

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「脳の機能発達と学習メカニズムの解明」

研究課題「言語の脳機能に基づく  
獲得メカニズムの解明」

## 研究終了報告書

研究期間 平成15年10月～平成21年3月

研究代表者：酒井 邦嘉  
(東京大学 大学院総合文化研究科、准教授)

## § 1 研究実施の概要

### 1. 研究の背景とねらい

言語は、人間に固有の高次脳機能である。言語獲得の生得的なメカニズムは、一般的な学習メカニズムとは全く異なるものであると考えられている。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fMRI(機能的磁気共鳴映像法)やMEG(脳磁計測)などの先端技術を用いて、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、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、アメリカの言語学者のチョムスキーとスイスの発達心理学者のピアジェによる有名な論争(1975年)以来、認知科学における中心的課題であった。

本研究では、脳科学の観点から教育の問題に取り組む際の指針となるようなデータを蓄積することを目指している。そのために、モデル・ケースとして言語教育に注目して、ともすれば客観的な評価・判断をしにくい教育のさまざまな場面に厳密科学を持ち込むことで、教育の効果を脳機能の変化として直接的に捉えることを目標にする。本研究のねらいは、言語の脳機能に焦点を当てて、言語獲得のメカニズムを解明することであり、次の3つのアプローチに重点を置く。第1に、脳機能の無侵襲的計測法を駆使して、言語機能の局在と神経ネットワークを明らかにし、母語と第二言語の獲得メカニズムを解明していく。言語の本質である「文法」という抽象的な概念が脳の中でどのように使われているかという疑問に対し、特定の大脳皮質の働きとして客観的に答えることを念頭に置き、研究プロジェクトを推進する。第2に、異なる年齢層の生徒・学生を対象とすることで、脳機能に基づく言語獲得の感受性期の解明と、獲得過程における複数の因子の相互作用の解明をめざす。第3に、学校における言語教育と連携して、教育の効果を脳機能の変化として直接的にとらえることをねらいとする。これらの3つは、言語の脳機能に焦点を当てて、言語獲得のメカニズムを解明するという本研究課題の目的の達成のために、最も必要であると考えられるアプローチである。

研究代表者がこれまで推進してきた研究プロジェクトにおいて、fMRI・光トポグラフィ・TMS(経頭蓋的磁気刺激)など、脳科学に不可欠な大型および中型装置が整備された。本プロジェクトでは、新たにMEGの先端技術を導入して、時間的に変化する言語処理を反映した脳活動の計測を新たに開始した。具体的には、文法処理や意味処理などの言語モジュールの実体を明らかにするために、前頭前野の機能分化の研究を推進する。また、第二言語の文法および文字の習得過程における脳活動をfMRIおよびMEG等により計測し、言語獲得装置がどのように関与するかを検討する。言語獲得装置の具体的なデザインを明らかにすることで、理論的なモデルへ適応することが可能になる。これらの言語の脳機能イメージング研究の成果を基礎として、言語獲得装置の機能局在と機能分化を明らかにし、脳における普遍文法の計算原理を解明することが本課題の目標である。

言語の問題は、脳科学における究極の挑戦である。言語学のパラダイムに基づく機能イメージングによる脳機能の研究と、自然言語処理のモデルの研究を融合することで、「言語の脳科学」が科学技術の新しい分野として確立・発展すると期待される。また、第二言語習得と機械学習の研究を並行させるにより、それらが母語の獲得とどのような点で共通し、または相違しているかが明らかになる。これにより、言語獲得装置の特徴の解明が一層進むのと同時に、文法処理や意味処理、音韻処理などの言語モジュールの役割が明らかになると期待される。

## 2. 成果概要

本プロジェクトの研究成果により、文法処理や文章理解において前頭葉の特定の領域が活性化するという言語の普遍性が、日本語・英語・日本手話のように異なる言語間で確かめられ、さらに第二言語の習得メカニズムが初めて明らかになった。当初の研究計画が着実に実を結び、言語の習得過程で脳活動がどのように変化していくかが明らかになった。具体的には、英語の習得開始が中学1年の場合、中学生から大学生にかけての6年間の学校教育で英語が定着するに従って、脳の「文法中枢」の活動が高まり、維持され、節約されるというダイナミックな変化を初めて見出した。この数年間の成果の積み重ねが認められ、これまで得られた知見の総合的な分析結果が *Science* 誌の総説として発表された(2005年)。

本研究では、第二言語の授業法の検討に役立てることを目標とし、英語の習得過程を脳活動の変化として捉えるために次のような調査を行った。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。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 によって計測した。その結果、英語の成績(動詞の過去形のテスト)の向上に比例して、左脳の前頭前野(ブローカ野)に活動の増加が見られ、また、この活動変化は中学1年生の双生児で高い相関を示した。この脳の場所は「文法中枢」の一部であり、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。少なくとも中学1年生では、英語が上達すると、日本語を使うときに活性化した脳の場所と同じ場所が活性化すると考えられる。このように、実践的な教育効果が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られたことは、意義深い。今回の fMRI を用いた方法は、個人の教育効果を直接的に測定する可能性を示すものとして、これからの教育の評価の方法やあり方に非常に大きな影響を与える可能性がある。さらに、研究のために特殊なトレーニングを実施するのではなく、日常の学習活動をトレーニングと位置づけて研究の対象とした本成果は、科学研究と学校教育の連携によって初めて可能になったもので、学校教育を対象とする世界初の脳研究である。本研究結果は、*Cerebral Cortex* 誌に発表された(2004年)。

一方、文字の習得は、文法とは全く異なる脳のシステムを使っていると考えられてきた。新たな外国語の文字の習得訓練を短期集中的に行えば、中学生と同様に大人でも、成績の向上に比例して脳の「文字中枢」の活動も向上することを初めて明らかにした。本研究では、「文字中枢」の活動に正字法と音韻の2つの要因のどちらか一方のみで十分であるか、それとも両方の要因が必要であるかを明らかにすることを目標として、大人の読字の習得過程に注目した。日本語を母語とする大学生および大学院生に対して、ハングル文字と音の組み合わせのトレーニングを2日間に渡って行い、成績の向上を確認する。さらに、このトレーニングを行っているときの脳活動を fMRI によって測定し、2日間の学習途上で脳機能に変化が観察されるかどうかを評価した。その結果、読字の成績の向上に比例して、左脳の下側頭回後部に活動の上昇が見られ、また、この活動変化は、新しく習得したハングル文字と音声を組み合わせたときのみ見られた。既習の仮名文字よりもハングル文字の方に強い活動を示した場所は、ハングル文字よりも仮名文字の方に強い活動を示した領域と隣接していた。従って、文字が読めるようになると、新しく習得した文字に特化した「文字中枢」の一部が活性化すると考えられる。本研究成果は、*Neuron* 誌に発表された(2004年)。

次に、fMRI の実験から、英語の熟達度で脳の「文法中枢」の反応が変わることを初めて直接的に証明した。英語の熟達度とは、英語の知識が定着した程度を表す指標で、英語の不規則動詞の過去形に対する正答率で評価した。大学生を対象として、英語に関連する課題を行っている際の脳活動を fMRI により測定することによって、英語の「熟達度」が高くなるほど文法中枢の活動が節約されていることが明らかになった。この結果と、英語習得を開始したばかりの中学生の英語の成績の向上に比例して文法中枢の活動が増加することを合わせると、中学生から大学生にかけて英語が定着するに従って、文法中枢の活動が高まり、維持され、節約されるというダイナミックな変化が見られることが示唆された。この結果は、語学教育の改善や言語の獲得機構の解明へとつながることが期待される。本研究成果は、*The Journal of Neuroscience* 誌に発表された(2005年)。

さらに、fMRI の実験から、日本手話による文章理解が日本語の音声と同じ左脳優位であることを初めて直接的に証明した。アメリカ手話の研究では、左脳の損傷で音声言語と同様に手話失語が起こることが明らかとなっている。一方、最近の fMRI による研究では、手話を見るときに右脳の活性化が特に高まることが報告されており、手話失語の知見と矛盾するため、激しい論争が行われてきた。今回、ろう者・コーダ(日本手話と日本語のバイリンガル)・聴者の3グループを対象として、文章理解における脳活動を fMRI により測定し比較することによって、日本手話の場合も日本語と同様に左脳の言語野が活性化することが明らかになり、脳における言語処理の普遍性が示唆された。本研究成果は、*Brain* 誌に発表された(2005年)。

また、脳活動の個人差を fMRI で調べたところ、外国語としての英語力と密接に関係する複数の脳部位を特定することに成功した。これまで、英語の習得を小学時に開始して学校教育で英語が定着していく過程で、中高生まだに文法中枢の活動がどのように変化するかについては明らかに

なっていなかった。そこで、英語の習得期間が異なる2群の中高生を対象として、英語文の文法性に関する課題を行っている最中の脳活動を fMRI で測定し、その個人差を詳細に分析した。その結果、習得開始が中学1年の群では成績に比例して脳の「文法中枢」の活動が高く、習得開始が小学1年の群では英語力が身につくほど文法中枢の活動が節約されていることが分かった。また、脳の「文章理解の中枢」の活動は、英語の文を処理する時間について両群で異なる相関性を示した。小学生から中高生にかけての今回の結果と、中学生から大学生にかけての既知の研究結果を合わせて考えると、外国語としての英語力の定着は習得開始の年齢だけでは説明できず、6年以上にわたる英語接触量の重要性が強く示唆される。本研究成果は、*Human Brain Mapping* 誌に発表された(2008年)。

## § 2 研究構想及び実施体制

### (1) 研究構想

以下に、6つのテーマに分けて具体的な研究構想とその進め方について述べる。

#### ① 言語機能の局在、および母語と第二言語の獲得メカニズムの解明(全グループ)

脳機能の無侵襲的計測法であるfMRIとMEGの技術を相補的に用いる可能性が数年前から指摘されてきたが、未だ本格的な運用は世界的にも限られている。本研究では、fMRIの高い空間分解能とMEGの高い時間分解能を統合するために必要な、ハードウェア・ソフトウェア両面からの技術開発を行うことで、脳における言語情報処理の流れを可視化することを目標とする。既に開始しているプロジェクトも含め、具体的な実験の計画を示す。

1) 母語の文法処理や意味処理などの言語モジュールの実体を明らかにするために、前頭前野の機能分化の研究を推進する。これにより、言語獲得装置の具体的なデザインが明らかになり、理論的なモデルへ適応することが可能になると考えられる。

2) 研究代表者のグループは、大脳皮質の領野間の機能的結合を明らかにする手法を新たに開発した。この手法をMRIによる神経線維束イメージング技術と組み合わせる方向で、継続して研究を進める。

3) 母語としての日本手話(Japanese Sign Language)の言語処理に伴う皮質活動を fMRI により計測し、音声提示による日本語の場合と比較検討する実験を現在進めている。これにより、自然言語の普遍性が解明できると考えられる。また、手話の文処理では、音声の場合と異なり、右脳の言語野が活動することが知られており、世界的な論争になっているが、その原因を明らかにすることも重要な目標である。

4) 第二言語の文法および文字の習得過程における脳活動を fMRI により計測し、言語獲得装置がどのように関与するかを検討する。特に、異なる教育法が習得過程に与える影響を解析する。

5) fMRI 実験で明らかになった脳部位や、失語症の責任病巣と機能の因果関係を明らかにするために、臨床研究も含めて、言語機能に選択的な障害が生ずるかを検討する。

#### ②言語獲得の感受性期、および獲得過程における複数の因子の解明(酒井グループ)

研究代表者は、東京大学教育学部附属中等教育学校の双生児研究委員会に定期的に参加して、現場の教師と討論を重ねながら、教育を科学の対象として研究していく上での問題点を1つ1つ克服してきた。中等教育の対象である中1～高3は思春期にあたり、発達過程でも重要な時期である。また、言語獲得の感受性期が思春期にあるという仮説を、レネバークらが提唱しており、学年の違いによって脳機能の変化に差が現れるかどうかを検討することは重要である。

さらに、双生児を被験者とすることで、遺伝因子あるいは環境因子の共有性が言語の獲得過程にどのような影響を与えるかを詳細に分析することが可能となる。具体的には、言語課題の成績変化において、双生児の間に優位な相関が見られるかどうかを最初の問題設定である。次に、脳の活動が変化した場合に、その変化量について双生児間で相関が見られるかどうかを重要な問題となる。十分な数の一卵性双生児と二卵性双生児の被験者が得られれば、遺伝因子と環境因子の分離が可能となるが、脳機能イメージングの効率から考えると、これはかなり実現が難しい。そこで、双生児内の相関と双生児間の個人差にどのような質的・量的な相違があるのかを明らかにすることを第1の目標とする。

#### ③言語教育による人間の脳の可塑性の可視化(酒井グループ)

上記のように、学校における言語教育と連携して、教育の効果を脳機能の変化として直接的にとらえることを目標とする。具体的には、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授業時間に実施し、その習得過程を脳活動の変化としてとらえることで授業法の検討に役立つ。期待される成果として、授業法の教育効果を脳活動の変化として評価するという全く新しい調査法が提案できる。具体的には、第二言語習得において文法規則の知識が自然に獲得されるかどうかを、成績の向上と脳活動の変化という両面から検討できる。

#### ④自然言語処理の開発による言語獲得モデルの構築(櫻井グループ)

(1) random indexing を用いた、単語の統計的情報の獲得を検討する。単語にインデックスを与え、その周囲に出現する単語の関係によって、意味や構文に関わる単語の特徴パターンを解析する。

(2) ランダム学習アルゴリズムを用いた、構文情報の獲得を検討する。線型閾値素子を用いた再帰型神経回路網を用いて、前項で得られた情報から構文的情報のみを抽出することを試みる。

⑤失語症における病態生理と責任病巣の解析(渡辺グループ)

脳の再学習機序を解明することを研究の目的とし、症例を用いたアプローチとして、脳卒中などで損傷され、機能障害を起こした脳が機能を回復してゆく過程を観察することにより、その回復機序を解明する試みである。その際に、失語症患者に適した同一の言語課題を開発する必要がある。また、この研究で明らかになった脳部位や失語症の責任病巣と機能の因果関係を明らかにするために、どのような言語機能に選択的な障害が生ずるかを検討する。

⑥拡散テンソルMRイメージング等の脳機能計測法パラダイムの開発(牧グループ)

(1) MRI による神経線維束イメージング技術の基礎的な開発を行う。モーション・アーティファクトおよび偽像を低減する画像再構成技術の開発、および渦電流による変位・伸縮・剪断歪みを補正する画像処理技術の開発を行い、脳画像への適用により有効性を確認する。

(2) トラッキング技術の開発により神経線維束の描出を行い、大脳皮質にある言語野間の解剖的結合を明らかにすることを目的とする。

(3) 光トポグラフィによる短時間刺激を可能とする高 S/N 計測を実現するため、短波長近赤外光による計測を行った。言語認識課題に伴うヘモグロビン濃度変化を従来手法と比較し、波長による散乱の違いを含めたモデルの再検討を行う。

(2) 実施体制

グループ名	研究代表者又は主たる共同研究者氏名	所属機関・部署・役職名	研究題目
酒井グループ	酒井邦嘉	東京大学・大学院 総合文化研究科・准教授	脳機能計測・双生児研究による言語獲得メカニズムの解明
櫻井グループ	櫻井彰人	慶應義塾大学・大学院 理工学研究科・教授	自然言語処理の開発による言語獲得モデルの構築
渡辺グループ	渡辺英寿	自治医科大学・脳神経外科・教授	失語症における病態生理と機能回復過程の解析
牧グループ	牧敦 山本由香里	日立製作所・基礎研究所・ 主管研究員 同研究員	MRI および光トポグラフィによる脳機能計測法パラダイムの開発

### § 3 研究実施内容及び成果

#### 3. 1 脳機能計測・双生児研究による言語獲得メカニズムの解明(東京大学 酒井グループ)

##### (1) 研究実施内容及び成果

#### 1. 言語の特異性と文法中枢のはたらき

##### 1-1. 言語獲得と認知学習

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。チョムスキーは、言語獲得の生得的なメカニズムが、一般的な認知学習のメカニズムとは全く異なるものであると主張した(言語の「領域固有性」)。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。

##### 1-2. 文法処理と文法中枢

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 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る一方で、言語機

能の中心として文法を位置づけて、fMRI の実験により両者を対比させた。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。文法判断課題と単語の記憶課題で脳の活動を直接比較したところ、ブローカ野のみに強い活動が観察された(図1)。従って、ブローカ野は、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世界で初めてのものであり、基本的な脳の機能が人間とサルで同じであるとする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(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。

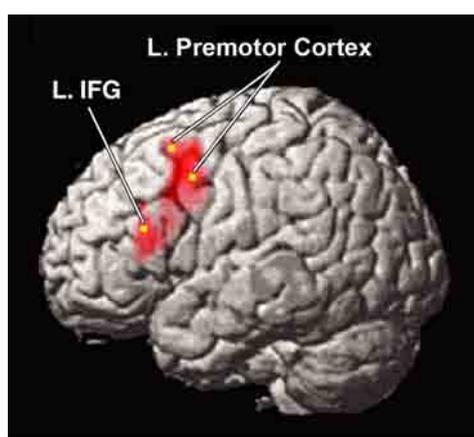


図1. 文法を使う言語理解の座「文法中枢」

左下前頭回(left inferior frontal gyrus: L. IFG)から左運動前野(left premotor cortex)にかけての活動領域が文法中枢にあたる。図の左が脳の前側。

## 2. 文法中枢における第二言語習得の初期過程

### 2-1. バイリンガルの脳活動

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、十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、2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を報告されている。しかし、その後この結果を再現する報告はなされていない。また、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や、習得時期が遅い方が活動が強まるという報告が現れて、母語と第二言語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。

## 2-2. 英語教育による脳活動の変化

われわれのグループは、英語の習得過程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。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カ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。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2A)。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。これら4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2Bに示すように、左脳のブローカ野を含む前頭葉(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2C)。

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2D)。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2E)。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。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。

