

# 逐次的な文理解における 文構造のつながり (connectedness) の限界と記憶の負荷

磯野真之介 (東京大学大学院)

【要旨】 ヒトが文を理解するには、線的に並んだ音や文字から、要素間の依存関係 (例：主語と動詞の関係) を脳内の作業記憶で再構築しなければならない。この処理は、記憶の減衰のため、依存関係の線的な距離が長くなるほど困難であるはずで、実験においては読み時間の増大が予測されてきた (局所性効果)。しかし、先行研究では局所性効果の有無は言語や依存関係の種類により異なることが知られている。本稿では、組合せ範疇文法 (CCG) に基づく統語構造解析のモデルによって、この局所性効果のばらつきに対する統一的な説明を与える。CCG では「ネコがネズミを」のような同節要素列が1つの“構成素”として扱われるなど、構成素の概念が主流生成文法とは異なる。減衰が生じる記憶の単位が、依存文法上の語や句構造文法上の最大投射ではなく、CCG 上の構成素であると考え、局所性効果のばらつきが説明できることを示す。

## 1 背景：局所性効果のばらつき

ヒトが文を理解するには、線的に並んだ音や文字から、要素間の統語的な関係を再構築しなければならない。その際、文全体を一度に見聞きすることはできないため、文理解は逐次的 (漸進的; incremental) に進む。逐次的な文理解では、入力された要素を脳内の作業記憶に一旦保持 (encoding) し、その後の入力に応じて取り出す (retrieval) ことで、要素間の関係を結んでいると考えられている (Gibson, 2000; Lewis & Vasishth, 2005; McElree, 2000)。作業記憶に保持された要素は、時間の経過とともに減衰したり、他の要素との間で干渉を起こしたりするため、入力位置から離れるほど取り出しが困難になり、処理負荷が高まると予測される。たとえば(1)の文では、*supervised* が入力された際に、主語の *nurse* や関係代名詞の *who* が記憶から取り出されるが、それらの間の距離が長い(1b)のほうが(1a)よりも *supervised* での処理負荷が高いと予測される。実際に、自己ペース読文実験や視線計測実験を行うと、*supervised* の読み時間は(1b)のほうが長い (Bartek et al., 2011; Grodner & Gibson, 2005)。

- (1) a. The administrator *who* the *nurse supervised* scolded the medic.  
b. The administrator *who* the *nurse who* was from the clinic *supervised* scolded the medic.

依存関係の距離による処理負荷の増大は**局所性効果** (locality effect) と呼ばれ、作業記憶を基盤とする文理解モデルの重要な証拠とされてきた。しかし、局所性効果は経験的には必ずしも安定しておらず、言語や構文によっては見られないことが知られている。表1に主な先行研究をまとめた。単なる主題関係では局所性効果は生じず、項が *wh* 句や NPI である場合に効果が生じるという傾向がみられる。このことから、依存関係の種類によって局所性効果の有無が異なり、通常主題関係は局所性効果をもたらさないという提案がなされている (Nakatani & Gibson, 2010; cf. Levy & Keller, 2013)。さらにその理由として Nakatani (2021a) は、主要部を同じくすると予測される依存部が一つの鎖 (chain) をなし、新しい同節要素が加わるたびに鎖が活性化して記憶の減衰がキャンセルされる、と提案している。たとえば(2a)では、「ジョン」がまず鎖の第一要素となり、主要部  $\omega$  が予測される ( $\langle j, \omega \rangle$ )。次に「オフィス」が同じ鎖に加えられ、その際鎖が再活性化される。「メアリー」「プレゼント」も順次鎖に加えられその都度鎖が再活性化される ( $\langle j, o, m, p, \omega \rangle$ )。「あげた」で必要な処理は予測された主要部  $\omega$  をこれに置き換えて依存関係を完成させることで、鎖は直前の「プレゼントを」で活性化されたばかりなので、記憶の減衰による処理負荷はほとんど生じない。

言語	依存関係	局所性効果	文献
英語	関係代名詞～動詞	あり	(Bartek et al., 2011; Grodner & Gibson, 2005)
英語	主節主語～動詞	なし	(Roland et al., 2021)
ロシア語	関係代名詞～動詞	あり	(Levy et al., 2013)
ドイツ語	関係代名詞～動詞	あり	(Levy & Keller, 2013)
ドイツ語	主節項～動詞 (分詞)	なし	(Konieczny, 2000; Levy & Keller, 2013)
日本語	wh 句～「か」	あり	(Ono & Nakatani, 2014)
日本語	NPI～否定辞	あり	(Nakatani, 2021a, 2021b)
日本語	主節主語～次の副詞	あり	(Isono & Hirose, 2022a)
日本語	主節主語～動詞	なし	(Isono & Hirose, 2022a; Nakatani & Gibson, 2010)

