

戦略的創造研究推進事業  
発展研究（SORST）

研究課題  
「言語の脳機能に基づく言語獲得  
装置の解明」

研究期間：平成14年10月1日～平成15年12月31日

研究代表者  
酒井 邦嘉  
東京大学大学院総合文化研究科 助教授

# 1 . 研究実施の概要

## 1 . 1 基本構想

脳科学の進歩に伴い、人間の脳の活動を画像として捉える機能的磁気共鳴映像法 (fMRI) や光トポグラフィ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、人間だけに備わった言語能力が、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な謎であった。言語獲得装置とは、チョムスキーが言語を司る脳に対して用いたコンセプトである。本研究は、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ようとするものである。

平成 9 年～14 年に実施された戦略的基礎研究推進事業 (CREST) の研究領域「脳を創る」においては、文法処理で特異的に活動する大脳の部位の発見、文法処理とブローカ野の働きの因果関係の証明、文法処理がブローカ野で担われていることを示す最初の知見、言語入力から文理解までのプロセスの解明、光トポグラフィによる言語解析パラダイムの確立、「言語の脳科学」の基礎づけと体系化、脳をモデルにした自然言語処理の開発、などの成果があった。特に、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発見は、「言語の脳科学」の突破口となる成果であった。この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。これらの計測技術により言語の脳機能イメージングを行い、既実施課題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ねらいである。また、新たに MEG (脳磁計測) 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な着眼点とするために必要な準備を進めた。

具体的な研究実施計画として、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、音声認識や文理解、および発話などの言語処理過程における脳活動を fMRI および光トポグラフィ等により計測し、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。

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。これにより、言語獲得装置の特徴の解明を一層進めるのが最大の目標である。

## 1.2 研究全体の成果

聴覚と視覚のモダリティーについて、文レベルの処理と語彙レベルの処理に伴う皮質活動を機能的磁気共鳴映像法 (fMRI) を用いて直接比較し、文レベルの処理に選択的な活動を示す脳の領域を同定を試みた (Homae et al., 2002)。その結果、左下前頭回腹側部が、聴覚と視覚の両モダリティーに共通して文理解の処理に選択的に関わっていることが明らかになった。我々は、さらに文法判断を音韻判断および意味判断と対比させることで、文法判断の機能局在を事象関連 fMRI により調べた (Suzuki & Sakai, 2003)。言語刺激はすべて聴覚的に提示し、文法判断条件 (Syn) では刺激文が文法的に正しいかどうかを判断させた。意味判断条件 (Sem) では刺激文中の名詞と動詞の意味的つながりが正しいかどうかを判断させ、音韻判断条件 (Pho) では動詞のアクセントが正しいかどうかを判断させ、音声ピッチ比較条件 (Voi) では声のピッチを比較させた。すべての条件で同じ単語セットから刺激文を作成し、語彙を統制した。その結果、Syn - (Sem + Pho + Voi) において左下前頭回 (ブローカ野) にのみ有意な活動が見られた。この領域は、英語の母語話者を対象とした文法エラーに選択的に反応する部位 (Embick et al. 2000) と一致する。Sem と Syn それぞれにおいて正文と誤文の試行を分けて解析したところ、左下前頭回は正文と誤文のいずれにおいても Syn に選択的な活動を示した。これらの結果は、左下前頭回が音韻判断や意味判断ではなく、文法判断に選択的に関わっていることを示唆する証拠である。この成果により、2002年にプレス発表を行った「文法中枢」の発見を裏付ける事ができた。

一方、自然言語処理の開発によって言語獲得モデルを構築するため、再帰型神経回路網を用いる他の言語学習研究とは異なり、多数のモジュールを用いる言語学習のための神経回路の構成と学習アルゴリズムの研究を進めた。その結果、学習過程ごとに、環境に適した強化学習エージェントが選択され、最終的には環境全体に適したエージェントが選択された。また、系全体の学習時間も大幅に低減されることがわかった。

本プロジェクトにおける、無侵襲的脳機能計測のための技術開発においても、特筆すべき成果が得られた。近赤外光分光法 (NIRS) については、事象関連光トポグラフィの開発、磁気刺激と光トポグラフィの同時計測、短波長近赤外光による計測などが実現した。MRI による神経線維束トラッキングの技術開発では、脳活動部位間における神経的な結合状態が明らかにすることで、脳機能の理解に貢献することが期待される。

## 1.3 各サブグループ毎の成果

酒井グループは、相関分析法 (correlation analysis) に基づく新しい手法を fMRI 時系列信号データに適用し、複数の ROI が示す信号変化の相関を求めることにより、言語処理における皮質領域間の機能的結合を定量的に評価した。視覚・聴覚刺激条件下の文課題および語彙課題のデータに本解析法を適用したところ、この左下前頭回腹側部と左中心前溝との

間で、文課題において最も強い相関が見られることが示された。以上の結果より、前頭前野における領域間の結合は、文処理において選択的に機能することが初めて明らかになった (Homae et al., 2003)。

一方、音声の認識と発話のシステムを明らかにするため、遅延聴覚フィードバック効果と呼ばれる現象のメカニズムを fMRI により解析した。その結果、遅延聴覚フィードバック条件において、両側の上側頭回に顕著な活動が見られた。従って、聴覚入力 of 遅延に伴う発話の適応制御において、両側の上側頭回が重要な役割を果たすと考えられる (Hashimoto & Sakai, 2003)。

さらに我々は、NIRS の手法を応用して、単一事象の信号変化を捉える「事象関連光トポグラフィ」の手法を初めて開発し、文法処理と意味処理に伴う皮質活動を分離することに成功した (Noguchi et al., 2002)。さらに、磁気刺激と光トポグラフィの同時計測に初めて成功し、運動閾値下の磁気刺激による皮質活動を直接証明した (Noguchi et al., 2003)。

櫻井グループは、入力文の解析において、意味的に可能な格フレームや構文的に可能な格フレームごとに起動されるモジュールがあり、それらが競合・協調して最尤解釈を求めるモデルを考えた。この格フレームに対応するモジュールの学習を強化学習と考え (正解が与えられない一方、全体としては、状況にあった解釈ができたときの満足度としての報酬が与えられると考える) 本プロジェクトで開発した強化学習アルゴリズムを適用することが可能になった。

渡辺グループは、脳梗塞や脳出血で失語症となり、その後症状の改善が見られた症例について、言語活動中の機能計測を NIRS を用いて行った。6/15 例 (40%) で右 IFG が活性化しており、回復過程で対側の対応部位が大きな役割を果たしていると言う従来からの仮説を指示する所見であった。また、傷害された部位の反応が負の反応を示す例が多くみられる事から、障害部位の血管反応性も大きく変化している事が考えられる。

牧グループは、NIRS を用いて、前頭葉・側頭葉・後頭葉・頭頂葉の 4 部位における、信号 / 雑音比および計測感度の空間分布の波長依存性を検討した。その結果、692/830 nm が最も計測に適した波長であることを見出した。また、各 Hb 信号の波形から、それぞれの波長の組合せでほぼ同じ皮質活動を捉えている事が示唆された。

さらに、MRI による神経線維束描画技術を開発する目的で、モデル画像を用いたシミュレーションにより、フィルタの種類やパラメータの違いによる固有ベクトル整列化効果や空間分解能への影響を定量的に評価した。その結果、固有ベクトルの整列化効果が高く空間分解能の劣化が少ないという 2 点から、フィルタ画素サイズが  $3 \times 3 \sim 5 \times 5$  の適応ウィナフィルタが最適であることが明らかになった。

## 2 . 研究構想

### 2 . 1 脳機能計測・文法解析による言語獲得装置の解明（酒井グループ）

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 fMRI による研究をさらに推進する。特に、文処理における複数の領域の機能を同定し、これらの領域間の機能的結合を明らかにすることで、言語モジュール間のダイナミクスをモデル化することを目標とする。

経頭蓋的磁気刺激法（TMS）は、頭部の外から脳表の神経細胞群を局所的に刺激する無侵襲の技術であり、脳機能イメージングの相補的な手法として、近年注目を集めている。言語研究では、人間のみを対象とする実験の制約から侵襲的な方法が使えず、言語の神経基盤の解明は、構造と機能の両面から困難を極めてきた。そのため、磁気刺激が効果的に使えるような実験条件とパラダイムを確立することが急務であり、その意義は極めて大きいと考えられる。本研究では、磁気刺激が引き起こす皮質活動を明らかにする目的で、事象関連光トポグラフィの手法を用いた磁気刺激との同時計測を試みた。

### 2 . 2 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）

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。

### 2 . 3 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）

fMRI 実験で明らかになった脳部位をもとにして、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、NIRS を用いて脳活動を計測する。損傷した脳が言語を獲得する機序を検討することにより、脳の機能回復の機序を明らかにすることを試みる。

### 2 . 4 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）

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。

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。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 . 研究内容

#### 3 . 1 脳機能計測・文法解析による言語獲得装置の解明 (酒井グループ)

##### (1)実施の内容

我々の最近の実験で、音声言語の両耳異刺激聴条件と両耳同刺激聴条件における聴覚野の活動を fMRI を用いて比較し、注意の効果が各領域によってどのように異なるかを検討した (Hashimoto et al., 2000)。その結果、一次聴覚野、側頭平面、上側頭回などにおいて局所的な活動が観察され、両条件に対する信号量の変化のパターンが、聴覚連合野において複数存在することが明らかになった。以上の結果は、音声言語処理において、聴覚連合野が複数の経路に機能分化していることを示唆する。次のステップとして、聴覚と視覚のモダリティーについて、文レベルの処理と語彙レベルの処理に伴う皮質活動を fMRI を用いて直接比較し、文レベルの処理に選択的な活動を示す脳の領域を同定を試みた (Homae et al., 2002)。その結果、左下前頭回腹側部が、聴覚と視覚の両モダリティーに共通して文理解の処理に選択的に関わっていることが明らかになった (図 1 - 1)。

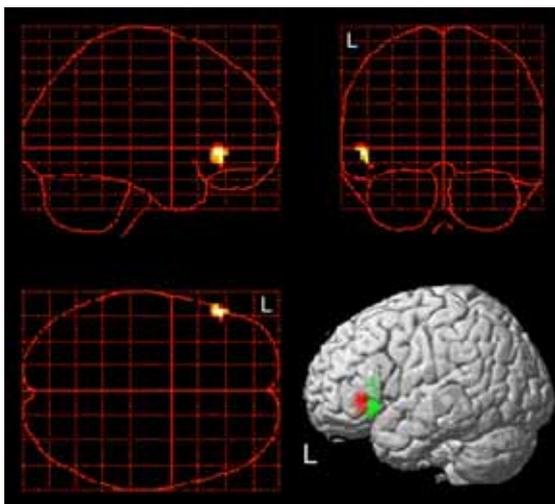


図 1 - 1 文理解に選択的な前頭前野の活動

文レベルの処理と語彙レベルの処理の直接比較による統計的に有意な活動 (SPM99 による) を、標準脳の左外側面 (右下) および 3 方向の投影図に表示した。緑の部分は視覚条件で、赤の部分は聴覚条件であり、両者は互いに重なり合う。

