■シンポジウム：感情的処理と知的処理の脳内機構

言葉の脳内処理機構

酒 井 邦 嘉*

要旨：本総説では，人間の脳における言語処理にかかわる以下の3点の基本的問題について議論し，言語の脳マッピング研究における最近の進歩について概説する。第1に，文理解の神経基盤がその機能に特化していることを示す最初の実験的証拠を紹介する。具体的には，最近われわれが発表した機能的磁気共鳴映像法（fMRI）や経頭蓋的磁気刺激法（TMS）の研究において，左下前頭回（IFG）の背側部が，短期記憶などのような一般的な認知過程よりも文理解の統語処理に特化していることを証明した。この結果は，左下前頭回が文法処理において本質的な役割を果たしていることを示唆しており，この領域を「文法中枢」と呼ぶ。第2に，第2言語（L2）習得の初期段階において，左下前頭回の活動増加が各個人の成績上昇と正の相関を示すことが最近明らかになった。これらの結果により，第2言語習得が文法中枢の可塑性にもとづいていると考えられる。第3に，外国語の文字と音声を組み合わせて新たに習得した場合に，下側頭回後部（PITG）を含む「文字中枢」の機能が学習途上で選択的に変わることを初めて直接的に示した。システム・ニューロサイエンスにおけるこうした現在の研究の動向は，言語処理において大脳皮質の特定の領域が人間に特異的な機能を司ることを明らかにしつつある。

（高次脳機能研究 25（2）：153～164，2005）

Key Words：言語，文処理，文法中枢，文字中枢，fMRI
language，sentence processing，grammar center，letter center，functional magnetic resonance imaging

はじめに

言語は，人間に固有の高次脳機能である。言語学者のチョムスキーは，言語獲得の生得的なメカニズムもまた，人間に固有のものであると主張したが，これまで実験的な検証は困難であった。「普遍文法」にもとづく言語情報処理について，言語学では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，脳の言語機能の核心的なメカニズム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。人間の言語能力が，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，認知科学における中心的な謎であった（ロワイヨーモン人間科学研究センター 1986）。チョムスキーは，言語獲得の生得的なメカニズムが，一般的な学習メカニズムとはまったく異なるものであると主張したが，これまで実験的な検証は困難であった。失語症が言語に特異的な脳障害であると認めることができれば，いくらか議論は前進するかもしれないのだが，失語症さえも短期記憶の障害の一様式とみなそうとする反対意見が根強いことからして，言語の領域固有性を実証することは，必要不可欠な課題となっている。その意味で，こうした言語に特異的な問題は，脳科学における究極の挑戦であるといえる（酒井 2002）。

Ⅰ.「文法中枢」の発見と証明

大脳皮質の言語野である左下前頭回（IFG）のブローカ野（ブロードマンの44および45野）が

*東京大学大学院 総合文化研究科相関基礎科学系 〒153-8902 東京都目黒区駒場3-8-1
受稿日 2005年4月10日

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。また，近年の脳機能イメージングの進歩により，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確かめられたが，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。つまり，文法処理に伴う一般の認知的な負荷，たとえば短期記憶や注意などによって，ブローカ野周辺の活動を説明できるのならば，「言語」機能を研究対象にしていることにはならないからである。

そこでわれわれは，一般的な認知機能の代表として短期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，機能的磁気共鳴映像法（functional magnetic resonance imaging：fMRI）の実験により両者を対比させた。この実験に用いた課題は，次の4つである（Hashimotoら 2002）。

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1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す。

3. 文の短期記憶課題（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，一致しなければ赤のボタンを押す。

4. 単語の短期記憶課題（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するならば緑のボタンを押し，一致しなければ赤のボタンを押す。

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もっと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，ブローカ野に強い活動が観察された（**図1**の赤色の領域）。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。したがって，ブローカ野は，文法処理にもとづく言語理解を担っていることが結論できる。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る常識を覆すことになった。このように，文法処理に特化した領域を，「文法中枢（grammar center）」と呼ぶことにする。

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

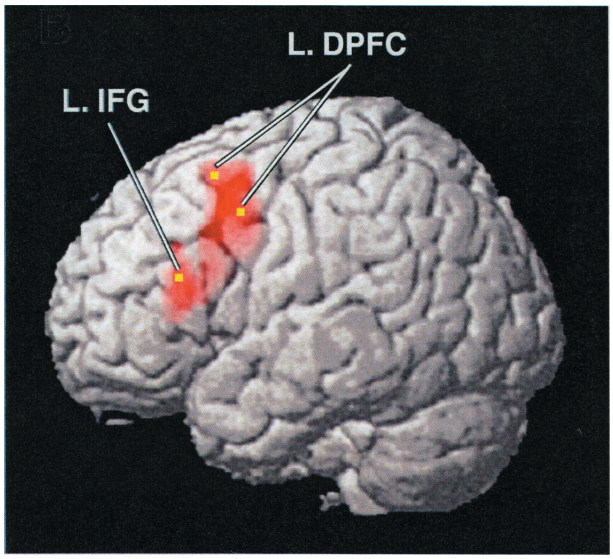

図1　文法を使う言語理解の座，「文法中枢」
左下前頭回（left inferior frontal gyrus： L. IFG）から左前頭前野背側部（left forsal prefrontal cortex： L. DPFC）にかけての領域（赤色の部分）。図の左が脳の前側。

