

論文の内容の要旨

論文題目

Research on functional roles of the inferior frontal gyrus using linguistic and numerical tasks

(言語課題と数課題を用いた下前頭回の 機能的役割の研究)

氏名 中井 智也

1. 序論

下前頭回 (通称ブローカ野) は言語の特に文法処理に関わる脳領域であることが知られている (Musso et al., 2003)。近年、言語と数学が共通にもつ特徴として、要素同士の再帰的結合によって生成される木構造が注目され、言語と数学は共通の基盤があるのではないかということが主張されている (Devlin, 2000)。本研究では、下前頭回の機能的特性を明らかにするため、言語と数課題を利用した4つの実験を行った。実験1では、機能的磁気共鳴スペクトロスコピー (MRS) を用いて、下前頭回の神経伝達物質特性を調べた。実験2では、言語課題と数課題の構造的な相互作用が生じるかどうかを、行動実験で調べた。実験3では、さらに同じ課題中の脳活動を機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) で計測し、言語と数学の相互作用を反映している脳部位を調べた。また、実験4では異なる先行研究に基づく言語課題と数課題を用いて下前頭回の活動を調べ、さらに言語や数課題の学習に関わる下前頭回以外の脳部位として報酬系に着目し、言語と数の洞察問題解決課題を解くことによる達成感と関連する脳活動を調べた。

2. 実験1：下前頭回の神経伝達物質特性

2.1. 導入

これまで、下前頭回の解剖学的性質が報告されてきた (Amunts et al., 2003)。しかし、下前頭回の特徴はその解剖学的性質では捉えきれない可能性がある。本実験では、下前頭回の神経伝達物質特性を評価するため、MRSによる神経伝達物質 GABA 濃度の測定を行った。また、標準化された課題が存在する言語機能に着目し、GABA 濃度と言語課題成績の関係を調べた。

2.2. 方法

28名の右利き男性に対し、言語流暢性課題を行い、言語能力の個人差を同定した。また左右の下前頭回を対象とし、3TのMRI装置を用いて、 H^1 -MRS (MEGA-PRESS)による測定を行った。

2.3. 結果

左下前頭回のみにおいて、言語流暢性課題の中でもカテゴリー流暢性課題 (CFT) の成績と

GABA+/Crの値に有意な負の相関がみられた ($P < 0.05$ 、図1B)。

2.4. 考察

言語流暢性課題との相関が左半球のみにおいてみられたことは、右利き者の言語優位半球が左であるという知見と一致する結果であり、下前頭回におけるGABA濃度が言語に対して重要な機能を果たしていることを示している。

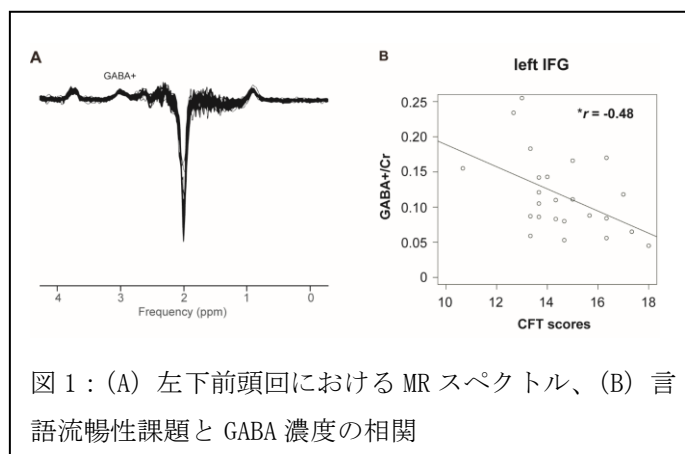


図1: (A) 左下前頭回におけるMRスペクトル、(B) 言語流暢性課題とGABA濃度の相関

3. 実験2: 言語と数課題のクロスドメイン構造プライミング効果

3.1. 導入

言語課題と数課題が同様の文法的構造を持つという仮説に基づき、同じもしくは異なる構造を持つ文・数式を作成することが可能である。「黒い猫が走る」という文は左枝分かれ構造を持っており、「猫が速く走る」という文は逆に右枝分かれ構造を持っている。それに対し、「 $6 \times 3 + 2$ 」は左枝分かれ構造をもっており、「 $2 + 3 \times 6$ 」は右枝分かれ構造を持っている。もし言語課題と数課題の文法処理が同じシステムに基づいているのであれば、それら文/数式刺激を連続呈示したときに構造の一致・不一致によりクロスドメイン構造プライミング効果が生じるはずである (図2)。

