



言語機能の局在論をめぐって

Localization of Language Function in the Brain

宮下 紘幸* 酒井 邦嘉*

Hiroyuki Miyashita*, Kuniyoshi L. Sakai*

Abstract

Since the first report of an aphasic patient by Paul Broca, the localization of brain function has been disputed for 150 years. In lesion studies, double dissociation has been a key concept to show the localization of particular cognitive functions. The advancement of non-invasive brain imaging methods enables us to investigate the brain activities under well-controlled conditions, further promoting the studies on the localization of the cognitive functions, including language function. Brain imaging studies, together with subtraction and correlation analyses, have accumulated evidence that syntax, phonology, and sentence comprehension are separately processed by modules in different cortical regions. More specifically, it has been clarified that the module for syntax localizes in the left lateral premotor cortex and the opercular/triangular parts of the left inferior frontal gyrus. This modular structure further suggests that aphasia is interpreted as deficits in either syntactic or phonological processing. Therefore, the classical model of contrasting speech production and comprehension should be updated.

According to theoretical linguistics, on the other hand, the recursive computation of syntactic structures is an essential feature of human language faculty. One direction of research would be to contrast human beings and animals for the abilities of processing symbolic sequences. Another direction is to clarify that the human brain is indeed specialized in language processing, which can be revealed by well-controlled language tasks and functional imaging techniques. Here we will review recent studies that demonstrate the existence of grammar center in the left frontal cortex. The future studies in the neuroscience of language will eventually elucidate the cortical localization of language function in a more precise way, i.e., what is really computed in the human brain.

Key words : syntax, language, frontal cortex, localization, module

はじめに

自然言語は、文法・意味・音韻などを中心としたいくつかの独立した「モジュール（機能単位）」により構成されていると考えられている。中でも文法（syntax）は、「再帰的計算（recursive computation）」という特異的なプロセスで人間の言語を特徴づけている。再帰的計算とは、新たな文や句を再び元の文や句の中に埋め込むことである。この言語の本質を看破し「生成文法」に始まる文法理論を主導してきた Chomsky¹⁾ は、新たな文を無限

に生成できる言語能力に着目して「言語の創造的側面」と述べている。

近年の脳機能イメージング技術の進展と実験パラダイムの精緻化によって、単語に関する音韻や意味のモジュールだけでなく、文法機能のモジュールの局在も明らかになりつつある。これにより、古典的な発話・理解モデルに基づく失語症の病因についても再検討する必要が出てきた。実際、文法処理に選択的な脳活動の解析と、損傷研究との融合によって、これまで議論の多かった文法障害の存在がはっきりしている。本稿では言語の脳科学における新しい展開について紹介しながら、人間の言

* 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〕 Department of Basic Science, Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo, 3-8-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8902, Japan

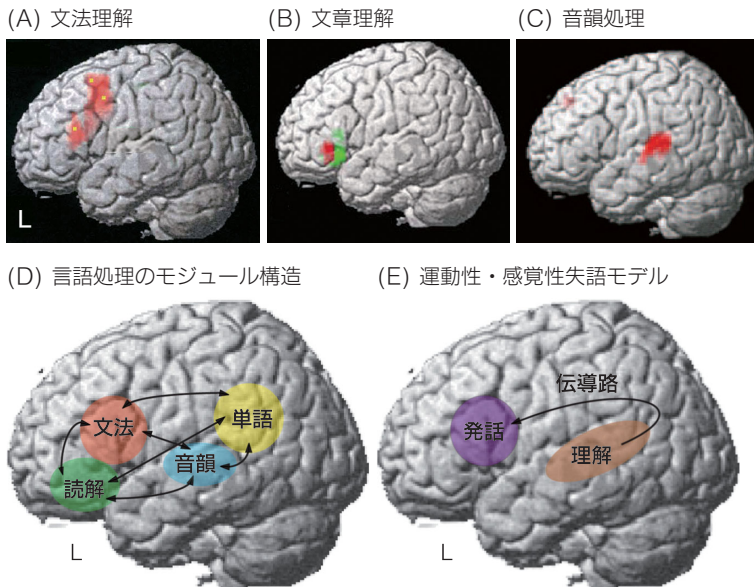


Fig. 1 言語処理モジュールの局在

A: 文法（文の構造）の理解によって活動する領域（左下前頭回弁蓋部・三角部、および左外側運動前野）。B: 文章理解によって活動する領域（左下前頭回眼窩部）。赤の領域は、音声刺激提示による活動を示し、緑の領域は、視覚刺激提示による活動を示す。C: 音韻の処理によって活動する領域（左上側頭回）。D: これまでの研究によって明らかになってきた言語処理モジュールの局在。E: 古典的な失語症研究に基づいた運動性・感覚性失語モデル。

