

# 新たな言語の文構造を正しく構築する際に who（誰が）、when（いつ）、what（何を）を規定する下前頭回背側部の活動上昇

梅島奎立<sup>1</sup> スザンヌ・フリント<sup>2</sup> 酒井邦嘉<sup>1\*</sup>

[Scientific Reports](https://www.nature.com/articles/s41598-023-50896-6) volume 14, Article number: 54 (2024)  
<https://www.nature.com/articles/s41598-023-50896-6>

## 要旨

第1言語習得を制約する原理は第2言語習得をも制約すると論じられてきた。しかし、その脳科学的根拠は乏しく、第3言語及び第4言語以降については少ない。我々はこの主張を評価するために、少なくとも2言語を習得した参加者にとって新しい言語である、カザフ語の複雑な文構造の構築に焦点を当てて、fMRI実験を行った。参加者は、発話された文について、文法性判断と主語動詞の対応課題を行った。実験課題の一つで到達した成績レベルに基づいて参加者を2つの群に分けた：I群は高得点獲得者、II群は低得点獲得者である。両群の直接比較、つまり構文を理解できた参加者、つまり「誰が〈who〉」を調べたところ、I群が左下前頭回（L. IFG）背側部において有意により強い活性化を示した。I群に注目し、我々の実験における初期段階と最終段階の比較によってどの文構造〈what〉を理解したのかを調べ、また、いつ〈when〉文構造が理解されたかを調べた。これらの解析には、さらにL. IFG背側部のみの局所的な活性化を示した。個々の参加者において文提示中に測定されたL. IFG背側部の強い活性化から、これに続く課題の実行において、より高い正答率とより短い反応時間を予測できた。これらの実験結果は、課題の難易度や記憶負荷では説明できないことであり、L. IFG背側部が新しい目標言語の文法習得の初期から中間段階において、重要かつ一貫した役割を果たすことを示している。このようなL. IFG背側部の機能的特異性は、目標とする第2言語や第3言語以上の言語獲得の研究における累積増進モデルの主張と一致する脳科学的証拠を提示している。

## 序論

累積増進モデル（CEM）は、多言語がどのように習得されるかを説明する仮説である；このモデルでは、以前に習得した言語の知識は、その後の言語習得を容易にすることができる<sup>1,4</sup>。CEMは、第1言語（L1）獲得プロセスを制約する生物学的素養（生まれながらに持っている）の原理が、第2言語（L2）の二言語習得過程も制約すると一貫して主張している<sup>5</sup>。最近の機能的磁気共鳴画像法（fMRI）による実験<sup>6</sup>において、我々はこのモデルについて、新しい言語、すなわち二言語話者にとって第3言語（L3）、多言語話者の場合は第4言語（L4）であるカザフ語の文構造を習得する際に、多言語話者[L1:日本語; L2:英語; 第3言語（L3）：主としてスペイン語]と二言語話者[L1:日本語; L2:英語]の両群において、同じ文法関連脳領域が活性化されるという脳科学的な裏付けを得ている。さらに、文法関連脳内ネットワークと領域一般性脳内ネットワークの両方が、二言語話者よりも多言語話者においてより強化された。多言語話者と二言語話者の直接比較では、多言語話者において左下前頭回（L. IFG）腹側部と右舌状回（R. LG）で有意な活性化を示した。さらに、運動前野外側部（LPMC）、上・中側頭回（STG/MTG）を含む両側の前頭・側頭領域における多言語話者

の活性化は、次に続く新しい文法条件においても、初期レベルよりも高いレベルで維持された。一方、二言語話者の大脳基底核/視床と小脳の活性化は、各課題条件開始時の初期レベルに戻った。上記の領域は多言語習得の神経基盤として同定されたが、L1 および L2 習得を調査した先行研究では、L. IFG 背側部が L1/L2 の統辞処理に共通に関与していることが示されており<sup>7-9</sup>、L. IFG 背側部は「文法中枢」として認識されている<sup>10</sup>。なお、L. IFG 背側部における活性化は、上述の研究で最も厳密な多言語群対二言語群の比較では取り除かれた。一方 L. IFG と左上側頭回 (L. STG) /左中側頭回 (MTG) が中核言語領域を形成していることが示唆されている<sup>11,12</sup>。本研究では、L3、L4、...、Ln の文法の獲得に関わる最も重要な統辞処理は、同じ中核領域である L. IFG 背側部が引き続き関与しており、言語習得に関する CEM の説明と一致する、という仮説を立てた。その他の理論や仮説については、我々の以前の論文<sup>6</sup>を参照されたい。本論文では、どの皮質領域 (特に L. IFG 背側部、L. IFG 腹側部、または L. STG/MTG) が L3/L4s の文構造の構築を反映しているかを明らかにすることを目的としている。

今回の研究は、前回のカザフ語での実験の続編である。構造依存の文法的特徴をうまく獲得することに関与する神経過程をさらに解明する。カザフ語も日本語も膠着語である。(カザフ語の文の語順は、日本語の文の語順とおおむね一致している。カザフ語も日本語も修飾語-主辞 (すなわち主辞終端型) の語順の膠着語であり、平叙文では主語-目的語-動詞 (SOV) の語順である<sup>13</sup>。したがって、カザフ語の文の語順は、一般に日本語の文の語順と一致する。しかし、興味深いことに、我々の先行および今回の研究の参加者は、この語順の一致に関する知識について意識していなかった。このような言語的事実を、参加者は実験中に知らされることもなかった。一方、主語と動詞 (SV) の一致 (すなわち、主語の人称や数と一致する動詞の接尾辞) は日本語にはないが、英語やスペイン語と同じようにカザフ語には SV 一致が存在する。この統辞の違いについても、参加者は知らされていなかった。

上記の獲得過程を理解するために、我々は前回の研究で、参加者がカザフ語の統辞構造に徐々に慣れるように 3 つの段階的な文法条件を用いた: G1、G2 (G1 獲得後)、G3 (G1、G2 獲得後) である。[G1-G3 の文例については、梅島ら (2021) の補足情報 表 S4 を参照]。各条件で基準に達しなかった参加者は、次の段階やレベルに進めなかった。G1 条件のもとでは、[[N<sub>1</sub> V<sub>1</sub>] al [N<sub>2</sub> V<sub>2</sub>]] で構成される al("and")を含む等位接続文を提示した。[N<sub>1</sub>V<sub>1</sub>]と[N<sub>2</sub>V<sub>2</sub>]のそれぞれの構造 (同じ添え字のセットで SV ペアを定義) について、SV の一致を習得できたかどうかを調べた。G2 条件のもとでは、dep("that")を含む 2 つの単純な文からなる入れ子文を提示した。我々は [N<sub>1</sub> [N<sub>2</sub> V<sub>2</sub>] dep V<sub>1</sub>] の構造について調べた。そこでは [N<sub>1</sub> V<sub>1</sub>] と [N<sub>2</sub> V<sub>2</sub>] のペアそれぞれに、G1 と同様に SV の一致が適用される。G3 条件のもとで、kezde (「いつ」または「時」の所格) を伴う関係節を含む文を提示した。[ [N<sub>2</sub> V<sub>2</sub>] kezde N<sub>1</sub> V<sub>1</sub>] または [N<sub>1</sub> V<sub>1</sub>, [N<sub>2</sub> V<sub>2</sub>] kezde] の構造を調べた。カザフ語では、形容詞分詞 (この場合は V<sub>2</sub>) の接尾辞は対応する主語(N<sub>2</sub>)の人称や数に関係なく、常に固定される。つまり、SV の一致は主節の[N<sub>1</sub> V<sub>1</sub>]のペアで成立するが、G3 条件下の関係節の[N<sub>2</sub> V<sub>2</sub>]のペアでは SV の一致は成立しない。前回の研究で G1-G3 条件において、高い習熟度で合格した参加者は本研究における G4 条件に進んだ (補足情報 表 S1 参照)。

G4 条件下では、主節と従属関係節からなる文をテストした。その文は目的語としての名詞 (カザフ語では基本的に -di/-di という接尾辞が付く) を含む。G4 条件での各刺激文は adamdi (man の対格) または adam (man

