

新たな言語の獲得における多言語話者の統辞関連領域で増進した脳活動

梅島奎立, スザンヌ・フリン & 酒井邦嘉

【©言語交流研究所 和訳作成: 白鳥正信, 清水れい子 & 野口和子 監修: 梅島奎立 & 酒井邦嘉】

Scientific Reports, volume 11, Article number: 7296 (2021)

<https://www.nature.com/articles/s41598-021-86710-4>

要旨

比類のない認知能力である多言語使用の神経科学的基盤について、更なる解明が必要とされている。本研究では fMRI (機能的磁気共鳴画像法)ⁱ の実験を行い、多言語話者および二言語話者による新しい言語(カザフ語)での統辞素性の獲得について評価した。実験結果は、第 2・第 3 言語の習熟度がより高い多言語話者の方が、より少ない回数の課題試行でカザフ語の音韻を獲得することを示した。群間差については、カザフ語に触れた初期の段階での応答時間の減少率が、二言語話者と比べて多言語話者で有意に大きかった。多言語話者では、両側前頭部・側頭部の活動が後続の新しい文法条件の最中に、最初の水準と比べてより高い水準で維持された。二言語話者においては、大脳基底核・視床および小脳の活動が、毎回最初の水準まで低下した。群間の直接比較では、左腹側下前頭回の活動が多言語話者で有意な増進を示した。これらの結果は、統辞関連および認知一般の双方のネットワークが、多言語話者でより増進したことを示している。また予想外のことであるが、多言語話者において視覚野でも有意な活動が見られ、音声を聞いているだけの時にも、多言語話者が視覚的表象を使用していることが示唆された。多言語話者が既得の知識を累積的に活用できたことから、これらの結果は言語獲得の累積増進モデルを支持している。

序論

二言語使用は 一より一般的に多言語使用は一 比類のない能力だがありふれたものであり、世界人口の大半が達成している¹。しかしながら、人々がどのように複数の言語を獲得するのかはまだ十分に理解されておらず、このプロセスの神経科学的基盤について更なる解明が必要である。本稿で我々は、新しい言語を学ぶことが累積的過程であることを論じる。そして本稿は、第 1 言語に日本語を、第 2 言語として英語を、その後に第 3 言語として主にスペイン語を学んだ者を対象に、第 4 言語としてカザフ語の文法課題を行い、この第 4 言語獲得から「累積増進モデル」の証拠を提示するものである。

数十年にわたる行動学的研究は、複数言語の獲得に関する深遠な問を提起してきた。これらの研究の大多数は、第 1 言語獲得と第 2 言語獲得の相違点および類似点に焦点を当てている。つまり、第 1 言語獲得を特徴づけ決定するといわれてきた、生物学的に決定された言語機能が、第 2 言語獲得においても

¹ Grosjean, F. *Bilingual: Life and Reality* (Harvard University Press, 2010).

また重要な影響を及ぼすことはあり得るだろうか。この間に対して、対照分析^{2,3}、根本的相違仮説^{4,5,6}、コネクショニスト論⁷、ダイナミックシステム理論⁸、そして表出主義的説明⁹といった従来の説明は否定的である。しかしながら、第1言語獲得と第2言語獲得が根本的には同じであると示す証拠が、同等或いはそれ以上に多く存在する^{10,11,12,13,14,15,16,17,18}。これらの一群の研究は、第1言語獲得の過程を制約するのと同じ原理が、第2言語の二言語獲得の過程をも制約すると論じている。

さらに最近の実証的研究は、第1言語獲得および第2言語獲得の両者を特徴づける原理に、第3言語獲得がどの程度従うかに焦点を当ててきた。すなわち、これまで第1言語獲得および第2言語獲得を特徴づけると論じられてきた、言語という認知機能に固有の遺伝的特質に関する理論は、第3言語獲得をどの程度特徴づけることができるだろうか。例えば「刺激の貧困」についての議論は、多言語使用にもあてはまるのだろうか。第3言語獲得は、第1言語および第2言語と同様の制約を受けることが示されている。しかしながら、第3言語学習者は、新たな言語(すなわち第3言語)固有の文法を構築する際に何らかの仕方ですべて活用可能な、他の言語(すなわち第1および第2言語)についての知識を保有している。事実、実験結果は、言語知識が多いほど第3言語獲得のプロセスが強化され、第2言語獲得と第3言語獲得の間に顕著な差異が見られることを示した。第3言語獲得における制約は第1および第2言語と共通するものの、第3言語学習者にはより多くの選択肢があることが明らかになった。このことは成人の第3言語獲得の研究

² Fries, C. C. Meaning and linguistic analysis. *Language* 30, 57-68. <https://doi.org/10.2307/410220> (1954).

³ Lado, R. *Linguistics across Cultures: Applied Linguistics for Language Teachers* (University of Michigan Press, 1957).

⁴ Bley-Vroman, R. in *Linguistic Perspectives on Second Language Acquisition*, Cambridge Applied Linguistics (eds Gass, S. M., & Schachter, J.) Ch. 2, 41-68 (Cambridge University Press, 1989).

⁵ Bley-Vroman, R. The logical problem of foreign language learning. *LingA* 20, 3-49. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139524544.005> (1990).

⁶ Bley-Vroman, R. The evolving context of the fundamental difference hypothesis. *Stud. Second Lang. Acquis.* 31, 175-198. <https://doi.org/10.1017/S0272263109090275> (2009).

⁷ Li, P. & Zhao, X. in *Contemporary Approaches to Second Language Acquisition*, AILA Applied Linguistics Series (eds García Mayo, M. P., Gutierrez Mangado, M. J., & Martínez Adrián, M.) Ch. 9, 177-198 (John Benjamins, 2013).

⁸ de Bot, K., Lowie, W. & Verspoor, M. *Second Language Acquisition: An Advanced Resource Book* (Routledge, 2005).

⁹ O'Grady, W. in *The Oxford Handbook of Linguistic Analysis* (eds Heine, B. & Narrog, H.) Ch. 12, 257-283 (Oxford University Press, 2009).

¹⁰ Cook, V. Interlanguage, multi-competence and the problem of the "second" language. *Rivista di Psicolinguistica Applicata* VI, 39-52 (2006).

¹¹ Cook, V. in *An Introduction to Bilingualism: Principles and Processes* (eds Altarriba, J., & Heredia, R. R.) Ch. 15, 245-264 (Lawrence Erlbaum Associates, 2008).

¹² 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).

¹³ Epstein, S. D., Flynn, S., & Martohardjono, G. in *The Generative Study of Second Language Acquisition* (eds Flynn, S., Martohardjono, G., & O'Neil, W.) Ch. 4, 61-77 (Lawrence Erlbaum, 1998).

¹⁴ Flynn, S. in *Cross-Linguistic Influence: From Empirical Evidence to Classroom Practice* (eds Gutierrez-Mangado, M. J., Martínez Adrián, M., & Gallardo-del-Puerto, F.) vii-xiv (Springer, 2019).

¹⁵ Flynn, S. Microvariation in multilingual situations: The importance of property-by-property acquisition: Pros and cons. *Second Lang. Res.* <https://doi.org/10.1177/0267658320945761> (2020).

¹⁶ Westergaard, M. Microvariation in multilingual situations: The importance of property-by-property acquisition. *Second Lang. Res.* <https://doi.org/10.1177/0267658319884116> (2020).

¹⁷ White, L. *Second Language Acquisition and Universal Grammar* (Cambridge University Press, 2003).

¹⁸ White, L., & Juffs, A. in *The Generative Study of Second Language Acquisition* (eds Flynn, S., Martohardjono, G., & O'Neil, W.) Ch. 7, 111-130 (Lawrence Erlbaum, 1998).

で広く報告されている^{19,20,21}。これらの第3言語獲得における行動実験の結果から、より多くの言語を知るほど、獲得が容易になるという仮説が導かれている^{22,23}。

しかし神経科学的には、第2言語獲得と第3言語獲得の違いをもたらさる神経基盤についてまだよく知られていない。行動研究と比べて、二言語使用と多言語使用に関する神経科学研究は少ないのだ。加えて、先行研究は主に言語病理学、運動系による言語の音声化、および大脳皮質における表現と組織化に強く限定される傾向があった^{24,25}。我々の知る限り、二言語以上の、リアルタイムでの処理および獲得を評価する研究は全くなされていない。我々は累積増進モデルに基づき、多言語話者(三言語以上を獲得した人)では二言語話者(二言語しか獲得していない人)と比較して、新しく獲得の対象となる言語が導入された際に特に、脳の言語関連領域においてより増進した活動が見られるであろうという仮説を立てた。

我々は過去の研究において、統辞処理の際に最も重要な脳領域が、左下前頭回弁蓋部・三角部と左運動前野外側部であり、これらが第1言語獲得および第2言語獲得の両者に関与することを明らかにした^{26,27,28}。左下前頭回のおそらく「普遍的な」機能は、「併合(Merge)」と呼ばれる統辞処理、すなわち、句や節を作り出す単純で基本的な組み合わせ操作である^{29,30}。事実、この領域の活動から、文の「併合度(Degree of Merger)」、すなわち枝分かれの深さの最大値を予測できた。ある文の二股の統辞節点(枝分かれ)が多いほど、この領域の活動が上昇したのである^{31,32}。また、文に対し「自然な」規則に接した場合と人工的な規則に接した場合で、参加者の脳活動が異なっていたことが報告されている^{33,34}。自然な規則の

¹⁹ Cabrelli Amaro, J., Flynn, S., & Rothman, J. in *Third Language Acquisition in Adulthood, Studies in Bilingualism* (eds Cabrelli Amaro, J., Flynn, S., & Rothman, J.) 1–6 (John Benjamins, 2012).