語について理解を深めたい。

I. 言語における文法機能の独立性

言語を含め脳のさまざまな機能については、全体論的な解釈が今でも根強く存在する。これに対し脳損傷研究では、損傷部位と症状との対応関係から機能を推定する試みが主であった。ある脳部位の損傷によって機能Aは正常だが機能Bが失われ、別の部位の損傷では機能Bは正常だが機能Aが失われるとき、これら2つの脳機能が「二重解離（double dissociation）」を示すという。二重解離は、脳機能の局在を示す直接的な証拠となる。次節で述べるように、運動性失語と感覚性失語はこの二重解離の典型例と考えられてきた。自然言語処理の神経基盤は、さらに多数の機能モジュールによって担われていると考えられ、これらを分離して同定することが言語の脳科学の目標である。このようなモジュールの局在の詳細な検討を行うにあたり、機能的磁気共鳴映像法（functional magnetic resonance imaging: fMRI）などの無侵襲的な脳機能イメージング技術を用いた研究は多くの知見をもたらしてきた。

筆者らのfMRI研究を例に挙げると、文法判断課題に対して、語句と文の意味内容を完全に統制した短期記憶課題を対照条件として用いて、脳活動を直接比較した。その結果、左下前頭回弁蓋部・三角部（L. F3op/F3t）と左外側運動前野において、文法判断に選択的な活動が明らかになっている（Fig. 1 A）²⁾。さらに、文法判断課題に対して意味判断や音韻判断課題と比較しても、左下前頭

回弁蓋部・三角部が有意に活動することが確認された³⁾。一方、会話文で意味の整合性を判断する課題と、会話文で使用された語句の中から非単語を検出する課題を比較した実験では、左下前頭回眼窩部が文章の意味理解に関係することが示唆されている（Fig. 1 B）⁴⁾。音韻判断課題に対して文法判断や意味判断と比較した場合は、左上側頭回が有意に活動した（Fig. 1 C）³⁾。こうした実験結果から文法・意味・音韻の機能局在が明らかとなり、われわれは脳における言語処理モジュールを提案した（Fig. 1 D）⁵⁾。

これらの研究では、音声提示だけでなく、文字による視覚提示も含んでおり、これらの言語モジュールが入力のモダリティ（音声や文字）によらないことが既に明らかとなっている。文字の習得には学習や教育による影響が大きく、二次的な言語能力であると考えられる⁶⁾一方で、読字障害や書字障害⁷⁾のように、文字に特異的な脳の障害が存在することから、生物学的要因も重要である。

以上の脳機能イメージングによる研究は、言語処理に関与する脳活動部位を相関関係として明らかにできるが、その因果性を示すことはできない。そこで筆者らは、経頭蓋磁気刺激（transcranial magnetic stimulation）を用いて左下前頭回を刺激することを試み、文の意味判断ではなく、文法判断のみが磁気刺激で促進されることを明らかにした⁸⁾。左下前頭回弁蓋部・三角部と左外側運動前野は、「文法中枢（grammar center）」として働くものと考えられる。なお、損傷研究の最新の成果についてはIV節で述べる。

II. 運動性失語と感覚性失語

文法中枢として提案した左下前頭回弁蓋部・三角部は、失語症研究から運動性失語 (Broca 失語) を引き起こす「Broca 野 (Broca's area)」として広く知られている。運動性失語とは、文の理解はおおむね保たれているが自発的発話や復唱が障害される状態である。一方「Wernicke 野 (Wernicke's area)」である左上側頭回後部が損傷を受けると感覚性失語 (Wernicke 失語) が生じ、発話は流暢ではあるものの錯語が多く、文の理解が障害される。この現象自体は発話と理解の二重解離であり、Broca 野と Wernicke 野、および両者を結ぶ伝導路 (弓状束) からなる古典的なモデル (Fig. 1 E) が今日まで受け入れられてきた⁹⁾。

