

## 脳内言語処理

窪 田 三 喜 夫

### はじめに

人間が言語を用いる時、脳の中では何が起きているのであろうか。脳機能測定装置、生体画像処理技術、コンピュータ技術などの進歩により、脳内言語処理の実態と言語に関する高次的脳機能を解明する試みが本格的になってきた。最近では、開頭手術をすることなく、電気生理学的測定方法や血流力学的測定方法を用いて、脳活動を外部から観察することが可能となったためである。電気生理学的な測定方法として、脳の神経活動にともなう生じる電流を頭皮上の電位変化で測定する脳波計 (EEG: electroencephalography; 特に認知・行動に関わるタスクを行わせて、事象関連電位 (event-related potential: ERP) によって脳波を記録する方法がある) と磁場変化で測定する脳磁計 (MEG: magnetoencephalography) がある。それに対し、血流力学的測定方法として、血流変化を磁場変化で測定する機能的磁気共鳴画像法 (fMRI: functional magnetic resonance imaging)、放射線で測定するポジトロン画像法 (PET: positron emission tomography)、近赤外線で測定する光トポグラフィー (OT: optical topography) が、医学的診断のみならず、言語脳科学の研究でも用いられている。現在、第一言語 (L1) と第二言語 (L2) の脳内言語処理の類似点・相違点を明らかにすることにより、第二言語習得の難しさを言語脳科学 (linguistic neuroscience) の見地から解き明かすことが重要になっている。

19世紀後半、言語産出に関わる脳の領域としてブローカ領域 (Broca's area: 左大脳半球の下前頭回後部の三角部と弁蓋部のブロードマン領域 Brodmann's Area (BA) 44とBA45) が、また、言語理解に関する部位としてウェルニッケ領域 (Wernicke's area) が発見された (参照 図1)。ブローカ領域は、言語産出、単語想起、単語復唱、物品命名の他、統語的作業記憶、意味的記憶にも関係する部位であると判明している。また、左半球 BA44 には単に発声をつかさどる機能だけではなく、手の動きを模倣する機能があることも脳磁場測定により最近わかった (Nishitani & Hari, 2000)。言語産出という脳機能が確立する前のブローカ領域が担っていた原始的な機能は、動作の認知・理解と模倣であったと考えられる。この神経細胞は模倣という機能があるため「ミラー・ニューロン」(mirror neuron) と呼ばれているが、言語の産出機能と動作の模倣機能が同じ部位の BA44 にあるため、L1 の発話獲得は口の動かし方の模倣から始まると言える。一方、ウェルニッケ領域は、言語理解時の音素識別と発話時の音素選択の機能を担っていると考えられている (岩田, 1996: 90, Scott et al., 2000: 2404)。

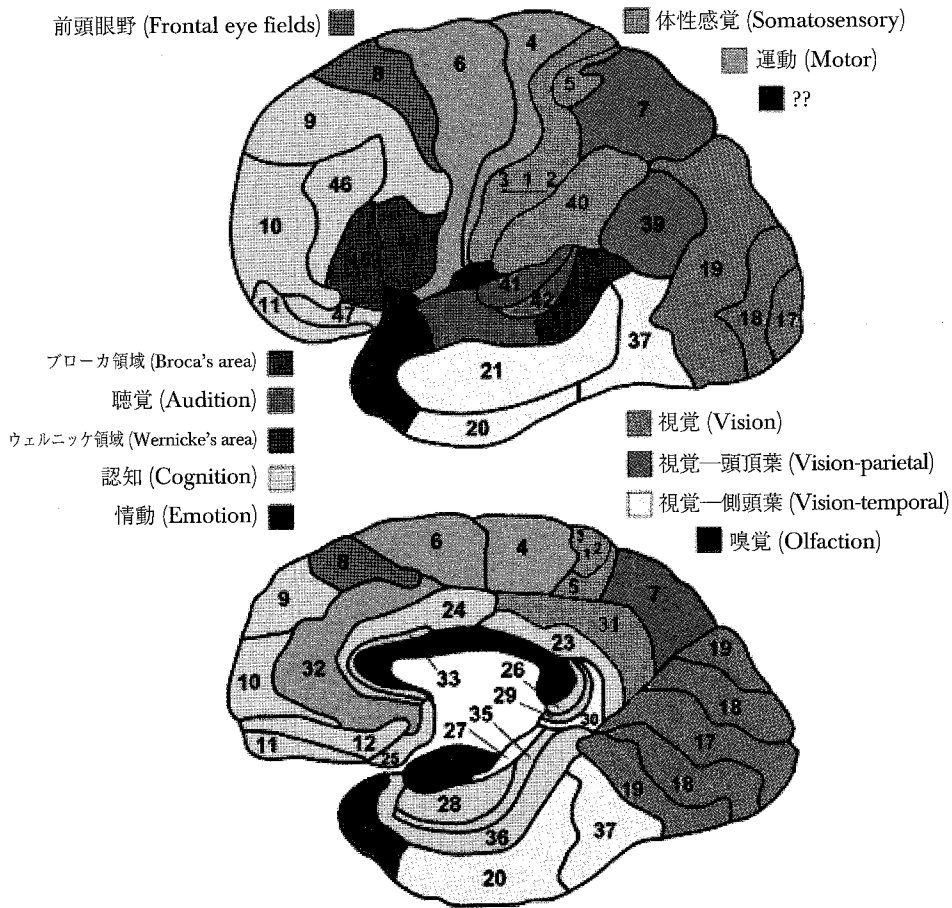


図1 ブロードマン領域 (Brodmann's Area)

<http://spot.colorado.edu/~dubin/talks/brodman/brodman.html>

本稿では、脳内で言語がどのように処理されているのかを、音響的・語彙的・文法的・意味的な側面から検証する。第二言語習得の観点からの研究を中心に、言語理解時に脳内で1秒以下の瞬時に起こる言語処理に関して時間的解像度の高い脳波・脳磁場と、神経活動部位の優れた画像が得られる空間解像度の高いfMRI・PET・OTを用いた研究を主に取り上げる。

## 1. 脳内音響処理

音響的特徴の異なる2つの音を聞かせ、被験者の脳が無意識的に、あるいは、注意してその違いを感知した時に現われる脳電位反応（音響的ミスマッチ陰性 (acoustic mismatch negativity, acoustic MMN) 成分と呼ばれる）を測定する実験方法がある。MMN成分は、音響的变化と音弁別に関する脳内神経細胞の自動的検出を示すとされる。近年、この脳波による手法を用いて、非母語話者が自分の第一言語 (L1) にはない母音の違いに対して、脳内でどのように反応しているかが研究されている。フィンランド語の母音 /e/ と /æ/ を対比させた脳波実験において、フィンランド語を L1 とする母語話者群と、フィンランド語を第二言語 (L2) として流暢に操るハンガリー人群とでは、大きな MMN 成分が観察されたのに対し、フィンランド語を知らないハンガリー人群では MMN 成分は現われなかった (Winkler et al., 1999)。このように、外国語を学習することによって、音に対する大脳皮質の記憶痕跡が変化することが指摘されている。また、英語の子音 /r/ と /l/ に関するミスマッチ成分を L1 話者と L2 学習者で比較した脳磁場研究が行われている。音声識別テストのような言語行動面からの分析により、日本人英語学習者の場合、子音の /r/ と /l/ の識別が困難であることがよく知られている (参照 関屋, 1994: 50)。L1 話者では脳磁場ミスマッチ (magnetic mismatch field: MMF) 成分が観察され (Phillips et al.,

1995)、左半球で子音識別の処理が行われた (Zhang et al., 2000a)。一方、L2 学習者のミスマッチ成分の検出の有無は、学習者の英語能力レベルの違いを反映している。日本人英語学習者の場合、MMF 成分が観察されなかった報告 (Phillips et al., 1995) と、半球差なく MMF 成分が検出された結果 (Zhang et al., 2000a) があり、その違いは被験者の L2 能力レベルによるものと考えられる。更に、外国語教育における音声指導に注目した脳磁場実験も行われており、/r-/l/ 子音識別テスト、聞き取り困難度が変化する刺激音の提示、発音時の口写真と音声の同時提示、フィードバックの提示を伴う個人適応型練習という学習の効果によって、日本人英語学習者は /r/ と /l/ に対する左半球の反応が強まり、右半球の反応が弱まったという脳磁場実験の報告がある (Zhang et al., 2000b)。このように、学習によって生じる神経細胞の可塑性が脳磁場研究によって実証され始めている。

