

[招待論文]

「脳の文法処理と再帰的計算」

— 言語の脳科学をめざして —

酒井 邦嘉

東京大学 大学院総合文化研究科 〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1

E-mail: kuni@mind.c.u-tokyo.ac.jp

あらまし 言語に規則があるのは、人間が規則的に言語を作ったためではなく、言語が自然法則に従っているためである。「人間に特有な言語能力は、脳の生得的な性質に由来する」、と半世紀にわたって主張してきたのは、言語学者のノーム・チョムスキーであった。しかし、生得説を裏付けるための証拠が未だ不十分なため、チョムスキーの革命的な考えは、多くの誤解と批判にさらされている。言語の脳機能の分析は、実験の積み重ねと MRI 技術などの向上によって、飛躍的な進歩を遂げてきた。本総説では、言語の問題に脳科学から挑むアプローチの一例として、脳の文法処理に関して最近得られた知見を中心に紹介する。

キーワード 言語, 普遍文法, 文処理, 脳, 機能イメージング

Syntactic Processing in the Brain and Recursive Computation

— Towards the Brain Science of Language —

Kuniyoshi L. SAKAI

The University of Tokyo, Komaba 3-8-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8902 Japan

E-mail: kuni@mind.c.u-tokyo.ac.jp

Abstract In this article, I will focus on our results of a CREST project of JST concerning language processing in the human brain, thereby updating recent advances made by functional neuroimaging and magnetic stimulation studies of language. First, I will provide the first experimental evidence that the neural basis of sentence comprehension is indeed specialized. Specifically, our recent functional magnetic resonance imaging (fMRI) study has clarified that the human left prefrontal cortex is more specialized in the syntactic processes of sentence comprehension than other domain-general processes such as short-term memory. Second, the distinction between explicit and implicit syntactic processes will be clarified, based on our fMRI studies that elucidate syntactic specialization in the left prefrontal cortex. The current direction of research in the brain science of language is beginning to reveal the uniqueness of the human mind.

Keyword Language, Universal Grammar, Sentence Processing, Brain, Functional Imaging

1861年にブローカが発話の障害を報告して以来、言語障害の症例がこれまで数多く蓄積されてきた。大脳皮質の言語野であるブローカ野が損傷を受けると、発話される文から文法的な要素が抜けてしまう現象が知られており、「失文法」と呼ばれている。1960年代に、アメリカのゲシュビントらは、失文法の原因がブローカ野を含む前頭葉の損傷であることを主張したが、この考えに異論を唱える研究者が多数現れて、論争が

続けられてきた。さらに、人間だけに備わった言語能力が、その他の心の機能と原理的に分けられるかという問題は、アメリカの言語学者のチョムスキーとスイスの発達心理学者のピアジェによる有名な論争（1975年）以来、依然として脳科学や認知科学における中心的な謎である。

1980年代になって、文中に文法的な間違いがあるときに、脳波に一定の乱れが生ずることが報告された。

しかし、脳波の技術では、脳のどこから信号が出ているのかを決めることができない。その後、脳科学の進歩に伴い、人間の脳活動を画像として捉える PET (ポジトロン断層撮影法) や fMRI (機能的磁気共鳴映像法) などを用いて、心のさまざまな機能の座が脳のどこにあるかを調べられるようになってきた。これらの脳機能イメージングの技術によって、さまざまな言語課題でブローカ野の活動が観察されるようになったが、その大半は単語の音韻や意味に関する課題だったために、ブローカ野の機能は依然としてよくわからなかった。文を使った研究でも、複雑な文にすればするほど言語野の活動が強くなることを示したのにとどまっていたので、言語ではなく、記憶などの認知機能の負荷が言語野の活動を高めるといった可能性が残ったままであった。実際、単語を用いたさまざまな記憶課題で、左脳の前頭葉が活動することが報告されている。近年、人間で見られる記憶や数に関する認知能力がサルやチンパンジーでも観察され、言語能力を一般的な認知能力の延長としてとらえられる見方が支配的であった。

1. 文法エラーに対する選択性

我々の研究プロジェクトでは、言語の本質である「文法」という抽象的な概念が脳の中でどのように使われているかを特定の大脳皮質の働きとして客観的に明らかにし、記憶などの認知機能では説明できない言語能力の座を特定することを目標とした。この研究により、言語の処理に特化した「言語獲得装置」の存在が確かめられると考える。