表1 先行実験研究における局所性効果の有無

特に「ジョンが」と「あげた」の表面上の距離は処理負荷に関係しない。これに対し(2b)では、否定極性表現 (NPI) である「しか」と「ない」の間の依存関係が主題関係とは独立に存在し、この依存関係の鎖は途中で活性化されないため、表面上の距離が局所性効果をもたらす。

- (2) a. ジョンがオフィスでメアリーにプレゼントをあげた。  
 b. ジョンしかオフィスでメアリーにプレゼントをあげなかった。

この仮説は、主題関係以外の依存関係において特に局所性効果が見られる理由をうまく説明する。類似の仮説として、Isono and Hirose (2022b) は、同節要素が意味論においてイベント項  $e$  によって相互に関連付けられているため、 $e$  に参加者が追加されると、イベントの理解のため、同じイベントに属する先行する要素が再活性化されると提唱した。これらの仮説に共通するのは、依存部が主要部の登場前に関係を結ぶことで再活性化され記憶の減衰が防がれているという見立てである。ただし、いずれの説明も、英語における主節主語～動詞間の局所性効果が存在すると予測するが、実際には適切な統制の下では観察されない (Roland et al., 2021) という点で経験的な問題がある。

本研究は、これらの仮説を発展させ、文理解のモデルに適した文法理論として (しかし局所性効果の問題とは全く独立に) 提唱されてきた**組合せ範疇文法** (CCG) (Steedman, 2000) に基づく文理解モデルとして提示する。CCG を採用する利点は3つある。第1に、英語の主節主語～動詞における局所性効果の欠如を含めて、観察されてきた局所性効果のばらつきを統一的に説明できる。第2に、なぜ依存部同士が直接関係を結ぶことができるのかという問いに理論言語学的な見地から独立した説明を与えられる。第3に、CCG は高度に (計算機に実装可能な程度に) 形式化されているため、単語列に対して可能な構文木を全て考慮して局所性効果を算出するなど、手計算による恣意性やミスの可能性を排除して反証可能な予測を立てることができる。なお、CCG により逐次的な文理解中の心理言語学的指標を説明する研究としては Stanojević et al. (2021) や梶川ほか (2023) があるが、記憶の減衰の効果を捉えようとする研究は本研究が初とみられる。以下では、2節で CCG を概観した上で、3節で CCG による文理解モデルを提示する。

## 2 組合せ範疇文法と逐次的な文理解

組合せ範疇文法 (Steedman, 2000) は語彙化文法の一形態で、各語彙項目に割り当てられた範疇に対して少数の組合せ規則を適用することで派生が進む。範疇は  $S, NP, N$  といった少数の基底範疇と、それらを  $(X/Y)$  ないし  $(X\backslash Y)$  の形で再帰的に組み合わせた複合範疇からなる。 $(X/Y)$  は右側に範疇  $Y$  の構成素をとって範疇  $X$  の構成素になること、 $(X\backslash Y)$  は左側に範疇  $Y$  の構成素をとって範疇  $X$  の構成素になることが、それぞれ(3)の規則で定められている (矢印の下に付いているのは規則の略記号)。

$$(3) \quad (X/Y) \quad Y \Rightarrow_{>} X \qquad Y \quad (X \setminus Y) \Rightarrow_{<} X$$

たとえば、*Tom chased Jerry* という文は(4)のように分析できる（各範疇の最も外側の括弧は省略する）。CCG の派生は一般にこのような、主流生成文法の木を上下反転させた形式で表記される。

$$(4) \quad \begin{array}{c} \text{Tom} \quad \text{chased} \quad \text{Jerry} \\ \hline \text{NP} \quad (\text{S} \setminus \text{NP}) / \text{NP} \quad \text{NP} \\ \hline \text{S} \setminus \text{NP} \\ \hline \text{S} \end{array}$$