の主格)を含む。例えば、adamdiを伴う形容詞分詞は、「N<sub>1</sub> [N V<sub>2</sub> adamdi] V<sub>1</sub>」(英語の例：We (N<sub>1</sub>) recognized (V<sub>1</sub>) [a man who knew (V<sub>2</sub>) John (N)] 「私たち (N<sub>1</sub>) は [ジョン (N) を知っている (V<sub>2</sub>) の人] だと認識した (V<sub>1</sub>)」) という構造を構築する。添え字のない N は以下、目的語を表す。例えば adam では、「[N<sub>2</sub> V<sub>2</sub> adam] N V<sub>1</sub>」 という構造が構築される (英語の例：[A man whom John (N<sub>2</sub>) knew (V<sub>2</sub>)] recognized (V<sub>1</sub>) us (N) 「ジョンが知っていた男の人が私たちが認識した」)。G3 条件と同様に、SV の一致は主節の [N<sub>1</sub> V<sub>1</sub>] のペアには必須であるが、関係節の [N<sub>2</sub> V<sub>2</sub>] のペアには必須ではない。

G4 条件で使用される各文では、その統辞構造は第一に 2 行 2 列の要因デザインによって決定される (図 1) : 主節の主辞位置 (目的語または主語) と関係節のギャップ位置 (主語か目的語のどちらか) である。合計で 4 種類の構造がランダムな順序で参加者に提示され、それにより、G4 条件は G1-G3 条件よりも難易度が高くなった。CEM に関しては、いかなる言語固有の文法習得の基礎における共通の計算システムが、G4 条件のような難易度の高い文法的条件下でも決定的に関与していることを示すことができるかどうか、大きな関心事である。

主辞先行型言語である英語では、主辞 "the man" と空範疇 (e) でギャップを示す目的格関係節 (例えば (i) の文 "the man [whom John knew] ジョンが知っていた人" という文) は、"John knew the man ジョンがその男の人を知っていた" という意味を持つ。関係節を含む英語文を用いた脳画像研究では、このような目的格関係節は文法処理の負荷が増大することが示されている。すなわち (ii) "the man [who e knew John]" のような主格関係節よりも文法処理の負荷が高い<sup>15,16</sup>。このような目的格関係節の統辞負荷の増大は、主辞とギャップの間の表層構造 "距離" の観点から説明されている。それは主格関係節 [(ii) 参照] よりも目的格関係節 [(i) 参照] において構造的にも直線的にも離れている。カザフ語や日本語のような主辞終端型言語では、主辞とギャップとの間の距離は、構造的に離れている (すなわち、ギャップがより深く埋め込まれている) が、主格関係節 (ギャップの位置 : 主語) の場合よりも目的格関係節 (ギャップの位置 : 目的語) の方が、直線的には近い。それは、図 1 の赤いジグザグの [何度も折れ曲がった] 矢印と [そうではない] 真っ直ぐの矢印を比べてみるとわかる。目的格関係節を伴う例文は表 1 の (3) と (5) に、主格関係節を伴う例文は (1) と (7) で示されている。目的格関係節の統辞負荷が高いことの構造的説明は、日本語において実験で立証されている<sup>17</sup>。

adam と主動詞 (V<sub>1</sub>) の間の構造的距離は、文の表層構造における直線距離と同様に、下層の木構造によって定義されており、adamdi と V<sub>1</sub> との間の距離よりも大きい。したがって、前者 (主辞の位置 : 主語) は後者 (主辞の位置 : 目的語 ; 図 1 参照) よりも文法的に負荷が高いという仮説が成り立つ。adamdi を含む例文を表 1 の (1) と (3) に ; adam を含む例文を (5) と (7) に示す。これらの負荷を組み合わせると、adam (主辞の位置 : 主語) と目的格関係節 (ギャップの位置 : 目的語) からなる主語-目的語 [SO; (5) 参照] の構造は、調査した 4 つの構造の中でもっとも高い統辞負荷を学習者に与える可能性がある。対照的に、adamdi (主辞の位置 : 目的語) と主格関係節 (ギャップの位置 : 主語) を伴う目的語-主語 [OS, (1) 参照] 構造は学習者に与える統辞負荷は最も低い。OS 構造と SO 構造 (図 1 の 2 行 2 列の主対角位置参照) が、他の構造と正確に判別されるならば、主辞やギャップの位置に関する言語的知識は学習者に累積されたと仮定することができる。

図1

### 関係節を含むカザフ語文の統辞構造

カザフ語の文は、2行2列の形式で示される OS、OO、SO、SS の4つの構造条件で示された。関係節（表1の各文例における括弧[ ]）では、ギャップは空範疇 (e) で示され、これは発音されないが、主節の主辞（これらの例では adamdi または adam）に対応している。名詞 adamdi（青字）は“man”の対格で、adam（橙字）は主格である。各パネルにおいて、二項分岐の木構造が示され、それぞれの赤色の折れ矢印は、主辞とギャップとの間の統辞的關係を示す。例えば、目的語-主語 (OS) 構造は、主辞の位置（矢印の始点）に目的語があることを示し、ギャップの位置（矢印の終点）に主語があることを示している。それぞれの文では、対応する主語/名詞または代名詞(N)と述語/動詞(V)に同じ添え字が付けられている。添え字1と2はそれぞれ主節と関係節を表している。添え字の無いN（灰色字で表示）は常に目的語である。名詞と動詞の下の双方向矢印は、主語と動詞(SV)のペアを表している。

このような統辞負荷以外の非言語的要因も、短期記憶負荷（「ワーキングメモリー」を含む）の制約とともに課題の難易度に影響を与える可能性があることに注意すべきである。もしそうであれば正答率を低下させ、反応時間(RT)をも増加させる可能性がある。“妨害刺激”(標的外)の数が一連の探索処理に影響することはよく知られている<sup>18</sup>。主語—主語[SS;表1の(7)を参照]構造は、課題自体への対処が最も困難であった。なぜなら主語と動詞のペアを正しく識別する課題(後述)では、これが妨害刺激となる直接目的語(図1で灰色で示した名詞)が2つあるからである。対照的に、目的語-目的語[OO;(3)参照]構造は、このような妨害刺激がないため、最も対処しやすかった。妨害刺激が一つあるOS構造とSO構造は、参加者にとってSS構造とOO構造の中間の難易度であった可能性がある。

L1/L2の獲得とそれに伴う脳の活性化の關係について、私たちは以前、「獲得の初期に皮質の活性化が増加し、その後活性化が維持され、言語能力の定着に伴って活性が低下する」<sup>10</sup>という可能性を示唆していた。このような多段階の変化は、それぞれ文法習得の初期段階、中間段階、最終段階に関連している。多段階での変化は急速に起こる可能性がある。なぜならG1-G3条件を通しての時間経過の中で、多言語話者の活性化に劇的な変化が観察されたからである<sup>6</sup>。本研究では、G4条件において新しい統辞知識を獲得する学習者の大脳皮質の活性化が増加するであろう文法・言語習得の初期段階から中間段階に焦点を当てた。この条件では、OS、OO、SOおよびSSの文構造からなる文刺激(以下、構造条件と記す)を、自然言語習得の状態と同じように完全に混合して用いたことに注意されたい。

表1

#### 4つの構造条件における文構造

それぞれの文構造について、その統辞構造(角括弧 [ ] はここでは関係節を示す)はカザフ語の正文の例で示され、日本語訳、英語訳と一緒に非文(\*)の例が示されている。

カザフ語では、日本語とは異なり、主節の動詞(V1)は常に主語(N1)と人称・数において一致し、関係節の動詞(V2)は常にSV一致のない形容詞分詞である(補足情報表S3参照)。参加者はこのような文法知識を、G1-G3試行(「はじめに」参照)を通じて、明らかな言葉による指示なしに習得した。非文法的な例文中の太字の単語は、SVの一致の誤りを示す。

#### 実験デザイン

本研究では、基本的に以前の研究<sup>6</sup>のデザインに従った。ここでは少し変更した点は、デモ試行で獲得された言語知識がその後のテスト試行でテストされるようにデモ試行とテスト試行を交互に8回ずつ行った。カザフ語の統辞構造や規則に関する明確な情報を提示せず、代わりにデモ試行中に視覚的な記号(+または-のいずれか)を提示した。それぞれの記号は文の状態:文法性とSVの対応を示す。主節と関係節の構造を持つ各文について、文の長さや音節数を調節した(名詞:1-3音節、動詞:2-4音節。補足情報、『本研究で使用したカザフ語の語彙』を参照)3つの名詞と2つの動詞が提示された。G4条件で使用された単語に関しては、参加者はG1-G3の実験の試行によりこれらの単語には既に馴染みがあった。