我々は、さらに文法判断を音韻判断および意味判断と対比させることで、文法判断の機能局在を事象関連 fMRI により調べた (Suzuki & Sakai, 2003)。言語刺激はすべて聴覚的に提示し、文法判断条件 (Syn) では刺激文が文法的に正しいかどうかを判断させた。意味判断条件 (Sem) では刺激文中の名詞と動詞の意味的つながりが正しいかどうかを判断させ、音韻判断条件 (Pho) では動詞のアクセントが正しいかどうかを判断させ、音声ピッチ比較条件 (Voi) では声のピッチを比較させた。すべての条件で同じ単語セットから刺激文を作成し、語彙を統制した。その結果、Syn - (Sem + Pho + Voi)において左下前頭回 (ブローカ野) にのみ有意な活動が見られた (図 1 - 2 A)。この領域は、英語の母語話者を対象とし

た文法エラーに選択的に反応する部位 (Embick et al. 2000) と一致する (図 1 - 2 B)。Sem と Syn それぞれにおいて正文と誤文の試行を分けて解析したところ、左下前頭回は正文と誤文のいずれにおいても Syn に選択的な活動を示した。これらの結果は、左下前頭回が音韻判断や意味判断ではなく、文法判断に選択的に関わっていることを示唆する証拠である。この成果により、2002 年にプレス発表を行った「文法中枢」の発見を裏付ける事ができた。

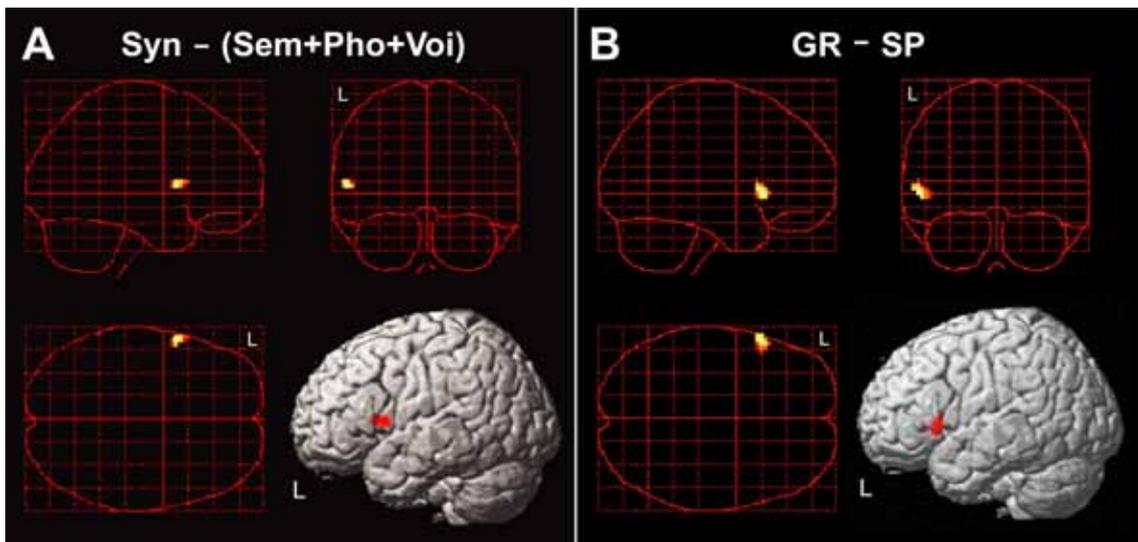


図 1 - 2 A) 文法判断条件を意味判断条件・音韻判断条件・音程判断条件と比較して得られた脳活動。左の下前頭回のみ活動が局在する。B) 文法エラー検出条件 (GR) をスペリングエラー検出条件 (SP) と比較して得られた脳活動。A と同じ領域に活動が局在する。

fMRI を用いて大脳皮質の機能を調べる際に、実験条件間での信号変化の有意性を t 検定によって判定するのが一般的である。しかし、抽出された複数の領域 (ROI: region of interest) がどのように機能的に結合しているかを t 検定で判定することは出来ない。本研究では、相関分析法 (correlation analysis) に基づく新しい手法を fMRI 時系列信号データに適用し、複数の ROI が示す信号変化の相関を求めることにより、言語処理における皮質領域間の機能的結合を定量的に評価した。視覚・聴覚刺激条件下の文課題および語彙課題を用いた我々の先行研究では、左下前頭回腹側部が文処理に選択的に関わっていることが示されている (Homae et al., 2002)。このデータに本解析法を適用したところ、この左下前頭回腹側部と左中心前溝との間で、文課題において最も強い相関が見られることが示された (図 1 - 3)。以上の結果より、前頭前野における領域間の結合は、文処理において選択的に機能することが初めて明らかになった (Homae et al., 2003)。

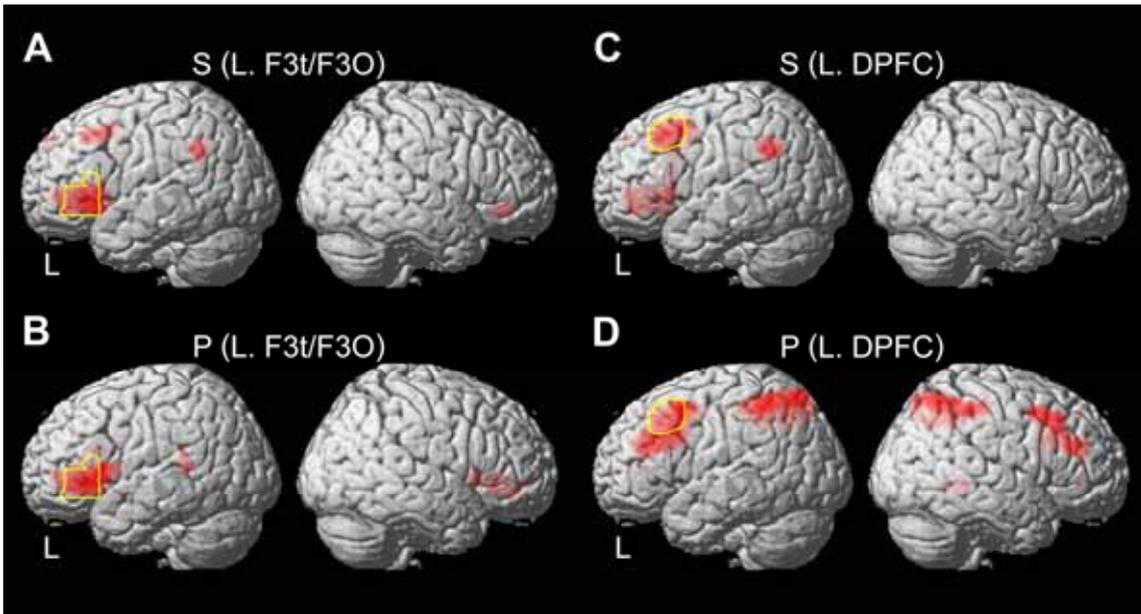


図 1 - 3 文課題 (S) と語彙課題 (P) における機能的結合

左下前頭回腹側部を参照領域とした場合 (A, B) と左中心前溝を参照領域とした場合 (C, D) の両方において、文課題に選択的な機能的結合が 2 領域間に見られた。

発話時に、自分の声が約 200 ミリ秒遅れて聞こえると、発話が非流暢になることが知られており、遅延聴覚フィードバック効果と呼ばれている。この遅延聴覚フィードバック効果は、聴覚入力の遅延に合わせて発話を遅延させる制御を反映していると考えられる。

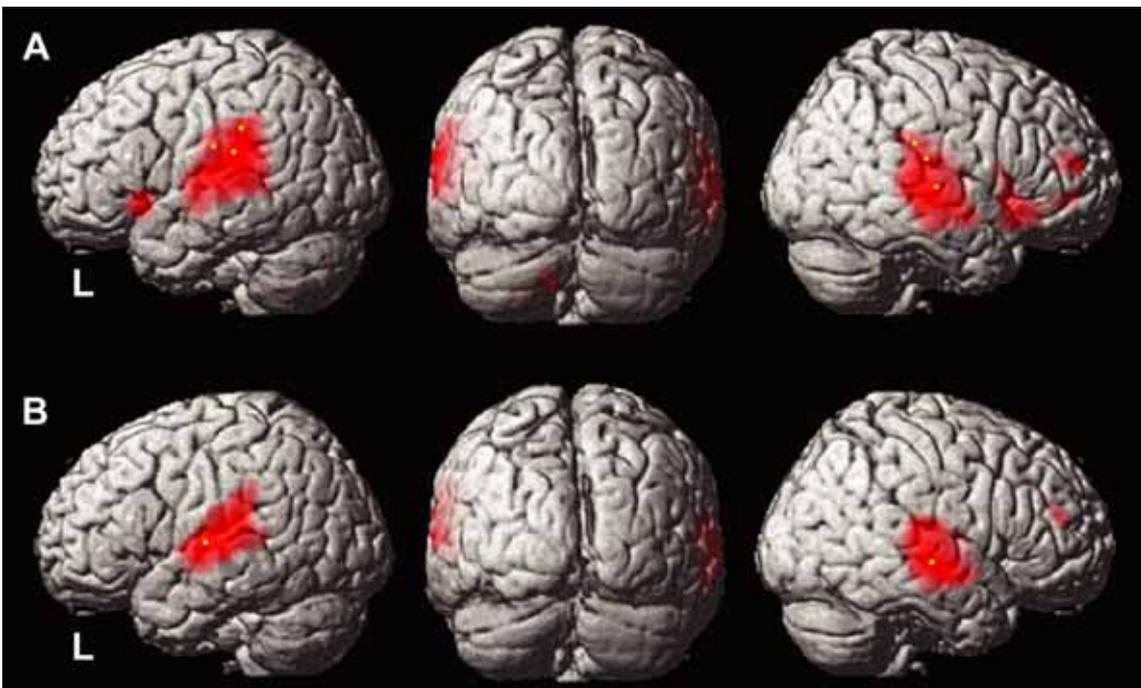


図 1 - 4 遅延聴覚フィードバック効果による脳活動

本研究では、視覚呈示した七文字からなる文を被験者に音読させ、1)リアルタイムの聴覚フィードバック条件下で発話する条件(NORMAL)、2)リアルタイムの聴覚フィードバック条件下で速く発話する条件(FAST)、3)遅延聴覚フィードバック条件下で発話する条件(DELAY)の3条件下における脳の活動をfMRIによって計測した。Sparse Temporal Samplingを用いて、MRIのスキャンに伴う音が被験者の声と重ならないようにした。DELAY - NORMALの比較において、両側の上側頭回と下前頭回弁蓋部、および小脳に活動が見られた(図1 - 4A)。DELAY - FASTでは、同様に両側の上側頭回に強い活動が観察された(図1 - 4B)。一方、NORMALとFASTの比較では、これらの領域の活動に差が見られなかったため、これらの活動が発話の速度を反映している可能性を除くことができる。以上の結果より、聴覚入力の遅延に伴う発話の適応制御において、両側の上側頭回が重要な役割を果たすと考えられる(Hashimoto & Sakai, 2003)。

