

バイリンガル話者の言語切替における脳の機能的連結性について Brain Functional Connectivity in Language Switching of Bilinguals

赤間 啓之¹, ペ セオフイ², 雷ビョービ³
Hiroyuki Akama¹, Bae Seohui², Lei Miaomei³

¹ 東京工業大学リベラルアーツ研究教育院/生命理工学院
Tokyo Institute of Technology, Institute of Liberal Arts/ School of Life Science and Technology

akama.h.aa@m.titech.ac.jp

² KAIST, Korea Advanced Institute of Science and Technology

³ 日立製作所, Hitachi, Ltd.

Abstract

The major challenge to be addressed in this article is to explore the functional connectivity for the language switching in the brains of early bilinguals. We recycled the data that Lei et al., 2014 recorded in the fMRI scans with a cohort of students from the Chinese Korean minority, who were requested to perform two types of property generation task that involved language switching. These tasks were subdivided into two-day sessions with different levels of difficulty: situational non-translation language switching condition (abbreviated as 'SnT') and focused simultaneous translation language switching condition (abbreviated as 'FST'). We found that the natural task based on living of bilinguals (SnT) recruited more broadened realms of functional connectivity than the artificial and difficult experimental switching-translation task (FST), encompassing in the former the bilateral nodes of both Default Mode Network (DMN) and the other task-positive networks.

Keywords — fMRI, functional connectivity, bilingualism, language switching, DMN.

1. はじめに

本研究は、早期バイリンガルにおける言語切替の神経基盤を明らかにした Lei ら[1]の実験結果を、さらにタスクベースの機能的連結性の観点から再解析したものである。複数の言語の習得年齢の早い早期バイリンガルにおいては、左背外側前頭前野[2]、側頭葉外側[3]などが言語切替の神経基盤として知られている。Lei らは、第一母語が韓国語、第二母語が中国語である朝鮮族のバイリンガル話者を対象に、言語切替時に母語間の翻訳を含むか否かという 2 つの条件で、実験日の異なる 2 つの fMRI セッションを通じ、言語切替の神経基盤を精査した。その結果、補足運動野、尾状核、縁上回、紡錘状回などの言語切替に特有な皮質、皮質下領域を検出した。

しかし、Lei らの研究も含め、これまでのバイリンガル脳の研究は、個別の言語刺激に対して試行内でどのように瞬間的の反応をするかに関心が集まり、一定の時

間内で同種の言語切替タスクが反復して行われているという環境の中で、脳が全体として数分間にどのような一定の賦活パターンを示すかということにはあまり関心が寄せられなかった。一定時間の脳の各 voxels・領域間の同調的賦活は、その変動の低周波帯の時系列データを、独立成分解析(ICA)や、シードからの相関分析に基づくネットワーク解析にかけることで明らかになる。しかしその多くは、実質的なタスクを行わず固視点を見て、取りとめもない思考がよぎる以外はリラックスした状態を保つという、安静時機能的連結性を示す脳反応を対象としている。そこでは、デフォルトモードネットワーク(DMN)が一種の基底状態とされ、内側前頭前野、楔前部、後帯状皮質、下頭頂小葉、小脳脚 I・小葉 IX、海馬傍回同調的賦活として観測される。DMN に対しては自己参照性・自己配向性・他者理解などの様々な認知機能が賦与され、アルツハイマー型認知症などの神経疾患のバイオマーカーとしても認められている。一方、安静時にもかかわらず、タスク陰性(task-negative)である DMN に加え、いくつかのタスク陽性(task-positive)反応ネットワークも部分的に観測されるが、それらはたとえば、背側注意ネットワーク、感覚運動ネットワーク、顕著性ネットワーク、前頭頭頂ネットワーク、あるいはその部分グラフであり、通常は DMN と負の相関を示すとされる。しかし、下頭頂小葉から左側頭葉にかけて、DMN が言語ネットワーク、特に意味記憶の処理を行うネットワークと構造的に重なることから、両者の間の共通性を問う論考も見られる[4]。言語タスクを実行している脳が時間的大域に亘りどのような同調賦活パターンを示すかを問う場合も、言語機能ネットワークのみならず、DMN のテンプレートにマッチするパターンは特に注目される。