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うえで，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。

経頭蓋的磁気刺激法（transcranial magnetic stimulation： 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，大脳皮質を刺激する。本研究で用いた二連発刺激は，数秒間に1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。

われわれは，文法判断と意味判断に対するTMSの効果を検討した。この実験の新しい点は，同じ単語セットの組み合わせを変えた最小対刺激（言語学的な要素を1つだけ変えて対をなす刺激）を用いながら，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（Sakaiら 2002）。

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文のうちの例）を，3文字ずつ0.2秒ごとに視覚提示する（**図2**）。例文のように，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，被験者は，この文が文法的に正しければ（normal： N）緑のボタンを押し，正しくなければ（anomalous： A）赤のボタンを押す。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，被験者は，この文が意味的に正しければ緑のボタンを押し，正しくなければ赤のボタンを押す。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 みのる」である。これらはすべ

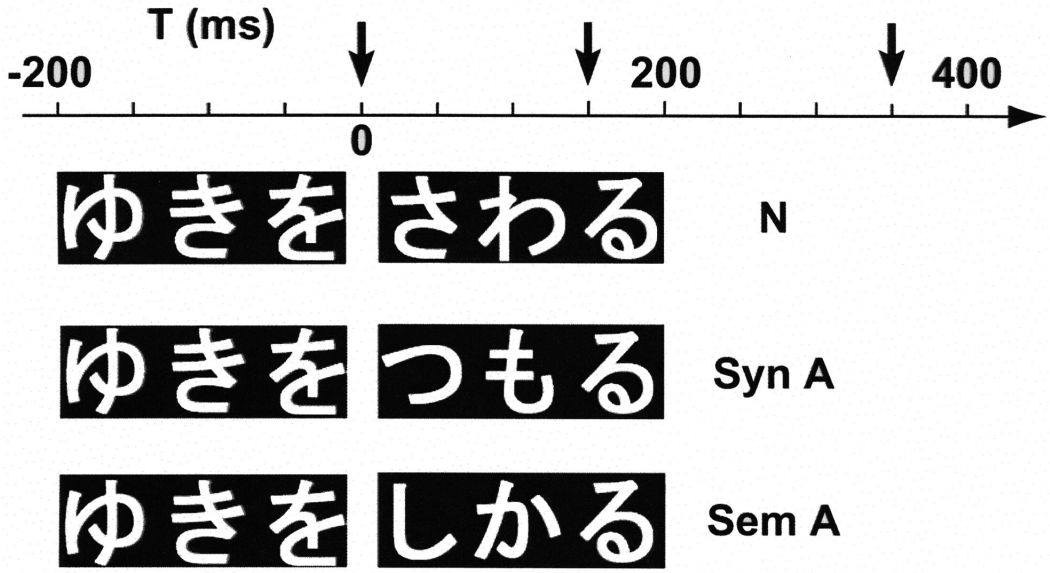

図2　文法判断課題と意味判断課題の最小対刺激とTMSのタイミング（矢印）

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（Δ RT）を求めて，磁気刺激の効果の指標とした。まず，ブローカ野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，Δ RTはゼロと変わらなかった（**図3A**）。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（**図3B**）。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まった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，Δ RTはゼロと変わらなかった（**図3C**）。これに対し，ブローカ野の背側に位置する中前頭回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，Δ RTはゼロと変わらなかった。このような事象関連の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。文法判断が選択的に促進されるという結果は，あらかじ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。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。これは文法中枢の初めての証明である。

Ⅱ.「文法中枢」の可塑性

アメリカのグループによるfMRIの実験では，幼少のときからバイリンガルで育った群と，10歳ごろから第2言語を習得した群とを比較して，後者の群でのみ，2つの言語による活動領域がブローカ野の中で分離していることを報告している（Kimら　1997）。その後，第2言語を習得した時期や習熟度が違っても，ブローカ野の活動に差が見られなかったという実験結果（Cheeら　1999）や，習得時期が遅い方が活動が強まるという報告（Wartenburgerら　2003）が現れて，母語と第2言語におけるブローカ野の役割はいまだ明らかにな