また、日本語における母音の長短およびピッチの変化を聞き分ける脳磁場実験では、母音長の短縮 (shortening; 「能」→「野」) と下り調子ピッチ (falling pitch; 「能」→「脳」) に対して、日本人 L1 話者・アメリカ人非日本語母語話者に関係なく、即ち、単語の意味の理解に関係なく、明らかな MMF 成分が見られた。一方、母音長の伸長 (lengthening; 「野」→「能」) と平板化ピッチ (leveling pitch; 「脳」→「能」) では両被験者群で大きな MMF 成分は生じなかった (Inouchi et al., 2001)。この現象は、MMF 成分の音響的方向性に対する脳神経細胞の鋭敏さの差を表しており、短縮と下り調子ピッチの方が伸長と平板化ピッチよりも鋭く脳反応が生じることが実証された。尚、同じ実験計画で非言語音のトーンを聞かせた脳磁場実験でも、ほぼ同様の結果が得られた (Inouchi et al., 2002a)。言語行動上では、外国語学習者は母音長の異なる単語のペアを識別することが困難であることが知られているが、脳神経細胞レベルでは、意味が介入しない音響処理の場合、音素の識別は言語知識の有無に関係ないことがわかった。

また、ピッチの変化が脳内のどの部位で処理されるかについての研究もある。タイ語のピッチ処理をタイ人・中国人・アメリカ人で比較した PET 研究 (Gandour et al., 2000) によれば、トーン言語のタイ語話者群は、タイ語の単語ペアを聞き、トーンが同じか異なるかをボタン押しによって判断するタスクを与えられた場合、異なるトーンのペアを聞いた時に、左半球 BA44 の前頭弁蓋 (frontal operculum) のブローカ領域周辺で大きな反応が見られた。しかし、タイ語と同じくトーン言語の中国語話者と非トーン言語のアメリカ英語話者では同様の反応が見られず、また、使用した言語音を低域通過フィルターを通して作成した非言語音の場合は、タイ語話者でさえブローカ領域の反応がなかった。トーン言語であったにもかかわらず中国語話者の脳が反応しなかったのは、タイ語のトーン変化の構造を理解していないためであると考えられる。この研究は、トーンを聞き分ける処理は対象言語を知っている場合のみ、左半球のブローカ領域で行われることを示唆したが、ピッチ処理については右半球優位説 (Zatorre et al., 1994) が主流であり、言語プロソディーを知覚する際に脳の両半球が関わるのか、又は、どちらかの半球が主に活性化するのは、タスク・記憶の負担・刺激音などの変数に影響されるため、今後の研究成果が待たれる。

## 2. 脳内単語処理

### (1) 語彙的ミスマッチ成分

単語レベルの音の違いに対し、L1 話者と非母語話者の脳内ミスマッチ成分の違いを検証した研究がある。複数の音節を連続して聞かせることにより、フィンランド語の単語になる組み合わせ (例: la + ki = lakki フィンランド語「帽子」) と非単語になる組み合わせ (例: va + ki = \*vakkı) を聞かせ、その脳波と脳磁場を測定した研究 (Pulvermüller et al., 2001) では、

フィンランド語母語話者はフィンランド語の単語に対して、語彙的アクセス (lexical access) を示す語彙的ミスマッチ (lexical mismatch negativity; lexical magnetic mismatch field) 反応が観察された。即ち、無意味語より、有意味語に対するミスマッチ反応の方が大きかった。一方、L1 のフィンランド語を知らない非母語話者では、語彙的ミスマッチ反応は生じなかった。つまり、目標言語の単語を知っているかいないかによって、語彙的ミスマッチ反応が出るかどうかが決まる。

また、形態的な面から英単語の屈折に関するミスマッチ反応を測定した脳波実験がある (Shtyrov and Pulvermüller, 2002)。L1 話者を対象にして動詞の語幹 (come) と活用形 (comes) に対する聴覚反応を比較し、ミスマッチ反応が左半球で見られた。特に、語幹を高頻度刺激にし、活用形を低頻度刺激とした実験条件の場合、その反対の実験条件と比べ、ミスマッチ反応が約 30 ミリ秒遅れた。この結果は、単語の接尾辞を処理する際には、語幹よりも更に処理時間が必要となることを示している。接尾辞処理における神経活動源は、左半球シルビウス裂周辺の後方部と推定され、語幹の場合は左半球前方部に推定されている。この脳波による研究は、頭皮上の電位分布を用いたものであったが、今後、ミスマッチ反応の厳密な活動源の特定には、MEG や fMRI による研究が必要である。

## (2) 早期語彙処理

話し言葉では、音素が聞こえる順番に単語の処理が進むのであって、単語全体を聞き終わってから単語処理が始まるのではない。単語処理には、語彙アクセス (lexical access) ・ 語彙選択 (lexical selection) ・ 語彙統合 (=意味統合; lexical integration = semantic integration) という三段階があると考えられている (Hagoort & Brown, 2000: 1528)。語彙アクセスの第一段階では、最初の音素を聞いて、複数の単語が候補にあがるという語彙形式に

基づくボトムアップの処理が行なわれる。語彙選択の第二段階では、活性化された複数の単語の候補と、文脈に基づいて予期される単語との照合が行われる。第三段階の語彙統合は、選択された単語の意味が文脈に合致しているのかというプロセスを指す。

脳内でどのように単語レベルの意味処理がされているのかに注目した脳波実験が行われている。文の中で意味的に逸脱している非単語を聞かせると、エラー語の開始後、約 200~250 ミリ秒で大きな脳反応が生じる。これは、先行する文脈に応じて、次にどのような単語が来るのかを予想したが、実際に聞こえた単語の最初の音素が、予想した単語の最初の音素と異なっていたことを示している。オランダ語の脳波実験では、約 200~250 ミリ秒後に脳波陰性波成分が現れた (van den Brink et al., 2001: 968; Hagoort & Brown, 2000)。このような早期語彙処理成分は、単語の意味統合のプロセスを表す N400 成分 (参照 後述の 4. 脳内意味処理) に先行する (van den Brink et al., 2001)。

### (3) 単語記憶

PET を用いた L1-L2 比較研究 (Kim et al., 2002) では、韓国語が L1 で初級レベルの英語学習者を対象に、視覚による単語記憶タスクを行わせたものがある。L1 では左半球の上側頭回と右半球の BA46 が活性化したのに対し、L2 では左半球の下側頭回と右半球の BA8 が活動するのが認められた。右半球 BA8 は記号の記憶と同じ活動部位であり、このことより L2 能力は、記号の形状を判断する処理と同じく、視覚による文字を言語化・想起する処理能力に大きく依存していると考えられている。



### 3. 脳内文法処理

文理解に関する統語処理には 3 種類の脳波反応が見られることが判明している (参照 図 2)。超早期文法処理成分である ELAN (early left anterior negativity: 極めて早期の段階で左半球前部に見られる陰性成分, Friederici et al. 1998 の用語)、早期文法処理成分の LAN (left anterior negativity: 早期の段階で左半球の前部などに見られる陰性成分, Kluender & Kutas 1993 の用語)、後期文法処理成分である P600 (positivity - 600 msec: 600 ミリ秒後に生じる陽性成分, Osterhout & Holcomb 1992 の用語) の 3 つがある。また、最近始まった脳磁場測定による英語の文法実験 (Kubota et al. submitted 1, 2, 3) で、脳波成分の ELAN に相当する脳磁場の SF-M150 (syntactic field - magnetic 150 msec) 成分が発見されている。