言語タスクベースの機能的連結性は、数分間ストーリーを聞くような[5]、脳内の反応変化があっても部分的・局所的なものとして相殺され、時間的大域に特徴的

な同調性の血流動態変化に帰着できるような実験デザインを前提とする。本実験は事象関連デザインを取っているため、本来は機能的連結性の観測には不向きな面も確かに存在する。しかし、各試行において刺激・タスクと休止が固定長に割り付けられ、ジッターリングを行っておらず、また言語刺激に関しては、選ばれた一定のアイテムにおいて、意味カテゴリーの配分が統制され、各セットにおいてランダムな順ではあるが厳密に同一であり、言語切替のタスクとしてセッション内においては変化が無い。そのため、タスクベースの機能的連結性[6-9]を計算するのに一定の条件を満足していると判断された。

2. 実験と分析

本研究のデータは既に[1]で扱ったものであるため、ここではその概略を再掲するととどめる。本実験の参加者である朝鮮族のバイリンガル話者は、第一母語が韓国語、第二母語が中国語である。よく知られているように、表音文字を用いる韓国語と表意文字を用いる中国語では、脳の賦活部位が異なり、前者は脳の吻側、後者は尾側に偏ると言う研究がある[10-11]。Leiらの実験では、言語切替時に母語間の翻訳を含むか否かという2つの条件で、実験日の異なる2つのfMRIセッションを通じ、言語切替の神経基盤を精査した。

実験参加者は韓国語-中国語の早期バイリンガル8名で、実験アイテムは中国語あるいは韓国語の単語の綴り計40語である。それらは意味的に哺乳類に関するアイテムが20個、手道具に関するアイテムが20個からなり、全アイテムが各々韓国語と中国語で書かれている。タスクは意味处理的な側面においては、声を出さずに、刺激の属性について連想するという共通している。各セッションでは、アイテムの順をランダムに変え、同一の刺激セットを6回繰り返し提示し、1日に計2時間程度を要した。

2つのセッションは、日を変えて行われ、内心のタスクにおける使用言語の選定のみが異なり、一方が「状況に即した翻訳なし言語切替」 situational non-translation language switching (SnT と略する)、他方が「集中的な同時翻訳つき言語切替」 focused simultaneous translation language switching (FST と略する)である。SnTセッションでは、刺激語と同一母語で対象の属性を考慮するので、言語切替はアイテムからアイテムに移る際の状況に応じて言語の変化という形で行われるが、FSTセッションでは、刺激語と異

なる母語で対象の属性を考慮するので、アイテムに関する意味処理内部で同時通訳という形の言語切替を行わねばならず、アイテム間とアイテム内の異なるタイプの言語切替を行うという二重の負荷がかかり難度が高い。

ただし、SnTセッションもFSTセッションも、スクリーンを通じて与えられる刺激セットそのものに違いはなく、各試行は3秒間、韓国語あるいは中国語で単語が提示され、固視点マークに切り替わり7秒続く計10秒である。各セットは計40試行で、1セッションにつき、6セットの反復があり、反復時間が1秒なので、task1セッションが計2400(=10*40*6)秒、になる。さらにLeiらの研究ではMVPAの計算のため、ベースラインの安静状態の脳反応を各セットの後に計6回40秒測定した。この安静状態restは機能的連結性を計算するには短い、反復時間1秒なので40時点が取れ、これらは独立したものとして扱われる。なお機能的連結性の計算にはSPM12上のConnectivity Toolbox (CONN v.18.a)とその脳地図(atlas.nii)を用いた。

3. 結果

本研究ではCONNを用い、タスクベースの機能的連結性を全セッションに亘って計算して、SnT条件とFST条件で連結重みに有意な差のある領域ペア(ROI-to-ROI)を求めた。機能的連結性は、voxelやROIから反応の時系列データを抽出し、その相関行列を計算した上で、さらに重み付き(あるいは無し)の隣接行列を求め、全脳に情報伝達ネットワークを張り巡らす方法である。なお、SnT>FSTはコントラストベクトル[-1 1]、FST>SnTは[1 -1]で計算し、実際にタスクを行った2400(=40*6 セット)秒間をtest、ベースラインの安静時240(=40*6 セット)秒間をrestで表した。TRが1秒なのでこの秒数はヴォリューム数に一致する。

結果として、表1・図1にあるように、test条件下で2つの領域間結線がFST条件とSnT条件の間で有意な差が見られ、しかも双方ともDMNと視覚関係のネットワークの間を差し渡すものであった。さらに連結強度は2つとも、「状況に即した翻訳なし言語切替」(SnT)の方が「集中的な同時翻訳つき言語切替」(FST)に比べて有意に大きかった(逆向きのコントラストはbeta値の符号が変わる)。すなわちDMNの重要なノードである後部帯状皮質と左外側視覚ネットワーク(MNI座標で-37, -79, 10)との間(p<0.01 FDR)、および