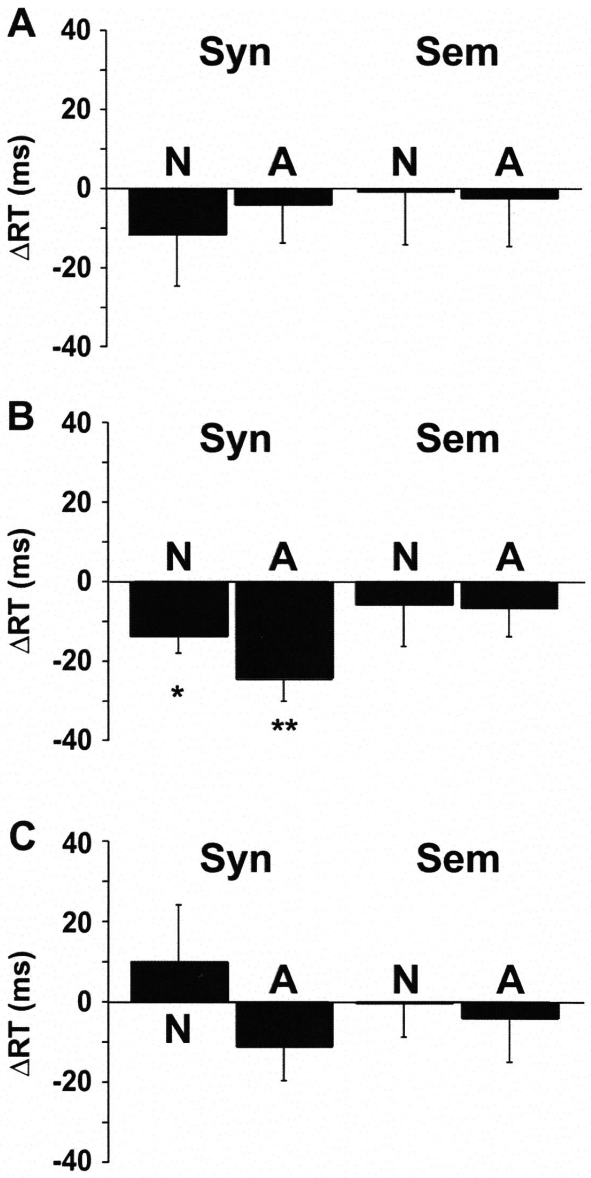

図3 ブローカ野の磁気刺激による文法判断の選択的促進
TMSのタイミングは，A：T＝0，B：T＝150 ms，C：T＝350 ms。*は5%，**は1%の有意水準を表す。

っていなかった。

われわれは，英語の習得過程を脳活動の変化としてとらえるために次のような調査を行った。東京大学附属中等教育学校の中学1年生の全生徒に対し，英語のヒアリング能力と文法運用能力の向上を促すトレーニングを2ヵ月間の授業時間に実施した。具体的には，ビンゴ・ゲームを通して，動詞の現在形と過去形の対応関係を集中的にトレーニングした。この授業を受けた全生徒の中に含まれる双生児に対して，トレーニングの前後における脳活動の変化をfMRIによって測定した(Sakaiら 2004)。

この実験では，言語課題として，動詞の原形を過去形に変える活用変化の文法判断と，動詞のマッチング課題を直接対比した。被験者は，日本語を母語とする右利きの中学1年生14名（6ペアの一卵性双生児と1ペアの二卵性双生児）であり，すべての被験者と保護者それぞれからインフォームド・コンセントを得た。英語の動詞のマッチング課題（English matching：EM）では，動詞の現在形を文字で提示して，同じ動詞を強制2択法で選ばせる（**図 4A**）。英語の動詞の過去形課題（English past：EP）では，動詞の現在形を提示して，正しい過去形を強制2択法で選ばせる。また，英語と同じ意味の日本語の動詞を用いて，同様にマッチング課題（Japanese matching：JM）と過去形課題（Japanese past：JP）を行った。これら4つの課題を行っている際の脳活動を計測した。トレーニング後のfMRI調査において，英語の動詞の過去形課題における脳活動を，英語の動詞のマッチング課題の場合と比較したところ，**図 4B**に示すように，左脳のブローカ野を含む前頭前野（赤色の領域）にもっとも強い活動が観察された。この活動は，トレーニング前のfMRI調査では現れなかったので，英語のトレーニングによる選択的な機能変化であると考えられる。また，日本語の動詞の過去形課題における脳活動を，日本語の動詞のマッチング課題の場合と比較したところ，同様に左脳のブローカ野にもっとも強い活動が観察された（**図 4C**）。英語の過去形課題におけるブローカ野の活動変化を各双生児のペア（横軸のA児と縦軸のB児）について1点ずつプロットしたところ，ペア同士で高い相関を示した（**図 4D**）。さらに，各被験者が示す英語の成績の向上に比例して，ブローカ野における活動が増加することが明らかになった（**図 4E**）。この脳の場所は上記の「文法中枢」と一致しており，日本語による同様の課題で見られた活動の場所と一致するのは興味深い。大人での研究報告はまだないが，少なくとも中学1年生では，英語が上達すると，文法中枢の機能変化によって英語の文法能力が定着すると考えられる。