CCG の大きな利点の一つは、逐次的な文理解との親和性の高さである (Steedman, 2000)。CCG では規則  $>$ ,  $<$  (合わせて関数適用規則と呼ばれる) に加えて(5)の関数合成規則、(6)の型繰り上げ規則がある。

$$(5) \quad (X/Y) \quad (Y/Z) \Rightarrow_{>B} (X/Z) \qquad (Y \setminus Z) \quad (X \setminus Y) \Rightarrow_{<B}$$

$$(6) \quad X \Rightarrow_{>T} Y / (Y \setminus X) \qquad X \Rightarrow_{<T} Y \setminus (Y / X)$$

これらの規則を用いると、(4)の文に対して、(7)の派生も与えることができる。

$$(7) \quad \begin{array}{c} \text{Tom} \quad \text{chased} \quad \text{Jerry} \\ \hline \text{NP} \quad (\text{S} \setminus \text{NP}) / \text{NP} \quad \text{NP} \\ \hline \text{S} / (\text{S} \setminus \text{NP}) \\ \hline \text{S} / \text{NP} \\ \hline \text{S} \end{array}$$

この派生では、*Tom chased* という単語列に対し  $S/NP$  という単一の範疇が与えられており、右に目的語 NP をとることで文となることを示している。これにより、(8)のような右方繰り上げ構文に対して、 $S/NP$  同士の等位接続として簡潔な分析を与えることができる。

$$(8) \quad [[_{S/NP} \text{Tom liked}] \text{ but } [_{S/NP} \text{Ben hated}]] \text{ Jerry.}$$

*Tom chased* を単一の“構成素”とみなす分析はこのように理論言語学的な根拠を持つ一方で、心理言語学的には逐次的な文理解のモデルとして扱うことができる。*Tom chased* が単一の構成素をなすということはそれに意味解釈が与えられているということであり、また範疇  $S/NP$  は次に  $NP$  が入力されれば  $S$  になるという予測とみなせる。これは主流生成文法における左隅解析戦略の下での分析(9) (例: Lewis and Vasishth, 2005) とよく似ている。

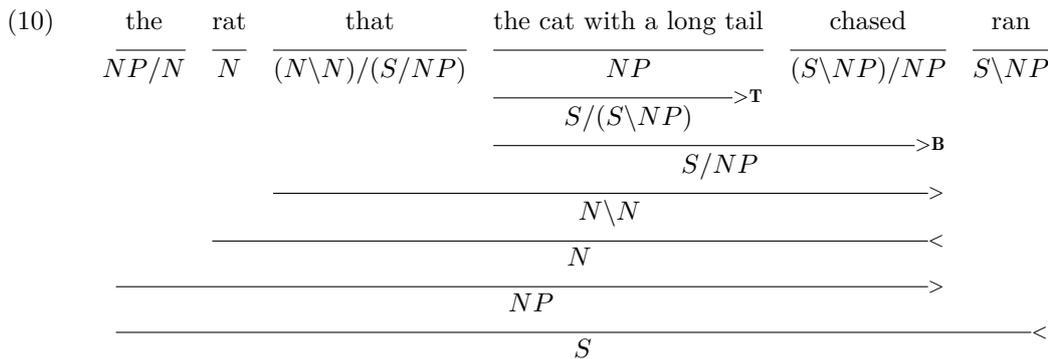
$$(9) \quad [_S [_{NP} \text{Tom}] [_{VP} [_V \text{chased}] \text{NP}]]$$

(9)のような分析に対する CCG の利点は、(i) 右方繰り上げ構文などの理論言語学的な分析による独立の根拠を持つこと、(ii) 逐次的な構造構築中の意味解釈が明示的に定まること、(iii) 長距離依存に対しても特別な機構なく拡張可能であること、(iv) *Tom chased* のような文の一部を作業記憶における単一の表象として自然に扱えること、が挙げられる。(i), (ii), (iii) は、CCG によって逐次的な文理解を捉えることへの一般的な支持を与える。他方、様々な構文における局所性効果のばらつきを捉えようとする本稿の主張にとって重要なのは (iii) と (iv) である。