我々は、新しい無侵襲の脳機能計測技術である光トポグラフィを用いて、言語機能をマッピングする手法を確立してきた。本研究において、単一事象の信号変化を捉える「事象関連光トポグラフィ」の手法を初めて開発し、文法処理と意味処理に伴う皮質活動を分離することに成功した(Noguchi et al., 2002)。左下前頭回において、正文の試行と誤文の試行の両方で、文法処理に選択的な酸素化ヘモグロビンの増加が観察された。この結果は、fMRIおよび経頭蓋的磁気刺激(TMS)による我々の知見と一致している(Sakai et al., 2002; Suzuki et al., 2003)。

経頭蓋的磁気刺激(TMS)が脳の局所的な活動に及ぼす影響は、従来PETやfMRIにより検討されてきたが、PETでは時間分解能が低く、fMRIでは強磁性体のコイルを装置内に持ち込むのが困難であった。本研究ではこれらの制約を受けない光トポグラフィを用い、TMSとの同時計測を行った。まず、被験者の運動野(手指対応部位)をMRI画像上で正確に同定し、TMSコイルをその直上の頭皮上に設置して、コイル直下にある皮質の血流変化を2波長の近赤外光で計測した。右手の第一背側骨間筋から筋電図を導出し、有意な神経筋活動を引き起こす最小の刺激強度を運動閾値とした。運動閾値の110%、90%、70%のいずれかを刺激強度とする単発刺激に対して、事象関連光トポグラフィの手法により信号変化を計測した。その結果、110%と90%の刺激により有意な酸素化ヘモグロビンの増加が観察されたが、70%ではこのような増加は見られなかった。以上の結果により、単発磁気刺激が脳血流を増加させることが示され、運動閾値下の刺激による事象関連活動の検出が光トポグラフィによって可能であることが明らかになった(Noguchi et al., 2003)。従って、この脳血流の増加は末梢の筋活動からの求心性入力ではなく、中枢における神経活動を直接反映すると考えられる。

## (2)得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

言語は、人間に固有の脳のはたらきである。アメリカの言語学者のチョムスキーは、言語のデータを入力として文法を出力するような、「言語獲得装置」が脳に存在すると仮定し、そのしくみを普遍文法と名付けた。この言語のメカニズムは、生まれつき備わった生得的な能力であり、一般的な学習のメカニズムとは全く異なると考えられている。そのため、言語の研究は、人間だけに備わる心の働きを明らかにするための突破口となることが期待されている。脳科学の進歩に伴い、人間の脳活動を画像として捉える手法を用いて、心のさまざまな機能の座が、脳のどこにあるかを調べられるようになってきた。しかし、人間だけに備わった言語能力が、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な謎であった。

本研究プロジェクトのような言語の脳科学における成果の積み重ねが突破口になって、人間の人間たるゆえんである心の働きの解明が進むことが期待される。また、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。言語の脳科学は、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、自閉症のよう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、言語障害の機能回復を促すリハビリテーションの過程においても、ブローカ野周辺皮質の活動をモニターすることが重要である。このように、脳研究の成果には、福祉の分野における大きな社会貢献が期待されている。

文法の処理が脳の機能として独立しているという我々の発見は、「言語の働きは、一般的な記憶や学習では説明できないユニークなシステムである」というチョムスキーの主張を支持する。言語が人間の脳で特別な意味を持つことを初めてはっきりさせたことにより、言語教育を科学的な裏付けをもって実践する道が開かれたと言える。実際、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発見は、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。言語の脳科学の成果は、一般的な認知発達の枠組みでは説明できない「言語の生得性」に対する理解を深めると共に、このコンセプトに基づく新しい教育方法を提案することで、学校における言語教育の改善に転機をもたらすと考えられ、教育学などの学問分野だけでなく一般社会の発展に貢献することが期待される。「脳を育む」という新しい研究領域において、言語の発達と教育はその主要テーマの1つである。近年、早期教育や語学教育について社会的な関心が高まる中で、科学的な根拠のない主張が乱立して混沌とした状況にある。その際に、一般化された学習のメカニズムの研究のみに偏らないためにも、生得的な言語獲得の機構が存在することを脳研究で明らかにしていくことは特に重要である。

Sakai, K. L., Noguchi, Y., Takeuchi, T. & Watanabe, E.: Selective priming of syntactic processing by event-related transcranial magnetic stimulation of Broca's area. *Neuron* **35**, 1177-1182 (2002).

Homae, F., Hashimoto, R., Nakajima, K., Miyashita, Y. & Sakai, K. L.: From perception to sentence comprehension: The convergence of auditory and visual information of language in the left inferior frontal cortex. *NeuroImage* **16**, 883-900 (2002).

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).

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).

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).

Noguchi, Y., Takeuchi, T. & Sakai, K. L.: Lateralized activation in the inferior frontal cortex during syntactic processing: An event-related optical topography study. *Hum. Brain Mapp.* **17**, 89-99 (2002).

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).

### 3.2 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)実施の内容

非常に汎用的な能力を有する人工神経回路網に、どのような制限を加えれば、効果的な言語学習が可能となるかを追究すること、最終的には、人間の言語処理・言語獲得のモデルを構築することを目的として研究を行ってきた。

人工神経回路網は、有界かつ連続な関数であれば任意精度で近似できる(ただし、使用する素子数は任意に増加できると仮定する)ことは証明され、また、適当な初期値から、適当な個数の教師データを使用して教師あり学習を行えば、学習が収束することも証明されている。さらに、実際のデータに対しても、振

る舞いのよい学習結果をもつことが実験的に知られている。また、人工神経回路網は、脳の非常に簡単な、しかし、現在我々が有するモデルの中では最もよく脳の神経回路をモデル化することが知られている。

一方で、言語が有する構文法は、ある文字列が文であるか非文であるかを区別する規則としては、非常に強力なものであって、一般に、無限個の正例と有限個の負例からでは学習不能であることが知られている。

従って、人間の脳においても、人間の脳は人工神経回路網と同等かそれ以上の表現能力・学習能力を有するのであるから、もしも、何らかの構造的な制限が神経回路網に存在しないのであれば、言語の獲得ができないことが推論できる。そこで、そのような制限がどのようなものであるかを明らかにすることは、人工神経回路網の学習研究だけでなく、言語の獲得過程に関する知見を提供し、言語の発展過程に対する示唆や、さらには、言語の学習方法の改善に対する示唆を与える可能性がある重要な研究課題である。

そのために、人工神経回路網が言語を効率よく学習するために、そこへ加えるべき合理的な制約を追究することとしたのである。そのために、理論的な研究とシミュレーションモデルの構築を目指した研究とを行ってきた。

## (2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

言語学習を可能とする人工神経回路網はいまだ提案されていないが、常識的に、非常に巨大な人工神経回路網となることが推定される。それは deterministic でもまた probabilistic でもありうる。しかし、いわゆる feedforward 型では、可能無限な長さをもつ実際の文を入力とすることはできないことから、再帰結合 recurrent connection を有する再帰結合型神経回路網を考えなければいけないことがわかる。

再帰型神経回路網においては、ノイズにより演算精度や表現精度が有限となる場合には、高々有限状態オートマトンしか表現できないことが知られている。一方で、無限精度での演算・表現が可能であれば、Turing機械以上の能力をもつことも知られている。なお、計算精度が無限というのは、実際上ありえない仮定であるが、人間のもつ神経素子の個数、実際の神経素子の表現能力の高さから考えると、無限精度表現可能としたモデルで近似するのは十分に意味のあることである。

これまでの研究で、我々は、精度を無限としても、文・非文の判断が(0でない)正の距離をおいてなされると仮定し、さらに、局所的な恒等関数は表現できないと仮定すると、stackが実装できないことを示した。文脈自由言語以

上の言語を認識するためには、stackは最低限必要であるので、自然言語を処理するためには、精度無限な上、ある処理を行う神経回路網にはその逆関数を計算する神経回路網が必要であるという構造上の制約が必要なことが分かる。すなわち、一様な神経回路網ではなく、内部にモジュールが存在しそれらが、(少なくとも、他のモジュールの逆関数を表現するような)モジュール構造をもっている神経回路網でないと、そもそも文脈自由言語というかなり単純な言語でさえ処理できないことになることがわかる。

そこで、本研究においては、再帰型神経回路網を用いる他の言語学習研究とは異なり、多数のモジュールを用いる言語学習のための神経回路の構成と学習アルゴリズムの研究を進めてきた。下記の3つのアプローチを並行して進めてきた。

- (a) モジュール構造における学習アルゴリズムの探求
- (b) 自然言語処理技術研究において得られた知見の反映
- (c) 人間の言語処理機能研究で得られた知見に基づく、下位レベルモデルへの制約の探求

以下では (a) と (b) について報告する。

(2-a) 実際の人間の言語処理は、外部から観察する限り、複数の処理機構が並列し、競合しながら、妥当な解釈・生成を行っているように見える。多数の神経素子間の競合を基本情報処理機構として作られたモデルはある(これを発展させれば多数の人工神経回路網による処理モデルとなる)。KohonenのSOM(self-organizing map)はその代表である。このような単純な素子を基本とするとき、競合モデルを(学習アルゴリズムに従いながら)構築することはできる。

しかし、個々の素子をモジュール

で置き換えた、多数の人工神経回路網によるモデルでは、その学習は、予め目的を設けての学習(すなわちモジュールごとに役目を固定しての学習、例えば、

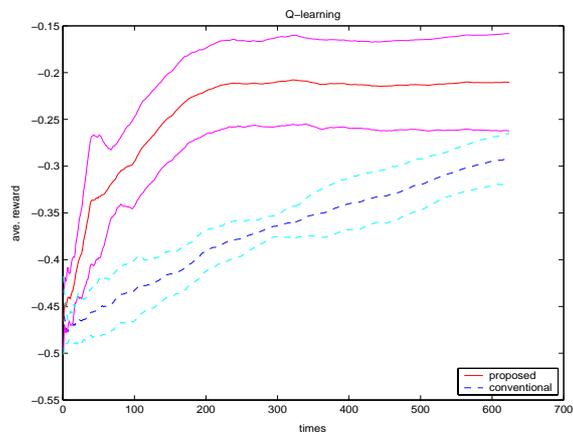


図 1 Q学習学習に関し、1エージェント場合(寒色)と複数エージェントの場合(暖色)との学習速度の比較。横軸は行動回数、縦軸はその時点までの平均獲得報酬を表す。それぞれ中央が10回の平均値、その上下は標準偏差。

