

言語のモジュール仮説*

金野 竜太^{1,2)} 酒井 邦嘉¹⁾

Key Words : 言語, 脳機能

はじめに

人間の言語処理過程は、いくつかの異なるレベルに分けられる。単語レベルの言語処理には音韻や語彙的意味処理があり、文および会話レベルの言語処理には統辞処理と文意味理解がある。したがって、これらの言語要素の処理が異なる脳領域で行われるのかどうか、すなわち、複数の言語野が存在するかどうか重要な問題となる。

脳内の主要な言語野は 19 世紀に発見された。言語を話す機能の言語野（運動性言語野）は P. Broca (1824～1880) 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) により左側頭回後方に位置することが報告された。N. Geschwind (1926～1984) は、上述の 2 つの脳領域と両野を結ぶ弓状束の連合作用の重要性を指摘した。近年の脳機能イメージング研究の進歩により、これらの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。また、拡散テンソル画像などの神経線維を可視化する技術により、言語処理の神経ネットワークを解明する試みが進められている。本稿では、まず言語処理の脳内機構を概観し、続いて言語のネットワークおよびそのモジュール性に関する

知見を紹介する。

音韻・語彙的意味処理

話された言葉を理解する場合、時系列的な音声信号から単語間に区切りをつけ、その発話から意味を引き出す処理が必要である。この聴覚的言語処理過程を音韻処理という。過去の症例報告では、Wernicke 野に一側性の限局的脳損傷をもつ患者において、母音の認知における顕著な障害を見出した¹⁾。近年の非侵襲的脳機能計測による研究では、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²⁾。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³⁾。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。われわれは音声刺激を用いた機能的磁気共鳴画像 (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⁴⁾。また、近年の脳梁損傷患者を対象に脳波を用いた研究では、健常者と脳梁前部損傷群では音韻的逸脱文を判断している際に N400 と呼ばれる脳波が生じるのに対し、脳梁後部損傷群において音韻的

* The modular hypothesis of language : Current topics in brain science.

¹⁾ 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

Ryuta Kinno, MD, Kuniyoshi L Sakai, PhD : 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 (神経)

Division of Neurology, Department of Internal Medicine, Showa University Northern Yokohama Hospital

逸脱文を判断している際の脳波において N400 が欠如することを報告した⁵⁾。この知見は、脳梁後部が音韻処理に関与することを示唆する知見である。

文理解処理

文は複数の単語から構成されるが、個々の単語の意味の解析だけでは不十分である。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、同じ単語を使いながらも、機能語(を、が)の位置によって、それぞれの文の表す意味が異なる。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処理が必要である。われわれは、左下前頭回の下部の 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⁶⁾。さらにわれわれは、脳領域間の fMRI 信号の時系列データを相関解析した結果、左下前頭回下部と左中心前溝が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⁷⁾。最近の拡散テンソル画像を用いた研究では、左下前頭回と左側頭葉をつなぐ最外包/中縦束が文意味理解に関与することが報告されている⁸⁾。これらの報告をまとめると、左前頭側頭葉間のネットワークが文レベルの意味処理に関係していると考えられる。

統辞処理

与えられた文の構造を解析する過程を統辞処理と呼ぶ。これまでの研究報告により、左下前頭回と左外側運動前野が文法処理の神経基盤とされている^{9,10)}。文理解の過程には、純粋な統辞処理のほかにも言語性の短期記憶処理が関与しうするため、これらの活動を言語性短期記憶処理によるという解釈もなされてきた¹¹⁾。したがって、文法処理に特化した脳領域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。われわれ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、文の統辞構造に焦点をあてた fMRI による実験パラダイムを作成した¹⁰⁾。その結果、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, BA 44/45) と左運動前野外

側部 (the left lateral premotor cortex ; L. LPMC, BA 6) において、統辞処理課題に選択的な反応がみられた。これらの領域が「文法中枢」である¹²⁾。

