

■特別講演

脳から見る言語の本質

金野 竜太¹⁾²⁾ 酒井 邦嘉¹⁾

要旨：言語情報は、単語から文や文章まで異なるレベルで処理される。音韻や語彙の意味などの単語レベルの言語情報は、主に左脳の側頭葉から頭頂葉にかけての領域で処理されると考えられる一方で、文法知識を適用して文構造を構築していく過程では、左前頭葉が重要な役割を果たしている。我々は機能的磁気共鳴映像法を用いて、左下前頭回弁蓋部/三角部および左運動前野外側部が文の統辞処理に関与することを実証した。さらに、左前頭葉の神経膠腫患者の統辞的文理解を評価したところ、左下前頭回弁蓋部/三角部と左運動前野外側部の損傷によって、統辞処理に選択的な障害が生じることが明らかとなった。以上の結果は、言語のモジュール仮説を支持する。

神経心理学 28 ; 174-181, 2012

Key words : 言語, 左前頭葉, 統辞処理, 失文法
language, left frontal cortex, syntax, agrammatism

はじめに

言語機能は人間にのみ備わった生得的な能力であると同時に、知覚・記憶・意識など、様々な認知機能と密接に関係している(酒井, 2002)。実際、社会・文化活動を含めて、人間の知的な営みに言語の関与が考えられないものは極めて少ない。人間の言語処理過程はいくつかの言語要素からなる。単語レベルの言語要素として音韻や語彙の意味処理があり、さらに文や文章までのレベルでは統辞処理と文意味理解がある。これらの言語要素の相互作用により人間は言語処理を行なっている。言語機能の脳内機構を考える際、これらの言語要素の処理が特定の脳領域で行なわれているかどうか、すなわち、複数の言語野が存在するかどうかが重要な問題となる。

脳内の主要な言語野は19世紀にはすでに発見

され、言語を話す機能の言語野(運動性言語野)はP. Broca (1824~1880)らにより左下前頭回後部に位置することが示され、言語を聞いて理解する機能の言語野(感覚性言語野)はC. Wernicke (1848~1905)らにより左側頭回後方に位置することが報告されている。N. Geschwind (1926~1984)は、これら2つの脳領域を結ぶ弓状束に注目し、これらの連合作用によって言語機能が営まれる、という理論を展開した。近年の認知神経科学の進歩により言語野の詳細な機能、さらには他の脳領域の言語処理への関与が報告されている。そして、これらの知見をもとに、言語の脳内処理機構の解明が進められている。そこで本稿では、最初に言語処理の脳内機構を概観し、続いて言語の脳内ネットワークを近年報告された知見をもとに概観する。

Nature of language revealed from the brain

- 1) 東京大学大学院総合文化研究科相関基礎科学系, Ryuta Kinno, Kuniyoshi L. Sakai: Department of Basic Science, Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo
- 2) 昭和大学横浜市北部病院内科, Ryuta Kinno: Department of Internal Medicine, Showa University Northern Yokohama Hospital

別刷請求先: 〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1 東京大学大学院総合文化研究科相関基礎科学系 酒井邦嘉
kuni@mind.c.u-tokyo.ac.jp

1. 音韻・語彙的意味処理

話された言葉を理解する場合、時系列的な音素の連なりから、音節・単語や文のレベルまでの処理が行われており、より広範囲における音声の操作、あるいは同定のことを音韻処理という。過去の症例報告では、Wernicke野に一側性の限局的脳損傷を持つ患者において、母音に認知における顕著な障害を見出した(Lund et al., 1986)。近年の脳機能イメージングによる研究では、後上側頭回である Brodmann の 22 野 (BA 22) が聴覚的音韻処理に関連していることが示唆されている(Hickok et al., 2000)。一方、語彙的意味処理には左角回・縁上回の関与が想定されている(Price, 2000)。しかし、音韻処理と語彙的意味処理に関する報告は多岐に渡っており、共通した結論が出ていない。我々は音声刺激を用いた機能的磁気共鳴画像法(functional magnetic resonance imaging, fMRI)により、統辞的逸脱文や意味的逸脱文と比較して、音韻的逸脱文と音の高低の逸脱文を判断しているときに両側上側頭回が特異的に活動することを報告した(Suzuki et al., 2003)。音韻・語彙処理の脳内機構を明らかにすることで、Wernicke失語の機序が分かると期待される。