チョムスキーがもたらした言語学のパラダイム・シフトは、「普遍文法 (Universal Grammar)」をめぐって進展した。普遍文法とは、人間が生得的にもっていると考えられる言語能力、すなわち言語獲得装置についての理論である。われわれが母語を用いて発話したり、他者の発話を理解したりするときには、普遍文法にもとづく言語情報処理を、無意識のレベルでおこなっていると考えられる。言語学では、この普遍文法の候補として、さまざまな言語のデータを普遍的に説明することができる理論が提出されてきた。しかしながら、これらの理論が、脳の認知機能の一部として支持され得るかどうかは、まだよくわかっていない。普遍文法の計算原理が、実際に脳のどのようなシステムによって実現されているか、という根本的な問題に挑戦するためには、新しい研究パラダイムの開発が必要である。

普遍文法に基づく文の最もユニークな特徴は、再帰的計算にある。例えば、「太郎が次郎は三郎がこのアイデアを考えたと思っていると言った。」のように、い

くらでも長い文を再帰的に作ることが原理的に可能である。さらに、われわれは文法的な文と非文法的な文を、明確に区別することができる。そこで、文法の整合性をチェックシエラーを検出するためのメカニズムが脳にある、という作業仮説を立ててみることにする。この作業仮説を検証するための研究パラダイムとして、文法的な間違いを含む文と綴りの間違いを含む文を比較することを試みた。その結果、文法を使って言語を理解するときに働く脳の部分を、fMRI によって初めて明らかにした (Embick et al., 2000)。この実験では、英語を母語とする被験者に英語の文を視覚的に提示して、文法的な語順の判断と綴りの判断における脳活動を比較したところ、文法的な間違いを含む文は、綴りの間違いを含む文よりも強い活動を、大脳皮質の各言語野に引き起こすことが明らかになった。また、この2条件での皮質活動の差は、左脳のブローカ野が最大であった。以上の結果は、ブローカ野が文法処理に特化していることを示す直接的な証拠であり、脳における文法処理モジュールの存在を示唆している。

2. 文法中枢の発見

上記の結果から、文法判断に必要な認知機能がブローカ野に関係していることがわかったが、一般的な認知機能がどの程度までブローカ野の働きに影響を及ぼすのかは未知の問題であった。そこで我々は、一般的な認知機能の代表として記憶にスポットを当てる一方で、言語機能の中心として文法を位置づけて、両者を対比させた。この新しいパラダイムに基づく fMRI の実験から、文法を使う言語理解に対する特異的な活動が左脳の前頭前野に局在することを発見した (Hashimoto & Sakai, 2002)。記憶などの認知機能では説明できない言語能力の座を特定したこの知見は世界で初めてのものであり、基本的な脳の機能が人間とサルで同じであると考えた大多数の脳科学者の常識を覆す発見である。このような研究の積み重ねが突破口になって、人間の人間たるゆえんである心の働きの解明が進むことが期待される。

被験者は、日本語を母語とする右利き成人男性 16 名である。実験に用いた課題は、次の 4 つである。

1) 文法判断課題その 1 (主語)

「太郎は/三郎が/彼を/ほめると/思う」(使用した 72 文のうちの一つ) のように、文の文節を順に 0.5 秒ごとに提示する。すべての文は 2 つの固有名詞、2 つの動詞、そして 1 つの代名詞からなる。この課題では一方の動詞に下線が引かれており、文を提示後に、この動詞と一方の固有名詞がペアで現れる。被験者は、この固有名詞が動詞の主語であれば緑のボタンを押し、主語でなければ赤のボタンを押す。

2) 文法判断課題その2 (代名詞)

課題1と同じ文を同様に提示する。この課題では代名詞に下線が引かれており、文を提示後に、この代名詞と一方の固有名詞がペアで現れる。被験者は、この代名詞が固有名詞を指し得るならば緑のボタンを押し、指し得なければ赤のボタンを押し。

3) 文の記憶課題 (文記憶)

課題1と同じ文を同様に提示する。この課題ではいずれかの単語に下線が引かれており、文を提示後に、この単語ともう1つの単語がペアで現れる。被験者は、この2つの単語が文の提示順と一致するならば緑のボタンを押し、一致していなければ赤のボタンを押し。

4) 単語の記憶課題 (単語記憶)

課題1と同じ文を名詞と動詞のグループに並び替えて提示する。この課題では、単語列を提示後に2つの単語がペアで現れる。被験者は、この2つの単語が単語列の提示順と一致しているならば緑のボタンを押し、一致していなければ赤のボタンを押し。

この実験の新しい点は、同じ単語のリストを使いながら、文法の知識を使って文の理解を判断する課題と、単語の提示順を覚える記憶課題を対比させるパラダイムにあり、これまでテストされたことのない着眼点である。単語記憶と文記憶では、どちらも課題の要請は同じだが、単語記憶は脈絡のない単語の羅列を覚えなくてはならないので、文記憶や文法判断課題と比べて格段に難しい。

