

脳機能マッピングによる言語処理機構の解明

酒井 邦 嘉

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」に基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。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¹⁾。本稿では、脳機能マッピング技術の進歩によって可能になった言語処理機構に関する最新の知見を紹介し、言語獲得の過程において文法中枢の機能が変化するという新しい仮説²⁾について述べる。

1 言語の特異性と文法中枢のはたらき

最近、Hauser, Chomsky, Fitch は、人間の言語の特異性が「再帰的計算(recursive computation)」にあることを述べている³⁾。これまでの言語学が明らかにしてきたように、人間が生み出す文には文法的な構造があり、さらにこのような構造を自己埋め込み的に内包させることが可能であ

る。こうした再帰的な計算処理が言語の本質であると考えられているのであるが、その神経基盤はまだ明らかにされていない。

大脳皮質の言語野である左下前頭回のブローカ野(ブロードマンの44および45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。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、例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て一方で、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⁴⁾。この実験のポイントは、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る。単語記憶課題と文記憶課題では、どちらも課題の要請は同じだが、脈絡のな

い単語の羅列を覚えなくてはならない単語記憶課題は、文記憶課題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、課題を解く際の負荷が最も必要とされる単語記憶課題において、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。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、文法判断課題の方が単語記憶課題よりも強い活動を引き起こしたのは、ブローカ野の周辺であった(図1)。従って、この領域は、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。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初めてであり、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る。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。

われわれは、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⁵⁾。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、語彙を完全に統制している。その結果、Syn-(Sem+Pho+Voi)の比較において文法中枢にのみ有意な活動が見られた。この領域は、英語の母語話者を対象とした文法エラーに選択的に反応する部位と

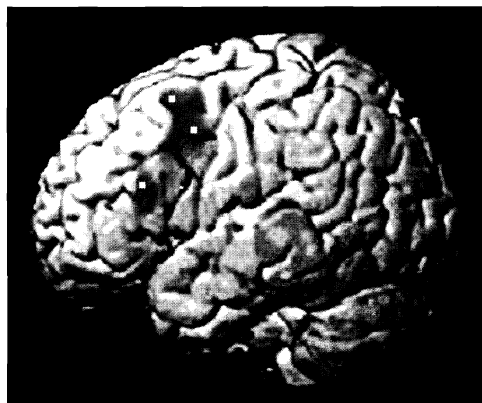


図 1 文法を使う言語理解の座「文法中枢」

左下前頭回(left inferior frontal gyrus)から左外側運動前野(left lateral premotor cortex)にかけての活動領域が文法中枢である。図の左が左脳の前側。

も一致する⁶⁾。Syn と Sem 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、左下前頭回が意味判断や音韻判断ではなく、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。

以上のように、文法処理にともなって文法中枢が選択的に活動することはわかったが、その逆も正しいであろうか。一般に脳機能イメージングは相関関係を示唆するだけであり、因果関係を証明するためには、脳を局所的に刺激する干渉法が必要となる。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。数秒間に1回の頻度で加える低頻度刺激は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、この TMS の手法を用いて、文法中枢の刺激が文法判断と意味判断のいずれかに影響を与えるかを比較検討した⁷⁾。この実験は、前記の fMRI 実験⁵⁾と同様に、同じ単語セットの組合せを変えた最小対刺激(言語学的な要素を一つだけ変

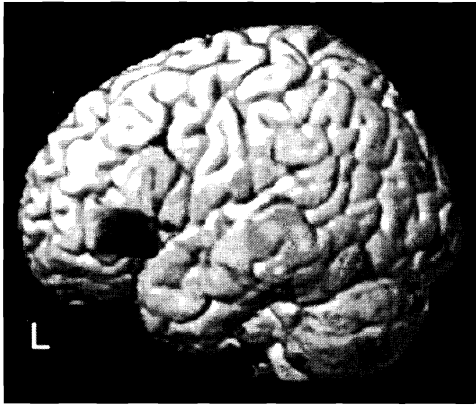


図 2 文章理解の中枢

左下前頭回の腹側部(pars orbitalis)周辺の活動領域が文章理解の中枢にあたる。

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を用いている。磁気刺激は、「ゆきが つもる」のように、名詞句に続く動詞の提示開始($T=0$)、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、参加者の反応時間(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ている。ブローカ野に磁気刺激を与えた場合、 $T=0$ 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 はゼロと有意に変わらなかった。次に $T=150$ ms では、文法判断課題において、文法的に正しい文と間違った文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 はゼロと有意に変わらなかった。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 ΔRT はゼロと有意に変わらなかった。磁気刺激の効果は文法中枢に選択的である。

