

比較表現の意味解析と含意関係認識

春田 和泉（指導教員：戸次 大介）

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* の比較級を含み，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 yours.

このように，程度を表す表現は比較と関連するため，程度の形式化は比較表現の分析へとつながると考えられる。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，(2) に示す様々な構文が存在する。

- (2) 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)

(2b) は *than* 節は形容詞 *tall* の省略，(2d) は数量詞 *2''* をそれぞれ含む場合である。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 (3) 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.

- (3) P_2 : Harry is shorter than 4 feet.

H : Mary is taller than Harry.

この複雑さから，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。

2 A-not-A 分析を用いた比較表現の扱い

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

(4) のような比較表現を分析する方法の一つとして A-not-A 分析とよばれる分析方法がある [3, 4, 5]。

- (4) A is taller than B is.

この分析では，(4) は (5) 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。

- (5) $\exists \delta (\text{tall}(A, \delta) \wedge \neg \text{tall}(B, \delta))$

今回，論理式として扱いやすい A-not-A 分析を用いて，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 1 に示す。これを基に，反意語，数形容詞，量化などのより複雑な文にも，表 2 のように意味表示を割り当てた。

表 1: 基本的な比較構文の意味表示

比較構文	意味表示
Mary is tall.	$\text{tall}(m, \theta_{\text{tall}})$
Mary is taller than Harry.	$\exists \delta (\text{tall}(m, \delta) \wedge \neg \text{tall}(h, \delta))$
Mary is less tall than Harry.	$\exists \delta (\neg \text{tall}(m, \delta) \wedge \text{tall}(h, \delta))$
Mary is as tall as Harry.	$\forall \delta (\text{tall}(h, \delta) \rightarrow \text{tall}(m, \delta))$

表 2: 省略・数形容詞・反意語を含む比較構文の意味表示

比較構文	意味表示
Mary is taller than the bed is long.	$\exists \delta (\text{tall}(m, \delta) \wedge \neg \text{long}(\text{the bed}, \delta))$
Mary is taller than 4 feet.	$\exists \delta (\text{tall}(m, \delta) \wedge (\delta > 4'))$
Mary is 2 inches taller than Harry.	$\forall \delta (\text{tall}(h, \delta) \rightarrow \text{tall}(m, \delta + 2''))$
Mary is shorter than Harry.	$\exists \delta (\text{short}(m, \delta) \wedge \neg \text{short}(h, \delta))$

反意語 *tall* の反意語 *short* は， $\text{short}(x, \delta)$ と表し，「 x が程度 δ 以下の高さである」を意味するものとする。

数形容詞 *ten orders* の *ten* のような数形容詞は，述語 $\text{many}(x, n)$ を使って $\text{many}(x, \text{ten})$ と表現できる [6]。

- (6) a. Mary won ten orders.
 b. $\exists x (\text{orders}(x) \wedge \text{won}(m, x) \wedge \text{many}(x, \text{ten}))$
- (7) a. Mary won many orders.
 b. $\exists \delta (\exists x (\text{orders}(x) \wedge \text{won}(m, x) \wedge \text{many}(x, \delta) \wedge (\theta < \delta)))$
- (8) a. Mary won more orders than Harry.
 b. $\exists \delta (\exists x (\text{orders}(x) \wedge \text{won}(m, x) \wedge \text{many}(x, \delta)) \wedge \neg \exists y (\text{orders}(y) \wedge \text{won}(h, y) \wedge \text{many}(y, \delta)))$

量化 *than* 節内に量化表現 *everyone* が現れる (9) では，主節よりも *than* 節のスコープを広くとることで適切な意味表示が与えられる。

- (9) a. Mary is taller than everyone.
 b. $\forall y (\text{person}(y) \rightarrow \exists \delta (\text{tall}(m, \delta) \wedge \neg \text{tall}(y, \delta)))$

3.2 統語範疇の割り当て

次に，Steedman[7] による CCG を用いて，各単語に統語範疇を割り当て，文全体の意味表示を導出する。今回，新しく程度を表す基底範疇 D を導入し，形容詞の統語範疇を $S \setminus NP \setminus D$ とした。

表 3 に今回提案したシステムで使用した語彙項目を示す。このうち，*taller* など比較級の語尾につく *er* は，表 2 で挙げた，増加比較級・主節と *than* 節内で異なる形容詞をもつ比較節・測定句比較・差異比較にそれぞれ対応するために 4 つに分割されている。

Larson[8] で指摘された，*than* 節内の主語が連言 (*and*) で結ばれた場合 (10) と選言 (*or*) で結ばれた場合 (11) は，表 3 の than_1 と than_3 を使い分けることで，うまくスコープの違いに対応している。よって，(11a) から *Mary is taller than Harry.* を推論できる。