言語が他の認知機能と比べて特別な働きを持たないならば、記憶の負荷や課題を解く際のメンタルな負荷が最も必要とされる単語記憶において、言語野を含めた広い領域に活動が観察されるはずである。ところが、単語記憶の方が文記憶よりも強い活動を引き起こしたのは、頭頂葉から前頭葉にかけての一部の領域だけであった。これに対し、2つの文法判断課題と単語記憶で脳の活動を直接比較したところ、左脳の前頭前野に強い活動が観察された。さらに、文法判断課題と文記憶を直接比較した場合でも、同じ領域が強く活動することを見出した。従って、左脳の前頭前野は、文法処理に基づく言語理解を担っていることが結論できる。本研究の成果は、「文法」という抽象的な概念が脳の中でどのように使われているかという疑問に対し、特定の大脳皮質の働きとして客観的に答えたものである。

失語症の研究で長年の論争であった「失文法」の問題に対し、脳機能イメージングの手法によって新しい知見を提供できたことは、医学の進歩においても重要である。この成果は、脳の損傷部位と言語機能の関係を明らかにする手がかりを与えるだけでなく、言語障害の機能回復を研究する上で、ブローカ野周辺皮質の活動をモニターすることの重要性を示唆する。

3. 文法中枢の証明

経頭蓋的磁気刺激法 (TMS) は、1985年から主として大脳の運動野の刺激法として用いられるようになった。磁気刺激では、磁場の変化が誘導電流を引き起こし、大脳皮質を刺激できる。本研究で用いた二連発刺激は、数秒間に一回の頻度で加える低頻度刺激であり、健常者に対しても安全であることが確かめられており、数ミリメートルの位置情報と数十ミリ秒の時間情報が得られる。TMSは、無侵襲的に脳の一部を刺激して脳の領野と機能の因果関係を明らかにできる、現在唯一の実験手法である。我々は、文法判断と意味判断に対するTMSの効果を直接対比することで、文法処理とブローカ野の働きの因果関係を初めて証明した (Sakai et al., 2002)。本研究によって文法処理の機能が前頭前野の一部に局在することが示され、しかもTMSが文法判断を特異的に「促進」することが明らかとなった。事象関連のTMSの実験は、これまで知覚機能や運動機能に限られており、TMSは特殊な場合を除き脳機能を抑制することが報告されていたので、この知見は常識を覆す結果である。

この実験の新しい点は、同じ単語のリストを使いながら、文法知識を使って文の正誤を判断する課題と、意味のつながりを判断する課題を対比させるパラダイムにある。実験に用いた言語課題は、次の2つである。

1) 文法判断課題 (Syn)

「ゆきを さわる」、「みちを ゆずる」、「ぬのを そめる」といった文 (使用した60文の例) を、3文字ずつ0.2秒ごとに視覚提示する。すべての文は名詞句と1つの動詞からなる。文を提示後に、この文が文法的に正しければ (N, normal) 被験者は緑のボタンを押し、正しくなければ (A, anomalous) 赤のボタンを押し。文法的に間違った文 (Syn A) の例は、「ゆきをつもる」、「みちを こおる」、「ぬのを かわく」である。これらはすべて、「ゆきが つもる」、「みちが こおる」、「ぬのが かわく」とすれば正しい文になるので、意味のつながりは正しい文である。この課題は、日本語の獲得過程で自然と身に付くような文法知識 (生成文法) が必要である。

2) 意味判断課題 (Sem)

課題1と同様に文を提示して、この文が意味的に正しければ被験者は緑のボタンを押し、正しくなければ赤のボタンを押し。意味的に間違った文 (Sem A) の例は、「ゆきを しかる」、「みちを ひろう」、「ぬのを みる」である。これらはすべて、文法的には正しい文である。

磁気刺激は、動詞の提示開始 (T = 0)、それより0.15秒後か0.35秒後のいずれかのタイミングを選んで行った。実験では、被験者の反応時間 (動詞の提示開始からボタン押しまでの時間) を測定した。磁気刺激