さらにわれわれは、統辞処理における脳内機構を調べるために、新しい絵・文マッチング課題を作成した¹³⁾。刺激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成り、実験参加者は絵と文の意味内容のマッチングを行った。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た (図 1a)。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、他は正規的な構文であるので、統辞処理の負荷は能動文に比べ、かき混ぜ文や受動文で高まる。こうした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。条件間では、絵のセットや音節の数、そして記憶の負荷や課題の難易度を統制した。さらに、視覚処理や単語レベルの言語処理に関連する負荷を統制するために、コントロール課題を作成した。

かき混ぜ文処理時の脳活動と能動文処理時の脳活動の直接比較 (SS-AS) では、L. F3op/F3t, L. LPMC, 上/中側頭回の後方領域 (posterior superior temporal gyrus and middle temporal gyrus ; pSTG/MTG, BAs 21/22) の 3 領域において、SS に対する有意な活動の上昇がみられた (図 1b, c)。また、受動文処理時の脳活動と能動文処理時の脳活動の直接比較 (PS-AS) では、受動文処理時における左下前頭回三角部の有意な活動の上昇がみられた。さらに、各条件施行時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。すなわち、L. F3t は、かき混ぜ文や受動文など非正規的文の処理の際に選択的に賦活する。L. pSTG/MTG は、かき混ぜ文処理時に特異的に賦活する。また L. LPMC は、能動文・受動文・かき混ぜ文の順に脳活動が増強する、ということが明らかとなった。本結果は、統辞処理におけるこれらの 3 領域の機能的役割の違いを示す初めての知

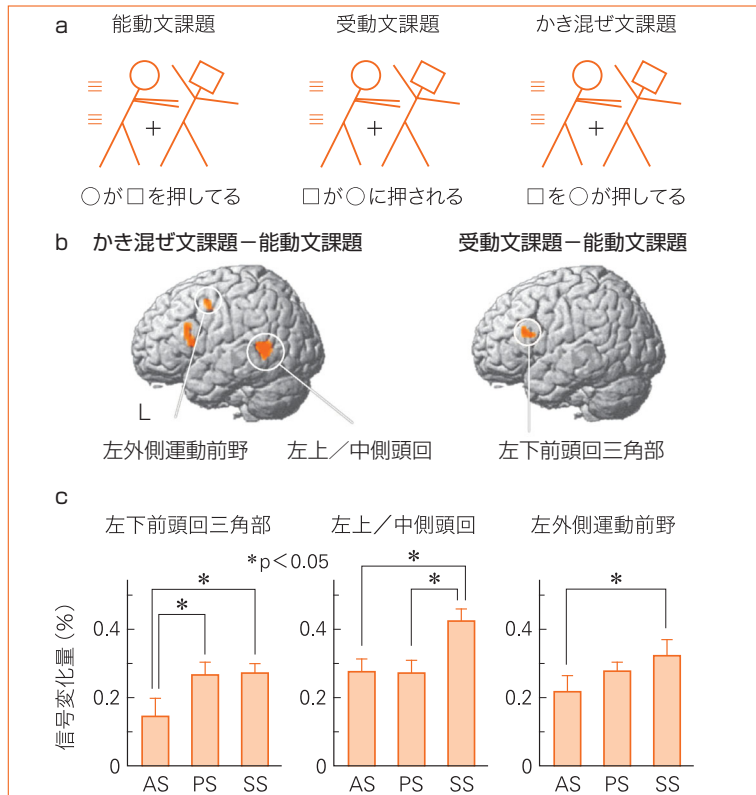


図 1 文理解時における統辞処理の神経機構¹³⁾

- 絵・文マッチング課題。各刺激は動作を表す絵と日本語文からなる。参加者は絵と日本語文が表わす意味内容が同じかどうかを判断する。能動文条件 (AS)、受動文条件 (PS)、かき混ぜ文条件 (SS) の 3 条件で使われる絵のセットは同じであるが、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 AS に比べ、PS や SS では高まる。
- 統辞処理に選択的な脳活動。かき混ぜ文条件と能動文条件、あるいは、受動文条件と能動文条件の施行時で脳活動を直接比較した。
- 統辞処理における信号変化量。有意な活動がみられた上記 3 領域で信号変化量を比較した。アスタリスクは $p<0.05$ での有意差を示す。3 領域では、各条件に対する反応性が異なる。