²⁰ Angelovska, T., & Hahn, A. in *L3 Syntactic Transfer: Models, New Developments and Implications, Bilingual Processing and Acquisition* (eds Angelovska, T., & Hahn, A.) 1–9 (John Benjamins, 2017).

²¹ Rothman, J., González Alonso, J. & Puig-Mayenco, E. *Third Language Acquisition and Linguistic Transfer* (Cambridge University Press, 2019).

²² Cenoz, J. The additive effect of bilingualism on third language acquisition: A review. *Int. J. Biling.* **7**, 71–87. <https://doi.org/10.1177/13670069030070010501> (2003).

²³ 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).

²⁴ Schwieter, J. W. & Paradis, M. eds. *The Handbook of the Neuroscience of Multilingualism, Blackwell Handbooks in Linguistics* 1–880 (Wiley Blackwell, 2019).

²⁵ Del Maschio, N. & Abutaleb, J. in *The Handbook of the Neuroscience of Multilingualism, Blackwell Handbooks in Linguistics* (eds Schwieter, J. W., & Paradis, M.) Ch. 9, 199–213 (Wiley Blackwell, 2019).

²⁶ Sakai, K. L. Language acquisition and brain development. *Science* **310**, 815–819. <https://doi.org/10.1126/science.1113530> (2005).

²⁷ 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).

²⁸ Sakai, K. L. *et al.* Distinct roles of left inferior frontal regions that explain individual differences in second language acquisition. *Hum. Brain Mapp.* **30**, 2440–2452. <https://doi.org/10.1002/hbm.20681> (2009).

²⁹ Chomsky, N. *The Minimalist Program* (The MIT Press, 1995).

³⁰ Chomsky, N. in *Step by Step: Essays on Minimalist Syntax in Honor of Howard Lasnik* (eds Martin, R., Michaels, D., & Uriagereka, J.) Ch. 3, 89–155 (The MIT Press, 2000).

³¹ 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).

³² 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).

³³ Musso, M. *et al.* Broca's area and the language instinct. *Nat. Neurosci.* **6**, 774–781. <https://doi.org/10.1038/nn1077> (2003).

³⁴ 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).

条件下では、左下前頭回を含む左言語野に局在した活動が認められたが、人工的な規則の条件下では、活動は両側の運動前野外側部および他の広範囲な領域に見られた³⁴。そこで自然言語に関する本研究では、文構築の深い特性(例えば等位や従属)が二言語話者や多言語話者にとってどのように一般化されるかを調べた。より具体的には、既得の知識が累積的に活用される可能性があり、上記の重要な領域の神経信号に反映されると予想される。この他にも、新しい音声を聴く際に不可欠な両側の聴覚野、並びに、音声や言語的規則の変化に対する適応制御の際に必要な皮質下の領域および小脳における活動の上昇も予想される。特に左尾状核について、習熟した二言語話者が単語の意味判断の最中に言語を切り替えた際、活動が生じることが報告されている³⁵。複数の言語を迅速かつ正確に操作する能力を持つ多言語話者においては、新たな言語に触れている間、これらの領域の活動が持続するであろう。加えて、小脳は内部モデルの符号化によって、運動機能に加えて精神活動をも制御するという提案がされている³⁶。我々は、これらの領域の活動に新しい言語の獲得プロセスに関係した変化が生じ、また二言語話者と比べ多言語話者の方がより増進した活動を示すだろうと予測する。

本研究では機能的磁気共鳴画像法(fMRI)を用いた。参加者は全員日本語を母語とし、英語を第2言語として獲得していた。言語習熟度テスト(スコア1~9で成績をつけたAvantテスト;補足情報・研究手法(Supplementary Methods)参照)のリスニングのスコアに応じて、参加者を2群に分けた。一方の群は「二言語群」(21名)であり、第2言語(英語)のスコアが2以上で、もし第3言語がある場合はスコアが1とした。他方の群は「多言語群」(28名)であり、第2言語(英語)および第3言語(ほとんどの場合スペイン語)のリスニングのスコアがどちらも2以上とした(補足情報・表S1、S2参照)。彼らが獲得する新しい言語にはカザフ語を用いた。チュルク諸語のキプチャク語群に属するカザフ語は、カザフスタンおよび近隣諸国における母語である。カザフ語は主辞終端型の膠着語であり、修飾語―主辞の語順で、平叙文ではSOVの語順である³⁷。これらの統辞パラメータは日本語と共通しているが、日本語には主語・動詞の一致のパラメータなどの、統辞素性の一致がない³⁸。カザフ語では、英語やスペイン語と同様に主語・動詞の一致が存在するため、我々はこの「隠れた」パラメータ、および関連する統辞処理が、英語およびスペイン語、あるいはそのいずれかの言語知識を持った、日本語を母語とする参加者によってどのように獲得されるかを調べた。

参加者は全員、カザフ語を獲得するのは今回が初めてであり、実験ではカザフ語の基礎単語を用いた(補足情報・表S3参照)。文法知識の獲得が段階的に進展するよう、文法条件を3段階(文法1、文法2、文法3)に分け、後の条件ほど複雑な統辞構造を用いた(補足情報・表S4参照)。それぞれの文法条件に対して文法性判断課題(GR課題)と主語・動詞対応課題(SV課題)を考案し、統制条件ⁱⁱとして、単語条件の下で単語の一致判断課題(W課題)を用いた(図1)。各試行では、5つのカザフ語単語(「単語リスト」)を音声で提示し、同時に単語の意味を英語で画面上に表示した。また単語条件と文法条件それぞれの下で、「デモ」試行と「テスト」試行を交互に行った。文法条件の下で、「デモ」試行では、1つ目の符号(+か-)が文における文法性の正誤を示し、2つ目の符号が文中の主語・動詞の対応の正誤を示した。そうした手がかりのない「テスト」試行では、カザフ語でのそれぞれの提示の後にこれらの正誤を判断させ、該当する色のボタン(+か-)を押して回答させた。この全く新しい実験デザインを用いることで、多言語群と二言語群の間の重要な差異が正しく解明され得ると考えた。

