

An Experimental Investigation of Subject Empty Categories: Their Real-time Status in a Top-down Parser

Kazuma Kimura

1 Introduction and background

1.1 The syntax of copular and possession

- BE 動詞は, 埋め込み構造から派生される (Stabler (1996), Moro (1997))

- (1) a. A picture of the wall was the cause of the riot.
 b. [*BE* [[*DP* a picture of the wall]][*DP* the cause of the riot]]
 c. [TP [*DP* A picture of the wall]][*SC* ti [*DP* the cause of the riot]]

- (2) a. The cause of the riot was a picture of the wall.
 b. [TP [*DP* the cause of the riot]][*FP* ti [*SC* ti [*DP* a picture of the wall]]]

- HAVE 動詞 (所有文) は, 埋め込み構造から派生される (Freeze (1992), Kayne (1993), Kim (2012), Myler (2016))

- (3) a. John has a brother.
 b. [*HAVE* [*PP* [*DP* a brother]][*TO* [*DP* John]]]
 c. [[*DP* John]_i [*HAVE* [*PP* [*DP* a brother]][*TO* ti]]]

- これらの動詞の派生には, 埋め込み節に空範疇が存在すると仮定されてきた (Chomsky (1973), Fiengo (1977), Chomsky (1993))

1.2 The processing cost of empty category

- EC は, 人間の文処理機構にとって処理負荷がかかる (Bever and McElree (1988), McElree and Bever (1989), Samar and Berent (1991), Yamaguchi and Ohta (2023))

- Minimalist Grammars (MGs)¹:

逐次的な文処理のメカニズムを統語理論の観点から捉える文法 (Stabler (1996), Stabler (2013))

- (4) A grammar $G = (V, Cat, Lex, F)$, where
 V is a set,
 Cat is a set,
 Lex is a set of expressions built from V and Cat ,
 F is a set of partial functions from tuples of expressions to expressions (文法操作)

¹ この文法は, Chomsky (1995) およびその後続研究が提案してきた統語理論を, トップダウン方式で心理計算論的に妥当な形で実装したものである。なお, この文法体系は, Minimalist で仮定されてきた構造構築操作や派生方法を, 文処理メカニズムと親和性の高い形式に「翻訳」したものに過ぎず, 従来のボトムアップな統語派生の存在自体を否定するものではないことに注意されたい。

1.3 Purpose

— この研究の目的 —

- BE/HAVE 動詞に含まれる痕跡 (Subject Empty Category) が逐次的な文理解に及ぼす影響を検証
- Subject EC の処理メカニズムを top-down MG で計算論的に実装
- Subject EC の処理負荷を, complexity metrics で定量化

2 Previous experimental / computational studies

2.1 The empty category in copular sentences in English

- Samar and Berent (1991): BE 動詞の埋め込みに存在する EC の処理負荷を検証

- (5) a. Terrible fights between good neighbors **happen** sometimes. (unaccusative)
 b. Hot meals in dining halls **are** served daily. (passive)
 c. College students in small dorms **complain** constantly. (unergative)
 d. Careful doctors in hospitals **watch** patients closely. (transitive)

- (6) a. Terrible fights between good neighbors **are** rare. (unaccusative analog)
 b. Hot meals in dining halls can **be** salty. (passive analog)
 c. College students in small dorms **are** friendly. (unergative analog)
 d. Careful doctors in hospitals **are** very important. (transitive analog)

(7) 実験の流れ

- モニター上に映し出された刺激文を読む
- ある名詞句が刺激文の主語名詞句として含まれていたかどうかを問う質問に答える
- その質問への反応時間を計測

- (8) a. [DP_i [BE [EC _i DP]]] (BE)
 b. [DP [V DP]] (transitive)

痕跡の含まない条件と比較しても有意に読み時間が短くなる (Scheffe's $F(1, 22) = 4.64, p < .001$ for subjects, $F(1, 40) = 29.23, p < .0001$ for items)。

Table.1 Mean Target Response Times (RTs) for the Four Different Sentence Types

Reference	Mean RT	Copular analog	Mean RT	Difference RT
Unaccusative	706.5	Unaccusative abracnalog	708.9	-2.4
Passive	689.9	Passive analog	743.3	-53.4
Intransitive	725.7	Intransitive analog	656.5	69.2
Transitive	707.1	Transitive analog	627.4	79.7

2.2 Control and Raising in Japanese

- Yamaguchi and Ohta (2023): 日本語の補文に含まれる EC の処理負荷を検証

(9) a. Raising condition

Nakamura-ga senshu kayobi-ni [Copy kaisha-de Takahashi-o shikari]
 Nakamura-NOM last-week Tuesday-DAT COPY at-an-office Takahashi-ACC scold
sugi-ta.
 too-much-PST.