見である。近年の拡散テンソル画像を用いた研究では、弓状束/上縦束や最外包/中縦束が統辞処理に関与する可能性が報告されているが、各神経線維の機能的役割の違いに関しては、議論の余地がある。

失文法理解

これまでの fMRI など健常者を対象とした研究で、「文法処理に伴い脳活動が上昇する」ことが明らかとなった。しかし、脳の構造と機能の間の最

も直接的な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」ことを明らかにする必要がある。われわれは、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あっても、文法判断を適切に調べることで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もつ患者を対象に、前述の「絵・文マッチング課題」を用いて文法機能の調査を行った¹⁴⁾。参加者は脳腫瘍摘出手術を受ける前であり、本人や担当医師による

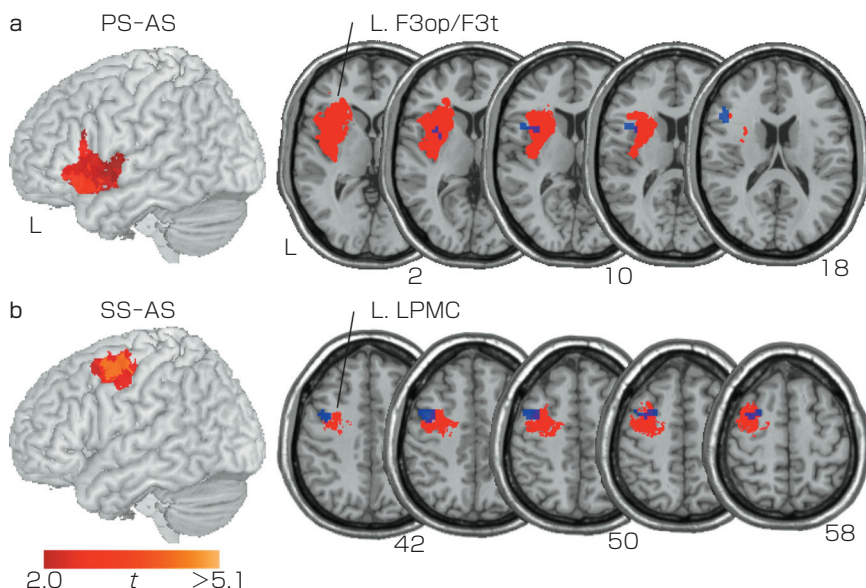


図 2 2 条件間の「誤答率の差」に対する責任病巣¹⁴⁾(VLSM 法による)

- a. 左：受動文 (PS) 条件と能動文 (AS) 条件の「誤答率の差」に対する責任病巣は、「左下前頭回」(L. F3op/F3t) の一部 (赤色～オレンジ色) であった。右：その水辺断面。
- b. 左：かき混ぜ文 (SS) 条件と AS 条件の「誤答率の差」に対する責任病巣は、「左運動前野外側部」(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) と一致した。

*数字は前交連と後交連 (左右脳の連絡線維) を結ぶ水平面からの高さ。単位 mm。

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 とともに) 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。

- (A 群) L. F3op/F3t に脳腫瘍のある患者
- (B 群) L. LPMC に脳腫瘍のある患者
- (C 群) L. F3op/F3t と L. LPMC 以外の左前頭葉に脳腫瘍のある患者

前述のように、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って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、文型に対する文法処理が唯一の要因であると結論される。

次に、このテストの誤答の原因となる脳腫瘍の場所を MRI で調べた。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。誤答の原因となる腫瘍部位 (責任病巣) の同定には、VLSM 法 (voxel-based lesion-symptom mapping) を用いた¹⁵⁾。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。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推定される。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。

受動文と能動文の「誤答率の差 (PS-AS)」に対する責任病巣は左下前頭回の一部であり (図 2a, かき混ぜ文 (SS) と能動文 (AS) の「誤答率の差 (SS-AS)」に対する責任病巣は左運動前野外側部であること (図 2b) が明らかになった。上記のよ