DMN 前頭前皮質(MNI 座標で 1, 55, -3)と右背側注意ネットワーク前頭眼野(MNI 座標で 30, -6, 64)である。

表 1. 両セッションの test 間で有意差のあった結線

subject effect	FST>SnT		
conditions	test		
seed/source(target)	target(seed/source)	beta	p-FDR
atlas.PC (Cingulate Gyrus, posterior division)	networks.Visual.Lateral (L) (-37,-79,10)	-0.24	0.0079
networks.DefaultMode.MPFC (1,55,-3)	networks.DorsalAttention.FEF (R) (30,-6,64)	-0.14	0.0201

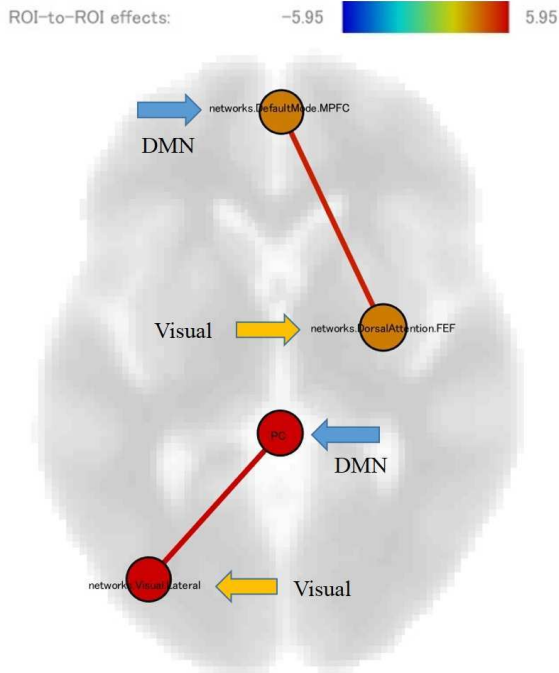


図 1 両セッションの test 間で有意差のあった結線 (SnT > FST)

さらに興味深いのは、test の各セット直後のベースライン安静時反応を 6 セットで計 240 ヴォリューム分記録し、これを rest とした場合、11 個の seeds において FST 条件と SnT 条件の間で有意な差が見られたことである。それらの多くは DMN、言語処理ネットワーク、背側注意ネットワーク、前頭頭頂ネットワークに関係していることがわかった(図 2, 3)。グラフで示したように、このセッション比較差分ネットワークにおいて左後上側頭回(pSTG l)が次数 5 でハブになっており、これはヴェルニッケ野とも重なり、DMN の重要なノードである左下頭頂(縁状回、角回)に連続してゆく。左後上側頭回(pSTG l)が seed のときは、必ず SnT > FST 条件であり(すべて寒色で表され)、FST > SnT 条件のときにこのノードを seed とする結線は出現しない。

同じく次数 5 の後帯状皮質(PC)も DMN の重要なノードであり、これも DMN や他の背側注意ネットワー

ク、前頭頭頂ネットワークのいくつかのノードと結線するが、これを seed とする有意な結線は、SnT > FST 条件下のものも、FST > SnT 条件下のものも存在する。興味深いことに、SnT > FST 条件で記録される有意な結線は、右半球の DMN および言語野右脳相同部を seed として、右半球内のみならず、左半球の DMN ないしタスク陽性ネットワークに差し渡されているのに対し、FST > SnT 条件で記録される有意な結線は、左半球内に限定して存在していることである。

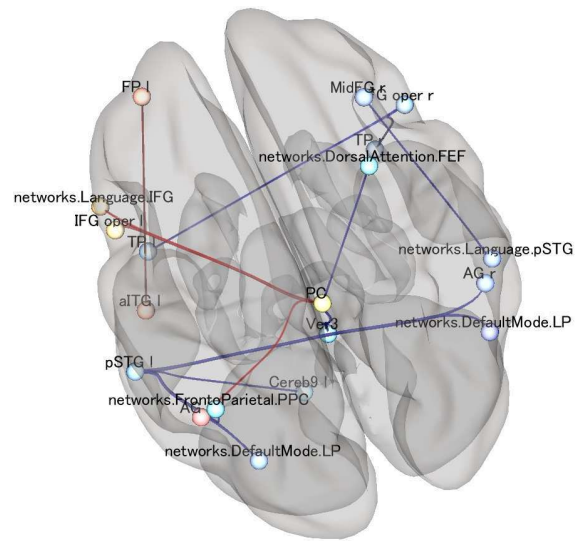


図 2 両セッションの rest 間で有意差のあった結線 (FST > SnT が暖色、SnT > FST が寒色で示される)