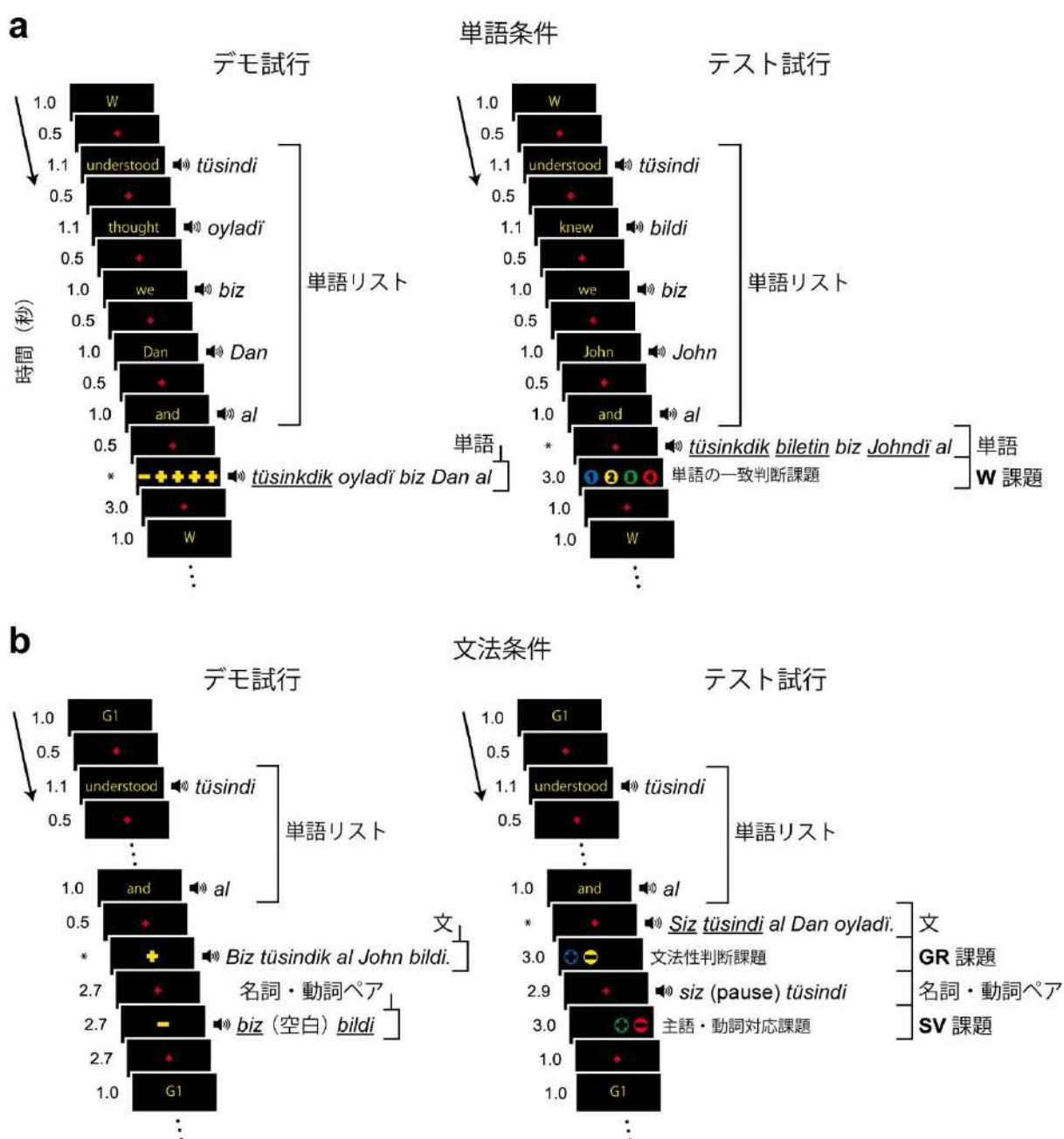
³⁵ Crinion, J. *et al.* Language control in the bilingual brain. *Science* **312**, 1537–1540. <https://doi.org/10.1126/science.1127761> (2006).

³⁶ Ito, M. Control of mental activities by internal models in the cerebellum. *Nat. Rev. Neurosci.* **9**, 304–313. <https://doi.org/10.1038/nrn2332> (2008).

³⁷ Muhamedowa, R. *Kazakh: A Comprehensive Grammar* (Routledge, 2016).

³⁸ 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).

図 1



カザフ語の単語条件および文法条件

(a) 単語条件の下での試行。「単語リスト」に続けて、このリスト内の語順を変えずいくつかを語形変化したもの置き換えた、5 つのカザフ語単語の組(「単語」)を提示した。(下線部は語形変化し、不一致であることを表す)。デモ試行において、符号(+か-)は同時に提示された音声刺激の正しさ(単語条件の下では一致・不一致)を示し、一方テスト試行において、参加者は直前に提示された音声刺激に対して番号(文法条件の下では符号)を選んで回答した。*は音声提示の時間が一定でないことを表す。

(b) 文法条件の文法 1 の下での試行。「単語リスト」に続けて、カザフ語の「文」が(下線部は文法の誤りを表す)、その後名詞・動詞ペアが提示された(下線部は対応の誤りを表す)。デモ試行の例で示されているカザフ語の文は「私たちは理解し、そしてジョンは知った」という意味であり、テスト試行の例で示されている文は文法的に正しくない。テスト試行では、「単語リスト」と「文」・「単語」の間に 0.5 秒の無音の間を置いた。活動の解析では、テスト試行における「文」、「単語」、および「単語リスト」の各事象ⁱⁱⁱに注目した。

実験結果

多言語群における複数言語間での能力の関連

多言語群においては、第 2 言語および第 3 言語双方の経験と習熟度について個人差が大きかったことから、彼らの言語接触期間(経験)とリスニングのスコア(習熟度)を詳細に評価した。接触期間は第 2 言語の方が第 3 言語よりも有意に長く(対応のある t 検定、 $t(27) = 13, p < 0.0001$)、リスニングのスコアも第 2 言語の方が第 3 言語よりも有意に高かった($t(27) = 3.9, p = 0.0005$) (補足情報・表 S1 参照)。さらに、図 2a が示すように、彼らの第 2 言語と第 3 言語で合算したリスニングのスコアに対して、第 2 言語と第 3 言語で合算した接触期間が相関を示した(スピアマンの順位相関検定、 $r_s = 0.40, p = 0.04$)。

多言語群の参加者の第 2 言語と第 3 言語の間で言語接触期間の差、および獲得年齢の差が有意に大きかったにもかかわらず($t(27) = 13, p < 0.0001$)、図 2b が示すように、第 2 言語のリスニングのスコアと第 3 言語のスコアの間に正の相関が見られた($r_s = 0.57, p = 0.002$)。そうであるならば、彼らの第 2 言語および第 3 言語で合算したリスニングのスコアは、カザフ語での課題の成績とも相関し得る。実際、合算したリスニングのスコアと、文法条件の準備として行った単語条件(Wpre)の下でのブロック数が負の相関を示した($r_s = -0.38, p = 0.04$) (図 2c; 補足情報・研究手法(Supplementary Methods)参照)。この有意な相関は、第 2 言語単独の場合でも再現されたが($r_s = -0.38, p = 0.05$)、第 3 言語単独ではされなかった($r_s = -0.26, p = 0.2$)。以上から、第 2 言語および第 3 言語のリスニング習熟度が高い参加者ほど、カザフ語の語形変化により速く順応したといえる。

カザフ語文法の段階的獲得における群間差

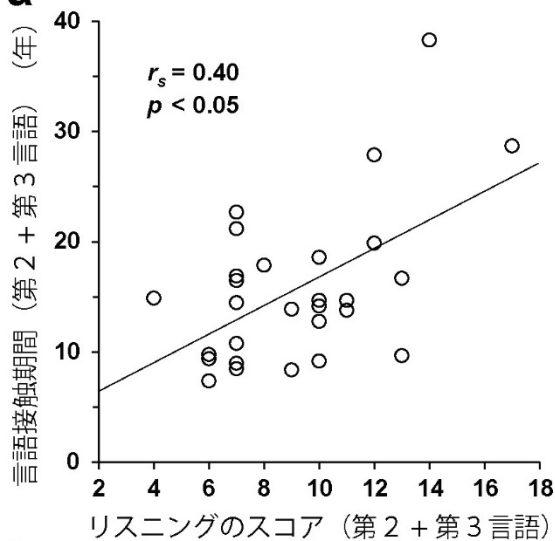
各課題への習熟の基準は、ある 2 ブロックのそれぞれで、テスト試行 8 回のうち 6 回以上正解することとした。文法 1 から文法 3 についてはそれぞれで、GR 課題および SV 課題の両方でこの基準を満たす必要がある。この基準に達するために要したブロック数を調べたところ(図 3a)、各条件の下で、この数は多言語群と二言語群の間で同等であった(t 検定、 $p > 0.3$)。したがって、各条件下でのブロック数の個人差は、行動結果あるいは脳活動における群間差を説明できない。それでもなお、単語(Wpre)・文法 1 から文法 2・文法 3 にかけてブロック数の有意な減少が見られたことは(多言語群: $t(49) = -3.5, p = 0.001$; 二言語群: $t(34) = -3.4, p = 0.002$)、両群でカザフ語文法の段階的獲得が生じたことを示唆しており、重要な点である。

加えて、応答時間もまた全ての条件(単語(Wpre)・文法 1・文法 2・文法 3)の下で、最初と最後のブロックにおいて群間で同等であった($p > 0.05$)。次に、各課題において、最初から最後のブロックまでの応答時間の「減少」を評価した(図 3b)。すると多言語群においてのみ、文法 2 から文法 3 にかけて応答時間の減少量の有意な低下($t(40) = -3.0, p = 0.005$)が観察され、また、文法 3 の下での GR 課題と SV 課題の間、すなわち文法 3-GR と文法 3-SV の間での有意差が観察された(対応のある t 検定、 $t(18) = 2.2, p = 0.04$)。これらの結果は、文法 2 で獲得された知識が文法 3 にうまく移行され、また文法 3 の下で GR 課題に比べて SV 課題がより容易になったことを示唆するものである。