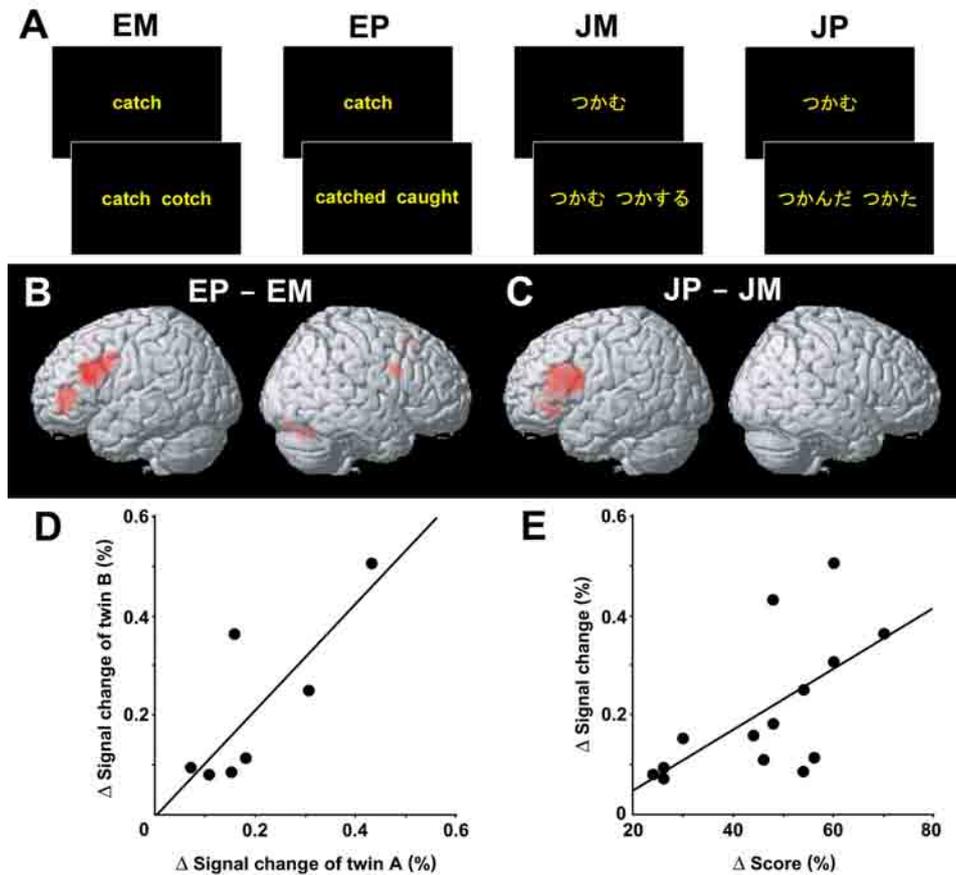


図2. 英語と日本語の文法処理に共通したブローカ野の活動

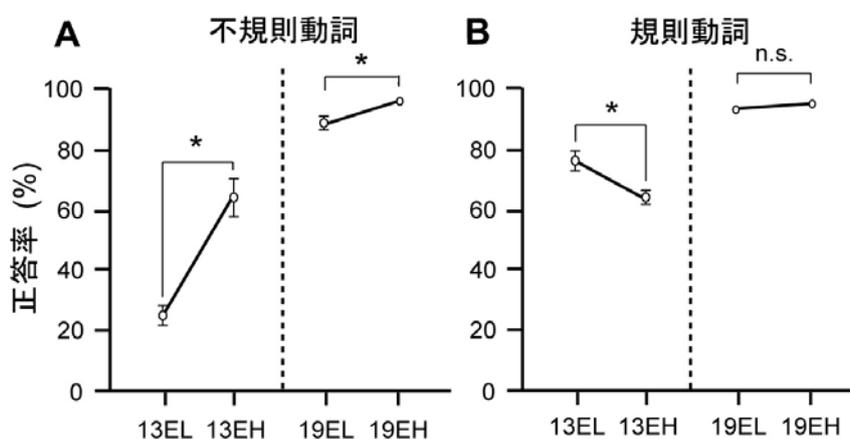
A) 英語による動詞のマッチング課題 (EM) と過去形課題 (EP)、および日本語による動詞のマッチング課題 (JM) と過去形課題 (JP)。動詞の現在形に続いて、同じ現在形またはその正しい過去形を選択する。B) 英語の過去形課題に選択的なトレーニング後の脳活動 (赤色の領域)。EP 課題遂行時の脳活動と EM 課題遂行時の脳活動を統計的に比較した結果を EP - EM と表記する。C) 日本語の過去形課題に選択的な脳活動 (JP - JM)。D) 英語の過去形課題においてブローカ野の活動変化 ( $\Delta$  Signal change) が示す、双生児 (横軸の A 児と縦軸の B 児) のペア間での相関。E) 英語の成績の向上 ( $\Delta$  Score) に比例したブローカ野における活動増加。

### 3. 文法中枢における第二言語習得の定着過程

#### 3-1. 英語の熟達度

上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才)を対象として、同様の英語の過去形課題をテストした。すべての参加者は、海外の滞在経験がなく、中1(12才)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)と中学生のグループ(13)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1つの指標とした(図3A)。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、比較的易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3B)。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分かる。このように、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。



## C

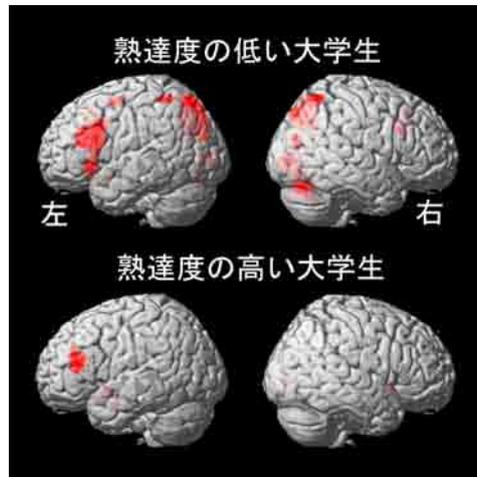


図3. 中学生と比較した大学生の英語の熟達度の上昇

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(赤色の領域)。熟達度の低い大学生(19EL)に比べて、熟達度の高い大学生(19HL)の方が著しく脳の活動領域が減少していることが分かる。

### 3-2. 熟達度による脳活動の違い

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2の13才の結果と同様に、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(19HL)の方が著しく脳の活動領域が減少していることが分かった(図3C)。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。

この知見は、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。以上の結果は、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。

### 3-3. 第二言語の習得過程における脳活動の変化

2-2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。これに対して3-2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。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(図4)。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。

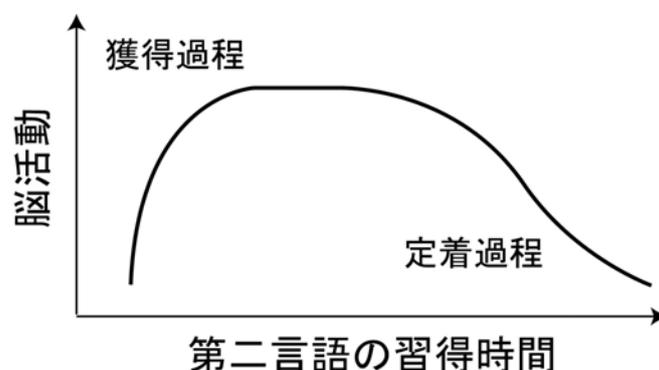


図4. 第二言語の習得過程における脳活動の変化

## 4. 人間の言語中枢の同定

人間の言語はさまざまな要素から成り立っている。文法を使って文章を理解する時と、単語の意味が分かり音韻(アクセントなど)を聞き分ける時とでは、それぞれ脳の異なる部分が必要となることを突き止め、左脳の「言語地図」を作成した。この知見は、2005年11月4日発行の *Science* 誌に発表された。

左脳で言語をつかさどる領域は「言語野」と呼ばれるが、ブローカ野やウェルニッケ野のように大まかな区分しか分かっていなかった。延べ約70人の参加者に対し、文法知識や文章理解、単語やアクセントの正誤などを問う問題を解いている時の脳の活動を fMRI や TMS などを用いて調べた。

その結果、例えば文法について判断する時は前頭葉下部が、音韻について判断する時は側頭葉上部が活発に働き、その活動パターンを地図にすると、文法・文章理解・単語・音韻(アクセント

など)の四つの中枢に分けられることが明らかになった。前頭葉には文レベルの言語処理に必要とされる「文法中枢」と「文章理解の中枢」があり、側頭葉から頭頂葉にかけての領域には、単語レベルの言語処理に必要とされる「音韻」と「単語」の中枢がある。細分化した言語地図を作ることで、言語障害が脳のどの部分と関連するかが明らかになる可能性があり、語学学習の成績を脳活動から評価する時にも役立つと考えられる。

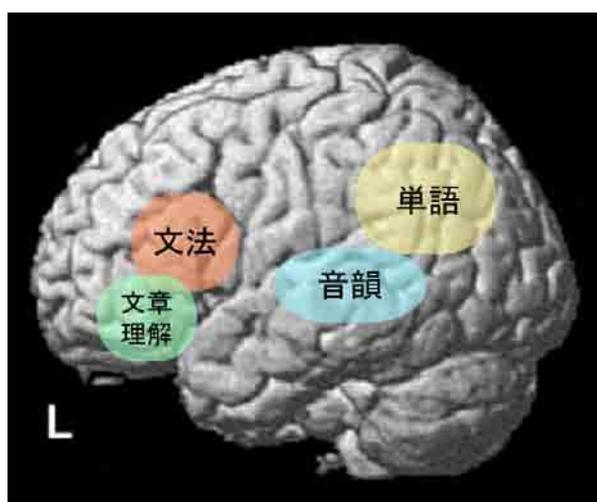


図5. 人間の左脳の言語中枢

## 5. 英語力の個人差に関係する脳部位

この調査の参加者は、日本語を母語とする右利きの中高生30名で、すべての参加者とその保護者からインフォームド・コンセントを得て調査を行った。そのうち18名は東京大学教育学部附属中等教育学校の生徒で、英語の習得開始が中学1年である生徒のみを対象とした。残り12名は加藤学園暁秀高等学校・中学校の生徒で、英語で一般教科を学ぶ日本初の「英語イマージョン・プログラム」(1日の50-70%が英語での授業、残りの時間が日本語での授業)を実践している加藤学園において、暁秀初等学校の1年より継続してこのプログラムに参加している生徒を対象とした。これらすべての参加者は、海外の長期滞在経験がない。

本研究で用いた2つの言語課題は、英語の文を文字で提示して、文法的に正しい文かどうかを答える「文法課題」(Esyn: English syntactic task)と、同じ文で用いられている単語の綴りが正しいかどうかを答える「スペリング課題」(Espe: English spelling task)である。これらの課題を行っている時の脳活動を fMRI で計測して、「文法課題」に対する脳活動から「スペリング課題」に対する脳活動を差し引くことにより、文処理に選択的な脳活動を抽出した。

東京大学教育学部附属中等教育学校の中高生(習得開始が中学1年の「短期習得群」)に対しては、英語動詞の文法的な使用法に関するトレーニングを2ヵ月間の授業時間中に実施して、これらの課題を行っている最中の脳活動の変化をトレーニングの前後でfMRIによって計測した。また、加藤学園暁秀高等学校・中学校の中高生(習得開始が小学1年の「長期習得群」)に対しては、トレーニングなしで同じ課題を行っている最中の脳活動を fMRI によって測定した。トレーニング後の短期習得群の成績(平均値)は長期習得群の成績と等しいため、両者に見られた脳活動の違いは、成績や対象年齢からは説明できない。

その結果、文処理に選択的な脳活動が、左脳の前頭葉下部にある「文法中枢」(ブロードマン45野)と、この文法中枢の腹側部に位置する「文章理解の中枢」(ブロードマン47野)の両方に観察された(図6)。これらの中枢は、日本語や日本手話を母語とした時の同様の言語課題で報告されているこれまでの知見と一致する。また、文法中枢での脳活動は、文法課題の成績について短期習得群では正の相関(活発化)を示し(図7)、長期習得群では負の相関(非活発化)を示した(図8)。さらに、文章理解の中枢での脳活動は、英語の文を処理する時間(反応時間)に対して短期習得群では正の相関を示し(図9)、長期習得群では負の相関を示した(図10)。これは二重の相関の逆転現象である。なお、本実験では反応時間は成績と全く無関係であった。以上の現象は、英語力がこれら2つの言語中枢の複合的な機能変化によって担われていることを示す、画期的な発見である。

本研究チームが中学生および大学生を対象にして行ってきたこれまでの実験成果なども総合すると、英語習得の初期に文法中枢の活動が高まり、中期にその活動が維持され、文法知識が定着する後期には活動を節約できるように変化すると考えられる。今回、英語の習得期間が異なる2群の中高生を対象として、小学生から中高生にかけての英語習得にも同様の文法中枢の機能変化が明らかになったことにより、外国語としての英語の定着は習得開始の年齢だけでは説明できず、6年以上にわたる英語接触量の重要性が強く示唆される。こうした長期にわたる英語習得の過程が、文法中枢および文章理解の中枢のダイナミクスとして観察できるというこの新しい成果は、広く教育の見地からも重要である。

## Esyn - Espe: Test 2

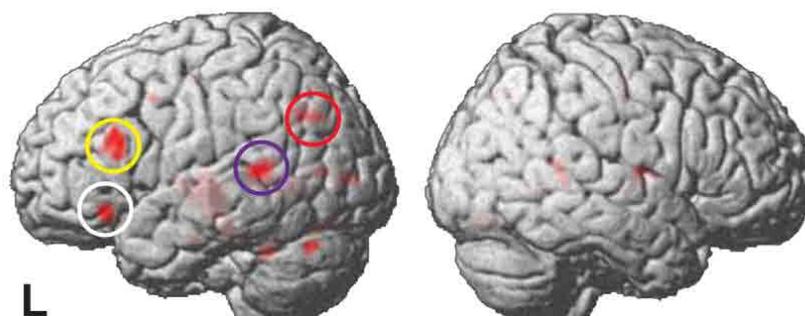


図6. 英語の短期習得群が示した文処理に選択的な脳活動(トレーニング後)

左脳の言語野に局在した活動の上昇(赤の濃淡)が観察された。特に、「文法中枢」の活動(ブロードマン45野、黄の○)と「文章理解の中枢」の活動(ブロードマン47野、白の○)が注目される。

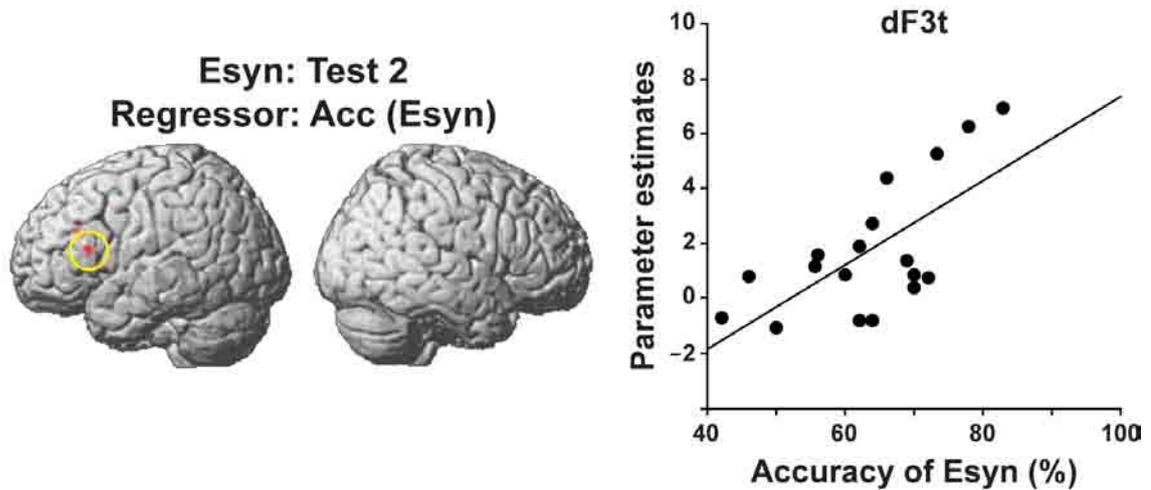


図7. 英語の短期習得群が示した脳活動(トレーニング後)と文法課題の成績との関係

文処理に選択的な「文法中枢」の活動(dF3t、黄の○)が、文法課題の成績と正の相関を示した。グラフの黒点は、それぞれ短期習得群の1人を表す。

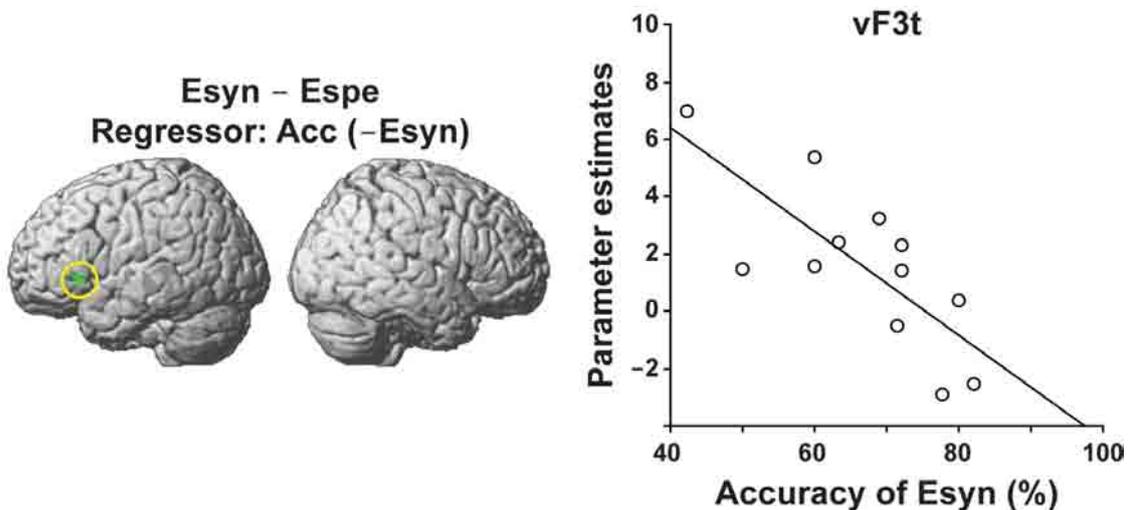


図8. 英語の長期習得群が示した脳活動と文法課題の成績との関係

文処理に選択的な「文法中枢」の活動(vF3t、黄の○)が、文法課題の成績と負の相関を示した。グラフの白点は、それぞれ長期習得群の1人を表す。

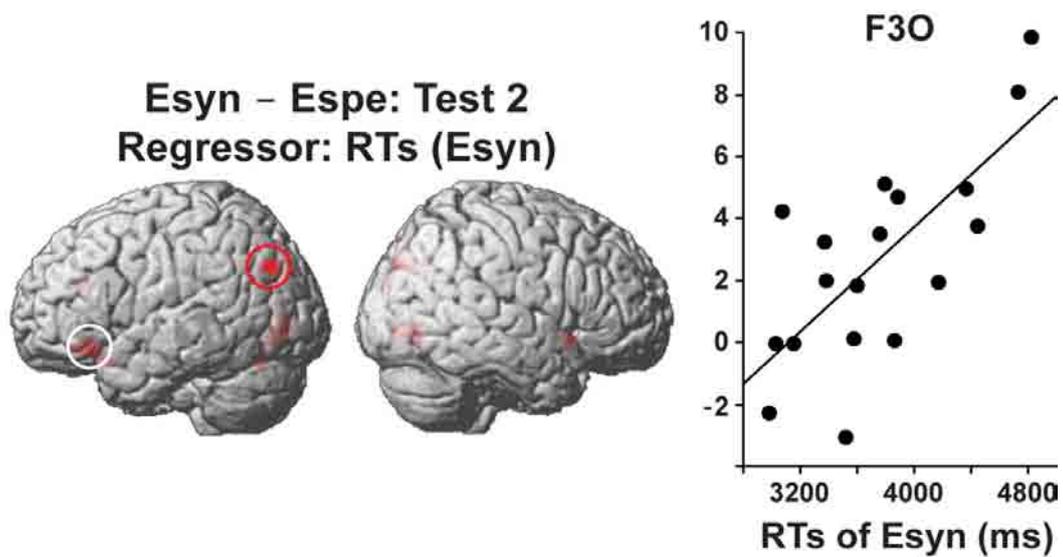


図9. 英語の短期習得群が示した脳活動と文法課題の反応時間との関係

文処理に選択的な「文章理解の中核」の活動(F30、白の○)が、英語の文を処理する時間(反応時間)と正の相関を示した。角回の活動(ブロードマン39野、赤の○)も同様の正の相関を示した。グラフの黒点は、それぞれ短期習得群の1人を表す。

