

fMRI を用いた日本語母語話者による英文の意味処理における脳の機能的結合性解析

Analysis of functional connectivity of the brain in semantic processing of English sentences in Japanese native speakers using fMRI

辻田 亜門[†], 大山 将来[†], 栗津俊二^{*}, 赤間 啓之^{†‡}
Amon Tsujita, Masaki Ooyama, Shunji Awazu, Hiroyuki Akama

[†]東京工業大学生命理工学院, [‡]東京工業大学リベラルアーツ研究教育院, ^{*}実践女子大学人間社会学部
Tokyo Institute of Technology, [†]School of Life Science and Technology, [‡]Institute of Liberal Arts,
^{*}Jissen Women's University, Faculty of Humanities and Social Sciences
tsujita.a.aa@m.titech.ac.jp

Abstract

In this study, we used fcMRI (functional connectivity MRI) to extract differential brain responses when Japanese native speakers interpret English sentences as compared to Japanese sentences of the same meaning. In particular, we focused on coordination between language areas associated with the other task-positive or task-negative networks. Furthermore, we examined individual differences in language ability, using the TOEIC score, to explore correlations between language proficiency and neural responses among subjects.

As a result, it was suggested that both the DMN (default mode network), which shares some overlapping regions with the semantic network, and the SN (salience network) might play an important role in English comprehension for Japanese native speakers. In addition, English proficiency was correlated with the strength of connectivity between the right pars triangularis, which is the homologous region of Broca's area, and the Wernicke's area, which is also a well-established language area located in the left superior temporal cortex. However, compared to the subjects with low TOEIC scores, the latter linguistic area in the brains of high-scoring subjects transferred its hub role to the more anterior part of the same area. Our data indicate that the bilateral networks consisting of the right pars triangularis and the left superior temporal cortex are crucial to semantic processing for second language learners.

Keywords — fMRI, functional connectivity, language, second language learning

1. はじめに

fcMRI(機能的結合性磁気共鳴画像法)は、脳の各領域の神経活動に伴う血流動態において、時系列相関の形で反応が同期する領域間を接続し、グラフ化する方法である。ヒトの脳の高次皮質機能に関与するメカニズムをより良く理解するためには、皮質領域間の機能的結合に関する、詳細な知識を必要とするとされる[1]。

本研究では、第二言語における意味理解のメカニズムを解明するため、有効性が注目されつつあるタスクベースの fcMRI を用いて[2]、日本語の母語話者が英

文の意味理解をする際の、言語処理ネットワークに着目し、同意の日本語文の意味理解と比較して英文理解の特微的な脳反応を抽出する。また、第二言語の学習のメカニズムを理解するために、実験参加者の英語能力を TOEIC の点数を指標として、英語の習熟度と英文理解時の脳反応の関係を調べた。

2. 実験方法

2.1. 実験参加者

実験参加者は 20 代の日本人 39 名(男 24 名、女 15 名)であり、東京工業大学の「人を対象とした研究倫理委員会」の審査・承認を得て募集している。参加者は全て右利きで、利き手指数は平均 47.9、標準偏差 2.62 であった。また、参加者の TOEIC の点数は 450 点~960 点の間でおよそ均等に分散しており、平均 662 点、標準偏差 150 点である。

2.2. 実験計画

fMRI 実験には東京工業大学 3.0-T General Electric Signa スキャナーを使用した。fMRI の撮像パラメーターは TR(Repetition Time): 3000ms、TE (Echo Time):30ms、FOV(Field of view): 24 * 24、Flip 角 90 度である。実験の前半には英語文のブロック、後半には意味的に同一の日本語文のブロックが設定され、各ブロックにおいては意味的に均衡が取れた 90 個の文が、3 セッションに分かれて提示される。各試行は、文の提示 5 秒間、提示された文が意味を成すかどうかの解答 1.5 秒間、安静 5.5 秒間として構成されている。1 セッション当たりの撮像回数は 120 回、セッション時間は 6 分 12 秒、1 ヴォリュームあたりのスライス数は 40 である。各試行は固定長であり、その中のイベントの配置はほぼ同一で、文の意味内容の差とボタン押しによる運動反応の位置のみ異なる。そのため、各ブロックを通じ、安静時の自発的ネットワークと同様の手法で、BOLD 信号の