3.2. 方法

34名 (自然科学系17名、人文/社会科学系17名)の被験者に対し左・右枝分かれ構造の文刺激/数式刺激を2000msごと連続呈示し、反応時間およびエラー率を測定した。被験者にはそれぞれの文刺激が意味的に正しいかどうかを判断させ、また数式刺激については10の倍数かどうかを判断させた。

3.3. 結果

自然科学学生において、エラー率の有意なプライミング効果がみられた ($P < 0.05$ 、図2)。他方、人文/社会科学学生ではそのような効果はみられなかった。反応時間に関しては、プライミング効果は文⇒数式の方のみで生じた。

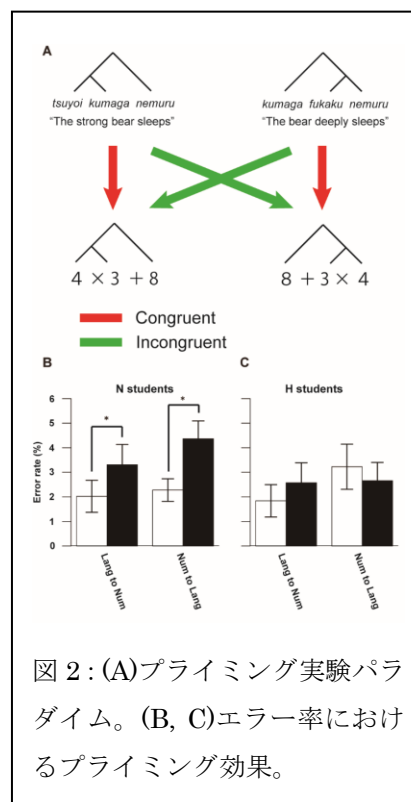


図2: (A)プライミング実験パラダイム。(B, C)エラー率におけるプライミング効果。

3.4. 考察

クロスドメイン構造プライミング効果は、言語課題と数課題が部分的に同じシステムに基づいていることを支持する結果である。プライミング効果が自然科学学生のみにもみられたことから、数式の構造処理には数学に対する経験や学習の影響があることが示唆された。

4. 実験 3：下前頭回における反応抑制効果

4.1. 導入

fMRI を用いた先行研究では言語課題と数学課題に共通して下前頭回が活動することが報告されている(Makuuchi et al., 2012)。しかしながら、たとえ異なる課題で共通部位が活動したとしても、それらが同じ神経回路に基づいていることは帰結しない。実験 3 では、実験 2 と同様の刺激を用いて、文法処理をつかさどる下前頭回に、プライミング効果を反映した神経活動が生じるかどうかを調べた。

4.2. 方法

20 名の右利き自然科学学生に対し、実験 2 と同じ課題実行中の脳活動を、MRI 装置を用いて調べた。また、言語課題と数課題を独立に行う機能的ローカライザー撮像を行った。

4.3. 結果

ローカライザー撮像のデータを用いて、言語課題と数課題に共通して左下前頭回が活動することを確認した。さらに、両半球の下前頭回において、一致条件が不一致条件と比べて有意に活動が低下している（反復抑制効果）ことがわかった ($P < 0.005$, $k > 10$, 図 3)。これらの活動パターンは数⇒言語および言語⇒数という双方向においてみられた。

4.4. 考察

反復抑制効果は特定の神経回路の刺激選択的な応答の結果だと考えられるため(Grill-Spector et al., 2006)、下前頭回における反復抑制効果は、この領域における同一の神経回路が言語課題と数課題に共通してその文法処理に関わっていることを支持する結果である。

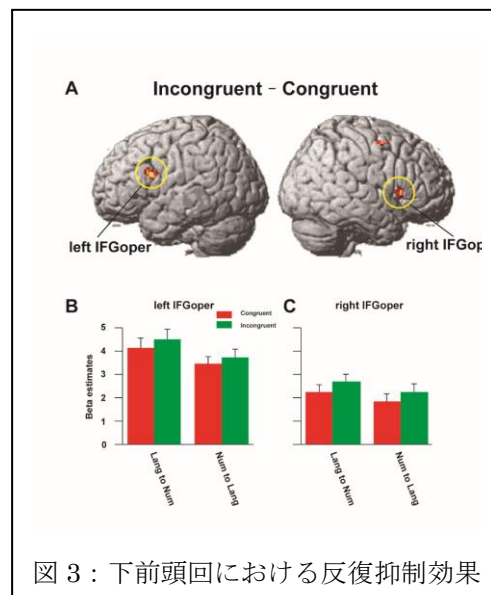


図 3：下前頭回における反復抑制効果

5. 実験 4：言語と数課題における下前頭回および報酬系の役割

5.1. 導入

下前頭回の機能的役割をより明確にするため、先行研究で下前頭回の活動がみられた数課題を発展させ (Nakai & Sakai, 2014)、数課題に対応する言語課題を導入した。文法的構造に限らず、言語課題と数課題には共通して多くの脳部位が関わると考えられるが、本実験では言語課題と数課題の学習過程における、下前頭回と報酬系の役割に注目した。