この研究において，実践的な教育効果を個人の脳の学習による変化として，科学的にそして視覚的にとらえることができた。脳機能の変化が双生児で高い相関を示したことは，双生児が共有する遺伝や環境の要因によって授業の教育効果が定着することを示唆する。今後，1卵性双生児と2卵性双生児間の相違があるかどうかを検討することで，文法中枢の変化に対する遺伝的な要因の寄与を明らかにする必要がある。

Ⅲ.「文字中枢」の可塑性

言語学的には，聞く・話すという言語機能は生得的かつ1次的な機能であり，読む・書くという言語機能は2次的であると考えられている。それには，おもに2つの理由がある。第1に，言葉を使っていたと考えられる人類の数万年の歴史の中で，文字の使用は五千年ほど前に始まったばかりである。第2に，乳幼児は親が意識して教えなくとも音声言語や手話およびその文法規則を獲得できるのに対し，文字の読み書きは教育によって後天的に身に付く能力である。文字が2次的なものであっても，脳科学にとって重要な問題であることに変わりはない。言葉は話せるのに，文字を読めなくなる脳の病気（読字障害や難読症と呼ばれる）が知られているが，読字のプロセスは複雑で，いまだ解明されていない。実際，文字を正しく読むためには，正字法（orthography）・音韻（phonology）・語彙的意味（lexico-semantics）などの言語知識が必要である。

読字障害（dyslexia）とは，正常な視力を持ち，1つ1つの文字は正しく知覚できるのに，文字で書かれた文章を正確に読めないという障害である。遺伝性の原因が考えられる場合は，「先天性読字障害」と呼ばれており，大人になってもなかなか回復しない。欧米では，読字障害の患者が全人口の5～10％に及んでおり，その対策は学校教育を含めて大きな社会問題となっている。読字障害のメカニズムについては，音韻処理が問題であるとする説と，視覚系の異常であるとする説があって，言語の脳科学でもっとも盛んな議論が行われている分野の1つとなっている（酒井 2002）。