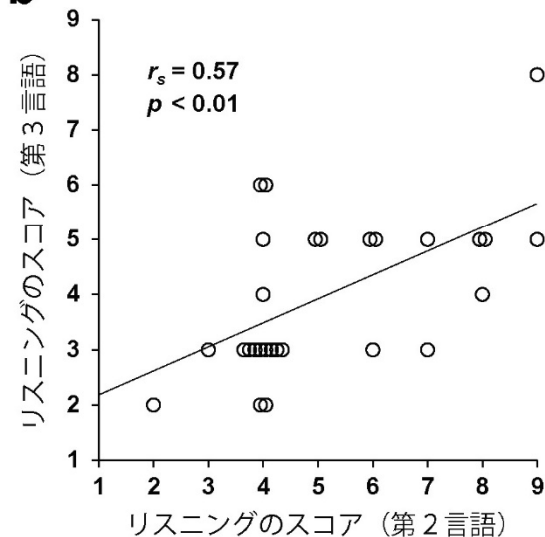
図 2

多言語群

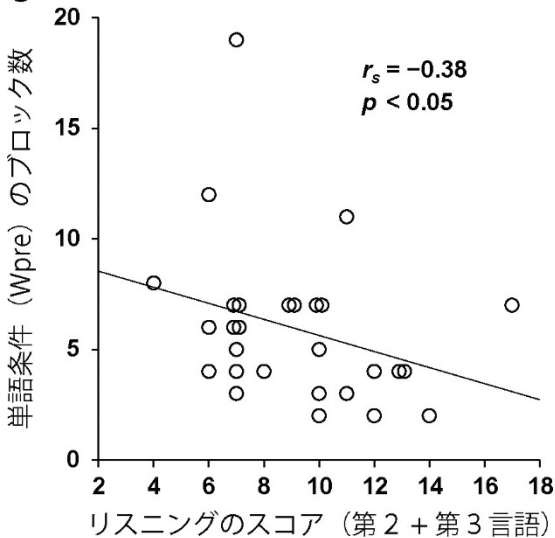
a



b



c



多言語群における複数言語間での能力の一貫性

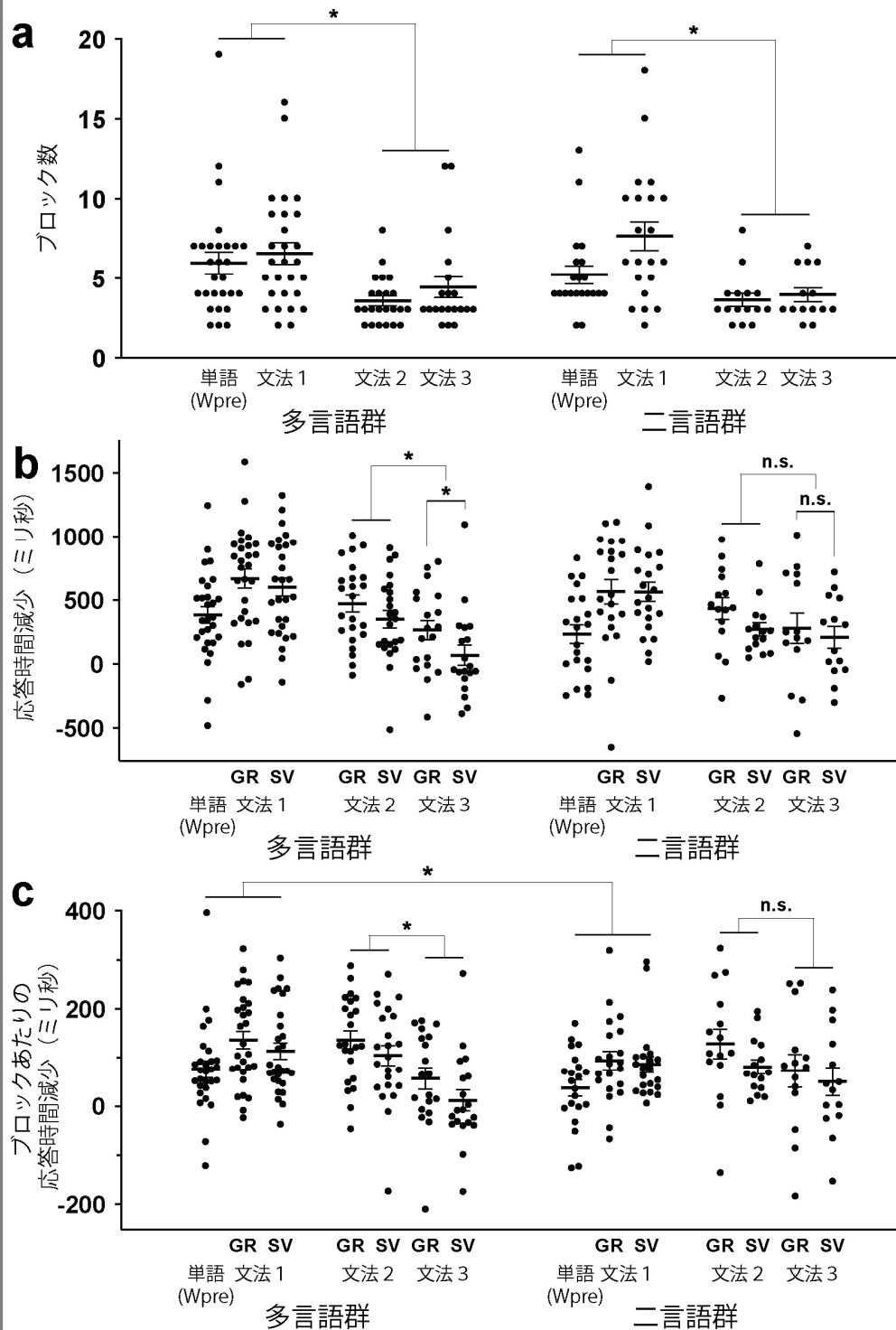
(a) Avant テスト(標準的なリスニング習熟度テスト)のスコアと言語接触期間の有意な相関(数値は第2言語と第3言語で合算)。

(b) 第2言語と第3言語間でのリスニングのスコアの相関。

(c) 合算したリスニングのスコアと、文法条件の準備として行った単語条件(Wpre)で基準に達するまでのブロック数(8試行で1ブロック)の間の負の相関。

これらの結果は、複数言語(第2言語、第3言語、および接触初期のカザフ語)間におけるリスニング能力の一貫性を示している。同じ位置に2点以上ある場合は、水平方向に広げて表示している。

図 3



カザフ語文法の段階的獲得における群間差

(a) 参加者が各条件の下で基準に達するまでに要したブロック数の平均値。各個人のデータを重ねて表示した。多言語群・二言語群ともに、単語 (Wpre)・文法 1 から文法 2・文法 3 にかけて、カザフ語文法の段階的獲得が観察された。

(b) 最初から最後のブロックまでの応答時間の減少。多言語群においてのみ、文法 2 と文法 3 の間で、また、文法 3 の下での GR 課題と SV 課題の間で有意な差が観察された。

(c) ブロック当たりの応答時間減少。単語 (Wpre)・文法 1 の下で有意な群間差を示した。

エラーバーは平均値の標準誤差を示す。*は統計的な有意性 ($p < 0.05$) を、n.s. は統計的に有意でないこと ($p > 0.1$) を示す。

段階的獲得の最中の応答時間の動的変化を明らかにするために、応答時間減少をブロック数で割った、ブロック当たりの応答時間減少を調べた。上記の結果と一貫して、多言語群においてのみ、文法 2 から文法 3 にかけてブロック当たりの応答時間減少の量が有意な低下を示した ($t(40) = -3.6, p = 0.001$) (図 3c)。二言語群も類似の傾向を示したが、個人差がより大きかった。さらに、ブロック当たりの応答時間減少に対する、群[多言語群、二言語語群]および課題[単語(Wpre)、文法 1-GR、文法 1-SV]の 2 要因の反復測定分散分析が、群の主効果 ($F(1, 47) = 4.3, p = 0.04$) および課題の主効果 ($F(2, 94) = 7.6, p = 0.0009$) を示し、両者の交互作用を示さなかった ($F(2, 94) = 0.1, p = 0.9$)。ブロック当たりの応答時間減少について多言語群の方が二言語群より大きかったため、カザフ語への接触初期(単語(Wpre)・文法 1)において、多言語群の方がより大きい向上を示したといえる。文法 1 の後の文法 2-GR・文法 2-SV あるいは文法 3-GR・文法 3-SV の個々の反復測定分散分析は、主効果 ($p > 0.05$) も交互作用 ($p > 0.5$) も示さなかった。

