

論文の内容の要旨

論文題目

Functional anatomy of the dorsal and ventral language-related pathways in second language acquisition

(第二言語習得における背側および腹側言語関連経路の機能解剖学)

氏名 山本香弥子

1. 背景と目的

言語機能は脳の離れた場所にある複数の領域の働きにより実現されており、これらの領域は主に背側および腹側の神経線維束により相互に連絡されている。近年、拡散 MRI (magnetic resonance imaging) が開発され、神経線維束を非侵襲的に分析し、それぞれの線維束の性質を定量化することが可能となった。線維束の評価指標としては、fractional anisotropy (FA) 値や太さ (体積) などが広く用いられている。FA 値は拡散異方性を表す指標で、ミエリン化の程度やグリア細胞・軸索の密度などを包括的に反映していると考えられており、線維束の太さ (体積) とは独立した指標である。先行研究では、特定の機能の長期的なトレーニングの後に、その機能に関連する領域の FA 値が上昇することが報告されている^[1]。言語関連経路の機能的な役割を明らかにするには、文法や意味といった能力を分離し、これらの能力における個人差が、背側および腹側経路の解剖学的指標とどのように関連しているかを特定する必要がある。

言語能力における個人差は、特に大人の第二言語習得において顕著であり、第一言語の習得とは明らかに異なっている。第一言語においても、負荷の高い状況下では言語能力の個人差が見られる。先行研究では子供と大人を対象とし、年齢・言語能力に基づいたグループに分類して比較することで、各要因に対応した脳活動が特定されている^[2]。また、個人差は文字習得においても見られ、成人期に初めて識字教育を受けた場合にも、神経線維束に変化が生じる可能性が報告されている^[3]。第二言語習得においても長期にわたる経験が必要であることから、言語習得の個人差が、言語関連経路の可塑性における個人差と関係している可能性が考えられる。こうした可塑性を明らかにするにあたって、言語の臨界期 (12 歳まで) 以降であり、なおかつ可塑性が大きい青年前期を対象とすることは有意義である。青年前期の脳の可塑性は、第二言語習得度と年齢に関連した要因の両方の影響を受けると考えられる。第二言語の経験年数を統制したうえで、習得度と年齢がそれぞれどのように言語関連経路における解剖学的指標と関係しているかを検討することが重要である。本論文では、背側および腹側言語関連経路の拡散 MRI による客観的な分析方法を提案し、第二言語文法能力との関係、さらに青年前期における発達を明らかにすることを目的とした。

2. 第二言語の文法習得における背側経路の重要性

2.1. 実験 I

2.1.1. 実験方法

中学1年生より英語の習得を開始した高校2年生の実験参加者に対して、英語の文法的な誤りの有無を判断する文法課題と、綴りの誤りの有無を判断する綴り課題を実施した。英語の語彙の知識を保証するために、綴り課題で80%以上正答した26名を解析の対象とした。拡散MRIを用いて、背側経路である弓状束 (arcuate fasciculus: Arcuate) と腹側経路である下前頭後頭束 (inferior fronto-occipital fasciculus: IFOF) を左右両半球において描出した。線維束の性質を代表する関心領域 (region of interest: ROI) を設定する目的で、それぞれの線維束の中心部において最も太さが均一の部分を選択した (図1)。ROIの大きさは実験参加者間で太さのばらつきが最小となるように設定し、各個人脳容量に応じて、Arcuateでは19–21 mm (平均20 mm)、IFOFでは14–16 mm (平均15 mm)とした。ROI内の平均の太さと平均FA値を線維束の評価指標として、文法課題正答率との相関を調べた。

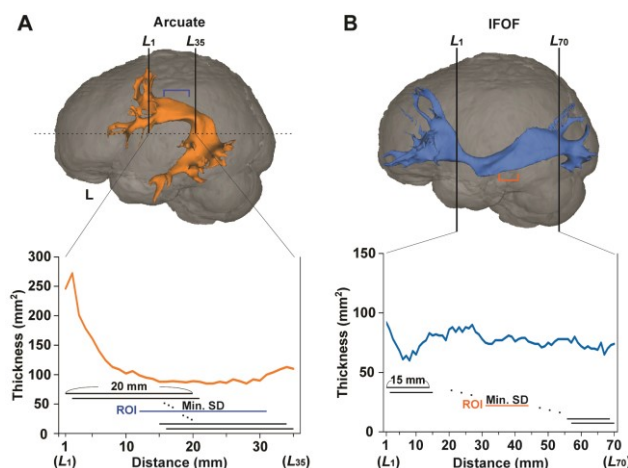


図1. 背側・腹側経路における関心領域 (ROI) の設定

背側経路の Arcuate (A) と腹側経路の IFOF (B) のそれぞれにおいて、線維束の中心部の最も太さが均一な部位を ROI として選択した。

2.1.2. 結果

各線維束 ROI における FA 値と文法課題正答率の関係を、綴り課題正答率・利き手指数・性別の影響を除いた偏相関により調べた結果、左 Arcuate において有意な相関が見られた (図2)。右 Arcuate および左右の IFOF においては、有意な相関は見られなかった。また、左 Arcuate の FA 値は、綴り課題正答率とは有意な相関を示さなかった。以上の結果から、左 Arcuate は言語処理の中でも特に文法処理において重要であることが示唆される。