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、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。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はじめて証明された。

2 文章理解の中枢のはたらき

さらにわれわれは、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 を用いて直接比較し、文章の理解に選択的な活動を示す脳の領域の同定を行った⁸⁾。その結果、文法中枢に接して腹側に位置する左下前頭回の腹側部(ブロードマンの 45 および 47 野)が、聴覚と視覚の両モダリティーに共通して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(図 2)。この領域は、文章理解の中枢の候補であると考えられる。

さて、fMRI を用いて大脳皮質の機能を調べる際に、実験条件間での信号変化の有意性を t 検定によって判定するのが一般的である。しかし、抽出された複数の領域(region of interest : ROI)がどのように機能的に結合しているかを t 検定で判定することはできない。そこでわれわれは、相関分析法(correlation analysis)を fMRI 時系列信号データに適用し、複数の ROI が示す信号変化の相関を求めることにより、言語処理における皮質領域間の機能的結合を定量的に評価した⁹⁾。前記の fMRI データ⁸⁾に本解析法を適用したところ、この左下前頭回の腹側部と左中心前溝との間で、文章理解の課題において最も強い相関が見られることが示された。以上の結果より、前頭前野における領域間の結合は、文処理において選択的に機能することが初めて明らかになった。

以上の実験は、音声の聴覚提示と文字の視覚提示の両方で完全に一致した結果が得られている。そこで、音声や文字とは異なるモダリティーである手話について、文章理解の中枢が一致するかどうかをさらに検討した¹⁰⁾。この実験の参加者は、日本手話を母語とするろう者 9 名、日本手話と日

本語の両方を母語とする聴者(コーダと呼ばれるバイリンガル)12 名, 日本手話の習得経験がない日本語を母語とする聴者 12 名である。すべての参加者からインフォームドコンセントを得た。実験で比較した条件は, 次の四つである。

- 1) 日本手話によるろう者の脳活動
- 2) 日本手話によるコーダの脳活動
- 3) 日本語の音声で提示した条件の聴者の脳活動
- 4) 日本語と日本手話を同時に提示した条件の聴者の脳活動

本研究では, 次の三つの課題を比較する実験パラダイムを用いた。

①「会話理解の課題」。会話文を日本手話または日本語の音声で提示して, 文脈に合わない文が提示されたとき, ボタン押しを行う。

②「非単語検出の課題」。文章理解の課題で用いた会話文を文単位で順序をランダムに入れ替えて提示する。日本手話または日本語にない単語(非単語)が提示されたとき, ボタン押しを行う。

③「くり返し検出の課題」。非単語検出の課題で用いた文を逆再生で提示する。日本手話または日本語の逆再生で同じものが反復して提示されたとき, ボタン押しを行う。

これらの課題を行っているときの脳活動を fMRI によって測定し比較した。会話理解の課題とくり返し検出の課題の脳活動を比較した結果, 上記 1)~4) の 4 条件に共通して左脳と右脳の両方に活動が見られたが, 全体的に左脳の活動の方が強いことが明らかとなり, 「左脳優位性」が明確に示された。さらに, 会話理解の課題と非単語検出の課題の脳活動を比較した結果, 会話の理解に選択的な脳活動は, 手話と音声の両条件に共通して左脳優位であり, 図 2 の文章理解の中枢が活動することが示された。

以上の知見をまとめると, 文章理解における脳の活動が日本手話と日本語において完全に共通しており, 手話と音声言語で同じ脳の場所が活性化するという言語の普遍性が確かめられた¹⁰⁾。さらに, ろう者・コーダ・聴者のグループの間に共通して, 左脳優位の活動が観察された。従って, 手話と音声などの言語様式によらない高次の言語処