低周波帯域からタスクベースの機能的連結性を、同調賦活する脳領域に関し計算することができると考えられる。

2.3. 実験刺激

提示される文は、日本語あるいは英語として意味を持つ文(例、「ドアをたたく」「I knock on the door」)と、不自然な意味を持たない文(例、「父を貼る」「I put up my dad」)で構成される。各言語で、意味を持つ文が60個、意味を持たない文が30個設定されている。実験参加者に課されたタスクは、意味の通らない文に対し、ボタン押しで応答することである。日本語文の短期記憶による、英語文の理解への影響をなくすために、順序効果の完全な相殺はできていないが、英語文の全セッションを日本語文のセッションよりも先に設定した。

2.4. 分析方法

取得された画像データは、MATLAB 上の spm12 と共に conn(connectivity tool box ver.2017a)を用いて、前処理、各言語条件下での機能的結合性の計算と t 検定による評価を行った。まず、全実験参加者における、英語文理解>日本語文理解と日本語文理解>英語文理解のコントラストを計算した。さらに全実験参加者を TOEIC 点数上位、中位、下位の3つの集団に分け、TOEIC 点数上位>下位のコントラストを用い、英文理解能力に差がある場合の機能的連結性の差に注目した。また、同じく conn の Graph Theory 機能を用い、各言語条件下の実験参加者ごとの、各脳領域におけるグラフ指標、すなわち、大域効率(Global Efficiency)、局所効率(Local Efficiency)、平均パス長(Average Path length)、媒介中心性(Betweenness Centrality)、コスト(Cost)、次数(Degree)、クラスター係数(Clustering Coefficient)を算出し、スピアマンの順位相関を用いて、各グラフ指標と参加者特性(TOEIC 点数)と統計的に有意な相関がある脳領域を調べた。特に、機能的結合性が有意に高い領域や、言語処理ネットワークに関係すると考えられる領域に注目した。

3. 結果

3.1 英語文理解>日本語文理解

英語文の理解においては、日本語文に比して、古典的言語野であるヴェルニッケ野を含む左後上側頭回(pSTG(L))、同じく古典的言語野であるブロカ野を含む左下前頭回(IFG(L))、言語処理ネットワーク(LN)のハブとされている左角回(AG(L))の3領域共に、デフォルトモードネットワーク(Default Mode Network, DMN)や顕著性(Salience Network, SN)に含まれる領域と多数の統

計的に有意な正または負の結合性が確認された(表1、表2)。加えて、前帯状皮質(ACC)を除いて、DMNに含まれる脳領域とSNに含まれる脳領域との間で、多数の有意な正の機能的結合性が確認された(表3)。なお以下の表で、*、**、***の記号はそれぞれ偽陽性率(False Discovery Rate, FDR)により多重比較したp値について、5%水準、1%水準、0.1%水準で有意差があったことを示している。

表1 英語文理解>日本語文理解における、LNとDMNのノード間で確認された有意な機能的結合

| LN \ DMN | IFG(L) | pSTG(L) | AG(L) |
|----------|-------------|-----------|-------------|
| PCC | Negative*** | Positive* | Positive** |
| LP(R) | Negative*** | — | — |
| LP(L) | Negative*** | — | — |
| MPFC | Negative* | Positive* | Positive*** |

表2 英語文理解>日本語文理解における、LNとSNのノード間で確認された有意な機能的結合

| LN \ SN | IFG(L) | pSTG(L) | AG(L) |
|------------|-------------|------------|-------------|
| SMG(R) | Negative*** | Positive* | Positive** |
| SMG(L) | Negative** | Positive** | — |
| RPFC(L) | — | Positive** | Positive*** |
| Ainsula(L) | — | — | Negative** |
| MPFC | — | — | Negative** |

表3 英語文理解>日本語文理解における、DMNとSNのノード間で確認された有意な機能的結合

| DMN \ SN | MPFC | LP(L) | LP(R) | PCC |
|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| ACC | Negative* | — | Negative** | Negative* |
| Ainsula(R) | — | — | — | — |
| Ainsula(L) | — | — | — | — |
| RPFC(R) | — | Positive* | — | Positive** |
| RPFC(L) | — | Positive*** | Positive** | Positive*** |
| SMG(R) | Positive** | Positive*** | Positive*** | Positive** |
| SMG(L) | — | Positive** | — | Positive** |

3.2 日本語理解>英語理解

日本語>英語というコントラストでは、弓状束等の神経網を通じ言語処理ネットワークを為すと考えられている、Broca野、ヴェルニッケ野、左角回のうち、Broca野とヴェルニッケ野、Broca野と左角回で、高度に有意な正の機能的結合性が認められた(Broca野とヴェルニッケ野 $p\text{-FDR}:1.8 \times 10^{-5}$ 、Broca野と左角回 $p\text{-FDR}:1.0 \times 10^{-6}$)。

