。

$$(CP^*) \frac{\exists\delta(\mathbf{F}(x, \delta) \wedge \neg\mathbf{F}(y, \delta))}{\forall e(\mathbf{F}(y, e) \rightarrow \mathbf{F}(x, e))}$$

図 4: COMP の派生規則

表 6: 文から意味表示へのマッピング

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| $P_1$ : Mary is taller than Harry. | $\Rightarrow \exists\delta(\mathbf{tall}(m, \delta) \wedge \neg\mathbf{tall}(h, \delta))$ |
| $P_2$ : Harry is tall.             | $\Rightarrow \mathbf{tall}(h, \theta_{tall})$   |
| $H$ : Mary is tall.                | $\Rightarrow \mathbf{tall}(m, \theta_{tall})$   |

$$\begin{aligned} (CP^*) & \frac{\exists\delta(\mathbf{tall}(m, \delta) \wedge \neg\mathbf{tall}(h, \delta))}{\forall e(\mathbf{tall}(h, e) \rightarrow \mathbf{tall}(m, e))} \\ (\forall E) & \frac{\forall e(\mathbf{tall}(h, e) \rightarrow \mathbf{tall}(m, e))}{\mathbf{tall}(h, \theta_{tall}) \rightarrow \mathbf{tall}(m, \theta_{tall})} \\ (\rightarrow E) & \frac{\mathbf{tall}(h, \theta_{tall}) \rightarrow \mathbf{tall}(m, \theta_{tall}) \quad \mathbf{tall}(h, \theta_{tall})}{\mathbf{tall}(m, \theta_{tall})} \end{aligned}$$

図 5: 表 6 の推論の証明

#### 5 実装と検証

これまでに説明した比較表現の分析のうち、CCG の導出木から意味表示へのマッピング、及び、定理証明による推論 (含意関係認識) の部分について実装し、検証を行った。まず、cgc2lambda の意味解析部を用いて表 4 の語彙項目に対応するテンプレートを作成し、CCG の導出木を入力として意味表示を出力するプログラムを作成した。テストに対応する正解の CCG の導出木は人手で作成した。<sup>2</sup>

出力された意味表示 (論理式) に基づいて、FOL の定理証明器 Prover9 とモデル構築器 Mace4 を用いて公理系 COMP のもとでの含意関係の成立を判定する。前提文の論理式を  $P_1, \dots, P_n$ 、仮説 (結論) の論理式を  $H$  とすると、システムは定理証明器によって  $P_1, \dots, P_n \vdash H$  が証明可能なら Yes を、 $P_1, \dots, P_n \vdash \neg H$  が証明可能なら No を出力する。どちらも証明可能でないとき、モデル構築器を用いて、 $P_1, \dots, P_n \vdash H$  に対する反例モデルの構築を試み、それに成功した場合、出力は Unknown とする。<sup>3</sup>

含意関係認識のデータセット FraCaS を使用して検証を行った。FraCaS は、形式意味論の知見をもとに言語現象ごとに意味論的に複雑な推論を集めたデータセットで、9 つのセクションに分かれている。今回

<sup>2</sup>英語の CCG パーザとしては、CCGBank[13] に基づく C&C パーザ [14] などが広く使われているが、比較表現の統語構造については十分な扱いがなされていないため、既存パーザの出力と 3 節で述べた比較表現の解析に必要な統語構造との間には大きなギャップがある。パーザとの接合は今後の課題として残されている。

<sup>3</sup>意味表示と公理系の正確さを検証することが目的のため、モデルサイズの制限のもと、反例モデルの構築に失敗した場合、エラーとした。

は Comparatives のセクション 31 問を使用した。そのうち、正解ラベルの分布は Yes が 19 問, No が 9 問, Unknown が 3 問であった。表 7 に問題例を示す。

表 7: FraCaS テストセットの比較級の問題例

| fracas-220        |   |
|-------------------|---|
| <b>Premise 1</b>  | The PC-6082 is faster than the ITEL-XZ. |
| <b>Premise 2</b>  | The ITEL-XZ is fast.                    |
| <b>Hypothesis</b> | The PC-6082 is fast.                    |
| <b>Answer</b>     | Yes                                     |
| fracas-231        |   |
| <b>Premise 1</b>  | ITEL won more orders than APCOM did.    |
| <b>Hypothesis</b> | APCOM won some orders.                  |
| <b>Answer</b>     | Unknown                                 |

結果を表 8 に示す。定理証明に基づいて含意関係認識を行うシステムとの比較を行った。

表 8: FraCaS テストセットでの精度

| 問題数 | 本研究 | B&C | MINE | Nut |
|-----|-----|-----|------|-----|
| 31  | .71 | .56 | .48  | .45 |