しかし、詳細な言語学的分析がなされた失語症の例は少なく、通常の失語症検査でも物品の呼称などがテストされているのに過ぎない。呼称に問題がなくとも、もし音韻や単語レベルに何らかの障害があれば文の理解まで困難になるのは当然であり、「感覚性失語」で言語のいかなるレベルやプロセスに障害が起こるかはわかっていないのである。同様にして運動性失語においても、複雑な文に対して理解が保たれているかどうかは通常検査ではわからない。日常会話では文脈で補って判断することも可能であるため、臨床検査では文法能力を分離して評価することが必要である。脳機能イメージングによる研究のデータをもとに過去の症例の知見を見直すと、より整合性のある解釈が可能であると考えている。

III. 自然言語の再帰性

自然言語処理では、人間の言語が持ち得る「文脈自由文法 (context-free grammar: CFG)」を、より限定された生成力しか持たない「正規文法 (regular grammar)」から区別することが出発点である。人間だけが言語能力を持つという事実の反証として、動物を訓練すれば CFG が身につくかもしれない、という検討が、特に複雑な歌を歌う鳥などで試みられている^{10,11)}。実際の研究では、録音された鳥の歌を A と B の 2 つのカテゴリーに便宜上分けて、AABB や ABAB などのパターンが区別可能かどうか調べる (Fig. 2 A, B)。ここで、AABB や AAABBB といったパターンは CFG の例であり、ABAB は正規文法の例だと仮定されてきた。しかし、この記号列 $A^n B^n$ を無限に長くできる場合には、CFG が必要となるが、記号列が有限である限りはどちらも正規文法で表せるので、

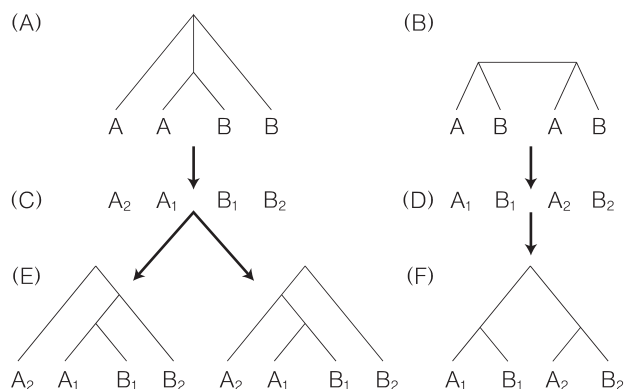


Fig. 2 自然言語の木構造

図中の A, B は記号のカテゴリーを表し、添え字は順に対応する [A, B] の組を表す。

A, B: 動物を用いた弁別学習での記号列と、それに対して提案されていた構造モデル。このような単純な記号列の弁別に、図のような構造を処理する必然性はない。C, D: Friederici らが実験で用いた記号列^{12,13)}。A の構造モデルは、言語学的にみれば例外的な 3 つ又の分岐が頂点において生じるという問題がある。B の構造モデルも、隣接した要素の組が同じ階層で線型に結合した構造であり、言語学的にみれば不自然である。E: C の記号列に対しては、「太郎は花子が歌うと思った」などの中央埋め込み構造を持つ文が対応し、言語学で用いられる 2 又枝分かれ (binary branching) を用いて、左、または、右に枝分かれする図のような木構造を考えるのが自然である。F: D の記号列に対しては、「太郎は笑い、花子は歌う」などの等位接続文が対応し、言語学的には、図のように全体で木構造を形成する。

この議論自体が誤りなのである。さらに、AABB や ABAB などのパターンが Fig. 2 A, B の上に書かれたような「木構造」を取るという証拠もなく、後述するように言語学的にみればどちらも誤った木構造となっている。