磁気共鳴(MR)のスキャンが開始される前に、参加者には説明書(日本語で記載)が渡された。そこには「以下の例文は、あなたが聞く文の英訳です。文は4種類あり、一度に1つずつ提示されます。文構造において目的語があることに注意してください。すべての文において、三人称名詞のhe、John、Dan、manは異なる人物を表しています。[これにより、文中の名詞間のあいまいな同一指示を避けつつ、しかし統辞構造には影響を与えない]。

Example 1: The man, whom you understood, knew John,

Example 2: The man, who knew Dan, recognized him,

Example 3: We understood the man, whom John knew, and

Example 4: Dan recognized the man, who knew you”

デモ試行では、ヘッドホンを使用した各参加者は、文(ここでは大文字でSentenceと表記)を聞き、次に同じ試行の文から抜きだされた名詞と動詞のペア(「NV pair」)を聞く(図2a)。NV pairの中の名詞は、Sentenceの直接目的語になりうるし、NV pairの名詞と動詞は、屈折接尾辞なしに提示された。文SentenceとNV pairの各刺激に対して、視覚的な記号(+または-)が同時に参加者の装着しているビデオゴーグルの画面に表示された。ゴーグル画面に表示された+/-記号は、その文が文法的(+か非文法的(-)かを示している;非文法的な文には必ず動詞接尾辞の誤りが含まれていた。各NV pairに関する+/-記号は、文構造において、そのSVのペアと一致する(+か、一致しない(-)かを示した。

## 図2

### デモ試行とテスト試行における時間的事象

(a) デモ試行では、カザフ語の文 [文法的あるいは非文法的] が聴覚的に (音声で) 提示され、その後に NV pair [文構造の2つの SV ペアと一致あるいは不一致、下線部の単語は不一致を示す] が提示された。各 NV pair では、名詞 (または代名詞) は常に対格に対して接尾辞を伴わずに提示され (たとえば、adamdi は adam)、そして動詞は常に単純過去形三人称単数の接尾辞で提示された。文と同時に提示される + / - 記号は文の文法性 / 非文法性を表し、NV pair に対する + / - 記号は一致 / 不一致を示した (上記参照)。この図に示された文は、「私たちはジョンを知っている人がわかった。」という意味である。(b) テスト試行では、5つのカザフ語単語 (図中の「語彙リスト」) が聴覚的に提示された; 英語に翻訳された個々の単語は視覚的に提示された。この語彙リストの後に、語彙リストの5つの単語すべてを使った文が続く。参加者は文法課題 (GR 課題) において + / - 記号のボタンを選んだ。その後、NV pair が提示され、参加者はマッチングの正誤の判断を求められた (上記参照)。ここでも参加者は主語動詞課題 (SV 課題) で + / - ボタンを選択した。活性化分析においては、テスト試行における Sentence と NV pair の時間的事象のみに注目した。

テスト試行では、+ と - 記号の両方が提示され (図 2b)、参加者は Sentence に対して一つを選択し、次に NV pair に対して更に一つを選択した (上部参照)。これらの課題はそれぞれ文法課題 (GR 課題)、主語-動詞課題 (SV 課題) と名付けられた。GR 課題が参加者に文に対して文法性判断を要求する一方で、SV 課題では、NV pair が文構造における2つの SV ペアのうちの1つと一致するかしないかを判断する課題であり、主節と関係節それぞれにおいて SV ペアを識別しなければならない。この SV 課題はさらに抽象的空範疇の統辞的分析を必要とする。(図 1 参照)

SV 課題の正答率において、2つのピークの間60%に遷移点を持つ二峰性分布が OS と SO のそれぞれの条件下で観察された (補足情報 図 S1 参照)。これらの結果に基づき、本実験では、参加者が SV 課題の OS と SO の両条件において60%以上の正答率を達成しなければならないという基準を設定した。(図 1 の主対角線に関する上記の説明を参照)。参加者を2つの群に分けた: I 群は基準値に達した者、II 群は基準値に達しなかった者である。この2つの群は、前回の G1-G3 の実験で G4 に達した右利きの参加者全員で構成された。この2つの群の分け方は、もはや二言語話者か多言語話者かではなく (補足情報表 S1 参照)、新しい言語の習熟度に基づくものである。

参加者に Sentence が提示される間、語彙レベルの処理は、SV の一致に必要な動詞の接尾辞を識別することと同様に、対格形 (例: adamdi と Johndi) から名詞の主格形 (例: adam と John) を識別することに関係している。統辞処理は、音韻と意味の情報の統合に関係する句レベルの構造の構築においても重要であった。一方、NV pair の提示では、主節と関係節それぞれにおける SV ペアの識別が必要であった。Sentence と NV pair のどちらかの事象の時の fMRI 活性化に注目すると共通かつ特徴的な統辞処理が明らかになるはずである。

CEM (累積増進モデル) 仮説によれば、学習者が L2/L3 での経験がより多ければ、個人差はあるけれども、群全体の効果において L4 での習熟度がより高いことが明らかである。L2/L3 での経験が少ない参加者は、最終的に L4 で、L2/L3 の経験が十分な参加者と同じように習熟するであろう。しかし、L2/L3 の経験の長さ、ある

いは深さ（言語を経験している期間の長さや密接さ）に避けられない差があるならば、L4での成績や活性化にも著しい差異が生じることが予想されるであろう。同様に、群Iと群II（"who 誰が"）におけるL4の習熟度の違いは、CEMと一貫して、L2/L3sへの接している時間の違いをも反映しているかもしれない。また、新しい文法の獲得には複数の段階があるが、初期段階、中間段階、最終段階（"when いつ"）がCEMに関連するのかどうかを明らかにする必要もある。I群とII群、また初期段階と中間段階（つまり、今回のテストではそれぞれ初期段階と最終段階）の間に関連する脳の活性化を比較することで、我々は統辞関連ネットワークの中で、最も決定的な領域での累積増進が観察される<sup>19,20</sup>という仮説を立てた。

## 結果

### カザフ語の総合的な習熟度の向上

カザフ語の習熟度の向上に関しては、参加者間で大きな差があった；これにより、参加者が課題をどれだけよく出来たかによって各参加者のテストブロック数が異なった（課題の項を参照）。各参加者のテストブロックを、できるだけ均等に4つの段階に分けた。たとえば、5つのブロックがある場合、4つの段階は1、1、1、2ブロックというように後半の段階でブロック数をより多くした。そして、全参加者の4つの各段階ごとの正答率を平均した。（I群とII群を合算）。

Avant STAMP 4S (Standards-based Measurement of Proficiency-4 Skills; Avant Assessment, Eugene, OR, USA) の Listening Comprehension サブテストを用いて、L2 および L3 の言語習熟度を 1~9 のスコア [初級 (1~3)、中級 (4~6)、上級 (7~9)] で評価した（補足情報表 S1）。第4段階、すなわち我々の課題の最終段階に関して、L2 および L3 の Avant スコアは、GR 課題の正答率と有意な相関があった（スピアマンの順位相関検定、 $r_s=0.53$ 、 $p=0.02$ ；補足情報 図 S2）。この結果は習熟度のレベルにおける大きな個人差にかかわらず、CEM 仮説（「はじめに」参照）を直接支持するものである。つまり、バイリンガルやマルチリンガルは、L2/L3s の能力が高ければ高いほど、L4 の能力も高くなるということである。

GR 課題に関しては、全参加者の正答率が、OS 条件下では、チャンスレベルが 50% から 70% へと、4 つに分けたブロック全体を通して着実に上昇した（図 3a 左）。ここで、OS を構造条件の比較の基準とした（図 3 のグレーのバー）。一元配置反復測定分散分析（rANOVA）では、段階 [という要因] の主効果が有意に示された（ $F(3, 90)=6.9$ 、 $p=0.0003$ ）、対応のある t 検定は、第 4 段階が第 1 段階よりも有意に高い正答率が示された（ $t(30)=4.8$ 、 $p<0.0001$ ）。第 4 段階に関しては、GR 課題の正答率はすべての構造条件下で 60~70% に達した（図 3a、右）。これらの正答率はチャンスレベルを有意に上回っており（1 標本の t 検定、 $p<0.01$ 、Holm 補正）、I 群と II 群を区別するための上述の基準レベル 60% を裏付けている。一元配置反復測定分散分析（rANOVA）では 4 つの条件の間に有意な相違を示してはいない。（ $F(3,90)=1.0$ 、 $p=0.4$ ）。

