

「脳を創る」

平成9年度採択研究代表者

酒井 邦嘉

(東京大学大学院総合文化研究科 助教授)

「言語の脳機能に基づく言語獲得装置の構築」

1. 研究実施の概要

本年度は、fMRI と光トポグラフィによる手法をさらに発展させて、大脳皮質における文法処理のモジュール性を確立するための実験を行い、大きな成果が得られた。具体的には、文法判断に含まれる一般的な言語性短期記憶から、純粋な統語処理を分離することが初めて可能になった。これは、言語獲得装置が前頭葉に局在することを示唆する強力な証拠である。この成果は、現在投稿中である。また、これらの知見をもとに言語システムをモデル化するためのアプローチを発展させて、基本的品詞の獲得のための単語毎の文脈記憶のモデルと、有限長のカウンタを用いるにも関わらず正しい文法を獲得する離散的再帰型神経回路網モデルを構築することを目指した。今後は、大脳皮質の領野間の機能的相関を明らかにし、MRI による神経線維束イメージング技術と組み合わせることで、言語の脳機能を司るネットワークの解明に全力を傾けていきたい。

2. 研究実施内容

(1) 脳における言語獲得装置の解析グループ

文法判断に含まれる、文の統語処理と一般的な言語性短期記憶を分離するため、統語判断 (SYN) 課題と言語性短期記憶 (SEM) 課題における脳活動を、fMRI により比較した。SYN 課題では、固有名詞(人物名)2つ、動詞2つ、および代名詞1つを含む中央埋めこみ文(例:「太郎は次郎が彼をほめると思った」)を視覚的に提示し、課題条件に従って文中の単語1つに下線を付した。SYN 課題として2条件を設定し、(1)下線部の動詞の主語が文中のどの人物に対応するか(SYN-1)、(2)下線部の代名詞が文中のどの人物を示し得るか(SYN-2)を判断させた。STM 課題では、SYN 課題で用いた単語をランダムに並べて、その順序を記憶するよう教示した。SPM99 による解析の結果、両側の下中心前回で STM 課題に選択的な反応を示したのに対し、左下前頭回では SYN 課題で STM 課題よりも有意に強い反応がみられた。さらに、左下前頭回において、SYN-1 よりも SYN-2 に対して有意に強い反応が観察され、この差は統語処理の負荷を反映すると考えられる。これらの結果は、前頭葉において統語処理が言語性短期記憶から解離していることを示す最初の証拠である。

音声または文字を提示すると、知覚レベルの処理は入力モダリティーに依存するが、知覚レベルから語彙レベルへと処理が進み、さらに高次である文レベルに至ると、文処理は入力モダリティー

一に依存しなくなると予想される。本研究では、各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した。文(S)課題では会話文を文節単位で提示し、文節(P)課題では S 課題と同じ文節セットをランダムな順序で提示した。この 2 つの課題を対比することにより、提示する語順の規則性の有無、すなわち文レベルの処理が必要か否かの差を明らかにすることができる。さらに、音声または文字の知覚レベルの処理を統制するため、非単語コントロール(NW)課題として、無意味音節列を音声と文字で同時に提示した。SPM99 による解析の結果、S - P の比較において、左半球の下前頭回腹側部、下中心前溝、中側頭回で活動が見られ、この活動は音声および文字提示条件の両方に共通していた。これらの領域のうち、P - NW の比較で有意差を示さない領域は、左下前頭回腹側部のみであった。一方、P - S の比較においては、音声提示条件で聴覚野に、文字提示条件で視覚野に活動が見られたが、言語野に有意差は認められなかった。以上の結果より、左下前頭回腹側部が文の統語処理に選択的に関わっていると考えられる。

これまで、左半球の下前頭回が文法処理に特異的に関わっていることを示唆するイメージング研究が報告されている。本研究では、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。言語刺激はすべて聴覚的に提示し、音韻条件(Pho)では二つの非単語の韻律のパターンが同じかどうかを判断させた。意味条件(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、文法条件(Syn)では刺激文が文法的に正しいかどうかを判断させた。Sem と Syn では同じ単語セットから刺激文を作成し、語彙を統制した。SPM99 を用いて統計検定を行ったところ、Syn - Sem において左下前頭回のみ有意な活動が見られ、この領域は Syn - Pho においても活動が見られた。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。一方、Sem - Pho では左下前頭回に有意差は認められなかった。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。

(2) 脳をモデルにした自然言語処理の開発グループ

再帰的神経回路網の表現能力を様々な観点から研究し、① 耐ノイズ性を多少とも要求すると、ある程度の学習は可能であるが、有限状態オートマトンより大きな能力は持ち得ず、最近研究報告が増加しているカウンターの獲得さえ多くの場合原理的に不可能なこと、② 名詞・動詞等の基本的品詞の獲得は、学習によらず、単語が出現する文脈の記憶とクラスタリングだけで可能なこと、③ 有限状態オートマトンは、離散的な値を用いる再帰型神経回路網においてランダム学習アルゴリズムにより学習可能なことを示した。以上のことから、基本的品詞の獲得のための単語毎の文脈記憶のモデル、有限長のカウンターを用いるにも関わらず正しい文法を獲得する離散的再帰型神経回路網モデルを構築することを目指すべきであることが判明した。現在、各単語毎の文脈を記憶するモデルとして sparse random coding を検討している。本モデルは、新しい単語にランダムなパターンを割り当てる(random coding)こと、random code の分離をよくするため非零成分を sparse とすること、出現単語の線形和を文脈表現とすること、を特徴としている。前2特徴は、神経活動の知見