2. 文理解処理

文は複数の単語から構成されるが、同じ単語を使っても、文レベルの意味処理は単語レベルの意味処理とは性質が異なる。例えば、「太郎が次郎を押す」という文と「次郎が太郎を押す」という文では、語順の違いによってそれぞれの文が表す意味は異なる。したがって、文理解処理には単語レベルの意味処理と文レベルの意味処理をつなぐための処理が必要である。我々は、左下前頭回下部 BA 45/47 において、語彙の選択や統合などの文レベルの意味処理に特化した脳領域を同定した(Homae et al., 2002)。さらに我々は、脳領域間の fMRI 信号の時間的な相関を計算することにより、左下前頭回下部と左運動前野外側部(the left lateral premotor cortex; L.LPMC, BA 6)が単語処理ではなく文理解処理に選択的な機能的統合を

示すことを報告した(Homae et al., 2003)。これらの報告をまとめると、左前頭葉の複数の領域が文レベルの意味処理に関係していると考えられる。

3. 統辞処理

単語や文に対して統辞知識を適用し、その文の構造を構築する過程を統辞処理と呼ぶ。言うまでもなく、文理解の過程には純粋な統辞的処理のみならず、言語性の短期記憶処理が関与している。これまでの研究報告により、左下前頭回弁蓋部/三角部(the opercular and triangular parts of the left inferior frontal gyrus; L.F3op/F3t, BAs 44/45)と L.LPMC が文法処理の神経基盤とされているが(Dapretto et al., 2002; Hashimoto et al., 2002)、これらの脳領域は、いずれも統辞処理が直接要求されない言語性短期記憶処理により賦活されることが報告されている(Chein et al., 2001)。しかし、先行研究では内言に伴う統辞処理はコントロールされていない可能性が残る。したがって、文構造の処理に特化した脳領域(文法中枢)の存在を証明することは、統辞処理の脳内機構を解明するために重要である。我々は統辞処理課題と言語性短期記憶課題に関わる脳活動を解離するため、統辞処理の性質の中でも、特に構造依存性と自動性に焦点をあてた fMRI による実験課題を作成した(Hashimoto et al., 2002)。その結果、L.F3op/F3t と L.LPMC において、統辞処理課題に選択的な反応がみられた。

我々は統辞処理を中心とする文理解における脳内機構をさらに詳しく調べるために、新しい「絵・文マッチング課題」を作成した(図 1A, Kinno et al., 2008)。この課題は二人の登場人物により動作場面を表す絵と、動作場面を示す文から構成されており、参加者は絵と文の意味内容のマッチングを行った。この課題を用いて、文法負荷の増大に伴い脳活動がどのように変化するかを事象関連 fMRI により計測した。実験では、能動文(active sentence; AS, 例: ○が□を押してる)、受動文(passive sentence; PS, 例: □が○に押される)、かき混ぜ文(scrambled sentence; SS, 例: □を○が押してる)の3種類の統辞構造について比較し