SV 課題に関して、すべての参加者の正答率が OS 条件下の全段階において上昇していた（図 3b 左）。rANOVA は、全段階の有意な主効果を示し（ $F(3,90)=6.3$ 、 $p=0.0006$ ）、対応のある t 検定は、第 4 段階は第 1 段階より有意に高い正答率を示した（ $t(30)=4.3$ 、 $p=0.0002$ ）。第 4 段階においては、SS 条件を除いて正答率は

60%に達した(図 3b、右)。rANOVA は、全条件の有意な主効果を示した ( $F(3, 90)=9.1, p<0.0001$ )が、SS 条件下での正答率は OS 条件下よりも有意に低かった( $t(30)=4.8, p<0.0001$ )。SS が最も難しい条件であるという仮説があったことを思い出してほしい(「序論 Introduction」を参照)。反応時間 RT(response time)は、各課題のすべての構造条件において同程度であった(rANOVA、 $p>0.1$ ; 図 3c)。SV 課題の正答率は、構造条件間の成績の違いを明らかにするのに最も感度がよかった。

両方の課題の成績をより強固な判断をするために、一般にノイズを含む信号源の分布をノイズ源のみの分布から区別するために用いられる「信号検出理論 the signal detection theory」を採用した<sup>21</sup>。この際、「hit」率(すなわち、本研究における非文法的で不一致な刺激の正しい検出)の Z 値から、「誤警報」率(すなわち、文法的刺激と一致刺激に対する不正解の反応)の Z 値を引いたものとして  $d'$  値を得た。チャンスレベル ( $d'=0$ ) からの有意な偏差を調べるために、 $d'$  値の分散を推定した<sup>22</sup>。GR 課題での  $d'$  値は正答率と一致したが(図 3a 参照)、SV 課題の  $d'$  値は OS 条件と OO 条件でのみ有意であった( $p<0.05$ 、各課題について Holm 補正)。この結果は、分散が大きい、すなわち個人差が大きいためであった(図 3d)。上述した基準レベル(「実験デザイン」の項を参照)を満たさない参加者がいたことを考慮し第 4 段階において、この基準に従って参加者を I 群と II 群に分けた。

### 図 3

#### カザフ語における習熟度の向上

(a)全参加者の GR 課題の正答率。左のグラフは、テストブロックの各段階(第 1、第 2、第 3、第 4)における OS 条件での正答率を示しており、第 1 段階から第 4 段階にかけて有意に上昇した。右のグラフは、第 4 段階での各構造条件(OS, OO, SO, SS)における正答率を示している。図 1 の  $2 \times 2$  の表の時計回りの順番で示されている。すべての条件で正答率が 60%に達した(破線で示した 50%のチャンスレベルを上回った)。灰色の棒グラフは、4 つの条件を比較するための基準として、OS 条件での結果を示す。(b)SV 課題での正答率。OS 条件下での正答率は、SV 課題(左)でも有意に増加した。第 4 段階では、SS 条件(右)を除き 60%に達した。(c)第 4 段階における各条件の反応時間(RT)を、GR 課題(左)と SV 課題(右)で別々に分けて示す。RT は両課題ともすべての条件で同程度であった。(d)全参加者の  $d'$  値。GR 課題と SV 課題の成績のより強固な評価を示している。これらの参加者を 2 つのグループ、I 群と II 群に分けた。(e)I 群の各段階における SV 課題の正答率は OS(左)と SO(右)の両条件下で、SV 課題が 60%以上(第 4 段階)という基準を満たした。(f)上記の基準に達しなかった II 群の SV 課題での正答率。OS(左)と SO(右)の条件下で、正答率はチャンスレベルにとどまった。(g)I 群の  $d'$  値(第 4 段階)は、SV 課題の SS を除き、値 0 のチャンスレベルを有意に上回った。(h)II 群の  $d'$  値はいずれも有意ではなかった。エラーバーは正答率と反応時間の平均値の標準誤差(SEM)を示し、 $d'$  値のエラーバーは推定分散を示す。\* $p<0.05$ 。

#### 習熟度の群間差

全参加者の結果(図 3b 参照)と一致し、I 群の SV 課題における正答率は、OS 条件と SO 条件(図 3e)において第 1 段階から第 4 段階にかけて有意に向上した。そして、OO 条件においても同様に、第 1 段階から第 4 段

階にかけて有意に向上した ( $p < 0.05$ , Holm 補正がなされた)。一方、II 群では、OS 条件と SO 条件 (図 3 f) では、第 1 から第 4 段階まで正答率に有意な変化はなく ( $p > 0.05$ )、OO 条件と SS 条件でも同様であった ( $p > 0.05$ )。SO 条件では、第 1 段階に 60%以上の正答率を示した。しかし、これは群 II の例外であり、この傾向は第 2 段階以降では、すぐにチャンスレベルまで低下した。我々はテストブロックの実数値は I 群と II 群で同等であることを確認した ( $t(29) = 0.6, p = 0.5$ )。I 群の顕著な進歩を考慮し、以降の分析では第 4 段階に焦点を当てた。

I 群では、GR 課題の  $d'$  値は 4 つの条件すべてで 0 値を有意に上回り、SV 課題の  $d'$  値は OS、OO、SO 条件下で有意であった ( $p < 0.05$ 、各課題について Holm 補正；図 3g)。一方、II 群では、GR 課題でも SV 課題でも、4 つの条件のいずれにおいてもチャンスレベルから  $d'$  値は有意な差はなかった。 ( $p > 0.05$ ；図 3h)。これらの結果は、OS、OO、SO の各条件下で、I 群の参加者が文構造の構築に成功したことを裏付けるものである。

### 脳活動における事象に関連している群間差

脳全体の総合的な活性化パターンを得るために、“Sentence”事象時の活性化を“語彙リスト”事象時 (5 つの単語のリスト；図 2b 参照) の活性化と比較した。語彙リストは、語彙の意味処理と同じように、刺激文 (Sentence) に使われた個々の単語の聴覚的識別についても制御した。すべての参加者において、[Sentence—(マイナス) 語彙リスト] 比較は、4 つの構成条件すべてにおいて一貫した結果を示し、運動前野側部 (LPMC)、下前頭回 (IFG 背側部)、島皮質、上/中/下側頭回 (STG/MTG/ITG)、角側頭回 (STG/MTG/ITG)、角回/縁上回 (AG/SMG)、小脳 VI (第六小葉) /Crus I (第一脚) における両側の活性化を明らかにした (補足情報 図 S3a、OS および SO 参照)。内側の活性化は、補足運動野 (SMA)、前帯状皮質 (ACC)、大脳基底核、視床、楔前部、および鳥距溝/舌状回 (LG) でも観察された。I 群と II 群を別々に分析すると (図 4a)、両群の全体的な活性化パターンは全参加者の活性化パターンと同様であったが、II 群では、両側 LPMC、IFG 背側部、島皮質、STG/MTG、SMG、小脳において、有意な活性化の範囲がより限定的であり、それは内側 SMA/ACC、大脳基底核、視床、楔前部、鳥距溝/LG においても同様であった。

次に、SV 応答に先行する NV pair 事象に注目した (図 2b 参照)。NV pair 事象中の活性化の範囲は、すべての参加者において、[NV pair—語彙リスト] 比較では、[Sentence—語彙リスト] 比較の活性化に比べると狭まっていた (補足情報 図 S3b)。I 群と II 群を別々に分析すると (図 4b)、I 群の全体的な活性化パターンは全参加者の活性化パターンと類似していた。また I 群の両側 LPMC、左 IFG 背側部、両側 STG/MTG、L. AG/SMG、および内側 SMA/ACC と視床に活性化 (20 ボクセル以上) が観察された (OS と SO について、図 4b、OS での活性化領域のリストは表 2 を参照)。全体的な活性化パターンは II 群でも同様であったが、有意な活性化の範囲はより限定的であった (表 2 参照)。両方の群の結果から、統辞・意味・音韻の処理において、言語野とそれをサポートするネットワークが関与していることが確認された。