Friederici らの fMRI 研究では、 $A_2 A_1 B_1 B_2$, $A_1 B_1 A_2 B_2$ のような対応関係のある音節 (A, B は母音の種類、添え字は子音の種類を示している) の列を被験者に提示している (Fig. 2 C, D)^{12,13)}。この研究でも Fig. 2 A, B の上に書かれた木構造が仮定されているが、Fig. 2 A には例外的な 3 つ又構造が生じるという問題がある。中央埋め込みに対する木構造では、Fig. 2 E に示した「2 又枝分かれ (binary branching)」のように、左分岐または右分岐の構造を仮定するのが自然である。また、Fig. 2 B では並列する組が同じ階層で結合しているが、等位接続ではさらに 1 つ上の階層で結合するから、Fig. 2 F のような木構造でなくてはならない。なお、等位接続の項が増えると 3 つ又以上の分岐が生じるが、これは推移則 ($\{a \# b\} \# c = \{a \# \{b \# c\}\}$) の成り立つ要素に対して例外的に認められる。

Table 1 自然言語の文法と人工的な線型順序配列

日本語の正しい文法を学習する条件		人工的な線型順序規則を学習する条件	
主節の構造	ポール は 梨 を 食べる	否定の構造	ポール は 梨 ない を 食べる
受動の構造	梨 は ポール に 食べられる	疑問の構造	食べる を 梨 は ポール
従属節の構造	ピア は ポール が 梨 を 食べる と 言う	過去形の構造	ポール は 梨 を た 食べる

Fig. 3の実験に用いられた文例。正しい日本語の構造は自然言語の文法に基づいて、語句同士の非局所的な関係を判断する必要がある。これに対し、以下に示す3つの人工的な線型順序配列でつくられた構造は、語句の局所的な関係や順序のみで判断することが可能である。否定の構造は、「ない」を3つ目の単語の後ろに置くことでつくられている。疑問の構造は、文内のすべての単語（助詞を含めて）を全体として逆順にすることでつくられている。過去形の構造は、助詞「を」の後ろに「た」を置くことでつくられている。Mussoらの論文¹⁴⁾をもとに作成。

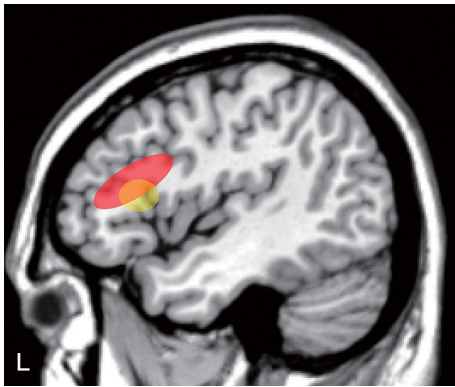


Fig. 3 自然言語の文法に対する左下前頭回に選択的な活動

ドイツ人の被験者に第2言語として日本語とイタリア語を学習させたときの脳活動。ただし、日本語とイタリア語の単語を用いた人工的な線型順序配列を学習させた条件を対照条件とした。赤は日本語の場合を、黄色はイタリア語の場合を示し、同一の領域が活動している。Mussoらの論文¹⁴⁾をもとに作図。

自然言語処理のモデルの中には、文法的な木構造を一切仮定することなく、隣接する単語間の確率的遷移だけで次の単語を予測するものがある。こうして生成される線型順序配列は、正規文法で表せる。Mussoら¹⁴⁾は、第2言語として外国語の文法規則を学習する課題に対して、人工的な線型順序配列を学習する課題を比較した(Table 1)。その結果、前者の条件でのみ左下前頭回に有意な活動が見出された(Fig. 3)。この知見は文法中枢の役割と合致する新たな証拠である。ただし、第2言語の習得には大きな個人差があり、脳活動にも違いがみられるので¹⁵⁾、第1言語(母語)に基づく研究が必要である。

IV. 文法処理に純粋にかかわる文法中枢の証明

前節の議論で明らかになったように、文の処理ではその統語構造の正確な解析が必要となる。例えば「太郎が花子を呼んでいる」という文から「花子を太郎が呼んでいる」という「かき混ぜ文」をつくる場合、目的語を文頭に移動する文法的な操作が必要となる。また、「花子が太郎に呼ばれている」のように受動文をつくる場合も、同様に名詞句の移動と動詞の変形操作が必要である。これらの文は、個々の単語の意味も文全体の意味内容も同一であり、文の構造のみが異なる。そこで以上の条件を比較すれば、文法処理のみを純粋に抽出することが可能となるであろう。