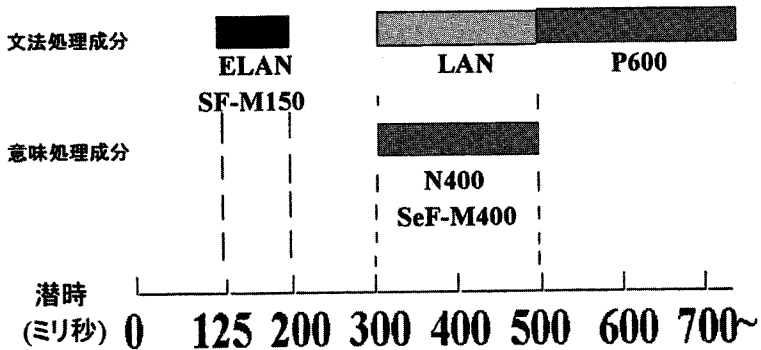


図 2 脳波・脳磁場測定による言語理解時の文法処理成分・意味処理成分と反応時間 (= 潜時, latency)

#### (1) 超早期文法処理成分

文法的に逸脱した語を聞いたり読んだりした場合、脳の中で大きなニューロン活動が生じる。例えば、\*I believe him is a spy といった文法的エラー

に対して、下線の引かれた目標語から約 150 ミリ秒後を頂点として、約 120~200 ミリ秒の反応時間 (= 潜時, latency) で、L1 話者では文法的に正しい文と比べて大きな脳反応が生じる (例: ドイツ語の研究 Friederici et al., 1993; 英語の研究 Neville et al., 1991, Kubota et al., submitted 1)。L2 学習者を対象とした実験では、脳波の ELAN 成分は中級レベルのドイツ語学習者では生じなかったという結果が報告されている (Hahne, 2001; Hahne & Friederici, 2001)。統語理論を軸にした、英語の L1 話者と L2 学習者のニューロン活動を比較した最初の脳磁場研究である Kubota et al. (submitted 1) では、文法的に正しい文と誤った文を対にした刺激条件を設定し、エラーを検出させる「LED パラダイム」(LED paradigm: linguistic error detection paradigm) という実験方法が考案された。この実験において、\*I believe [him is a spy] といったタイプの二重格付与エラーに対して、目標語の約 150 ミリ秒後に脳磁場成分 SF-M150 が L1 話者では生じたが、上級レベルの日本人英語学習者では検出されなかったことが報告されている (Kubota et al., submitted 1)。一方、\*I believe [he to be a spy] のタイプの格フィルター (case filter) エラーは、不定詞補文の主語には格が付与されないため、L1 話者・L2 学習者を問わず SF-M150 成分は誘発されなかった。

更に、英語の名詞句繰り上げ (NP-raising) と格フィルターに関する脳磁場実験では、L1 話者 (アメリカ人) と L2 上級学習者 (日本人) の両群ともに SF-M150 成分が検出された (Kubota et al., submitted 2)。名詞句繰り上げに関するエラーの \*The man was believed [was killed] のような文に対しては SF-M150 成分が検出されたが、\*It was believed [the man to have been killed] といった格フィルターのエラーに関しては検出されなかった。名詞句繰り上げによって生じたエラーは、主節主語と不定詞補文主語の位置で二重に格が照合される環境にあるため、極めて大きな脳反応を引き起

こすと考えられる。

これまで行われた研究成果をまとめると、L1 話者の場合は言語構造の複雑性によって、L2 学習者の場合は言語構造の複雑性と L2 言語能力レベルによって、脳反応に違いが見られると推測される。L2 学習者の言語能力レベルが上級になればなる程、L1 話者と同じような脳内反応が見られると推定される。今後の研究の展望として、どの L2 言語能力レベルの学習者がどのような難易度の構造に対して、どのような脳内反応をするのかといった、言語構造の複雑性と L2 言語能力レベルの交互作用を厳密に検討する実験が必要である。

上記のような文法的エラーと、動詞の屈折エラー (例: 受動態での動詞原形の使用, Gunter et al., 1997) といった形態・文法的エラーが、超早期文法処理成分を引き起こし、句内のエラーに対してのみ、大きな脳内反応が現れる。このような超早期文法処理成分には、句内というローカルな処理にかかわるニューロン活動によって誘発されるという、文構造上の「局所性による制約」(locality constraint) が働いていると考えられる。従来、ELAN 成分は超早期段階で文構造を解析・構築する過程を表すとされ、句構造規則 (phrase structure rule) のエラーに限定されるとされていたが (Friederici, 1995; 1999; in press)、最近 Kubota et al. (submitted 1, 2, 3) による一連の脳磁場研究で、句構造規則に違反しない非句構造規則 (non-phrase-structure rule) に対しても超早期文法処理成分 SF-M150 が発見された。脳は、予期している文法体系に反した単語が現われると、約 150 ミリ秒という極めて短い時間内で文法性を判断する自動的な処理を行っていると考えられる。即ち、この超早期文法処理は、漸次的に単語を積み上げて文構造を解析している時に、予想に反した文法的エラーを検出するという統語的ミスマッチ (syntactic mismatch) のメカニズムを反映していると言える。

超早期文法処理成分のニューロン活動源 (source) に関して、脳磁場測定

によって SF-M150 成分が検出された場合、L1 話者・L2 学習者を問わず両半球の側頭葉が文法的エラーに対して活発に活動していることがわかってきている (Kubota et al., submitted 1, 2, 3)。Friederici et al. (2000) では、超早期文法処理は両半球の側頭葉と前頭葉前外側部で行われているが、左半球側頭葉のニューロンの方がより活発に活動していると報告している。特に、統語的な作業記憶への負担が多くなったり統語的要素への注意 (attention) が極めて大きくなったりすると、前頭葉前外側部が統語処理の際に関与するとされる (Fiebach et al., 2001; Friederici, in press)。文法処理における各半球の役割を含め、詳細な実験データの積み重ねが必要である。

## (2) 早期文法処理成分

文法的エラー語の約 300~500 ミリ秒後に、大きな脳反応が生じることが脳波による研究でわかっている。現在のところ、脳磁場の成分は発見されていない。LAN (left anterior negativity) 成分は、前述の通り、脳波による左半球前部で処理される超早期の ELAN 成分と比べて、左半球の前頭葉前部の他に、側頭部・頭頂部と頭皮上電位分布の広がりを見せる。句構造規則と動詞下位範疇化の文法的エラーのみならず、動詞の屈折や一致 (主語と述語の数、名詞の単数・複数形) など形態・文法的エラーにも LAN 成分は検出されている (参照 Hagoort, Brown & Osterhout, 1999)。いずれのタイプも句内エラーであり、LAN 成分には超早期文法成分 (ELAN 成分・SF-M150 成分) と同様にエラー検出のメカニズムがある。

また、LAN 成分は、文法的エラーの有無に関わらず、作業記憶 (working memory) の負担の増減に関与するという報告がある (Kluender & Kutas, 1993; King & Kutas, 1995)。文法的に正しい文を用いた実験で、Wh 疑問文 (例: What<sub>i</sub> did he suppose that he could coerce her into [t<sub>i</sub>] this time?)