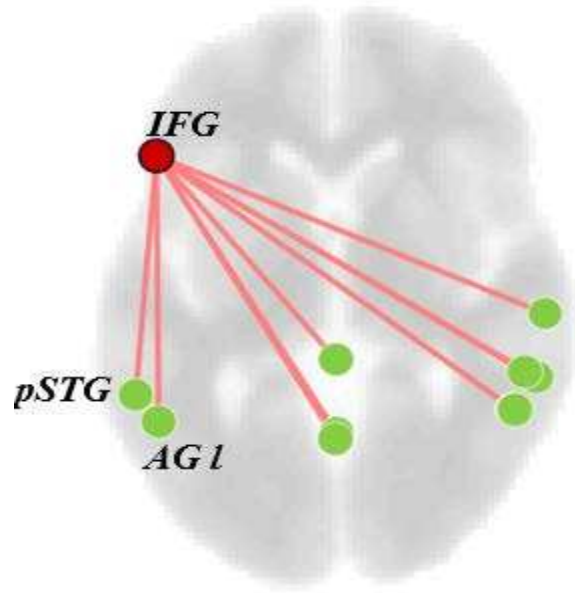


図1 左下前頭回をシードとした日本語理解>英語理解における有意な正の機能的結合($p\text{-FDR}<2.0 \times 10^{-5}$)

3.3 TOEIC 点数上位>下位のコントラストにおける英語理解

左後上側頭回とBroca野相同部である右三角部との間で、有意な正の機能的結合性が確認された。これについては考察で詳しく述べる。

3.4 グラフ指標

右三角部において、TOEIC スコアが示す英語能力が高いほど、局所効率(Local Efficiency)、クラスター係数(Clustering Coefficient)が高いという結果が得られた。さらに、左後上側頭回においては、英語能力が高い実験参加者のほうが、平均パス長(Average Path length)が上昇し、大域効率(Global Efficiency)、媒介中心性(Betweenness Centrality)、コスト(Cost)、次数(Degree)が低下する結果が見られた。反対に左前上側頭回では、英語能力が高いほど、大域効率(Global Efficiency)、媒介中心性(Betweenness Centrality)、コスト(Cost)、次数(Degree)が上昇し、平均パス長(Average Path length)が低下した。このように、英語能力の差に着目すると、左上側頭回では、前部と後部で対照的な結果が得られた(表4の黄色で強調された第1,2行を参照のこと)。