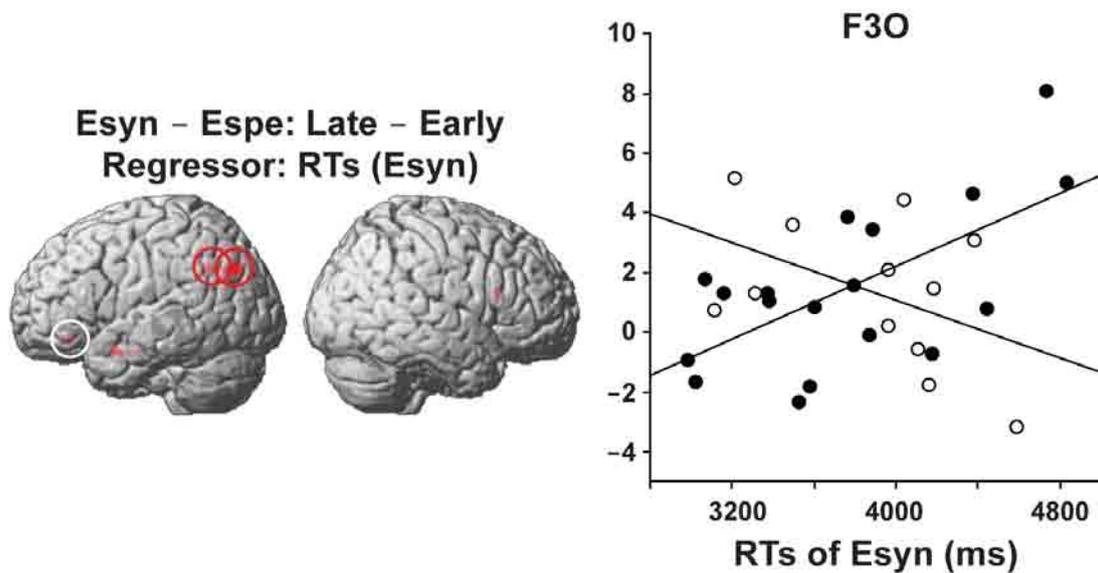
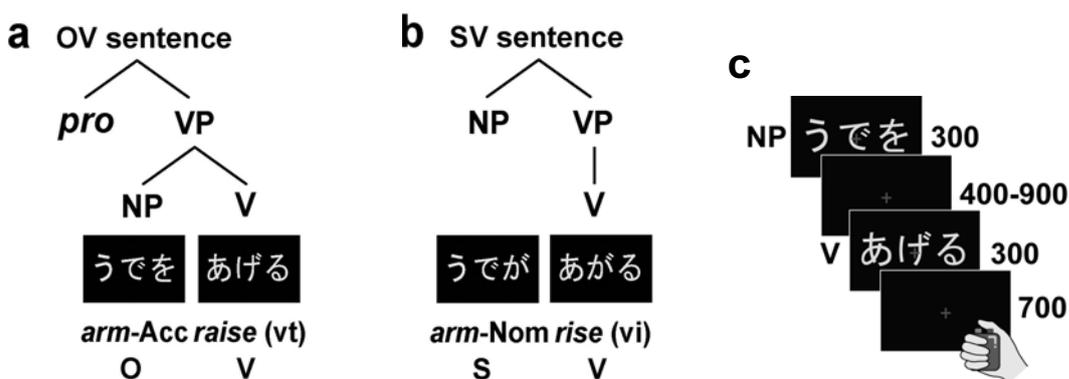


図10. 英語の短期習得群と長期習得群が示した脳活動と文法課題の反応時間との関係

文処理に選択的な「文章理解の中枢」の活動(F3O、白の○)が、英語の文を処理する時間(反応時間)に対して、短期習得群と長期習得群では相関の逆転を示した。角回の活動(赤の○)も同様の相関の逆転を示した。グラフの黒点はそれぞれ短期習得群の1人を表し、白点はそれぞれ長期習得群の1人を表す。

## 6. MEG を用いた文の統語構造の時間的情報処理の解明

文解析における統語構造の重要性は言語学において長らく強調されてきたが、一方で文中の語句の連なりが語彙意味の連合や統計によって予測可能であるとする線形順序モデルも広く受け入れられてきた。我々は最小対パラダイムを用いて、統語課題と意味課題を遂行中の参加者の脳活動を MEG により計測した。目的語・動詞 (OV) 文 (図11a) あるいは主語・動詞 (SV) 文 (図11b) を文節毎に提示して、動詞に対する脳活動を解析の対象とした(図11c)。その結果、OV 文(正文)に対する有意な反応が左下前頭回三角部 (F3t) において動詞提示後 120-140 ms で観察され、この成分は統語課題に選択的であった(図11d)。この早いタイミングでの左 F3t の活動は、動詞の統語情報に関する予測的な効果として考えられ、連合記憶や統計的な要因では説明ができない。また、左島皮質において 150-170 ms で観察された反応は、OV 文の統語構造の処理に選択的であった (図11e)。この活動は、SV 文より複雑な OV 文の統語構造の処理を反映していると考えられる。一方、左内側前頭皮質と下頭頂領域において 240-280 ms で観察された反応は、それぞれ統語的非正則性と他動詞性に関連していた。これらの結果から、階層的な統語構造と課題に関連した情報処理過程で協働する複数の領域のダイナミクスが初めて明らかとなった。本研究成果は、*NeuroImage* 誌に発表された(2009年)。



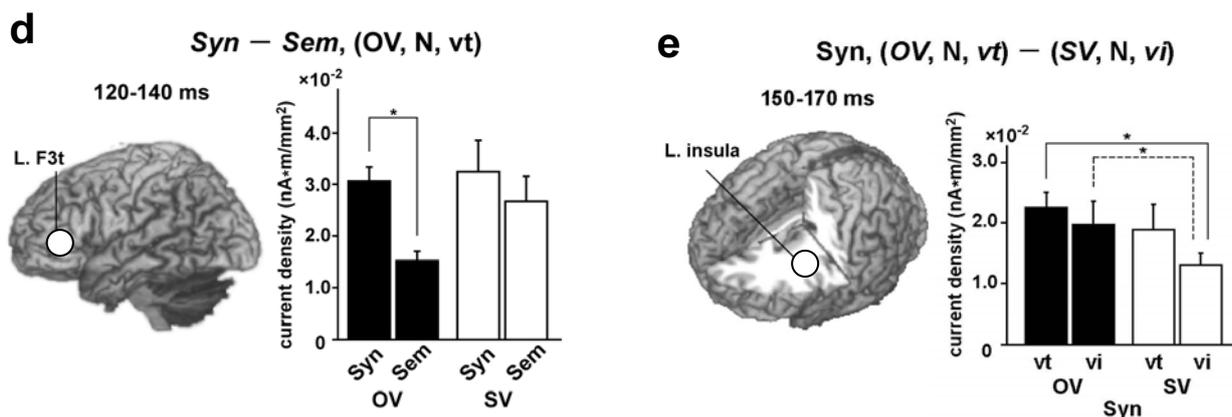


図11. 文の統語構造に選択的な「文法中枢」の早期活動成分

(a) 他動詞(vt)を含む目的語・動詞 (OV) 文の構造。pro は省略された主語代名詞、VP は動詞句、NP は名詞句を表す。(b) 自動詞(vi)を含む主語・動詞 (SV) 文の構造。(c) 各課題における一回の試行。右の数字は提示時間 (ms)。(d, e) 各条件に選択的に関わる皮質の活動 (corrected  $P < 0.05$ )。黒の棒グラフは OV 文、白の棒グラフは SV 文における脳活動(電流密度)を示し、棒グラフ上の実線と点線は、それぞれマッピングに用いた比較とそれ以外の比較を表す。

## (2) 研究成果の今後期待される効果

科学技術や社会における本研究の意義および将来展望を、次の3点に要約する。

### 1) 言語の獲得機構の解明

英語力の個人差の要因を脳科学の手法で定量的に計測したことにより、言語獲得のメカニズムの解明がさらに進むものと期待される。英語の習得開始の年齢が異なっても、外国語としての英語の定着が同様に生じるという知見は、外国語習得の初期に生じる不安感の軽減に役立ち、学習法の効率を評価する際にも役立つと考えられる。

### 2) 語学教育の改善

文の理解と単語の羅列の記憶が、脳で全く異なる領域で処理されているという成果は、単語の丸覚え中心の語学教育から、語順の文法と理解を重視する言語習得法への移行を強く促すものである。複雑な文法知識をいかに効率よく身につけるかは、第二言語の教育が直面する壁の1つである。今回の研究から、最適な教育方法を選択するためには、学習の到達度を脳の働きとして客観的かつ直接的に評価することが役立つと考えられる。このような客観的な教育評価法に基づく新しいコンセプトの教育方法が今後重要になっていくと思われる。

### 3) 言語障害の機能回復への応用

本研究は、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、痴呆のような全般的な知的障害と言語障害の関係をj知る上でも役立つと期待される。さらに、言語障害の機能が回復する際に、左前頭葉の活動がどのように変化していくかをモニターすることにより、リハビリテーションに役立つ新しい知見をもたらす可能性がある。

このように、英語の習得期間の違いが個人の脳活動の変化として、科学的にそして視覚的に捉えられたことは意義深い。従来、英語力の個人差は、対象年齢や課題の成績などの要因から分離することが困難だったが、今回のfMRIを用いた方法は、個人の学習の到達度を直接的に測定できることを示すものとして、これからの教育の評価の方法やあり方に大きな影響を与える可能性がある。今後、この研究成果が突破口になって言語の獲得機構の解明が進み、語学教育の改善につながることを期待したい。

## 3. 2 自然言語処理の開発による言語獲得モデルの構築(慶應義塾大学 櫻井グループ)

### (1) 研究実施内容及び成果

#### (1.1) 前書き

本研究においては、脳内言語処理機構を合理的に説明する様々なモデルを組み立てること、またその妥当性を検証することを目的としてきた。モデルの枠組みとしては、脳のモデルであるために、ニューラルネットワークを第一に考えた。ただし、そこで行われる計算過程のモデルとして、統計的手法や機械学習的方法を考慮にいれ、考察、実験を行った。

言語処理機構のモデルを考察するにあたって、以下の諸点を考慮した。

- a 言語学・認知科学から得られる制約に基づき最小・必要な言語機能であって脳科学的知見と整合するものを求め、これを基盤的構文機能と考え、モデル化を進める。基盤的構造の一つとして、再帰的構造を上げる。再帰的構造は、Chomsky によれば、人間という種のみがもつ能力に依存している構造であり、言語の無限生産性を実現する要素である。言語の無限生産性の他の一要素として、統語範疇の獲得に関わる systematicity を取り上げる。
- b コンピュータ科学、自然言語処理研究の成果で得られた、効率的とされる構文解析手法に基づく構文解析手法をモデル化し、その学習・実行を統計的手法・機械学習的手法のもとで行う。ただし、ニューラルネットワークでモデル化可能な形で行う。本質的には、記号処理である構文解析が、連続近似可能な機構を用いて実現可能であるモデル化を目指す。
- c 意味解析を、統計的手法・機械学習的手法を併用し、コンピュータ科学・自然言語処理研究

の成果を援用して、モデル化する。特に構文解析と統一した手法で行うことを目指す。必然的に、構文解析と同様に、ニューラルネットワークによるモデル化可能な形で行うことになる。

## (1.2) 概要

この成果の概略をまず述べ、その後、補足する形で詳細な部分を述べる。

a 再帰的構造をニューラルネット内に実現することは可能であるが、極めて限られることが示された。完全な証明は未完であるが、ある個数の中間素子を持つニューラルネットワークに対しては、厳密な証明を行った。実現可能な再帰構造は、finite-turn counter と名づける、有限個数のみ計数できる計数器であり、また、可能無限の個数が計数できる counter は実現不能である。この可能性は条件をかなり緩めた上での可能性であり、実際上は、複数回往復する counter は設計が難しい。Counter は stack の下位機能であるので、counter が実現できなければ、stack も実現できない (Iwata, Shinozawa, and Sakurai (2007), Shinozawa and Sakurai (2008))。

一方、人間の言語は原理的に無限の深さの埋め込み構造を持つ文を含む。実際の処理には補助道具(紙と筆記用具)が必要となるが、その埋め込み構造の本質を脳が理解していることは確かである。この能力差は、ニューラルネットワークが記号処理を行っているか(連続値の処理を行っている)に掛かっている。我々の証明が成立しないのは、(ある処理、例えば、stack にデータを push する処理に)厳密な逆関数が存在する場合である。厳密な逆関数が実現できれば、stack が実現できる。しかし、逆関数の存在は、構成的に構成するニューラルネットワーク(一般に言う feed-forward 型)では、線形の場合を除いて、保証されない。実際のニューラルネットワークでも存在しない。

ニューラルネットワークで stack を実現するには、従って、ニューラルネットワークに記号処理を行わせ、外部の空間または stack 処理を行う制御空間以外の領域に可能無限な補助記憶装置を用意し、それに対する push/pop 操作として、学習・獲得するしかないことになる。

b 構文解析手法に関しては、上記(1)の結果から分かるように、記号処理が必要である。しかし、一方、統計的処理が必要なことは、近年のコーパス言語学が示すところである。そこで、本研究においては、構文解析アルゴリズムが何らかの形で学習可能であることを、量・内容において実データに近いデータに対して、示すことを念頭に置いた。

最初の試みとして、構文解析手法として比較的単純かつ確実な動作を行う shift-reduce パーザを獲得する実験を行った。実験には、帰納論理プログラムである CHILL を用いた。また、コーパスには ATIS を用いた。人間の文法獲得方法に似せるため、学習単位を統語範疇とし、事例は正例(合文法的な文)のみとし、学習アルゴリズム内で、統語範疇レベルでの負例を自動生成する方法を案出した。これにより、構文解析の標準的な評価規準で 80%程度の正解率が得られた。

次にこのモデルをニューラルネットワークに写像する方法を研究した。構文解析的アルゴリズムと

ニューラルネットワーク動作を橋渡しする数学的モデルとして、有限状態オートマトンを用いることを試みた。有限状態オートマトンは、理論的には、ニューラルネットワークで近似学習が可能であり、シミュレーションでも、一応、学習可能なことが示されているからである。

有限状態オートマトンの学習アルゴリズムは、通常、記号的に記述され、適当な制約のもと最小状態オートマトンを構築する。しかし、言語のように隠れ状態を用いて記述される規則を学習するには、非常に遅い。音声認識等の分野では、頻度(確率)に基づく方法が考案されている。本研究においては、一度に複数個の(各終端記号に対応して設ける)オートマトンを一度にしかし近似的・漸増的に学習させるため、強化学習を用いた学習を試みた(Shinozawa and Sakurai (2005), 石川他 (2005), 石川他(2006), Ishikawa et al.(2007))。

一方、実用に近い構文規則の学習可能性を示すため、CCG (combinatory categorical grammar) の学習アルゴリズムを検討している。CCG に基づく構文法学習アルゴリズムとしては、(他の mildly context sensitive な言語、例えば、TAG (tree adjoining grammar) でも同様のアプローチが採用される) super tag と呼ばれる構文構造を内包した tag を、POS tagger に類似した方法で、各単語に(複数個の候補を)割り当て、その後、それら候補の組合せの中から、合文法的に文に至る構文木が構成できる組合せを探索する方法が取られる。この2段階の処理構造は、特に1段目である super tagging はニューラルネットワークによる実現が可能であり(現在は、log-linear モデルによるものが試みられている。下述するSVMによる実装も可能である)、一方2段目は機械的な整合性チェックとすれば、超並列にやはりニューラルネットワークによる実現が可能と考えられる。

そこで、実際に、ニューラルネットワークに自然に写像できる、super tagger の検討に入っている。

c (構文解析に伴う)意味解析の基盤である機構の一つに意味タグ(tag)付けがある。これは、いわゆる主語や目的語に相当する句が、文中の動詞句に対し、意味的にどのような関係にあるかを示すタグを、その句と動詞句との組合せに対して付与する機構である。過去においては記号処理的な研究が多く行われてきたが、近年においてはコーパスを用いた研究が行われるようになってきた。本研究においては、FrameNet II 及び EDR コーパスを用いて、ニューラルネットワークに写像可能な機構を有するアルゴリズムの案出を目指して、研究を行った。

FrameNet 等に基づく意味タグ付け等においては、SVM(support vector machine)という、基本的には単語等の出現に統計性を仮定しない(しかし、記号的手法ではない)機械学習手法が、統計的な手法より高い精度を達成している。なお、POSタグ(part of speech tag, 品詞)付けについては、統計的手法が多少優位であるが、意味タグ付けについては、研究途上である。また、SVM を脳のモデルとすることは、その学習手法が2次計画法に基づくものであるだけに、困難である。

本研究においては、単語やタグの組合せの出現度数を計数することによって学習過程が表現できる手法で精度のよいものとして、AODE(averaged one-dependence estimator) を用いた。コーパスとしては、FrameNet 及び EDR コーパスを対象とした。予備実験では、予想通り SVM の精度が高

いが、その違いは小さかった。しかし、AODE を全面的に採用すると、学習速度が却って SVM より遅くなるため、本実験では、タグ付けを、タグを付与するか否かの判断プロセスと付与するタグを決定するプロセスの2段階に分割することとした。これにより大規模な実験が可能となり、ニューラルネットワークに写像可能な方法で、高精度な意味タグ割り当てが可能であることが確認された(Shibui and Sakurai (2004))。

### (1.3) 補足

詳細説明を補足的に以下に記す。

#### (1.3.1)ニューラルネットワークによる、言語処理機能のモデル化

##### (1.3.1.1) 再帰構造

文の構文を解析する手法が、ニューラルネットワークで実装され(すなわち、脳の簡易モデルとしてのニューラルネットワークで、言語処理の基盤機能の一つである構文解析が可能であるとする)、文を単語の連なりと考え、構文解析器の行う情報処理は、時系列処理でモデル化する。時系列処理を行うニューラルネットワークは、長さ上限を設けないとすると、出力値を入力値に戻す結合をもった、リカレントニューラルネットワーク(の一般形)となる。このような、ニューラルネットワークは、動的システムとして記述される。

$$\mathbf{s}_{n+1} = \sigma(\mathbf{w}_s \cdot \mathbf{s}_n + \mathbf{w}_x \cdot \mathbf{x}_n)$$

$$N_n(\mathbf{s}_n) = \mathbf{w}_{os} \cdot \mathbf{s}_n + \mathbf{w}_{oc}$$

そうすると、自由にstack操作ができるための条件は、この動的システムの安定集合・不安定集合を用いて記述することができる。まず、関数  $f$  の局所安定・不安定多様体は

$$W_{loc}^{s,f}(q) = \{y \in U_q \mid \lim_{m \rightarrow \infty} \text{dist}(f^m(y), q) = 0\}$$

$$W_{loc}^{u,f}(q) = \{y \in U_q \mid \lim_{m \rightarrow \infty} \text{dist}(f^{-m}(y), q) = 0\}$$

と定義される。ただし、 $U_q$  は  $q$  の近傍であり、 $\text{dist}$  は距離関数である。そうして、大域的安定・不安定多様体は次のように定義される:

$$W^{s,f}(q) = \bigcup_{i \geq 0} f^{-i}(W_{loc}^{s,f}(q))$$

$$W^{u,f}(q) = \bigcup_{i \geq 0} f^i(W_{loc}^{u,f}(q))$$

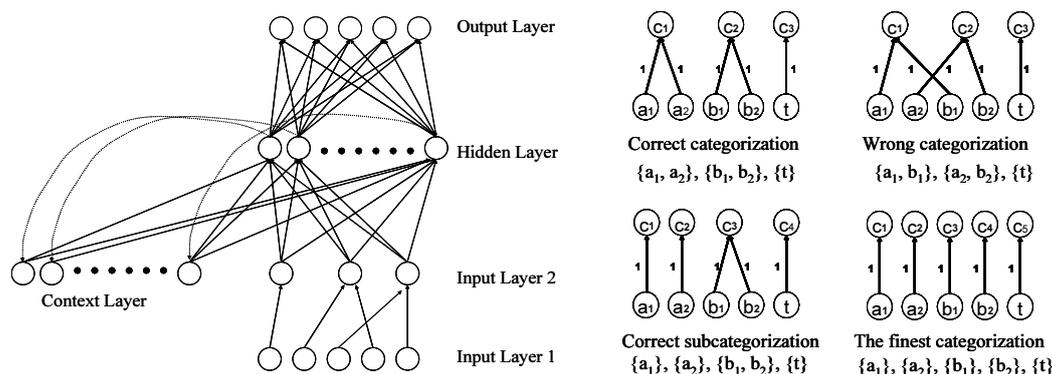
以上の安定・不安定多様体の存在は  $f$  を stack の下位機能である counter の +1 (stack の push の下位機能) または -1 (stack の pop の下位機能) に対応させると、Guckenheimer & Holmes (1997) の Stable Manifold Theorem for a Fixed Point により、保証される。この時、stack が自由に操作できるための条件は、 $P_\infty \subseteq Q_\infty \cup \bigcup_{q \in Q_\infty} W^{u,-1}(q)$  と書ける。ただし、 $P_\infty$  は、+1 を無限に行ったときの極限の点集合であり、 $Q_\infty$  は -1 を無限回行ったときに初期状態にたどり着く点集合を表す。この