### 3 組合せ範疇文法による文理解モデル

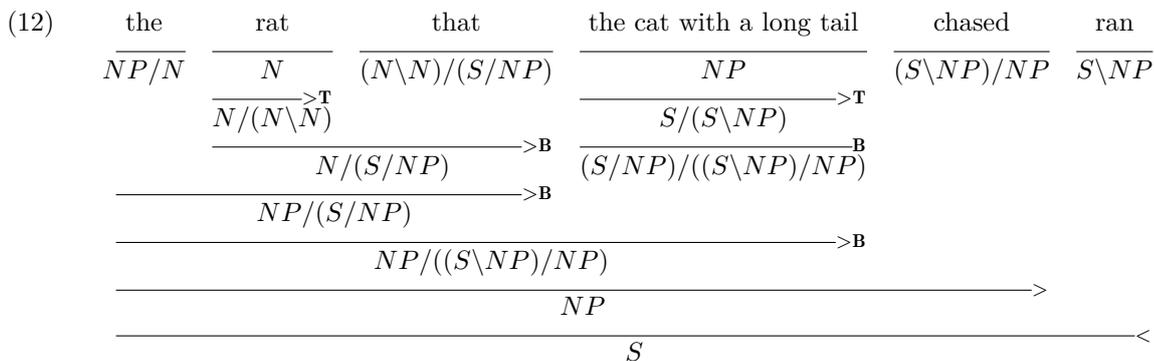
(1) で示したように、英語の関係代名詞と動詞の間では局所性効果が観察されている。この局所性効果が CCG に基づく文理解モデルで予測されることを以下に示す。まず分かりやすさのために、逐次的ではなく主流生成文法に近い

木構造の分析を(10)に示す (Demberg, 2012)。目的語を表層に欠いた文である *the cat ... chased* が範疇  $S/NP$  を持ち、*that* がそれを選択することで、痕跡や移動 (コピー) といった仕組みなく関係節の構造を捉えている。



次に(10)の逐次的な派生を示す。Demberg (2012) および Hoyt and Baldrige (2008) の示唆に基づき、分割規則 (11) を導入する。なおこの分割規則があれば、関数合成規則  $>B, <B$  は分割規則と関数適用規則に分解することができるため、徒に規則が増えているわけではない (表記の簡便のため関数合成規則も使い続ける)。

(11)  $X/Y \Rightarrow_B (X/Z)/(Y/Z)$



分割規則により、先行詞から関係節主語まで (*the rat ... tail*) を1つの構成素にまとめられる。ここで重要なのは、(13)に示すように、未完成の関係節主語と先行要素を1つの構成素にまとめることはできないという点である。

(13)

<u>the rat that</u>	<u>the cat with</u>
$NP/(S/NP)$	$NP/NP$
—————*	

より一般的に述べると、文の逐次的な入力に対してひとつながりの木構造を作れることを **connectedness** (“つながり”と仮訳する) と言うが、Demberg (2012) が指摘するように CCG の逐次解析は完全なつながりを達成できない。そこで、新しい要素とつながることのできない *the rat that* のような構成素は、作業記憶の中に言わば置かれたままの状態になり、徐々に減衰すると考えてみる。これが局所性効果をもたらすというのが本研究の提案(14)である。

(14) CCG に基づく局所性効果

$i$  番目の語の入力に応じた解析に際して、組合せ規則をある構成素  $C$  に適用する場合、 $f(i-j)$  の処理負荷がかかる。ここで  $f(x)$  は  $x$  に応じて単調増加する関数であり (cf. Gibson, 1998)、 $j$  は  $C$  が生成された時点もしくは  $C$  が最後に組合せ規則の適用対象となった時点の語の位置である。

本研究では、この仮説に基づく局所性効果を算出するため、文理解のモデルを Python を用いて計算機上で実装した。計算機を使用する動機は2つある。第1に、局所性効果の説明の鍵となっているのは“つながり”の欠如であり、

the	rat	that	the	cat
$NP/N$	$N$	$(N\backslash N)/(S/NP)$	$NP/N$	$N$
	$NP$	$N/(S/NP)$		$NP$
		$NP/(S/NP)$		$(N\backslash N)/(S\backslash NP/NP)^*$
				$N/(S\backslash NP/NP)^*$
				$NP/(S\backslash NP/NP)^*$