人間を対象とした脳機能イメージングの手法によって，図形や顔にではなく，文字に選択的に活動する領域が，左脳の側頭葉に見つかっている

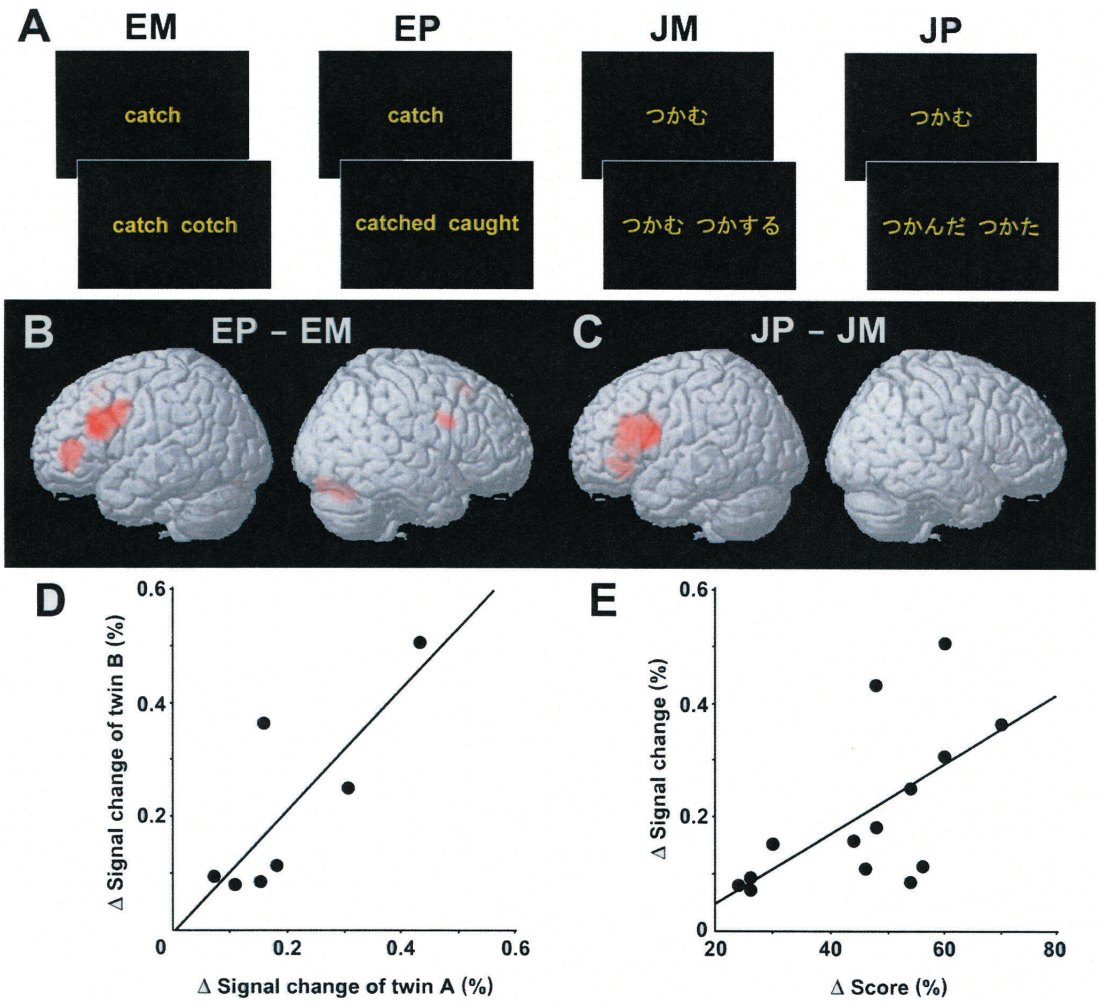

図4　英語と日本語の文法処理に共通したブローカ野の活動

A）英語による動詞のマッチング課題（EM）と過去形課題（EP），および日本語による動詞のマッチング課題（JM）と過去形課題（JP）。動詞の現在形に続いて，同じ現在形またはその正しい過去形を選択する。B）英語の過去形課題に選択的なトレーニング後の脳活動（赤色の領域）。EP課題遂行時の脳活動とEM課題遂行時の脳活動を統計的に比較した結果をEP–EMと表記する。C）日本語の過去形課題に選択的な脳活動（JP–JM）。D）英語の過去形課題においてブローカ野の活動変化（ΔSignal change）が示す，双生児（横軸のA児と縦軸のB児）のペア間での相関。E）英語の成績の向上（ΔScore）に比例したブローカ野における活動増加。

（Price ら 1996，Puce ら 1996）。この領域は，隣接する下側頭回後部（PITG）と紡錘状回（ブロードマンの21野と37野）の一部であり，「文字中枢（letter center）」の候補と考えられてきた。さらに，発音できる文字列に対してこの領域の活動が上昇することから，正字法に従った機能を担う領域として，「視覚性単語形状領野（visual word form area）」と呼ばれている（McCandliss ら 2003）。その一方で，この領域の活動には必ずしも視覚的な単語形状が必要ないという主張（Price ら 2003）が現れて，最近の論争となっている。しかし，正字法・音韻・語彙的意味などの要因の中で，どれが本質

的に「文字中枢」の機能と関係しているかは明らかになっていなかった。そこで，1次的に獲得される文法知識と対比して，2次的に学習される読字の能力がどのように違うのかを明らかにすることが重要である。実際，文字の学習では，前頭葉のブローカ野にある「文法中枢」とはまったく異なる領域が関与すると考えられる。そのためには，脳科学の観点から文字の学習過程をさらに研究していく必要があった。

われわれは，言語課題として，新しく習得中の文字と音声を組み合わせる課題と，既習の文字と音声のマッチング課題を直接対比した（Hashimotoら 2004）。さらに，対照条件として，新しく習得中の文字と非音声を組み合わせる課題と，非文字図形と非音声のマッチング課題を用いた。このパラダイムにおいては，すべて意味のない単語を用いることで，正字法と音韻の2つの要因にしぼり込み，どちらか一方のみで十分であるか，それとも両方の要因が必要であるかを明らかにすることを目標とした。被験者は，日本語を母語とする右利きの大学生および大学院生12名（18～27歳）であり，すべての被験者からインフォームド・コンセントを得た。すべての被験者で，実験前にはハングル文字の学習経験はない。fMRIによる実際の実験は，次の4条件で構成されている（**図5A**）。

1. KS課題

仮名文字（kana : K）と音声（speech : S）のマッチング課題。「あ，い，お，か，き，こ，ま，み，も」の音声と仮名文字を使用した。

2. HS課題

ハングル文字（Hangul : H）と音声（speech : S）のマッチング課題。「あ，い，お，か，き，こ，ま，み，も」の音声と，それぞれに対応するハングル文字を使用した。

3. HN課題

ハングル文字（Hangul : H）と非音声（non-speech : N）のマッチング課題。8つのハングル文字に対して，低いトーン音（T-L）・高いトーン音（T-H）・低いノイズ音（N-L）・高いノイズ音（N-H）のいずれかをマッチさせる。

