

文法遺伝子は本当にあるのか

酒井邦嘉*

KEY WORDS

- ・言語
- ・文法遺伝子
- ・文法中枢
- ・fMRI
- ・FOXP2

SUMMARY

言語は、人間に固有の高次脳機能である。言語学者のChomsky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。こうした言語の問題は、脳科学における究極の挑戦である。脳科学の進歩に伴い、人間の脳の活動を画像として捉える機能イメージングの手法を用いて、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。しかし、言語などの高次脳機能の遺伝的なメカニズムは、まだほとんどわかっていない。本稿では、言語機能の核心にある文法処理に着目した脳機能イメージングによる最近の研究と、言語の遺伝的基礎を示唆する研究を紹介する。まだ「文法遺伝子」といえるだけの確固たる証拠はないが、近い将来に言語の遺伝的メカニズムが解明される可能性は高い。

はじめに

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、米国の言語学者のChomskyとスイスの発達心理学者のPiaget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¹⁾。Chomsky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。「遺伝子-脳-行動」という堀田²⁾のドグマを前提にするならば、そもそも言語能力が、脳機能としてその他の認知能力から分離できなければ、言語機能という発現形質そのものが定まらないことになり、「文法遺伝子」をいくら議論しても無意味なのである。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。しかし、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、必要不可欠な課題なのである。その意味で、こうした言語の問題は、脳科学における究極の挑戦であるといえる³⁾。

1. 「文法中枢」の発見

大脳皮質の言語野である左脳のブローカ野(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」とよばれている。1960年代に、米国のGeschwind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、論争がつけられてきた。

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あてる一方で、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、つぎの4つである⁴⁾。

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くらべて格段にむずかしい。

言語が他の認知機能とくらべて特別な働きをもたないならば、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、単語記憶のほう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はじめてのものであり、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」とよぶことにする。

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。

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し。

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し。

2. 「文法中枢」の証明

経頭蓋的磁気刺激法 (transcranial magnetic stimulation : TMS) は、1985 年から主として大脳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 mm の位置情報と数十 ms 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合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、つぎの 2 つである⁵⁾。

1) 文法判断課題

「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 200 ms 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いければ (normal : N) 緑のボタンを押し、正しくなければ (anomalous : A) 赤のボタンを押し。文法的に間違った文の例は、「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つくような文法知識 (生成文法) が必要である。

2) 意味判断課題

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い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し。意味的に間違った文の例は、

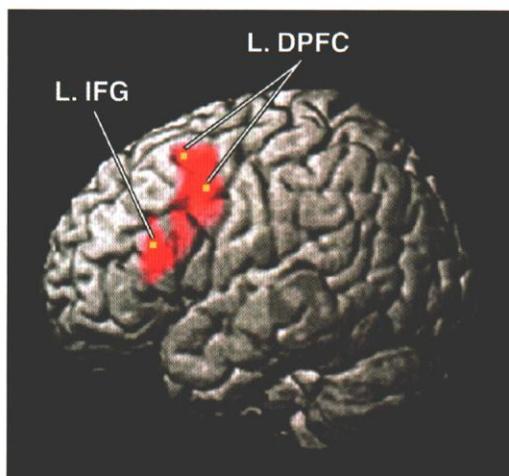


図 1. 文法を使う言語理解の座、「文法中枢」左下前頭回 (left inferior frontal gyrus : L. IFG) から左前頭前野背側部 (left dorsal prefrontal cortex : L. DPFC) にかけての領域 (赤色の部分)。図の左が脳の前側。(筆者作成)

「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、動詞の提示開始時 (T=0 ms)、それより 150 ms、350 ms のいずれかのタイミングを選んでおこなった (図 2)。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 3 A)。つぎに T=150 ms では、文法判断課題において、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みられた (図 3 B)。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みられなかった。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 3 C)。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



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) (Sakai KL *et al*, 2002⁵⁾より改変引用)