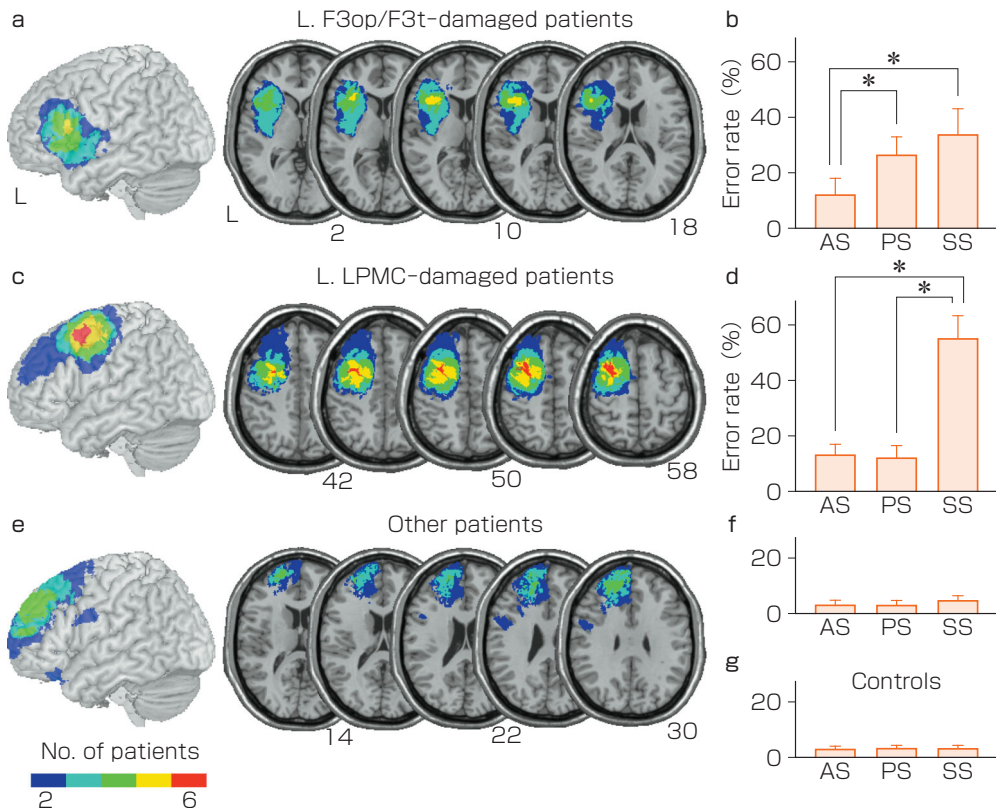


図 3 腫瘍部位によって異なる 3 条件の誤答率¹⁴⁾

- a. 図 2a に示した左下前頭回に脳腫瘍のある患者 5 名の腫瘍部位の重なり。右：その水平断面。
b. A 群の 3 条件の誤答率を示す棒グラフ。AS 条件よりも PS 条件と SS 条件で有意に高い誤答率を示した。
c. 図 2b に示した左運動前野外側部に脳腫瘍のある患者 6 名の腫瘍部位の重なり。右：その水平断面。
d. B 群の 3 条件の誤答率を示す棒グラフ。AS 条件と PS 条件よりも SS 条件で有意に高い誤答率を示した。
e. 図 2 に示した左下前頭回と左運動前野外側部以外の左前頭葉に脳腫瘍のある患者 10 名の腫瘍部位の重なり。右：その水平断面。
f. C 群の 3 条件の誤答率を示す棒グラフ。健常者と同等の誤答率 (g 図参照) を示した。
g. 健常者 21 名による誤答率。

*下に示した色で人数を表す。

*数字は前交連と後交連 (左右脳の連絡線維) を結ぶ水平面からの高さ。単位 mm。

うに、この「誤答率の差」は、文型に対する文法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本研究グループによる脳機能イメージング研究で脳活動が観察された場所 (図 2 の青色) と完全に一致した。さら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 (A 群) は、正則文 (SOV 語順) の能動文よりも非正則文である受動文とかき混ぜ文で有意に

高い誤答率を示したが (図 3b)、L. LPMC に脳腫瘍のある患者 (B 群) は、主語が文頭に来る能動文と受動文よりも目的語が文頭に来るかき混ぜ文で有意に高い誤答率を示した (図 3d)。また、A 群と B 群のどちらも、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 (C 群) 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左下前頭回と左運動前野外側