のように *what* の疑問詞とその束縛する痕跡 *t* との依存関係が離れた距離にある (long-distance dependency) 場合、LAN 成分が検出される (Kluender & Kutas, 1993)。また、文法的に正しい関係代名詞節の文で主格関係代名詞文 (例: The fireman [who speedily rescued the cop] sued the city over working conditions) よりも、目的格関係代名詞文 (例: The fireman [who the cop speedily rescued \_\_\_] sued the city over working conditions) の方に大きな LAN 成分が見られた (King & Kutas, 1995)。LAN 成分は、補充語 (filler; ここでは *wh* 語) と空所 (gap; 痕跡) との統語的依存関係がはつきりするまで、補充語を一時的に記憶に保持しておく過程を示している (Fiebach et al., 2001)。そのため、文理解の処理への負担が目的格関係代名詞節の方が大きくなるとされる (Müller, King, & Kutas, 1997)。尚、英語の補充語一空所の文構造は、目的語が動詞に先行し、SVO の文型をとる言語として基本的でない (non-canonicity) ために、LAN 成分が現われるとする見解もある (Ueno & Kluender, in press)。

文法処理にかかわる血流変化を測定した fMRI と PET 研究の多くは、左半球ブローカ領域の下前頭回 (IFG: inferior frontal gyrus)、特にその弁蓋部 (pars opercularis, BA44) が大きな記憶負荷のかかる複雑な文法を理解する際に活動していると指摘している (PET: Stromswold et al., 1996, Caplan et al., 1998; fMRI: Inui, et al., 1998, Dapretto & Bookheimer, 1999, Kang et al., 1999, Embick et al., 2000, Cooke et al., 2002)。Fiebach et al. (2001) によるドイツ語 *wh* 間接疑問文の fMRI 実験の結果から、ブローカ領域は文法的作業記憶を司っていると考えられる。同様の結果が、PET を利用した研究からも得られている。例えば、Stromswold et al. (1996) は、関係代名詞節の右枝分かれ文 (right-branching sentence; 例: The child spilled the juice [that stained the rug]) と比べ、中央埋め込み文 (center-embedded sentence; 例: The juice [that the child spilled \_\_\_] stained the rug) の理解

は作業記憶への負担が大きくなるため、左半球ブローカ領域の弁蓋部により活発に活動していると PET による研究で観察している。しかし、この実験では刺激文が最小対 (minimum pair) をなしておらず、結果が統語処理の違いによるものなのか、あるいは、意味の違いによるものなのかがはっきりしないと指摘されている (大津, 1997)。一方、Just et al. (1996) は fMRI を用いて、(a) 主格関係代名詞文 (例: The reporter [who attacked the senator] admitted the error) と (b) 目的格関係代名詞文 (例: The reporter [who the senator attacked \_\_\_] admitted the error) を比較し、文法的複雑性の高い (b) の文で左半球のブローカ領域 (下前頭回の弁蓋部 BA44 と三角部 BA45) とウェルニッケ領域で局所脳血流量が増加したことを明らかにした。Caplan et al. (1999) の PET 研究では、主格節分裂文 (例: It was the award [that thrilled the actress]) と比べ、文法的に複雑な目的格節分裂文 (例: It was the actress [that the award thrilled \_\_\_]) において、左半球ブローカ領域の下前頭回三角部 (BA45) が活性化した (参照 Caplan et al., 2000)。尚、Stowe et al. (1998) は、PET によって、左半球前頭弁蓋とブローカ領域の奥にある島 (insula) が文法的複雑性のある文のみならず、単語を黙読した場合にも活性化したと報告している (参照 Moro et al., 2001)。つまり、文法構造の情報だけでなく語彙も一時的に記憶している役割があると論じている。日本語文を対象にした fMRI 実験では、主節動詞の主語が何であるのか、従属節の人称代名詞が何を指しているのかという文法判断を行う際に、左半球の下前頭回が関与していることを明らかにしている (Hashimoto et al., 2002)。これらの実験結果により、文法的な作業記憶は、活動部位に若干の差はあるが、概ね、ブローカ領域で行われていると言うことができる。

### (3) 後期文法処理成分

句構造規則、動詞の下位範疇化、空範疇原理、下接 (subjacency) の条件、束縛原理に関する文法的なエラー、一致 (主語-動詞の数、格、人称) や動詞屈折に関する形態・文法的エラー、文法的には正しいが複雑で曖昧な文で使用頻度の低い袋小路文 (garden-path sentence)、文法的には正しいが、統合の難しい文を聞いたり読んだりした場合、目標語の提示から約 600 ミリ秒後を頂点に、約 500 ミリ秒~700 ミリ秒超の時間長で、陽性脳波が生じる (参照 Hagoort, Brown & Osterhout, 1999)。この後期文法処理成分は、両半球の頭頂葉中央部に分布し、脳波では P600 と呼ばれる。例えば、\*The broker persuaded to sell the stock という文において、主節動詞の後に目的語の名詞句が必要であるが、この文では to 不定詞が続いており、動詞の下位範疇化に関するエラーとなり、このエラーに対して P600 成分が観察された (Osterhout & Holcomb, 1992)。一方、The lawyer charged the defendant was lying という文は、統語的・意味的に曖昧な袋小路文で、最初、主節動詞 charged の目的語が the defendant であると解釈していると、次に動詞 was が続くため、the defendant をその動詞 was の主語として再解釈する必要が生じ、目標語 was に対して P600 成分が生じた (Osterhout, Holcomb, & Swinney, 1994)。このような曖昧な文に接した場合、脳は可能な文解析を同時に複数考えたり、はっきりした情報が得られるまで解析・解釈を保留したりするのではなく、統語的単純さ・文構造の頻度・もっともらしさ・文脈・記憶の負担・統語的統合 (syntactic integration: 予測していた文構造と新しいインプットを結びつける過程) の単純さに基づいて 1 種類の文解析を一時的に行うとされる (参照 Kaan et al., 2000: 162, Hagoort, Brown, & Osterhout, 1999: 288-289)。

また、Kaan et al. (2000) は、再分析を必要とする袋小路文ではなく、次のような文法的に正しい文を用いて、統語的統合の困難度を脳波測定によ

り検討した。

- (a) Emily wondered [whether the performer in the concert had imitated a popstar for the audience's amusement].
- (b) Emily wondered [which popstar the performer in the concert had imitated \_\_ for the audience's amusement].
- (c) Emily wondered [who the performer in the concert had imitated \_\_ for the audience's amusement].

補充語—空所の文構造のために統語的統合が困難な (b) の which 疑問文と (c) の who 疑問文において、(a) の whether 疑問文と比べ P600 成分が大きく見られた。(b) の which 疑問文と (c) の who 疑問文を比較した場合は、which 疑問文で P600 成分が大きく現れた。このことは、(b) の which により、既に名前が挙がっている複数のポップスターという談話上の旧情報を参照することが求められ、which 疑問文の方がより複雑な言語処理を行っているためであると推定されるが、追検証が必要である。3 の (2) で前述したように、LAN 成分の出現は補充語と空所との統語的依存関係がはっきりするまで、補充語を一時的に記憶に保持している過程にも関わっていると考えられているが (Kluender & Kutas, 1993; King & Kutas, 1995)、同様に、上記の (a) と (b, c) における P600 成分の振幅の違いも、作業記憶の負担の違いであると説明できる。P600 成分は、補充語と空所との統語的依存関係が決定し、一時記憶している語句のつながりを句構造規則に正しく統合させるプロセスで現れると言える (Fiebach et al., 2001: 327)。同じ関係代名詞を対象にした実験であっても、Kaan et al. (2000) では空所の前に位置 (pre-gap position) する関係代名詞節の動詞が P600 成分を、King & Kutas (1995) では空所の後に位置 (post-gap position) する主節動詞が LAN 成分を誘発し、どのような文法的役割のある単語を目標語に設定するのかによって、出現する言語処理成分が異なっている。この点について



は、更なる追証が望まれる。

以上をまとめると、P600 成分は、文法的なエラー文に対しては統語的修正 (syntactic repair) を、袋小路文に対しては統語上再分析 (syntactic reanalysis) を、文法的に困難度の高い複雑な文に対しては統語的統合 (syntactic integration) を行うことによる、言語インプットの統語的再処理 (syntactic reprocessing) を示しているとされている (Friederici, in press)。文法的エラーについては超早期文法成分 (ELAN) や早期文法成分 (LAN) に引き続き P600 成分が生じることがあるが、袋小路文と統語的統合の難しい文は文法的には逸脱していないため P600 成分が単独で出現する。特に、袋小路文のように構造上の階層を変更する必要がある場合は、文処理に負担がかかり、大きな P600 成分が見られる。