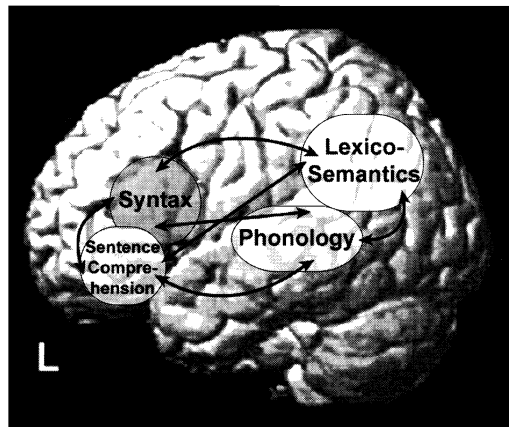


図 3 左脳の「言語地図」とそのネットワーク

理が左脳の文章理解の中枢に局在していることが結論できる。

図 3 に示した文法中枢(図中の Syntax)と文章理解の中枢(Sentence Comprehension)は, 側頭葉上部の音韻の中枢(Phonology)や単語意味の中枢(Lexico-Semantics)とは分離しており, これら四つの中枢間で双方向の言語情報のやりとりがあると考えられる²⁾。つまり, 古典的なブローカ野やウェルニッケ野を含む言語野の機能分化は, 言語処理の観点から見直すことが必要であろう。今後の研究では, この「言語地図」に見られる領域間の情報の流れやそのタイミングを明らかにしていく必要がある。

3 文法中枢における第二言語習得の初期過程

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 歳頃から第二言語を習得した群とを比較して, 後者の群でのみ, 二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が報告されている¹¹⁾。その後, 第二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¹²⁾や, 習得時期が遅い方が活動が強まるという報告¹³⁾が現れて, 母語と第二言語の獲得におけるブローカ野の役割は未だ明らかになっていなかった。

そこでわれわれのグループは, 英語の習得過程

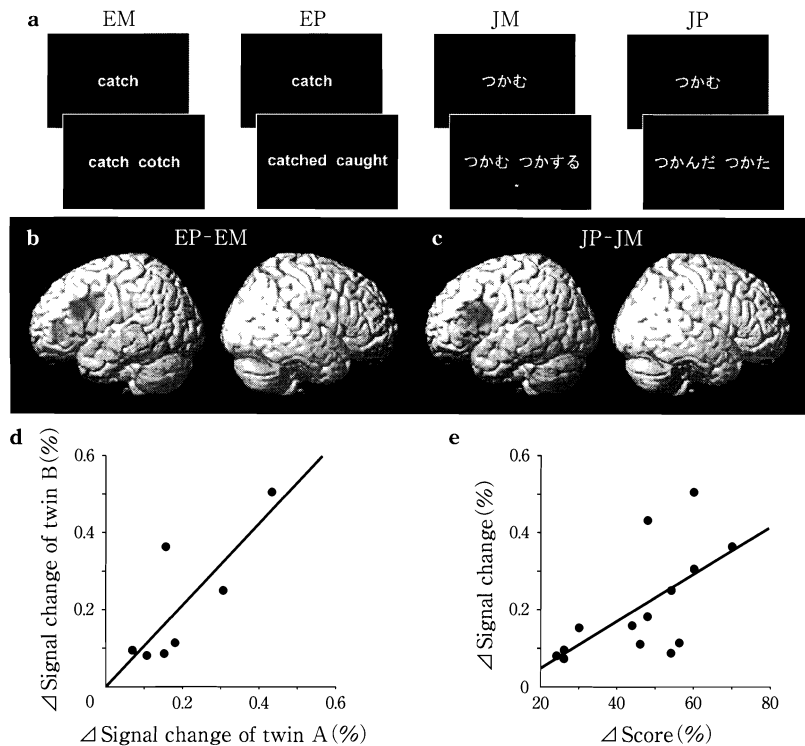


図 4 英語と日本語の文法処理に共通したブローカ野の活動

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(濃い領域)。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(Δ Signal 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(Δ Score)に比例したブローカ野における活動増加。

