

酒井 邦嘉

東京大学大学院総合文化研究科・教授

言語の脳機能に基づく神経回路の動作原理の解明

## §1. 研究実施体制

### (1) 酒井グループ

① 研究代表者: 酒井 邦嘉 (東京大学大学院総合文化研究科、教授)

#### ② 研究項目

- ・「失文法」に伴う神経回路の同定
- ・「文法中枢」による統語処理計算の同定
- ・言語獲得の感受性期の神経回路解析
- ・言語障害後の神経回路再編成の解析

### (2) 村垣グループ

① 主たる共同研究者: 村垣 善浩 (東京女子医科大学先端生命医科学研究所、教授)

#### ② 研究項目

- ・言語関連線維の描出
- ・言語マッピングによる機能部位の解析
- ・文法・言語に本質的な神経線維の特定
- ・誘発電位による皮質連絡の確認

### (3) 福井グループ

① 主たる共同研究者: 福井 直樹 (上智大学外国語学部、教授)

#### ② 研究項目

- ・言語構造に関する理論的論点の整理
- ・統辞処理の理論的考察に基づく概念化
- ・内心性とラベル付けの理論化
- ・言語の基本演算に関する理論的研究

## §2. 研究実施内容

### (A)「脳機能解析」グループ

研究代表者グループは、他の 2 つのグループの研究を相補的に融合させる役割を持ち、研究チーム全体の統括および適切な研究遂行の責任を担う。具体的には、言語課題・認知課題の作成、行動データ解析、脳構造・脳機能解析を遂行する。

人間が生み出すあらゆる文は木構造によって表すことができ、言語処理における脳活動の変化が木構造によって正しく説明できることが本研究で明らかとなった<sup>(1)</sup>。さらに我々は、文の持つ木構造の複雑さを数値化する「併合度」を世界で初めて概念化して導入した<sup>(2)</sup>。

実験では、意味などの要因をできるだけ除いて文法にフォーカスするため、個々の単語の意味をなくした文を用いた。我々は、併合度に加え、主語と動詞の対応を数値化した「サーチ数」が重要な要因であると考えて実験をデザインし、対照条件として文の形を取らない文字列も準備した。大学生および大学院生 18 名が参加して、こうした文や文字列を処理する時の脳活動を fMRI で計測し、文法処理に選択的な脳活動を調べた。まず、サーチ数や短期記憶の負荷などを統制しても、併合度の違いによって脳活動が生じるか調べるため、埋め込み文と逆順文字列の脳活動を比較した結果、脳全体の中で左下前頭回(44 と 45 野)と左縁上回(40 野)に大きな活動の差が観察された<sup>(2)</sup>。この左下前頭回は、われわれが報告してきた「文法中枢」と一致しており、「ブローカ野」と呼ばれる言語中枢の一部である。一方、左縁上回は、語彙の処理に関係した「単語中枢」であると考えられている。

次に、これらの領域において、埋め込み文と単文それぞれに対する脳活動から、最も単純な木構造を持つ連文に対する脳活動を差し引くことで、脳活動がどのように変化するかを詳しく調べた。これまで提案されてきた 19 種類ものモデルを詳細に比較検討した結果、左下前頭回の活動は併合度によって変化し、左縁上回の活動は「併合度+サーチ数(両者の和)」によって変化することが明らかになった<sup>(2)</sup>。以上の結果は、文法中枢や単語中枢の活動を変化させる要因を初めて特定し、また文法処理の実体を担うネットワークを解明したという点で画期的な発見である。

### (B)「脳外科臨床」グループ

脳腫瘍患者についての言語関連線維を効果的に描出かつ評価する目的で、脳腫瘍患者術前に撮影された MRI-DTI 画像の解析を試みた。正常脳と比較して脳腫瘍患者では tracking が困難なことが多く、脳浮腫や直接の腫瘍の影響により神経線維描出に制約がある。原則として術前に 6 軸または 12 軸での DTI 撮影後、FA color map を作成して術中評価と組み合わせ、24 例の周術期の情報共有に貢献できた。運動神経については術前予想と術中及び術後症状と比較した結果、有用であると思われる。しかしながら言語関連神経については術前予想が困難であり、術中マッピングで術中同定する手法を超える結果は得られていない。こうした MRI 画像情報からの神経線維 tracking の困難な現状については、脳機能解析グループと共同で検討した上で言語関連神経線維描出にむけてのプロトコール作成を目指している。

言語マッピングによる機能部位の解析は、脳外科臨床グループが中心となり進めている。脳腫瘍患者に慢性硬膜下電極留置を行い、術前MRIと術後CT撮影を融合させ、マッピングのための部位特定の3次元解析を実施した。通常行うマッピングにおける言語関連部位の特定と合わせ、言語タスクへの反応時間を解析可能なシステムをさらに改善したものを構築した(右図)。言語課題を提示する画面とスイッチを持った被験者に加え、押されたボタンのモニターが同じ時間軸で表示されるとともに、課題提示から反応までの時間が計測される。また、音声も同時記録できるように改良を加えた。



前年度から改善を加えた患者対応スイッチの術中運用の試用を行いながら、術前に2例、術中に2例施行した。今後は術前と術中を通した比較を行いながら順次検討を行う予定である。覚醒下手術において、術前情報と共に手術情報を統合解析し、脳外科手術に応用した成果報告と共に臨床症状との関わりについての報告を論文発表<sup>(3)</sup>および学会報告として幅広く行った。