5.2. 方法

21 名の右利き被験者に対し、MRI 装置内で数字と平仮名を用いた洞察問題解決課題を行わせた。また課題呈示直前に、3 種類のヒント（ヒント無し、間接ヒント、直接ヒント）を教示し、さらに教示法による影響を調べた。課題直後に問題解決に伴う達成感を被験者に評定させることにより、問題解決時の活動が達成感と相関を示す脳領域を調べた。

5.3. 結果

言語と数課題実行時に左下前頭回の活動が観測された ($P < 0.05$, topological FDR 補正)。平均達成感は、間接ヒント条件において直接ヒント条件およびヒント無し条件よりも有意に高かった ($P < 0.05$, 図 4B)。さらに、達成感の高さと問題解決時の両側尾状核および前部帯状回の活動に有意な相関がみられ ($P < 0.05$, 図 4C)、そのような性質は言語と数課題において共通していた。

5.4. 考察

中程度の事前知識を与えた間接ヒント条件において、最も平均達成感が高く、またその神経基盤として報酬系が関わっていることが明らかになった。さらに、この結果が言語と数課題に共通していたことにより、尾状核の機能が言語と数課題の学習や動機づけに関わっていることが示唆された。人工文法学習の研究において、尾状核が関わっていることが報告されており (Forkstam et al., 2006)、実験 4 の結果は先行研究と整合的である。

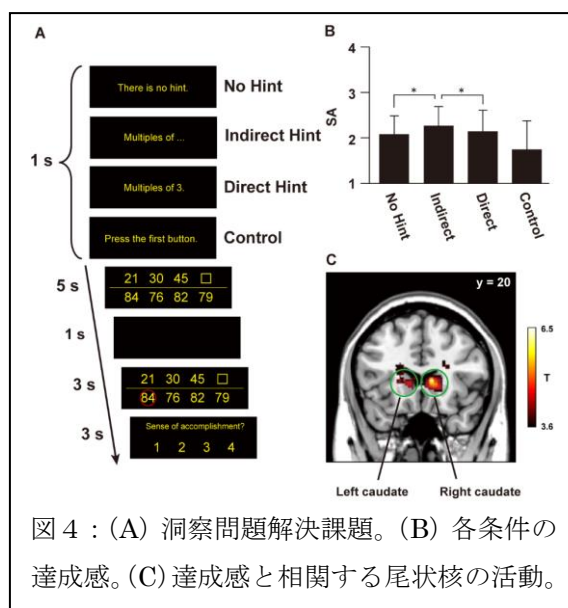


図 4 : (A) 洞察問題解決課題。(B) 各条件の達成感。(C) 達成感と相関する尾状核の活動。

6. 総合考察

本研究では、実験 1 により下前頭回の GABA 濃度が言語機能と関わっていることを示し、実験 2・3 によってその領域が言語課題と数課題両方の文法処理に共通する基盤になっていることを明らかにした。実験 4 でも言語課題と数課題に共通して左下前頭回の活動がみられ、さらに達成感と相関する尾状核の機能が、下前頭回と共同して言語課題と数課題の学習の基盤になっていることが考えられる。本研究の結果は、言語課題と数課題には共通する基盤があるという理論的予測と矛盾しない結果であり、それが下前頭回の神経伝達物質特性に基づくものであることを示唆する。

7. 参考文献

- Amunts, K., Schleicher, A., Ditterich, A., & Zilles, K. (2003). The Journal of Comparative Neurology, 465(1), 72–89.
- Devlin, K. J. (2000). The math gene: How mathematical thinking evolved and why numbers are like gossip. New York: Basic Books.
- Forkstam, C., Hagoort, P., Fernandez, G., Ingvar, M., & Petersson, K. M. (2006). NeuroImage, 32(2), 956–967.
- Grill-Spector, K., Henson, R., & Martin, A. (2006). Trends in Cognitive Sciences, 10(1), 14–23.
- Makuuchi, M., Bahlmann, J. & Friederici, A.D., 2012. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 367(1598), pp.2033–2045.
- Musso, M., Moro, A., Glauche, V., Rijntjes, M., Reichenbach, J., Büchel, C., & Weiller, C. (2003). Nature Neuroscience, 6(7), 774–81.
- Nakai, T., & Sakai, K. L. (2014). PLOS ONE, 9(11), e111439.