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¹⁴⁾。東京大学教育学部附属中等教育学校の中学 1 年生 (13 歳) 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 ヶ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。

この fMRI 調査では, 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。参加者は, 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, すべての参加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 4 a)。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。そして, これら四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 4 b に示すように, 左脳のブローカ野を含む前頭葉(濃い領域)に最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もので、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最も強い活動が観察された(図 4 c)。

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 4 d)。さらに、各参加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 4 e)。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。今後は一卵性双生児と二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。

4 文法中枢における第二言語習得の定着過程

前記の調査に引き続き、日本語を母語とする右利きの大学生 15 名(19 歳)を対象として、同様の英語の過去形課題をテストした¹⁵⁾。すべての参加者は海外の滞在経験がなく、中 1(12 歳)のときから英語を学び始めている。

英語の過去形課題の成績について、不規則動詞(例えば catch-caught)と規則動詞(例えば talk-talked のように ed がつく場合)を分けて調べたところ、不規則動詞の成績において個人差がもっとも顕著に表れた。そこで、大学生(19 歳)と中学

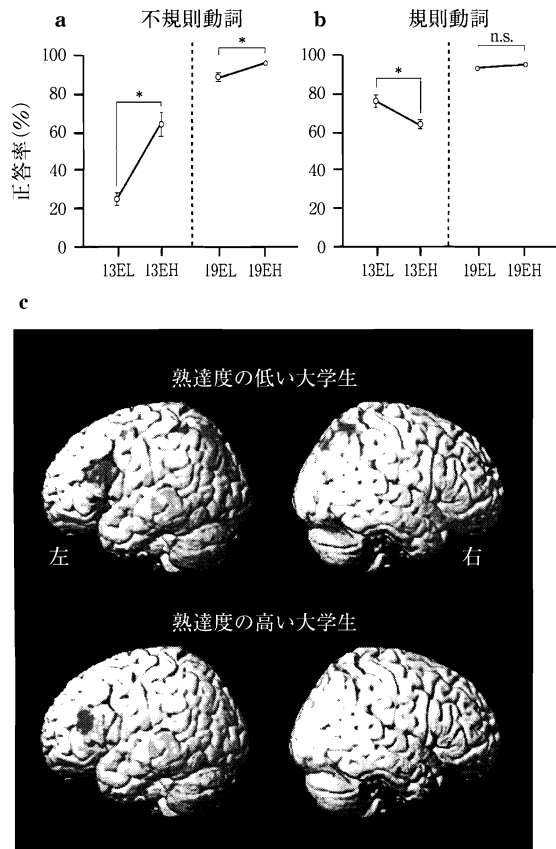


図 5 中学生と比較した大学生の英語の熟達度の上昇
a, b) 不規則動詞と規則動詞の正答率について、中学生(13EL, 13EH)と大学生(19EL, 19EH)の各グループを 2 群に分けて比較した。*は統計的な有意差があることを、n. s. は有意差がないことを表す。c) 英語の過去形課題に選択的な脳活動(濃い領域)。熟達度の低い大学生(19EL)に比べて、熟達度の高い大学生(19EH)の方が著しく脳の活動領域が減少していることがわかる。

生(13 歳)のグループそれぞれを、不規則動詞の成績が高い群(EH, higher in English)と低い群(EL, lower in English)に分けて、英語の熟達度の一つの指標とした(図 5 a)。実際、中学生の成績が高い群(13EH)よりも大学生の成績が低い群の方(19EL)が熟達度が高い。なお、比較的やさしい規則動詞の場合は、大学生のグループでほぼ満点に近い成績に達していることがわかる(図 5 b)。また、中学生の成績が低い群(13EL)では、不規則動詞よりも規則動詞を選択する傾向が強く(両者を平均すれば 50 点程度)、規則動詞は英語の熟達度をそのまま反映していないことがわかる。この