文法・言語に本質的な神経線維の特定に関して、文法課題を言語タスクとしたfMRIを脳機能解析グループが行っているが、その賦活部位と、術中マッピングにおける言語停止部位との関係について学会発表を行った。さらに、上記fMRI賦活部位が脳構造のどの部位に一致し、どのような解剖学的特徴を持つかについて解析を進めた。脳構造について脳皮質と白質および脳溝に注目した解析の重要性を提案したが、脳腫瘍患者での脳構造を詳細に解析することで臨床症状(記憶障害、高次脳機能障害)の局在についての考察を可能とした。記憶障害についてはWMS-Rを用い、高次脳機能障害についてはMMSEを用いて評価し、結果について学会報告を行った。また、脳腫瘍摘出術2週間前、皮質上(Broca及びWernickeと命名されている部位)に慢性硬膜下電極を留置し、皮質間電位(CCEP)を直接測定解析し、術前マッピング結果との整合性を確認した。術中のCCEP計測と合わせ、術中症状と比較しながらモニターを行った結果、有用な知見が得られ論文投稿中である。術前に腫瘍と白質線維との関係を簡便に可視化して臨床応用するため、定位放射線治療に用いる既知ソフトを脳腫瘍治療に応用することにも取り組んだ<sup>(4)</sup>。

### (C)「言語学理論」グループ

本グループは今年度においても引き続き、人間言語の根本演算(のひとつ)とされる併合演算(Merge)の本質についての研究を行なった。

脳機能解析グループとの共同研究<sup>(2)</sup>では、言語表現中の二つの要素(典型的には名詞句と動詞)を対応づける課題を被験者が行なっている最中の脳活動を fMRI で測定し、言語表現が持つ木構造の複雑さを表わす「併合度(Degree of Merger)」という概念を導入することによって併合自体に結びつく脳活動を抽出すると共に、短期記憶の負荷などを統制して併合度の違いによって脳活動の変化が生じるかどうかを調べた。その結果、併合度は直接的に左第3前頭回(弁蓋部およ

び三角部)の活動を引き起こし、左縁上回の活動は、併合度と探索(サーチ)と呼ばれる演算の複合によって変化することが判明した。

この脳科学的研究は、理論言語学的研究とも緊密な関係を持つ。H23 年度の最後(2012 年 3 月)に生物言語学国際会議で行なった講演の内容は、現在、それを一部として含む論文として改訂中であるが、講演の提案の一部(特に、素性の均衡概念に基づく併合の動機付け)は原著論文<sup>(5,6)</sup>で論じられている。H24 年度に於ける全く新たな展開は、国際学会発表で行なった併合演算と探索演算の研究である。この発表では、構造を作る最も基本的な演算である併合以外の諸々の演算(鎖を作る演算、スコープを決定する演算、等々)は、実は全て探索という単一の演算としてまとめられることが提案され、さらにこの探索も、併合+ $\alpha$  ( $\alpha$  は言語に固有の演算とは限らない)として分析できる可能性が示唆されている。もしこれが正しければ、上述の脳科学的研究で明らかになった結果と極めて興味深い形で言語理論の研究が関わることになる。H25 年度の研究の大きな柱のひとつはここにあると言える。

その他、言語機能とカウンターとの関係についても研究を開始した。「言語機能には隣接性の概念は組み込まれているが、カウンターは組み込まれていない」という仮説は、以前から言語学で提出されていたが、この仮説が持つ言語理論上の意味合いは未だに充分吟味されているとは言いがたい。数理文法論的にこの仮説を厳密に解釈し、それに基づいて脳科学的研究をデザインする作業を H24 年度に開始した。これは H25 年度の研究課題のひとつとなる。

### §3. 成果発表等

#### (3-1) 原著論文発表

##### ● 論文詳細情報

1. Inubushi, T., Iijima, K., Koizumi, M., Sakai, K. L. (2012) Left Inferior Frontal Activations Depending on the Canonicity Determined by the Argument Structures of Ditransitive Sentences: An MEG Study. PLOS One 7: e37192, 1-11. (DOI: 10.1731/journal.pone.0037192)
2. Ohta, S., Fukui, N. Sakai, K. L. (2013) Syntactic Computation in the Human Brain: The Degree of Merger as a Key Factor. PLOS One 8: e56230, 1-16. (DOI: 10.1371/journal.pone.0056230)
3. Y. Muragaki, M.Chernov, K.Yoshimitsu, T.Suzuki1, H.Iseki, T.Maruyama, M.Tamura, S.Ikuta, M.Nitta, A.Watanabe, T.Saito, J.Okamoto, C.Niki, M.Hayashi and K.Takakura (2012) Information-Guided Surgery of Intracranial Gliomas: Overview of an Advanced Intraoperative Technology, Journal of Healthcare Engineering 3:551-569.
4. M.Tamura, Y.Konishi, N.Tamura, M.Hayashi, N.Nakao, U.Yuji, T.Itakura, J.Regis,

- JF.Mangin, Y.Muragaki, H.Iseki (2013) Usfulness of Leksell GammaPlan for preoperative planning of brain tumor resection: Delineation of the cranial nerves and fusion of the neuroimaging data, including DTI, *Acta Neurochirurgica Suppl.* 179-185
5. Narita, Hiroki, Takaomi Kato, and Mihoko Zushi (2013). A Review of “Anna Maria Di Sciullo and Cedric Boeckx, eds. (2011) *The Biolinguistic Enterprise: New Perspectives on the Evolution and Nature of the Human Language Faculty* (Oxford Studies in Biolinguistics), Oxford University Press”. *English Linguistics* 30(1),
  6. Fukui, Naoki, and Hiroki Narita. Merge, labeling, and projection. In Andrew Carnie, Dan Siddiqi, and Yosuke Sato, eds., *Routledge Handbook of Syntax*. London: Routledge, to appear.