2 つの群間の定性比較に続いて、直接群比較を行った、すなわち [I 群—II 群] 比較の機能に関する脳地図を直接的に獲得した。我々は 4 つの条件下で平均化された Sentence 事象に注目した。L. IFG 背側部と両側 STG/MTG に有意な活性化が観察され (図 4c 左)、また同様に内側楔前部でも有意な活性化が観察された。こ

これらの領域は、I群で [Sentence—語彙リスト]比較にて活性化した領域の一部であった (図 4a 参照)。

I群の参加者は、OS、OO、SO の各条件で、SS の条件よりも良い結果を示したので(図 3g 参照)、次に前者 3 つの条件に注目した。同じ群比較を繰り返したところ、L. IFG 背側部と L. STG/MTG のみで、より局所的な活性化が観察された (図 4c、右、表 2)。

#### 条件に特化した時間的活性化の変化

上記の直接群比較に続いて、次に I群に注目した。我々のテストの最終段階において、上記のどの領域が重要であるかを決定するために、初期段階と最終段階、すなわち、[第 4 段階—第 1 段階]比較での活性化を直接比較した。我々は [NV pair—語彙リスト]比較における OS、OO、SO 条件に注目した。その結果、L. IFG 背側部のみで局所的な活性化が観察され、初期から最終段階まで連続的に起こる時間的な活性化変化を示した。(図 4d、表 2)

さらに、正答した構造条件に対する特異的な活性化を検証した。[(OS+OO+SO)—SS]比較では、局所的な活性化が L. IFG 背側部でも観察された (図 4e、表 2)。この領域は主にブロードマン (BA) 44/45 野からなり、図 4d に示した領域よりも BA45 が多く含まれていた。個別の解析で観察された L. IFG 背側部の 3 つの領域 (図 4c-e 参照) に関しては、これらのクラスター間で統計的に有意な 8 つのボクセルの重なりを確認した。II 群では、[第 4 段階—第 1 段階]比較も [(OS+OO+SO)—SS]比較も有意な活性化を示さなかった。これらの結果により、L. IFG 背側部が構造の正しい構築過程において中心的な役割を果たしていることがさらに確認された。

また、OS、OO、および SO 条件下での 2 元配置 [群×4 段階] 反復共分散分析 (rANCOVA) を行った。その結果、[NV pair—語彙リスト]比較における段階の主効果について、L. IFG 背側部で局所的な活性化が観察され (補足情報 図 S3c)、I群の結果 (図 4d) が全参加者でも再現された。さらに、[Sentence—語彙リスト]比較においても、4 つの段階ごとの群の有意な相互作用が見られた (補足情報 図 S3d)。

#### 図 4

##### 群、段階、条件に関連する活性化

- (a) [Sentence-語彙リスト]比較 (Sentence' と略す) における I 群と II 群それぞれの両側の活性化。OS と SO 条件下での第 4 段階の活性化を示す [ボクセルレベルで  $p < 0.05$  に補正した FWE (family-wise error) ]。
- (b) それぞれの群での [NV pair-語彙リスト]比較 (NV pair' と略す) における局所的活性化。Sentence' と NV pair' の比較は第 2 水準解析 (集団解析) で行われた。
- (c) [I 群-II 群] の直接比較で観察された局所的活性化 (ボクセルレベルでは未補正  $p < 0.001$ 、クラスターレベルでは FWE 補正  $p < 0.05$ )。Sentence 事象の最中では、OS、OO、SO と SS 条件下 (図の左)、OS、OO、SO 条件下 (図の右) において左下前頭回 (L. IFG) および上・中側頭回 (STG/MTG) で主に活性化が観察され、行動実験結果と一致した (図 3g 参照)。II 群 (1 標本の t 検定、未補正  $p < 0.05$ ) については負の活性化の除外マスクを適用した。
- (d) [第 4 段階-第 1 段階] 比較で観察された I 群の L. IFG の活性化。NV pair' 比較は第 1 水準解析 (個人解析) を行い、脳活動は OS、OO、SO 条件間で平均した。
- (e) 第 4 段階の [(OS+OO+SO)-SS] 比較でさらに明らかになった I 群の IFG の活性化 [ボクセルレベルでは補正なし  $p < 0.001$ 、クラスターレベルでは偽陽性率 (FDR) 補正  $p < 0.05$ ]。

#### 表 2

##### 群、段階、構造条件に関連して有意な活性化を示した領域

16mm 以上離れた Z 値の活性化ピークについて、MNI 標準座標における定位座標 (x, y, z) を示す (図 4 参照)。アスタリスクのついた領域は、真上の行に示した領域と同じクラスター内に含まれる。BA: ブロードマン野; L: 左側; M: 内側; R: 右側; ACC: 前帯状皮質; AG: 角回; LPMC: 運動前野外側部; IFG: 下前頭回; SMA: 補足運動野; SMG: 縁上回; STG/MTG/ITG: 上/中/下側頭回。

##### 後に続く課題成績に関連する脳活動

すべての参加者について、図 4e の [(OS+OO+SO)-SS] 比較で特定された L. IFG 背側部の活性化のクラスターについて、さらに関心領域 (ROI) の解析を行った。[Sentence-語彙リスト] 比較における信号の変化に注目した。

これは、それらの活性化が Sentence に関する文法的判断や SV pair の正しい識別に必要な後続の処理に影響を及ぼすかどうかを調べるためである。4 つの条件で平均すると、GR (図 5a) SV (図 5b) 課題での正答率と L. IFG 背側部の活性化との間に有意な正の相関が観察された (いずれも  $r = 0.51$ 、 $p = 0.003$ )。

また、I 群の OS 条件にも注目したところ、GR 課題 (図 5c) と SV 課題 (図 5d) での、RT と L. IFG 背側部の活性化の間に有意な負の相関が観察された。(GR 課題:  $r = -0.50$ 、 $p < 0.05$ 、SV 課題:  $r = -0.56$ 、 $p = 0.02$ )。これらの結果は L. IFG 背側部において、Sentence 事象中に測定されたより大きい信号変化が、その後の実験課題におけるより高い正答率とより短い RT を実際に予測したことを示している。

図5

### 後続く課題成績に関連する脳の活性化

- (a) 全参加者における GR 課題での L. IFG の活性化と正答率との相関。4つの構造条件を平均すると、Sentence' 比較でより強い脳活動を示した参加者ほど GR 課題の正答率が高い。この図の関心領域 (ROI) は、図 4e の活性化領域によって決定された。
- (b) SV 課題での同様の相関関係。L. IFG の脳活動が強いほど、SV 課題でのより高い正答率が予測された。
- (c) I 群の GR 課題における L. IFG の活性化と RT の相関関係。OS 条件下で、より強い活性化を示す参加者においては、RT が短くなるのが、より高い課題習熟度を示す。
- (d) SV 課題における同様の相関関係。L. IFG の脳活動が強いほど、ここでも短い RT を予測させた。

### 考察

以前の研究<sup>6</sup>では、カザフ語の文の初期習得を、等位接続文、埋め込み文、関係節を含む文という異なる文構造を持つ3つの段階的文法条件下で調べた。次の段階として本研究において、参加者には主節と関係節から構成され、いずれも名詞を目的語として含む文が提示された。目的語を含む文は、この実験デザインの段階で新たに導入され、テスト条件は非常に厳しいものとなった。さらに、4種類の文構造 (OS、OO、SO、SS; 図1) は、完全にランダムな順序で参加者に提示された。デモ試行と課題試行をただ単に交互に行うことにより (図2)、文法規則を明確に教えることなく、新しい言語の文構造を構築する能力をテストすることができた。