多言語群と二言語群における外側部の活動

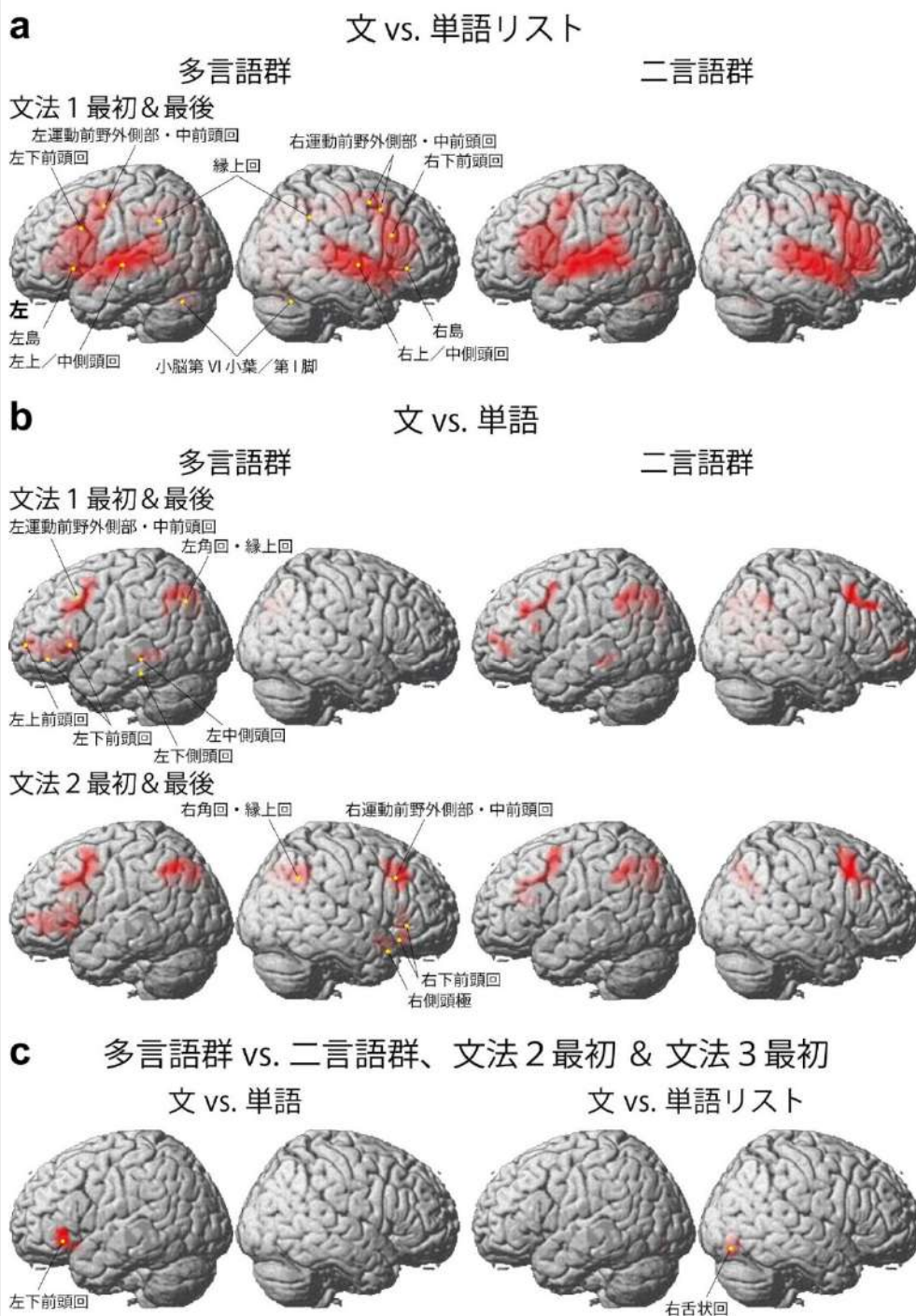
文法 1 から文法 3 までの各条件下での初回(「初期」状態)と最終回(「終」状態)、合計 6 つの重要なブロック(文法 1 最初、文法 1 最後、文法 2 最初、文法 2 最後、文法 3 最初、文法 3 最後)について解析を行った。それぞれの文法条件に固有の活動パターンが見られるかを調べるために、文法 1 から文法 3 のそれぞれについて、初回と最終回を合算した(例えば文法 1 最初&文法 1 最後)。

最初に調べたのは「単語リスト」に対して「文」で選択的な活動、すなわち、文法条件下での同一のテスト試行における、文と単語リストという 2 種類の刺激の間の比較である(「文」、「単語リスト」は図 1 で示した特定の事象を指す)。「単語リスト」は「文」に対して、共通の基本的な聴覚処理および符号化処理を単語について統制した。外側部の活動パターンは各文法条件下で類似しており、最も顕著な活動が、両側の運動前野外側部・中前頭回と下前頭回、並びに上／中側頭回において観察された(図 4a; 多言語群における活動領域の一覧については補足情報・表 S5 参照)。これらの活動パターンは両群でも類似していた。

次に調べたのは、より厳しい比較となる、「単語」に対して「文」で選択的な活動、すなわち、文法条件下での文と、単語条件下での(必ず語形変化を含む)単語という 2 種類の刺激の比較である(「文」、「単語」は図 1 で示した特定の事象を指す)。「単語」は「文」に対して、聴覚処理および記憶想起処理を厳密に統制する。文法 1 最初&文法 1 最後において多言語群では、運動前野外側部・中前頭回、腹側下前頭回、上前頭回、中／下側頭回、および角回・縁上回で、左脳に局限した活動が見られた(図 4b、補足情報・表 S5)。これと対照的に、二言語群では運動前野外側部と角回・縁上回で左脳・右脳両方に活動が見られ、さらにより前方にある下前頭溝(ブロードマンの 10/46 野)でも両側に活動が見られた。文法 2 最初&文法 2 最後において、多言語群では上述の前頭部・頭頂部に加えて、右脳の運動前野外側部・中前頭回、腹側下前頭回、側頭極、および角回・縁上回にも活動が見られた。対照的に、二言語群では文法 1 と文法 2 の活動パターンに大きな変化はなかった(図 4b 参照)。二言語群で腹側前頭部に有意な活動が見られなかったことも、上記に加えて両群の差を示唆している。

文法 1、文法 2、および文法 3 において、両群の直接比較で活動の有意差が認められなかったため、さらに別の 2 つのブロックの組合せ(例えば文法 1 最初&文法 2 最初)について調べた。「文」と「単語」の比較では、文法 2 最初と文法 3 最初を合算した場合のみ、二言語群に対して多言語群に選択的な活動が見られた(図 4c、補足情報・表 S5)。有意な活動は左腹側下前頭回に局限し、図 4b の結果を裏付けている。さらに、同じブロックの組合せでの「文」と「単語リスト」の比較では、右舌状回に有意な活動が見られた。これらの結果は多言語群に選択的な活動上昇を実証するものである。なぜ文法 2 最初と文法 3 最初においてこのような上昇が見られるかについては、以後の個別ブロックの解析によって明らかとなるであろう。

図 4



多言語群と二言語群における外側部の活動

(a) テスト試行において、「単語リスト」提示と比べて「文」提示で高い活動が見られた脳領域(赤色)。「文」、「単語リスト」は図 1 で示した特定の事象を指す。図は文法 1 の初回と最終回(すなわち、それぞれ文法 1 最初と文法 1 最後)で平均したものを示している。両群とも、前頭部と側頭部において両側で有意な活動を示した(クラスターレベルで FWE 補正 $p < 0.05$)。

(b) 単語条件での「単語」提示と比べて、文法条件での「文」提示で高い活動が見られた脳領域(「文」、「単語」は図 1 で示した特定の事象を指す)。図は文法 1(最初&最後)と文法 2(最初&最後)について示している。各条件下で、「単語」における負の活動の除外マスク(exclusive mask)^{iv} を適用した(1 標本 t 検定、補正なし $p < 0.005$)。

(c) 文法 2 最初と文法 3 最初で平均した活動の、両群の直接比較(すなわち、二言語群に対して多言語群で選択的な活動)。「文」と「単語」の比較(左側)、および「文」と「単語リスト」の比較(右側)について示した。

黄色い点は、外側部表面上の領域における活動の極大値を示している(補足情報・表 S5 参照)。

多言語群と二言語群の間での皮質下の活動差

「文」と「単語リスト」の比較(図 4a)における外側部の活動パターンと対照的に、皮質下領域の活動は著しい群間差を示した(図 5 矢状断面、赤色の部分)。多言語群では、大脳基底核・視床に有意な活動が見られ、文法 1 最後とその後に続くブロックで持続した。特に文法 1 最後と文法 2 最初の活動パターン、並びに文法 2 最後と文法 3 最初の活動パターンが、ほぼ同一であった点に注意されたい。二言語群においては対照的に、文法 1 から文法 3 の下で、最初と最後のブロック間で大脳基底核・視床の活動の有無が交代していた。このパターンは新しい文法条件に適応しようとする際の「更新周期」と特徴づけることができる。換言すれば、文法 1 最後と文法 2 最後で観察された活動が、それぞれ文法 2 最初と文法 3 最初においてほぼ完全に消失していた。左の小脳でも、同様の交代する活動パターンが再現された(図 5 冠状断面、赤色の部分)。両群が全ての条件下で同等のブロック数を行ったこと(図 3a)、また文法 1 から文法 2、および文法 2 から文法 3 へ移行する間隔がほとんどの場合で同日中か翌日(中央値:1 日)であり、群間に有意差が無かったことから(ウィルコクソンの順位和検定、 $W = 169, p = 0.9$)、これらの異なる活動パターンは実験手順の違いでは説明できない。