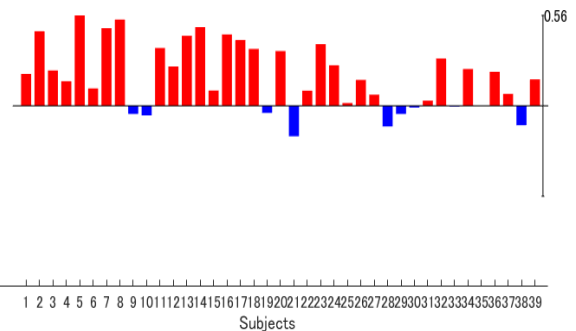


図2 各実験参加者の、左下前頭回をシードとし左後上側頭回をターゲットとした時の日本語理解>英語理解における機能的結合のエフェクトサイズ

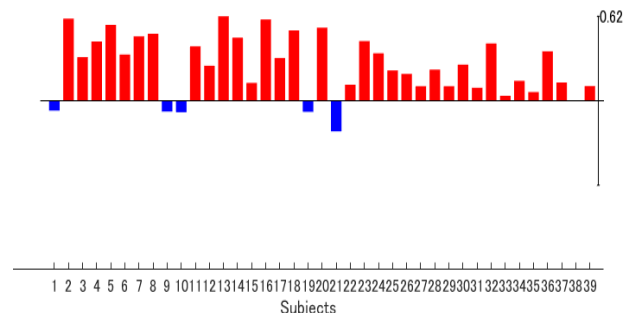


図3 各実験参加者の、左下前頭回をシードとし左角回をターゲットとした時の日本語理解>英語理解における機能的結合のエフェクトサイズ

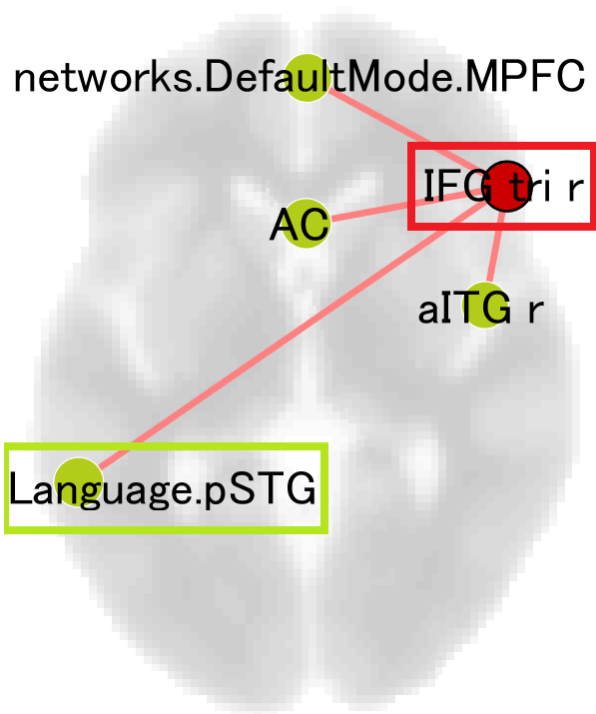


図4 右三角部をシードとした英語能力上位群>英語能力下位群における、英語文理解時の統計的に有意な正の機能的結合(p-FDR<5.0×10⁻²)

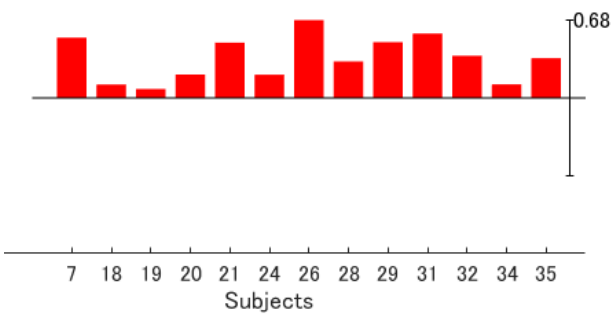


図5 英語能力上位群の、右三角部をシードとして

ターゲットが左後上側頭回の、英文理解時における機能的結合のエフェクトサイズ

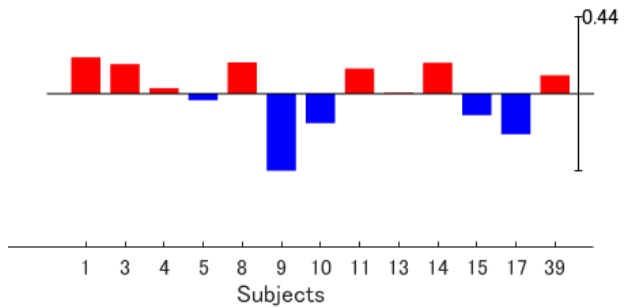


図6 英語能力下位群の、右三角部をシードとしてターゲットが左後上側頭回の、英文理解時における機能的結合のエフェクトサイズ

表4 各グラフ指標において、スピアマンの順位相関で参加者特性(TOEIC 点数)と統計的に有意な相関があるすべての脳領域。無印：正に相関、(-)：負に相関

| | Global | Average(-) | Between | Cost |
|-----------------------|------------|------------|------------|---------|
| aSTGL | Global | Average(-) | Between | Cost |
| pSTGL | Global(-) | Average | Between(-) | Cost(-) |
| IFGTriR | Local | Clustering | | |
| IFGoperL | Local | | | |
| aMTGR | Local | Clustering | | |
| toMTGR | Local | Clustering | | |
| aPaHCL | Average | Between(-) | | |
| pPaHCR | Global(-) | Average | Between(-) | Cost(-) |
| pPaHCL | Global(-) | Average | Cost(-) | |
| sLOCR | Average | | | |
| aTFusCL | Between | | | |
| ICCL | Between | | | |
| PTL | Global(-) | | | |
| PutamenR | Local | Clustering | | |
| PutamenL | Cost | | | |
| Cereb1R | Local | Clustering | | |
| Cereb1L | Local | Clustering | | |
| Cereb3R | Global(-) | Average | Between(-) | Cost(-) |
| Cereb3L | Global(-) | Average | | |
| Cereb10R | Global(-) | Between(-) | Cost(-) | |
| Ver3 | Global(-) | Cost(-) | | |
| Visual_Ventral | Average | | | |
| SensoriMotor_Superior | Between(-) | | | |