図1 CKY法の例。\*が付されたセルには他にもスラッシュの向きだけが異なる範疇が入るが省略。

すなわちある構成素列を1つの構成素にまとめる導出の欠如である。そのような導出が欠如していることを確認するには、すべての可能な導出を検討しなければならない、手計算では限界がある。第2に、逐次的な文理解モデルとしては、最終的な正解木以外の解析も考慮しなければならない。たとえば(12)では、*the rat that the cat*が入力された時点でこれを1つの構成素  $NP/((S\backslash NP)/NP)$  にまとめることができるが、この構成素は正解木には現れない。しかし、この構成素を作る際に *the rat that* が活性化されているので、最終的な局所性効果の算出にはこの解析も考慮しなければならない。こうした一時的曖昧性を考慮する簡便な方法はCKY法(下記)であるが、これも計算量が多く手計算では容易ではない。そのため計算機による実装がモデルの予測を正しく算出する上で重要である。コードは <https://github.com/isono-s/ccg-locality> にて公開している。

CKY法の例を図1に示す(CCGにおけるCKY法についてはSteedman(2000)を参照)。CKY法ではこのようなチャートを埋めていくことで解析が行われる。入力された語は最上段のセルに入り、各語の範疇がそのすぐ下のセルに入っている。その下に進むごとに、右隣の語も含めた構成素の範疇が示されており、たとえば *that* の列の一番下の  $NP/(S/NP)$  は *the rat that* に与えられる範疇である。この範疇は直上の  $N/(S/NP)$  (*rat that* の範疇) と左端の  $NP/N$  (*the* の範疇) に規則  $> B$  を適用することで求められる。このように、セルを左から順次埋めていくことで可能な構造を全て導出するのがCKY法による逐次的な文理解のモデルである。

今回の実装では、次のような仮定を置いた。チャート上の各セルが、生成されたいし最後に規則適用を受けた時点のタイムスタンプ( $j$ 語目)を持つ。 $i$ 語目の時点で、タイムスタンプ  $j$ を持つセルが規則適用を受けるときには、 $f(i-j)$ のコストがかかる。ただし  $f$  は恒等関数とした。また、タイムスタンプの更新やコストの発生は全ての規則適用に起きるわけではなく、各列で可能な限り最大の(つまり埋まっているセルの中で一番下の)構成素を生じさせるもので、かつそのような規則適用の中でも最も左側の構成素が大きいもののみとした。規則は関数適用、型繰り上げ、分割のみとした。ある範疇  $A$  と  $B$  から新たな範疇を生じさせる場合、 $A$  と  $B$  に一箇の規則(型繰り上げ、分割)を最大3回ずつまで適用した上で、関数適用規則が適用できるかを調べた。ただし型繰り上げは英語の  $NP$  および  $N$  にしか適用できない。同一セルに複数の可能な範疇が生じる場合、最も単純なもの(スラッシュの数が少ないもの)全てを入れた。規則の適用回数やセルへの挿入数を限定するのは計算の組合せ爆発を防ぐためである。このようなモデルに、英語の関係節構文・日本語のSOV構文・NPI構文を解析するのに必要な小規模なレキシコンを与えて文解析を行わせた。以下、そのシミュレーション結果を元に議論する。

英語関係節(12)では、9番目の語 *tail* の入力時に、*the rat that* と *the cat with a long tail* を対象として規則  $> B$  が適用される。後者は今生成されたばかりなのでコストは  $f(9-9) = f(0)$  である。一方前者の *the rat that* が最後に組合せ規則の適用対象となったのは5番目の語 *cat* の時点である。したがって、*the rat that* を記憶から取り出す負荷は  $f(9-5) = f(4)$  となる。この値は関係節主語が長くなる(例：*the cat with a really really long tail* なら  $f(11-5) = f(6)$ ) と大きくなるため、局所性効果が予測される。先行研究で局所性効果が観察されてきたのは *chased* に相当する動詞位置であるが、*tail* の位置からのスピルオーバー(Mitchell, 1984)とみなすことができる。実際、Bartek et al. (2011)で報告されているデータでは、*tail* 相当の位置の効果は統計的には検定されていないものの、数値的には既に局所性効果が生じているとみられる。

このモデルは、従来の仮説と異なり、この構文での主節主語～動詞間の局所性効果の欠如をも同時に説明できる。(12)では、主節動詞 *ran* の入力時に新たに必要な処理は *the rat ... chased* と *ran* の間の  $<$  適用のみであり、そのコ

ストは  $f(11 - 10) = f(1)$  である。この値は関係節の長さに依存しないので、局所性効果は生じない。主要部間の距離ではなく、逐次構築される構成素間の距離を数える点が従来の理論との違いである。