‘Nakamura scolded Takahashi too much at an office last Tuesday.’

b. Control condition

Nakamura-ga senshu kayobi-ni [Copy kaisha-de Takahashi-o shikari]
 Nakamura-NOM last-week Tuesday-DAT Copy at-an-office Takahashi-ACC scold
sobire-ta.
 fail-to-PST.

‘Nakamura failed to schold Takahashi at an office last Tuesday.’

c. Reflexive condition

Nakamura-ga senshu kayobi-ni kaisha-de jibunjishin-de Takahashi-o
 Nakamura-NOM last-week Tuesday-DAT at-an-office Takahashi-ACC schold-PST.
shikat-ta.

‘Nakamura scolded Takahashi by himself at an office last Tuesday.’

d. Causative condition

Nakamura-ga senshu kayobi-ni [Copy kaisha-de Yamashita-ni
 Nakamura-NOM last-week Tuesday-DAT at-an-office Takahashi-ACC schold
Takahashi-o shikar] ase-ta.
 CAUSE-PST.

‘Nakamura made Yamashita scold Takahashi at an office last Tuesday.’

→ EC を含む Control・Raising 条件で, 読み時間が優位に伸びる

2.3 Issues

論点① 言語理論 → 行動データ:

BE / HAVE の統語構造に含まれる EC は逐次的文処理に影響するか (心理実験で検証, 3 節)

論点② 行動データ → 文処理理論:

逐次的文処理時の振る舞いを踏まえて, それらをどのように定式化できるか (top-down MGs による定式化と実装, 5 節)

3 Experiments

3.1 Experiment 1

BE / HAVE 動詞の統語構造に含まれる痕跡の文処理への影響を自己ペース読み課題 (Self-paced Reading Task, SPR) を用いて検証する

3.1.1 Participants

● 実験参加者:

Amazon Mechanical Turk で募集した英語母語話者 24 人

3.1.2 Material

● 1 要因 4 水準 (動詞タイプ) の刺激文

- (10) a. Airline pilots with great experience **are** rolemodels for aspiring pilots.
 b. Airline pilots with great experience **have** opportunities for career growth.
 c. Airline pilots with great experience **are involved** in this company.
 d. Airline pilots with great experience **talk** friendly in this room.

● 文を 10 領域に分割 (動詞は領域 6 に置くよう統一)

Region→	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
BE sentence (=8a))	Airline	pilot	with	great	experience	are	role-models	for	aspiring	pilots.
HAVE sentence (=8b))	Airline	pilot	with	great	experience	have	opportunities	for	career	growth.

Table.2 ターゲット文の領域設定

3.1.3 Procedure

● 実験実施方法:

PCIBex farm (Zehr and Schwarz (2018)) 上で実施

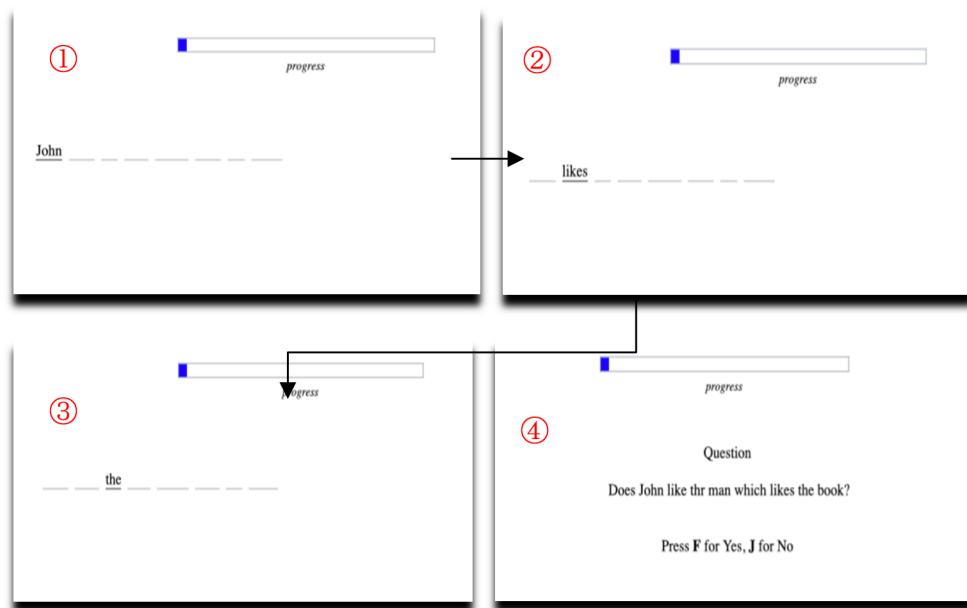


Figure.1 PC Ibex 上での自己ペース読み課題

- (i) 24 刺激文 + 36 フィラー文をランダム化した順番で提示
- (ii) 1 文ずつ単語区切りで読ませ (moving window 法), 各領域の読み時間 (RT) を計測
- (iii) 各刺激文を提示したあと, 文の真偽を問う comprehension question を解いてもらう

- (11) a. Airline pilots with great experience are role models for aspiring pilots.
- b. Do airline pilots have great experience? (Yes)

- (12) a. [DP_i [BE [EC_i DP]]]
- b. [DP_i [HAVE [PP DP [P [EC_i]]]]]

3.1.4 Results

関心領域 (ROI) である領域 6, 9 の RT (ms) を線形混合効果モデルで解析²

従属変数: ROI (領域 6, 9) の RT 説明変数: 動詞タイプ (Passive, Intransitive, BE, HAVE)

3.1.5 Discussion

- 痕跡の位置が読み時間に影響した可能性 (4 節で議論)

² 解析には, R studio (R Core Team (2018)) の lmeTest パッケージを用いた。データ解析にあたって外れ値および間違い値と考えられる RT は上限値と下限値を設け, その範囲内にはないデータポイントは解析から除外した。

Table.3 領域 6, 7 における RT の線形混合効果モデルによる分析

	Estimate	Std. Error	t value	P Value
(Intercept)	-0.02018	0.14424	-0.140	0.8897
BE	0.10859	0.04534	2.395	0.0264 *
HAVE	0.02465	0.04520	0.545	0.5916
Intran	0.04370	0.04528	0.965	0.3460

モデル式: lmer(RT67 ~ BE + HAVE + Intran + (1 | subj) + (1 | item))

Table.4 領域 9 における RT の線形混合効果モデルによる分析

	Estimate	Std. Error	t value	P value
(Intercept)	0.12855	0.14998	0.857	0.399
BE	0.06765	0.04839	1.398	0.163
HAVE	0.08020	0.04793	1.673	0.095 .
Intran	-0.01680	0.04837	-0.347	0.729

モデル式: lmer(RT9 ~ BE + HAVE + Intran + (1 | subj) + (1 | item))

Table.5 刺激文全体の RT の線形混合効果モデルによる分析

	Estimate	Std. Error	t value	P Value
(Intercept)	0.084999	0.125717	0.676	0.5043
BE	0.065051	0.034943	1.862	0.0774 .
HAVE	0.009972	0.034905	0.286	0.7781
Intran	0.008141	0.034936	0.233	0.8181

モデル式: lmer(RT ~ BE + HAVE + Intran + (1 | subj) + (1 | item))