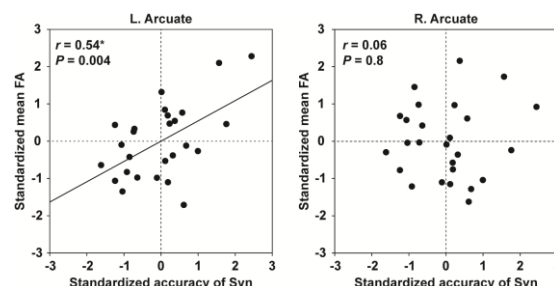


図2. FA 値と文法課題 (Syn) 正答率の相関

左右各半球の Arcuate・IFOF の中で、左 Arcuate のみが有意な相関を示した。

2.2. 実験 II

2.2.1. 実験方法

高校2年生の一卵性双生児12組を対象とした。実験Iと同一の課題を実施し、左右両半球での Arcuate と IFOF の描出、さらに ROI の設定を行った。課題成績および解剖学的指標についてペア間での相関を調べることで、一卵性双生児が共有している遺伝的・環境的要因の影響の強さを調べた。

2.2.2. 結果

課題成績に関して、特に綴り課題の反応時間において強いペア間の相関が見られた (図3上段)。この相関は文法課題正答率におけるペア間の相関と比較して、有意に強い相関であった。解剖学的指標について、左 Arcuate の太さにおいて有意な相関が見られた一方で、FA 値では有意な相関は見られなかった (図3下段)。IFOF は、いずれの半球においても、太さ・FA 値ともに有意なペア間の相関を示さなかった。これらの結果から、左 Arcuate の太さは一卵性双生児が共有している要因に強く影響を受ける一方で、実験Iで相関が明らかとなった左 Arcuate の FA 値と文法課題正答率は、いずれも共有要因の影響が弱い可能性が示唆される。

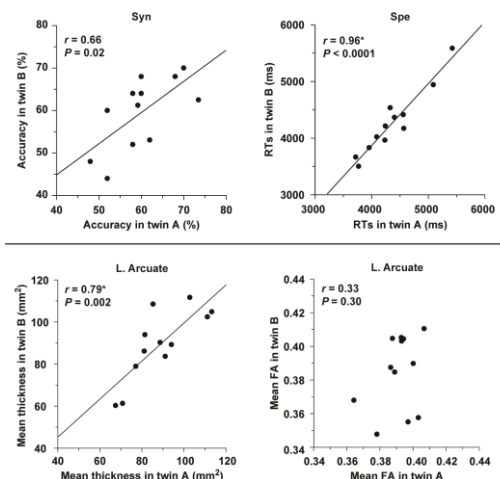


図3. 一卵性双生児ペア間での相関 上段に課題成績における相関、下段に左 Arcuate の解剖学的指標における相関を示す。

3. 言語関連経路における第二言語習得または年齢に関連した群間差

3.1. 実験方法

中学 1 年生より英語の習得を開始した中学 2 年生 (Junior) と高校 2 年生 (Senior) を対象とし、文法課題と綴り課題を実施した。正答率と反応時間に基づき、第二言語習得度が同程度である Junior (High) と Senior (Low) グループ、これらふたつのグループより有意に成績が高い Senior (High) グループに分類した。これらの実験参加者について、左右両半球で Arcuate と IFOF を描出し、Montreal Neurological Institute (MNI) 座標への標準化を行った (図 3)。Arcuate と IFOF について、最も太さが均一の部分にそれぞれ 20mm と 15mm の ROI を設定した。各 ROI での平均の太さ・平均 FA 値について、グループ間で比較を行った。さらに、第二言語習得に関連した違いが見られた解剖学的指標について、どのような言語能力との関係が最も強いかを明らかにする目的で、文法課題と綴り課題それぞれの正答率との相関を調べた。

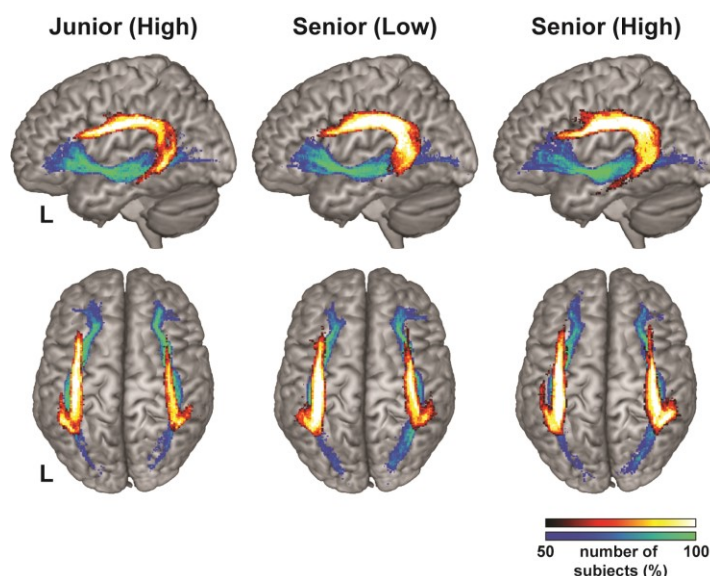


図 3. Junior (High) (14 歳) と Senior (Low)/Senior (High) (17 歳) における Arcuate と IFOF Arcuate は、特に左半球において Junior (High) と比較して Senior (Low) および Senior (High) では太い。