Miikkulainen 1991) のみが研究されている。しかし、モジュールごとに役目を固定し教師あり学習を行うことは、教師信号が与えられようがない現実の言語獲得を説明することはできない。そこで、多くの人工神経回路網による並列処理・学習モデルを新たに構築する必要があった。

人工神経回路網における学習モデルとしては、教師あり学習を用いることが多い。しかしながら、言語の学習のように、正解が必ずしも与えられないような環境で、しかも、複数の(的確な処理モジュールとなりうる、しかし、的確な処理モジュールとなるにはどのような入出力関係を満足すればよいか)が明確ではないような)モジュールの学習はこれまで研究されたことがなく、可能性さえ明確ではない。教師なし学習としては、

強化学習手法が有名であり、脳のモデルとしては、その中でも actor-critic 型の学習機構が用いられ、小脳や大脳の運動学習モデルとして成功している。そこで、人工神経回路網(またはその組合せ)が強化学習の枠組みで学習し、しかも、的確になりうるモジュールが複数あるという枠組みでの学習アルゴリズムを検討した。この結果、複数の強化学習エージェントが競合しながら学習する機構を考案し、シミュレーションでその有効性を確認した。なお、人工神経回路網また強化学習の枠組みで言語を学習するようなものはこれまで確立されていなたため(試みは多いが、共通認識となったモデルはない)、このシミュレーションは、強化学習のアルゴリズムの有効性確

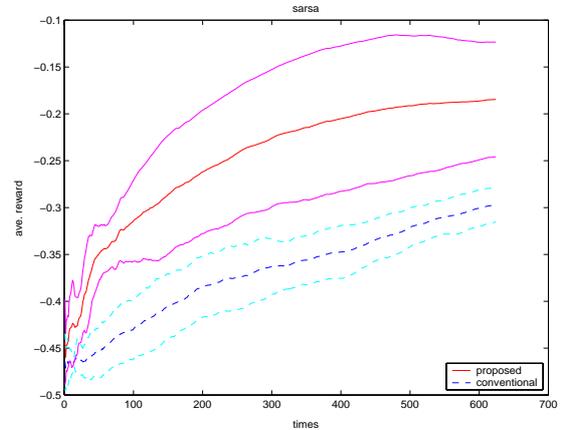


図 2 Sarsa学習に関し、1エージェント場合(寒色)と複数エージェントの場合(暖色)との学習速度の比較。横軸は行動回数、縦軸はその時点までの平均獲得報酬を表す。それぞれ中央が10回の平均値、上下は標準偏差。

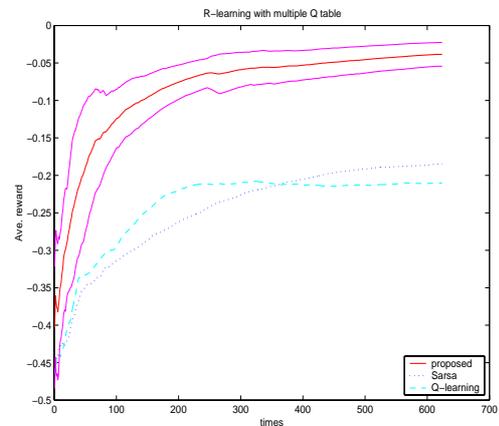


図3 R学習エージェントを複数用いた場合(暖色)の学習速度とQ学習またはSarsa学習エージェントを複数用いた場合(寒色)の学習速度の比較。横軸は行動回数、縦軸はその時点までの平均獲得報酬を表す。それぞれ中央が10回の平均値、上下は標準偏差。なお、単一エージェントによるR学習は学習が全く進行せず、平均獲得報酬は下限である  $-0.5$  となった。

認にしばしば用いられる、ロボットの環境を用いて行った。

強化学習は、行動や成果に基づいて報酬が与えられるとき、その累積報酬を最大化しつつ、将来の累積報酬が最大となるような行動方針を学習することを目的とする。なお、報酬は通常正の値を用いるが、罰に対応する負の報酬を与えることもできる。実験は、強化学習の代表的な学習アルゴリズムであるQ学習・Sarsa学習について行った。学習過程ごとに、環境に適した強化学習エージェントが選択され、最終的には環境全体に適したエージェントが選択された。また、系全体の学習時間も大幅に低減された。

また、それほど一般的ではないが重要な強化学習方法であるR学習についても実験を行った。実験で用いた環境は、強化学習の環境としては時間を要するものに属するため、R学習アルゴリズムでは学習が全く進行しない環境となっているにも関わらず、本手法を用いることにより、Q学習・Sarsa学習に本手法を適用した場合よりも更に高速な学習が行われた。

R学習は、真に累積報酬を最大化するほぼ唯一の学習アルゴリズムにも関わらず(実はQ学習・Sarsa学習では、将来獲得すると期待される報酬に対しては、恰も期待利益を計算するときのように、一定割引率で割引いた報酬を用い、累積値の算出を行っている)、limit cycle という落とし穴(低報酬にも関わらず安定なため脱出できない状態遷移)に陥ることが非常に多いためこれまで理論的研究もシミュレーションもあまり行われてこなかった歴史がある。その意味でも、本手法は非常に期待されるものである。

(2-b) 自然言語処理に関しては、計算機科学において、従来、非常に多くの研究がなされている。その一つは、構文解析に関する研究であり、実用的な機械翻訳が可能と考えられ活発な研究が開始された1960年代以降現在に至るまで行われている。また、1990年代以降、膨大なテキストデータが蓄積されかつ広範囲に利用される環境が整いつつある中、正確な構文解析を行うことなく、意味をできるだけ捉え情報検索に活用しようという研究が行われてきた。いずれも、脳による言語処理方法に関する研究ではないが、言語という特異な現象を、数学的・理学的に解析し、工学的応用を図った研究であるがゆえに、脳のモデルを構築する上で参考となる知見・技術が多いと考えられる。

従来、構文解析と意味解析とは独立に(そして一般的には、構文解析後、意味解析が)行われていた。この方法は、多義性のない構文法をもつ計算機言語の解析には有効であるが、多義の解消が容易ではない自然言語には適さない。一方、実際の人間は、単に多義だけでなく、構文的に誤りを含む文も対象と

しその妥当な解釈を得ているにも関わらず、その解析は極めて高速である。このことから、人間は、多数の構文的に可能な解釈を一つ一つ試みような時間の掛かる方法を用いているとは考えられず、構文解析とともに意味解析も行っていると考えられる。これをモデル化するには、構文解析は、意味解析と結び付けやすい格フレーム単位の解析を行うと考えるのが自然である。

そこで、入力文の解析には、意味的に可能な格フレームや構文的に可能な格フレームごとに起動されるモジュールがあり、それらが競合・協調して最尤解釈を求めるモデルを考えた。この格フレームに対応するモジュールの学習を強化学習と考え（正解が与えられない一方、全体としては、状況にあった解釈ができたときの満足度としての報酬が与えられると考える）、上記 (a) のモデルを適用することができる。

文生成は、意味格フレームから外部表現と等価な列を生成する過程であると捉え、解析に使用する格フレームモジュールをcritic とし、actor にあたる格フレーム生成モジュールの学習を行う actor-critic モデルを考える。これらも複数並列に動作させながら学習させる。(a) で開発した強化学習アルゴリズムを用いることにより、系全体による学習が可能となる。

### 3.3 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）

#### (1)実施の内容

脳機能計測法として確立されている fMRI は脳の一群の神経細胞が活動するとその部分を還流している細動脈が拡張してその周囲に血流が増加する生理機序を基礎としている。われわれが開発した近赤外線スペクトログラフィー（NIRS）はこの現象を酸化型・還元型ヘモグロビンをそれぞれ区別して捉えることができる手法である。今回は 24 あるいは 48 チャンネルの測定器を用いて言語活動中の脳血液量の変化を観察した。健常人に用いて言語反応を測定する方法と結果は既に論文に報告しているが、本研究では、脳梗塞や脳出血で失語症となり、その後症状の改善が見られた症例について、言語活動中の機能計測を行った。

#### <方法>

失語症回復期の症例、16 例を用いて、NIRS で言語タスク時の、脳活動の計測を行った。左中大脳動脈灌流領域の脳梗塞による失語症が 10 例、言語領野を含む脳皮質下出血 5 例、左被核出血 1 例である。全例、リハビリテーションにより言語機能の回復がみられた症例で、発症からの期間は 1-60 ヶ月である。

言語機能計測は基本としては、語想起課題を 15 秒間行い 30 秒の安静期をを 5 回のタスクを繰り返しこれを平均加算する。しかし、症例によっては迅速な反応が得られない

場合があり、それぞれにタスクにかかる時間を長く取る、被験者に対する動機づけを頻繁に行うなど、細かいコントロールを多岐にわたる条件をクリアすれば一応の反応が得られる事がわかった。

## (2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

### < 横断的結果 >

表に示すように、4例で左下前頭回(Broca領域周辺、以下IFG)に明かな反応がみられた。これらの症例では、右側(劣位側)には殆ど反応は見られなかった。これは、健常例に最も普遍的にみられる反応形態である。また、これと反対に4例で左IFGに負の方向の反応が見られた。タスク中に血液量がむしろ減少する形で、正常の反応ではない。このうち3例は、右に全く反応は見られなかったが、残りの1例では右IFGにも負の反応が得られている。一方、6例では、左IFGに殆ど反応が見られず、このうち、4例では右IFGに血液量増加の反応が、1例では、右IFGに血液量の減少が見られた。いずれも、健常では大な反応がみられない劣位側に反応が見られており、劣位側の活性化が伺われる所見である。また、1例では、右にも反応がみられず、この症例は言語タスクに対する反応が殆ど見られなかった。この症例は、言語タスクの成績も低下しており、パフォーマンスの悪さに関連した結果と考えられる。