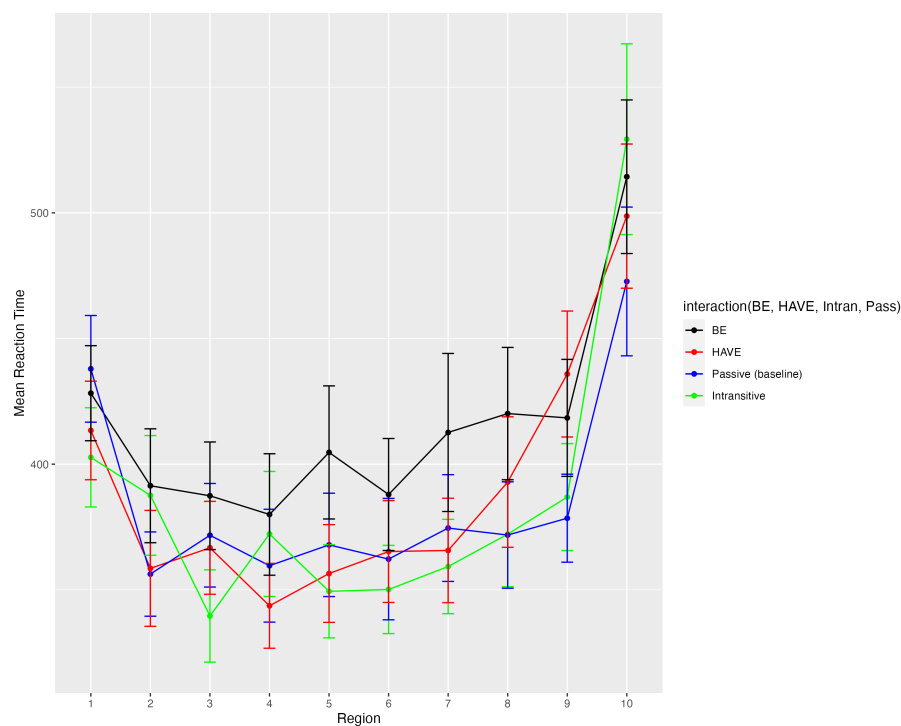


Figure.2 各動詞タイプにおける領域ごとの読み時間

3.2 Experiment 2

実験 1 での結果に加えて, comprehension question に回答するまでの反応時間 (ms) を計測
→ 痕跡の位置による反応時間の違いを検証する

3.2.1 Participants

● 実験参加者:

Amazon Mechanical Turk で募集した英語母語話者 24 人

3.2.2 Material

- (13) a. College students in small dorms are participants in study groups. (BE)
b. College students in small dorms have access to study resources. (HAVE)
c. College students in small dorms are provided with study resources. (Passive)
d. College students in small dorms may gather for study sessions. (Intransitive)
e. College students in small dorms obtain access to study resource. (Transitive)

3.2.3 Procedure

● 実験実施方法:

PCIBex farm (Zehr and Schwarz (2018)) 上で実施

- (i) 24 刺激文 + 36 フィラー文をランダム化した順番で提示
(ii) 1 文ずつ単語区切りで読ませ (moving window 法), 各領域の読み時間を計測
(iii) 各刺激文を提示したあと, 文の真偽を問う comprehension question を解いてもらう

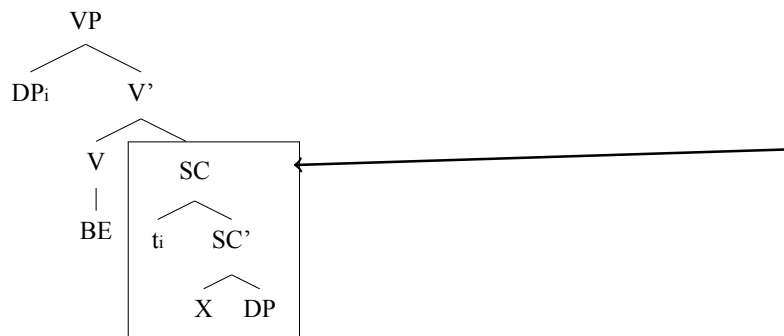
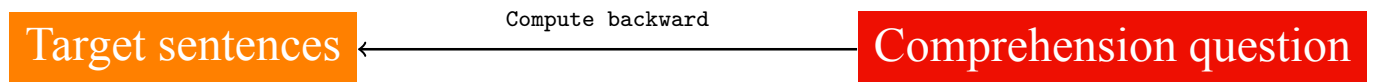
- (14) a. Airline pilots with great experience are rolemodels for aspiring pilots.
→ It was **airline pilots with great experience** that are role models for aspring pilots. (Yes)
b. Active adults in good health have memberships in fitness clubs.
→ It was **inacitive adults in good health** that have membership in fitness clubs. (No)

3.2.4 Results

comprehension question への回答時間 (ms) を, 一般化線形混合モデルで分析³

- (15) BE 動詞は他の動詞と比べて, アクセス時間が短く, HAVE 動詞は長くなる (有意差はない)

³ 読み課題とは異なり, オフライン課題において, 計測した反応時間を対数化することによる解析結果の解釈への影響を考慮し, 一般化線形混合モデルを採用した。



If the syntactic structure contains a trace of the subject noun, namely subject ECs, then the comprehender can find the information of the subject noun by accessing the EC.