条件は、「 $P_0$  はある不安定集合中に含まれなければならない」ことを意味する。不安定集合は測度ゼロのため、言い換えれば、学習によって、この状態に達することは不可能であるし、近似状態に達するのも困難であるということである(Iwata, Shinozawa, and Sakurai (2007), Shinozawa and Sakurai (2008))。

### (1.3.1.2) Systematicity について

本研究では、言語の systematicity がニューラルネットワークにより学習可能であるか否かの検討を行った。言語の systematicity は、通常、品詞を同じくすれば単語を入れ替えても合文法性(構文的に正しい文か否かという性質)は変わらないこと、すなわち、合文法的な文において、ある単語を他の品詞を同じくする単語に替えても文であり続ける性質を言う。人間の幼児はかなり早くからこの性質を知っているように思われる。すなわち、生得的なもののように思われる。

そこで、制約の少ない一般的なニューラルネットワークとその学習機構で, systematicity が学習できるかどうか、言語機序の一つが生得的であるか否かの議論の傍証にできると考え、その研究が行われている。我々は、通常のニューラルネットワークではその学習ができておらず、しかし、範疇化を実現する極めて原初的な機構を導入すれば、学習可能であることをしめた。前者は、過去学習ができたとする実験を追実験し、結果を検証することにより、後者は、新たな誤差評価関数を導入することにより、検証したものである(Suhara and Sakurai (2006), Shinozawa and Sakurai (2008))。次左図は、使用したニューラルネットワークであり、下右図は、このネットワーク中の input layer 1 と input layer 2 の間のネットワークの候補である。この中から、学習データ中で最適なものを選択する。一般の学習機構では、過学習が起こるが、本機構では、そのようなことは極めて稀であることが示せる(範疇化の機構が簡単なため、事実上過学習が発生しないのである)。



### (1.3.2) 構文解析機構の検討

実験では、構文規則を構文解析木(パーザ)の動作として表現することを学習することとした。その一つの理由は、構文解析は(試行錯誤を含む)動作の連続であり、それを動作命令の列として

表現することができる一方、人間の脳においても、記憶形態として動作記憶があり、それは小脳に記憶され自動反復的動作に特徴があることから、構文規則学習を動作学習のモデル化として記述することを試みるべきだと考えたからである。

パーザとしては、LRパーザの最も簡単なものであるLR(0)パーザを想定した。学習アルゴリズムは、まず、ILP (Inductive Logic Programming) を試みることにした。これは、アルゴリズムとしては記号処理の高度なものを含むため、直接的にはニューラルネットワークで実現するのは困難であるが、今回の課題に対しては、基本的な汎化しか行わず、従って、ニューラルネットワークに置き換えることが可能であろうと考えたからである。コーパスとしては、会話英語文とその構文木の対で構成されたATIS コーパスを用いた。

ATIS コーパス中の 350 文で学習し、それに含まれない 80 文でテストして、正解率を測定した。唯一つの解析木を出力しかつそれが正しい割合は 21%であった。通常行われる緩い評価基準では正解率が 80%弱となる。確率構文解析器を用いれば後者の値は 90%前後となるので、これは低い値である。

確率構文解析器の学習では、仮説空間中で、事例(今の場合、学習に用いる文)間の距離という概念が暗黙に導入され、本学習事例には正しい文(正例)しかないにも関わらず、間違った文(負例)に関する情報が暗黙のうちに構成される。しかし、本学習方法では距離概念がなく、学習事例(正例)以外は、すなわち、すべて負例に扱われてしまう。

これを緩和するために、学習事例において、文を構成する一つ以上の単語を別の品詞の単語に替えたものを負例として新たに含め、改めて学習実験を行った。この結果、唯一つの解析木を出力しかつそれが正しい割合は、42%であり、通常行われる緩い評価基準で 90%弱の正解率となった。

以上から、LR(0)であれば、確率的構文解析でなくとも、負例を適宜補うことにより、構文解析動作で構文規則が学習できることがわかった。CCG (combinatory categorial grammar)は、文に対し、次図のような解析結果を与える文法である。

Dr.	Jekyll	saw	and	Mr.	Hyde	ate	a	lemon
NNP	NNP	VBD	CC	NNP	NNP	VBD	DT	NN
N/N	N	(S[dc1]NP)NP	conj	N/N	N	(S[dc1]NP)NP	NP[bb]/N	N
<hr/>				<hr/>			<hr/>	
N				N			NP[bb]	
<hr/>				<hr/>			<hr/>	
NP				NP				
<hr/>				<hr/>			<hr/>	
S[XQ](S[XQ]NP)				S[XQ](S[XQ]NP)				
<hr/>				<hr/>			<hr/>	
S[dc1]NP				S[dc1]NP				
<hr/>				<hr/>			<hr/>	
				(S[dc1]NP)(S[dc1]NP)				
<hr/>				<hr/>			<hr/>	
				S[dc1]NP				
<hr/>				<hr/>			<hr/>	
				S[dc1]				
<hr/>				<hr/>			<hr/>	
				S[dc1]				

各単語に割り振られる super-tag (complex category) は、文を構成するための構文情報をかなり含んでいる。従って、これを正しく割り当てることは、文全体の構文情報の下位情報を与えることになり、これを行うことは難しく、しかし、もし高い確率で正しい割り当てを行うことができれば、最終的な構文解析は効率的に行えることになる。

通常は、この割り当ては、確率モデルである log-linear モデルを用い、多数の例から帰納している。しかし、それはニューラルネットワークモデルにするには困難なため、また、学習に反復計算が伴うため(これはアルゴリズムの問題ではなく、モデルそのものの性質である)、精度は多少低くても(精度の低さは後段の構文解析をトリビアルに並列化することで対処できるので)学習機構が簡便な方法を考え、実験を行っている。

現在、ほぼ計数するだけの方法で、単語単位では 85%以上の正解率(単語ごとに一個の super-tag を推定するときの正解率)を、上位 5 位まで割り当てたときの文正解率は 80%以上の、手法を得た。なお、データは CCGbank を用いている。

### (1.3.3) 意味解析について

構文解析と類似の方法で意味解析を行うことを目指している。この場合の構文解析手法は、(1.3.2)で述べたように、super-tag を割り当てるフェーズと super-tag 組合せの中から合理的なものを選択するフェーズとからなる構文解析手法である。そして、意味解析は、意味 tag を各単語に割り当てる方法をとることになる。

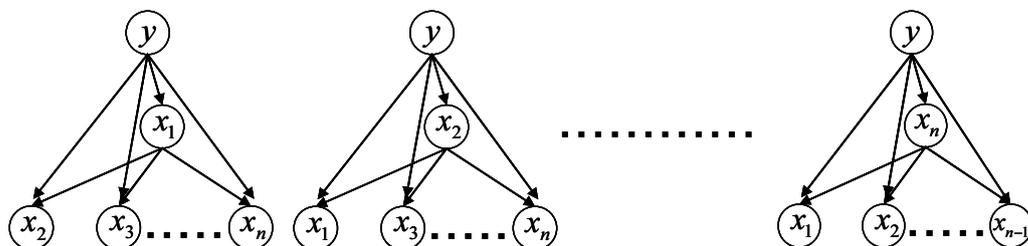
Tag の割り当ての学習には、機械学習の様々な手法が用いられるが、生成モデル的手法としては、log-linear モデルを用いた事後確率最大推定、判別モデル的手法では SVM (support vector machine) を用いた手法が、精度がよいためよく用いられている。純粹にコンピュータサイエンスとして精度を追求するには、これらがよいのであるが、意味解析モデルのニューラルネットワークへの写像を考慮すると、より単純なアルゴリズムによるものの方に現実性がある。そこで、(1.3.2)でも述べたように、構文解析には単純な計数に基づく方法を考えている。

意味解析においては、このような単純な方法では精度が不足すぎるため、計数に基づく方法ではあるが、変数間に依存関係を導入した ODE (one-dependence estimator) を複数個組み合わせる AODE (averaged ODE) を用いた。ODE は次図に示したものの一つであり、属性変数間の確率的依存関係に、naive Bayes に用いる条件付独立性を少し弱め、一属性変数を親に持つことを許した依存グラフをもつものである。AODE は、可能なすべての ODE を平均化するものである。

ただし、AODE をそのまま用いると、単語数文の ODE を用意する必要性による速度低下 (single CPU の計算機では顕著。ただし、大規模並列化は可能である)に対処するため、実験ではやむを得ず、SVM と組み合わせることとした。なお、現在では、SVM を用いない方法 (map and reduce を用い multicore CPU で高速化を図る。脳のモデルとしての妥当性を考慮している)を検討している。

SVM を用いた意味タグの割り当て実験では、FramNet II のデータを用いた。単語当たりの正解率（割り当てた意味タグのうち正しいものの割合）は 80%前後、網羅率（意味タグを付与すべき単語のうち、どの程度の意味タグを割り当てたかの割合。意味タグ割り当ての場合、割り当てないという選択肢があるため、この指標が必要である）は 75%前後、文正解率（すべての意味タグが正しく割り当てられた文の割合）は 50%前後であった。なお、文正解率が相対的に高いのは、単語に対するタグ割り当ての正しさには強い相関があるためである。すなわち、一文の処理において、誤るときは続けて誤り、正しいときには続けて正しいことが多いからである。

文例数を 25600 文まで増やして実験したところ、単語当たりの正解率は 92%、単語当たりの再現率を 95%とすることができる一方、SVM 単独で行うときに比し、学習時間を 1/3 にすることができた。AODE はトリビアルに並列化できるため、大量の CPU を用いれば、すなわち、脳のモデルとしては、非常に高速に、SVM 並みの精度が出せることが分かった。



## (2) 研究成果の今後期待される効果

現在、自然言語の処理機構に関しては、脳のモデルとして作られた計算機構と実際の自然言語処理のために使われている技法との間に大きなギャップがある。その原因の一つは、脳のモデルとして第一候補になるニューラルネットワークが原理的には万能に近いもののそれを実用的な速度で動かす技術が未開発であるためである。他の一つは、機械学習手法が高度に発達してしまったため、精度・速度の向上は大きく進んだものの、脳のモデルとしての意味づけができなくなったことにある。

本研究においては、このギャップを埋めるべく、様々な方法を試み、例えば、自然言語文の解析においては、

- (a) 出現頻度のみでパラメータ推定が可能な確率モデル(ex. ODE)を
- (b) その構造が異なるものを、ある範囲で網羅的に用い
- (c) それらが出力する推定値の平均値を出力とする

モデルと、そのモデルを文中の各単語に適用して得られる、単語ごとの推定値の組合せ(の集合)の中から

(d) 構文的制約が最も満たされるような、推定値組合せを得る

方法との組合せにより、ニューラルネットワークに写像できるモデルでありながら、実用的にも十分利用可能な、学習可能な言語処理モデルが実現可能であることが分かった。

言語の処理は、脳においても、大量の情報の統合と複雑な記号処理の組合せであると考えられ、従って、その担当部位が無侵襲計測により容易に分離できると考えるのは妥当ではない。上記のような情報処理モデルからの類推が、計測に生かされる可能性があるだろう。

また、情報処理技術としても、今回のモデルは、有用な面がある。一般に精度・速度のみを追求した場合には、それ専用の処理モデルの方がよい。しかし、上記のモデルには、精度低下は僅かであり、トリビアルに並列化可能であるという利点以外に、漸増的に(incremental に)学習可能であるという利点がある。インターネット上の情報は次々と増加しており、これらの変化を反映しつつ言語処理を進めるには適したアルゴリズムであると考ええる。

### 3. 3 失語症における病態生理と機能回復過程の解析(自治医科大学 渡辺グループ)

#### (1) 研究実施内容及び成果

今回のメインテーマである脳の機能発達と学習メカニズムの解明という命題から発展して、機能回復を障害からの再学習という切り口で観察することにより、脳のダイナミックな機能構築の変化能力を探ることに大きな意義があると考え、初年度より縦断的な研究を続けている。具体的には、脳卒中後の失語症のリハビリテーションにおいて回復を観察し、機能回復のメカニズムを知ることにより、脳がどのような過程で言語機能を再獲得しているのかを探ろうとしている。

言語活動においては、脳は非対称性に機能分化し、80%以上で左半球が優位に活動すると考えられている。これは19世紀のBrocaの報告に端を発し、以来多くの失語症例の研究から明らかにされてきた。現在ではfMRIや光トポグラフィーなど近年急速に進歩した非侵襲性脳機能マッピング法によって正常者を使用しても確認が行われている。一方、19世紀当初から言語機能における劣位半球の役割にも多大な関心が寄せられ、早くから優位半球の損傷によって生じた失語症の回復過程に劣位半球が大きな働きをしていることを示唆する症例が多く報告されてきており、劣位半球に関する関心は並々ならぬものがある。これは脳の柔軟な可塑性に支えられていると考えられ、これら非優位側言語相当野や優位側にあっても言語関連の周辺領域などが失語症の回復過程においておおきな役割を担っていることがさかんに提唱され、リハビリテーションにおいても重要視されている。しかし、いまだ、一定の科学的証拠が得られていないのが現状である。われわれは非侵襲性脳機能マッピング法のうちでも比較的被験者への心理的、生理的負担の少ない光トポグラフィーの技術を用いて、言語関連周辺の役割を検討した。

## ① 研究の経過

本研究のキーである光トポグラフィー装置の開発にわれわれは 1987 年からかわり、多チャンネルの近赤外線スペクトル解析を用いた脳機能マッピング装置を開発し、この装置は現在では光トポグラフィーとして臨床的にも用いられる装置となっている[1,2,3]。

計測原理の概要を示す。近赤外線は皮膚、骨を容易に透過する。頭皮上から光ファイバーで投射された近赤外線は脳組織内に拡散して行くが、照射点から数センチ離れたところで計測すると、乱反射して戻ってきた成分を受光する事ができる。シミュレーションの結果からは 30mm 離れた点で計測すると、約 20mm 深部を通過してきた成分を中心に計測する事になる。この深さはちょうど頭皮から大脳皮質の深さであり、通常大脳皮質の活動を計測するためにこの距離が使用される。このような照射・受光のプロローベを 1 ペアと考え、これを複数のペアを頭皮上に並べると、大脳皮質の機能マッピングが可能となる。

現在最もよく使用されているのは、830nm と 780nm の二波長を使用して、48 チャンネル同時記録できる機種である[3,4]。計測は 48 チャンネルの光トポグラフィー装置を用いた。両側の下前頭回から耳介上部までを覆う、大脳言語領野を含む領域に計測部位を設定した。言語刺激としては、20 秒の語想起課題と 30 秒間の安静課題を 5 回繰り返しこれを平均加算した[4,5,8]。

## ② 研究の成果

初年度からしだいに症例数を増やし現在は総計 30 名の失語症患者につき機能計測を続けている[1,6,7]。

30 例中 13 例は右(劣位)半球下前頭回に言語活動に一致した血流増加が観察され、この部位の神経活動が言語機能を支えていると考えられた。10 例は優位側(左)に活性が認められ、7 例は左に血流が低下するような、異常な反応が認められた。30 例中 11 名は複数回の計測を行い、活動部位の変遷を検討した。11 例中 7 例は右に活性が認められたが、2 例は半年後に他の 5 例は 3-6 ヶ月後に活動が優位側にも出現し、同時に非優位側の活動が低減していることが観察された。このように、回復期の早期には非優位側が言語活動をささえ、次第に優位側が回復してくるとともに、非優位側の活動が下がって切り替えが行われる現象が起こることが分かった。一方、残りの 4 例ははじめから左に潜時の遅れや波形逆転など波形の異常はあるもののなんらかの活性があり、経過とともに明確で正常な反応へと正常化する傾向が認められた。

## ③ 高解像度光トポグラフィーの開発

従来の 30mm 間隔のプロローベ配置では空間分解能に限界があり、詳細な脳回レベルでの観察が困難であった。特にプロローベ間の計測エリア内の感度分布が均一でないことから、小さな部位が活性化した場合、プロローベの位置との関係で、大きく出たり小さく出たり一定しない傾向が示唆さ

れていた[9]。しかし、その後の検討の進展に従い、プローベを倍の密度に配置するとこの不均一性からくる計測のゆがみが大幅に軽減することがシミュレーション研究により示唆された。これを踏まえて、倍密度のプローベ配置を試みた。未だ予備的な結果ではあるが、空間分解能は飛躍的に改善した。つまり、運動野の刺激や、感覚野の刺激などを行うと、運動刺激特にイメージ運動タスク(MI: motor imagery)では中心前回を中心に、痛覚刺激では中心後回を中心に大きな活動が得られ、それぞれ、中心溝の対岸には活動がみられないという、脳回レベルでの空間分解能が得られることがわかった。この点に関しては、現在症例を増やして鋭意検証中であり、文献化する予定である。今回新しく追加した機能としては、プローベ密度の増加と、プローベの三次元位置を正確にMRI 表面画像上に重畳表示する機能である。

## (2) 研究成果の今後期待される効果

このような結果を元に、活動している脳部位が経時的に変化して機能を獲得して行くことが明らかになった。この結果を元に、言語リハビリテーションのメニューを脳の回復過程に合致したものに合わせ、細かく制御することができればより効率のよい言語訓練が可能となるものと期待される。

1. 渡辺英寿, 失語の近赤外線光トポグラフィー, CLINICAL NEUROSCIENCE, 24(7):763-766, 2006
2. 渡辺英寿, 光トポグラフィーによる脳機能の計測, BRAIN and NERVE: 神経研究の進歩 (1881-6096)59 巻 5 号 Page459-466(2007.05)
3. 渡辺英寿, 近赤外線光トポグラフィーによる脳機能計測, 脳 21(1344-0128)10 巻 3 号 Page293-298(2007.07)
4. 渡辺英寿, 脳神経外科における光トポグラフィーの応用, 臨床神経生理学(1345-7101)35 巻 5 号 Page272(2007.10)
5. 小黒恵司, 横田英典, 山口崇, 宮田貴広, 庄島正明, 渡辺英寿, 言語優位半球同定のための光トポグラフィーの有用性 アミタールテストとの比較, 臨床神経生理学(1345-7101)35 巻 5 号 Page401(2007.10)
6. 小黒恵司, 横田英典, 渡辺英寿, 脳神経外科疾患と脳波 光トポグラフィーによる非侵襲的言語機能の計測, 臨床脳波(0485-1447)50 巻 2 号 Page110-117(2008.02)
7. 小黒恵司, 横田英典, 渡辺英寿, 高次脳機能障害の画像診断 光トポグラフィーによる高次脳機能の計測, 神経内科(0386-9709)68 巻 Suppl.5 Page70-81(2008.04)
8. 武田湖太郎, 渡辺英寿, 加藤宏之, 広範な外傷性左脳半球損傷で失語が生じなかった右手利き者の一症例, 脳科学とリハビリテーション 8 巻 Page26(2008.03)
9. 小黒恵司, 横田英典, 渡辺英寿, 近赤外線光イメージングによる非侵襲脳機能モニタリングの

### 3. 4 MRI および光トポグラフィによる脳機能計測法パラダイムの開発(日立製作所 牧グループ)

#### (1) 研究実施内容及び成果

酒井グループでは、成長過程における言語機能の習得に関する脳機能研究を行っている。言語機能の下位モジュールとして文法、文意、音韻の各機能が考えられるが、文章や会話レベルの言語機能である文法、文章理解の処理は前頭葉で行われており、語彙レベルの処理とは独立していることがわかってきた[1-5]。文法課題においては、左脳の外側運動前野 (lateral premotor cortex, LPM)、および下前頭回 (inferior frontal gyrus, IFG)の背側部(弁蓋部と三角部, F3op/F3t)が賦活することが示された[2]。一方、文章理解課題においては左脳の下前頭回の腹側部(三角部と眼窩部, F3t/F3O)が賦活することがfMRIによる研究から示された[3, 4]。