### 症例リスト

| 症例 | 年齢 | 診断  | 話す | 書く | 聞く | 読む | month after | 左   | 右  |
|----|----|-----|----|----|----|----|-------------|-----|----|
| 1  | 56 | CI  | 2  | 2  | 3  | 3  | 1           | -1  | 0  |
| 2  | 61 | CI  | 3  | 3  | 3  | 3  | 40          | -1  | -1 |
| 3  | 48 | PH  | 2  | 2  | 3  | 3  | 3           | -1  | 0  |
| 4  | 74 | CI  | 3  | 3  | 3  | 1  | 5           | -1  | 0  |
| 5  | 58 | CI  | 3  | 3  | 3  | 3  | 48          | 0   | 1  |
| 6  | 57 | CI  | 2  | 2  | 3  | 3  | 1           | 0   | 1  |
| 7  | 70 | SCH | 3  | 3  | 3  | 3  | 18          | 0   | 1  |
| 8  | 70 | SCH | 3  | 3  | 3  | 3  | 30          | 0   | 1  |
| 9  | 54 | CI  | 1  | 1  | 1  | 1  | 48          | 0   | 0  |
| 10 | 59 | CI  | 2  | 3  | 3  | 3  | 9           | 0   | -1 |
| 11 | 40 | SCH | 3  | 3  | 3  | 3  | 13          | 0.5 | 0  |
| 12 | 71 | CI  | 2  | 3  | 3  | 3  | 60          | 0.5 | 0  |
| 13 | 70 | SCH | 3  | 3  | 3  | 3  | 36          | 1   | 0  |
| 14 | 71 | CI  | 2  | 2  | 2  | 3  | 8           | 1   | 0  |
| 15 | 71 | CI  | 2  | 1  | 1  | 1  | 22          | 1   | 0  |
| 16 | 67 | SCH | 3  | 3  | 3  | 3  | 2           | 1   | 0  |

CI:脳梗塞、SCH:皮質下出血、PH:被核出血

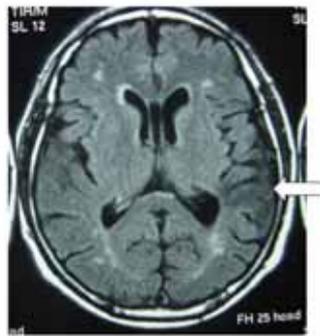


図 1

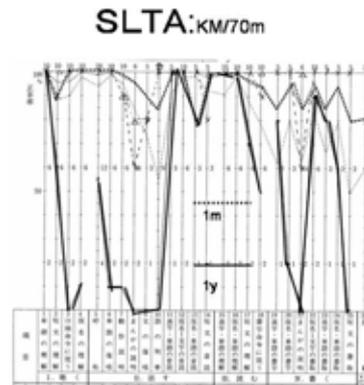


図 2

<時系列の結果>

今回の検討症例のうちの1例はリハビリテーション中、3回の時系列計測をする機会が得られた。症例は70歳男性で左側頭葉の皮質下出血である。図1は1.5年後のMRIである。発症時は高度な全失語であったが、急速に改善した。発症1ヶ月後の言語テスト（SLTA）では図2点線で示すように運動性の成分の強い失語を示した。この時は言語課題が達成できないため、言語NIRSは行なえていない。しかし、その後も言語リハを行なう事により言語機能の回復が認められ、1.5年後には図2実線で見られるように、SLTAでも著明な改善が認められた。この時の言語NIRSでは図3Aのように左IFGは反応せず、右IFGの活性化が見られた。更に、2.5年後には言語機能は安定し、NIRSによると、図3Bのように、右IFGの活性化は変わらず、左のIFGにも僅かながら反応が見られている。更に3年後にはNIRSで、図3Cのように左IFGに大きな正の反応がみられるようになり、右のIFGの反応はむしろ低下している。この症例では、まず右のIFGが活性化し始め、次第に本来の左IFGに活性が起り、それに伴い右の活性は低下して行く現象が観察された。

本研究では、NIRSを用いて失語症が回復して行く機序を検討した。6/15例（40%）で右IFGが活性化しており、回復過程で対側の対応部位が大きな役割を果たしていると言う従来からの仮説を指示する所見であった。また、傷害された部位の反応が負の反応を示す例が多くみられる事から、障害部位の血管反応性も大きく変化している事も、付加的な情報として得られた。

一方、1例ではあるが、時系的に追跡した症例では、回復期に左右の脳半球が動的に協調的に作動している可能性が示唆され、劣位側が、回復期の早期に機能を支え、担当部位が機能回復するとともにその役割を終えて行く過程が示唆されたように思われる。この点に関しては、今だ、仮説の域を出ないので、更に症例を重ねて検討する必要がある。

これまでは、ヘモグロビンの濃度変化として得られるNIRS信号を、刺激信号と相互相関を見るという比較的単純な統計解析のみで、その大小を肉眼的な比較で行ってきたが、本研究では、主成分分析法を導入して、より客観的かつ定量的に比較検討することを検討し

た。主成分分析は、得られた 24 チャンネルからの波形をすべて使用して、24 個の要素波形に分解し、それぞれの要素波形と刺激波形と相互相関を取って刺激に最も時間的に一致した成分のみを抽出する方法である。これにより、目視によって波形を取捨する過程を完全に排除でき、さらに自動的に主成分の大きさが求められるので、左右差の検討も客観性が増す。これによって “laterality index” が自動計算され、半球優位性を、定量的に検討することができるようになった。

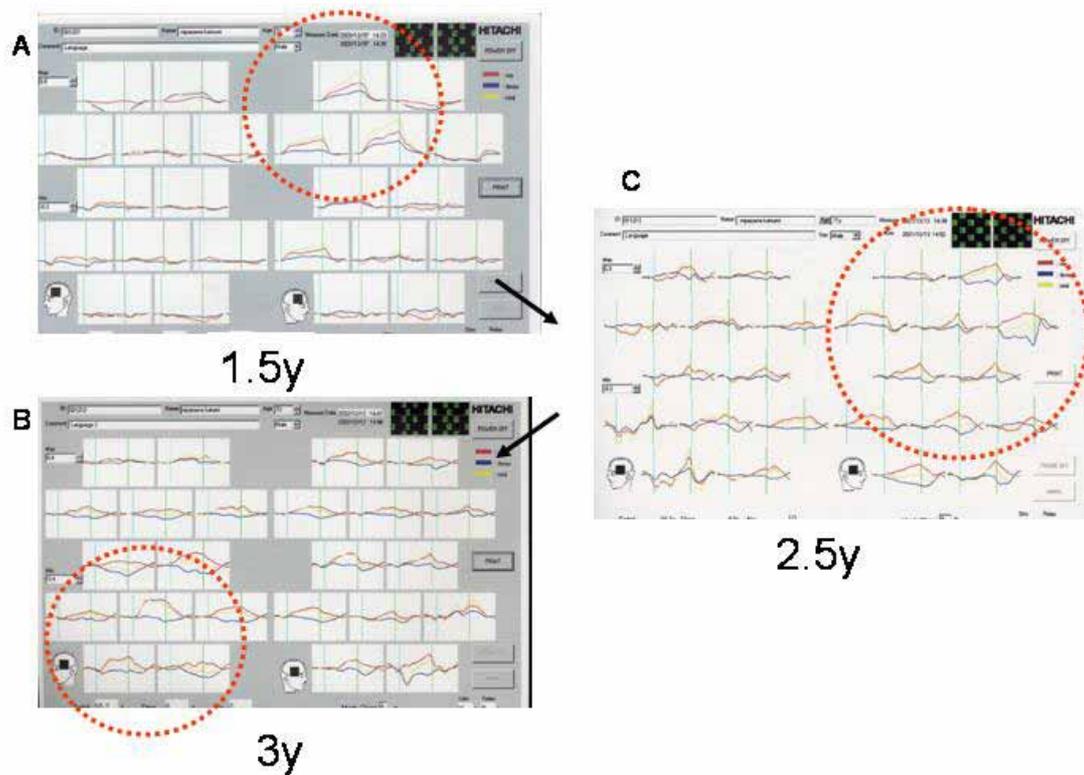


図 3

### 3.4 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)

#### 3.4.1 光トポグラフィ計測における光源波長の最適化

##### (1)実施の内容

近赤外光分光法(NIRS)を用いて、脳活動に伴う血液酸化状態の変化を無侵襲に計測することができる。この原理を利用し開発された脳機能画像化技術「光トポグラフィ[1]」は、神経発作の診断などの医療分野を始め、新生児の脳機能計測[2]など認知科学の分野においても使用され注目を集めている。

この計測法では、酸素化ヘモグロビン(Hb)と脱酸素化 Hb の吸光スペクトルの違いを

利用し、各 Hb の吸光係数が異なる 2 波長を用いて両 Hb の濃度変化を計測する。従来は、両 Hb の等吸収点である 805 nm 近傍を挟む 2 波長の組合せ (780/830 nm) が多く用いられている。本研究グループでは、一方の波長 (780 nm) を短波長化 (650 ~ 750 nm) することにより、波長間における各 Hb 吸光係数の差が大きくなるため、Hb 信号における雑音 (Hb 信号雑音) が低減することを見出した [3]。また、他の研究グループも同様に、780/830 nm が最適な計測波長ではないことを示唆している [4]。しかし、実際の計測に最適な波長域は明確にされていないのが現状である。

以前の研究において、側頭部の 4 波長 (678, 692, 780, 830 nm) 同時計測により、692/830 nm において Hb 信号雑音が最小となることを見出した [5]。この結果は、Hb 吸光係数の差から予測した傾向とは異なるため、本研究では更に計測を進め、複数部位における Hb 信号の波形および Hb 信号/雑音比の波長依存性を検討した。

< 方法 >

4 人の成人被験者 (男 2, 女 2) に対し、前頭部 (Frontal)、後頭部 (Occipital)、頭頂部 (Parietal)、側頭部 (Temporal) の各部位で 5 波長同時計測を行った (図 1)。4 波長 (678, 692, 750, 782 nm) を 830 nm と組み合わせ、各 Hb 変化を算出した。各計測部位と刺激パラダイムを表 1 に示す。1 回の試行では、30 秒間の

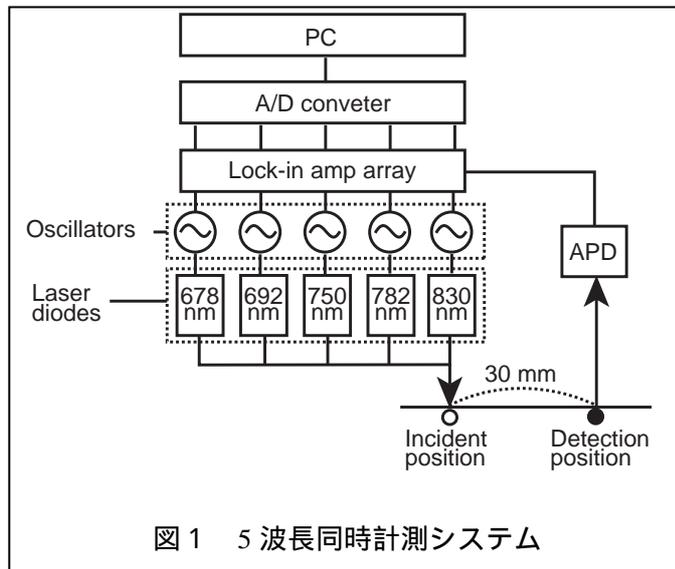


図 1 5 波長同時計測システム

レスト期間を挟んで 15 秒間の刺激を 5 回繰り返した。各波長の計測信号から Hb 濃度変化を算出し、活動期間中の平均 Hb 変化量を「信号強度」、最初のレスト期間 20 秒における Hb 変化の標準偏差を「Hb 信号雑音」と定義し、信号/雑音比 (S/N) を求めた。