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。これは文法中枢のはじめての証明である。

3. 「文法中枢」の変化

米国のグループによる 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、十歳ごろ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、2つの言語による活動領域がブローカ野のなかで分離していることを報告した⁶⁾。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みられなかったという実験結果⁷⁾や、習得時期が遅いほうが活動が強まるという報告⁸⁾が現れて、母語と第二言語におけるブローカ野の役割ははまだ明らかになっていなかった。

われわれは、英語の習得過程を脳活動の変化として捉えるためにつぎのような調査をおこなった。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 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

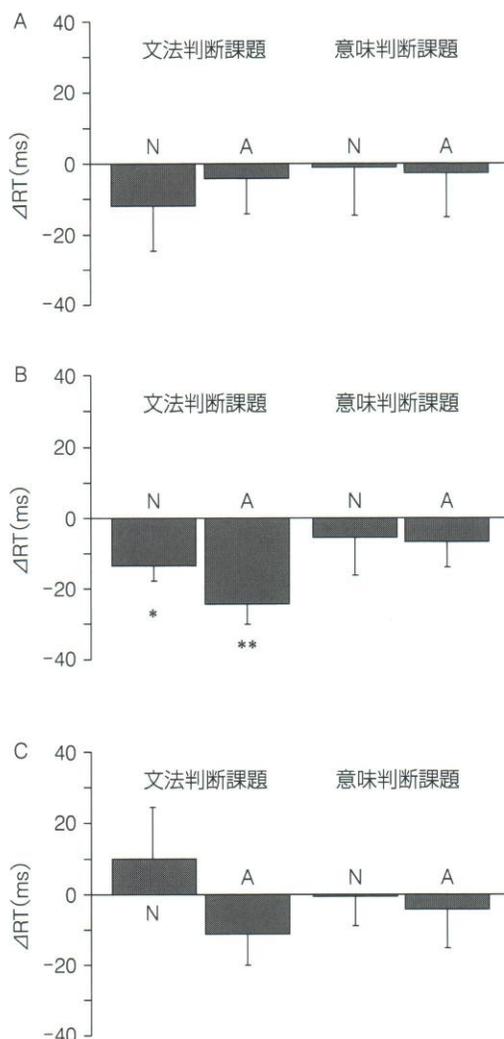


図 3. ブローカ野の磁気刺激による文法判断の選択的促進 TMS のタイミングは、A : T=0 ms, B : T=150 ms, C : T=350 ms. * は 5%, ** は 1% の有意水準を表す。

(Sakai KL *et al*, 2002⁵⁾より引用)

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なか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⁹⁾。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 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) をおこなった。これら 4 つの課題をおこな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前野 (赤色の領域) 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ため、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 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み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。これらの知見は、Chomsky が提唱してきた「普遍文法」の核心に一步近づいたといえよう。

本研究において、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捉えることができた。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、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。

MRI を用いて脳溝と脳回のパターンを一卵性双生児と二卵性双生児で比較した研究によると、一卵性双生児

では、二卵性双生児以上に脳のほとんどの場所でほぼ完全に近い相関があることがわかった¹⁰⁾。さらに、遺伝的に決定される程度を脳全体で調べたところ、ブローカ野より背側の前頭葉と、左脳の角回と縁上回が最大であった。最も大きな遺伝的支配を受けているのが言語野であるというこの発見は重要である。

4. 「文法遺伝子」をめぐって

言語に関連した遺伝子を探すアプローチには、言語障害を伴う遺伝病の調査が重要である。特定の遺伝子と言語のあいだに因果関係があることを示す現象が見つければ、研究が大きく前進するからである。遺伝子に原因があって言語獲得の障害を起こす病気として、「特異性言語障害 (specific language impairment : SLI)」などが知られている。特異性言語障害の最近の研究では、20 ms ほどの短い音の聞き取りに重い障害があることが示され、聴覚の障害がもっと高次の言語障害の原因となっている可能性が出てきた¹¹⁾。