4. NN課題

非文字図形（non-letter : N）と非音声（non-speech : N）のマッチング課題。4つの非文字図形に対して，低いノイズ音（N-L）・高いノイズ音（N-H）のいずれかをマッチさせる。

HSとHN課題では，はじめにハングル文字と音の組み合わせを数十回（数分間）の練習で覚えてから，1日目（Day 1）のfMRI実験中にそれぞれ180試行を行い，一晩睡眠をとった翌日（Day 2）にさらに180試行を繰り返した。なお，1試行に要する時間は4秒であり，トレーニングはこの実験中（全体で実質24分）のみに限られている。

もしも正字法のみが重要であって音韻の要因が文字学習に無関係ならば，同様のハングル文字を用いたHS課題とHN課題では，類似した脳の活動が観察されるはずである。また，「文字中枢」の活動が音韻処理のみにもとづくならば，まったく同じ音声を用いたKS課題とHS課題では，同様の活動が観察されると予想される。しかし，HS課題のみに選択的な脳活動が検出されるならば，正字法と音韻の両方の組み合わせが必要であることが結論できる。

被験者すべてのデータを平均加算したうえで，KS課題とNN課題を比較したところ，両側の側頭葉上部，下側頭回後部と紡錘状回，そして頭頂皮質から後頭皮質にかけて強い活動が見られた（**図5B**）。また，HS課題とKS課題を直接比較したところ（**図5C**），左脳のこれらの領域において，新しく習得したハングル文字と音声の組み合わせに選択的な領域（赤色の部分）と，既習の仮名文字に選択的な領域（青色の部分）が分離した。さらに，ハングル文字の習得過程で変化した脳活動を調べたところ（**図6A**），左脳の下側頭回後部の一部（緑色の部分）に局在することが明らかになった。同じ標準脳に**図5C**の結果を重ね合わせた結果によると，左脳の側頭葉においてHS課題に選択的な活動を示す領域（赤色の部分，左脳の下側頭回後部）は，KS課題に選択的な活動を示す領域（青色の部分，左脳の紡錘状回）と隣接しており，解剖学的に分離していた（**図6B**）。

