

$$\begin{array}{c}
\frac{\text{Ich trinke Bier,}}{S[dcl]/(S[dcl]\backslash S[dcl])} \xrightarrow{T} \frac{\text{weil}}{(S[dcl]\backslash S[dcl])/S[vlast]} \\
: \lambda P. P(\text{drink}'(I', \text{beer}')) \quad : \lambda x. \lambda y. \text{because}'(x, y) \xrightarrow{B} \\
\frac{S[dcl]/S[vlast]}{: \lambda z. \text{because}'(z, \text{drink}'(I', \text{beer}'))} \\
\frac{\quad}{S[dcl]/(S[vlast]\backslash NP[n])} \xrightarrow{B} \frac{\text{ich}}{S[vlast]/(S[vlast]\backslash NP[n]): \lambda P. P(I')} \xrightarrow{T} \\
\frac{\quad}{: \lambda w. \text{because}'(w(I'), \text{drink}'(I', \text{beer}'))} \frac{\text{Durst}}{NP[a]: \text{thirst}'} \xrightarrow{B} \\
\frac{\quad}{S[dcl]/((S[vlast]\backslash NP[n])\backslash NP[a])} \xrightarrow{B} \frac{\quad}{(S[vlast]\backslash NP[n])/((S[vlast]\backslash NP[n])\backslash NP[a]): \lambda Q. Q(\text{thirst}')} \xrightarrow{T} \\
\frac{\quad}{: \lambda x. (\text{because}'((x(\text{thirst}'))(I'), \text{drink}'(I', \text{beer}')))} \frac{\text{habe}}{(S[vlast]\backslash NP[n])\backslash NP[a]: \lambda y. \lambda x. \text{have}'(x, y)} \xrightarrow{B} \\
\frac{\quad}{S[dcl]: \text{because}'(\text{have}'(I', \text{thirst}'), \text{drink}'(I', \text{beer}'))} \xrightarrow{B}
\end{array}$$

図5 “Ich trinke Bier, weil ich Durst habe.”の漸進的導出

$$\begin{array}{c}
\frac{\text{Ich trinke Bier,}}{S/(S\backslash S)} \xrightarrow{T} \frac{\text{denn}}{(S\backslash S)/S} \\
: \lambda P. P(\text{drink}'(I', \text{beer}')) \quad : \lambda x. \lambda y. \text{because}'(x, y) \xrightarrow{B} \\
\frac{S/S}{: \lambda z. \text{because}'(z, \text{drink}'(I', \text{beer}'))} \xrightarrow{B} \frac{\text{ich}}{S/(S\backslash NP[n])} \xrightarrow{T} \\
\frac{\quad}{: \lambda x. \text{because}'(x(I'), \text{drink}'(I', \text{beer}'))} \xrightarrow{B} \frac{\text{habe}}{(S\backslash NP[n])/NP[a]} \xrightarrow{B} \\
\frac{\quad}{: \lambda x. \text{because}'(x(I'), \text{drink}'(I', \text{beer}'))} \xrightarrow{B} \frac{\quad}{S/NP[a]} \xrightarrow{B} \frac{\text{Durst}}{NP[a]: \text{thirst}'} \xrightarrow{B} \\
\frac{\quad}{: \lambda w. \text{because}'(\text{have}'(I', w), \text{drink}'(I', \text{beer}'))} \xrightarrow{B} \frac{\quad}{S: \text{because}'(\text{have}'(I', \text{thirst}'), \text{drink}'(I', \text{beer}'))} \xrightarrow{B}
\end{array}$$