3.2. 結果

明らかな群間差は、左 Arcuate においてのみ観察された。左 Arcuate の太さに関して、Junior (High) と比較して Senior (Low) および Senior (High) では値が大きかった (図 4 左)。Senior (Low) と Senior (High) では有意な差は見られなかった。これらの結果から、左 Arcuate の太さには、第二言語習得度によらず年齢が関係していることが示唆される。左 Arcuate の FA 値に関しては、Junior (High) および Senior (Low) と比較して Senior (High) では値が有意に大きかった (図 4 右)。Junior (High) と Senior (Low) では有意な差は見られなかった。これらの結果から、左 Arcuate の FA 値には、年齢によらず第二言語習得度が関係していることが示唆される。

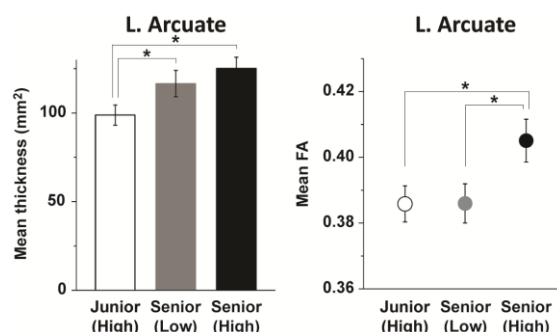


図 4. 左 Arcuate における第二言語習得または年齢に関連した群間差 太さでは年齢に、FA 値では第二言語習得に関連した群間差が見られた。

次に、第二言語習得に関連した群間差が見られた左 Arcuate の FA 値について、文法課題および綴り課題それぞれの正答率との相関を Senior (High) において調べた。文法課題正答率に関して、綴り課題正答率・利き手指数・性別の影響を除いた偏相関を用いて調べた結果、FA 値との有意な相関が見られた (図 5 左)。一方で、綴り課題正答率に関して、文法課題正答率・利き手指数・性別の影響を除いた偏相関を用いて調べた結果、有意な相関は見られなかった (図 5 右)。これらの結果から、左 Arcuate の FA 値は、第二言語習得における特に文法能力の個人差を反映していることが示唆される。

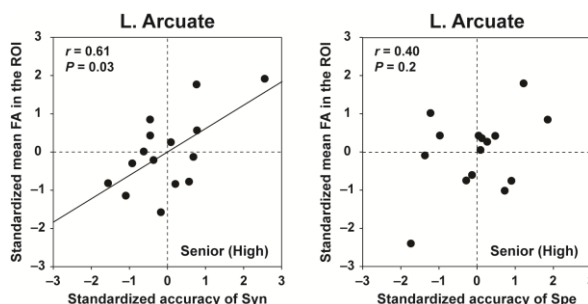


図 5. 左 Arcuate の FA 値は文法課題 (Syn) 正答率を反映する 第二言語習得に関連した群間差が見られた左 Arcuate の FA 値について、Senior (High) において文法課題・綴り課題の正答率との関係を調べた結果、文法課題正答率とのみ有意な相関が見られた。

4. 総合考察

左背側経路の FA 値が第二言語の文法習得における個人差を反映していることが明らかになった。左背側経路は、文法処理における重要性が指摘されてきた左下前頭回^[4,5]と、側頭葉に位置する言語関連部位を相互に連絡しており、本研究は左下前頭回を含んだネットワークの重要性を示唆する。また、一卵性双生児を対象とした分析から、左背側経路 FA 値と第二言語文法習得度のいずれにおいても、双生児が共有する遺伝・環境要因の影響は比較的弱い一方で、左背側経路の太さや、課題の反応速度では共有要因の影響が強く見られることが明らかになった。さらに左背側経路において、第二言語習得と年齢の要因がそれぞれ、FA 値と太さという異なる解剖学的指標と関連していることが示された。本研究で用いた言語関連経路の正確な同定法や、その個人差の客観的な評価手法は、今後の複数のイメージング手法を融合させた研究、さらに個人に即した教育法の選択などに役立つと考えられる。

参考文献

- [1] Scholz et al. (2009) *Nature Neuroscience* 12, 1370-1371
- [2] Schlaggar et al. (2002) *Science* 296, 1476-1479
- [3] Thiebaut de Schotten et al. (2014) *Cerebral Cortex* 24, 989-995
- [4] Sakai et al. (2009) *Human Brain Mapping* 30, 2440-2452
- [5] Nauchi and Sakai (2009) *Human Brain Mapping* 30, 3625-3635