このモデルは、日本語における局所性効果の有無をも説明しうる。CCG では日本語の逐次的な処理は次のように分析できる (戸次, 2010)。 $\mathbf{T}$  は変数である。

$$(15) \quad \begin{array}{c} \text{ネコが} \quad \text{ネズミを} \quad \text{追いかけた} \\ \hline \frac{\mathbf{T}/(\mathbf{T}\backslash NP_{ga}) \quad \mathbf{T}/(\mathbf{T}\backslash NP_o) \quad (S_v\backslash NP_{ga})\backslash NP_o}{\mathbf{T}/((\mathbf{T}\backslash NP_o)\backslash NP_{ga})} \xrightarrow{\text{B}} \\ \hline S_v \end{array} \xrightarrow{\quad}$$

この例から明らかなように、日本語の項や付加詞は、動詞が現れる前に1つの構成素にまとめることができる。そのため、個別の項や付加詞と動詞の距離が離れても、局所性効果は生じないことが導かれる。これは、動詞に先行する項が互いに関係を結んでいるという点では Nakatani (2021a) や Isono and Hirose (2022b) の説明と共通する。

次に (2) で見たような NPI と動詞の間の局所性効果の分析を考える。NPI 「ネコしか」は、後ろに否定辞 ( $S_a^{+n}$ ) を要求するので  $S_a^{+n}/(S_a^{+n}\backslash NP)$  という範疇を割り当てるとする。しかし、このままでは(15)と同様に「ネズミを」とすぐにつながってしまい、局所性効果が生じない。考えられる分析の一つは、「ネズミを」が変数  $\mathbf{T}$  でなく  $(S_v\backslash NP_{ga})\backslash NP_o$ 、すなわち他動詞を要求するようにすることである。この場合、「ネコしか」は「ネズミを追いかけてな k」としかつながらないため、NPI から否定辞までの距離が局所性効果を生じる。

$$(16) \quad \begin{array}{c} \text{ネコしか} \quad \text{ネズミを} \quad \text{追いかけて} \quad \text{な k} \quad \text{at} \quad \text{た} \\ \hline \frac{S_a^{+n}/(S_a^{+n}\backslash NP) \quad (S_v\backslash NP_{ga})/((S_v\backslash NP_{ga})\backslash NP_o) \quad (S_v\backslash NP_{ga})\backslash NP_o \quad S_a^{+n}\backslash S_v \quad S_v\backslash S_a \quad S_t\backslash S_v}{S_v\backslash NP_{ga}} \xrightarrow{\quad} \\ \hline S_a^{+n}\backslash NP_{ga} \quad \leftarrow \text{B} \\ \hline S_a^{+n} \quad \xrightarrow{\quad} \\ \hline S_v \quad \leftarrow \\ \hline S_t \quad \leftarrow \end{array}$$

「ネコしか」と「ネズミを」の合成をもっと直接的に禁じる方法として、slash modality を使う方法もある。Slash modality は範疇のスラッシュにつく記号で、各種組合せ規則の適用可否を表す (Baldrige & Kruijff, 2003)。合成規則の適用を禁じる modality である  $\star$  を用いて「ネコしか」の範疇を  $S_a^{+n}/\star(S_a^{+n}\backslash NP)$  とすれば、合成規則の適用を回避でき、(16) と同型の導出木となる。いずれの分析が妥当かは、理論言語学的な見地からも検討が必要である。

## 4 結語

CCG に基づく文理解モデルにより、言語や構文による局所性効果のばらつきが統一的に説明できることを示した。今後の研究の方向性としては、計算機への実装が可能なことを生かしてコーパスに付された読み時間に対するモデルの予測力を調べることや、局所性効果以外の現象、たとえば干渉現象の説明を試みることが考えられる。

**【謝辞】** 東京大学大学院総合文化研究科の広瀬友紀先生、梶川康平氏との議論から多大な示唆を受けました。記して感謝します。

## References

Baldrige, J., & Kruijff, G.-J. (2003). Multi-modal Combinatory Categorical Grammar. *Proceedings of the 11th Annual Meeting of the European Association for Computational Linguistics*.