L1 話者と L2 学習者の比較研究では、L1 話者と比べ、ロシア人 L2 学習者 (ドイツ語学習歴 6 年) では P600 成分の反応時間が遅れたという報告がある (Hahne, 2001)。日本人ドイツ語学習者 (2 年半の学習歴と 2 年半のドイツ滞在期間) を対象にした脳波実験では、L1 話者には見られた P600 成分が生じなかった (Hahne & Friederici, 2001)。後期文法処理成分に関しては、脳波成分の P600 に相当する脳磁場の SF-M600 (syntactic field – magnetic 600 msec) 成分の検出を含め、さまざまな言語能力レベルを対象にした実験が必要であり、L2 言語能力レベルによる脳内反応の違いに焦点を絞った研究成果が期待される。

#### 4. 脳内意味処理

文中で意味的に逸脱した語を見せたり聞かせたりすると、エラー語から約 300~500 ミリ秒の間で、400 ミリ秒を頂点にした陰性脳波 (N400: negativity – 400 msec) が生じる (参照 図 2)。Kutas & Hillyard (1980) の

N400 の検出によって、一連の言語脳科学の研究が始まった。この N400 成分は、意味的エラーだけでなく、単語の繰り返しが無い場合、一般に出現頻度が低い単語の場合、そして、空所に入る単語の予測度が低い場合に、反応が大きくなることがわかった (Kutas & Federmeier, 2000)。脳波 N400 成分の反応時間は早期文法処理成分の LAN と同じ 300~500 ミリ秒の間であるが、頭皮上電位分布は、両半球の頭頂部、側頭葉後部、後頭葉にまたがり、LAN の頭皮上電位分布とは異なる。L1 話者と L2 学習者を比較した研究では、中級 L2 学習者は L1 話者と比べて N400 成分の反応が遅れ、振幅も小さいという研究 (Hahne, 2001) と、L1 話者と L2 学習者の N400 成分の反応時間と振幅はほぼ同じであるという結果の異なる報告がある (Hahne & Friederici, 2001)。

脳磁場による実験では、Mäkela et al. (2001) がフィンランド語の意味的エラーに対して N400m (magnetic N400) 成分を発見し、両半球の聴覚野周辺にニューロン活動源を特定した。また、N400m 成分の検出には、目標語が、長い単語ではなく短い単語であることが必要条件であることを明らかにした。日本語を対象にした脳磁場研究を行った Inouchi et al. (2002b) では、母音短縮による意味的エラー (例：\*寒さを防ぐために着る服は、琴) と、異なる音節による意味的エラー (例：\*伝統的な日本の楽器は、こま) によって、左半球で脳磁場の意味処理成分 SeF-M400 (semantic field - magnetic 400: 従来、N400m と呼ばれていた成分と同じであるが、脳波の陰性成分の名称 N400 に脳磁場の m をつける用語は好ましくないため) が検出された。ニューロン活動源は、左半球シルビウス裂の周辺であった。母音伸長による意味的エラー (例：\*伝統的な日本の楽器は、コート) では SeF-M400 成分は生じず、意味処理にともなうニューロンの活動は母音短縮の意味的エラーの方に敏感であることが示された。意味処理成分は、文脈の意味内容に合致している単語であるかという意味統合のプロセスを表

すとされているが、超早期文法処理が行われると、N400 成分は生じないことが脳波実験により確認されている (Hahn & Jescheniak, 2001)。文法解析の処理に容量の多くが取られてしまい、目標単語の意味が文脈に合致するかどうかという意味統合の処理が妨げられるためと考えられている。

fMRI による神経活動源の測定実験で Dapretto & Bookheimer (1999) は、文法的にも意味的にも正しい 2 つの文の意味が同じであるかを判断するタスクでの意味処理は、左半球 BA47 (下前頭回眼窩部, *pars orbitalis*) が司っているとした。一方、意味的・文法的判断をさせた fMRI 実験では、ブローカ領域のみが活性化した文法的エラーと比べ、意味のエラーに対してはウェルニッケ領域を始めとして、より広範に活性化が見られた (Ni et al., 2000)。Kuperberg et al. (2000) は、fMRI 実験で、文の正しさを判断するタスクを行い、意味のエラー (例：\*The young man drank the guitar) と語用的エラー (例：\*The young man buried the guitar) に、左半球の上側頭部が関与したという結果を得た。今後、どのようなタスクを課すかによる違いを詳細に検討する必要がある (参照 Friederici, in press)。

以上のように、文法処理と意味処理で説明した言語理解に関わる脳波成分と脳磁場成分に関して L1 話者の特徴をまとめると、次の表 1 のようになる。

脳波成分	ELAN 成分	LAN 成分	N400 成分	P600 成分
脳磁場成分	SF-M150 成分		SeF-M400 成分	
潜時 (ミリ秒)	120-200	300-500	300-500	500-700~
頭皮上の 電位分布	左半球前部	左半球の前部, 側頭部, 頭頂部	両半球の頭頂部, 側頭葉後部, 後頭葉	両半球頭頂葉中央部
神経活動源	両半球側頭葉 両半球前頭葉前外側部		左半球側頭葉	
言語構造 の特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>文法的エラー (句構造規則, 格素性照合, 名詞句繰り上げ, 不定詞の範疇選択)</li> <li>形態・文法的エラー (動詞屈折)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>文法的エラー, (句構造規則, 動詞下位範疇化)</li> <li>形態・文法的エラー (動詞屈折, 一致 (主語-動詞の数, 名詞の単数形・複数形))</li> <li>補充語-空所の依存関係が離れた距離の文法的に正しい文</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>意味的エラー</li> <li>意味的に正しい文 (単語の繰り返しが<sup>a</sup>ない場合, 一般に出現頻度が低い単語の場合, 空所に入る単語の予想度が低い場合)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>文法的エラー (句構造規則, 動詞下位範疇化, 空範疇原理, 下接の条件, 束縛原理)</li> <li>形態・文法的エラー (一致 (主語-動詞の数, 格, 人称), 動詞屈折)</li> <li>袋小路文</li> <li>統語的統合の難しい文</li> <li>補充語-空所の依存関係が離れた距離の文法的に正しい文</li> </ul>
機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>最初の文構造解析</li> <li>文法的エラー検出</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>文構造解析</li> <li>文法的エラー検出</li> <li>作業記憶</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>意味統合</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>文法的再処理</li> <li>作業記憶</li> </ul>

表 1 言語理解時の文法・意味処理における L1 話者の脳波・脳磁場成分の特徴

文法処理成分の三段階の最大の違いは、超早期文法成分 (ELAN, SF-M150) は文法的エラーによってのみ生じる点である。早期文法成分 (LAN) や後期文法成分 (P600) は、文法的エラーだけでなく作業記憶の負担など他の要因にも影響される。尚、脳波の LAN と P600 にそれぞれ対応する脳磁場成分は、まだ報告されておらず、脳磁場測定による早期・後期文法成分のニューロン活動源の特定が急がれる。また、L1 話者と L2 学習者との間で脳反応の大きな違いが見られるのは、超早期文法処理成分である。これは、後期文法処理成分を反映する制御的処理 (controlled processing) とは違い、超早期文法処理成分が文法処理の自動的処理 (automatic processing) を反映しているためと考えられる。L1 話者と L2 学習者の脳内言語処理の差を、文法構造のタイプや L2 能力レベルなどの面より解明できるとして、今後の研究の進展が期待される。

これまでの言語脳科学の実験は、英語、ドイツ語、オランダ語、フィンランド語が中心であり、日本語を対象にした実験は数が少ない。日本人を対象にした日本語文の脳波実験で、\*「動物園で何を見たよ」という終助詞の文法的エラーに対して P600 成分が出現し、\*「太郎が辞書に出かけた」という意味的エラーに N400 成分が現われたことが確認されている (Nakagome et al., 2001)。日本語の超早期文法処理成分と早期文法処理成分は、まだ検出されておらず、非インド・ヨーロッパ語族である日本語を対象にした脳反応実験が今後増加し、英語・ドイツ語・オランダ語などのインド・ヨーロッパ語族と比較しながら、各言語に共通な脳内言語処理成分が検出されるのかどうかを確かめることは、意義深い。日本語での言語脳科学の分野を進展させるために、日本語学習者を用いた L2 実験も必要である。