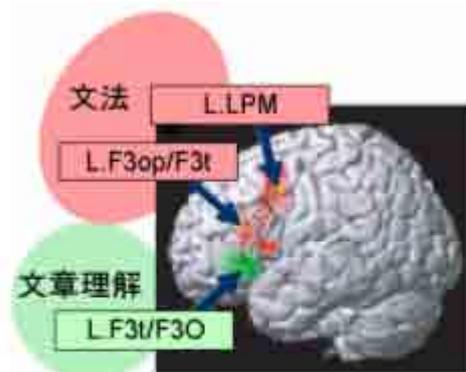


図1. 文章会話レベルの言語処理関連領域  
F3op: Inferior frontal gyrus (IFG), opercular part,  
F3t: Inferior frontal gyrus, triangular part,  
F3O: Inferior frontal gyrus, orbital part

本研究では、これらの領域間の形態学的な関連性を明らかにするために、神経線維束描画技術[6-9]を用いて上述の言語関連領域間のコネクティビティを調べ、左脳の外側運動前野、下前頭回の背側部、下前頭回の腹側部間に直接的な神経線維束が存在することを示した(山本ら、2006)。また、2領域間を接続する神経線維束の割合である評価関数 *SCI* (Selective Connectivity index) を用いた形態学的なコネクティビティの評価手法を提案し(山本ら、2007)、上記言語関連領域間を結ぶ左半球内経路と、対応する右半球経路間を評価した結果、*SCI*に左優位性が見られることがわかった(山本ら、2008)。

#### 1. 1 実施方法

##### 1) 神経線維束画像表示ソフトウェア

本研究では、脳機能画像における複数の賦活部位間の神経的な連絡状態を可視化するため、下記の機能を搭載した神経線維束画像の表示用ソフトウェアを開発した。重畳表示する脳機能画像としてfMRIを想定しているが、標準的な画像形式を用いているため、光トポグラフィ画像などの他のモダリティによる画像への対応も可能である。

#### ①形態画像の表示断面選択機能

脳機能画像や神経線維束画像を重畳表示する形態画像の任意の断面を選択する機能を搭載した。

#### ②脳領野情報の表示機能

脳機能計測では個人間のデータを比較する機会が多くあり、このような場合には賦活部位の領野名称を明らかにする必要がある。そこで、機能領野毎に番号を割り当てた、AAL(Automated Anatomical labeling)[10]の情報を用いて、任意の位置の領野情報を表示する機能を搭載した。AALは、標準脳のT<sub>1</sub>画像に基づいて細胞構築学的に領野を分割し、各領野に1対1対応した番号でラベル化したものである。各ラベル番号には、“Precentral gyrus(中心前回)”、“Superior frontal gyrus, dorsolateral(上前頭回、背側)”などの形態学的な領域名称が割り当てられている。このラベル番号を画素値とするAAL画像を脳領野画像として重畳表示する機能の他、マウスで指定した位置の領野名称と座標をウィンドウ上に表示する機能を搭載した。

#### ③重畳表示画像の選択機能

形態画像、脳機能画像、神経線維束画像、脳領野画像の任意の組み合わせで表示できるように、表示画像の選択機能を設けた。

#### ④神経線維束の選択表示機能

脳機能計測で注目すべき領域が決まっている場合、その領域と神経的に結合している領域を可視化するため、特定の領域を通る神経線維束のみを選択的に表示する機能を搭載した。また、複数の領域をAND/OR条件で組み合わせることにより、複雑な領域指定を可能とした。さらに、この領域に含まれる神経線維束数を表示する機能を搭載した。

#### ⑤シード点の表示機能

本機能は、表示している神経線維束画像のシード点を別ウィンドウに表示するものである。神経線維束の位置情報は、水分子の運動方向を表す拡散異方性MRI画像から求めるが、この計算に用いる出発点をシード点と呼ぶ。

### 2) 計測および神経線維束のトラッキング方法

神経線維束描画に用いる拡散強調画像は、1.5 T-MRI装置(Stratis II premium, 日立メディコ)を使用し、表1のパラメータを用いて計測した。計測後のMRI画像は渦電流による歪補正、ウィナーフィルタによるノイズ除去を行った後、SPM2(Statistic Parametric Mapping, Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK)を用いてMNI(Montreal Neurological Institute)標準脳座標に変換した。

表 1. 計測パラメータ

項目	
パルスシーケンス	マルチスライスエコープラナー法
繰り返し時間(TR)	300 ms
エコー時間(TE)	88 ms
空間分解能(像再構成時)	2×2×2 mm <sup>3</sup>
拡散強調	0-400 s/mm <sup>2</sup> (6方向×8段階+強調なし)
積算	2回

本研究では、前頭葉の言語関連領域に注目しているため、神経線維束トラッキングのシード領域として前頭葉大脳皮質のほぼ全域(上前頭回, 中前頭回, 下前頭回)を選択した。MNI 標準脳座標上で定義した皮質領域ラベル[10]から抽出した座標値を用い、大脳左半球あるいは右半球における上前頭回背側部(Superior frontal gyrus,

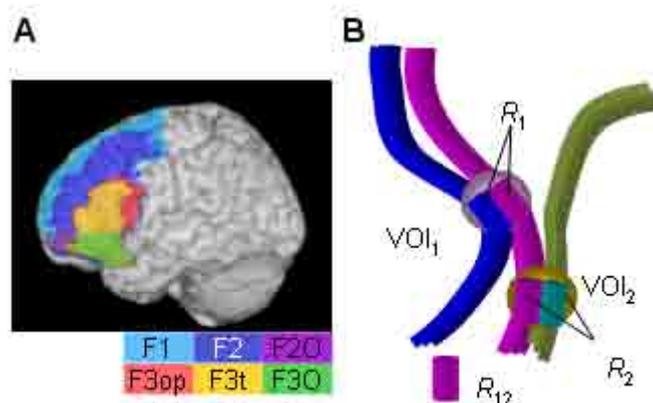


図2. 評価に用いる神経線維束の選択 (A) シード領域 (B) VOI<sub>1</sub>, VOI<sub>2</sub>を通る神経線維束 R<sub>12</sub>を抽出する

dorsolateral; F1 と略記)、中前頭回(Middle frontal gyrus; F2 と略記)、中前頭回眼窩部(Middle frontal gyrus, orbital part; FO と略記)、IFG の弁蓋部(F3op)・三角部(F3t)・眼窩部(F3O)領域全体を選択した。半球毎のシード領域の大きさは 30039 ボクセル(上記空間分解能の場合)であった。図2(A)は左半球のシード領域を示したものであるが、R. LPM, R. F3op/F3t, R. F3t/F3O を通る神経線維束のコネクティビティについても検討するため、右半球大脳皮質の対応する領域もシード領域として選択した。トラッキングアルゴリズムは、Lazar らの提案した TEND [11]を用いた。画像処理、トラッキングなどのデータ処理は MATLAB7.1(The MathWorks, USA)を用いて行った。

被験者は、神経科学的な異常の無い 14 名の正常ボランティア(男性 12 名, 女性 2 名)で、東京大学の倫理委員会規定に基づき、インフォームドコンセントを得ている。計測はすべて、東京大学酒井研究室の MRI 装置を用いて行った。

### 3) コネクティビティの指標

神経線維束イメージングで得られる線維束の数は、MRI 計測のパラメータ設定や神経の髄鞘化の度合いなどに影響される。また、特定経路のコネクティビティを個人間で比較する場合、脳全体

の神経発達の度合いにも影響を受けるため、神経線維束数のかわりに(1)式に示す評価関数  $SCI$  (Selective Connectivity Index)を導入し、コネクティビティをあらわす指標として用いた。

$$SCI = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{R_{12}}{R_1} + \frac{R_{12}}{R_2} \right) \quad (1)$$

ここで  $R_1$  および  $R_2$  は、それぞれ領域 1 および領域 2 を通る神経線維束数、 $R_{12}$  は両領域を通る神経線維束である。(1)式は、領域1と領域2をそれぞれ通る神経線維束のうち、両領域間の接続に用いられている神経線維束の割合の平均を表しており、2領域間の入力-出力関係の選択性を意味する。

## 1.2 結果と考察

### 1) 左脳前頭前野における言語関連領域間の神経線維束

2領域間を直接接続する神経線維束がすべての例で観察された(8例中8例)。図3に一例を示す。3領域間の神経線維束の経路はいずれも直線的であり、すべての領域間において直接的なネットワークが存在することが確かめられた。

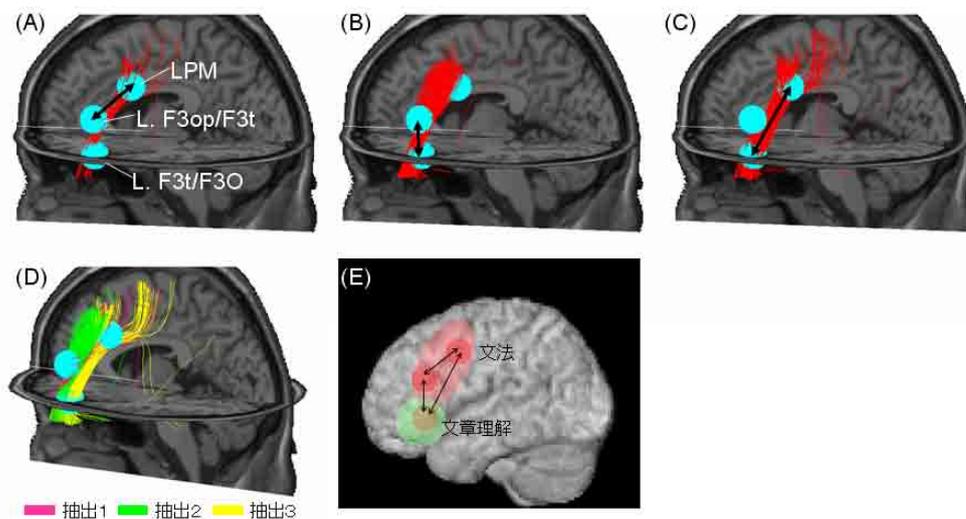


図3. 前頭前野の言語関連領域間の神経線維束  
(A) 抽出1, (B) 抽出2, (C) 抽出3, (D) 抽出1～3の重畳表示, (E) 文法・文章理解関連領域と抽出に用いた球状領域との位置関係

同じ文法処理を担う領域間において、このような直線的な神経ネットワークが存在することは理にかなっている(図3(A))。一方で、文法的な正誤判断と文脈の正誤判断は異なる言語機能ではあるが、その関連性の深さから両者の間には密接なネットワークの存在が予想された。図3(A)-(C)に示すように、これらの領域間にも直接的な神経ネットワークが観察され、文法処理と文章理解処理

との強い相互作用の存在を支持した。以上により、脳機能計測の結果[2-5]から予想されてきた、文章-会話レベルでの言語中枢間ネットワークの存在が裏付けられた。

## 2) 両側前頭葉におけるSCIの評価

SCIの有効性を示すため、前頭葉内で任意に選択した4領域(図4, 左右のF1 および F3t)のうち2領域を接続する3つの経路(左右の半球内経路および半球間経路)について、SCIの評価を行った。これらの球状領域の中心座標は(-18, 29, 53)、(-33, 29, 45)、(18, 29, 53)、および(33, 29, 45)であり、後述する言語関連領域とは重なっていない。また、2領域間を通る神経線維束の数は領域サイズによって影響を受けるため、球状領域の半径を6~12 mm まで変化させ、SCIに及ぼす領域サイズの影響を評価した。

図5に示すように、SCI はすべての経路について領域サイズとともに増加した。左右の半球内経路は半球間経路に比べて短く、コネクティビティの選択性が高いと考えられるため、SCIは大きい値を取ることが予想された。球状領域の半径が10 mm および12 mm の時、左半球内経路と半球間経路間においてSCIに有意差が見られた(それぞれ、 $[t(13) = 2.5, P = 0.03]$  および  $[t(13) = 3.4, P = 0.004]$ )。

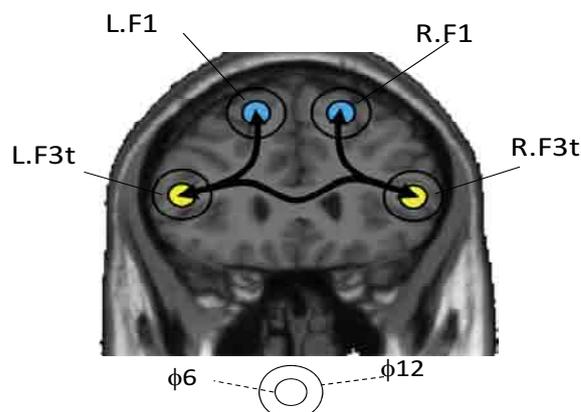


図4. SCIの有効性検討に用いた左右半球内の4つの球状領域および3経路

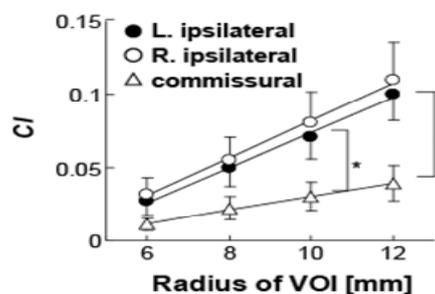


図5. SCIと領域サイズとの関係  
\*は有意差あり(有意確率0.05)

同様にして、球状領域の半径が10 mm および12 mm の時、右半球内経路と半球間経路間においてSCIに有意差が見られた(それぞれ、 $[t(13) = 2.4, P = 0.03]$  および  $[t(13) = 2.5, P = 0.03]$ )。一方、2つの半球内経路については有意差が見られなかった( $[10 \text{ mm}, t(13) = 0.38, P = 0.71]$ ;  $12 \text{ mm}, t(13) = 2.6, P = 0.80]$ )。以上から、左右の対応する経路間にはSCIの有意差がないことがわかった。また、領域半径が10 mm 以上のときに予想された半球内経路-半球間経路間の有意差が見られたことから、以下の解析では球状領域の半径を10 mm とした。

### 3) 言語関連領域へのSCIの適用

注目する言語領域間のコネクティビティを調べるため、文法中枢とされている左半球のLPM および F3op/F3t、文章理解処理を担うとされている F3t/F3O の中から、脳活動の大きさを表す統計値が特に高い座標をひとつずつ選択した[2, 3] (表2. A-C)。MRI 画像を標準脳座標に変換する際の誤差や個人差などに対応するため、これらの座標を中心座標とする球状領域を通る神経線維束を抽出することとした。球状領域の半径は前節で求めた 10 mm とした。また、右半球の対応する座標を中心座標とする球状領域も同様に神経線維束の抽出に用いた(表2. D-F)。表2の球状領域のうち2領域を結ぶ9経路(図6)の SCIを求めた。

表2. 神経線維束の抽出に用いた球状領域

	脳領域	中心座標* [mm]	半径 [mm]
A	L. LPM(文法)	(-39, 3, 42)	10
B	L. F3op/F3t(文法)	(-54, 27, 21)	10
C	L. F3t/F3O(文章理解)	(-51, 27, -6)	10
D	R. LPM	(39, 3, 42)	10
E	R. F3op/F3t	(54, 27, 21)	10
F	R. F3t/F3O	(51, 27, -6)	10

\* MNI 標準脳座標上で定義

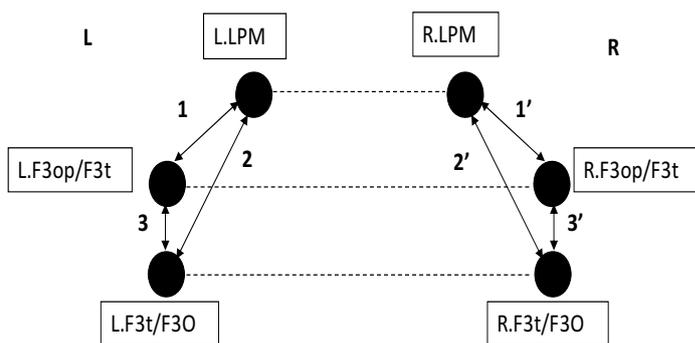


図6. SCI解析に用いた左右の半球内経路(1, 2, 3, 1', 2', 3')および半球間経路(4, 5, 6)

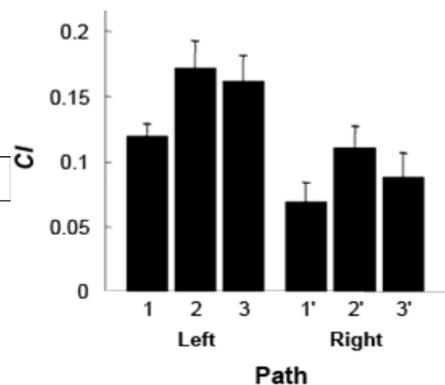


図7. 被験者間の平均SCIのヒストグラム (エラーバーは標準誤差)

本研究で用いた MR 画像は、標準脳への変換を行っているため左右の対象性が保たれており、左右の対応する経路の長さは等しい(例:経路1および 1')。経路×側性を要素とする2元の rmANOVA (repeated-measure analysis of variance) を SCI に関して行った結果、側性に関して有意

な主効果が見られた[ $F(1, 13) = 54, P < 0.0001$ ]. 一方、経路の主効果[ $F(2, 26) = 2.5, P = 0.11$ ] および交互作用[ $F(2, 26) = 0.62, P = 0.55$ ]は有意ではなかった。核経路の側性化をさらに調べるため1元の rmANOVA を行った。すべての経路について有意な側性化の効果が見られた(path 1:  $F(1, 13) = 20, P = 0.0006$ ; path 2:  $F(1, 13) = 12, P = 0.005$ ; and path 3:  $F(1, 13) = 31, P < 0.0001$ )。しかし、半球間経路に関する1元 rmANOVA では、経路間に有意差はなかった[ $F(2, 26) = 0.48, P = 0.62$ ]。

以上から、前頭前野の言語関連領域においては、左半球の *SCI*が有意に大きいという結果が得られた。このような左右差は、前節で示した任意領域間の経路では見られなかった。このことから、これらの左半球の言語関連領域は、対応する右半球の領域に比べ領域間の情報交換に割く割合がより大きいことが示唆された。

神経線維束描画で得られる線維束の数は、MRI 計測のパラメータ設定や神経の髄鞘化の度合いなどに影響される。また、特定経路のコネクティビティを個人間で比較する場合、脳全体の神経発達の度合いにも影響を受けるため、相対的な評価手法が必要である。Catani らは、左右半球の対応する神経線維束のコネクティビティを比較する指標を導入して、ブローカ野とウェルニッケ野を接続する神経路の左側性化について報告している[12]。しかしながら、前頭前野における文章-会話レベルの言語関連領域を対象とした形態学的コネクティビティに関する研究は、今のところ報告されていない。神経線維束描画における2点間のコネクティビティに関する研究としては、ノイズ等に起因する不確定性の確率密度関数を用いて、任意の2点間に線維束の接続が存在する確率を推定する手法が提案されている[13]が、任意の領域間のコネクティビティの強さを比較するものではない。

- [1] K. L. Sakai, et al., "An Event-related fMRI Study of Explicit Syntactic Decisions in Contrast to Semantic and Phonological Decisions", *Soc. Neurosci. Abstr.* **27**, 119.3 (2001).
- [2] R. Hashimoto, and K. L. Sakai, "Specialization in the Left Prefrontal Cortex for Sentence Comprehension", *Neuron* **35**, 589-597 (2002).
- [3] F. Homae, N. Yahata, and K. L. Sakai, "Selective Enhancement of Functional Connectivity in the Left Prefrontal Cortex during Sentence Processing", *NeuroImage* **20**, 578-586 (2003).
- [4] K. Suzuki and K. L. Sakai, "An Event-related fMRI Study of Explicit Syntactic Processing of Normal Processing of Normal/Anomalous Sentences in Contrast to Implicit Syntactic Processing", *Cerebral Cortex* **13**, 517-526 (2003).
- [5] K. L. Sakai, "Language Acquisition and Brain Development", *Science* **310**, 815-819 (2005).
- [6] C. Poupon, C. A. Clark, V. Frouin, D. LeBihan, I. Bloch, and J. -F. Mangin, "Inferring the brain connectivity from MR diffusion tensor data", *In MICCAI'99, Cambridge, UK, LNCS-1679*,

453-462, Springer-Verlag (1999).