部はそれぞれ特定の文型に対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¹⁶⁾。以上の結果は、統辞処理に L. F3op/F3t と L. LPMC が関与するという説を実証するものである。

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、明らかな失文法的文理解を呈した。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。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傾向である。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みなしがちである。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みられたのは驚くべきことで、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。

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、われわれ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¹²⁾。今後、fMRI の信号変化量の時系列データを用いて各脳領域間の機能的つながりに関する研究や、拡散テンソル画像を用いた解剖学的つながりを調べる研究を融合させることにより、言語処理の脳内ネットワークを機能的かつ解剖学的に可視化されることが期待される。

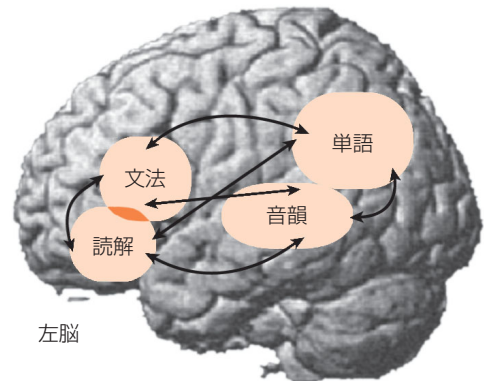


図 4 脳における言語機能のネットワーク（文献¹²⁾より引用・一部改変）

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 4 つの機能モジュール間の相互作用により、言語処理が行われると考えられる。

言語のリハビリテーションにおいては、こうした言語処理に関する知見への深い理解が必要であろう。患者の言語機能を詳細に検討することが、その患者に最も効果的な言語リハビリテーションを施行することの一助となる。今後、脳科学とリハビリテーション医学の融合により、各言語要素の障害に対して、最も効果的なリハビリテーション技術の開発が期待される。

人間の脳を対象とする基礎的な脳研究に対して、神経内科・脳神経外科・精神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重要である。例えば、脳活動を健常者と患者群で比較検討することにより、健常者を対象とした研究だけでは明らかにすることができない神経ネットワークを明らかにする可能性がある。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 の脳活動が統辞処理で説明されることを明らかにすることで、言語処理における文法中枢の本質的役割を追究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

が今後の神経言語学の進むべき方向である。

文献

- 1) 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
- 2) Hickok G, Poeppel D : Towards a functional neuroanatomy of speech perception. *Trends Cogn Sci* **4** : 131-138, 2000
- 3) Price CJ : The anatomy of language : contributions from functional neuroimaging. *J Anat* **197** : 335-360, 2000
- 4) 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
- 5) Friederici AD, von Cramon DY, Kotz SA : Role of the corpus callosum in speech comprehension : interfacing syntax and Prosody. *Neuron* **53** : 135-145, 2007
- 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) Saur D, Kreher BW, Schnell S, et al : Ventral and dorsal pathways for language. *Proc Natl Acad Sci U S A* **105** : 18035-18040, 2008
- 9) Dapretto M, Bookheimer SY : Form and content : Dissociating syntax and semantics in sentence comprehension. *Neuron* **24** : 427-432, 1999
- 10) Hashimoto R, Sakai KL : Specialization in the left prefrontal cortex for sentence comprehension. *Neuron* **35** : 589-597, 2002
- 11) Chein JM, Fiez JA : Dissociation of verbal working memory system components using a delayed serial recall task. *Cereb Cortex* **11** : 1003-1014, 2001
- 12) Sakai KL : Language acquisition and brain development. *Science* **310** : 815-819, 2005
- 13) 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
- 14) 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
- 15) Bates E, Wilson SM, Saygin, AP, et al : Voxel-based lesion-symptom mapping. *Nat Neurosci* **6** : 448-450, 2003
- 16) Kinno R, Muragaki Y, Sakai KL : The contribution of gray matter in a glioma to language deficits. *Advances in the Biology, Imaging and Therapies for Glioblastoma*, Chen CC (ed), InTech, Croatia, pp107-122, 2011