実験計画を立てる時や、実験結果を考察する時に留意すべきことは、研究対象の言語、刺激文のタイプ、言語的エラーの程度、目標語のタイプと

文中の位置、刺激文の提示方式 (リスニングを行わせる聴覚方式、文字を見せる視覚方式)、目標文以外の攪乱文 (filler sentence) のタイプと量、被験者の L1・L2 言語能力レベル、各被験者の個人差 (読解の幅、教育レベル等) などによる結果の違いを考慮しなければならない点である (参照 Hahne & Jescheniak, 2001: 210)。

## 5. バイリンガルの脳内言語処理

ここでは、バイリンガルに関する fMRI と PET の研究を紹介する。Kim et al. (1997) は、声に出さずに頭の中で内的発話 (internal speech) をさせた fMRI 実験で、5~6 才までに L2 学習を開始した早期バイリンガル (early bilingual) と、その年齢以降に L2 学習を開始した非早期バイリンガル (late bilingual) を比較した。早期バイリンガルは、ブローカ領域内の同じ部位に L1 と L2 の活動源が同定されたが、非早期バイリンガルは、L1 と L2 でブローカ領域内の異なる部位が活性化し、L2 言語習得の年齢による影響があることが示された。Dehaene et al. (1997) の実験で、フランス語・英語のバイリンガル (L2 開始年齢: 7 才) に L1 と L2 で物語を聞かせた。左上側頭回が主に活動した L1 と異なり、L2 では両半球の側頭部と前頭部が活動源であった。一方、PET を用いた Perani et al. (1998) では、イタリア語・英語の上級レベル非早期バイリンガルとスペイン語・カタロニア語の上級レベル早期バイリンガルに L1 と L2 で物語を聞かせ、その活動部位には言語間の差がそれぞれ見られなかったという結果を得ている。一般に、L1 と比較して L2 では、脳活動の部位が広範にわたる傾向にあるが、被験者の L2 能力レベルや、L2 開始年齢、タスクの種類、言語処理の種類 (発話 vs. 理解)、言語タイプ (例: インド・ヨーロッパ語族、非インド・ヨーロッパ語族) という神経活動の脳内分布に影響を与える様々な要因の違いをよく

見極める必要があり、今後の研究の進展が待たれる。

## まとめ

EEG・MEG を用いた電気生理学的測定方法と PET・fMRI などを用いた血流力学的測定方法による脳機能測定によって、言語処理に伴い脳内で何が起きているのかが、少しずつ解明されてきた。特に、時系列に従って、文法処理は 3 つの段階にわかれ、意味処理も独立して存在することが明らかになっている。

言語脳科学の研究成果は、直接的とは言わずとも、間接的に第二言語習得研究と外国語教育学に影響を与えるものである。例えば、文法的エラーに対する脳反応を見ると、文構造によってニューロン活動の観点から強いエラー (strong error) と弱いエラー (weak error) に分類でき、言語行動上のエラー分類とは異なる観点からの分析が期待できる。今後、言語脳科学の研究成果が積み重ねられ、それに基づく新文法シラバスの提案などの貢献も考えられる。現時点でも、日本人にとって習得の困難な項目である /r/ と /l/ に関して、日本人英語学習者の神経細胞の柔軟性が脳磁場研究で実証されており (Zhang et al., 2000b)、外国語教育における音声指導の有効性が言語脳科学により支持されている点は極めて有意義なことである。

今後の研究の目指す方向は、言語理解だけではなく言語産出に関する脳科学実験である。これまでは、発話に伴う頭の動きのために、アーティファクト (artifact) と呼ばれる、脳内活動に無関係な雑信号が生体データに含まれるため、言語産出に関する脳実験は敬遠されてきており、数が少ない。例えば、van Turenhout et al. (1999) は、脳波により、オランダ語の名詞句の発話をさせる場合、絵を見てその絵が表す名詞の定冠詞が de か het かを決める文法処理の反応時間が、絵の名詞の第一音素が /b/ か /s/ かを決め

る音韻処理よりも 40 ミリ秒早かったことを明らかにしている。

発話に関する PET 研究として、Indefrey et al. (2001) は、色つきの正方形と長円が順番にアニメーションとして提示され、ドイツ語で文、名詞句、単語をそれぞれ発話させる実験を行った。文を発話した時の局所脳血流量 (rCBF: regional cerebral blood flow) から単語を発話した時の局所脳血流量を引き算した結果、左半球ブローカ領域の BA44 の尾部に接する前方ローランド弁蓋部 (Rolandic operculum, BA6) が単語を文に構造化する際の活動源であるとした。しかし、このような引き算は、どのような言語活動を反映しているのかが明確ではなく、実験手法として問題がある。また、fMRI による研究で、声に出さずに頭の中で文法的エラーを訂正するという内的発話のタスクをさせた時は、右半球のシルビアン皮質周辺が活発に反応した (Meyer et al., 2000)。訂正には、文法・意味・韻律などあらゆる要素が絡んでくるため、右半球が関わるとされている。

更に、談話レベルの言語脳科学の実験も既に行われている。fMRI では、一貫性 (coherence) と結束性 (cohesion) に関する研究 (Ferstl & von Cramon 2001) や、意味的なユーモア・音韻的なユーモア (例: Why did the golfer wear two sets of pants? ... He got a hole in one) を聞いた時の脳反応に関する実験 (Goel & Dolan, 2001) も開始され、言語脳科学の研究対象の広がりを見せている。また、PET では、翻訳 (Klein et al., 1995, Price et al., 1999) や通訳 (Rinne et al., 2000) についての研究もある。例えば、Rinne et al. (2000) では、通訳のプロを対象とし、L2 の英語を L1 のフィンランド語に同時通訳する場合には、左半球前部が活性化し、L1 を L2 に同時通訳する場合には、左半球前部・側頭部と活動部位が広範に及んだことが報告されている。L1 を L2 に通訳する場合の方が、より労力の折れる大変な作業であることが推察される。光トポグラフィーを用いた研究では、正しい 1 文を繰り返し聞くタスクと比べて、物語を聞くタスクでは、左半球上側



頭部がより活性化した (Sato et al., 1999)。光トポグラフィーは、頭を自由に動かせないという制約は依然として残るが、大きな機械の中に頭を入れることはないため、MEG・fMRI・PET と比べ、多少は自然な環境で言語処理を行わせることができる点が強みである。今後の研究に期待したい。

高齢化社会を迎えている現在、加齢 (aging) にともなう脳内言語処理の変化についての研究も開始された (Grossman et al., 2002a, b)。最近、言語に関係する遺伝子の存在を明らかにした最先端の研究も報告されている。例えば、読字障害のある患者を対象にした Grigorenko et al. (2000) による一連の研究がある。特に、単語の音読、ディクテーション、適切な単語選択に第 6 染色体が関与していることが確認された。また、Lai et al. (2001) は、唇と舌の動きのコントロールがうまくできず、言葉に流暢さがなく、文法的障害 (例：\*Mike play tennis yesterday という形態素エラー) のあるイギリスの KE という名の家系の三世代にわたる人々を対象にした特異性言語障害に関する遺伝子レベルの研究を行い、発話と文法の障害を持つ患者は FOXP2 という遺伝子が直接遮断されていることを明らかにした。このような遺伝子レベルでの言語脳科学研究も日本で発展することが必要である。文系と理系の融合した学際的研究分野である言語脳科学が、これから日本で盛んになり、L1 と L2 の言語処理にともなう脳機能の実態が明らかになることが期待される。

#### 参考文献

- Caplan, D., Alpert, N., & Waters, G. (1998) Effects of syntactic structure and propositional number on patterns of regional cerebral blood flow, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10, 541-552.
- Caplan, D., Alpert, N., & Waters, G. (1999) PET studies of syntactic processing with auditory sentence presentation, *NeuroImage*, 9, 343-351.