[7] T. E. Conturo, NF. Lori, T. S. Cull, E. Akbudak, A. Z. Snyder, J. S. Shimony, R. C. McKinstry, H. Burton, M. E. Raichle, "Tracking neuronal fiber pathways in the living human brain", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **96**; 10422-10427 (1999).

[8] P. J. Basser, S. Pajevic, C. Pierpaoli, J. Duda and A. Aldroubi; "In vivo fiber tractography using DT-MRI data"; *Magn. Reson. Med.* **44**, 625-632 (2000).

[9] D. K. Jones, S. C. R. Williams, D. Gasston, M. A. Hord, A. Simmons, and R. Howard; "Isotropic Resolution Diffusion Tensor Imaging with Whole Brain Acquisition in a Clinically Acceptable Time"; *Human Brain Mapping* **15**, 216-230 (2002).

[10] N. T-Mazoyer, B. Landeau, D. Papasanasslou, et al., "Automated Anatomical Labeling of Activation in SPM Using a Macroscopic Anatomical Parcellation of the MNI MRI Single-Subject Brain", *NeuroImage* **15**, 273-289 (2002).

[11] M. Lazar, et al., "White matter tractography using diffusion tensor deflection", *Human Brain Mapping*, **18**, 306-321 (2003).

[12] M. Catani, M. P. G. Allin, M. Husain, L. Pugliese, M. M. Mesulam, R. M. Murray, DK. Jones: "Symmetries in human brain language pathways correlate with verbal recall", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **104**: 17163-17168(2007).

[13] T. E. Behres, et al., "Characterization and Propagation of Uncertainty in Diffusion-Weighted MR Imaging", *Magn. Reson. Med.* **50**, 1077-1088 (2003)

## (2) 研究成果の今後期待される効果

神経線維束描画技術を用いることにより、通常の MRI 画像では得られない、左半球の優位性に関する新しい知見を得ることが出来た。神経線維束描画技術を脳機能計測と組み合わせることにより、脳に対する理解がさらに深まることが期待される。このような言語関連領域における形態学的側性化は脳発達過程のどの時期に生じるのか、性差があるのか、言語関連領域の皮質の厚さとの相関の有無などが今後の課題として挙げられる。また、言語関連領域間の形態学的コネクティビティは、言語能力と何らかの関連があると考えられる。両者の関連性を解明することにより、言語能力の評価手法や言語学習効果をモニタするツールとしての応用展開が期待できる。

## §4 研究参加者

### ① 酒井グループ(脳機能計測・双生児研究)

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期			
					開始		終了	
					年	月	年	月
○	酒井 邦嘉	東京大学・大学院総合文化研究科	准教授	脳機能計測・文法解析	15	10	21	3
*	飯島 和樹	〃	大学院生	MEGによる脳機能計測	17	1	21	3
	百々 佳菜子	〃	大学院生	fMRIによる脳機能計測	17	1	19	3
*	名内 存人	〃	大学院生	fMRIによる脳機能計測	18	4	21	3
	辰野 嘉則	〃	大学院生	fMRIによる脳機能計測	15	10	17	3
*	佐伯 夏希	〃	CREST 研究補助員	研究補助(MRI操作及びデータ解析)	16	1	20	3
*	田中 沙織	〃	CREST 研究補助員	研究補助(MEG操作及びデータ解析)	18	5	18	8
*	高山 智恵子	〃	CREST 研究補助員	研究補助(手話の刺激作成及び解析)	19	4	21	3
*	高橋 智美	〃	CREST 研究補助員	研究補助(手話の刺激作成及び解析)	19	4	21	3
*	松倉 彩織	〃	CREST 事務員	事務・経理	16	11	20	3
*	牧 美奈子	〃	CREST 事務員	事務・経理	16	1	16	10
	松田 広美	〃	研究員	MEGによる脳機能計測	20	4	21	3
	小師 尚子	〃	研究員	fMRIによる脳機能計測	20	1	21	3
*	武藤 牧子	〃	CREST 研究員	MEGによる脳機能計測	17	4	18	10
	〃	〃	助教	MEGによる脳機能計測	18	10	20	3
	橋本 龍一郎	〃	学術研究支援員	MEGによる脳機能計測	15	10	15	12
	保前 文高	〃	学術研究支援員	fMRIによる脳機能計測	15	10	15	12
	安井 拓也	東京大学・医学部	助教	MEGによる脳機能計測	16	4	21	3
	金野 竜太	昭和大学・神経内科	助教	fMRIによる脳機能計測	16	4	21	3

*	舟生 勇人	山形大学・ 脳神経外科	社会人大学院 生及びCREST 研究補助員	fMRIによる脳機能計測	16	4	17	3
	岡田 如弘	神戸大学・ 神経内科	社会人大学院 生	fMRIによる脳機能計測	19	4	19	12
	関原 謙介	首都大学東 京	教授	MEGによる脳機能計測	16	4	21	3
	木村 晴美	国立リハビリ テーション センター	教員	日本手話による研究	17	4	21	3
	三橋 俊夫	東京大学・ 附属中等高 等学校	教員	双生児研究	15	10	21	3
	村石 幸正	〃	〃	〃	15	10	21	3
	檜府 暢子	〃	〃	〃	15	10	21	3
	三浦 邦彦	〃	〃	〃	15	10	16	1
	平野 和由	〃	〃	〃	16	2	21	3
	福島 昌子	〃	〃	〃	16	2	21	3
	田邊 康夫	〃	〃	〃	16	2	21	3
	勝亦 あき子	〃	〃	〃	16	2	21	3
	杉浦 祐子	〃	助手	〃	16	2	21	3

② 櫻井グループ(自然言語処理の研究)

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期			
					開始		終了	
					年	月	年	月
○	櫻井 彰人	慶應義塾大 学・大学院理 工学研究科	教授	自然言語処理の開発	15	10	21	3
	篠沢 佳久	〃	助教	〃	15	10	21	3

③ 渡辺グループ(失語症の研究)

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期			
					開始		終了	
					年	月	年	月
○	渡辺 英寿	自治医科大学・脳神経外科	教授	失語症における病態生理の解析	15	10	21	3
	小黒 恵司	自治医科大学・脳神経外科	講師	失語症における病態生理の解析	15	10	21	3
	河内 十郎	日本女子大学	元教授	神経心理学	15	10	21	3
	河村 満	昭和大学・神経内科	教授	神経心理学	15	10	21	3

④ 牧グループ(脳機能計測法の研究)

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期			
					開始		終了	
					年	月	年	月
○	牧 敦	日立製作所・基礎研究所	主管研究員	同時計測法パラダイムの開発	15	10	21	3
	山本 由香里	〃	〃	拡散テンソル MR イメージング	15	10	21	3
	山崎 享子	〃	研究補助員	研究補助	18	4	21	3
	山本 剛	〃	研究員	同時計測法パラダイムの開発	15	10	16	3

§5 招聘した研究者等

氏名(所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
なし			

## § 6 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 7 件、国際(欧文)誌 22 件)

### 【酒井グループ】

1. Suzuki, K. & Sakai, K. L.: 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).
2. Noguchi, Y., Watanabe, E. & Sakai, K. L.: An event-related optical topography study of cortical activation induced by single-pulse transcranial magnetic stimulation. *NeuroImage* 19, 156-162 (2003).
3. Hashimoto, Y. & Sakai, K. L.: Brain activations during conscious self-monitoring of speech production with delayed auditory feedback: an fMRI study. *Hum. Brain Mapp.* 20, 22-28 (2003).
4. Homae, F., Yahata, N. & Sakai, K. L.: Selective enhancement of functional connectivity in the left prefrontal cortex during sentence processing. *NeuroImage* 20, 578-586 (2003).
5. Sakai, K. L., Miura, K., Narafu, N. & Muraishi, Y.: Correlated functional changes of the prefrontal cortex in twins induced by classroom education of second language. *Cereb. Cortex* 14, 1233-1239 (2004).
6. Hashimoto, R. & Sakai, K. L.: Learning letters in adulthood: Direct visualization of cortical plasticity for forming a new link between orthography and phonology. *Neuron* 42, 311-322 (2004).
7. Tatsuno, Y. & Sakai, K. L.: Language-related activations in the left prefrontal regions are differentially modulated by age, proficiency, and task demands. *J. Neurosci.* 25, 1637-1644 (2005).
8. Sakai, K. L., Tatsuno, Y., Suzuki, K., Kimura, H. & Ichida, Y.: Sign and speech: Amodal commonality in left hemisphere dominance for comprehension of sentences. *Brain* 128, 1407-1417 (2005).
9. Mochizuki, H., Ugawa, Y., Terao, Y. & Sakai, K. L.: Cortical hemoglobin-concentration changes under the coil induced by single-pulse TMS in humans: A simultaneous recording with near-infrared spectroscopy. *Exp. Brain Res.* 169, 302-310 (2006).
10. Kinno, R., Kawamura, M., Shioda, S. & Sakai, K. L.: Neural correlates of non-canonical syntactic processing revealed by a picture-sentence matching task. *Hum. Brain Mapp.* 29, 1015-1027 (2008).
11. Yasui, T., Kaga, K. & Sakai, K. L.: Language and music: Differential hemispheric dominance in detecting unexpected errors in the lyrics and melody of memorized songs. *Hum. Brain Mapp.* 30, 588-601 (2009).
12. Momo, K., Sakai, H. & Sakai, K. L.: Syntax in a native language continues to develop in adults: Honorification judgment in Japanese. *Brain Language* 107, 81-89 (2008).
13. Sakai, K. L., Nauchi, A., Tatsuno, Y., Hirano, K., Muraishi, Y., Kimura, M., Bostwick, M. & Yusa, N.: Distinct roles of left inferior frontal regions that explain individual differences in

second language acquisition. *Hum. Brain Mapp.* in press (2009).

14. Iijima, K., Fukui, N. & Sakai, K. L.: The cortical dynamics in building syntactic structures of sentences: An MEG study in a minimal-pair paradigm. *NeuroImage* 44,1387-1396 (2009).
15. Nauchi, A. & Sakai, K. L.: Greater leftward lateralization of the inferior frontal gyrus in second language learners with higher syntactic abilities *Hum. Brain Mapp.* in press (2009).

【櫻井グループ】

16. Shinozawa, Y. & Sakurai A.: A Role Sharing Model of Language Areas. *Proceedings of First International Workshop on Emergence and Evolution of Linguistic Communication*, 41-46 (2004).
17. Shibui, N. & Sakurai, A.: FrameNet-Based Shallow Semantic Parsing with a POS Tagger. *Proceedings of Joint Workshop of Vietnamese Society of AI, SIGKBS-JSAI, ICS-IPSJ and IEICE-SIGAI on Active Mining*, JSAI SIG-KBS-A403, 187-190 (2004).
18. 石川, 櫻井, 藤波, 國藤: 強化学習におけるオンラインセンサ選択. *電気学会論文誌C*, vol.125, no.6, 870-878 (2005).
19. 高雄, 櫻井: 電子掲示板における投票機能がコミュニケーションに与える影響. *ヒューマンインタフェース学会*, vol.7, no.3, 81-87 (2005).
20. 岡, 櫻井: ユーザの興味を反映したコミュニティマップを利用したメール配信方式の提案と評価. *ヒューマンインタフェース学会*, vol.7, no.1, 47-54 (2005).
21. 石川, 櫻井, 藤波, 國藤: 強化学習におけるオンラインセンサ選択. *電気学会論文誌C*, vol.125, no.6, 870-878 (2005).
22. 石川, 櫻井, 藤波, 國藤: 複数の状態行動価値表を用いた R 学習の高速化. *電気学会論文誌C*, vol.126, no.1, 72-82 (2006).
23. Suhara, Y. & Sakurai, A.: Generalization by Categorical Nodes in Recurrent Neural Networks. *Brain-Inspired IT II: Decision and Behavioral Choice Organized by Natural and Artificial Brains*. ICS 1291 (Eds. K. Ishii, K. Natsumem, and A. Hanazawa), 35-38, Elsevier (2006).
24. Ishikawa, K., Sakurai, A., Fujinami, T. & Kunifuji, S.: R-learning with multiple state-action value tables. *Electrical Engineering in Japan*, vol.159, no.3, 34-47 (2007) .
25. Shinozawa, Y. & Sakurai, A.: A Role Sharing Model of Language Areas, *New Frontiers in Artificial Intelligence. Lecture Notes in Artificial Intelligence* vol.3609, 335-344 (2007).
26. Suhara, Y. & Sakurai, A.: A simple computational model for classifying small string sets. *Brain-Inspired IT III. Invited and selected papers of the 3rd International Conference on Brain-Inspired Information Technology "BrainIT 2006,"* ICS 1301 (Eds. K. Natsume, A. Hanazawa and T. Miki), 270-273, Elsevier (2007).
27. Sakurai, A. & Shinozawa, Y.: Linguistic Productivity and Recurrent Neural Networks. In Xiolin Hu and P. Balasubramaniam (eds.). *Recurrent Neural Networks*, ISBN 978-3-902613-28-8, I-Tech Education and Publishing (2008).

【渡辺グループ】

28. 渡辺英寿, 室田由美子, 中島千鶴: 近赤外線光トポグラフィーを用いた失語症回復過程の計測. *高次脳機能研究* (1348-4818) 25 巻 3 号, 215-223 (2005).
29. 武田湖太郎, 渡辺英寿, 加藤宏之: 広範な外傷性左脳半球損傷で失語が生じなかった右利き者の一症例. *脳科学とリハビリテーション* 8, 26 (2008).

(2)学会発表(国際学会発表及び主要な国内学会発表)

①招待講演 (国内会議 81 件、国際会議 12 件)

【酒井グループ】

1. Sakai, K. L.: Functional Brain Imaging Studies of Human Language Processing. The First International Symposium "Interdisciplinary Studies on Life Systems", The 21st Century COE Program, Research Center for Integrated Sciences, 2003 年 11 月 15 日, 東京
2. 酒井邦嘉: 脳の文法処理と再帰的計算. 電子情報通信学会・第 5 回シンポジウム「認知科学の最前線」, 2003 年 12 月 19 日, 横浜市
3. Sakai, K. L.: Specialization for Sentence Processing in the Prefrontal Cortex. Seminar at Max Planck Institute for Human Cognitive and Brain Sciences, 2004 年 1 月 7 日, ライプツィヒ
4. 酒井邦嘉: 脳から文法処理をさぐる. 東北大学文学部・21 世紀 COE セミナー, 2004 年 2 月 4 日, 仙台市
5. 酒井邦嘉: 言語と機能マッピング. 第 6 回日本ヒト脳機能マッピング学会大会・ランチョンセミナー1, 2004 年 3 月 21 日, 横浜市
6. 酒井邦嘉: 人間の言語処理の脳機能イメージング研究. 第 27 回日本脳神経 CI 学会総会・特別講演 2, 2004 年 4 月 2 日, 愛知郡
7. 酒井邦嘉: 文法処理の脳機能イメージング研究. 第 108 回つくばブレインサイエンス・セミナー, 筑波大学基礎医学系, 2004 年 4 月 13 日, つくば市
8. Sakai, K. L.: Brain Mechanisms of Syntactic Processing. The HFSP 15th Anniversary – Fourth Awardees Annual Meeting, Human Frontier Science Program, 2004 年 5 月 18 日, 箱根町
9. 酒井邦嘉: ことばの科学～脳はどのようにことばを生み出すか～. 「楽しむ科学教室」第 4 回講演, 財団法人 平成基礎科学財団, 2004 年 5 月 23 日, 東京
10. 酒井邦嘉: 物理学から脳科学、そして言語学へ. 第 44 回夏の学校・分科会 1(B), 生物物理若手の会, 2004 年 8 月 5 日, 東京
11. 酒井邦嘉: 文法遺伝子は本当にあるのか. 夏のワークショップ “Genes and Cognition III”, 文部科学省 特定領域研究「先端脳」, 2004 年 8 月 23 日, 東京

12. 酒井邦嘉:言語発達の脳科学. 第12回脳の世紀シンポジウム, NPO 法人 脳の世紀推進会議, 2004年9月15日, 東京
13. 酒井邦嘉:チョムスキー. 20世紀の知の遺産・人物篇パート3, NPO 法人 東京自由大学, 2004年9月18日, 東京
14. Sakai, K. L.: Functional Brain Imaging of Second Language Acquisition. Research Area "Brain-Science and Education", The 1st International Symposium – Research on Learning & Education Based on Neuroimaging, Japan Science and Technology Agency, 2004年9月30日, 東京
15. 酒井邦嘉:言語の脳機能に基づく言語獲得装置の解明. 戦略的創造研究推進事業 CREST・SORST ジョイントシンポジウム “脳神経科学の最先端2004”, 科学技術振興機構, 2004年10月6日, 東京
16. 酒井邦嘉:言語から人間へ挑むー脳科学で迫る究極の難問. 越境する脳科学の未来ーカオス, 言語から医療までー, 科学技術振興機構, 2004年10月9日, 東京
17. 酒井邦嘉:第二言語習得における獲得と学習の脳内メカニズム. 日本英語学会第22回大会・シンポジウム「第二言語獲得研究と脳科学の接点」, 2004年11月14日, 埼玉県草加市
18. 酒井邦嘉:言葉の脳内処理機構. 第28回日本高次脳機能障害学会総会・シンポジウム「感情的処理と知的処理の脳内機構」, 2004年11月25日, 千葉県浦安市
19. 酒井邦嘉:脳の文法中枢をめぐって. 上智大学外国語学部言語学副専攻講演会, 2004年12月9日, 東京
20. 酒井邦嘉:脳が生み出す言語としての日本手話. バイリンガルろう教育研究会講演会, NPO 法人 龍の子学園, 2004年12月11日, 東京
21. Sakai, K. L.: Language Processing is Uniquely Human. First Japanese-German Frontiers of Science (JGFoS) Symposium, フンボルト財団・日本学術振興会, 2005年1月30日, マインツ
22. 酒井邦嘉:脳機能イメージングによる言語処理ネットワークの解明. 第3回小川脳機能研究所講演会, 第1回次世代fMRI研究会講演会・特別講演, 2005年2月19日, 東京
23. 酒井邦嘉:脳が生み出す言語としての日本手話 ~脳での文章理解は手話と音声で完全に同じ~. 第3回バイリンガル・バイカルチャラルろう教育研究大会・記念講演, NPO 法人 龍の子学園, 2005年3月12日, 東京
24. 酒井邦嘉:言語脳科学の進歩. 東京大学先端科学技術研究センター講演会, 2005年6月20日, 東京
25. 酒井邦嘉:言語脳科学の進展. 第35回日本聴覚医学会 ERA 研究会・特別講演, 2005年7月3日, 東京
26. 酒井邦嘉:脳が言葉を生み出すメカニズム. 第28回日本神経科学大会「高校生・大学生のための脳神経科学入門」, 2005年7月25日, 横浜市