筆者らは、絵と文のマッチング課題を用いたfMRI実験を行った(Fig. 4A-F)¹⁶⁾。その結果、文法処理の負荷の高い文型において、左下前頭回弁蓋部・三角部が選択的に活動することが見出された。さらに脳腫瘍患者群に対して同様の課題を行い、各ボクセルが腫瘍を含むか否かで被験者を2群に分け、課題間の誤答率の差の違いを解析した[voxel-based lesion-symptom mapping (VLSM)法]。これにより、左下前頭回弁蓋部・三角部に腫瘍を持つ患者群では、文法処理の負荷の高い文で誤答率が有意に高いという文法障害がはっきりと示された(Fig. 4G)¹⁷⁾。これらの結果はイメージング研究と損傷研究の融合によって初めて得られたもので、文法中枢の損傷によって「失文法(agrammatism)」が生じるという因果関係が初めて明らかになった。

V. 自然言語処理の時間的解析

言語処理に対する脳機能マッピングに比べ、時間的な解析は未解明な点が多い。言語情報の理解や表出におけ

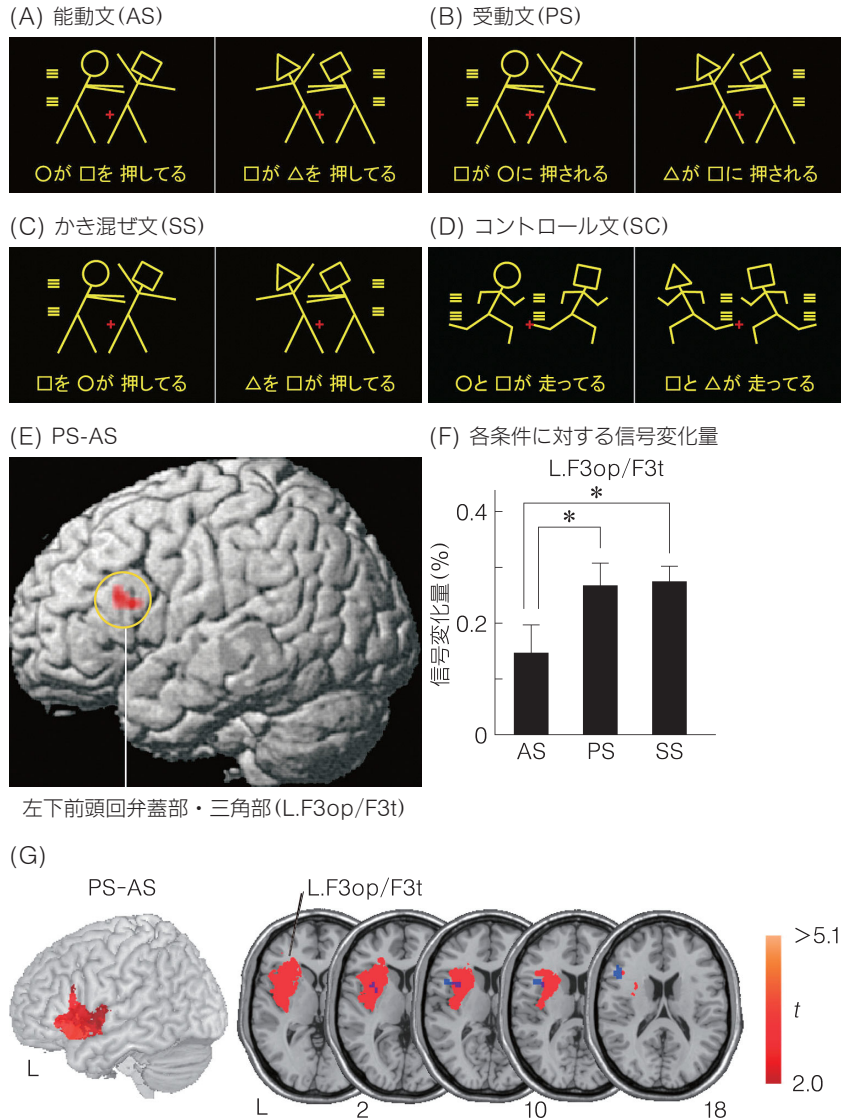


Fig. 4 fMRIによる純粋な文法処理に関わる文法中枢の証明

A: 基準となる能動文 (AS)。B: Aと同じ絵に対し、文を受動文 (PS)としたもの。C: Aと同じ絵に対し、文をかき混ぜ文 (SS)としたもの。D: 対照条件として、2者関係のない文 (SC)を用いた。E: AS条件と比べて、PS条件で有意に上昇した脳活動。選択的な活動が、左下前頭回弁蓋部・三角部のみに見られた。F: SC条件を基準としたときの、AS・PS・SS条件のEの信号変化量。AS条件より統語処理の負荷が高いPS・SS条件で強い信号の増加がみられた。G: VLSM法により、腫瘍の有無でPS条件とAS条件の誤答率の差に有意な差のあった部位を赤色で示す。青の領域は図(E)における活動部位を示す。これらは重なる領域が見出された。左側の図は外側面を示し、右側の図は水平断による断面を示す。下の数字は、前交連-後交連をつなぐ線からの高さ (mm)を表す。

A-Fについては、Kinno R, Kawamura M, Shioda S, Sakai KL: Neural correlates of noncanonical syntactic processing revealed by a picture-sentence matching task. *Hum Brain Mapp* 29: 1015-1027, 2008を改変して転載