に基づくものであり、3番目の特徴は、機構が単純であるため、類似機構が実際に存在することが十分考えられるものである。文法学習には、離散的な値をもつ再帰型神経回路網を用いる。本回路においては、単純な文法表現を自動的に優先するランダム探索を行わせ、所持するカウンタが有限長であるという欠点を抱えながらも、単純かつ妥当な文法を獲得しうることを示す。過去の研究より、単語表現をそのまま入力としたのでは文法獲得が非常に困難なことが推定される。本モデルにおいては、上記文脈モデルにより構成されるクラスタ識別 code を入力とすることによりこの困難の解消を目指す。

(3) 失語症における病態生理の解析グループ

近赤外線脳機能マッピング法を用いた、言語優位半球の診断を検討した。この方法は、皮膚・骨を容易に透過する近赤外光を頭皮表面から照射し、脳内から反射してくる成分を再び頭皮上で計測する事により、直下の脳組織の組織血液量(rCBV)の増減を捉える方法である。これにより、神経活動の変動を知る事ができる。語想起タスクを行なわせると、言語野にrCBVが増加する。アミタールテスト(ATT)を行なった29例でNIRSを行ない、結果を比較した。ATT左優位の24例のうちNIRSでは18例が左位優位、3例が右優位、3例が両側に反応が見られた。ATT右優位は3例で、NIRSでは2例が右優位、1例が左優位であった。2例はATTで優位半球が不明確であったが、NIRSでは1例が右、1例が左優位であった。よって77%が完全に一致した。12%に全く相反する結果となったが、これはアミタールテストは抑制効果を、NIRSは賦活効果を観察しているために起きる不一致と思われる。今後の検討課題である。NIRSは言語機能に関連した神経活動を観察する方法として有用と考えられた。

(4) 光トポグラフィとfMRIによる言語機能計測のためのパラダイム開発グループ

MRIによる神経線維束イメージング技術の開発を行って、短時間言語刺激における光トポグラフィによる脳機能計測パラダイムの開発を行うことを目的とする。大強度の傾斜磁場パルスに起因する画質劣化は、神経線維束イメージングの障害のひとつである。そこで、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、人頭画像への適用により有効性を確認した。また拡散係数の計測精度向上に関して特許を出願した。今後、トラッキング技術の開発により神経線維束の描出を行う計画である。さらに、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、692nmと930nmの組み合わせによる短波長計測の有効性確認を行った。言語認識課題に伴う**ベータリズム**変化を従来手法と比較し、ノイズ成分の低減を確認した。今後は、波長による散乱の違いを含めたモデルの再検討を行う。

3. 研究実施体制

(1) 脳における言語獲得装置の解析グループ

- ① 酒井邦嘉(東京大学、助教授)
- ② 脳機能計測・文法解析および言語課題の心理学的評価

- (2) 脳をモデルにした自然言語処理の開発グループ
 - ① 櫻井彰人(北陸先端科学技術大学院大学、教授)
 - ② 自然言語処理の開発
- (3) 失語症における病態生理の解析グループ
 - ① 渡辺英寿(東京警察病院、医長)
 - ② 失語症における病態生理の解析
- (4) 光トポグラフィとfMRIによる言語機能計測のためのパラダイム開発グループ
 - ① 牧敦(日立製作所、研究員)
 - ② 同時計測法・脳機能計測法パラダイムの開発および拡散テンソル MR イメージング

4. 研究成果の発表

(1) 論文発表

- Sakai, K. L., Hashimoto, R. & Homae, F.: Sentence processing in the cerebral cortex. *Neurosci. Res.* **39**, 1-10 (2001)
- Sakai, K. L., Takeuchi T. & Watanabe, E.: Selective modulation of syntactic processing by focal transcranial magnetic stimulation of Broca's area. *J. Cognit. Neurosci. Suppl.*, 111F (2001).
- Hashimoto, R. & Sakai, K. L.: Separate neural bases for syntactic processing and verbal short-term memory in the frontal cortex: An fMRI study. *Soc. Neurosci. Abstr.* **27**, 82.7 (2001).
- Sakai, K. L. & Suzuki, K.: An event-related fMRI study of explicit syntactic decisions in contrast to semantic and phonological decisions. *Soc. Neurosci. Abstr.* **27**, 119.3 (2001).
- Homae, F. & Sakai, K. L.: Functional differentiation in the auditory association cortex depending on the process levels of language: An fMRI study. *Soc. Neurosci. Abstr.* **27**, 512.5 (2001).
- A. Sakurai, A Fast and Convergent Stochastic MLP Learning Algorithm, *International Journal of Neural Systems*, vol.11, no.6, 573-584 (2001).
- Harada, T., O.Araki, and A.Sakurai, Learning Context-Free Grammars with Recurrent Neural Networks, *Proc. of the Int. Joint Conf. on Neural Networks*. 2001 (2001).
- 兵藤, 櫻井, 再帰型神経回路網による単語クラスタリングについて, 人工知能学会研究会報告 SIG-FAI-0104 (2002).
- 近藤, 櫻井, 確率的学習アルゴリズムを用いた有限状態オートマトンの学習, 人工知能学会研究会報告 SIG-FAI-0104 (2002).

(2) 特許出願

国内1件、外国なし