カナダの言語学者 Gopnik¹²⁾ は、ある家系 (KE 家とよばれる) の三代の 30 人中、16 人という高頻度で、動詞の時制を変えたり、非単語 (言葉のようで意味のない単語) を複数形 (s をつける) に変えたりする際に障害が現れることを報告した。この研究は、「文法遺伝子」の発見として宣伝されたが、同じ家系のその後の詳細な調査で、文法に特異的な障害とはいえないことがわかった。言語障害があることは確かだが、口の動きの障害や知能指数の低下が報告されており¹³⁾、尾状核 (大脳基底核の一部) などに萎縮がみられる。単語の復唱課題では、ブローカ野や尾状核などの活動が正常な被験者より強く、逆に補足運動野などの活動が弱かった¹⁴⁾。KE 家の人々を被験者とした最近の fMRI によると、名詞を提示して動詞を声に出さずに答える条件において、健常者のグループは左脳のブローカ野に活動が観察されたのに対し、言語障害のあるグループでは左右両半球にわたって活動が分散していた¹⁵⁾。しかし、動詞を声に出して答える条件では、この活動パターンが再現しなかったり、恣意的に多重比較の補正や統計的閾値を操作している、この研究には技術的な問題が残る。

さらに、この KE 家の言語障害の原因となる優性遺伝

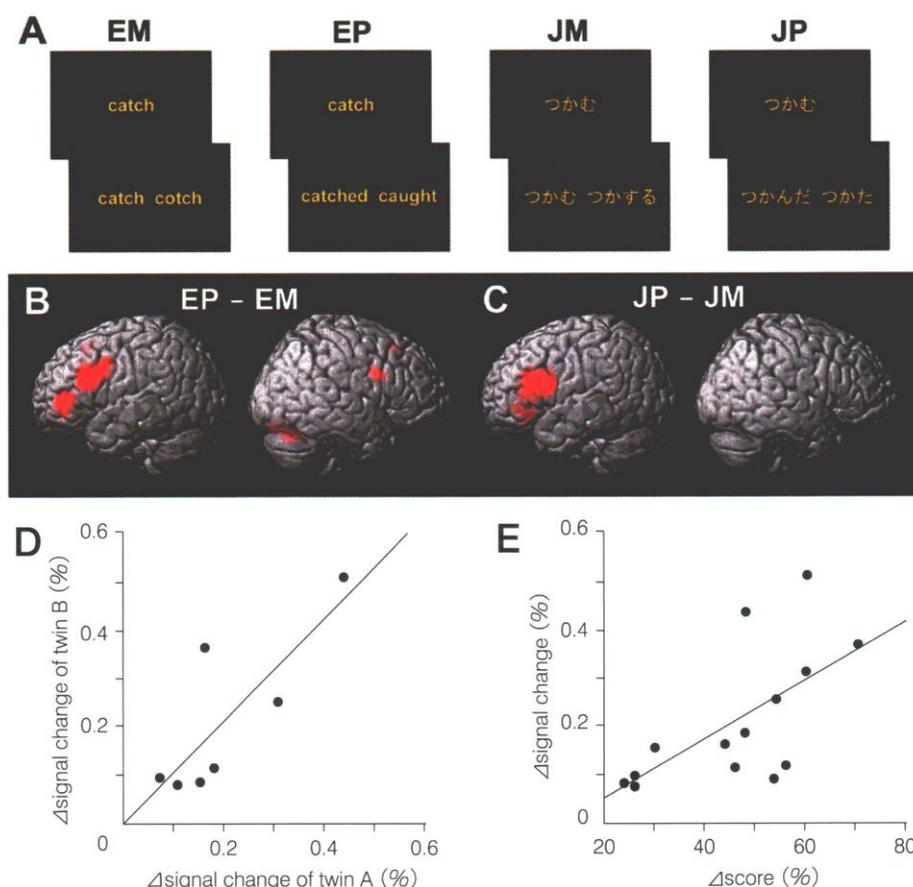


図 4. 英語と日本語の文法処理に共通したブローカ野の活動

- 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 (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.