図6 “Ich trinke Bier, denn ich habe Durst.”の漸進的導出。SはすべてS[dcl]。

$$\begin{array}{c}
\frac{\text{Ich trinke Bier,}}{S/(S\backslash S)} \xrightarrow{T} \frac{\text{ich}}{(S\backslash S)/((S\backslash S)\backslash NP[n])} \xrightarrow{T} \\
: \lambda P. P(\text{drink}'(I', \text{beer}')) \quad : \lambda Q. Q(I') \xrightarrow{B} \\
\frac{S/((S\backslash S)\backslash NP[n])}{: \lambda z. (z(I'))(\text{drink}'(I', \text{beer}'))} \xrightarrow{B} \frac{\text{habe}}{(S\backslash NP[n])/NP[a]} \xrightarrow{B} \\
\frac{\quad}{: \lambda z. (z(I'))(\text{drink}'(I', \text{beer}'))} \xrightarrow{B} \frac{\quad}{((S\backslash S)\backslash NP[n])/((S\backslash S)\backslash NP[n])\backslash ((S\backslash NP[n])/NP[a])} \xrightarrow{T} \\
\frac{\quad}{: \lambda P. P(\lambda y. \lambda x. \text{have}'(x, y))} \xrightarrow{B} \\
\frac{\quad}{S/((S\backslash S)\backslash NP[n])\backslash ((S\backslash NP[n])/NP[a])} \xrightarrow{B} \frac{\quad}{((S\backslash S)\backslash NP[n])\backslash ((S\backslash NP[n])/NP[a])} \xrightarrow{B} \\
\frac{\quad}{: \lambda w. ((w(\lambda y. \lambda x. \text{have}'(x, y)))(I')(\text{drink}'(I', \text{beer}')))} \xrightarrow{B} \frac{\text{nämlich}}{((S\backslash S)\backslash NP[n])\backslash ((S\backslash NP[n])/NP[a])} \xrightarrow{B} \\
\frac{\quad}{: \lambda w. \lambda P. \lambda u. \lambda v. \text{because}'(Pwu, v)} \xrightarrow{B} \\
\frac{\quad}{S/NP[a]} \xrightarrow{B} \frac{\quad}{: \lambda z. \text{because}'(\text{have}'(I', z), \text{drink}'(I', \text{beer}'))} \xrightarrow{B} \frac{\text{Durst}}{NP[a]: \text{thirst}'} \xrightarrow{B} \\
\frac{\quad}{S: \text{because}'(\text{have}'(I', \text{thirst}'), \text{drink}'(I', \text{beer}'))} \xrightarrow{B}
\end{array}$$

図7 “Ich trinke Bier, ich habe nämlich Durst.”の漸進的導出。SはすべてS[dcl]。

的である厳密な漸進的解析を実現するためである。

以上を踏まえ、厳密な漸進的解析が可能になるように設定した語彙項目と、そのときの各文の導出過程（の一例）を図 5 から図 10 に示す。最終的にどの文からも同一の意味表示が得られている事が分かる。

4 関連研究

Stanojević and Steedman [2] は、漸進的木回転 (Incremental Tree Rotation) と名付けた組合せ範疇文法の解析アルゴリズムを提案している。このアルゴリズムは、右枝分かれの木を左枝分かれに変換すると共に、右端に出現する可能性を秘めた潜在的な修飾語句に対応した漸進的な処理が可能である。漸進的木回転は純粋に文法的な手法であるが、意味表示やヒューリスティクスを利用する先行研究に比べて、より高い漸進性と精度を示すと報告されている。

Demberg [1] は組合せ範疇文法における厳密な漸進性 (strict incrementality あるいは full connectedness) について議論し、どのような場合に厳密な漸進的解析が可能で、どのような場合に不可能であるかを分析している。また一般の組合せ範疇文法には陽に含まれない「Geach 規則」を導入し、厳密な漸進的解析が適用できる範囲を拡大する方法を示している。

Geach 規則 : $Y/Z \Rightarrow_B (Y/G)/(Z/G)$

語彙項目としては通常の非漸進的解析に用いられる物をそのまま変更せずに採用しつつ、組合せ規則を追加することで漸進的に解析可能な範囲を拡張している点が本稿との違いである。

ブログ記事 [11, 12] は、上記 Demberg [1] を踏まえた上で一般化型繰上げ規則と一般化 Geach 規則を提案し、更に以下のような予想を与えている。

application/composition/type raising のみが許される CCG の任意の導出木を、generalized type raising と generalized Geach rule を使って、(semantics を変えることなく) incremental な導出木に変形できることが示せると思う

興味深い予想であり、今後の展開が期待される。

5 おわりに

意味内容的には同一だが、統語構造的にはさまざまな形を取る複数の文を、組合せ範疇文法を用いて厳密な形で漸進的に解析しつつ、最終的に同一の意

味表示を得る事ができるか否かを、ドイツ語の原因・結果関係文を題材として考察した。

本稿の漸進的解析では、型繰上げ規則と関数合成規則を使用しているが、これらの規則を多用すると擬似的曖昧性 (spurious ambiguity) が急激に増加してしまう、という問題が知られている。そのため正規型 (normal form) と呼ばれる導出においては、関数合成と型繰上げの使用は関係節など統語的に必要な場面に制限されている [9]。