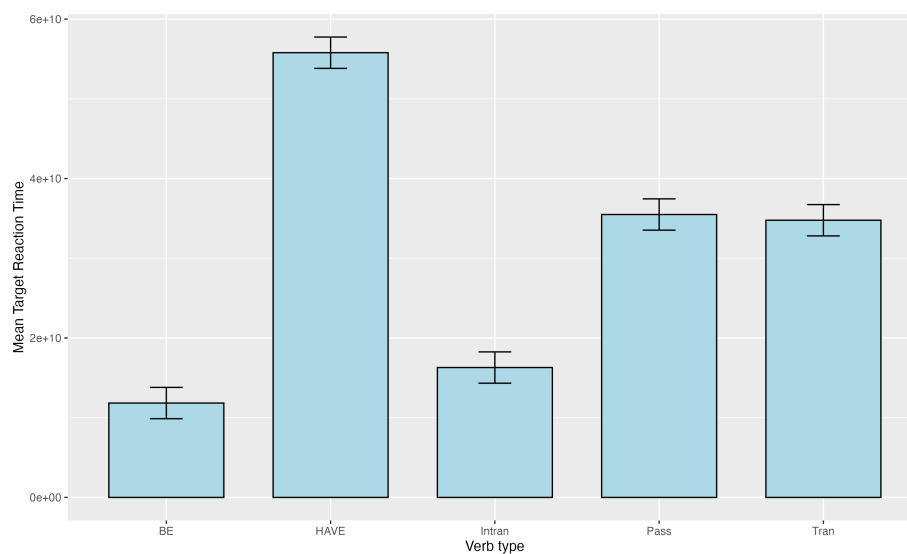


Figure.3 動詞ごとの刺激文における主語名詞句へのアクセス時間 (エラーバーは標準誤差)

Table.6 一般化線形混合モデルによるターゲット（主語名詞句）へアクセスするまでの反応時間の分析

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> z)
(Intercept)	38.29	12.19	3.14	0.00168 **
BE	-6.99	2.59	-2.70	0.00697 **
HAVE	14.99	10.97	1.37	0.17174
Tran	4.48	5.72	0.78	0.43357

3.3 Summary

- (16) a. BE 動詞・HAVE 動詞の痕跡は、オンライン処理 (Experiment 1)・オフライン処理 (Experiment 2) 両方で読み時間に影響した
- b. BE 動詞は、動詞直後の領域、HAVE 動詞は、目的語直後の領域で読み時間が伸びた。
- c. それぞれの動詞が要求する統語構造が影響した可能性を示唆

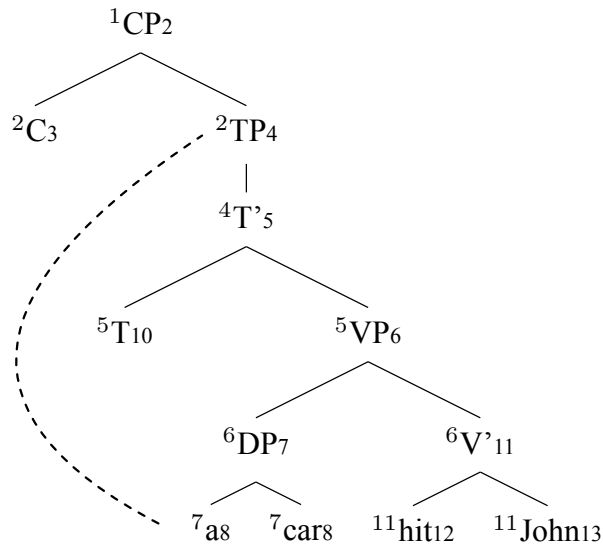
4 Proposal: The cost of processing EC

4.1 Parsing in a top-down Minimalist Grammar

- トップダウン解析器でモデリング⁴

(17) a. A car hit John.

b.



(18) a. outdex (左上): 解析器がそのノードを統語構造に初めて追加する際のステップ

b. index(右下): そのノードにおいて、全ての文法操作 (移動, 一致) が完了するステップ

4.2 The complexity metrics of processing EC

(19) Complexity metrics in offline processing (Graf et al. (2015))

- Tenure: How long a node is kept in memory?
- Payload: How many nodes must be kept in memory?
- Size: How much information is stored in a node?