多言語群と二言語群の間で活動の統計的な差を示すために、各参加者について、関心領域^v内の活動したボクセル数(画像上の体積)(補正なし $p < 0.001$ の閾値を超えたもの)を数えることによって、領域ごとの活動を定量化した。大脳基底核・視床(図 6a)について、二言語群では文法 1 から文法 3 までの各条件の中で上昇したボクセル数が、次の条件に移行すると基底レベル(文法 1 最初)に戻ったのに対して、多言語群ではその数が文法 1 最後から文法 3 最後まで基底レベルを超えて持続した。この数値は二言語群に比べて多言語群の方が、文法 2 最初と文法 3 最初において有意に高かった(文法 2 最初:片側 t 検定、 $t(74) = 2.7, p = 0.004$; 文法 3 最初: $t(64) = 2.0, p = 0.03$)。小脳(第 VI 小葉・第 I 脚)についても、基本的に先の活動の時間的パターンが再現され、同様の群間差が観察された(文法 2 最初: $t(74) = 2.0, p = 0.02$; 文法 3 最初: $t(64) = 1.7, p = 0.05$)。これらの結果は、皮質下領域や小脳などの調整系が新しい言語の文に適応する際、二言語群では文法 2 最初と文法 3 最初で新規のものとして処理されたのに対して、多言語群ではこのような更新周期が目立って見られなかったことを示唆している。

図 5

文 vs. 単語リスト

多言語群

二言語群

文法 1 最初

左

左

文法 1 最後

尾状核

視床

第 II 脚

鳥距溝・舌状回

楔前部

文法 2 最初

文法 2 最後

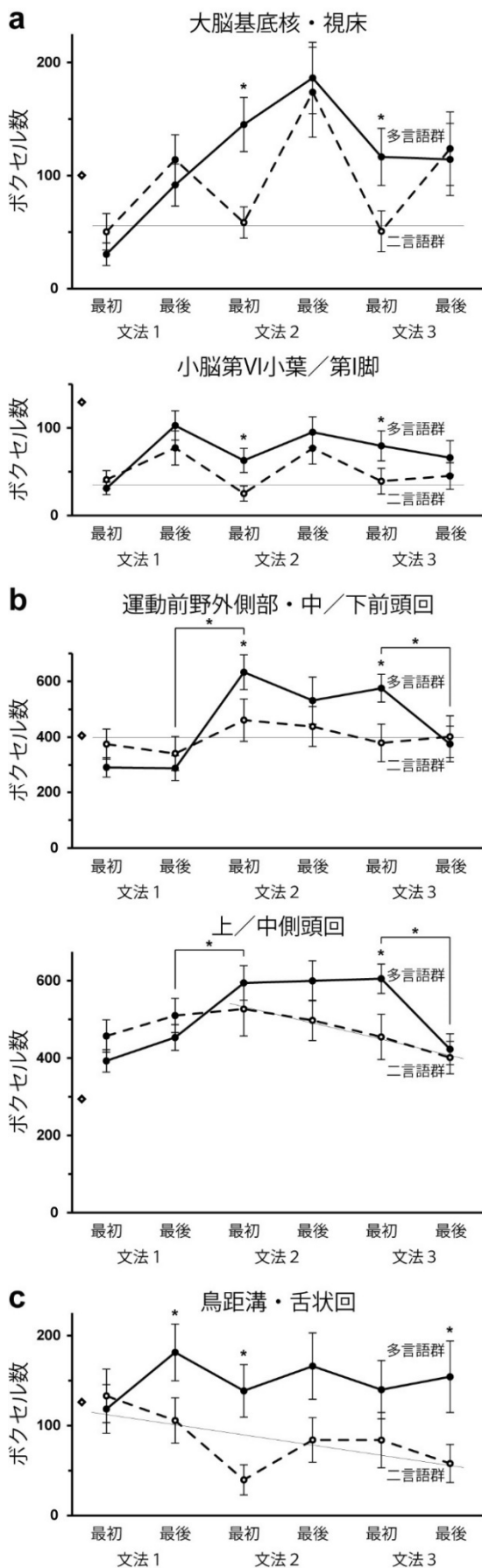
文法 3 最初

文法 3 最後

多言語群と二言語群の間での他の皮質領域および皮質下領域における活動差

「単語リスト」に対して「文」で選択的な領域を赤色で、「文」に対して「単語リスト」で選択的な領域を青色で示している(クラスターレベルで FWE 補正 $p < 0.05$)。MNI 標準座標 $x = -15$ における矢状断面は皮質下の活動を示し(赤色)、一方、 $y = -72$ における冠状断面は後頭部の活動を示した(赤色)。垂直線はそれらの断面の位置を示し、各黄色い点は中央構造部の領域における活動の極大値を示している(補足情報・表 S5 参照)。多言語群においては、文法 1 最後で脳基底核・視床に有意な活動が見られ、その後続くブロックを通して持続した。さらに多言語群においては、全ブロックで一貫して、視覚野に局限した活動が観察された。

図 6



多言語群における活動の二言語群と明確に異なる時間的パターン

各関心領域内において、「単語リスト」に対して「文」で選択的な活動を示したボクセル数(各参加者について補正なし $p < 0.001$)をブロックごとに示している。右脳と左脳それぞれの関心領域のボクセル数を独立のデータとして扱った。各図中の細かい直線は、個別の時間的活動パターンに従って、二言語群のデータの一部(O)に当てはめたものである。縦軸上の印(◇)は、各関心領域の 10%に相当するボクセル数を表し、各図の縮尺はこの固定の比率に基づいて標準化された。

(a) 大脳基底核・視床および小脳のボクセル数

(b) 左脳の言語関連領域および右脳での相同領域である、運動前野外側部・中／下前頭回および上／中側頭回のボクセル数

(c) 鳥距溝・舌状回のボクセル数

エラーバーは平均値の標準誤差を示す。*は統計的な有意性 ($p < 0.05$) を示す。

多言語群における前頭部と側頭部で増進した活動

運動前野外側部・中／下前頭回の活動(図 6b)に関して、二言語群のボクセル数が全てのブロックで初期(文法 1 最初)の水準に留まった。しかしながら、多言語群では文法 2 最初から文法 3 最初に至るまでボクセル数が初期水準よりも高くなり、文法 2 最初と文法 3 最初において二言語群に比べて有意に高い数を示した(文法 2 最初: $t(74) = 1.7, p = 0.04$ 、文法 3 最初: $t(64) = 2.4, p = 0.01$)。上／中側頭回では、二言語群のボクセル数が文法 2 最初から文法 3 最後まで徐々に減少したが、これは聴覚刺激への慣れによるものであった可能性がある。対照的に、多言語群では文法 2 最初から文法 3 最初まで数値が高いままであり、文法 3 最初において二言語群に比べて有意に高い数を示した($t(64) = 2.2, p = 0.01$)。注目すべきことに、これらの結果は多言語群でより増進した統辞処理および聴覚処理を示唆する。

多言語群における活動の時間的パターンに関して、前頭部および側頭部の両方で、文法 1 最後と文法 2 最初の間に、ボクセル数の有意な上昇が認められた(運動前野外側部・中／下前頭回: $t(100) = 4.5, p < 0.0001$ 、上／中側頭回: $t(100) = 2.6, p = 0.006$)。文法 2 又は文法 3 で習熟の基準を満たさない参加者もいたため、ここでは対応のない t 検定を行った。さらに、これらの領域で、文法 3 最初と文法 3 最後の間で活動の有意な下降が観察された(運動前野外側部・中／下前頭回: $t(74) = -2.5, p = 0.008$ 、上／中側頭回: $t(74) = -3.3, p = 0.0007$)。これらの結果は、多言語群の言語関連領域および右の相同領域での活動の時間的パターンが、二言語群の脳基底核・視床および小脳のそれと全く異なるものであったことを示唆している(図 6a,b)。