- Bartek, B., Lewis, R. L., Vasishth, S., & Smith, M. R. (2011). In search of on-line locality effects in sentence comprehension. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 37(5), 1178–1198. <https://doi.org/10.1037/a0024194>
- Demberg, V. (2012). Incremental derivations in CCG. *Proceedings of the 11th International Workshop on Tree Adjoining Grammars and Related Formalisms (TAG+11)*, 198–206.
- Gibson, E. (1998). Linguistic complexity: Locality of syntactic dependencies. *Cognition*, 68, 1–76. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(98\)00034-1](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(98)00034-1)
- Gibson, E. (2000). The dependency locality theory: A distance-based theory of linguistic complexity. In A. P. Marantz, Y. Miyashita, & W. O’Neil (Eds.), *Image, language, brain* (pp. 95–126). MIT Press.
- Grodner, D., & Gibson, E. (2005). Consequences of the serial nature of linguistic input for sentential complexity. *Cognitive Science*, 29(2), 261–290. <https://doi.org/10.1207/s15516709cog0000-7>
- Hoyt, F., & Baldridge, J. (2008). A logical basis for the D combinator and normal form in CCG. *Proceedings of the 46th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*, 326–334.
- Isono, S., & Hirose, Y. (2022a). Locality effect before the verb as evidence of pre-verb reactivation. *The 23rd Annual International Conference of The Japanese Society for Language Sciences*.
- Isono, S., & Hirose, Y. (2022b). Psycholinguistic evidence for severing arguments from the verb. In K. Horie, K. Akita, Y. Kubota, D. Y. Oshima, & A. Utsugi (Eds.), *Japanese/Korean linguistics 29* (pp. 437–446). CSLI Publications.
- Konieczny, L. (2000). Locality and parsing complexity. *Journal of Psycholinguistic Research*, 29(6), 627–645. <https://doi.org/10.1023/A:1026528912821>
- Levy, R., Fedorenko, E., & Gibson, E. (2013). The syntactic complexity of Russian relative clauses. *Journal of Memory and Language*, 69(4), 461–495. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2012.10.005>
- Levy, R., & Keller, F. (2013). Expectation and locality effects in German verb-final structures. *Journal of Memory and Language*, 68(2), 199–222. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2012.02.005>
- Lewis, R. L., & Vasishth, S. (2005). An activation-based model of sentence processing as skilled memory retrieval. *Cognitive Science*, 29(3), 375–419. [https://doi.org/10.1207/s15516709cog0000\\_25](https://doi.org/10.1207/s15516709cog0000_25)
- McElree, B. (2000). Sentence comprehension is mediated by content-addressable memory structures. *Journal of Psycholinguistic Research*, 29(2), 111–123. <https://doi.org/10.1023/A:1005184709695>
- Mitchell, D. C. (1984). An evaluation of subject-paced reading tasks and other methods for investigating immediate processes in reading. In D. E. Kieras & M. A. Just (Eds.), *New methods in reading comprehension research* (pp. 69–89). Erlbaum.
- Nakatani, K. (2021a). Integrating different types of long-distance dependencies: A case study of a negative polarity dependency in Japanese. *International Symposium on Issues in Japanese Psycholinguistics from Comparative Perspective*.
- Nakatani, K. (2021b). Locality effects in the processing of negative-sensitive adverbials in Japanese. In R. Okabe, J. Yashima, Y. Kubota, & T. Isono (Eds.), *The joy and enjoyment of linguistic research: A festschrift for Takene Ito* (pp. 462–472). Kaitakusya.
- Nakatani, K., & Gibson, E. (2010). An on-line study of Japanese nesting complexity. *Cognitive Science*, 34(1), 94–112. <https://doi.org/10.1111/j.1551-6709.2009.01067.x>
- Ono, H., & Nakatani, K. (2014). Integration costs in the processing of Japanese *wh*-interrogative sentences. *Studies in Language Sciences*, 13, 13–31.
- Roland, D., Mauner, G., & Hirose, Y. (2021). The processing of pronominal relative clauses: Evidence from eye movements. *Journal of Memory and Language*, 119, 104244. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2021.104244>
- Stanojević, M., Bhattasali, S., Dunagan, D., Campanelli, L., Steedman, M., Brennan, J., & Hale, J. (2021). Modeling incremental language comprehension in the brain with Combinatory Categorical Grammar. *Proceedings of the Workshop on Cognitive Modeling and Computational Linguistics*, 23–38. <https://doi.org/10.18653/v1/2021.cmcl-1.3>
- Steedman, M. (2000). *The syntactic process*. MIT Press.
- 戸次 大介. (2010). 日本語文法の形式理論. くろしお出版.
- 梶川 康平, 吉田 遼, & 大関 洋平. (2023). CCG による日本語文処理のモデリング. 言語処理学会第 29 回年次大会.