表 1 計測部位と刺激パラダイム

|     | 前頭葉 (F)     | 側頭葉 (T) | 後頭葉 (O)     | 頭頂葉 (P)     |
|-----|-------------|---------|-------------|-------------|
| 刺激  | 暗算課題        | 音声言語の理解 | チェッカーボードの注視 | 運動 (指タッピング) |
| レスト | 安静 (固視点の注視) |         |             |             |

< 結果 >

脳活動に伴うヘモグロビン変化量 (信号強度)

各波長組み合わせで各部位の皮質活動が計測された( 図 2)。各波長組合せで計測した Hb 信号の波形は類似しており(0.8 Hz 以下の低周波数成分における平均相関係数; 酸素化 Hb: 0.95, 脱酸素化 Hb: 0.82), 同じ皮質部位の活動を計測している事が示唆された。678/830, 692/830, 750/830 nm における Hb 信号雑音は全て 782/830 nm より低減したが, Hb 信号雑音が最小となる波長組合せは部位間および個人間で若干異なった。これは, 検出光強度の雑音(検出光雑音)を決定する透過率が, 部位間及び被験者間で異なることによる。

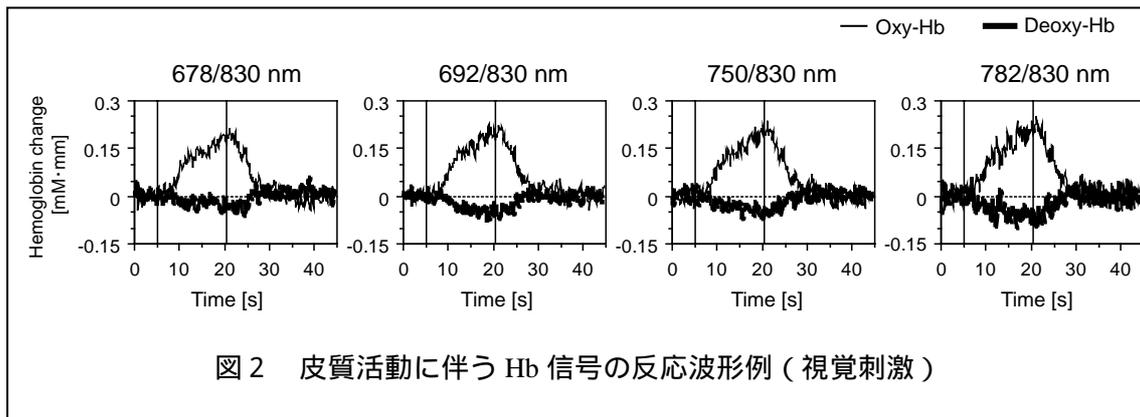


図 2 皮質活動に伴う Hb 信号の反応波形例 ( 視覚刺激 )

### 信号 / 雑音比

各波長組合せにおける Hb 信号の信号/雑音比を図 3 に示した。不均一体である生体において最適波長を決定することは難しいが, 全般的に 692/830 nm を用いた場合に S/N が最も高くなることが示された。従来の 782/830 nm に比べて, 酸素化 Hb では約 1.2 ~ 1.5 倍, 脱酸素化では約 1.3 ~ 1.6 倍の S/N が実現できる。

### (2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

短波長化による計測精度の向上は, 我々のグループが先行して発信した知見である [1]。本研究ではこの知見をもとに, 前頭葉・側頭葉・後頭葉・頭頂葉の 4 部位における, 信号 / 雑音比および計測感度の空間分布の波長依存性を検討した。その結果, 692/830 nm が最も計測に適した波長であることを見出した。また, 各 Hb 信号の波形から, それぞれの波長の組合せでほぼ同じ皮質活動を捉え

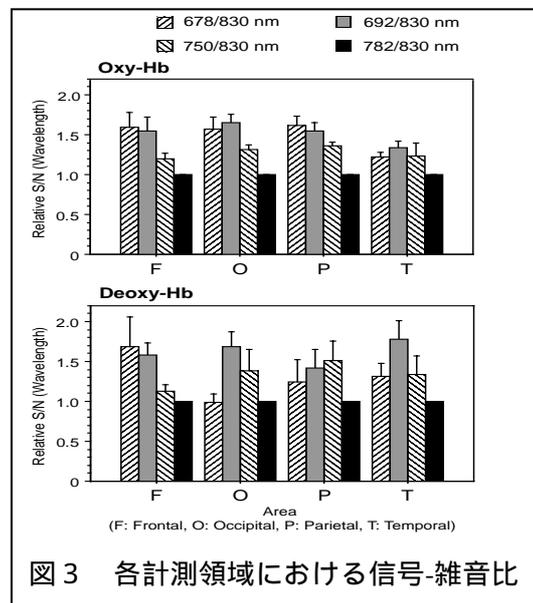


図 3 各計測領域における信号-雑音比

ている事が示唆された。今後、シミュレーション研究などを併用し、光路の波長依存性について詳細に検討する必要があるが、本技術により、特に脱酸素化 Hb の信号 / 雑音比の改善による計測精度の向上が期待される。脱酸素化 Hb の変化は fMRI の信号と密接な関係にあるため、fMRI の信号発生機序を解明する上で計測波長の短波長化は重要である。

[1]A. Maki et al., "Spatial and temporal analysis of human motor activity using noninvasive NIR topography," Med. Phys. 22, 1997-2005 (1995) .

[2] M. Pena et al., "Sounds and Silence: An optical topography study of language recognition at birth. Proc. Natl. Acad. USA, in press.

[3]Y. Yamashita et al., "Wavelength dependence of the precision of noninvasive optical measurement of oxy-, deoxy-, and total-hemoglobin concentration," Med. Phys. 28 (6), 1108-1114 (2001).

[4]G. Strangman et al., "Factors affecting the accuracy of near-infrared spectroscopy concentration calculations for focal changes in oxygenation parameters," NeuroImage 18, 865-879 (2003).

[5] H. Sato et al., "Evaluation of optimal wavelength of Optical Topography". Presented at the 8th International Conference on Functional Mapping of the Human Brain, June 2-6, 2002, Sendai, Japan. Available on CD-Rom in NeuroImage, Vol. 16, No. 2 (2002).

### 3 . 4 . 2 神経線維束描画技術の開発

#### (1)実施の内容

神経線維束の描出を効率的に行うためには、1.5 Tで  $1300 \text{ sec/mm}^2$ の拡散強調が必要であると言われている[1]。このような拡散強調に用いられる高強度の傾斜磁場パルスは、音響ノイズに起因する振動発生の原因となるため、装置によっては必ずしも十分な拡散強調を行えない場合がある。これまでの報告で、拡散テンソル計算前のMRI画像にノイズ除去フィルタを適用することにより、水分子の可動方向が整列化され、拡散強調が不十分な場合でも神経線維束イメージングが可能になることを示した。今回は、モデル画像を用いたシミュレーションにより、フィルタの種類やパラメータの違いによる固有ベクトル整列化効果や空間分解能への影響を定量的に評価した。

#### <方法>

拡散異方性の高い領域 A，等方的拡散領域 B，背景領域Cで構成されるシミュレーションモデル(図4)にガウシアンノイズ(平均値0，分散0.01~0.03)を付加し，フィルタによる固有ベクトル整列化の効果(評価1)および空間

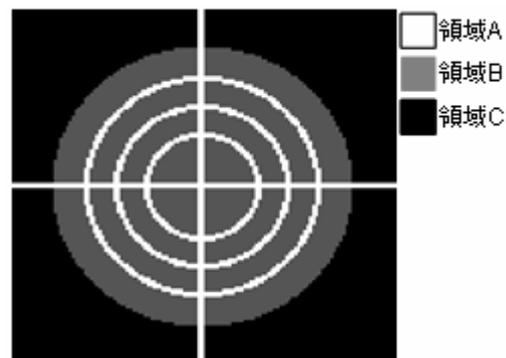


図4 シミュレーションモデル

分解能劣化の影響(評価2)を定量的に評価した。評価1は、ノイズ付加前とフィルタ適用後の固有ベクトル $\mu_1$ の内積を画素毎に求め、その平均値を用いた。評価2は、ノイズ付加前とフィルタ適用後の異方性画像(以下、FA画像)間の相関係数を用いた。神経線維束の描出に最適なフィルタの種類を特定するため、4種類のフィルタ(適用ウィナフィルタ(AWF)、メディアンフィルタ(MF)、最小方向差分フィルタ(DDF)[2]および中央荷重平均値フィルタ(CWAF)[3])について評価を行った。

<結果>

### 評価1：固有ベクトルの整列化

すべてのケースで、最も高い整列化効果を示したのは適応ウィナフィルタであった。最小方向差分フィルタは、フィルタ画素サイズの影響はほとんど見られないが、整列化の効果が他のフィルタに比べて小さい。メディアンフィルタおよび中央荷重平均値フィルタでは、フィルタ画素サイズが $5 \times 5$ 以上で整列化効果が劣化した。特にメディアンフィルタではこの傾向が顕著であり、領域Aの幅が狭いほど劣化が大きい。反対に適応ウィナフィルタでは、フィルタ画素サイズの増大に伴う整列化効果の劣化が少なく、多くのケースでは $7 \times 7$ の時に最大の整列化効果が得られた(表2)。ただし、 $3 \times 3$ 以上の改善率はほとんど変わらなかった。

表2 最大の整列化効果を示すフィルタ画素サイズと整列化改善率

|                 | ノイズ分散 0.01              | ノイズ分散 0.02              | ノイズ分散 0.03              |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 領域幅 2 画素 (4 mm) | $3 \times 3$<br>1.01073 | $5 \times 5$<br>1.03145 | $7 \times 7$<br>1.05316 |
| 領域幅 3 画素 (6 mm) | $3 \times 3$<br>1.01100 | $7 \times 7$<br>1.02887 | $7 \times 7$<br>1.05506 |
| 領域幅 4 画素 (8 mm) | $5 \times 5$<br>1.01201 | $7 \times 7$<br>1.03117 | $7 \times 7$<br>1.05650 |