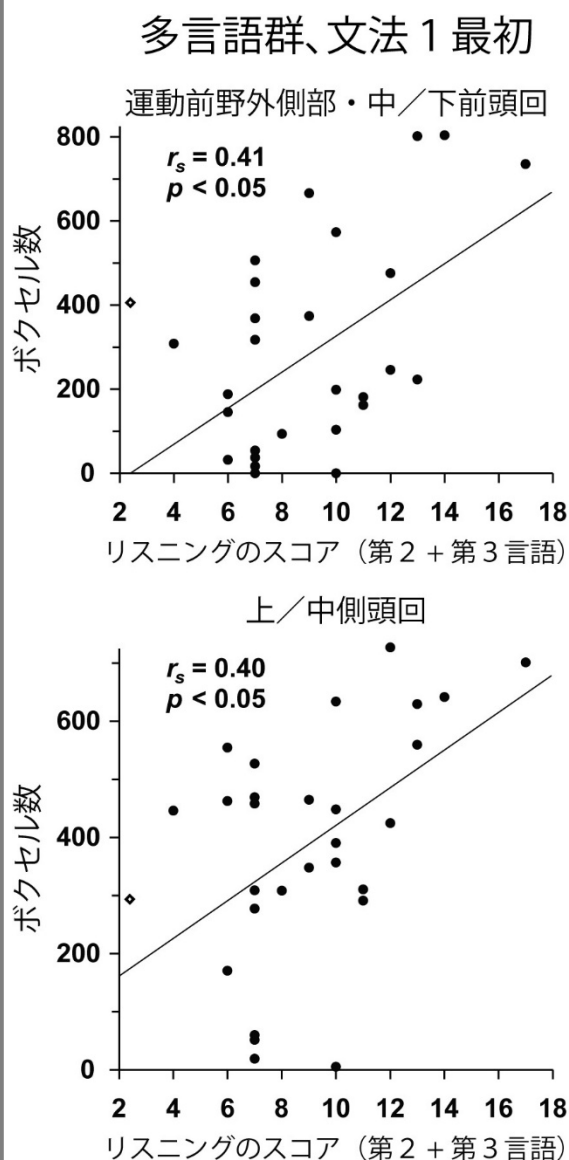
次に我々は、言語関連領域および右の相同領域における活動が、言語習熟度の個人差を反映するかを調べた。ここではカザフ語文への接触初期、すなわち文法 1 最初に焦点を当てた。すると多言語群において、合算したリスニングのスコアとボクセル数の間に有意な相関が観察された(図 7; 運動前野外側部・中／下前頭回: $r_s = 0.41, p = 0.03$; 上／中側頭回: $r_s = 0.40, p = 0.04$)。このような相関は他のブロックでは有意でなかった($|r_s| < 0.3, p > 0.3$)。これらの結果は、ある言語の文に初めて触れる際に特に、参加者の複数言語の習熟度が高いほど統辞処理および聴覚処理がより増進することを示唆する。

多言語群の視覚野における刺激に依存しない持続的な活動

多言語群における、「単語リスト」に対して「文」に選択的な比較では(図 5)、予想外のことであるが、全てのブロックを通して視覚野の活動が観察された(冠状断面、赤色の部分)。この活動は、視覚的刺激も提示される「単語リスト」の活動を差し引き、かつ「文」の事象中に視覚的刺激が一切提示されないにもかかわらず残存した(図 1b 参照)。より具体的には、視野のより周辺の領域(周中心窩から網膜黄斑まで)に対応する、鳥距溝・舌状回の前方(吻側)部が有意な活動を示した(矢状断面、赤色の部分)。対照的に、二言語群では、鳥距溝・舌状回の吻側部の活動が文法 1 最初と文法 1 最後でのみ有意に見られ、かつ多言語群よりずっと弱かった。「単語リスト」において英語訳された単語が視覚的に提示されることから(図 1b 参照)、「実在する」視覚刺激に起因する活動を特定するために、「文」に対して「単語リスト」で選択的な領域、すなわち「逆」の比較を調べた(図 5、青色の部分)。この比較から、視野のより中心の領域(中心窩から傍中心窩)に対応する、鳥距溝・舌状回の後方(尾側)部の活動が明らかに示された(矢状断面、青色の部分)。これらの結果は、音声のみを聴いている時でも視覚野が関与することを示唆する。

鳥距溝・舌状回において(図 6c)、二言語群のボクセル数は全てのブロックを通して減少した。対照的に、多言語群では、文法 3 最後の試行まで初期の高い水準を維持した。多言語群のボクセル数は、二言語群に比べて文法 1 最後、文法 2 最初、文法 3 最後で有意に高かった(文法 1 最後: $t(96) = 1.8, p = 0.04$ 、文法 2 最初: $t(74) = 2.5, p = 0.006$ 、文法 3 最後: $t(64) = 1.9, p = 0.03$)。これらの結果により、多言語群における視覚野の活動がより増進され持続的であることが、統計的に裏付けられた。

図 7



多言語群の言語習熟度によって予測される文法 1 最初の活動

運動前野外側部・中／下前頭回(a)と上／中側頭回(b)について、多言語群の各参加者ごとに両半球の関心領域におけるボクセル数を平均した値が、合算したリスニングのスコアとの間に有意な相関を示した。縦軸上の印(◇)は、図 6 同様、各関心領域の 10%に相当するボクセル数を表す。

考察

獲得された全ての言語は、それに続く言語学習の発展に積極的に寄与する可能性を持っている。この考えは、既得の知識による負の転移や干渉、或いは、非言語的・認知的要因の役割が多言語使用の発達の特徴であるとする、言語学習の欠如モデルと鋭く対立している。我々は、複数の言語が自然な仕方で獲得された時、等位や従属のような文構築の深い特性が内面化され、その結果言語の根本的基礎となるという仮説を立てた。

本研究では、両側の運動前野外側部・中／下前頭回および上／中側頭回において選択的な活動が観察され(図 4a)、多言語群では左腹側下前頭回でも認められた(図 4c)。これは、より増進した統辞処理³²および文法知識の関与、あるいはそのいずれかを示唆するものである。左前頭部におけるこれらの文法的

役割は、3つの統辞処理関連ネットワーク内の右前頭部によって支えられており³⁹、一方両側の側頭部の活動は、音声パターンに対して注意力が増強した影響かもしれない⁴⁰。さらに、第2言語獲得の初期において、左運動前野側部・中／下前頭回の活動が実に、言語習熟度が高くなるほど上昇した^{28,41}。本研究において、多言語話者では文法2の下で、より複雑な統辞構造が要求された時に右前頭部の活動が動員されたが、二言語話者では、文法1および文法2双方の下で右前頭部の活動が見られた(図4b)。今回我々は限られた単語のセットを用い、また主語・動詞の一致のような統辞素性をテストしたものの、文における単語や語形変化の組み合わせは膨大になり、それゆえ明示的な規則や一般的なパターン学習とは正反對に、文法知識の獲得が必須であった。この文法知識は、人間言語の鍵となる概念である「併合生成可能性(Merge-generability)³⁴」を重要な基礎としており、一般的な人工的規則とは著しい対照を示している。

我々が先行研究で示唆したように、「皮質の活動は、言語獲得の初期に上昇し、その後維持され、そして言語能力の固定に伴い下降する²⁶」。特筆すべきは、本実験中の短い期間でも多言語話者でこれと同じ活動パターンが見られ、二言語話者では見られなかったことである(図6b)。文法2最初および文法3最初が維持の段階の2つの端点であったことから、このパターンは、左腹側下前頭回における群間差を説明するものでもある(図4c)。さらに、多言語話者において、文法1最初という獲得の初期段階で、言語関連領域および右の相同領域におけるボクセル数と第2言語および第3言語の習熟度の間に正の相関が見られた(図7)。よって、言語的・文法的規則や新しい音声パターンを獲得するプロセスが、多言語話者において始めに促進され、後に減少した可能性が高い。

経路探索課題についてのfMRI研究では、未知の規則を伴う探索条件、および事前学習済の規則を伴うモデルベース条件の下で、両側の線条体と小脳の活動が報告されている⁴²。そのような探索条件およびモデルベース条件に類似して、今回の文法1から文法3の一連の条件においても、新たな言語における未知の規則の探索が求められる。「文」と「単語リスト」の比較において大脳基底核・視床および小脳における選択的な活動が観察されたことは(図5、図6a)、多言語話者が二言語話者と比べて言語関連領域および認知一般の適応制御システムを、より上手く連係させていることを示唆するものである。

鳥距溝・舌状回の活動に関して(図4c、図5、図6c)、舌状回は左運動前野側部、左角回および小脳核と共に、統辞論および入出力インターフェースを処理する脳領域ネットワークの一部であり³⁹、これらの領域の活動は本研究でも再現されている(図4b)。多言語話者における、右舌状回および主要な統辞関連領域である左腹側下前頭回の動員は、統辞構造のより深い処理を示唆するものかもしれない。本研究では、「単語リスト」に対する「文」、および「文」に対する「単語リスト」の二重比較を用いることによって、鳥距溝・舌状回の吻側部および尾側部がそれぞれ別々に活動したことを実証した。このことは、特に多言語話者において文の聴覚的提示の最中でも周辺視が使用された可能性を示している。鳥距溝・舌状回の活動に対して考え得る非言語的説明として、「文」と「単語リスト」間での感覚入力・注意の厳格な統制にも関わらず、視

³⁹ 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).

⁴⁰ Alho, K., Rinne, T., Herron, T. J. & Woods, D. L. Stimulus-dependent activations and attention-related modulations in the auditory cortex: A meta-analysis of fMRI studies. *Hear. Res.* **307**, 29–41. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2013.08.001> (2014).