(20) Size (移動元と移動先のステップ数の差分, cf Graf et al. (2015))

Given a node n of derivation tree t , we write $o(n)$ for the outdex of n . We write Mn for the mother of n (the node immediately dominating n). We write F_n for the final landing site of n in t , where Mn quantifies as a landing site. Then the Size of n is $size(n) = o(Mn) - o(F_n)$; for the root node r (which has no mother), $size(r) = 0$.

⁴ 具体的には, Chesi (2021) が提供する Python パッケージで実装されたアルゴリズム及び計算に用いる語彙要素を修正し, 我々の提案する EC を解析する操作を追加したモデルを使用する方法をとる。

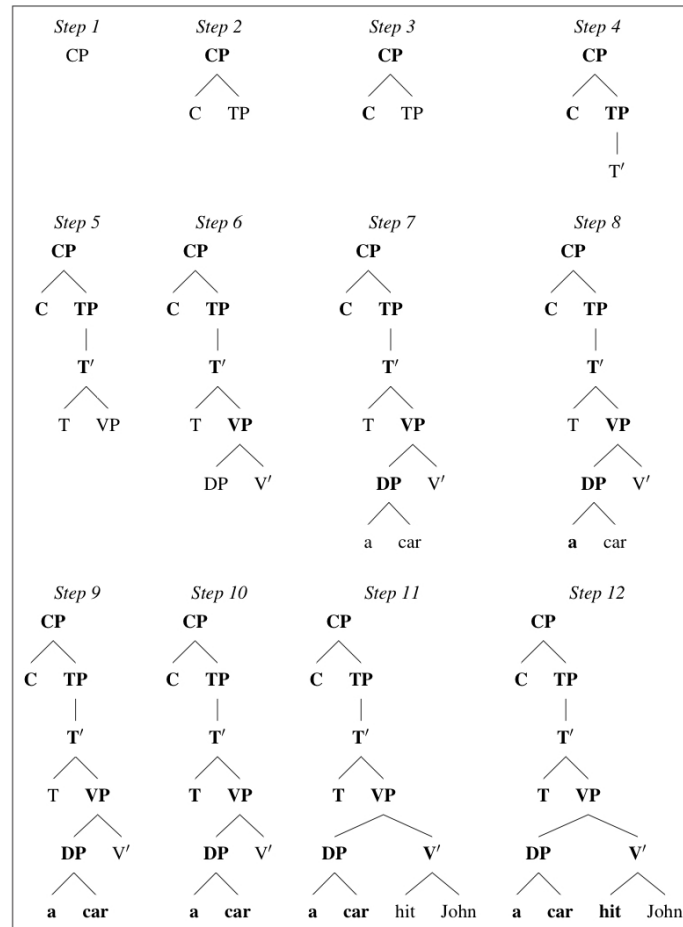
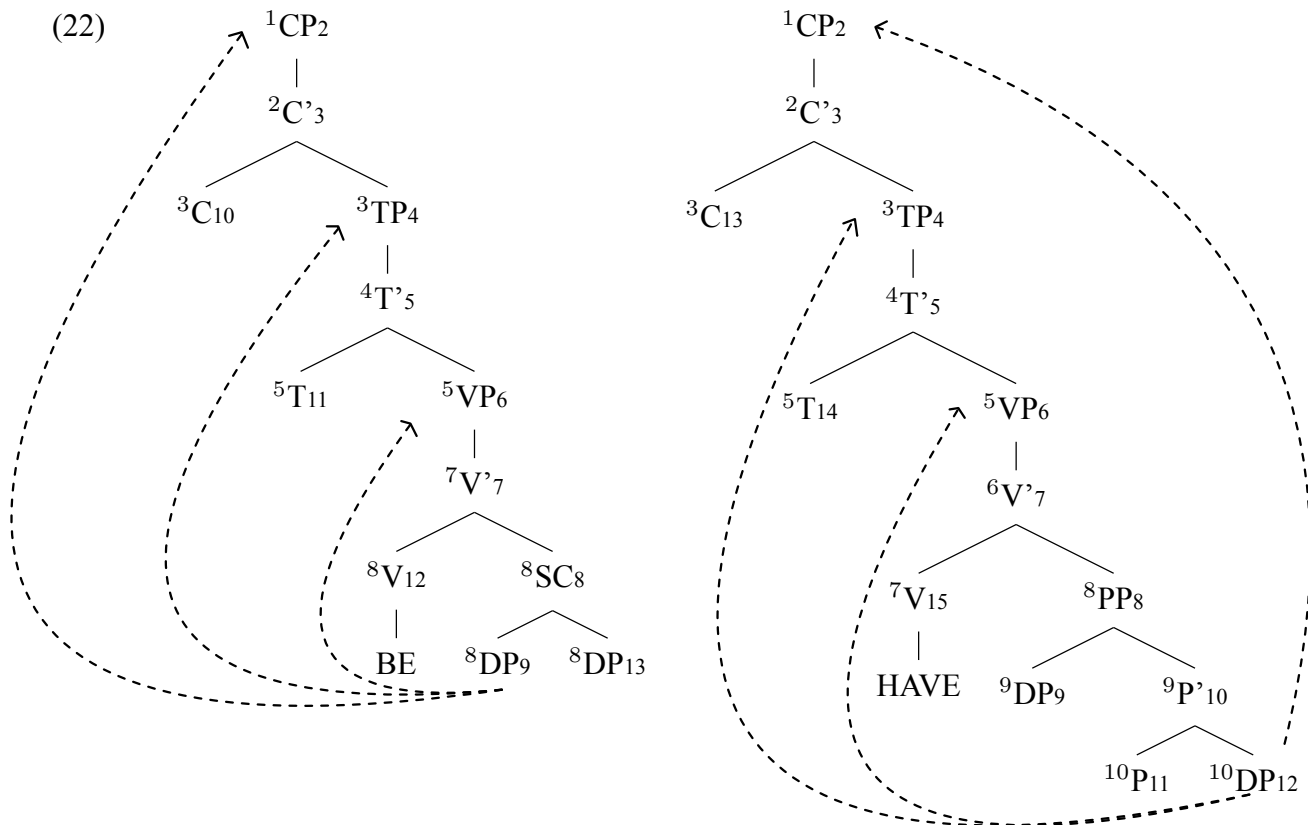