また、Hockenmaier and Steedman [13] においても、関数合成と型繰上げは必要な場合のみ行うとされており、更に Stanojević and Steedman [2] では、型繰上げを適用する範疇は NP や PP などの引数に限られる、とされている。

異なる統語構造に対して厳密な漸進的解析を実行し、最終的に同一の意味表示を得るという当初の目的は達成されたが、厳密な漸進性を重要視した結果として逆に探索空間が増加してしまうのでは、人間の言語理解モデルとして十分ではないと考えている。また図 7 の nämlich や図 10 の deshalb に付与した語彙項目は、厳密な漸進性を実現するためとは言え、複雑すぎるようにも見える。

今後は漸進性のレベルと探索空間の範囲、それに語彙項目の複雑さのバランスが取れた言語理解モデルの構築に取り組みたい。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP22K12188 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Vera Demberg. Incremental derivations in CCG. In **Proceedings of the 11th International Workshop on Tree Adjoining Grammars and Related Formalisms (TAG+11)**, pp. 198–206, Paris, France, September 2012.
- [2] Miloš Stanojević and Mark Steedman. CCG parsing algorithm with incremental tree rotation. In **Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Volume 1 (Long and Short Papers)**, pp. 228–239, Minneapolis, Minnesota, June 2019. Association for Computational Linguistics.
- [3] Mark Steedman. **The Syntactic Process**. The MIT Press, 2000.
- [4] Mark Steedman. **Surface Structure and Interpretation**. The MIT Press, 1996.
- [5] 戸次大介. 日本語文法の形式理論. くろしお出版, 2010.
- [6] 峯島宏次. 論理と文法. 数学セミナー, Vol. 59, No. 3, pp. 30–35, 2020.
- [7] Krishnamurti Vijay-Shanker and David Weir. Polynomial time parsing of combinatory categorial grammars. In **28th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics**, pp. 1–8, 1990.
- [8] 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.
- [9] David Reitter, Julia Hockenmaier, and Frank Keller. Priming effects in Combinatory Categorical Grammar. In **Proceedings of the 2006 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing**, pp. 308–316, Sydney, Australia, July 2006. Association for Computational Linguistics.
- [10] Julia Hockenmaier. Creating a CCGbank and a wide-coverage CCG lexicon for German. In **Proceedings of the 21st International Conference on Computational Linguistics and 44th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics**, pp. 505–512, Sydney, Australia, July 2006. Association for Computational Linguistics.
- [11] 氏名不詳. 組合せ範疇文法の漸進的構文解析, 2021. <https://m-a-o.hatenablog.com/entry/2021/05/05/085810>.
- [12] 氏名不詳. 続・組合せ範疇文法の漸進的構文解析, 2021. <https://m-a-o.hatenablog.com/entry/2021/11/14/234710>.
- [13] Julia Hockenmaier and Mark Steedman. CCGbank: User’s manual. 05 2005.

$$\begin{array}{c}
\frac{\text{Weil}}{(S[dcl]/S[v1])/S[vlast]} \quad \frac{\text{ich}}{S[vlast]/(S[vlast]\backslash NP[n])} >T \\
: \lambda x. \lambda y. \text{because}'(x, y) \quad : \lambda P. P(I') \\
\hline
(S[dcl]/S[v1])/S[vlast]\backslash NP[n] >B \\
: \lambda z. \lambda y. \text{because}'(z(I'), y) \\
\frac{\text{Durst}}{NP[a] : \text{thirst}'} >T \\
\frac{(S[vlast]\backslash NP[n]) / ((S[vlast]\backslash NP[n])\backslash NP[a])}{: \lambda P. P(\text{thirst}')} >B \\
\frac{(S[dcl]/S[v1]) / ((S[vlast]\backslash NP[n])\backslash NP[a])}{: \lambda x. (\lambda y. \text{because}'(x(\text{thirst}')(I'), y))} \\
\frac{\text{habe,}}{(S[vlast]\backslash NP[n])\backslash NP[a]} > \\
: \lambda y. \lambda x. \text{have}'(x, y) \\
\frac{S[dcl]/S[v1]}{: \lambda y. \text{because}'(\text{have}'(I', \text{thirst}'), y)} > \frac{\text{trinke}}{(S[v1]/NP[a])/NP[n]} >B^2 \\
: \lambda x. \lambda y. \text{drink}'(x, y) \quad \frac{\text{ich}}{NP[n] : I'} \\
\frac{(S[dcl]/NP[a])/NP[n] : \lambda u. \lambda v. \text{because}'(\text{have}'(I', \text{thirst}'), \text{drink}'(u, v))}{S[dcl]/NP[a] : \lambda v. \text{because}'(\text{have}'(I', \text{thirst}'), \text{drink}'(I', v))} > \frac{\text{Bier}}{NP[a] : \text{beer}'} \\
\hline
S[dcl] : \text{because}'(\text{have}'(I', \text{thirst}'), \text{drink}'(I', \text{beer}')) >
\end{array}$$