27. 酒井邦嘉:脳機能マッピングの将来. 第28回日本神経科学大会・ランチョンセミナー, 2005年7月26日, 横浜市
28. 酒井邦嘉:脳機能マッピングによる言語処理機構の解明. 第19回塚原仲晃記念賞・受賞講演会, 2005年7月27日, 横浜市
29. Sakai, K. L.: Syntactic Processing in Broca's Area. "Introduction to Neurolinguistics", Linguistic Society of America 2005 Institute at MIT / Harvard, 2005年8月1日, ボストン
30. 酒井邦嘉:第二言語習得と子どもの脳. 第2回子ども学会議・特別講演ー脳科学と言語, 2005年9月3日, 東京
31. 酒井邦嘉:言語獲得の脳科学. ヒューマンフォーラム2005「学習とインタラクション」, 本田技術研究所, 2005年9月6日, 和光市
32. 酒井邦嘉:科学文法と脳科学ー脳はどのようにことばを生みだすか. メビウス月例研究会 第120回例会・スペシャルワークショップ, 京都外国語大学, 2005年9月24日, 京都
33. 酒井邦嘉:ことばを生み出す脳の働きー最先端機器により脳の神秘を探るー. 世界物理年秋のイベント・特別公開講演会, 世界物理年日本委員会, 2005年10月15日, 東京
34. 酒井邦嘉:言語を生み出す脳. 現代社会と科学「脳の実体にせまる」, 早稲田大学オープンカレッジ, 2005年10月22日, 東京
35. 酒井邦嘉:脳はどのようにしてことばを習得するか. 戦略的創造研究推進事業(CREST)・研究領域「脳の機能発達と学習メカニズムの解明」第1回公開シンポジウム “脳を育むー発達・学習・障害回復のメカニズム”, 科学技術振興機構, 2005年11月19日, 東京
36. 酒井邦嘉:脳の高次機能を物理で見る. 物理学教室コロキウム, 東京大学大学院理学系研究科・理学部, 2005年12月9日, 東京
37. 酒井邦嘉:人間の言語とは何か. 第6回「自然社会」研究会, ヒューマンルネッサンス研究所, 2006年1月27日, 東京
38. 酒井邦嘉:人間の言語とは何かーその2. 第7回「自然社会」研究会, ヒューマンルネッサンス研究所, 2006年3月7日, 京都
39. Sakai, K. L.: Brain Development in Second Language Acquisition. The 8th Japan Human Brain Mapping Satellite Symposium, Seiriken/Sokendai, 2006年3月9日, 岡崎市
40. 酒井邦嘉:脳の言語情報処理. ロボット工学セミナー 第35回シンポジウム「脳型情報処理入門」, 日本ロボット学会, 2006年4月25日, 東京
41. 酒井邦嘉:ヒトの言語の特異性. 第47回日本神経学会総会シンポジウム「言語の神経科学的基盤」, 2006年5月12日, 東京
42. 酒井邦嘉:脳はどのようにことばを生みだすか. 第39回日本言語障害児教育研究大会・記念講演, 2006年8月9日, 東京

43. Sakai, K. L.: Language Acquisition and Brain Development. 平成 18 年度 特定領域研究「統合脳」・全体ワークショップ, Integrative Research for Understanding Brain Functions: Recent Trends in Neuroscience with Multidisciplinary Approaches -Functional Modules in the Cerebral Cortex-, 2006 年 8 月 23 日, 札幌市
44. 酒井邦嘉:脳科学からみた手話言語と音声言語. 2006 年度手話セミナー, 東京都聴覚障害者連盟, 2006 年 9 月 10 日, 東京
45. 酒井邦嘉:脳の話:言語と認知. 基礎科学科談話会, 東京大学大学院総合文化研究科, 2006 年 9 月 12 日, 東京
46. 酒井邦嘉:手話の脳科学. 企画シンポジウム「脳科学と教育ー特殊教育に生かす脳科学の最新情報ー」, 日本特殊教育学会, 2006 年 9 月 18 日, 前橋市
47. 酒井邦嘉:言語の脳科学. 京都府立医科大学医学部・特別講義および大学院セミナー, 2006 年 10 月 25 日, 京都
48. 酒井邦嘉:言語を育む脳のしくみ. 戦略的創造研究推進事業(CREST)「脳の機能発達と学習メカニズムの解明」第2回公開シンポジウム “脳を育むー発達と発達障害の脳科学”, 科学技術振興機構, 2006 年 12 月 9 日, 東京
49. 酒井邦嘉:科学研究の芽を育む高校教育とは. 高等学校教育実践研究集会・講演会, 京都教育大学附属教育実践総合センター・京都教育大学附属高等学校, 2007 年 2 月 2 日, 京都
50. 酒井邦嘉:言語活動を脳から見る. 第 19 回生活安全保障セミナー「脳を守る・脳を究める」, 日本女子大学生涯学習総合センター, 2007 年 2 月 17 日, 東京
51. 酒井邦嘉: MRI による言語学・教育学への展開. 「強磁場 MRIー生命の可視化ー」, 東京大学大学院新領域創成科学研究科・医学系研究科, 2007 年 2 月 20 日, 東京
52. 酒井邦嘉:脳科学による言語発達研究の現在. 国立特殊教育総合研究所セミナーII「特別支援教育と専門性の発展」第一分科会「発達障害、脳科学はどこまで解明できたか」, 国立特殊教育総合研究所, 2007 年 2 月 21 日, 東京
53. 酒井邦嘉:ことばの科学ー脳はどのようにことばを生み出すかー. 「楽しむ科学教室」第 29 回講演, 財団法人 平成基礎科学財団, 2007 年 3 月 17 日, 鳥取市
54. 酒井邦嘉:言語を生み出す脳の不思議. 特別展「脳! 内なる不思議の世界へ」「脳を育む」シリーズ講演会, 脳の世紀推進会議・文部科学省特定領域研究「統合脳」5領域・大阪歴史博物館・読売新聞社主催、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業「脳の機能発達と学習メカニズムの解明」企画協力, 2007 年 3 月 31 日, 東京
55. 酒井邦嘉:脳はどのように言語を生み出すか. 第4回 東京大学の生命科学 シンポジウム, 東京大学生命科学教育支援ネットワーク, 2007 年 4 月 14 日, 東京
56. 酒井邦嘉:物理から脳、そして言語へ. シンポジウム「私はどのようにして専門分野を決めたか」, 東京大学教養学部進学情報センター, 2007 年 4 月 27 日, 東京
57. 酒井邦嘉:言語の脳科学. 2007 年度「理論言語学講座」, 東京言語研究所, 2007 年 5 月 17

日～7月26日, 東京

58. 酒井邦嘉: 言語を育む脳の不思議. 第44回東京地区教員研修会(外国語), 日本私立小学校連合会, 2007年6月1日, 東京
59. 酒井邦嘉: 「英語脳」をめぐる. 東京大学教育学部附属中等教育学校・てぶくろの会, 2007年6月9日, 東京
60. 酒井邦嘉: 脳はどのように言語を生みだすか. 神経生理学特別講義, 慶應義塾大学医学部, 2007年7月6日, 東京
61. 酒井邦嘉: 「脳を見る・心を知る」模擬講義, 東京大学教養学部オープンキャンパス 2007, 2007年8月2日, 東京
62. 酒井邦嘉: 統語処理を中心とする言語の脳イメージング研究. ワークショップ「言語認知研究再考(2): 言語の脳イメージング研究」, 日本心理学会第71回大会, 2007年9月19日, 東京
63. 酒井邦嘉: 「手話と脳」江戸川区ろう者協会公開ゼミ, 2007年9月29日, 東京
64. 酒井邦嘉: 言語を生み出す脳の不思議. 戦略的創造研究推進事業(CREST)「脳の機能発達と学習メカニズムの解明」第3回公開シンポジウム “脳を育むー発達・学習・機能回復の脳科学”, 科学技術振興機構, 2007年11月10日, 東京
65. 酒井邦嘉: 言語の脳科学ー言語の獲得と文法処理のメカニズム. 日本LD学会第16回大会・教育講演, 2007年11月24日, 横浜市
66. Sakai, K. L.: Uniquely Human Language Processing. The 10th Annual Symposium of Japanese-American Frontiers of Science (JAFoS) Symposium, 日本学術振興会・米国科学アカデミー, 2007年12月3日, 神奈川県三浦郡
67. 酒井邦嘉: 脳科学と言語学の接点. 「脳科学と社会」領域架橋型シンポジウムシリーズ(脳科学から英語教育へのアプローチ), 2007年12月15日, 東京
68. 酒井邦嘉: 脳と脳科学について語る. 2007年度第1回基礎科学科サイエンス・カフェ, 2007年12月21日, 東京
69. 酒井邦嘉: 英語習得過程の脳内メカニズム. 東京大学教育学部附属中等教育学校・校内研究会, 2008年1月24日, 東京
70. 酒井邦嘉: 脳から見た言語の発達. ツインマゼースクラブ, 2008年3月8日, 東京
71. 酒井邦嘉: 研究の異分野へどのように踏み込むか. 学生セミナー, 総合研究大学院大学, 2008年4月4日, 神奈川県三浦郡
72. 酒井邦嘉: 言語の脳科学. 2008年度「春期特別講座」, 東京言語研究所, 2008年4月19日, 東京
73. 酒井邦嘉: 生命らしさとは何かー物理と化学で生物を見る. 2008年度第1回基礎科学科サイエンス・カフェ(司会), 2008年5月7日, 東京

74. 酒井邦嘉:脳と言語の発達. 日本双生児研究会, 2008年5月10日, 東京
75. 酒井邦嘉:言語の脳科学. 2008年度「理論言語学講座」, 東京言語研究所, 2008年5月15日～7月31日, 東京
76. 酒井邦嘉:言語獲得・言語発達の不思議／言語を対象とする脳機能研究からの提案. シンポジウム「多分野からの目・日本語教育からの目・これからの目」, 2008年度日本語教育学会春季大会, 2008年5月24日, 東京
77. 酒井邦嘉:言語の脳機能と獲得過程の解明. JST シンポジウム「CREST12－科学技術イノベーションを目指すCRESTの挑戦－」, 科学技術振興機構, 2008年5月27日, 東京
78. Sakai, K. L.: Neuroscience of Human Language. The 1246th Biological Symposium, 国立遺伝学研究所, 2008年6月17日, 三島市
79. Sakai, K. L.: Towards the Neuroscience of Language. Symposium "Towards the Neuroscience of Language and Sociability", The 31st Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, 2008年7月9日, 東京
80. 酒井邦嘉:脳の「言語地図」. 第6回 Awake Surgery 研究会・招待講演, 2008年8月23日, 東京

【渡辺グループ】

81. 渡辺英寿: 光トポグラフィーの臨床応用とその実際. 金剛脳神経外科コロキウム(2005年春季), 2005年4月30日, 大阪
82. 渡辺英寿: 近赤外線光トポグラフィーによる脳機能計測の臨床応用. 第4回自治医大シンポジウム, 2005年9月17日, 下野市
83. 渡辺英寿:光トポグラフィーによるてんかん焦点の診断(特別講演). 第35回山陰てんかん懇話会, 2006年6月10日, 米子
84. 渡辺英寿:脳とことば. 平成18年度 国際医療福祉大学 イブニングタイム公開講座, 2006年6月22日, 那須塩原市
85. 渡辺英寿:光トポグラフィーによる催眠療法における脳活動のモニター. 2006年国際サイコセラピー会議 イン・ジャパン, 2006年8月3日, 東京
86. 渡辺英寿:光トポグラフィーによるてんかん焦点の診断. 第27回三重てんかん研究会, 2006年9月2日, 津
87. 渡辺英寿: てんかんの術前診断における光トポグラフィーの応用(特別講演). 第62回岡山てんかん懇話会, 2007年6月21日, 岡山
88. 渡辺英寿: f NIRS による高次脳機能計測の臨床応用. 自治医科大学大学院研究科特別講義, 2007年6月25日, 下野市

89. 渡辺英寿: 光トポグラフィーによるてんかん焦点の診断. 第14回新潟神経疾患研究会, 2007年8月31日, 新潟
90. 渡辺英寿: 光トポグラフィーによる新しい脳機能計測の臨床. 第31回東京電機大学公開講座 ME 講座 先端技術がひらく医療と福祉の未来, 2007年11月14日, 東京

【牧グループ】

91. 牧敦: 脳科学からのストレス理解. 日本産業ストレス学会, 2004年11月29日
92. 牧敦: 発達科学におけるニューロイメージングの役割. 認知科学会, 2004年12月11日
93. Maki, A.: Development of near infrared-light spectroscopic topography - Novel imaging modality for higher order function of the human brain. The 2nd Asian and Pacific Rim Symposium on Biophotonics, 2004年12月15日

②口頭発表 (国内会議 0 件、国際会議 17 件)

【酒井グループ】

1. Tatsuno, Y. & Sakai, K. L.: Task-selective activation in Broca's area is differentially modulated during first and second language acquisition. 日本神経科学学会, *Neurosci. Res.* 50, Suppl. 1, S62, OJ1-07 (2004).
2. Sakai, K. L.: Language processing specialized in the left prefrontal cortex. 日本神経科学学会, *Neurosci. Res.* 52, Suppl. 1, S4, Tsukahara Award 2-2 (2005).
3. Yasui, T., Kaga, K. & Sakai, K. L.: Differential lateralization of error-induced fields in speech and melody processing: An MEG study. 日本神経科学学会, *Neurosci. Res.* 52, Suppl. 1, S61, O3B-01 (2005).
4. Iijima, K. & Sakai, K. L.: Spatio-temporal dynamics of cortical activation at the prelexical stage. 日本神経科学学会, *Neurosci. Res.* 52, Suppl. 1, S61, O3B-02 (2005).
5. Kinno, R., Kawamura, M., Shioda, S. & Sakai, K. L.: Activation of the grammar center in new picture-sentence matching tasks. 日本神経科学学会, *Neurosci. Res.* 52, Suppl. 1, S61, O3B-03 (2005).
6. Sakai, K. L., Tatsuno, Y., Ochi, Y., Shiota, K., Hirano, K., Muraishi, Y., Kimura, M., Bostwick, M. & Yusa, N.: Training-related increase and proficiency-dependent decrease of grammar center activation during second language acquisition. 日本神経科学学会, *Neurosci. Res.* 52, Suppl. 1, S61, O3B-04 (2005).
7. Sakai, K. L., Tatsuno, Y., Ochi, Y., Shiota, K., Hirano, K., Muraishi, Y., Kimura, M., Bostwick, M. & Yusa, N.: Separate neural bases of two fundamental processes during second language acquisition in the inferior frontal cortex. *Soc. Neurosci. Abstr.* Program No. 354.6 (2005).
8. Nauchi, A., Hirano, K., Muraishi, Y. & Sakai, K. L.: Correlation between regional grey matter volume and proficiency increase in second language: A VBM study. 日本神経科学学会, *Neurosci. Res.* 55, Suppl. 1, S49, OS2A-8-04 (2006).

9. Momo, K. & Sakai, K. L.: Grammar center activation in honorification judgment of Japanese sentences. 日本神経科学学会, *Neurosci. Res.* 55, Suppl. 1, S49, OS2A-8-05 (2006).
10. Yasui, T., Kaga, K. & Sakai, K. L.: Top-down modulation for melody-related activity in the right auditory areas: An MEG study. 日本神経科学学会, *Neurosci. Res.* 55, Suppl. 1, S50, OS2A-8-06 (2006).
11. Muto, M. & Sakai, K. L.: Cortical plasticity in adulthood for learning phonics rules for English orthography and phonology. 日本神経科学学会, *Neurosci. Res.* 55, Suppl. 1, S50, OS2A-8-07 (2006).
12. Iijima, K., Fukui, N. & Sakai, K. L.: Hierarchical syntactic processing in the left frontal region: An MEG study. 日本神経科学学会, *Neurosci. Res.* 55, Suppl. 1, S50, OS2A-8-08 (2006).
13. Kinno, R., Muragaki, Y., Hori, T., Maruyama, T., Kawamura, M. & Sakai, K. L.: Selective impairment of syntactic processing in patients with brain tumor. 日本神経科学学会, *Neurosci. Res.* 58, Suppl. 1, S46, O1P-G15 (2007).
14. Muto, M. & Sakai, K. L.: Prefrontal activations predict future performance improvement in learning phonics rules of English orthography and phonology. 日本神経科学学会, *Neurosci. Res.* 58, Suppl. 1, S46, O1P-G16 (2007).
15. Iijima, K., Fukui, N. & Sakai, K. L.: Visualization of temporal events in syntactic and semantic analyses for two-word sentences. 日本神経科学学会, *Neurosci. Res.* 59, Suppl. 1, O1-F10 (2008).

【牧グループ】

16. 山本由香里, 牧敦, 酒井邦嘉 : 文章処理関連領域における神経線維束トラッキング. 第29回日本神経科学大会, OS2A-8-11, 2006年7月19日, 京都
17. 山本由香里, 牧敦, 酒井邦嘉 : 言語関連領域間における解剖学的連絡の側性化の可視化. 第31回日本神経科学大会, O1-F12, 2008年2月14日, 東京

③ポスター発表 (国内会議 1 件、国際会議 20 件)

【酒井グループ】

1. Sakai, K. L., Miura, K., Narafu, N. & Muraishi, Y.: Correlated functional changes of the prefrontal cortex in twins induced by classroom education of second language. *Human Brain Mapping*, 2004年6月13日-17日, Budapest
2. Yeung, H.H., Hashimoto, R., Phillips, C. & Sakai, K.L.: N400-like MEG response elicited by verbs in English relative clauses. *BIOMAG 2004*, 2004年8月9日-12日, Boston
3. Yasui, T., Kaga, K. & Sakai, K. L.: Differential top-down modulation for language and melody-related activity in the auditory areas: An MEG study. *BIOMAG 2006, Abstr.* 15, 65, C1-2 (2006), Vancouver, Canada
4. Muto, M. & Sakai, K. L.: Cortical plasticity for learning English rules between spelling and pronunciation during second-language acquisition. *Soc. Neurosci. Abstr.* Program No. 263.7 (2006).

5. Iijima, K., Fukui, N. & Sakai, K. L.: Early hierarchical syntactic processing in Broca's area for merging words. 日本神経科学学会, *Neurosci. Res.* 58, Suppl. 1, S116, P1-h21 (2007).
6. Nauchi A., Hirano, K., Muraishi, Y. & Sakai, K. L.: The leftward structural asymmetry in the inferior frontal gyrus as an indicator of acquiring syntax in second language: A VBM study. 日本神経科学学会, *Neurosci. Res.* 58, Suppl. 1, S172, P2-h15 (2007).
7. Muto, M. & Sakai, K. L.: Cortical plasticity in juveniles for learning English phonics rules as a part of second language acquisition. *Soc. Neurosci. Abstr.* Program No. 738.16 (2007).
8. Yasui, T., Kaga, K. & Sakai, K. L.: Language and music: Differential hemispheric dominance in detecting unexpected errors in the lyrics and melody of memorized songs. *The 12th Japan-Korea Joint Meeting of Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery*, 2008年4月5日, 奈良
9. Kinno, R., Muragaki, Y., Hori, T., Maruyama, T., Kawamura, M. & Sakai, K. L.: Unexpected grammatical deficits in patients with a focal glioma in the left frontal cortex. 日本神経科学学会, *Neurosci. Res.* 59, Suppl. 1, P3-q07 (2008).
10. Iijima, K., Fukui, N. & Sakai, K. L.: The cortical dynamics selective for syntactic structures of sentences in a minimal-pair paradigm: An MEG study. *BIOMAG 2008, Abstr.* 16, 129-130, 1-7-19 (2008), Sapporo, Japan
11. 金野竜太、村垣善浩、堀智勝、丸山隆志、河村満、酒井邦嘉: 左前頭葉に局在した神経膠腫による統語処理障害. 第32回日本神経心理学会総会学術集会, 2008年9月18日, 東京
12. Kinno, R., Muragaki, Y., Hori, T., Maruyama, T., Kawamura, M. & Sakai, K. L.: Selective deficits in the comprehension of sentences with dependency relations caused by a glioma in the left dorsolateral frontal cortex. *The 46<sup>th</sup> Annual Meeting of the Academy of Aphasia*, *Abstr.* Program No. 60 (2008), Turku, Finland

【櫻井グループ】

13. Shinozawa, Y. & Sakurai, A.: A Role Sharing Model of Language Areas. *Proceedings of First International Workshop on Emergence and Evolution of Linguistic Communication.* (2004)
14. Shibui, N. & Sakurai, A.: FrameNet-Based Shallow Semantic Parsing with a POS Tagger. *Proceedings of Joint Workshop of Vietnamese Society of AI, SIGKBS-JSAI, ICS-IPJSJ and IEICE-SIGAI on Active Mining* (2004).
15. Suhara, Y. & Sakurai, A.: Generalization by Categorical Nodes in Recurrent Neural Networks. *Proceedings of BrainIT2005* (2005).
16. Shinozawa, Y. & Sakurai, A.: A Model for Linguistic Communication and Knowledge Transfer. *Proceedings of Second Int. Symp. Emergence and Evolution of Linguistic Communication*, April 2005, (2005), Hatfield UK
17. Suhara, Y. & Sakurai, A.: A Simple Computational Model for Classifying Small String Sets. *Proceedings of BrainIT 2006* (2006).
18. Iwata, Shinozawa, Y. & Sakurai, A.: A characterization of simple recurrent neural networks as a language recognizer. *Proceedings of ICONIP (International Conference on Neural Information Processing)* (2007).