左脳の下側頭回後部における各課題別の活動変化をさらに解析したところ，HS課題に選択的に，1日目（Day 1）よりも2日目（Day 2）に活動が上

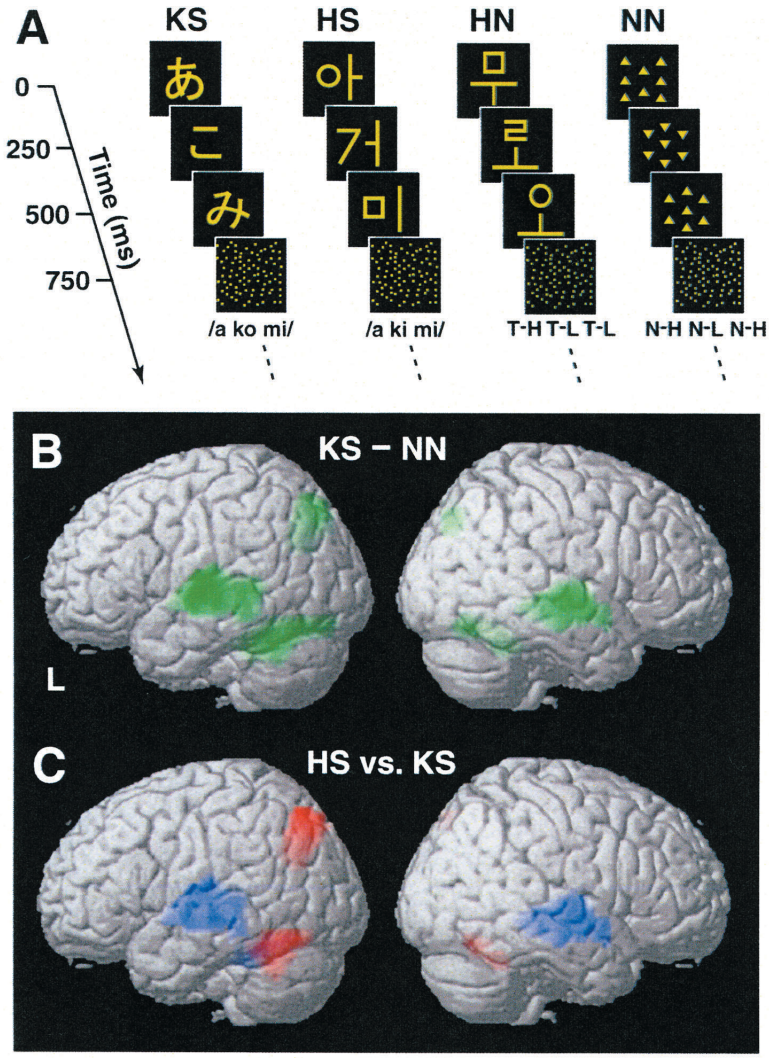

図5　文字と音声のマッチング課題に選択的な文字中枢の活動

A）文字と音声のマッチング課題。左端のKS課題のように，3つの文字が1つずつ提示され，その直後または直前に提示される音（たとえば，「あ・こ・み」）とマッチしているかどうかを判断してボタンを押す。各課題の詳細については，本文を参照。B）KS課題とNN課題における脳活動の比較。仮名文字を読んでいるときの脳活動（緑色の部分）を脳の外側面（左が左脳）に投影したもの。C）HS課題に選択的な脳活動（赤色の部分）とKS課題に選択的な脳活動（青色の部分）。

昇することが観察された（**図 6C**）。これに対し，同じ音声を用いたKS課題や，HS課題と同様のハングル文字を用いたHN課題では，このような活動の上昇はまったく見られなかった。一方，紡錘状回では，KS課題に選択的に，2日間で共通した活動が見られた（**図 6D**）。以上の結果より，「文字中枢」と考えられてきた左脳の下側頭回後部と紡錘状回が，別の機能を担っていることが明らかになり，左脳の下側頭回後部の活動には，正字法と音韻の両方の組み合わせが必要であることが結論された。

また，HS課題において，成績には個人差が見られるが，ほとんどの人で2日目に成績が向上した。さらに，左脳の下側頭回後部の活動変化は，

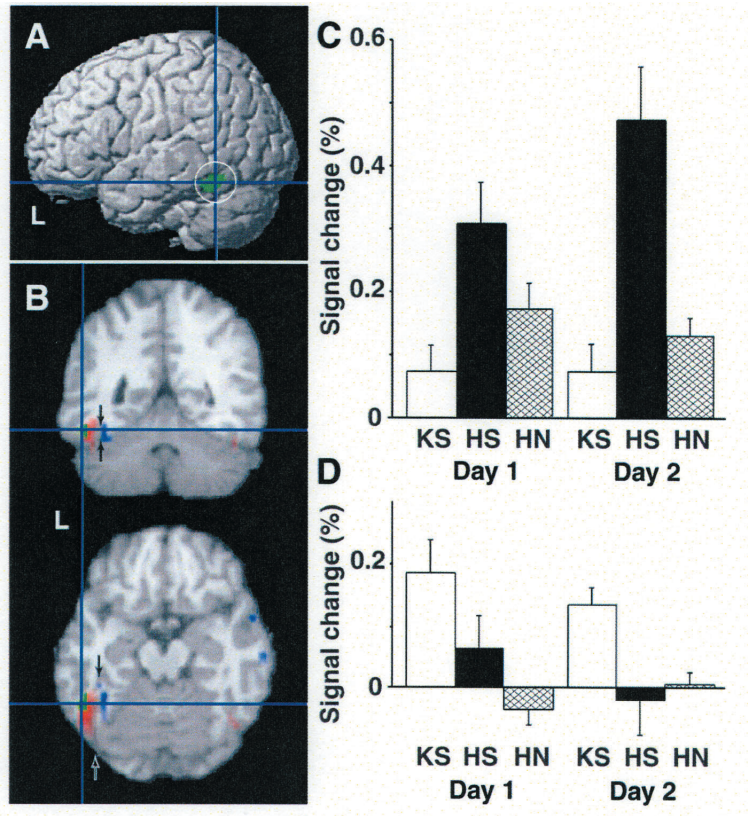

図6　文字中枢における課題に選択的な脳活動の分離

A）ハングル文字の習得過程で上昇した脳活動（緑色の部分，左脳の下側頭回後部）。B）HS課題に選択的な脳活動（赤色の部分，左脳の下側頭回後部）とKS課題に選択的な脳活動（青色の部分，左脳の紡錘状回）の分離。（A）の活動領域（緑色の部分）は，HS課題に選択的な脳活動（赤色の部分）の領域に含まれる。C）左脳の下側頭回後部における各課題別の活動変化。HS課題に選択的に，1日目（Day 1）よりも2日目（Day 2）に活動が上昇した。 D）左脳の紡錘状回における各課題別の活動変化。KS課題に選択的に，2日間で共通した活動が見られた。

HS課題における成績変化と高い相関を示す。したがって，トレーニングの到達度が，脳の働きとして客観的に測定できることが明らかである。また，左脳の下側頭回後部と頭頂後頭皮質の機能的結合を解析したところ，HS課題においてのみ，2日目に機能的結合が増強されることが明らかになった。