Gについては、Kinno R, Muragaki Y, Hori T, Maruyama T, Kawamura M, et al: Agrammatic comprehension caused by a glioma in the left frontal cortex. *Brain Lang* 110: 71-80, 2009を改変して転載

リアルタイムの処理について、精緻な理論言語学的モデルに加えて、高い時間分解能の脳機能計測が必要とされる。筆者らは、脳磁図 (magnetoencephalography) を用いて、目的語に続く他動詞に選択的な活動増加を左下前頭回に見出した¹⁸⁾。これは、目的語によって他動詞が文法的に予測される効果であると考えられ、文の木構造による説明とも合致する。

言語理解の処理については、脳活動の時間的変動に対する「被験者間相関解析 (intersubject correlation analysis)」の結果が Lerner ら¹⁹⁾によって報告されている (Fig. 5)。この被験者間相関解析とは、脳の局所血流量の変化が刺激の時間的変化に対してどのくらい正確に応答したかを表す指標として、MRI 信号の時間的変動の相関を 10 人程度の被験者間で調べる手法である。この実験では、音声の逆再生に加え、単語・文・段落ごとに並び換

えた物語を被験者に聞かせて、マッピングを行った。最も低次の条件である逆再生と単語の場合では、音韻処理に関与する上側頭回のみが活動した (Fig. 5 A の赤い部分)。さらに文や段落の場合では、被験者間相関を示す領域が側頭葉から頭頂葉へと拡大し、前頭葉にも有意な相関がみられた (Fig. 5 A の緑と青の部分)。一方、無声映画を用いた視覚提示では、被験者間相関を示す領域が視覚野を含む後頭葉から頭頂葉にかけての領域に限られていた (Fig. 5 B, C)。

視覚系においては、空間的な受容野 (spatial receptive field) が一次視覚野から高次視覚野にかけて拡大していくという、情報の統合と階層的処理が知られている。Lerner らの聴覚提示の結果は、音声信号のサンプリング時間が長くなるに従って、それに応答する領域がより高次の連合野へと拡大することを示唆する。音声信号のサン