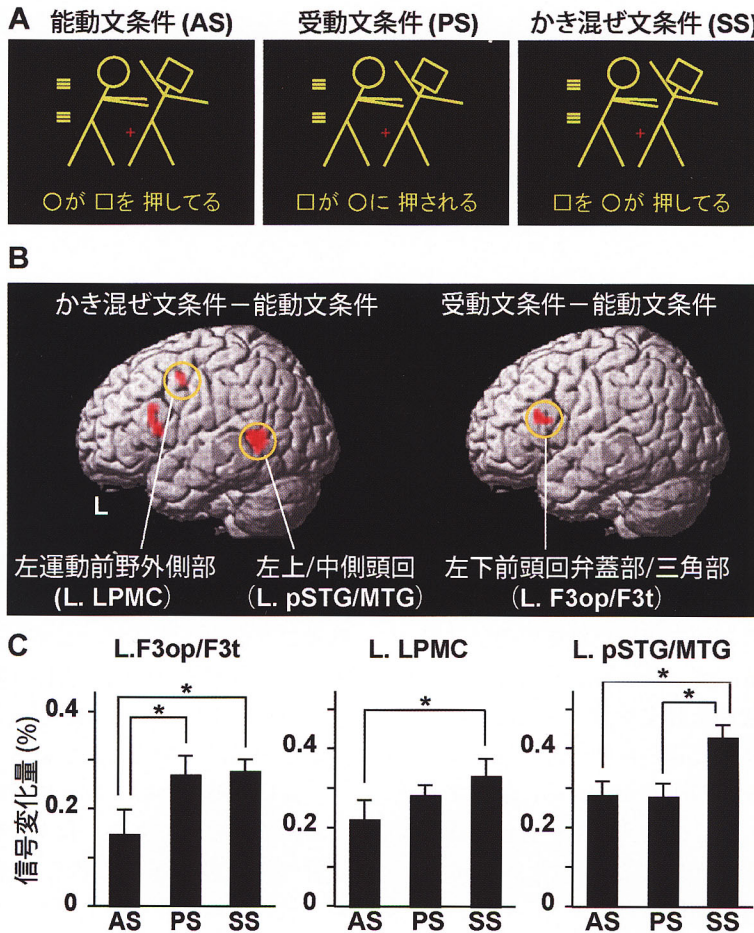


図1 文理解における統辞処理の神経機構 (Kinno et al., 2008) (一部改変)

(A) 絵・文マッチング課題。各条件は動作を表す絵と日本語文からなる。被験者は絵と日本語文が表わす意味内容が同じかどうか判断する。能動文条件 (AS), 受動文条件 (PS), かき混ぜ文条件 (SS) の3条件で使われる絵は同じであるが, 各条件で提示される文構造は異なる。すなわち, この3条件の間において, 意味処理の負荷は等しいが, 統辞処理の負荷は能動文条件に比べ, 受動文条件やかき混ぜ文では高まる。

(B) かき混ぜ文条件と能動文条件での脳活動の直接比較, および, 受動文条件と能動文条件での脳活動の直接比較。

(C) 統辞処理における信号変化量。L. F3op/F3t, L. LPMC, L. pSTG/MTGの信号変化量を示す。アスタリスクは $p < 0.05$ での有意差を示す。上記3領域の能動文条件, 受動文条件, かき混ぜ文条件に対する反応性は脳部位により相異なるパターンを呈する。

た。これらの文のうち, 受動文およびかき混ぜ文は非正規的な構文であり, 能動文は正規的な構文である。統辞処理の負荷は能動文に比べ, 非正規的な文で高まると考えられる。条件間では, 絵および音節の数, そして記憶の負荷や条件間の難易

度を完全に統制した。

かき混ぜ文条件と能動文条件での脳活動の直接比較では, L. F3op/F3t・L. LPMC・左上/中側頭回の後方領域 (the left posterior superior temporal gyrus and middle temporal gyrus; L. pSTG/

MTG, BAs 21/22) の3領域において、かき混ぜ文条件における有意な活動の上昇がみられた(図1B)。また、受動文条件と能動文条件の脳活動の直接比較では、L.F3op/F3tにおいて、受動文条件における有意な活動の上昇がみられた。さらに、各条件の脳活動の信号変化量を調べると、上記3領域の各条件に対する反応性は相異なるパターンを呈することが明らかとなった。本結果は、統辞処理の神経機構としてL.F3op/F3t, L.LPMC, L.pSTG/MTGの3領域が関係し、各脳領域の統辞処理への関与は、文構造の違いによって動的に調節されていることを示す初めての知見である。

4. 失文法

脳の構造と機能における因果関係を明らかにするためには、文法中枢の損傷で実際に文法に選択的な障害が生じることを明らかにしなくてはならない。そこで我々は、文法判断を適切に調べることで、従来の失語症検査や知能検査で正常であると診断された患者でも文法中枢の損傷に伴う文法障害(失文法)が現れると考え、左前頭葉に脳腫瘍を持つ患者を対象に「絵・文マッチング課題」を用いて文法判断の調査を行なった(Kinno et al., 2009)。参加者は脳腫瘍摘出手術を受ける前の患者で、本人や担当医師による失語症や精神疾患の報告はなく、知能検査の結果(言語性IQ, 非言語性IQ共に)も標準の範囲内に含まれていた。患者を以下の3群に分割した。

- ① L.F3op/F3tに脳腫瘍のある患者
- ② L.LPMCに脳腫瘍のある患者
- ③上記以外の左前頭葉に脳腫瘍のある患者

能動文・受動文・かき混ぜ文の3条件で同一の絵のセットを用いることにより(図1A)、意味処理を完全に統制することができるため、条件間に何らかの差が認められた場合は、文型に対する統辞処理が唯一の要因であると結論される。