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

表 3: CCG による語彙項目

PF	統語範疇	意味表示
tall	$AP = S \setminus NP \setminus D$	$\lambda \delta x. \text{tall}(x, \delta)$
Mary	$NP^\dagger = S / (S \setminus NP)$	$\lambda p. p(m)$
is	$S \setminus NP / (S \setminus NP)$	id
4'	D	$4'$
than ₁	S/S	id
than ₂	D/D	id
than ₃	$S \setminus NP \setminus (S \setminus NP / NP^\dagger) / NP^\dagger$	$\lambda QWx. Q(\lambda y. W(\lambda p. p(y))(x))$
pos	$S \setminus NP / AP$	$\lambda A. A(\theta_A)$
-er ₁	$S \setminus NP / NP^\dagger \setminus AP$	$\lambda AQx. \exists \delta (A(\delta)(x) \wedge \neg Q(A(\delta)))$
-er ₂	$S \setminus NP / (S \setminus D) \setminus AP$	$\lambda AKx. \exists \delta (A(\delta)(x) \wedge \neg K(\delta))$
-er ₃	$S \setminus NP / D \setminus AP$	$\lambda A\delta'x. \exists \delta (A(\delta)(x) \wedge (\delta > \delta'))$
-er ₄	$S \setminus NP / NP^\dagger \setminus D \setminus AP$	$\lambda A\delta'Qx. \forall \delta (Q(A(\delta)) \rightarrow A(\delta + \delta'))(x)$
as ₁	$S \setminus NP / NP^\dagger \setminus AP$	$\lambda AQx. \forall \delta (Q(A(\delta)) \rightarrow A(\delta)(x))$
as ₂	S/S	id
more	$(S \setminus NP) / NP^\dagger \setminus ((S \setminus NP) / NP) / N$	$\lambda N G Q z. \exists \delta (\exists x (N(x) \wedge G(\lambda p. p(x))(z) \wedge \text{many}(x, \delta)) \wedge \neg \exists y (N(y) \wedge Q(G(\lambda p. p(y)))) \wedge \text{many}(y, \delta))$

この語彙項目に基づき、様々な比較構文に適切な意味表示を構成的に割り当てることことができる。例として、図1に比較級を用いた文の導出木を示す。than節の中で生じる動詞句の省略には、CCGの関数合成を用いることができる。

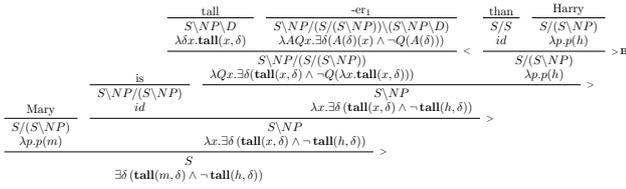


図1: *Mary is taller than Harry* の導出木

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4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4: 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)	$\forall e \forall x (\mathbf{F}^-(x, e) \leftrightarrow \forall \delta ((\delta \geq e) \rightarrow \neg \mathbf{F}^+(x, \delta)))$
(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す。また、(INN)(INP)(IN)(IP)の4つの公理によって反意語の変換が可能になり、§1で紹介した(3)のような複雑な推論の成立も証明することができる。

5 実装と検証

これまで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)の部分を実装し、検証を行った。まず、cgg2lambda[9]の意味解析部を用いて表3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させた。テストに対応する正解のCCGの導出木は人手による。

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の下での含意関係の成立を判定する。本システムは定理証明器によって、前提から仮説(結論)が証明可能なら Yes を、前提から仮説の否定が証明可能なら 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、前提から仮説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。

含意関係認識のデータセット FraCaS[10]¹を使用して検証を行った。今回は 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5に問題例を示す。

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

¹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つのセクションから成る。

表5: FraCaS テストセットの比較級の問題例

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

結果を表6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。²

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。今回解けなかった問題として、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、従来の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 (comparison 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、本システムをさらに拡張させたい。

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] Max J Cresswell. The semantics of degree. In *Montague grammar*, pp. 261–292. Elsevier, 1976.
- [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] Roger Schwarzschild. The semantics of comparatives and other degree constructions. *Language and Linguistics Compass*, Vol. 2, No. 2, pp. 308–331, 2008.
- [6] Martin Hackl. *Comparative quantifiers*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [7] Mark J. Steedman. *The Syntactic Process*. The MIT Press, 2000.
- [8] Richard K Larson. Scope and comparatives. *Linguistics and philosophy*, Vol. 11, No. 1, pp. 1–26, 1988.
- [9] Pascual Martínez-Gómez, Koji Mineshima, Yusuke Miyao, and Daisuke Bekki. cgg2lambda: A Compositional Semantics System. In *Proceedings of ACL 2016 System Demonstrations*, pp. 85–90, 2016.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Aarne Ranta. *Grammatical framework: Programming with multilingual grammars*. CSLI Publications, 2011.
- [13] 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.
- [14] Johan Bos. Wide-coverage semantic analysis with boxer. In *Proceedings of the 2008 Conference on Semantics in Text Processing*, pp. 277–286, 2008.
- [15] 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.

²B&C[11]は、Grammatical Framework [12]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[13]とNut[14]はCCGパーザ [15]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。