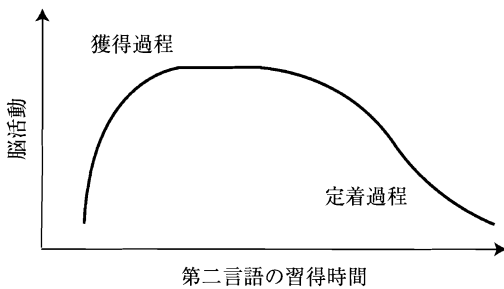


図6 第二言語の習得過程における脳活動の変化

ように、一般の学習成績においても、熟達度の要因を分離することが必要となる。

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4の13歳の結果と同様に、左脳のブローカ野を含む前頭葉に最も強い活動が観察された。こうした脳活動が熟達度によってどのように変化するかを調べたところ、熟達度の低い大学生(19EL)に比べて、熟達度の高い大学生(19EH)の方が著しく脳の活動領域が減少していることがわかった(図5c)。すなわち、熟達度が高くなるほどブローカ野の活動が節約されていることがわかる。また、不規則動詞と規則動詞に共通して、ブローカ野の活動と熟達度の間に負の相関が見られた。不規則動詞と規則動詞のテストでは明らかな成績の違いがあるにもかかわらず、ブローカ野の活動が同様の変化を示したということは、この活動が英語の成績そのものではなく熟達度を反映していると結論できる。

以上の知見は、熟達度の個人差を、年齢や課題の成績などの要因から明確に分離したことがポイントである。また、英語が上達すると、日本語を使うときに必要な脳の場所と同じ場所が活性化するという言語の普遍性が、大人でも確かめられたことになる。これらの結果は、ブローカ野が文法判断を普遍的に司っており、英語の熟達度が文法中枢の機能変化によって担われていることを直接的に示している。

前節では、英語習得を開始したばかりの中学生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を説明した¹⁴⁾。これに続いて本節では、第二言語の習得がかなり進ん

だ大学生において、熟達度が高くなるほどブローカ野の活動を必要としなくなることを明らかにした¹⁵⁾。この両方の知見を合わせて考えると、習得の初期の獲得過程で文法中枢の活動が高まり、その活動が維持され、文法知識の定着過程では活動を節約できるように変化することが示唆される²⁾(図6)。長期にわたる英語習得の過程が文法中枢のダイナミクスとして観察できるという可能性は、広く教育の見地からも重要なポイントであろう。

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) 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、2002
- 2) Sakai KL : *Science* **310** : 815-819, 2005
- 3) Hauser MD, Chomsky N, Fitch WT : *Science* **298** : 1569-1579, 2002
- 4) Hashimoto R, Sakai KL : *Neuron* **35** : 589-597, 2002
- 5) Suzuki K, Sakai KL : *Cereb Cortex* **13** : 517-526, 2003
- 6) Embick D, Marantz A, Miyashita Y, O'Neil W, Sakai KL : *Proc Natl Acad Sci USA* **97** : 6150-6154, 2000
- 7) Sakai KL, Noguchi Y, Takeuchi T, Watanabe E : *Neuron* **35** : 1177-1182, 2002
- 8) Homae F, Hashimoto R, Nakajima K, Miyashita Y, Sakai KL : *NeuroImage* **16** : 883-900, 2002
- 9) Homae F, Yahata N, Sakai KL : *NeuroImage* **20** : 578-586, 2003
- 10) Sakai KL, Tatsuno Y, Suzuki K et al : *Brain* **128** : 1407-1417, 2005
- 11) Kim KHS, Relkin NR, Lee K-M, Hirsch J : *Nature* **388** : 171-174, 1997
- 12) Chee MWL, Tan EWL, Thiel T : *J Neurosci* **19** : 3050-3056, 1999
- 13) Wartenburger I, Heekeren HR, Abutalebi J et al : *Neuron* **37** : 159-170, 2003
- 14) Sakai KL, Miura K, Narafu N, Muraishi Y : *Cereb Cortex* **14** : 1233-1239, 2004
- 15) Tatsuno Y, Sakai KL : *J Neurosci* **25** : 1637-1644, 2005