- Caplan, D., Alpert, N., Waters, G., & Olivieri, A. (2000) Activation of Broca's area by syntactic processing under conditions of concurrent articulation, *Human Brain Mapping*, 9, 65-71.
- Cooke, A., Zurif, E.B., DeVita, C., Alsop, D., Koenig, P., Detre, J., Gee, J., Pināngo, M., Balogh, J., & Grossman, M. (2002) Neural basis for sentence comprehension: grammatical and short-term memory components, *Human Brain Mapping*, 15, 80-94.
- Dapretto, M. & Bookheimer, S.Y. (1999) Form and content: dissociating syntax and semantics in sentence comprehension, *Neuron*, 24, 427-432.
- Dehaene, S., Dupoux, E., Mehler, J., Cohen, L., Paulesu, E., Perani, D., van de Moortele, P.F., Lehericy, S., & Le Bihan, D. (1997) Anatomical variability in the cortical representation of first and second language, *Neuroreport*, 8, 3809-3815.
- Embick, D., Marantz, A., Miyashita, Y., O'Neil, W., & Sakai, K.L. (2000) A syntactic specialization for Broca's area, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97, 6150-6154.
- Ferstl, E.C. & von Cramon, D.Y. (2002) The role of coherence and cohesion in text comprehension: an event-related fMRI study, *Cognitive Brain Research*, 11, 325-340.
- Fiebach, C.J., Schlesewsky, M., Friederici, A.D. (2001) Syntactic working memory and the establishment of filler-gap dependencies: insights from ERPs and fMRI, *Journal of Psycholinguistic Research*, 30, 321-338.
- Friederici, A.D. (1995) The time course of syntactic activation during language processing: a model based on neuropsychological and neurophysiological data, *Brain and Language*, 50, 259-281.
- Friederici, A.D. (1999) The neurobiology of language comprehension. In Friederici, A.D. (ed.) *Language comprehension: a biological perspective*, 265-304. [2nd ed.] Berlin: Springer.
- Friederici, A.D. (in press) The neural basis of sentence processing: a neurocognitive model. In Hickok, G. & Poeppel, D. (eds.), *Towards a new functional anatomy of language. Cognition* (special issue).

- Friederici, A.D., Hahne, A., & von Cramon, D.Y. (1998) First-pass versus second-pass parsing processes in a Wernicke's and a Broca's aphasic: electrophysiological evidence for a double dissociation, *Brain and Language*, 62, 311-341.
- Friederici, A.D., Wang, Y., Herrmann, C.S., Maess, B., & Oertel, U. (2000) Localization of early syntactic processes in frontal and temporal cortical areas: magnetoencephalographic study, *Human Brain Mapping*, 11, 1-11.
- Gandour, J., Wong, D., Hsieh, L., Weinzapfel, B., Van Lancker, D., & Hutchins, G.D. (2000) A crosslinguistic PET study of tone perception, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 207-222.
- Goel, V. & Dolan, R.J. (2001) The functional anatomy of humor: segregating cognitive and affective components, *Nature Neuroscience*, 4, 237-238.
- Grigorenko, E.L., Wood, F.B., Meyer, M.S., & Pauls, D.L. (2000) Chromosome 6p influences on different dyslexia-related cognitive processes: further confirmation, *American Journal of Human Genetics*, 66, 715-723.
- Grossman, M., Cooke, A., DeVita, C., Alsop, D., Detre, J., Chen, W., & Gee, J. (2002a) Age-related changes in working memory during sentence comprehension: an fMRI study, *NeuroImage*, 15, 302-317.
- Grossman, M., Cooke, A., DeVita, C., Chen, W., Moore, P., Detre, J., Alsop, D., & Gee, J. (2002b) Sentence processing strategies in healthy seniors with poor comprehension: an fMRI study, *Brain and Language*, 80, 296-313.
- Gunter, T.C., Stowe, L.A., & Mulder, G. (1997) When syntax meets semantics, *Psychophysiology*, 34, 660-676.
- Hagoort, P. & Brown, C.M. (2000) ERP effects of listening to speech: semantic ERP effects. *Neuropsychologia* 38, 1518-1530.
- Hagoort, P., Brown, C.M., & Osterhout, L. (1999) The neurocognition of syntactic processing. In Brown, C.M. & Hagoort, P. (eds), *The neurocognition of language*, pp. 273-316. Oxford: Oxford University Press.
- Hahne, A. (2001) What's different in second-language processing? Evidence from event-related brain potentials, *Journal of Psycholinguistic Research*, 30, 251-266.
- Hahne, A. & Friederici, A.D. (2001) Processing a second language: late learners' comprehension mechanisms as revealed by event-related brain potentials,

- Bilingualism*, 4, 124-141.
- Hahne, A. & Jescheniak, J.D. (2001) What's left if the Jabberwock gets the semantics? An ERP investigation into semantic and syntactic processes during auditory sentence comprehension, *Cognitive Brain Research*, 11, 199-212.
- Hashimoto, R. & Sakai, K.L. (2002) Specialization in the left prefrontal cortex for sentence comprehension, *Neuron*, 35, 589-597.
- Indefrey, P., Brown, C.M., Hellwig, F., Amunts, K., Herzog, H., Seitz, R.J., & Hagoort, P. (2001) A neural correlate of syntactic encoding during speech production, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98, 5933-5936.
- Inouchi, M., Kubota, M., Ferrari, P., & Roberts, T. (2001) Magnetic mismatch fields elicited by Japanese words: vowel duration and pitch by native and nonnative speakers. A poster presented at the 31st annual meeting of Society for Neuroscience, Nov. 10-15, San Diego, USA.
- Inouchi, M., Kubota, M., Ferrari, P, & Roberts, T. (2002a) Neuromagnetic auditory cortex responses to duration and pitch changes in tones: cross-linguistic comparisons of human subjects in directions of acoustic changes, *Neuroscience Letters*, 331,138-142.
- Inouchi, M., Kubota, M., & Roberts, T. (2002b) Magnetoencephalography evidence of semantic violations in auditory sentence comprehension by native speakers of Japanese, *Neuroscience Letters*, 331, 133-137.
- Inui, T., Otsu, Y., Tanaka, S., Okada, T., Nishizawa, S., & Konishi, J. (1998) A functional MRI analysis of comprehension processes of Japanese sentences, *Neuroreport*, 9, 3325-3328.
- Just, M.A., Carpenter, P.A., Keller, T.A., Eddy, W.F., & Thulborn, K.R. (1996) Brain activation modulated by sentence comprehension, *Science*, 274, 114-116.
- Kaan, E., Harris, A., Gibson, E., & Holcomb, P. (2000) The P600 as an index of syntactic integration difficulty, *Language and Cognitive Processes*, 15, 159-201.
- Kang, A.M., Constable, R.T., Gore, J.C., & Avrutin, S. (1999) An event-related fMRI study of implicit phrase-level syntactic and semantic processing, *NeuroImage*, 10, 555-561.

- Kim, J.-J., Kim, M.S., Lee, J.S., Lee, D.S., Lee, M.C., & Kwon, J.S. (2002) Dissociation of working memory processing associated with native and second languages: PET investigation, *NeuroImage* 15, 879-891.
- Kim, K.H., Relkin, N.R., Lee, K.M., & Hirsch, J. (1997) Distinct cortical areas associated with native and second languages, *Nature*, 388, 171-174.
- King, J. & Kutas, M. (1995) Who did what and when? Using word- and clause-related ERPs to monitor working memory usage in reading, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 7, 378-397.
- Klein, D., Milner, B., Zatorre, R.J., Meyer, E., & Evans, A.C. (1995) The neural substrates underlying word generation: a bilingual functional-imaging study, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 92, 2899-2903.
- Kluender, R. & Kutas, M. (1993) Bridging the gap: evidence from ERPs on the processing of unbounded dependencies, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 5, 196-214.
- Kubota, M., Ferrari, P., & Roberts, T. (submitted 1) Magnetoencephalography detection of early syntactic processing in humans: Comparison between L1 speakers and L2 learners.
- Kubota, M., Ferrari, P., & Roberts, T. (submitted 2) Neuromagnetic responses to English NP-raising and case filter violations by L1 and L2 speakers.
- Kubota, M., Ferrari, P., & Roberts, T. (submitted 3) Neuromagnetic evidence of early syntactic responses to English infinitives and gerunds by L1 speakers and L2 learners.
- Kuperberg, G.R., McGuire, P.K., Bullmore, E.T., Brammer, M.J., Rabe-Hesketh, S., Wright, I.C., Lythgoe, D.J., Williams, S.C., & David, A.S. (2000) Common and distinct neural substrates for pragmatic, semantic, and syntactic processing of spoken sentences: an fMRI study, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 321-341.
- Kutas, M. & Federmeier, K.D. (2000) Electrophysiology reveals semantic memory use in language comprehension, *Trends in Cognitive Sciences*, 4: 463-470.
- Kutas, M., Federmeier, K.D., & Sereno, M.I. (1999) Current approaches to mapping language in electromagnetic space. In Brown, C.M. & Hagoort, P.