(Sakai KL *et al*, 2004⁹⁾より改変引用)

子は, 転写制御因子と考えられている *FOXP2* であり, 実際に *FOXP2* に突然変異が起こっていることが突き止められた¹⁶⁾. 転写制御因子とは, DNA に結合して, mRNA への転写を調節する蛋白質である. *FOXP2* 遺伝子はマウスにもあり, 発生初期の大脳皮質で大量に発現することがわかっている. *FOXP2* の発現量が半分になると, 脳の神経回路の発達が異常になると考えられ, 言語に関係する遺伝子の最初の例となった. *FOXP2* 自体の mRNA の発現パターンをヒトとマウスの胎児で調べた研究によれば, 両方の種に共通して, 大脳基底核・

視床・下オリブ核・小脳の運動系などに発現が集中することが報告されている¹⁷⁾. さらに, チンパンジー・ゴリラ・アカゲザルの *FOXP2* 蛋白質は同一であり, ヒトの *FOXP2* 蛋白質とくらべると, 2つのアミノ酸が異なることが明らかとなった¹⁸⁾. 現時点で *FOXP2* が「文法遺伝子」であると結論づけることはできないが, 言語を含めた人間の特殊性を明らかにするための遺伝的研究へ向けて, 最初の一步が踏み出されたといえるであろう.



文 献

- 1) ロワイヨーマン人間科学研究センター (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
- 2) 堀田凱樹: 遺伝子—脳—行動 (1). 自然 **27** : 32-40, 1972
- 3) 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
- 4) Hashimoto R, Sakai KL : Specialization in the left prefrontal cortex for sentence comprehension. *Neuron* **35** : 589-597, 2002
- 5) Sakai KL, 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
- 6) Kim KH, Relkin NR, Lee KM *et al* : Distinct cortical areas associated with native and second languages. *Nature* **388** : 171-174, 1997
- 7) Chee MW, Tan EW, Thiel T : Mandarin and English single word processing studied with functional magnetic resonance imaging. *J Neurosci* **19** : 3050-3056, 1999
- 8) Wartenburger I, Heekeren HR, Abutalebi J *et al* : Early setting of grammatical processing in the bilingual brain. *Neuron* **37** : 159-170, 2003
- 9) Sakai KL, Miura K, Narafu N *et al* : Correlated functional changes of the prefrontal cortex in twins induced by classroom education of second language. *Cereb Cortex*, in press, 2004
- 10) Thompson PM, Cannon TD, Narr KL *et al* : Genetic influences on brain structure. *Nat Neurosci* **4** : 1253-1258, 2001
- 11) Wright BA, Lombardino LJ, King WM *et al* : Deficits in auditory temporal and spectral resolution in language-impaired children. *Nature* **387** : 176-178, 1997
- 12) Gopnik M : Feature-blind grammar and dysphasia. *Nature* **344** : 715, 1990
- 13) Vargha-Khadem F, Watkins K, Alcock K *et al* : Praxic and nonverbal cognitive deficits in a large family with a genetically transmitted speech and language disorder. *Proc Natl Acad Sci USA* **92** : 930-933, 1995
- 14) Vargha-Khadem F, Watkins KE, Price CJ *et al* : Neural basis of an inherited speech and language disorder. *Proc Natl Acad Sci USA* **95** : 12695-12700, 1998
- 15) Liegeois F, Baldeweg T, Connelly A *et al* : Language fMRI abnormalities associated with *FOXP2* gene mutation. *Nat Neurosci* **6** : 1230-1237, 2003
- 16) Lai CS, Fisher SE, Hurst JA *et al* : A forkhead-domain gene is mutated in a severe speech and language disorder. *Nature* **413** : 519-523, 2001
- 17) Lai CS, Gerrelli D, Monaco AP *et al* : *FOXP2* expression during brain development coincides with adult sites of pathology in a severe speech and language disorder. *Brain* **126** : 2455-2462, 2003
- 18) Enard W, Przeworski M, Fisher SE *et al* : Molecular evolution of *FOXP2*, a gene involved in speech and language. *Nature* **418** : 869-872, 2002