このテストの誤答の原因となる脳腫瘍の場所をMRIで特定するために、各人の高精細MRI画像(解像度 $0.75 \times 0.75 \times 1\text{mm}^3$)上で腫瘍部位の正確な同定を行い、この画像から腫瘍部位をマスクして一定の標準脳座標上に変換することで各個人の

脳の形状を標準化した。この責任病巣の同定には、VLSM法(voxel-based lesion-symptom mapping)を用いた(Bates et al., 2003)。この手法は、脳画像の1画素(voxel)を損傷部位に含む患者と含まない患者の2群に分け、この2群間で課題の成績を比較(t検定)する。もし統計的に有意な差があれば、この画素に対応する脳部位の損傷が成績低下の原因であると特定できる。本研究では、腫瘍部位のMRIデータに基づいて、「絵と文のマッチング課題」の誤答率(間違えた試行の割合)を3つの条件に分けて解析した。

その結果、各条件での誤答の責任病巣は、これまで文法中枢として提案してきたL.F3op/F3tとL.LPMCであることが明らかとなった(図2A~C)。また、受動文条件と能動文条件の「誤答率の差」に対する責任病巣はL.F3op/F3tであり(図2D)、かき混ぜ文条件と能動文条件の「誤答率の差」に対する責任病巣はL.LPMCであること(図2E)が明らかになった。上記のように、この「誤答率の差」は、文型に対する統辞処理の能力差を反映しており、しかも、これらの場所は、同様の課題を用いた我々の先行研究(Kinno et al., 2008)で健常者における脳活動が観察された場所(図2D, Eの青色)と完全に一致した。更に詳しい解析を行ったところ、上記の3つの患者群は、課題の3条件に対して異なるパターンの誤答率を示した(図3)。L.F3op/F3tに脳腫瘍のある患者(図3A)は、正則文(SOV語順)の能動文条件よりも非正則文である受動文条件とかき混ぜ文条件で有意に高い誤答率を示したが(図3B)、L.LPMCに脳腫瘍のある患者(図3C)は、主語が文頭に来る能動文条件と受動文条件よりも目的語が文頭に来るかき混ぜ文条件で有意に高い誤答率を示した(図3D)。また、L.F3op/F3tに脳腫瘍のある患者とL.LPMCに脳腫瘍のある患者のどちらも、3条件すべてに対して健常者より有意に高い誤答率を示した。一方、L.F3op/F3tとL.LPMC以外の左前頭葉に脳腫瘍のある患者(図3E)は、健常者と同等の誤答率を示し(図3F, G)、相補的な結果が得られた。つまり、2つの文法中枢であるL.F3op/F3tとL.LPMCはそれぞれ特定の文型に対