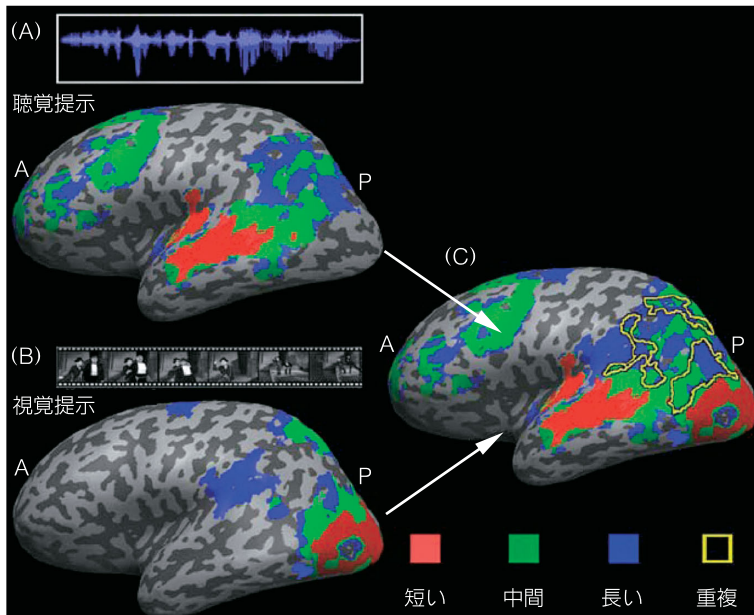


Fig. 5 聴覚・視覚刺激提示に対する脳活動の被験者間相関

A: 聴覚的に物語を提示した条件。脳活動の時間的変動に対する被験者間相関をカラーマップで示す。提示刺激として、単語(平均1秒, 短い), 文(8秒, 中間), 段落(38秒, 長い)ごとに順序を並び換えたものがそれぞれ用いられた。単語ごとに並び換えた条件では音韻処理を行う側頭葉にのみ相関がみられるが, 長い文章では, 前頭葉にも相関がみられる。B: 視覚的に無声映画を提示した条件。被験者間相関を示す。提示刺激は, 約4秒(短い), 12秒(中間), 36秒(長い)単位で順序を並び換えたものがそれぞれ用いられた。この場合は前頭葉に相関がみられない。C: A, Bの両方で有意な相関があった部位を黄色の線で示す。側頭頭頂接合部などの連合野に共通した相関がみられた。

Lerner Y, Honey CJ, Silbert LJ, Hasson U: Topographic mapping a hierarchy of temporal receptive windows using a narrated story. *J Neurosci* 31: 2906-2915, 2011 を改変して転載

プリング時間に対する各領野の反応選択性 (response selectivity) を, Lerner らは空間的な受容野との類推から「時間的な受容幅 (temporal receptive window: TRW)」と呼んでいる。これは少なくとも側頭葉における新たな特徴抽出機構の1つである可能性があり, 興味深い。

それでは, 前頭葉の活動をこの TRW だけで説明できるだろうか? Lerner らの聴覚刺激では, サンプル時間の増加に伴って, 文法解析や読解による「文処理」の負荷が高まることが予想され, TRW の可能性と分離することが困難である。実際, 彼らが報告した前頭葉の活動は左脳優位であったので, 言語処理による可能性も否定できない。さらにわれわれは, 単語と同様に極めて短いサンプル時間で生じる文法処理の例として, 動詞の現在形から過去形への活用変化(例:「食べる」→「食べた」)を調べており, 左下前頭回が選択的に活動することを報告している²⁰⁾。したがって, 言語処理に伴う前頭葉の活動が実際にいかなる計算や特徴抽出の過程を反映しているかを明らかにすることが, 今後の重要な研究課題だといえよう。

VI. 今後の展望

文法中枢の計算原理に関する現在の理論的および実験的研究は, その核心的な要素を他の言語的要素から分離する段階へと進みつつある。今後は, さらに再帰的構造を生成する文法操作そのものを同定するような研究が望

まれる。同時に, 音韻処理などを司る領域と文法中枢との情報のやり取りを明らかにしていく必要がある。複数の皮質領域における活動の時間的相関から, 動的な情報処理のシステムをモデル化する手法 (dynamic causal modeling など) も開発が進んでいるが²¹⁾, 機能的な相関のみからのモデル化は困難である。より現実的なモデルに収束させるためには, 神経線維連絡を調べる手法である拡散テンソル画像法 (diffusion tensor imaging) など得られる言語関連の皮質経路²²⁾をモデルに組み入れていく必要がある。

さらに近年では, 成績などにみられる個人差を脳活動から探る研究が注目されている。筆者らは, 第2言語の文法課題に対する習熟度が左下前頭回の局所体積の左右差に相関することを見出し²³⁾, 第1言語であっても敬語の使い方のように習熟度に個人差があるものについては, 左下前頭回の活動が課題の成績と負の相関を示すことを報告した²⁴⁾。このような脳活動の変化を発達や学習の過程と合わせて解析することは, 言語の脳科学において今後ますます重要になるであろう。