4. 考察

後帯状皮質(PCC)、頭頂葉外側部(LP)、内側前頭皮質(MPFC)は DMN に含まれるとされ、縁上回(SMG)、吻側前頭前野(RPFC)は SN に含まれるとされている。英

語>日本語のコントラストの結果より、英文を理解する際、最近の研究で意味処理ネットワークと重なるとされている DMN[3]と、他のネットワークの調節に関わると考えられている SN[4]という 2 つのネットワークが、言語処理ネットワークとの間で、有意な正もしくは負の結合性を示すことが認められた。また、DMN と SN において、互いのネットワークに含まれる領域間で、多数の有意な正の機能的結合性が確認されたことから、この 2 つのネットワーク間の結合性は、英文把握の際に高まると見做しうる。以上のことから、日本語母語話者の英語における意味処理において、DMN と SN が関与することが強く示唆される。

反対に、日本語>英語のコントラストでは、言語処理ネットワーク内に含まれる領域間で、有意な正の機能的結合性が認められた。このことは、日本語による言語活動の際、言語処理に関わる領域間で同調的に意味処理が完結していることを示している(図 1,2,3)。母語と第二言語とでは、言語に主要に関わるとされているネットワークの活動に大きな差が見られ、第二言語の処理においては DMN, LN, SN など異なるネットワーク間での調整が必要なことが示唆されている。

図 4 のように、TOEIC 点数上位>下位のコントラストの結果では、右三角部と左後上側頭回の結合性の強さは統計的に有意である。全実験参加者を見ても、TOEIC の得点は、右三角部と左後上側頭回の結合性の強さと有意に正の相関を示している。右三角部をシードとし左後上側頭回をターゲットとして、英文理解時における機能的結合のエフェクトサイズを実験参加者ごとに示したのが、図 5, 6 である。またグラフ指標の結果から、英語能力が高い参加者において、右三角部が含まれるネットワークが特徴的な振舞いを示すことがわかった(図 4 の赤で強調された 3 行目)。TOEIC 高得点者では、このネットワークに左後上側頭回が吸収され、そのため左後上側頭回を介して結合する領域数が減少し、ハブとして持つ情報伝達効率が低下する[5]。

その代わりに、英語能力が高いと、左上側頭回では、後部ではなく、前部にハブとしての役割が置かれるということがグラフ指標の結果よりわかった。英語能力に応じての左上側頭回内におけるハブの移動は、英語の意味理解能力の差を反映しているのではないかと思われる。意味処理のハブとして左前上側頭回は大きな関心を集めている。その場合、下前頭回に対する意味処理

ネットワークは、左後上側頭回と関連する弓状束などの背側の神経網ばかりでなく、左前上側頭回と関連する最外包や鉤状束などの腹側の神経網も考慮が必要となってくる。

以上を要するに、第二言語の習熟度が高くなるにつれて、右三角部と左後上側頭回を含むような両側にまたがる第二言語特有の言語処理ネットワークが作られ、そのネットワークは DMN や SN とも様々な調整を行っているのではないかと考えられる。その中で、右半球のブロカ野相同部、すなわち右下前頭回、三角部の果たす役割については、まだ不明な点が多い。この解明が今後の課題であると思われる。

参考文献

- [1] Riki Matsumoto, Dileep R. Nair, Eric Lapresto, Imad Najm, William E. Bingaman, Hiroshi Shibasaki, Hans Otto Lüders (2004) "Functional connectivity in the human language system: a cortico-cortical evoked potential study", *Brain*, Volume 127, Issue 10, 1, Pages 2316-2330
- [2] Javier Gonzalez-Castillo, Peter A. Bandettini (2017) "Task-based dynamic functional connectivity: Recent findings and open questions", *NeuroImage*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1053811917306535>
- [3] Miranka Wirtha, Kay Janna, Thomas Dierksa, Andrea Federspiela, Roland Wiestb, Helge Hornc (2011) "Semantic memory involvement in the default mode network: A functional neuroimaging study using independent component analysis", *NeuroImage*, Volume 54, Issue 4, Pages 3057-3066
- [4] Valerie Bonnelle, Timothy E. Ham, Robert Leech, Kirsi M. Kinnunen, Mitul A. Mehta, Richard J. Greenwood, David J. Sharp (2012), "Salience network integrity predicts default mode network function after traumatic brain injury", *PNAS*, Volume 109, Issue 12, Pages 4690-4695
- [5] 小野田 慶一 (2015), "脳画像研究におけるグラフ理論の基礎", *生理心理学と精神生理学*, 33 巻 3 号 p. 231-238