- (eds.) *The neurocognition of language*, 359-392. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Kutas, M. & Hillyard, S.A. (1980) Reading senseless sentences: brain potentials reflect semantic incongruity, *Science*, 207, 203-205.
- Kutas, M. & Van Petten, C.K. (1994) Psycholinguistics electrified: event-related brain potential investigations. In Gernsbacher, M.A. (ed.), *Handbook of Psycholinguistics*, 83-143. San Diego, CA: Academic Press.
- Lai, C.S., Fisher, S.E., Hurst, J.A., Vargha-Khadem, F., & Monaco, A.P. (2001) A forkhead-domain gene is mutated in a severe speech and language disorder, *Nature*, 413, 519-523.
- Mäkela, A.M., Mäkinen, V., Nikkilä, M., Ilmoniemi, R.J., & Tiitinen, H. (2001) Magnetoencephalographic (MEG) localization of the auditory N400m: effects of stimulus duration, *Neuroreport*, 12, 249-253.
- Meyer, M., Friederici, A.D., & von Cramon, D.Y. (2000) Neurocognition of auditory sentence comprehension: event related fMRI reveals sensitivity to syntactic violations and task demands, *Cognitive Brain Research*, 9, 19-33.
- Moro, A., Tettamanti, M., Perani, D., Donati, C., Cappa, S.F., & Fazio, F. (2001) Syntax and the brain: disentangling grammar by selective anomalies, *NeuroImage*, 13, 110-118.
- Müller, H.M., King, J.W., & Kutas, M. (1997) Event-related potentials elicited by spoken relative clauses, *Cognitive Brain Research*, 5, 193-203.
- Nakagome, K., Takazawa, S., Kanno, O., Hagiwara, H., Nakajima, H., Itoh, K., & Koshida, I. (2001) A topographical study of ERP correlates of semantic and syntactic violations in the Japanese language using the multichannel EEG system, *Psychophysiology*, 38, 304-315.
- Neville, H., Nicole, J.L., Barss, A., Forster, K.I., & Garrett, M.F. (1991) Syntactically based sentence processing classes: evidence from event-related brain potentials, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 3, 151-165.
- Ni, W., Constable, R.T., Mencl, W.E., Pugh, K.R., Fulbright, R.K., Shaywitz, S.E., Shaywitz, B.A., Gore, J.C., & Shankweiler, D. (2000) An event-related neuroimaging study distinguishing form and content in sentence processing,

- Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 120-133.
- Nishitani, N. & Hari, R. (2000) Temporal dynamics of cortical representation for action, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97, 913-918.
- Osterhout, L. & Holcomb, P.J. (1992) Event-related potentials elicited by syntactic anomaly, *Journal of Memory and Language*, 31, 785-806.
- Osterhout, L., Holcomb, P. J., & Swinney, D. A. (1994) Brain potentials elicited by garden-path sentences: evidence of the application of verb information during parsing, *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 20, 786-803.
- Perani, D., Paulesu, E., Galles, N.S., Dupoux, E., Dehaene, S., Bettinardi, V., Cappa, S.F., Fazio, F., & Mehler, J. (1998) The bilingual brain. Proficiency and age of acquisition of the second language, *Brain*, 121, 1841-1852.
- Phillips, C., Marantz, A., McGinnis, M., Pesetsky, D., Wexler, K., Yellin, E., Poeppel, D., Roberts, T., & Rowley, H. (1995) Brain mechanisms of speech perception: a preliminary report, *MIT Working Papers in Linguistics* 26, 153-191.
- Price, C.J., Green, D.W., & von Studnitz, R. (1999) A functional imaging study of translation and language switching, *Brain*, 122, 2221-2235.
- Pulvermüller, F., Kujala, T., Shtyrov, Y., Simola, J., Tiitinen, H., Alku, P., Alho, K., Martinkauppi, S., Ilmoniemi, R.J., & Näätänen, R. (2001) Memory traces for words as revealed by the mismatch negativity, *NeuroImage*, 14, 607-616.
- Rinne, J.O., Tommola, J., Laine, M., Krause, B.J., Schmidt, D., Kaasinen, V., Teras, M., Sipila, H., & Sunnari, M. (2000) The translating brain: cerebral activation patterns during simultaneous interpreting, *Neuroscience Letters*, 294, 85-88.
- Sato, H., Takeuchi, T., & Sakai, K.L. (1999) Temporal cortex activation during speech recognition: an optical topography study, *Cognition*, 73, B55-66.
- Scott, S.K., Blank, C.C., Rosen, S., & Wise, R.J. (2000) Identification of a pathway for intelligible speech in the left temporal lobe. *Brain*, 123, 2400-2406.
- Shtyrov, Y. & Pulvermüller, F. (2002) Memory traces for inflectional affixes as shown by mismatch negativity. *European Journal of Neuroscience*, 15, 1085-1091.

- Stowe, L.A., Broere, C.A., Paans, A.M., Wijers, A.A., Mulder, G., Vaalburg, W. and Zwarts, F. (1998) Localizing components of a complex task: sentence processing and working memory, *Neuroreport*, 9, 2995-2999.
- Stromswold, K., Caplan, D., Alpert, N., & Rauch, S. (1996) Localization of syntactic comprehension by positron emission tomography, *Brain and Language*, 52, 452-473.
- Ueno, M. & Kluender, R. (in press) Event-related brain indices of Japanese scrambling and wh-in-situ, *Brain and Language*.
- van den Brink, D., Brown, C.M., & Hagoort, P. (2001) Electrophysiological evidence for early contextual influences during spoken-word recognition: N200 versus N400 effects. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13, 967-985.
- van Turenout, M., Hagoort, P., & Brown, C. (1999) The time course of grammatical and phonological processing during speaking: evidence from event-related brain potentials, *Journal of Psycholinguistic Research*, 28, 649-676.
- Winkler, I, Kujala, T., Titinen, H., Sivonen, P., Alku, P., Lehtokoski, A., Czigler, I., Csépe, V., Ilmoniemi, R.J., & Näätänen, R. (1999) Brain responses reveal the learning of foreign language phonemes, *Psychophysiology*, 36, 638-642.
- Zatorre, R., Evans, A., & Meyer, E. (1994) Cortical mechanisms underlying melodic perception and memory for pitch, *Journal of Neuroscience*, 14, 1908-1919.
- Zhang, Y., Kuhl, P. K., Imada, T., Kotani, M., & Stevens, E. B. (2000a) MMFs to native and nonnative syllables show an effect of linguistic experience, *Abstracts of the 12th International Conference on Biomagnetism*, 121b, p.121.
- Zhang, Y., Kuhl, P. K., Imada, T., Iverson, P., Pruitt, J., Kotani, M., & Stevens, E. (2000b) Neural plasticity revealed in perceptual training of a Japanese adult listener to learn American /l-r/ contrasts: a whole-head magnetoencephalography study, *The 6th International Conference on Spoken Language Processing (ICSLP 2000)*, 01161, p.109.
- 岩田誠 (1996) 『脳とことば：言語の神経機構』 共立出版。
- 大津由紀雄 (1997) 「文法の脳科学」 『心理学評論』 40, 265-277.
- 関屋康 (1994) 「第3章 音韻の習得」 SLA 研究会 (編) 『第二言語習得研究に基づく最近の英語教育』, 49-88. 大修館書店。