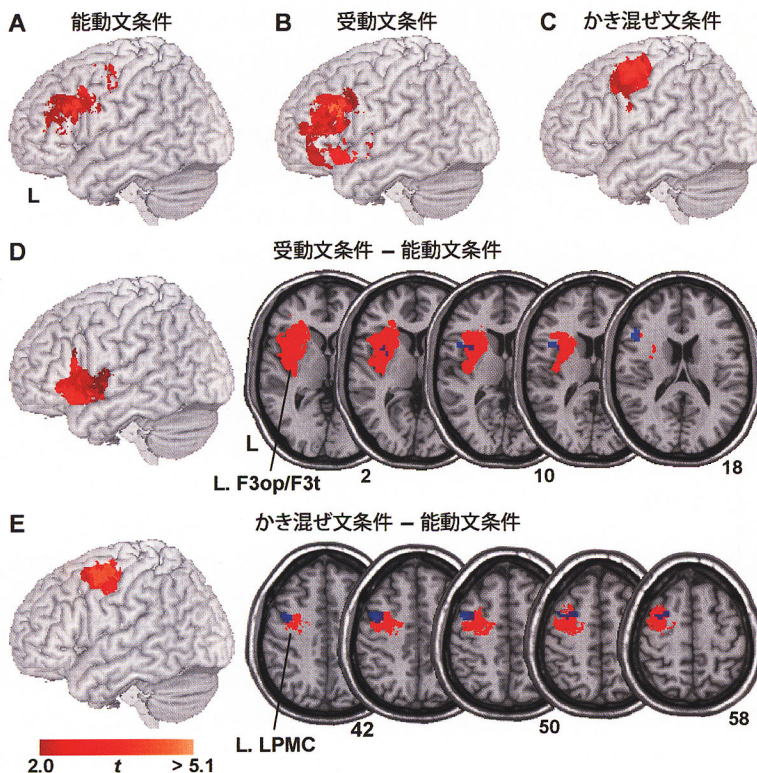


図2 失文法理解の責任病巣 (VLSM 法による) (Kinno et al., 2009) (一部改変) (A-C) 各条件に対する責任病巣. (A) 能動文条件, (B) 受動文条件, (C) かき混ぜ文条件, に対する責任病巣を示す. 左前頭葉の中で L. F30p/F3t または L. LPMC (赤色~オレンジ色) に脳腫瘍のある患者は, 絵と文のマッチング課題の3条件において有意に高い誤答率を示した. (D, E) 2条件間の「誤答率の差」に対する責任病巣. (D) 左: 受動文条件と能動文条件の「誤答率の差」に対する責任病巣は, L. F30p/F3t の一部 (赤色~オレンジ色) であった. 右: その水辺断面 (数字は前交連と後交連を結ぶ水平面からの高さ. 単位 mm). (E) 左: かき混ぜ文条件と能動文条件の「誤答率の差」に対する責任病巣は, L. LPMC の一部 (赤色~オレンジ色) であった. 右: その水辺断面. どちらの場合も, 責任病巣の位置 (赤色) が, 同じ課題を用いた脳機能イメージングで示された健常者の脳活動の場所 (青色, 図1B 参照) と一致した.

する文法処理に寄与しており, これらの領域が正常に働く限り, それ以外の左前頭葉の損傷では文法障害が起らないということが明らかになった. また, 各条件での誤答率は, 年齢や知能指数, そして腫瘍の大きさと無関係であることを確認した. さらに VLSM 法を灰白質部分に対して行うことにより, この文法障害は確かに灰白質部分の損傷が原因となることを明らかにした (Kinno et al., 2011). 以上の結果は, 文法機能が脳皮質の一部

に局在するという「機能局在論」を実証するものであり, Broca 失語に対して新たな可能性を提示する.

今回参加したすべての脳腫瘍患者は, 臨床的に失語症や認知症が疑われることはなかったにもかかわらず, 明らかな失文法理解を呈した. その理由として, 従来の失語症の診断や知能検査では文法について深く調べないため, 検査法自体に限界があったと考えられる. 理論言語学のトレーニン