⁴¹ 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).

⁴² Fermin, A. S. R. *et al.* Model-based action planning involves cortico-cerebellar and basal ganglia networks. *Sci. Rep.* **6**(31378), 1–14. <https://doi.org/10.1038/srep31378> (2016).

覚的イメージ(例えば単語の配列や文内容の光景)を使用したことが挙げられる⁴³。本研究の結果はさらに、多言語話者が言語使用に際して、複数の感覚種(ここでは聴覚と視覚)の情報を活用できることを示唆している。

研究材料および手法

詳細については、補足情報・研究手法(Supplementary Methods)参照。

参加者

実験への参加希望者(日本語を母語とする 62 名)は、一般財団法人言語交流研究所ヒップファミリークラブ、東京大学、上智大学など、複数の団体を通して広く募集され、また参加者からの個人的な紹介もあった。参加者は全員、カザフ語を獲得するのは本実験が初めてであった。明確で説得力のある理由がない限り、参加者を除外することはなかった。参加者のうち 1 名は日本語とトルコ語の両方を第 1 言語としていたが、二言語を第 1 言語とする場合の影響は未知であり、また単語(Wpre)・文法 1・文法 2 の基準に到達するのが他の多言語話者と比較して例外的に速い訳ではなかったため、解析に含めた。参加者の右利きの度合いは、エディンバラ利き手テスト⁴⁴に基づき側性係数として推定され、2 名は左利きであり(負の側性係数)、1 名はその可能性があったため(側性係数: 6.7)、解析から除外した。別の 1 名は英語のリスニングのスコアが 1 であったため、また、9 名は文法 1 で基準に達しなかったため除外した。

残る 49 名の参加者は全員右利きであり(側性係数: 47-100)、精神疾患はなかった。多言語群で文法 1、文法 2、および文法 3 の基準に達した人数は、それぞれ 28、23、および 20 名だった。1 名は撮影装置内での頭の動きのため、文法 3 の解析から除外した。二言語群で文法 1、文法 2、および文法 3 の基準に達した人数は、それぞれ 21、15、および 14 名であった。参加者にとって、文法 1 の最も単純な構造(2 つの単文の等位)を獲得すると、一般的に文法 2・文法 3 のより複雑な統辞構造を理解することがより容易になったであろう。

二言語群と多言語群の間で、年齢および側性係数に有意差はなかった(年齢: t 検定、 $t(47) = 1.6$, $p = 0.1$; 側性係数: $t(47) = 1.7$, $p = 0.09$)。一方、第 2 言語の言語接触期間は両群で有意差が認められたが($t(47) = 2.2$, $p = 0.03$ 、多言語群の方が長い)、第 2 言語のリスニングのスコアは同等であった($t(47) = 1.4$, $p = 0.2$)。また、二言語群は主に大学で第 3 言語を経験していたものの、第 3 言語のリスニング能力は最小限であった(補足情報・表 S2 参照)。対照的に多言語群では、第 3 言語のリスニングのスコアについて、ほとんどが 3 以上であった。したがって、両群の重要な違いは第 3 言語を獲得していたか否かである。

刺激

カザフ語の聴覚刺激は、補足情報・表 S3 に示した単語で構築された 146 の文(80 の正文と 66 の非文)で構成され、カザフ語母語話者の男性によって録音された。正文および非文はややゆっくり発話され、また個別の単語も別に録音された。刺激はソフトウェアの Wavelab 8 (Steinberg Media Technologies GmbH、ハンブルク州、ドイツ)を用いてデジタル化し(16 ビット、44.1 kHz、ステレオ)、各刺激の最大音量は等しく -1 dBFS に設定された。また文刺激について元の音程を保ちながら、長さが可能な限り一定になるよう努め、文中に異なる機能語を含む文法 1、文法 2、および文法 3 の下で文の長さがそれぞれ 4.3 秒、4.2 秒、

⁴³ Sakai, K. & Miyashita, Y. Visual imagery: An interaction between memory retrieval and focal attention. *Trends Neurosci.* 17, 287-289. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(94\)90058-2](https://doi.org/10.1016/0166-2236(94)90058-2) (1994).

⁴⁴ Oldfield, R. C. The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 9, 97-113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4) (1971).

および 4.65 秒に調整された。撮影中、装置の高周波の雑音 (> 1 kHz) を軽減するために、参加者は MRI 準拠のヘッドフォン (Resonance Technology Inc.、ノースリッジ、カルフォルニア州、アメリカ)、耳あて (3 M Peltor、セントポール、ミネソタ州、アメリカ)、および耳栓 (Earasers、Persona Medical、カッセルベリー、フロリダ州、アメリカ) を装着した。

課題

単語条件の下で(図 1 参照)、「デモ」試行では、5 つの符号(+かー)の列が左から右の順に従って、「単語リスト」と 5 つのカザフ語単語の組との対応の正誤を示した。そうした手がかりのない「テスト」試行では、不一致である語数を数え、該当する色のボタンを押して回答させた。文法条件は本文(序論)を参照のこと。

単語条件と文法条件両方の下で、「デモ」試行 4 回のブロックと「テスト」試行 8 回のブロックを交互に行った。課題を完了する速さに個人差があり、単語および文法 1 から文法 3 を合算して、参加者ごとに 30 から 104 ブロック(220 から 704 試行)を要した(例えば文法 1 では撮影 1 回あたり、文法 1 の試行 8 回で 1 ブロックと単語の試行 5 回)。デモ試行において、単語条件の下ではカザフ語単語が、音声パターンの知識獲得のために提示され、文法条件の下ではカザフ語文が、統辞構造の知識獲得のために提示された。実験を通じて、参加者はカザフ語の文法規則や文構造について、明示的な説明を一切受けなかった。参加者はテスト試行の各ブロックの後で必ず、正答数のフィードバックを受け(例えば 8 回のうち 6 回)、特に文法条件の下では GR と SV 課題について別々に受けた。参加者が単に記憶して判断することを避けるため、デモとテスト試行では異なる刺激セットが用いられた。

MRI データ取得 (和訳省略)

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。

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

本研究は一般財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(B)(JP17H02347)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、以下リンクを参照のこと(和訳省略)。

https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1038%2Fs41598-021-86710-4/MediaObjects/41598_2021_86710_MOESM1_ESM.docx

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 関連基礎科学系

梅島奎立 & 酒井邦嘉

Department of Linguistics and Philosophy, Massachusetts Institute of Technology, 77 Massachusetts Avenue, Cambridge, MA, 32-D80802139, USA

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(Suzanne Flynn)

責任著者:酒井邦嘉

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・コモンズ・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とる必要がある。

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

〔和訳註〕

ⁱ **MRI**(磁気共鳴映像法)は、脳の組織構造を、水素原子の局所磁場に対する応答性から測定し画像化する手法で、全く傷をつけずに外部から脳組織を観察する方法として広く使用されています。そのために使用する医療機器が、超伝導磁石によって高磁場(3 テスラ程度)を発生させる **MRI** 装置です。この装置を使用した撮影法の一つに **fMRI**(機能的磁気共鳴画像法)があります。**fMRI** は脳内の神経活動に伴う血流変化を、局所磁場の变化から測定し画像化する手法で、全く傷をつけずに外部から精度良く脳活動を観察する方法として、1990 年代から広く使用されています。

ⁱⁱ ある認知機能が脳のどの領域を必要とするかを知るために、課題を行わせたり刺激を提示したりするわけですが、関心のある認知機能だけを生じさせる課題や刺激を作ることは困難です。そこで、関心のある要素を含む条件・課題・刺激等に対して、その要素だけでなく他は全て同じであるような「統制(対照)条件」を

用意します。元の条件の活動から統制条件の活動を引き算することで、関心のある機能の効果のみを抽出できます。この手法が「差分法 (subtraction method)」です。

iii 特定の課題時や刺激の提示時の脳活動を見たいとき、試行の中から特に関心があるタイミングを指定することになります。この課題や刺激提示に対応したタイミングが「事象 (event)」です。

iv 「 $A - B$ 」という差分法の脳活動では、「 A 」に対する反応の一部のみを抽出したいのですが、「 $-B$ 」という余分な反応が含まれることがまれにあります。多くの場合では、ベースライン (安静時など) と比べて $A > 0$ 、 $B > 0$ なので問題にならないのですが、 $B < 0$ のときは、「 $A - B$ 」=「 A 」+「 $-B$ 」の効果が出てしまいます。そこで、「 $-B$ 」に対する活動領域を「除外マスク (exclusive mask)」と定めて、このマスクで覆われた「 $A - B$ 」の反応を取り除きます。

v 全脳から一部の脳領域を取り出して調べるとき、この取り出した領域が「関心領域 (region of interest, ROI)」です。