## 【牧グループ】

19. 山本由香里, 牧敦, 酒井邦嘉: Influence of Spatial Normalization on Diffusion Tensor. *10th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping*, 2004年6月13日, ブダペスト
20. Yamamoto, Y., Maki, A. & Sakai, K. L.: Direct Anatomical Connections among Functionally Identified Prefrontal Regions for Sentence Processing. *Abstract of Human Brain Mapping*, 289-W-AM, 2006年6月14日, フローレンス
21. Yamamoto, Y., Maki, A. & Sakai, K. L.: Anatomical Connections among Brain Regions Functionally Identified for Syntactic Processing and Sentence Comprehension, *Abstract of Neuroscience2007*, 836-7, 2007年5月15日, サンディエゴ

## (3)特許出願

### ①国内出願 (1件)

発明の名称: 神経線維束計測システムおよび画像処理システム

発明者: 酒井 邦嘉、山本 由香里

出願人: 日立製作所、東京大学

出願日: 2006年11月27日

出願番号: 特願 2006-318981

### ②海外出願 (1件)

発明の名称: Measurement system and image processing system for neural fiber bundles

発明者: 酒井 邦嘉、山本 由香里

出願人: 日立製作所、東京大学

出願日: 2007年11月27日

出願番号: 11/987083

## (4)受賞等

### ①受賞

酒井邦嘉: 第19回塚原仲晃記念賞

### ②新聞報道

1. アクセントに妙味ありー新日本語の現場 206. 読賣新聞, 18 (2003年11月11日).
2. 左脳に「文法中枢」ー外国語マスターのカギ. 毎日新聞(夕刊), 8 (2004年1月27日); 日本経済新聞(夕刊), 20 (2004年1月27日); 東京新聞, 10 (2004年1月27日); 日本工業新聞, 2 (2004年1月27日); 日刊工業新聞, 36 (2004年1月27日).
3. 認知神経科学で学問する. 東京大学新聞, 東京大学新聞社, 2251, 2 (2004年4月13日).
4. 脳の文字中枢一部ー読み書き専門機能担う. 日刊工業新聞, 37 (2004年4月22日); 北海道新聞 (2004年4月27日).

5. 大人でも脳の学習機能活発. 日本経済新聞, 21 (2004年5月17日).
6. 脳を究める(第11回)謎を解く:言葉の秘密―「文法中枢」場所を特定. 日本経済新聞(夕刊), 3 (2004年8月16日).
7. 『言語の脳科学』著者インタビュー:新たな斬り口・なぜ日本人は英語苦手. 教育医事新聞, 9 (2004年12月25日).
8. 英語力つければ「省エネ脳」―中枢活動、少ない血流で. 朝日新聞(夕刊), 18 (2005年2月16日).
9. 英語習熟すれば脳の活動を節約. 日本経済新聞(夕刊), 18 (2005年2月16日); 東京新聞(夕刊), 10 (2005年2月16日); 北海道新聞(夕刊), 1 (2005年2月16日)
10. 英語ペラペラ 脳は省エネ. 読賣新聞, 30 (2005年2月23日); 東京大学新聞, 2 (2005年3月10日)
11. 「手話＝言語」脳の同じ部分が活動. 日本経済新聞(夕刊・社会面), 10 (2005年3月12日).
12. 手話も左脳で理解―日本語と同じ、実験で明らかに. 朝日新聞(文化面), 23 (2005年3月15日).
13. 外国語の習得―感受性期に言語の刺激を. 産経新聞(関西版), 10 (2005年5月30日).
14. 国際人って? (第5回)バイリンガルの子ども. 読賣新聞, 15 (2005年9月8日).
15. 単語、文章 考える場所は別々―脳の「言語地図」. 読賣新聞, 2 (2005年11月4日).
16. 言語と脳の謎を解く. (インタビュー:滝順一), 日本経済新聞(かがく Cafe), 31 (2006年4月9日).
17. 脳に言語地図描く. (インタビュー:橋本克彦), 東京新聞(サンデー版), 4-5 (2006年4月16日).
18. 読む力 成人も向上. 朝日新聞(be on Sunday), 2 (2006年5月28日).
19. 発見「英語脳スイッチ」へのコメント, 朝日新聞, 3 (2006年6月9日).
20. 「質問続け挑戦を」「ことばの科学」講演. 朝日新聞(鳥取版), 28 (2007年3月18日).
21. 脳の普遍性(日本人解剖・第2章 機能・体質). 産経新聞, 20 (2007年6月25日).
22. 手話で学べる―左脳使う自然な言語. 毎日新聞, 13 (2007年7月2日).
23. 日本の知力―言語の変化 自然の法則. 読賣新聞, 2 (2008年2月22日).
24. 英語修得に活動―脳の部位解明.朝日新聞(夕刊),12(2008年11月6日);日本経済新聞(夕刊),20(2008年11月6日);産経新聞,(2008年11月7日)

25. 子供の英語勉強、効果は？－開始時期より継続が重要. (インタビュー:滝順一), 日本経済新聞, 13(2008年12月21日)

### ③その他

#### 【酒井グループ・テレビ放映】

1. 『サイエンス ZERO』「脳科学を教育にいかせ～脳研究最前線～」. NHK 教育 (2004年2月3日).
2. 『小柴昌俊博士の楽しむ最先端科学』「言語学・なぜ人は言葉を話すのか?」. NHK 教育 (2004年11月5日, 2005年1月3日再放送).
3. 『ガリレオチャンネル』「脳は文法を知っている～酒井邦嘉の言語サイエンス」. 東京 MX テレビ (2005年2月27日, 2005年3月6日再放送).
4. 『放送大学大学院 文化科学研究科 教授・学習課程論 ～学習科学の展開～』第9回「学習の認知神経科学」. 放送大学 (2006年～2010年).
5. 『サイエンス ZERO』「ふたご研究最前線 環境と遺伝のひみつ」. NHK 教育 (2007年3月17日).

#### 【酒井グループ・記事や対談など】

1. 子どもの脳を育てる－脳科学の最新研究からの提言. *AERA*, 朝日新聞社, Vol. 16, No. 51, 12-13 (2003年12月8日).
2. 英語も脳の使い方は同じ－日本語と共通の「文法中枢」・中1授業で東大が初測定. *内外教育*, 時事通信社, 5451, 12 (2004年2月3日).
3. 教育の効果が直接確認できる. *内外教育*, 時事通信社, 5456, 8-9 (2004年2月20日).
4. 外国語習得も同じ「文法中枢」－中1英語で双生児に相関－. *JST ニュース* Vol. 1, No. 6, 6, 科学技術振興機構 (2004年3月1日).
5. 文字の習得に「文字中枢」－大人でも一夜漬けで脳が活性化－. *JST ニュース* Vol. 2, No. 9, 10, 科学技術振興機構 (2004年6月1日).
6. 大脳に文法を処理する中枢があることを発見－日本語も英語も活発になる部位は同じ. *JST 基礎研究最前線* No. 6, 8, 科学技術振興機構 (2004年7月).
7. 言語を獲得するコンピュータ. *日経バイト*, 日経 BP 社, No. 265, 50-53 (2005年5月22日).
8. カフェでサイエンス－科学者が街にやってくる. *JST News*, Vol. 2, No. 4, 12-13 (2005年7月).
9. 脳は言葉の設計図をもっている!. *マガジナルク*, Vol. 23, No. 11, 14-15 (2005年11月).
10. マルチリンガル英会話入門. *ニューズウィーク 日本版*, Vol. 21, No. 17, 36-43 (2006年4月26日).

11. バイリンガル脳. *ニューズウィーク 日本版*, Vol. 19, No. 27, 16-18 (2006年6月5日).
12. 子どもの英語脳. *AERA with Kids English*「英語キッズの育て方」, 20 (13), 20-25, 朝日新聞出版 (2007年3月15日).
13. 右脳と左脳、分子レベルでその非対称性を探る. (インタビュー: 西村尚子), *nature DIGEST 日本語編集版*, 4 (4), 20-23 (2007年4月).
14. MRIと脳機能地図. *nature DIGEST 日本語編集版*, 4 (6), 28 (2007年6月).
15. ようこそ私の研究室へ. *JST News*, 4 (3), 14-15, 科学技術振興機構 (2007年6月).
16. Comment for News in *Science* “Wired for Language”. *Science* (March 24, 2008).
17. 思考の基礎をつくる言葉. *Science Window*, 2 (1), 8-9 & 13, 科学技術振興機構 (2008年4月1日).
18. 脳から見た言語の発達. *ツインマザーズクラブ 会報*, 206, 9-13 (2008年4月1日).
19. 脳科学的には英語が苦手当たり前. *日経ビジネス Associé*, 7 (20), 43, 日経 BP 社 (2008年9月16日).
20. 言語の熟達度が脳で見える! *JST News*, 5 (11), 10-11, 科学技術振興機構 (2009年2月).
21. 座談会 書を楽しむ脳. *墨*, 197, 128-134 (2009年3月1日)

(5)その他特記事項

#### 【酒井グループ】

<総説>

1. Sakai, K. L.: Language acquisition and brain development. *Science* 310, 815-819 (2005).
2. Sakai, K. L. & Muto, M.: Cortical plasticity for language processing in the human brain. *Cognit. Sci.* 1, 211-225 (2007).
3. 酒井邦嘉: 脳の文法処理と再帰的計算—言語の脳科学をめざして—. *電子情報通信学会技術研究報告* 103 (520), 19-22 (2003).
4. 酒井邦嘉: 脳機能イメージングで言語教育の効果をみる. *実験医学* 22, 1322-1323 (2004).
5. 酒井邦嘉: 文法遺伝子は本当にあるのか. *分子精神医学* 4, 302-308 (2004).
6. 酒井邦嘉: 脳機能イメージングによる言語処理ネットワークの解明. *小川脳機能研究所年報* 4, 82-88 (2005).
7. 酒井邦嘉: 言葉の脳内処理機構. *高次脳機能研究(日本高次脳機能障害学会誌)* 25, 153-164 (2005).
8. 酒井邦嘉: 脳機能マッピングによる言語処理機構の解明. *生体の科学* 57, 30-36 (2006).

9. 安井拓也 & 酒井邦嘉: 音声言語処理と側頭葉. *臨床神経科学* 24, 531-533 (2006).
10. 金野竜太 & 酒井邦嘉: 言語の脳内処理機構. *臨床神経科学* 24, 743-745 (2006).
11. 応援メッセージ. バイリンガル・バイカルチュラルろう教育センター (2007年1月27日).
12. 「進学決定論ー物理から脳、そして言語へー」. *進学情報センターニュース* No. 46, 東京大学教養学部進学情報センター (2007年4月5日).
13. 「言語の脳科学ー文理融合の試金石」. *Frontiere* 2007, 東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻年報, 10-11 (2008年3月).
14. 金野竜太 & 酒井邦嘉: 失語症の機能回復の脳内機構. *総合リハビリテーション* 36, 1181-1185 (2008).

< 公刊物 >

1. 酒井邦嘉: 言語の神経機構. In: 『脳神経科学』, 伊藤正男監修, 三輪書店, 東京 (ISBN 4-89590-192-0), pp. 791-800 (2003).
2. 酒井邦嘉: 赤ちゃんはどうして言葉を覚えるのか. In: 『科学の最前線で研究者は何を見ているのか』, 瀬名秀明編, 日本経済新聞社, 東京 (ISBN 4-532-16468-0), pp. 116-133 (2004).
3. 酒井邦嘉: 脳に刻まれた「究極の規則性」を探す! In: 『科学者になる方法ー第一線の研究者が語る』, 科学技術振興機構プレスルーム編, 東京書籍, 東京 (ISBN 4-487-80055-2), pp. 39-43 (2005).
4. 酒井邦嘉: 言語発達の脳科学. In: 『脳を知る・創る・守る・育むー第7巻』, 「脳の世紀」推進会議編, クバプロ, 東京 (ISBN 4-87805-055-1), pp. 131-151 (2005).
5. Phillips, C. & Sakai, K. L.: Language and the brain. *McGraw-Hill Yearbook of Science & Technology 2005*, McGraw-Hill, New York (ISBN 0-07-144504-8), pp. 166-169 (2005).
6. 酒井邦嘉: 言語と脳からみた健康と病. In: 『16歳からの東大冒険講座ー[3]文学／脳と心／数理』, 東京大学教養学部編, 培風館, 東京 (ISBN 4-563-01913-5), pp. 127-140 (2005).
7. 酒井邦嘉: 学習の認知神経科学. In: 放送大学大学院教材『新訂 教授・学習過程論ー学習科学の展開』, 大島純他編著, 放送大学教育振興会, 東京 (ISBN 4-595-12619-0), pp. 106-120 (2006).
8. 酒井邦嘉: 『科学者という仕事ー独創性はどのように生まれるか』. 中公新書, 東京 (ISBN 4-12-101843-5) (2006).
9. 言語の謎に挑む脳科学. In: 『あたらしい教科書 3 ことば』, 加賀野井秀一・酒井邦嘉他監修, プチグラパブリッシング, 東京 (ISBN 4-903267-25-3), pp. 47-67 (2006).
10. 酒井邦嘉: テーラーメイド学習プログラム. In: 『50年後の日本』, 東京大学・野村證券共同研究「未来プロデュースプロジェクト」, 三笠書房, 東京 (ISBN 4-8379-2193-0), pp. 127-132 (2006).

11. Sakai, K. L.: Brain mapping of human language processing. *Brain Mapping and Language*, Nova Biomedical Books, New York (ISBN 1-59454-579-0), pp. 135-156 (2006).
12. 酒井邦嘉: 脳機能マッピングによる言語処理機構の解明. In: 『ブレインサイエンス・レビュー2007』, (財)ブレインサイエンス振興財団 伊藤正男・川合述史編, クバプロ, 東京 (ISBN 4-87805-077-2), pp. 219-233 (2006).
13. 堀田凱樹 & 酒井邦嘉: 『遺伝子・脳・言語ーサイエンス・カフェの愉しみ』. 中公新書, 東京 (ISBN 978-4-12-101887-8) (2007).
14. 酒井邦嘉: 言語脳科学の最前線. In: 『生命システムをどう理解するかー細胞から脳機能・進化にせまる融合科学』, 浅島誠編, 共立出版, 東京 (ISBN 978-4-320-05648-0), pp. 136-148 (2007).
15. チョムスキーの文法理論と脳科学からの挑戦(インタビュー:池上高志). In: 『生命システムをどう理解するかー細胞から脳機能・進化にせまる融合科学』, 浅島誠編, 共立出版, 東京 (ISBN 978-4-320-05648-0), pp. 173-182 (2007).
16. 科学の心をアインシュタインが教えてくれた. In: 『科学者の頭の中ーその理論が生まれた瞬間ー』, 進研ゼミ高校講座, ベネッセコーポレーション, 東京, pp. 2-6 (2007).
17. 脳科学から言語へのアプローチー脳活動の計測から人間の言語に迫る. 言語学との融合で脳機能を解明. In: 『東京大学 大学院総合文化研究科 広域科学専攻』, 日経 BP ムック「変革する大学」シリーズ, 東京 (ISBN 978-4-86130-318-0), pp. 92-93 (2008).
18. 酒井邦嘉: 人間の創造性の本質ー脳の再帰的計算. 文法. In: 『ACADEMIC GROOVE 東京大学アカデミックグルーヴ』, 東京大学編, 東京大学出版会, 東京 (ISBN 978-4-13-003330-5), pp. 100-103, 66 (2008).
19. 酒井邦嘉: チョムスキーの言語哲学. In: 『哲学の歴史 別巻ー哲学と哲学史』, 中央公論新社, 東京 (ISBN 978-4-12-403530-8), pp. 294-300 (2008).
20. 酒井邦嘉: 哲学者チョムスキー. In: 『哲学の歴史 別巻ー哲学と哲学史』, 中央公論新社, 東京 (ISBN 978-4-12-403530-8), p. 395 (2008).
21. 酒井邦嘉: 脳に描く言葉の地図. In: 『言葉の宇宙への旅立ち 2ー10代からの言語学』, 財団法人ラボ国際交流センター／東京言語研究所発行, ひつじ書房, 東京 (ISBN 978-4-89476-429-3), pp.59-98 (2009)

#### 【渡辺グループ】

##### <総説>

1. 渡辺英寿 & 川崎真護: 脳波・筋電図の臨床 光トポの主成分分析法による言語優位半球同定の検討. *臨床脳波* 45 巻 9 号, 567-571 (2003)
2. 渡辺英寿: 近赤外線トポグラフィーによる非侵襲脳機能計測の実際. *臨床神経生理学* 31 巻 2 号, 139 (2003)
3. 渡辺英寿: 脳機能イメージング 近赤外線脳機能マッピング(光トポグラフィー)による脳機能の診断. *新医療* 30 巻 3 号, 59-63 (2003)

4. 渡辺英寿: 近赤外線光トポグラフィーによる脳機能計測. *MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY*, 22 巻 3 号, 120-124 (2004)
5. 渡辺英寿: NIRS(近赤外線トポグラフィー). *MEDICAL REHABILITATION*, 40 号 44-50 (2004)
6. 渡辺英寿: 神経疾患における光トポグラフィー(NIRS)機能画像. *臨床精神医学* 33 巻 6 号, 757-765 (2004)
7. 渡辺英寿: 失語の近赤外線光トポグラフィー. *CLINICAL NEUROSCIENCE*, 24(7), 763-766 (2006)
8. 渡辺英寿: 光トポグラフィーによる脳機能の計測. *BRAIN and NERVE: 神経研究の進歩* (1881-6096)59 巻 5 号, 459-466 (2007.05)
9. 渡辺英寿, 近赤外線光トポグラフィーによる脳機能計測, *脳* 21(1344-0128)10 巻 3 号 Page293-298(2007.07)
10. 渡辺英寿: 脳神経外科における光トポグラフィーの応用. *臨床神経生理学*(1345-7101)35 巻 5 号, 272 (2007.10)
11. 小黒恵司, 横田英典, 山口崇, 宮田貴広, 庄島正明, 渡辺英寿: 言語優位半球同定のための光トポグラフィーの有用性 アミタールテストとの比較. *臨床神経生理学*(1345-7101) 35 巻 5 号, 401 (2007.10)
12. 小黒恵司, 横田英典, 渡辺英寿: 脳神経外科疾患と脳波 光トポグラフィーによる非侵襲的言語機能の計測. *臨床脳波*(0485-1447) 50 巻 2 号, 110-117 (2008.02)
13. 小黒恵司, 横田英典, 渡辺英寿: 高次脳機能障害の画像診断 光トポグラフィーによる高次脳機能の計測. *神経内科*(0386-9709) 68 巻 Suppl.5, 70-81 (2008.04)
14. 小黒恵司, 横田英典, 渡辺英寿: 近赤外線光イメージングによる非侵襲脳機能モニタリングの臨床応用. *CI 研究*(0918-7073) 29 巻 3-4 , 173—182 (2008.03)

## § 7 研究期間中の主な活動

ワークショップ・シンポジウム等 なし

## § 8 結び

本研究プロジェクトで、当初の研究計画を上回る成果が得られたという達成感があり、「言語の脳科学」という新しい人間科学の分野を開拓する手応えを感じている。今後も研究に専念し一層の研究を積み重ねることにより、CREST の成果を着実に発展させていく決意である。

この場を借りて、研究統括の津本先生、研究アドバイザーの先生方、そしてJSTの本部および「脳学習」事務所のスタッフの方々に厚く感謝の意を表したい。どうもありがとうございました。