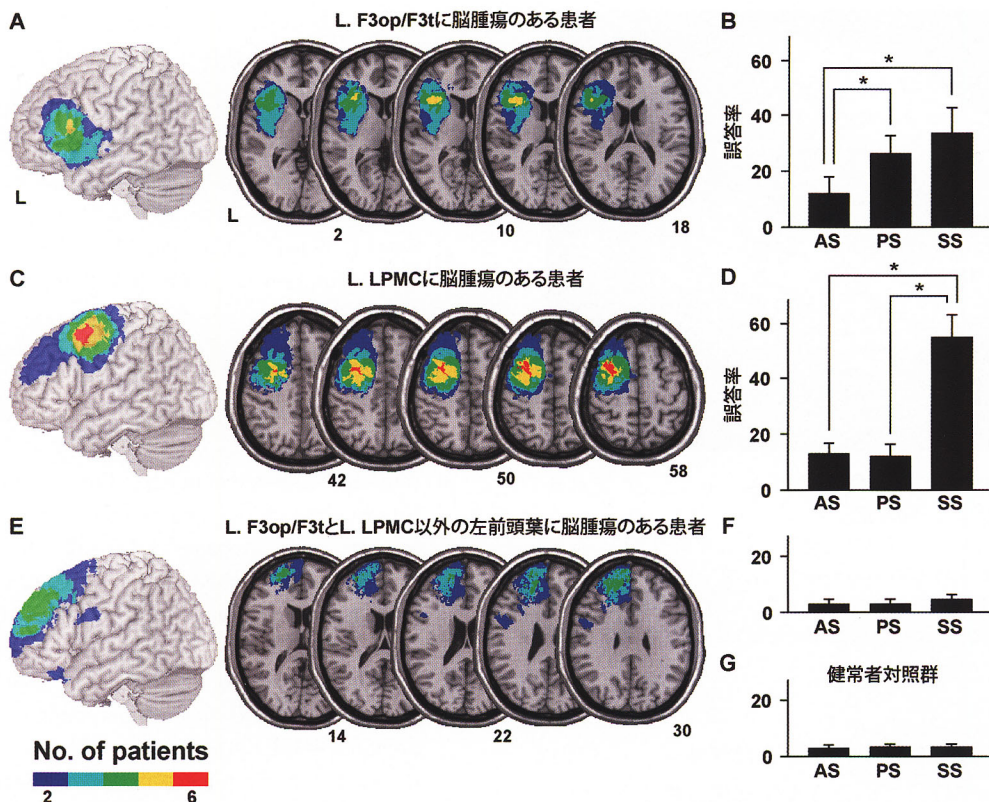


図3 腫瘍部位によって異なる3条件の誤答率 (Kinno et al., 2009) (一部改変)

(A, B) L. F3op/F3tに脳腫瘍のある患者の誤答率。(A) 左: 腫瘍部位の重なり (下に示したカラー・スケールで人数を表す), 右: その水辺断面, (B) 3条件の誤答率。能動文条件よりも受動文条件と聞き混ぜ文条件で有意に高い誤答率を示した。

(C, D) L. LPMCに脳腫瘍のある患者の誤答率。(C) 左: 腫瘍部位の重なり, 右: その水辺断面, (D) 3条件の誤答率。能動文条件と受動文条件よりも聞き混ぜ文条件で有意に高い誤答率を示した。

(E, F) L. F3op/F3tとL. LPMC以外の左前頭葉に脳腫瘍のある患者の誤答率。(E) 左: 腫瘍部位の重なり, 右: その水辺断面, (F) 3条件の誤答率。健常者と同等の誤答率を示した (G図参照)。

(G) 健常者対照群21名による誤答率。

グを受けた言語聴覚士が今なお少ない現状では、言語理解を支える文法処理自体に注意があまり払われないのであろう。また、日常会話では文脈や常識が文法的な情報の欠落を補えるため、文法障害には自分でも気づきにくいと考えられる。言語理解に困難を覚える場合でも、文法障害に対する自覚 (病識) が本人になれば、発話の聞き取りにくさや活字の見えにくさ、そして注意力が原因であると見なしがちであろう。さらに、脳腫瘍によって文法中枢以外の領域に「機能再編」が生じることが考えられ、文法機能を補う働きのために

言語障害が目立たなくなっている可能性もある。このような脳の代償作用にもかかわらず、今回のように基本的な能動文の理解にまで顕著な障害が見られたのは注目すべきことで、用いた「絵と文のマッチング課題」が文法障害を検出するのに有効かつ適切であったと結論できる。

5. 言語機能ネットワークの神経機構

これまでの研究をもとに、我々は言語の脳内処理機構が図4のように分化していることを提案した (Sakai, 2005)。さらに、これらの言語野がいず

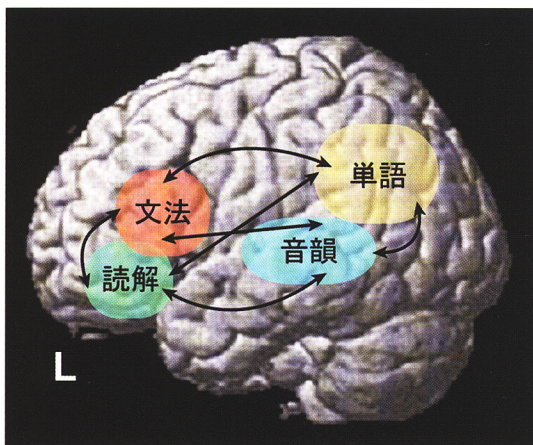


図4 脳における言語機能のネットワーク (Sakai, 2005) (一部改変)

単語レベルの言語処理は主として側頭葉から頭頂葉にかけての領域が関与し、文レベルの処理には左下前頭回が関係している。これらの脳領域の相互作用により言語処理が行なわれると考えられる。

れも左半球優位性を示すことは興味深い。人間以外の生物では、このような半球優位性を示す脳活動は知られていない。このことは、言語処理が人間に特異な能力であることを裏付けている。