文 献

- 1) Chomsky N (author), Belletti A, Rizzi L (eds): *On Nature and Language*. Cambridge University Press, Cambridge, 2002
- 2) Hashimoto R, Sakai KL: Specialization in the left prefrontal cortex for sentence comprehension. *Neuron* 35: 589-597, 2002

- 3) Suzuki K, Sakai KL: 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
- 4) Homae F, Hashimoto R, Sakai KL: 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
- 5) Sakai KL: Language acquisition and brain development. *Science* **310**: 815-819, 2005
- 6) Dehaene S, Pegado F, Braga LW, Ventura P, Filho GN, et al: How learning to read changes the cortical networks for vision and language. *Science* **330**: 1359-1364, 2010
- 7) Roux FE, Dufor O, Giussani C, Wamain Y, Draper L, et al: The graphemic/motor frontal area: Exner's area revisited. *Ann Neurol* **66**: 537-545, 2009
- 8) Sakai KL, 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
- 9) Geschwind N: The organization of language and the brain. *Science* **170**: 940-944, 1970
- 10) Gentner TQ, Fenn KM, Margoliash D, Nusbaum HC: Recursive syntactic pattern learning by songbirds. *Nature* **440**, 1204-1207, 2006
- 11) Abe K, Watanabe D: Songbirds possess the spontaneous ability to discriminate syntactic rules. *Nat Neurosci* **14**: 1067-1074, 2011
- 12) Friederici AD, Bahlmann J, Heim S, Schubotz RI, Anwander A: The brain differentiates human and non-human grammars: functional localization and structural connectivity. *Proc Acad Natl Sci U S A* **103**, 2458-2463, 2006
- 13) Bahlmann J, Schubotz R, Friederici AD: Hierarchical artificial grammar processing engages Broca's area. *Neuroimage* **42**, 525-534, 2008
- 14) Musso M, Moro A, Glauche V, Rijntjes M, Reichenbach J, et al: Broca's area and the language instinct. *Nat Neurosci* **6**: 774-781, 2003
- 15) Sakai KL, Nauchi A, Tatsuno Y, Hirano K, Muraishi Y, et al: Distinct roles of left inferior frontal regions that explain individual differences in second language acquisition. *Hum Brain Mapp* **30**: 2440-2452, 2009
- 16) Kinno R, Kawamura M, Shioda S, Sakai KL: Neural correlates of noncanonical syntactic processing revealed by a picture-sentence matching task. *Hum Brain Mapp* **29**: 1015-1027, 2008
- 17) Kinno R, Muragaki Y, Hori T, Maruyama T, Kawamura M, et al: Agrammatic comprehension caused by a glioma in the left frontal cortex. *Brain Lang* **110**: 71-80, 2009
- 18) Iijima K, Fukui N, Sakai KL: The cortical dynamics in building syntactic structures of sentences: An MEG study in a minimal-pair paradigm. *Neuroimage* **44**: 1387-1396, 2009
- 19) Lerner Y, Honey CJ, Silbert LJ, Hasson U: Topographic mapping a hierarchy of temporal receptive windows using a narrated story. *J Neurosci* **31**: 2906-2915, 2011
- 20) Sakai KL, Miura K, Narafu N, Muraishi Y: Correlated functional changes of the prefrontal cortex in twins induced by classroom education of second language. *Cereb Cortex* **14**: 1233-1239, 2004
- 21) Friston KJ, Harrison L, Penny W: Dynamic causal modelling. *Neuroimage* **19**: 1273-1302, 2003
- 22) Saur D, Kreher BW, Schnell S, Kümmerer D, Kellmeyer P, et al: Ventral and dorsal pathway for language. *Proc Acad Natl Sci U S A* **105**: 18035-18040, 2008
- 23) Nauchi A, Sakai KL: Greater leftward lateralization of the inferior frontal gyrus in second language learners with higher syntactic abilities. *Hum Brain Mapp* **30**: 3625-3635, 2009
- 24) Momo K, Sakai H, Sakai KL: Syntax in a native language still continues to develop in adults: honorification judgment in Japanese. *Brain Lang* **107**: 81-89, 2008