Figure.4 Stepwise construction of the derivation tree for A car hit John, with the final scanning (Pasternak and Graf (2021))

(21) 上記 A car が移動する際の処理負荷

$${}^6\text{DP} - \text{TP}_4 = 2$$

4.3 Analysis



(23) Offline processing

- a. BE: $({}^8DP) - (C_2) = 6 + ({}^{10}DP) - (TP_3) = 7 + ({}^{10}DP) - (VP_5) = 5$
- b. HAVE: $({}^{12}DP) - (CP_2) = 10 + ({}^{12}DP) - (TP_3) = 9 + ({}^{12}DP) - (VP_6) = 6$

→ 主語名詞句は, CP, TP, VP で認可される必要があるため, 複数の移動操作を要する

- オンライン処理負荷の定量化には, 複数の方策が存在する

- (24) a. 読み込んだ名詞句が, CP, TP, VP でそれぞれ認可されるため, その (非顕在的) 移動による処理負荷
- b. それぞれ VP, PP 領域で, 名詞句を 2 つ同時に読み込むため, ワーキングメモリへの負荷 (e.g. (19b), (19c)) が掛かっている可能性

(25) Complexity metrics of online processing (Hale (2001))

$$P(W_n = w_n | W_1 = w_1, \dots, W_{n-1} = w_{n-1})$$

4.4 Issues

- (26) a. Subject Empty Category が存在することによるオフライン処理負荷が, wh 句のような変項の移動とどのように異なるのか
- b. オンライン処理負荷の定量化 (検討中)
- c. 格認可や Φ 素性の一致など, それぞれの操作が同程度の処理負荷を及ぼすのかどうか (主語名詞句が Empty Category であることの効果?)