行動データと機能データに関する分析のために、主語—動詞一致課題で達成したレベルを基に参加者をI群とII群に分けた。そして、以下の3つの結果が得られた。

第一に、I群においてはOS、OO、SOの各条件下で複雑な文構造の構築に成功した (図3g) が、II群 (図3h) ではうまくいかなかった。*誰が (who)* 構文解析ができた参加者かを調べた [I群—II群] の比較では、OS、OO、SOの各条件下で、中核的な言語野であるL. IFGとL. STG/MTGが有意に活性化される (図4c) が示された。第二に、I群に焦点をあて、いつ (*when*) 構造分析したのか、[第4段階—第1段階]の比較を調べた (図4d)。同様に*何の構造 (what)* が分析されたのかを調べた [(OS+OO+SO)—SS]比較 (図4e) は、さらにL. IFG背側部のみの局所的な活性化を明らかにした。第三に、個々の参加者において、Sentence事象中に測定されたL. IFG背側部のより強い活性化は、その後の各課題の実行における、より高い正答率とより短いRTを予測した (図5)。これらの結果は、課題の難易度や記憶負荷では説明できず、代わりに、新しい目標言語における文法習得の初期段階から中間段階において、L. IFG背側部の重要かつ一貫した役割を示している。このようなL. IFG背側部の機能的特異性、すなわち文法中枢は、習得対象言語とする第二、第三言語以降の言語習得の調査におけるCEMの主張と一致する脳科学的証拠を提供する。

「何の構造 (what) が解析されたか」に関して観察された結果は、L. IFG背側部が、新しい目標言語において文構造の構築に成功するために使われる統辞処理において本質的な役割を果すという主張を裏付けている。左腹側BA44は統辞構造の構築に関連しているが<sup>23</sup>、左背側BA44と下前頭溝は、記憶負荷との関連が示唆されている<sup>24,25</sup>。しかし、本研究ではL. IFG背側部における活性化は、課題の難易度や記憶負荷とは無関係であることが

示された。というのも、GR と SV の両課題において、難なく解いた参加者に大きな脳活動が観察されたからである (図 5)。さらに、L. LPMC とともに L. IFG 背側部が神経膠腫によって損傷された場合、失文法的理解の明らかな証拠を我々はすでに報告している<sup>19,26</sup>。これらの研究では、記憶負荷を使わない画像と文のマッチング課題を用いた。また、BA44 の容積は参加者間で最大 10 倍まで異なると先の解剖学的研究で報告されている<sup>27</sup> ように、BA44 の範囲には大きな個人差があることに留意しなければならない。そこで、我々は、L. IFG 背側部を BAs 44、45 および 6 には分離しなかった。3 つのクラスター (図 4c-e) で重なった 8 つのボクセルは、BAs 44/6 に位置していた。

「who (誰が)」については、群 II の方が群 I よりも全体的な脳活動がより弱く、空間的により限定されていた。II 群では、初期段階からの習熟度の向上は実験中には見られなかったが、I 群では見られた (図 3e-h)。さらに、脳活動は、2 つの群に関して習熟度レベルの個人差を反映している (図 4a-c)。このことは、II 群の参加者にとっては、発達する前の段階を表しているのかもしれないし、I 群と比べて発達が「遅れている」ことを示しているのかもしれないが、これらの仮説の説明は本稿の範囲外である。もう一つの可能性は、有意な群の相違は音韻論/音声学と形式的意味論を同時処理する難しさに起因するものだろう。この可能性は、直接群比較をしたときにおける両側の STG/MTG の活性化によって裏付けられており (図 4c)、L. STG/MTG (ウェルニッケ野に含まれる) 部分ではより強い脳活動がみられたが、これは音韻処理の中核領域である<sup>10</sup>。しかしながら、統辞処理の中核領域である L. IFG 背側部 (ブローカ野に含まれる) の活性化も、句レベルの構造を構築することが決定的な要因であることを示し、「言語の基本的特性」を実証している<sup>28</sup>。この言語習得に関与している制約やしくみは、かなりの個人差を伴うので、さらなる解明が必要である。

Sentence 事象中に LPMC の両側の活性化が観察されたが、I 群の方が II 群よりも強かった (図 4a)。さらに、L. LPMC におけるより局所的な活性化は NV pair 事象中にはっきりと見られ、これも I 群でより強かった (図 4b)。私たちが過去に行った文法判断に関する fMRI を使った研究で、L. IFG 背側部及び L. LPMC の活性化を一貫して報告した<sup>6,10,19,29-31</sup>。我々の最近の fMRI による研究では、L1 (第 1 言語) における文の主語と述語の対応関係を明確にテストし、単語の線形順序に基づく構造と比較したとき、階層構造によってのみ決定される依存関係の処理をするために両側 LPMC が重要な活性化を示すことが明らかになった<sup>32</sup>。これらの結果は、他の脳画像実験<sup>7,33-35</sup>の結果をさらに裏付けるものである。

失語症患者に関する多くの症例研究では、ウェルニッケ野が「入力・理解」にのみ、ブローカ野が「出力・生成」にのみ関連するという決定的な役割が一般的かつ単純に特定されてきた<sup>36</sup>。しかし、本研究の立場に沿って、これらの領域が言語特有の文法の喪失だけでなく獲得にも関与していると仮定すると、ウェルニッケ野とブローカ野の従来の言語処理に関する古典的な概念を修正する必要がある<sup>37</sup>。さらに、脳画像研究によって、L. IFG 背側部が、手話および音声言語の両方における言語情報の計算処理の核となるハブであることが明らかにされている。これらはそれぞれ異なる外在化の様式を用いている<sup>38-40</sup>。核となる言語システムと外部感覚運動システム<sup>28</sup>が明確に区別されていることを考えると、L. IFG の主たるシステムは感覚入力と運動出力の両方から独立していると結論づけた。

L1 と L2、更に L3<sup>41</sup>とそれに続く L4、… Ln においての獲得を同じ原理が制約する<sup>5</sup>という提案に沿うと、

文法中枢である L. IFG 背側部があらゆる新しい言語においても言語特有の文法の獲得の最中に機能的になると予測した。このことは、人間の言語能力に関する本質的かつ普遍的な性質を示唆しており、多言語の獲得と使用の両方を制限しないことになる。結論として、言語習得の根底にある普遍的なメカニズムの説明、すなわち「why [なぜそうなっているのか]」として仮定された CEM とともに、L4 の文法習得に関する現在の脳科学的証拠は、新しい言語における文構造の構築の成功に何に関わるのかを明確にするためのさらなる本質的な洞察を提供する。

## 実験方法

詳細は補足情報の方法を参照のこと。

## 参加者

日本語を母語とするボランティアは、この研究のために複数のソースから募集されました。これらには、LEX 言語交流研究所(ヒポファミリークラブ)、東京大学、上智大学等を含む。合計で 33 人の参加者が、G1-G3 条件に設定された基準を満たし(「Introduction」で記載)、G4 条件に到達した。右利きは、エジンバラ利き手検査に従い、側性係数(LQ)によって評価された<sup>42</sup>。左利き(すなわち負の LQ)だったため、二人の参加者が解析から除外された。我々は残りの 31 名を二つの群に分けた(基準については「Introduction」を参照)：I 群[参加者 16 名；多言語話者 9 名、二言語話者 7 名の]、II 群[参加者 15 名；多言語話者 8 名、二言語話者 7 名](補足情報の表 S2 を参照)。英語に触れている期間(DOE)、英語におけるアバントスコア(言語習熟度レベル)及び LQ ( $p > 0.2$ ) に群間差は見られなかった。平均年齢は II 群で有意に低かった ( $t(29) = 2.3, p = 0.03$ )。I 群と II 群には、それぞれ 19 歳未満の参加者が 1 名と 5 名含まれていたことに注目のこと。19 歳以上の参加者では、年齢に有意な差はなかった ( $t(23) = 1.7, p = 0.1$ )。年齢はこのように脳活動分析の攪乱要因として使用された(補足情報、方法、fMRI データ分析を参照)。この研究の参加者の中に、神経あるいは精神疾患を持っている人はいなかった。

研究への参加に先立って、各参加者に対して、研究の特質と起こりうる影響について説明し、その事前説明の直後に書面によるインフォームドコンセントが取得された。この実験は、東京大学大学院総合文化研究科の人を対象とした実験研究に関する倫理審査委員会から承認を得て実施された(承認番号：464)。すべての研究は、ヘルシンキ宣言、研究公正に関するシンガポール声明(研究の誠実性に関する声明)、および日本の関連ガイドライン/規制(日本学術会議および独立行政法人日本学術振興会)に従って実施された。この臨床試験は、2020 年 12 月 25 日に日本臨床研究データベース(jRCT)で公開登録されました(登録番号：jRCT1030200294)。

## 刺激

カザフ語の聴覚刺激は、76 の文(44 の正文と 32 の非文)で構成されており、補足情報表 S3 に示された限定された数の語彙項目が使われた。刺激文は、カザフ語の男性のネイティブスピーカーによって録音され、個々の単語も別で録音された。カザフ語に馴染みのない参加者のために、やや遅いペースで正文と非文の両方がはっきり