この研究において，身近な読字のトレーニング効果を個人の脳の学習による変化として，科学的にそして視覚的にとらえることに初めて成功した。また，特殊な強化トレーニングを長期間実施することなく，実質わずか30分程度のトレーニングをした際に，学習途上で脳機能がダイナミックに変化することを明らかにした本成果には，ユニークな意義がある。さらに，言語の感受性期をすでに過ぎたとされている大人において，脳機能の可塑的変化が示されたことは，大脳皮質が成人で完成するのではなく，大人になった後も脳が機能的に変化し続けることを示唆する。このメカニズムは，「文字中枢」である左脳の下側頭回後部と紡錘状回を中心として，頭頂後頭皮質を含むネットワークが担っていると考えられる。さらに，文字と音声の新たな組み合わせには左脳の下側頭回後部が特化しており，左脳の紡錘状回が既習の文字に選択的な反応を示す，という新しい知見は，人間の高次視覚皮質の機能分化を直接的に示す知見である。

以上のように，特定の学習法やトレーニングの有効性，およびその到達度が，脳の働きとして客観的に測定できるという事実は重要である。このような新しいコンセプトの教育方法を提案することで，本成果は，医学・教育学などの学問分野だけでなく，広く一般社会の発展に寄与するであろう。

文　献

1) Chee, M. W. L., Tan, E. W. L. & Thiel, T.： Mandarin and English single word processing studied with functional magnetic resonance imaging. J. Neurosci., 19 ： 3050–3056, 1999.
2) Hashimoto, R. & Sakai, K.L.： Specialization in the left prefrontal cortex for sentence comprehension. Neuron, 35 ： 589–597, 2002.
3) Hashimoto, R. & Sakai, K. L.： Learning letters in adulthood ： Direct visualization of cortical plasticity for forming a new link between orthography and phonology. Neuron, 42 ： 311–322, 2004.
4) Kim, K. H. S., Relkin, N. R., Lee, K. –M., et al.： Distinct cortical areas associated with native and second languages. Nature, 388 ： 171–174, 1997.
5) McCandliss, B. D., Cohen, L. & Dehaene, S.： The visual word form area ： Expertise for reading in the fusiform gyrus. Trends Cognit. Sci., 7 ： 293–299, 2003.
6) Price, C. J., Wise, R. J. S. & Frackowiak, R. S. J.： Demonstrating the implicit processing of visually presented words and pseudowords. Cereb. Cortex, 6 ： 62–70, 1996.
7) Price, C. J. & Devlin, J. T.： The myth of visual word form area. Neuroimage, 19 ： 473–481, 2003.
8) Puce, A., Allison, T., Asgari, M., et al.： Differential sensitivity of human visual cortex to faces, letterstrings, and textures ： A functional magnetic resonance imaging study. J. Neurosci., 16 ： 5205–5215, 1996.
9) ロワイヨーモン人間科学研究センター，編，藤野邦夫，訳：ことばの理論・学習の理論―ジャン・ピアジェとノーム・チョムスキーの論争（上・下）．思索社，東京，1986.
10) 酒井邦嘉：言語の脳科学―脳はどのようにことばを生みだすか．中公新書，東京，2002.
11) Sakai, K.L., Noguchi, Y., Takeuchi, T., et al.： Selective priming of syntactic processing by event–related transcranial magnetic stimulation of Broca's area. Neuron, 35 ： 1177–1182, 2002.
12) Sakai, K. L., Miura, K., Narafu, N., et al.： Correlated functional changes of the prefrontal cortex in twins induced by classroom education of second language. Cereb. Cortex, 14 ： 1233–1239, 2004.
13) Wartenburger, I., Heekeren, H. R., Abutalebi, J., et al.： Early setting of grammatical processing in the bilingual brain. Neuron, 37 ： 159–170, 2003.

■ Abstract

The cortical mechanisms of language processing

Kuniyoshi L. Sakai*

In this review article, I will focus on three fundamental issues concerning language processing in the human brain, and update recent advances made by brain mapping 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） and transcranial magnetic stimulation （TMS） studies have proved that the left dorsal inferior frontal gyrus （IFG） is more specialized in the syntactic processes of sentence comprehension than other general cognitive processes such as short-term memory. These results suggest that the left IFG plays an essential role in grammatical processing, which is thus referred to as the grammar center. Second, we have recently discovered that the activation increases of the left IFG were positively correlated with individual performance improvements during the early phase of second language （L2） acquisition. These results further suggest that the cortical plasticity for L2 acquisition specifically involves the grammar center. Third, we have established that a new link between orthography and phonology is formed when adults learn letters, which is selectively based on the plasticity of a letter center involving the left posterior inferior temporal gyrus （PITG）. The current direction of research in systems neuroscience contributes to clarifying that the specific cortical regions subserve uniquely human functions during language processing.

*Department of Basic Science, The University of Tokyo, Komaba. 3-8-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8902, Japan