を加えた条件と、磁気刺激を加えずに刺激に伴うクリック音のみを提示した条件とで、反応時間の差 (ΔRT) を求めて、磁気刺激の効果の指標とした。まず、ブローカ野（こめかみの少し上に位置する左前頭葉下部の一部、ブロードマンの 44 野と 45 野で人間のみにある）に磁気刺激を与えた結果を示す。T = 0 では動詞が提示された直後なので、まだ言語判断が起こらない段階であり、どちらの課題とも、 ΔRT はゼロと変わらなかった。次に T = 150 ms では、文法判断課題 (Syn) において、文法的に正しい文 (N) と間違った文 (A) の両方で反応時間の減少が見られた。反応時間が減少したということは、文法判断が促進されたことを示す。一方、意味判断課題での反応時間には全く変化が見られなかった。また、T = 350 ms では、どちらの課題とも、 ΔRT はゼロと変わらなかった。これに対し、中前頭回（ブロードマンの 8 野と 9 野でサルにもある）に磁気刺激を与えた結果では、T = 150 ms においてどちらの課題とも、 ΔRT はゼロと変わらなかった。以上の知見より、左脳のブローカ野の活動と文法判断の因果関係が証明された。文法処理の座を磁気刺激で特定したこの知見は、世界で初めてである。また、文法判断が促進されるという結果は、予め磁気刺激によってブローカ野の活動が誘起されることで、その後の文法判断に伴う活動が起こりやすくなることを示唆する。この新しいメカニズムは、脳の特定の部分が文法判断を司っていることを直接的に示す発見である。

4. 言語入力から文理解までのプロセスの解明

音声言語の両耳異刺激聴条件と両耳同刺激聴条件における聴覚野の活動を fMRI を用いて比較し、注意の効果が各領域によってどのように異なるかを検討した (Hashimoto et al., 2000)。その結果、一次聴覚野、側頭平面、上側頭回などにおいて局所的な活動が観察され、両条件に対する信号量の変化のパターンが、聴覚連合野において複数存在することが明らかになった。以上の結果は、音声言語処理において、聴覚連合野が複数の経路に機能分化していることを示唆する。また、聴覚と視覚のモダリティーについて、文レベルの処理と語彙レベルの処理に伴う皮質活動を fMRI を用いて比較し、文レベルの処理に選択的な活動を示す脳の領域を同定した (Homae et al., 2002)。この結果より、左下前頭回腹側部が文理解の処理に選択的に関わっていることが明らかになった。

我々は、さらに文法判断を音韻判断および意味判断と対比させることで、文法判断の機能局在を事象関連 fMRI により調べた (Suzuki & Sakai, 2003)。言語刺激はすべて聴覚的に提示し、文法判断条件 (Syn) で

は刺激文が文法的に正しいかどうかを判断させた。意味判断条件 (Sem) では刺激文中の名詞と動詞の意味的つながりが正しいかどうかを判断させ、音韻判断条件 (Pho) では動詞のアクセントが正しいかどうかを判断させ、音声ピッチ比較条件 (Voi) では声のピッチを比較させた。すべての条件で同じ単語セットから刺激文を作成し、語彙を統制した。その結果、Syn - (Sem + Pho + Voi) において左下前頭回 (ブローカ野) にのみ有意な活動が見られた。この領域は、文法エラーに選択的に反応する部位と一致する。Sem と Syn それぞれにおいて正文と誤文の試行を分けて解析したところ、左下前頭回は正文と誤文のいずれにおいても Syn に選択的な活動を示した。これらの結果は、左下前頭回が音韻判断や意味判断ではなく、文法判断に選択的に関わっていることを示唆する証拠である。

以上の研究は、言語処理が人間の脳で特別な意味を持つことを初めてはっきりさせたことにより、人間をサルの延長としてとらえる人間観を大きく変革させることになると思われる。

引用文献

- 酒井邦嘉: 『言語の脳科学—脳はどのようにことばを生み出すか』。中公新書, 東京 (ISBN 4-12-101647-5) (2002).
- Embick, D., Marantz, A., Miyashita, Y., O'Neil, W. & Sakai, K. L.: A syntactic specialization for Broca's area. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **97**, 6150-6154 (2000).
- Hashimoto, R., Homae, F., Nakajima, K., Miyashita, Y. & Sakai, K. L.: Functional differentiation in the human auditory and language areas revealed by a dichotic listening task. *Neuroimage* **12**, 147-158 (2000).
- Homae, F., Hashimoto, R., Nakajima, K., Miyashita, Y. & Sakai, K. L.: From perception to sentence comprehension: The convergence of auditory and visual information of language in the left inferior frontal cortex. *NeuroImage* **16**, 883-900 (2002).
- Hashimoto, R. & Sakai, K. L.: Specialization in the left prefrontal cortex for sentence comprehension. *Neuron* **35**, 589-597 (2002).
- Sakai, K. L., Noguchi, Y., Takeuchi, T. & Watanabe, E.: Selective priming of syntactic processing by event-related transcranial magnetic stimulation of Broca's area. *Neuron* **35**, 1177-1182 (2002).
- Suzuki, K. & Sakai, K. L.: An event-related fMRI study of explicit syntactic processing of normal/anomalous sentences in contrast to implicit syntactic processing. *Cereb. Cortex* **13**, 517-526 (2003).