5 Conclusion

結論

- 英語の BE 動詞・HAVE 動詞の統語構造に含まれる Subject Empty Category は, オンライン・オフライン処理時の負荷を増大させる
- Top-down parser において, 移動の元位置と移動先のステップ数および主語名詞句の認可 (lexical content の復元?) の観点から処理負荷を定量化することが可能

今後の課題

- 文法操作の処理負荷
- 非顕在的な移動と主語名詞句の移動の処理ステータスの違い (Quantifier Raising, cf. Pasternak and Graf (2021))

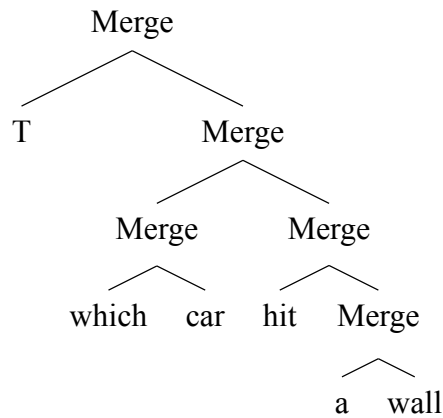
References

- Bever, T. G. and McElree, B. (1988). Empty categories access their antecedents during comprehension. *Linguistic Inquiry*, 19(1):35–43.
- Chesi, C. (2021). Expectation-based minimalist grammars. *CoRR*, abs/2109.13871.
- Chomsky, N. (1973). Conditions on transformations. *A Festschrift for Morris Halle/Holt, Reinhart and Winston*.
- Chomsky, N. (1993). *Lectures on government and binding: The Pisa lectures*. Number 9. Walter de Gruyter.
- Chomsky, N. (1995). *The Minimalist Program*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Fiengo, R. (1977). On trace theory. *Linguistic Inquiry*, 8(1):35–61.
- Freeze, R. (1992). Existentials and other locatives. *Language*, pages 553–595.
- Graf, T., Fodor, B., Moette, J., Rachiele, G., Warren, A., and Zhang, C. (2015). A refined notion of memory usage for minimalist parsing. In *In Proceedings of the 14th meeting on the mathematics of language*, Chicago.
- Hale, J. (2001). A probabilistic earley parser as a psycholinguistic model. Second Meeting of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics.
- Kayne, R. S. (1993). Toward a modular theory of auxiliary selection. *Studia linguistica*, 47(1):3–31.
- Kim, K. (2012). Argument structure licensing and english have. *Journal of Linguistics*, 48.
- McElree, B. and Bever, T. G. (1989). The psychological reality of linguistically defined gaps. *Journal of Psycholinguistic Research*, 18:21–35.
- Moro, A. (1997). *The raising of predicates: Predicative noun phrases and the theory of clause structure*, volume 80. Cambridge University Press.
- Myler, N. (2016). *Building and Interpreting Possession Sentences*. MIT Press.
- Pasternak, R. and Graf, T. (2021). Cyclic scope and processing difficulty in a minimalist parser. *Glossa: a Journal of General Linguistics*, 6(1):1–34.
- R Core Team (2018). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Samar, V. J. and Berent, G. P. (1991). Be is a raising verb: Psycholinguistic evidence. *Journal of Psycholinguistic Research*, 20(5):419–443.
- Stabler, E. (1996). Derivational minimalism. In *International conference on logical aspects of computational linguistics*, pages 68–95. Springer.
- Stabler, E. P. (2013). Two models of minimalist, incremental syntactic analysis. *Topics in cognitive science*, 5(3):611–633.
- Yamaguchi, K. and Ohta, S. (2023). Dissociating the processing of empty categories in raising and control sentences: A self-paced reading study in japanese. *Frontiers in Language Sciences*, 2:1138749.
- Zehr, J. and Schwarz, F. (2018). Penncontroller for internet based experiments (ibex).

AppendixA A top-down Minimalist

(1) a. Which car hit a wall.

b.



(2) a. Merge a and wall, checking =N on a and N on wall.

b. Merge hit and a wall, checking =D on hit and D on a

c. Merge which and car, checking =N on which and N on car

d. Merge hit a wall and which car, checking =D on hit and D on which

e. Merge T and which car hit a wall, checking =V on T and v on hit

• Pasternak and Graf (2021):

(3) Local Differential (LD)

Given a node n in derivational tree t , let $o(n)$ be n 's outdex. Furthermore, let m_n denote n 's mother, and let l_n and p_n denote n 's final LF and PF landing site in t , respectively (where m_n qualifies as both an LF and PF landing site). The Locational Differential (LD) of n is $ld(n) = |o(p_n) - o(l_n)|$. For root node r , $ld(r) = 0$.