図8 “Weil ich Durst habe, trinke ich Bier.”の漸進的導出

$$\begin{array}{c}
\frac{\text{Ich habe Durst,}}{S[dcl]/(S[dcl]\backslash S[dcl])} >T \quad \frac{\text{deshalb}}{(S[dcl]\backslash S[dcl])/S[v1]} >T \\
: \lambda P. P(\text{have}'(I', \text{thirst}')) \quad : \lambda y. \lambda x. \text{because}'(x, y) \\
\hline
S[dcl]/S[v1] >B \quad \frac{\text{trinke}}{(S[v1]/NP[a])/NP[n]} >B^2 \\
: \lambda z. \text{because}'(\text{have}'(I', \text{thirst}'), z) \quad : \lambda x. \lambda y. \text{drink}'(x, y) \\
\frac{(S[dcl]/NP[a])/NP[n]}{: \lambda u. \lambda v. \text{because}'(\text{have}'(I', \text{thirst}'), \text{drink}'(u, v))} > \frac{\text{ich}}{NP[n]} > \\
: I' \\
\frac{S[dcl]/NP[a]}{: \lambda v. \text{because}'(\text{have}'(I', \text{thirst}'), \text{drink}'(I', v))} > \frac{\text{Bier}}{NP[a]} > \\
: \text{beer}' \\
\hline
S[dcl] : \text{because}'(\text{have}'(I', \text{thirst}'), \text{drink}'(I', \text{beer}')) >
\end{array}$$

図9 “Ich habe Durst, deshalb trinke ich Bier.”の漸進的導出。

先行文の“Ich habe Durst”は，“Ich trinke Bier”と同様の手順で漸進的に導出可能。

$$\begin{array}{c}
\frac{\text{Ich habe Durst,}}{S/(S\backslash S)} >T \quad \frac{\text{ich}}{(S\backslash S)/((S\backslash S)\backslash NP[n])} >T \\
: \lambda P. P(\text{have}'(I', \text{thirst}')) \quad : \lambda Q. Q(I') \\
\hline
S/((S\backslash S)\backslash NP[n]) >B \quad \frac{\text{trinke}}{(S\backslash NP[n])/NP[a]} >T \\
: \lambda z. (z(I'))(\text{have}'(I', \text{thirst}')) \quad : \lambda y. \lambda x. \text{drink}'(x, y) \\
\frac{((S\backslash S)\backslash NP[n]) / ((S\backslash S)\backslash NP[n]) \backslash ((S\backslash NP[n])/NP[a])}{: \lambda P. P(\lambda y. \lambda x. \text{drink}'(x, y))} >B \\
\frac{S/((S\backslash S)\backslash NP[n]) \backslash ((S\backslash NP[n])/NP[a])}{: \lambda w. ((w(\lambda y. \lambda x. \text{drink}'(x, y)))(I'))(\text{have}'(I', \text{thirst}'))} \\
\frac{\text{deshalb}}{(((S\backslash S)\backslash NP[n]) \backslash ((S\backslash NP[n])/NP[a])) / NP[a]} >B \\
: \lambda w. \lambda P. \lambda u. \lambda v. \text{because}'(v, Pwu) \\
\hline
S/NP[a] > \frac{\text{Bier}}{NP[a] : \text{beer}'} > \\
: \lambda z. \text{because}'(\text{have}'(I', \text{thirst}'), \text{drink}'(I', z)) \\
\hline
S : \text{because}'(\text{have}'(I', \text{thirst}'), \text{drink}'(I', \text{beer}')) >
\end{array}$$

図10 “Ich habe Durst, ich trinke deshalb Bier.”の漸進的導出。SはすべてS[dcl]。