人間の脳を対象とする基礎的な脳研究において、神経内科、脳神経外科、精神神経科などの臨床研究から得られる貴重な知見を融合させることが今後ますます重要である。例えば、脳腫瘍患者が術前、術後でどのように言語機能が変化するか、精神疾患の鑑別において言語機能評価がどのように有用であるのか、言語以外の高次機能障害と言語機能はどのような関連性があるのか、などを明らかにすることにより、言語機能の脳内機構が明らかになると期待される。また、言語学理論と脳科学の融合も必要である。例えば、L.F3op/F3tやL.LPMCの脳活動が、階層処理や一致処理といった言語性要因で説明可能であるかどうかを明らかにすることにより、脳内言語処理における文法中枢の本質的役割を追求することが可能となる。このような多方面からのアプローチにより、人間の脳における言語の機能分化と機能局在から機能モジュール(具体的には文法や意味処理等)の

計算原理を明らかにし、モジュール間相互の神経結合から神経回路の動作原理を解明することが可能となる。したがって、多分野の融合こそ、今後の神経言語学のすすむべき方向であろう。

文 献

- 1) Bates E, Wilson SM, Saygin AP et al: Voxel-based lesion-symptom mapping. *Nat Neurosci*, 6; 448-450, 2003
- 2) Chein JM, Fiez JA: Dissociation of verbal working memory system components using a delayed serial recall task. *Cereb Cortex*, 11; 1003-1014, 2001
- 3) Dapretto M, Bookheimer SY: Form and content: Dissociating syntax and semantics in sentence comprehension. *Neuron*, 24; 427-432, 1999
- 4) Hashimoto R, Sakai KL: Specialization in the left prefrontal cortex for sentence comprehension. *Neuron*, 35; 589-597, 2002
- 5) Hickok G, Poeppel D: Towards a functional neuroanatomy of speech perception. *Trends Cogn Sci*, 4; 131-138, 2000
- 6) Homae F et al: 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
- 7) Homae F, Hashimoto R, Nakajima K et al: Selective enhancement of functional connectivity in the left prefrontal cortex during sentence processing. *Neuroimage*, 20; 578-586, 2003
- 8) Kinno R, Kawamura M, Shioda S et al: Neural correlates of noncanonical syntactic processing revealed by a picture-sentence matching task. *Hum Brain Mapp*, 29; 1015-1027, 2008
- 9) Kinno R, Muragaki Y, Hori T et al: Agrammatic comprehension caused by a glioma in the left frontal cortex. *Brain Lang*, 110; 71-80, 2009
- 10) Kinno R, Muragaki Y, Sakai KL: The contribution of gray matter in a glioma to language deficits. In *Advances in the Biology, Imaging and Therapies for Glioblastoma*, ed by Chen CC, InTech, Croatia, 2011, pp.107-122
- 11) Lund E, Spliid PE, Andersen E et al: Vowel perception. A neuroradiological localization of the perception of vowels in the human cortex. *Brain Lang*, 29; 191-211, 1986

- 12) Price CJ: The anatomy of language: contributions from functional neuroimaging. *J Anat*, 197; 335-360, 2000
- 13) 酒井邦嘉：言語の脳科学，中公新書，2002
- 14) Sakai KL: Language acquisition and brain development. *Science*, 310; 815-819, 2005
- 15) 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

Nature of language revealed from the brain

Ryuta Kinno¹⁾²⁾, Kuniyoshi L. Sakai¹⁾

1) Department of Basic Science, Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo

2) Department of Internal Medicine, Showa University Northern Yokohama Hospital

Linguistic information is processed at distinct levels from words to sentences and discourse. Linguistic information at the word level, including phonology and lexico-semantics, would be processed in the temporal and parietal regions of the left brain, whereas left frontal regions play an important role in the process of constructing sentence structures by applying grammatical knowledge. We have used functional magnetic resonance imaging, and have shown that the opercular and triangular parts of the left inferior frontal gyrus (L. F3op/F3t) and the left lateral premotor cortex (L. LPMC) are critically involved in syntactic processing. Moreover, we have recently demonstrated that a glioma in the L. F3op/F3t or L. LPMC is sufficient to cause selective deficits in syntactic processing. These results support the module hypothesis of human language.

(Japanese Journal of Neuropsychology 28; 174-181, 2012)