と発音された。Wavelab 8 ソフトウェア (Steinberg Media Technologies GmbH、ドイツ、ハンブルク) を使用して、刺激をデジタル化 (16 ビット、44.1kHz、ステレオ) して、各刺激の最大音量は-1dBFS 一定に設定した。すべての刺激文の継続時間を 4.75 秒に調整し(図 2b 参照)、文のもとのピッチを維持した。語彙の参考として、文中で使用される 5 単語(「語彙リスト」)は、各テスト試行の開始時に聴覚的に提示され、英語に翻訳された個々の単語が視覚的に提示された(図 2b 参照)。英語の翻訳は、カザフ語の単語の意味と品詞の手がかりを提供した。MR スキャン中、スキャナーの高周波ノイズ(>1 kHz)を軽減するために、参加者は MRI 対応ヘッドホン (Resonance Technology Inc., Northridge, カリフォルニア州)、イヤーマフ(3 M Peltor、セントポール、ミネソタ州)、および耳栓(Erasers、Persona Medical、Casselberry、フロリダ州) を装着した。

## 課題

デモブロックとテストブロックは、ランダムな順序で現れる 4 つの構造条件(OS、OO、SO、SS) それぞれについて 2 回の試行で構成された。G1-G3 の条件では、デモブロックごとに 4 つの試行を使用した。最も要求の厳しい G4 条件については試行を 8 回と回数を増やした。参加者が刺激文を簡単に記憶するのを避けるために、デモブロックとテストブロックでは異なる組み合わせの文が使用された。参加者はスキャナーの内部に入っていたが、スキャンなしでデモブロックを実施し、この音にさらされている間、聴覚刺激は MR スキャンに伴う大きな騒音なしで提示された。デモブロックでは、最初の 2 つの文は常に文法的に正しく、残りの 6 つの文は 4 つの正文と 2 つの非文がランダムな順序で表示される。スキャンをしているテストブロックでは、正文と非文の両方が完全にランダムに提示された。デモブロックにおける NV pair については、最初の 2 つのペアは常に一致しており、不一致のペアは非文の後には決して続かなかった。それ以外の場合、一致したペアと一致しないペアはランダムにあらわれた。テストブロックでは、一致ペアと不一致ペアの両方が完全にランダムにあらわれた。

実験では、G4 条件についても G1-G3 と同じ基準を使用した。それは、各参加者は、GR タスクと SV タスクの両方において 2 つのブロック (必ずしも連続しない) のそれぞれで 8 つのテスト試行のうち少なくとも 6 つを正しく答えるというものである。1 日または 2 日間の実験で、31 人の参加者のうち 15 人がこれらの基準に達した。残りの 16 人のうち、GR と SV の両方のテストで、1 つのブロックで 8 つのテスト試行のうち、少なくとも 6 試行を正確に答えた 10 人のうち 5 人が別の日にさらにテストされた。これらの 5 人の参加者のうち 3 人は、3 日目に基準に達した。最終的には、5~28 のテストブロック (つまり、40~224 テスト試行) が参加者に応じて行われ、したがって第 4 段階のテストブロックは 2~7 である。テスト試行の各ブロックの後、参加者は GR タスクと SV タスクのそれぞれの正解数 (例: 8 回のうち 6 回) を知らされた。各スキャン実行において、単語条件下で 5 つのテスト試行を加えた(補足情報 方法、課題を参照)。

## MRI データの取得と解析

MRI スキャンは、3.0T スキャナー (Signa HDxt; GE Healthcare, Milwaukee, WI) に鳥かご状ヘッドコイルを装着して行った。各参加者は仰臥位で、頭部はコイル内に固定された。構造画像に関して、脳全体の高解像度 T1 強調画像 [136 軸スライス、 $1 \times 1 \times 1 \text{mm}^3$ ] は、3 次元高速スポイルドグラジエントエコー法 (3D FSPGR) 撮影 [繰り返し時間(TR)=8.6ms、エコー時間(TE)=2.6ms、flip 角(FA)=25°、視野(FOV)= $256 \times 256 \text{mm}^2$ ] を用い

て取得した。fMRI の時系列データに関しては、グラジエントエコーのエコー・プランナー・イメージング (EPI) シーケンスを用いた [TR=2 秒、TE=30ms、FA=78°、FOV=192×192 mm<sup>2</sup>、解像度=3×3mm<sup>2</sup>]。前交連から後交連 (AC-PC) までの範囲で、−38.5 mm から 66 mm をカバーする 3 mm の厚さと 0.5 mm の間隔を持つ 30 枚の軸方向スライスの組をスキャンした。単一のスキャンセッションで 145 の三次元データを取得し、MR 信号の増加により最初の 4 つの三次元データを分析から除外した。この fMRI データは、SPM12 統計的パラメトリックマッピングソフトウェア (Wellcome Trust Center for Neuroimaging, <http://www.fl.ion.ucl.ac.uk/spm>)<sup>43</sup> を使用して標準的に分析された。このソフトウェアは MATLAB (Math Works, Natick, MA) 上に実装されていた。fMRI データ解析では、正答と誤答の両方の試行を含むすべての試行を使用し、課題の正答率を直接反映する活性化を検討した (図 5 a, b 参照) ; テストされたすべての条件は、実施された試行数に関しては等しく重み付けされた。詳細は補足情報 方法を参照。

## データの提供

本研究中に生成し解析したデータについて正式な依頼があれば、責任著者から提供する。

受領：2023 年 10 月 16 日、受理日：2023 年 12 月 27 日

オンライン発行：2024 年 1 月 2 日

## 参考文献

1. Flynn, S., Foley, C. & Vinnitskaya, I. The cumulative-enhancement model for language acquisition: Comparing adults' and children's patterns of development in first, second and third language acquisition of relative clauses. *Int. J. Multiling.* **1**, 3–16. <https://doi.org/10.1080/14790710408668175> (2004).
2. Flynn, S. & Berkes, E. Toward a new understanding of syntactic CLI: Evidence from L2 and L3 acquisition. In *L3 Syntactic Transfer: Models New Developments and Implications Bilingual Processing and Acquisition* (eds Angelovska, T. & Hahn, A.) 35–61 (John Benjamins, 2017).
3. Flynn, S. Microvariation in multilingual situations: The importance of property-by-property acquisition: Pros and cons. *Second Lang. Res.* **37**, 481–488. <https://doi.org/10.1177/0267658320945761> (2021).
4. Fernandez-Berkes, E. & Flynn, S. Vindicating the need for a principled theory of language acquisition. *Linguist. Approaches Biling.* **11**, 30–36. <https://doi.org/10.1075/lab.20095.fer> (2021).
5. Epstein, S. D., Flynn, S. & Martohardjono, G. Second language acquisition: Theoretical and experimental issues in contemporary research. *Behav. Brain Sci.* **19**, 677–714. <https://doi.org/10.1017/S0140525X00043521> (1996).
6. Umejima, K., Flynn, S. & Sakai, K. L. Enhanced activations in syntax-related regions for multilinguals while acquiring a new language. *Sci. Rep.* **11**, 7296. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86710-4> (2021).
7. Musso, M. *et al.* Broca's area and the language instinct. *Nat. Neurosci.* **6**, 774–781. <https://doi.org/10.1038/nm1077> (2003).
8. Sakai, K. L., Miura, K., Narafu, N. & Muraishi, M. Correlated functional changes of the prefrontal cortex in twins induced by classroom education of second language. *Cereb. Cortex* **14**, 1233–1239. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhh084> (2004).
9. Tatsuno, Y. & Sakai, K. L. Language-related activations in the left prefrontal regions are differentially modulated by age, proficiency, and task demands. *J. Neurosci.* **25**, 1637–1644. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.3978-04.2005> (2005).
10. Sakai, K. L. Language acquisition and brain development. *Science* **310**, 815–819. <https://doi.org/10.1126/science.1113530> (2005).
11. Zaccarella, E., Schell, M. & Friederici, A. D. Reviewing the functional basis of the syntactic Merge mechanism for language: A coordinate-based activation likelihood estimation meta-analysis. *Neurosci. Biobehav. Rev.* **80**, 646–656. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.06.011> (2017).
12. Matchin, W. & Hickok, G. The cortical organization of syntax. *Cereb. Cortex* **30**, 1481–1498. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhz180> (2020).
13. Muhamedowa, R. *Kazakh: A Comprehensive Grammar* (Routledge, 2016).