### 評価2：空間分解能劣化の影響

空間分解能劣化に対する改善効果は適応ウィナフィルタが最も高く、ノイズ分散が0.01~0.02の場合はフィルタ画素サイズが $3 \times 3$ の時に最大の効果が得られた(図4)。メディアンフィルタと中心荷重フィルタは、フィルタ画素サイズが $5 \times 5$ 以上で改善効果が著しく劣化し、領域幅が狭いほど劣化が顕著であった。これは領域AとBの境界において固有値の平均化が起こり、見かけ上の拡散異方性が変化したものと考えられる。このように、メディアンフィルタや中心荷重フィルタは、フィルタ画素サイズによって

空間分解能の劣化が大きいため、神経線維束描画への適用は避けるべきであると考えられる。最小方向差分フィルタは改善効果がほとんど見られなかった。

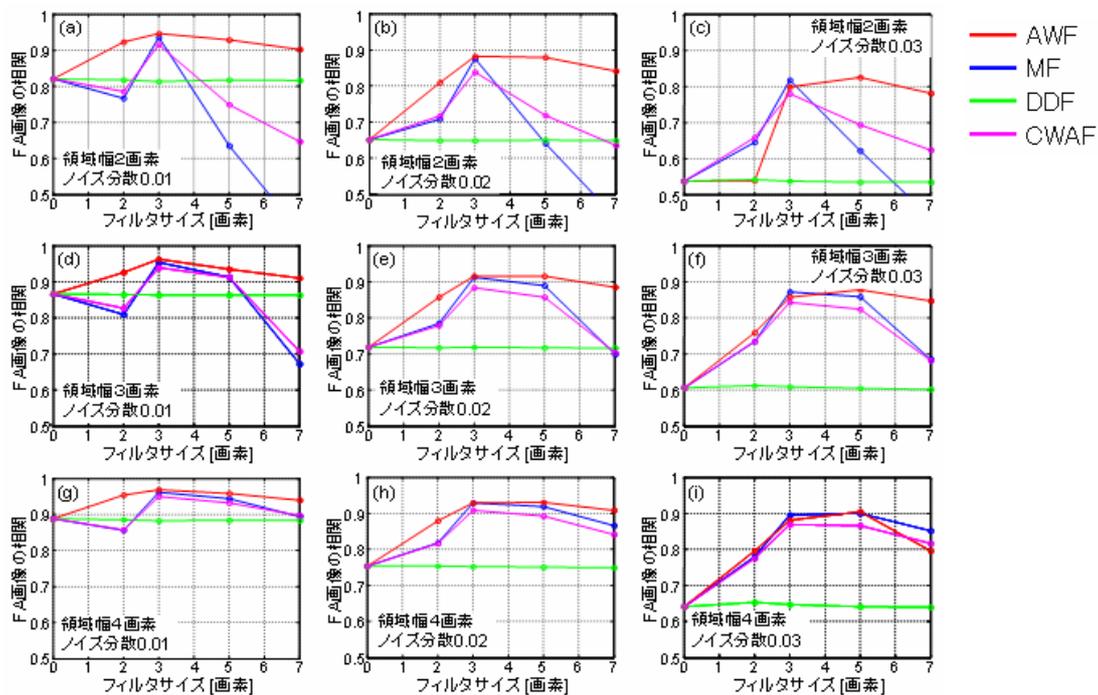


図5 ノイズなしFA画像との相関

以上から、FAの空間分布の改善効果が最も高いフィルタは適応ウィナフィルタであり、人頭の拡散強調画像と同等のS/Nを示すノイズ分散(0.01~0.02)の場合、フィルタ画素サイズが $3 \times 3$ の時に最大の効果が得られることがわかった。

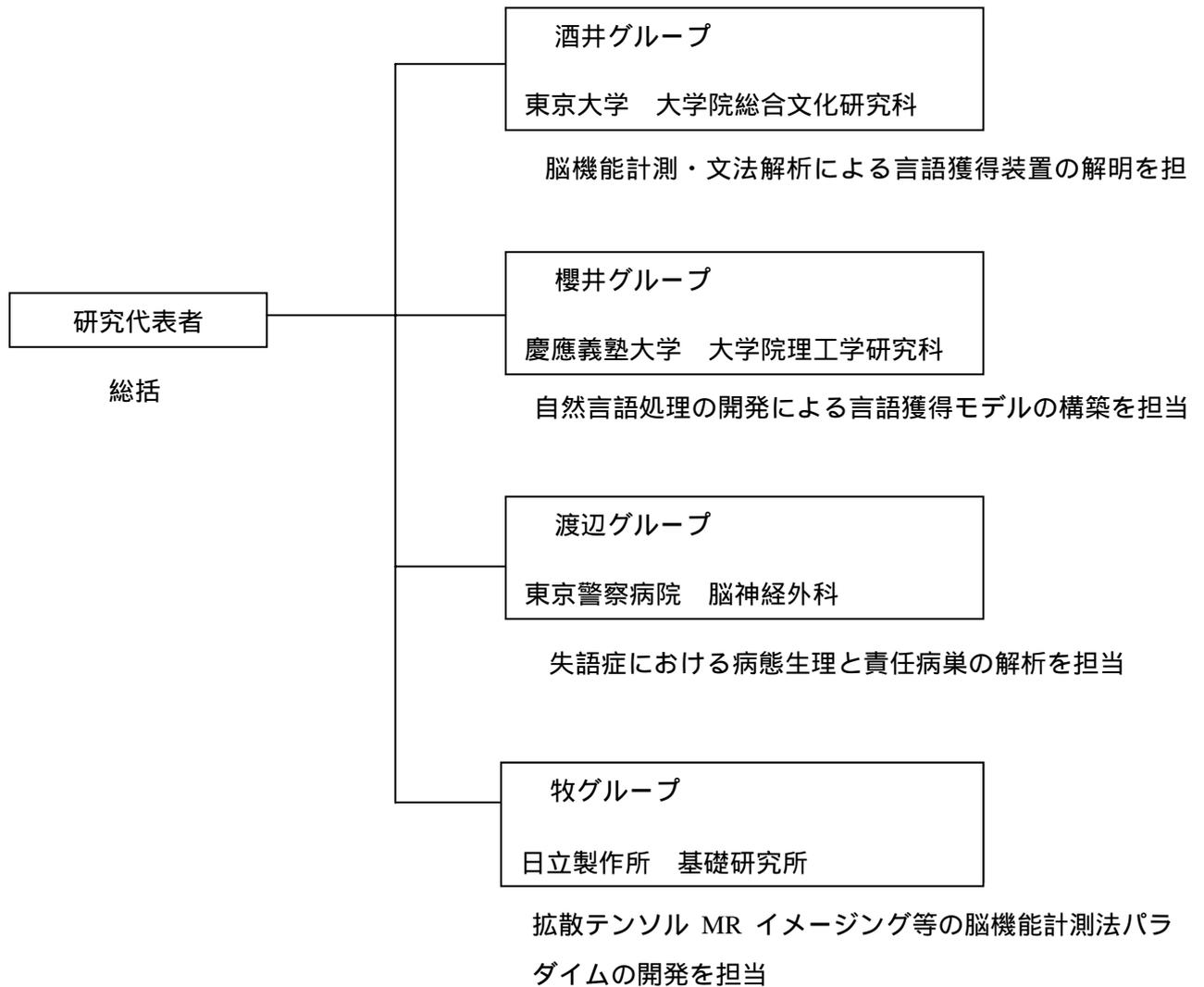
## (2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

拡散強調画像のノイズは拡散テンソルの計測値に影響を及ぼし、神経線維束のトラッキング結果に不確実性を与える原因となる。このようなトラッキング不確実性を低減するため、本研究では拡散強調画像へのノイズ除去フィルタの適用について検討し、固有ベクトルの整列化効果が強く空間分解能の劣化が少ないという2点から、フィルタ画素サイズが $3 \times 3 \sim 5 \times 5$ の適応ウィナフィルタが最適であることを示した。他の研究機関からは、神経線維束の方向の不確実性を考慮し、ひとつのシード点から可能性のある複数の線維路を算出する手法が提案されている[4]。今後このようなトラッキングの不確実性が解決されるに従い、脳活動部位間における神経的な結合状態が明らかとなり、脳機能を理解する上で大きな役割を果たすことが期待される。

- [1] 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)
- [2] 橋本有平, 梶川嘉延, 野村康雄, "画像信号の方向性を考慮したインパルス性ノイズ除去手法", "電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J84-A, No. 6, pp. 759-768 (2001-06)
- [3] 松下晃久, 梶川嘉延, 野村康雄, "CWF を用いたガウス性ノイズ除去法に関する検討", "第 16 回デジタル信号処理シンポジウム, B2-1 (2001-11).
- [4] J. -D. Tournier, F. Calamante, D. G. Gadian, and A. Connelly; "Diffusion-weighted magnetic resonance imaging fibre tracking using a front evolution algorithm"; *NeuroImage*, **20**, 276-288 (2003)

## 4 . 研究実施体制

### (1)体制



(2)メンバー表

研究グループ名 酒井グループ

| 氏名    | 所属              | 役職      | 担当する研究項目   | 参加時期                   |
|-------|-----------------|---------|------------|------------------------|
| 酒井邦嘉  | 東京大学・大学院総合文化研究科 | 助教授     | 脳機能計測・文法解析 | 平成14年より                |
| 橋本龍一郎 | 〃               | 学術研究支援員 | 〃          | 平成15年より                |
| 保前文高  | 〃               | 学術研究支援員 | 〃          | 〃                      |
| 辰野嘉則  | 〃               | 大学院生    | 〃          | 〃                      |
| 河内十郎  | 日本女子大学          | 教授      | 神経心理学      | 平成14年より                |
| 三橋俊夫  | 東京大学・附属中等教育学校   | 副校長     | 双生児研究      | 平成15年より                |
| 村石幸正  | 〃               | 教官      | 双生児研究      | 〃                      |
| 榎府暢子  | 〃               | 教官      | 双生児研究      | 〃                      |
| 三浦邦彦  | 〃               | 教官      | 双生児研究      | 〃                      |
| 松田広美  | 科学技術振興機構        | 研究補助員   | 事務・経理等     | 平成14年～                 |
| 牧美奈子  | 〃               | 〃       | 〃          | 平成15年10月<br>平成15年11月より |

研究グループ名 櫻井グループ

| 氏名   | 所属               | 役職 | 担当する研究項目  | 参加時期    |
|------|------------------|----|-----------|---------|
| 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 | 平成14年より |
| 篠沢佳久 | 〃                | 助手 | 自然言語処理の開発 | 平成15年より |