B&C[15] は, Grammatical Framework [16] に基づくシステムで, 証明は証明支援器 (Coq) を用いて検証されているが, 自動化されていない。MINE[17] と Nut[18] は CCG パーザ [14] を使用し, それぞれ高階論理と FOL に基づいて定理自動証明によって含意関係認識の判定を行う。単純な比較は不可能であるが, 本研究のシステムは, 従来システムの正答率を上回ることができた。依然として解けなかった問題に, 前提文 “ITEL won more orders than APCOM did.” と “APCOM won ten orders.” から “ITEL won at least eleven orders.” を導く問題などがあり, 数表現の扱いが今度の課題の一つである。

## 6 おわりに

本研究では, A-not-A 分析を基に, 比較表現の構成的意味論を与えた。言語学と自然言語処理を接合する試みとして, CCG に基づいて適切な意味表示へとマッピングし, 定理証明によって含意関係認識を行う方法を提案した。FraCaS の比較に関するテストセットを用いた評価では, 従来システムと比較して本システムがより有効であることが示された。

今後は, CCG パーザとの接合, いわゆる形容詞の比較クラス (comparative class)[4] の扱い, 副詞や動詞などの他の程度表現の分析を含めて, 本システムのさらなる拡張を目指す。

## 謝辞

本研究の一部は, JSPS 科研費 JP18H03284 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] Stephen Pulman. Formal and computational semantics: a case study. In *Proceedings of the Seventh International Workshop on Computational Semantics (IWCS-7)*, pp. 181–196, 2007.
- [2] Mark J. Steedman. *The Syntactic Process*. The MIT Press, 2000.
- [3] Pieter AM Seuren. The comparative. In *Generative grammar in Europe*, pp. 528–564. Springer, 1973.
- [4] Ewan Klein. The interpretation of adjectival comparatives. *Journal of Linguistics*, Vol. 18, No. 1, pp. 113–136, 1982.
- [5] Pascual Martínez-Gómez, Koji Mineshima, Yusuke Miyao, and Daisuke Bekki. ccg2lambda: A Compositional Semantics System. In *Proceedings of ACL 2016 System Demonstrations*, pp. 85–90, 2016.
- [6] Robin Cooper, Richard Crouch, Jan van Eijck, Chris Fox, Josef van Genabith, Jan Jaspers, Hans Kamp, Manfred Pinkal, Massimo Poesio, Stephen Pulman, et al. FraCaS—a framework for computational semantics. *Deliverable*, Vol. D6, , 1994.
- [7] Max J Cresswell. The semantics of degree. In *Montague grammar*, pp. 261–292. Elsevier, 1976.
- [8] Irene Heim. Degree operators and scope. In *Semantics and Linguistic Theory*, Vol. 10, pp. 40–64, 2000.
- [9] Christopher Kennedy and Louise McNally. Scale structure, degree modification, and the semantics of gradable predicates. *Language*, pp. 345–381, 2005.
- [10] Roger Schwarzschild. The semantics of comparatives and other degree constructions. *Language and Linguistics Compass*, Vol. 2, No. 2, pp. 308–331, 2008.
- [11] Martin Hackl. *Comparative quantifiers*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [12] Richard K Larson. Scope and comparatives. *Linguistics and philosophy*, Vol. 11, No. 1, pp. 1–26, 1988.
- [13] Julia Hockenmaier and Mark Steedman. CCGbank: A corpus of CCG derivations and dependency structures extracted from the Penn Treebank. *Computational Linguistics*, Vol. 33, No. 3, pp. 355–396, 2007.
- [14] Stephen Clark and James R. Curran. Wide-coverage efficient statistical parsing with CCG and log-linear models. *Computational Linguistics*, Vol. 33, No. 4, pp. 493–552, 2007.
- [15] Jean-Philippe Bernardy and Stergios Chatzikyriakidis. A type-theoretical system for the FraCaS test suite: Grammatical Framework meets Coq. In *Proceedings of 12th International Conference on Computational Semantics (IWCS-2017)*, 2017.
- [16] Aarne Ranta. *Grammatical framework: Programming with multilingual grammars*. CSLI Publications, 2011.
- [17] Koji Mineshima, Pascual Martínez-Gómez, Yusuke Miyao, and Daisuke Bekki. Higher-order logical inference with compositional semantics. In *Proceedings of the 2015 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*, pp. 2055–2061, 2015.
- [18] Johan Bos. Wide-coverage semantic analysis with boxer. In *Proceedings of the 2008 Conference on Semantics in Text Processing*, pp. 277–286, 2008.