14. Fukui, N. & Sakai, H. The visibility guideline for functional categories: Verb raising in Japanese and related issues. *Lingua* **113**, 321–375. [https://doi.org/10.1016/S0024-3841\(02\)00080-3](https://doi.org/10.1016/S0024-3841(02)00080-3) (2003).
15. Caplan, D., Chen, E. & Waters, G. Task-dependent and task-independent neurovascular responses to syntactic processing. *Cortex* **44**, 257–275. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2006.06.005> (2008).
16. Ohta, S., Fukui, N. & Sakai, K. L. Computational principles of syntax in the regions specialized for language: Integrating theoretical linguistics and functional neuroimaging. *Front. Behav. Neurosci.* **7**(204), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2013.00204> (2013).
17. Ueno, M. & Garnsey, S. M. An ERP study of the processing of subject and object relative clauses in Japanese. *Lang. Cogn. Process.* **23**, 646–688. <https://doi.org/10.1080/01690960701653501> (2008).
18. Treisman, A. M. & Gelade, G. A feature-integration theory of attention. *Cogn. Psychol.* **12**, 97–136. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(80\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0010-0285(80)90005-5) (1980).
19. Kinno, R., Ohta, S., Muragaki, Y., Maruyama, T. & Sakai, K. L. Differential reorganization of three syntax-related networks induced by a left frontal glioma. *Brain* **137**, 1193–1212. <https://doi.org/10.1093/brain/awu013> (2014).
20. Tanaka, K., Kinno, R., Muragaki, Y., Maruyama, T. & Sakai, K. L. Task-induced functional connectivity of the syntax-related networks for patients with a cortical glioma. *Cereb. Cortex Commun.* **1**(tgaa061), 1–15. <https://doi.org/10.1093/texcom/tgaa061> (2020).
21. Peterson, W. W., Birdsall, T. G. & Fox, W. C. The theory of signal detectability. *Trans. IRE Prof. Group Inf. Theory* **4**, 171–212. <https://doi.org/10.1109/TIT.1954.1057460> (1954).
22. Gourevitch, V. & Galanter, E. A significance test for one parameter isosensitivity functions. *Psychometrika* **32**, 25–33. <https://doi.org/10.1007/BF02289402> (1967).
23. Zaccarella, E. & Friederici, A. D. Merge in the human brain: A sub-region based functional investigation in the left pars opercularis. *Front. Psychol.* **6**(1818), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01818> (2015).
24. Makuuchi, M., Bahlmann, J., Anwander, A. & Friederici, A. D. Segregating the core computational faculty of human language from working memory. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **106**, 8362–8367. <https://doi.org/10.1073/pnas.0810928106> (2009).
25. Iwabuchi, T., Nakajima, Y. & Makuuchi, M. Neural architecture of human language: Hierarchical structure building is independent from working memory. *Neuropsychologia* **132**(107137), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2019.107137> (2019).
26. Kinno, R. *et al.* Agrammatic comprehension caused by a glioma in the left frontal cortex. *Brain Lang.* **110**, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2009.05.001> (2009).
27. Amunts, K. *et al.* Broca's region revisited: Cytoarchitecture and intersubject variability. *J. Comp. Neurol.* **412**, 319–341. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9861\(19990920\)412:2%3c319::aid-cne10%3e3.0.co;2-7](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9861(19990920)412:2%3c319::aid-cne10%3e3.0.co;2-7) (1999).
28. Chomsky, N. Minimalism: Where are we now, and where can we hope to go. *Gengo Kenkyu* **160**, 1–41. [https://doi.org/10.11435/gengo.160.0\\_1](https://doi.org/10.11435/gengo.160.0_1) (2021).
29. Kinno, R., Kawamura, M., Shioda, S. & Sakai, K. L. Neural correlates of noncanonical syntactic processing revealed by a picturesentence matching task. *Hum. Brain Mapp.* **29**, 1015–1027. <https://doi.org/10.1002/hbm.20441> (2008).
30. Ohta, S., Fukui, N. & Sakai, K. L. Syntactic computation in the human brain: The degree of merger as a key factor. *PLOS ONE* **8**(e56230), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056230> (2013).
31. Tanaka, K. *et al.* Merge-generability as the key concept of human language: Evidence from neuroscience. *Front. Psychol.* **10**(2673), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02673> (2019).
32. Umejima, K. *et al.* Differential networks for processing structural dependencies in human language: Linguistic capacity vs. memorybased ordering. *Front. Psychol.* <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1153871> (2023).
33. Caplan, D., Alpert, N. & Waters, G. PET studies of syntactic processing with auditory sentence presentation. *NeuroImage* **9**, 343–351. <https://doi.org/10.1006/nimg.1998.0412> (1999).
34. Price, C. J. The anatomy of language: Contributions from functional neuroimaging. *J. Anat.* **197**, 335–359. <https://doi.org/10.1046/j.1469-7580.2000.19730335.x> (2000).
35. Zaccarella, E., Meyer, L., Makuuchi, M. & Friederici, A. D. Building by syntax: The neural basis of minimal linguistic structures. *Cereb. Cortex* **27**, 411–421. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhv234> (2017).

## 謝辞

アメリカ LEX Language Project の Elizabeth White 氏、そして、一般財団法人言語交流研究所の鈴木堅史氏、平岡一武氏、平岡弦也氏は、「多言語の脳科学」プロジェクトをコーディネートしてくださったことに感謝する。また、Aidos Sultankulov 氏はカザフ語について、山田亜虎氏は実験計画と MR 撮影について、Run Chen 氏は言語背景評価について、小師尚子氏は技術的な支援について、松田広美氏は事務的な支援について、感謝したい。

## 著者の分担

研究計画：梅島奎立、スザンヌ・フリン & 酒井邦嘉

実験実施：梅島奎立

データ解析：梅島奎立 & 酒井邦嘉

論文執筆：梅島奎立、スザンヌ・フリン & 酒井邦嘉

## 研究費

本研究は一般社団法人言語交流研究所より研究費の提供を受けた。提供者は研究設計、データ収集、データ解析・解釈、原稿執筆、あるいは出版に向けた論文投稿の決定など、本研究のいかなる側面にも関わらなかった。また本研究は、文部科学省科研費挑戦的研究（開拓）（Nos. 21K18115）の助成を受けた。

## 利益相反

著者は利益相反がないことを表明する。

## 追加情報

補足情報については、以下のリンクを参照のこと（和訳省略）。

[https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1038%2Fs41598-023-50896-6/MediaObjects/41598\\_2023\\_50896\\_MOESM1\\_ESM.pdf](https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1038%2Fs41598-023-50896-6/MediaObjects/41598_2023_50896_MOESM1_ESM.pdf)

## 著者情報

〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1 東京大学大学院総合文化研究科 相関基礎科学系大学院

梅島奎立<sup>1</sup> & 酒井邦嘉<sup>1\*</sup> (email: sakai@sakai-lab.jp)

Department of Linguistics and Philosophy, Massachusetts Institute of Technology,

77 Massachusetts Avenue, Cambridge, MA, 32-D80802139, USA

Suzanne Flynn<sup>2</sup>

米国マサチューセッツ州（32-D80802139）ケンブリッジ マサチューセッツ工科大学 言語哲学科

スザンヌ・フリン<sup>2</sup>

責任著者(\*)：酒井邦嘉 <sup>1\*</sup>

オープンアクセス

本論文は、クリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際ライセンスの対象であり、原著者と出典、クリエイティブ・ライセンスのリンク先、また、修正を加えた場合はその旨を適切に明記することにより、使用、共有、翻案、配布、複製することを許可する。論文中の図や第三者の素材についても、特別に記載がない限り本論文のクリエイティブ・コモンズ・ライセンスに含まれる。本論文のクリエイティブ・コモンズ・ライセンスに含まれない素材については、その著作権保有者に直接許可を取る必要がある。

クリエイティブ・コモンズ・ライセンス <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

和訳作成：折田玲子、富山万美子、野口和子、三好康子

和訳監修：梅島奎立 & 酒井邦嘉 (2025年7月)