研究グループ名 渡辺グループ

| 氏名   | 所属           | 役職 | 担当する研究項目       | 参加時期    |
|------|--------------|----|----------------|---------|
| 渡辺英寿 | 東京警察病院・脳神経外科 | 医長 | 失語症における病態生理の解析 | 平成14年より |

研究グループ名 牧グループ

| 氏名    | 所属          | 役職  | 担当する研究項目         | 参加時期    |
|-------|-------------|-----|------------------|---------|
| 牧 敦   | 日立製作所・基礎研究所 | 研究員 | 同時計測法パラダイムの開発    | 平成14年より |
| 小泉英明  | 〃           | 主管  | 脳機能計測法パラダイムの開発   | 〃       |
| 山本由香里 | 〃           | 研究員 | 拡散テンソル MR イメージング | 〃       |

5. 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等

なし

(2) 招聘した研究者等

なし

## 6 . 主な研究成果

(1) 論文発表 (国内 4 件、海外 9 件)

- Sakai, K. L., Homae, F. & Hashimoto, R.: Sentence processing is uniquely human. *Neurosci. Res.* **46**, 273-279 (2003).
- Sakai, K. L., Noguchi, Y., Takeuchi, T. & Watanabe, E.: Selective priming of syntactic processing by event-related transcranial magnetic stimulation of Broca's area. *Neuron* **35**, 1177-1182 (2002).
- Homae, F., Hashimoto, R., Nakajima, K., Miyashita, Y. & Sakai, K. L.: From perception to sentence comprehension: The convergence of auditory and visual information of language in the left inferior frontal cortex. *NeuroImage* **16**, 883-900 (2002).
- 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).
- 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).
- 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).
- Noguchi, Y., Takeuchi, T. & Sakai, K. L.: Lateralized activation in the inferior frontal cortex during syntactic processing: An event-related optical topography study. *Hum. Brain Mapp.* **17**, 89-99 (2002).
- 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).
- Hiroki Sato, Masashi Kiguchi, Fumio Kawaguchi, and Atsushi Maki, "Practicality of Wavelength Selection to Improve Signal-to-Noise Ratio in Near-infrared Spectroscopy"; *NeuroImage* in press
- 酒井邦嘉 : 「言語の脳科学」をめざして. *神経心理学* **19**, 130-137 (2003).
- 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 (2003).

- 石川, 櫻井, 藤波, 國藤: 強化学習を用いたオンラインセンサ選択, 人工知能学会誌 (投稿中).
- 石川, 櫻井, 藤波, 國藤: 複数 Q 値表を用いた R 学習の性能改善, 人工知能学会誌 (投稿中).

## (2) 口頭発表

招待講演 (国内 18 件、海外 1 件) 以下 19 件は酒井が発表

- 脳科学から見た言語能力の獲得. 第 98 回東京大学公開講座「学力」, 2002 年 10 月 12 日, 東京
- Language and Cognition in the Cerebral Cortex. Seminar at Department of Neurology, Beth Israel Deaconess Medical Center, Harvard Medical School, 2002 年 10 月 30 日, ボストン
- 言語の脳機能に基づく言語獲得装置の構築. 「脳を創る」第 1 回終了シンポジウム, 科学技術振興事業団, 2002 年 12 月 2 日, 東京
- Modularity of Language. KIT International Symposium on Brain and Language, 2002 年 12 月 12 日, 金沢市
- 「言語の脳科学」をめざして. 第 25 回生理学技術研究会・研修講演, 2003 年 2 月 20 日, 岡崎市
- 光トポグラフィと磁気刺激による言語の脳マッピング. 第 5 回日本ヒト脳機能マッピング学会大会・オーガナイズドセッション「NIRS (近赤外分光) による脳機能マッピング」, 2003 年 3 月 18 日, つくば市
- 光トポグラフィによる言語の脳研究. 第 1 回光トポグラフィ・シンポジウム, 慶應義塾大学文学部, 2003 年 4 月 24 日, 東京
- 授業で脳が変わる. 東京大学教育学部附属中等教育学校・てぶくろの会, 2003 年 5 月 24 日, 東京
- 脳と言語 - 心の文法. 北海道大学特別講義, 2003 年 5 月 26 日, 札幌市
- 脳科学からみた言語. 歯学研究セミナー・第 225 回北海道歯学会例会, 2003 年 5 月 26 日, 札幌市
- 脳科学からみた言葉の発達. 第 3 回日本赤ちゃん学会・教育講演 1, シンポジウム 1「言葉の発達」, 2003 年 5 月 31 日, 東京
- 心と言語の関係を脳からさぐる. 第 4 回 21 世紀 COE 融合科学創成ステーション研究会「脳と心の解明をめざして」, 東京大学, 2003 年 6 月 28 日, 東京
- Sentence Processing in the Human Prefrontal Cortex. Summer Program 2003, Riken Brain Science Institute, 2003 年 8 月 10 日, 東京
- 「言語と脳科学」- 教育の脳科学をめざして -. 第 30 回言語・聴能教育実践夏期講座・

特別講演，2003年8月14日，東京

- 授業が脳を変える．東京大学教育学部附属中等教育学校・校内研究会，2003年10月23日，東京
- 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
- 言語と脳から見た健康と病．東京大学社会連携・高大連携プログラム「21世紀を生きるための知」，東京大学，2003年12月5日，東京
- 脳の文法処理と再帰的計算 - 言語の脳科学をめざして．第5回音声言語シンポジウム，電子情報通信学会，2003年12月19日，東京

口頭発表（国内5件、海外0件）

- Homae, F. & Sakai, K. L.: Integration between syntactic and lexico-semantic processes in the left prefrontal cortex during sentence comprehension. *Neurosci. Res.* **46, Suppl. 1**, S51, O-096 (2003).
- Sakai, K. L., Miura, K., Narafu, N., Mitsuhashi, T., Hirano, K., Fukushima, M., Tanabe, Y., Katsumata, A., Sugiura, Y. & Muraishi, Y.: Education can change the brain: A functional imaging study of second language acquisition. *Neurosci. Res.* **46, Suppl. 1**, S52, O-097 (2003).
- Tatsuno, Y. & Sakai, K. L.: Commonality and difference in the functional connectivity of cortical regions during sentence comprehension in Japanese sign and written languages. *Neurosci. Res.* **46, Suppl. 1**, S52, O-098 (2003).
- Hashimoto, R. & Sakai, K. L.: Selective enhancement of functional connectivity between cortical regions during the acquisition of reading skills. *Neurosci. Res.* **46, Suppl. 1**, S52, O-099 (2003).
- 磯尾 綾子、渡辺 英寿、真柳 佳昭、NIRSによる言語優位半球の決定、第26回日本てんかん外科学会、2003年9月29日

ポスター発表（国内0件、海外2件）

- Yamamoto, Y., Maki, A., Koizumi, H. & Sakai, K. L.: An improvement of fiber-tracking method with low diffusion weightings. *NeuroImage* **19**, S40, 718 (2003).
- Homae, F. & Sakai, K. L.: Dissociation and interaction between syntax and lexico-semantics in the left prefrontal cortex: An fMRI study of sentence comprehension. *NeuroImage* **19**, S57, 1301 (2003).

### (3)特許出願

なし

### (4)新聞報道等

新聞・雑誌報道

- Team of Tokyo Univ. Identified Regions of Human Brain Specialized in Understanding Syntactic Structures. *Science & Technology Newsletter* #10, 6, Embassy of Canada in Japan (October, 2002).
- Selective priming of syntactic processing by event-related transcranial magnetic stimulation of Broca's area. *Nature Reviews Neuroscience* 3, 837 (November, 2002).
- 文法処理を司る大脳の部位を特定:科学技術振興事業団, *S&T Today* 14, 12 科学技術広報財団 (2002年11月15日).
- 知を創る(第36回)酒井邦嘉氏 - 言葉を操る「文法中枢」発見. 読賣新聞, 31 (2002年11月19日).
- A brain region for controlling grammatical processes identified: JST. *S&T Today* 14, 16 (November 20, 2002).
- 受賞の6氏が喜び、抱負 - 毎日出版文化賞贈呈式. 毎日新聞, 26 (2002年11月29日); 毎日新聞(夕刊), 6 (2002年12月3日).
- The Language Connection: Opening the brain's grammar toolbox. *The Daily Yomiuri*, 14 (January 7, 2003).
- 科学技術振興事業団・CREST研究成果から(第42回)酒井邦嘉氏 - 文法を使う言語能力の座 左脳の前頭前野だった 世界初特定. 科学新聞, 1 (2003年3月14日).
- 脳と言葉のナゾに迫る - 「文法担当」解明. 日本経済新聞, 26 (2003年5月18日).
- 時空の旅(第10回)赤ちゃんはどうして言葉を覚えるのか.(対談:瀬名秀明&酒井邦嘉), 日経サイエンス, 日本経済新聞社, 33 (8), 52-57 (2003).
- 学力向上と個性形成に効果 - すべての授業を手話で. 公明新聞, 7 (2003年7月23日).
- アクセントに妙味あり - 新日本語の現場 206. 読賣新聞, 18 (2003年11月11日).

受賞

- 2002年11月 第56回毎日出版文化賞・第3部門(自然科学)『言語の脳科学 脳はどのようにことばを生み出すか』酒井邦嘉 著, 中央公論新社.

その他

- サイエンス ZERO』ゼロトピック「最近の脳科学から」. NHK 教育 (2003年6月18日)

## 7 . 結び

これまで、予算の一部をMRI等の大型設備の維持費に充ててきたが、幸いトラブルもなく稼働することができ、順調に研究目標通りの成果が得られて、研究達成の手応えを感じた。欧文論文も、この期間中に9編が完成し、成果の発表も着実に進んでいる。さらに、基礎研究専用のMEG施設を東京大学駒場キャンパスに設置する工事が無事始まった。これらの大型装置は、科学研究における若手研究者の確保と育成に資するものであり、有効に活用していきたい。今後は、CRESTの研究領域「脳の機能発達と学習メカニズムの解明」において、本プロジェクトをさらに継続し発展させながら研究を行っていきたい。

今後の研究の展開として、新しい着眼点でパラダイムを開拓するのはもちろんのこと、脳機能計測の技術革新の努力を怠っては、最先端の科学研究を推進することは難しい。不断の努力を重ねて、「言語の脳科学」を科学技術の新しい分野として確立・発展させることを目指す決意である。

脳科学は今、転回点にある。脳から心の解明をめざして、個々の研究者の豊かな発想と、研究者間の協力体制の両方が必要とされている。この新しい科学の発展に貢献すべく、全力を傾けたい。

## 謝辞

JST本部および発展研究事務所のスタッフの方々の厚いサポートにより、言語の脳研究を追究することができた。ここに心からの感謝の意を表したい。



左より、保前・橋本(龍)・野口・橋

本(泰)・酒井・小泉・櫻井・山本・松田