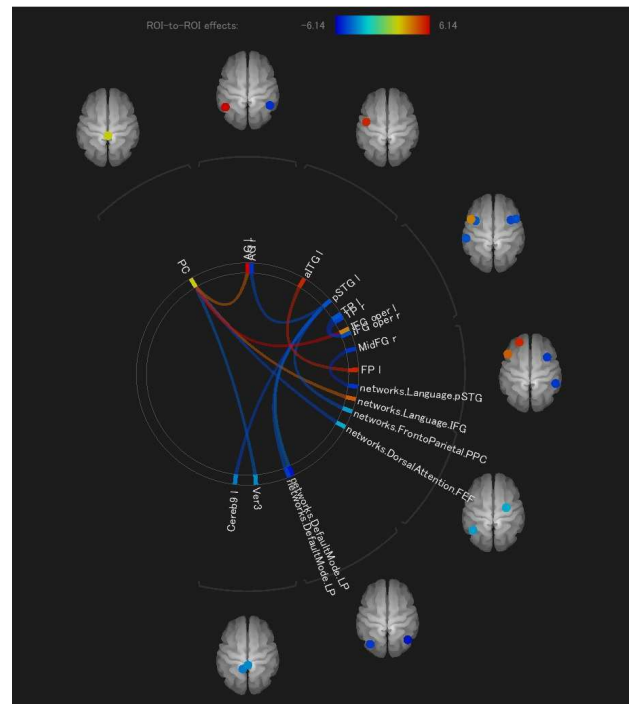


図 3 両セッションの rest 間で有意差のあった結線 (リンググラフ)

4. 考察

状況に即した自然な場面間での言語切替(SnT)の方が、瞬間的な翻訳を要求し翻訳の方向性をそのつど切り替えて負荷を課す難度の高い言語切替(FST)よりも、タスク陰性・陽性ネットワークの双方の部分的連携を際立たせ、しかも両側間で有意に強度の大きい結線を張り巡らしていることは注目に値する。しかも、実際のタスク時には有意な結線として、DMN と視覚ネットワークの協働が SnT 条件においてのみ、しかも 2 箇所でしか検出されなかったのに対し、タスクが終わった直後の小休止であるベースラインの安静時では、数多くの有意差のある結線が双方の条件から記録されている。

「自然な」言語切替タスクである(SnT)条件時に、背側 DMN にあって時間的配向性[12]を司る前頭前野(MPFC)が前頭葉の眼球運動中枢である前頭眼野(FEF)と同調して賦活するのは、この条件時にスクリーン上の単語の読みがスムーズに行われていることを意味する可能性がある。試行内で言語を瞬間的に切り替える FST 条件では綴字処理レベルで干渉が生じることも考えられる。ただ、test 時の SnT で FST に比べ後部帯状皮質(DMN)と左外側視覚ネットワークも強く連結していたことは、別の解釈の可能性も垣間見させる。このことはタスク陰性・陽性ネットワークの安静時連携が、バイリンガルにとって自然な流れの言語切替環境では生じるが、人工的にバイアスがかかり余分の緊張を強いる高難度の言語通訳環境では阻害されることを示唆しているかもしれない。

タスク(test)の余韻を引き摺ったセット間休憩にもなる安静時測定(rest)において、言語活動負荷の大きな FST が、古典的言語野である左下前頭回ブロカ野と同側の背側 DMN との間で連結を機能させているのは興味深い。しかし、さらに注目すべきは、SnT 条件の rest で、ブロカ野右相同部が対側の左側頭極に対し有意な結線をもつということである。このことは、脳内の言語処理における右脳の役割[13-16]を考慮する上で注目に値するとともに、Hub-and-Spoke 理論[17-18]で左側頭極が意味処理中枢と見做されていることも合わせて考慮すべきである。また同様に SnT 条件の rest では、ヴェルニッケ野右相同部に近い右角回など、DMN の右下頭頂小葉が、対側のヴェルニッケ野に近い左上側頭回と、両側に差し渡す有意な結線を形成している。この結果、バイリンガル話者の自然な状況下での言語切替

には、脳の両側に差し渡された言語野と、認知状態を考える上で重要な皮質領域の連携が深く関与している可能性が、本研究で垣間見られたと言える。

参考文献

- [1] Lei M, Akama H, Murphy B, (2014) Neural basis of language switching in the brain: fMRI evidence from Korean-Chinese early bilinguals. *Brain and language*, Elsevier, 2014, 138. doi:10.1016/j.bandl.2014.08.009
- [2] Hernandez AE, (2009) Language switching in the bilingual brain: What's next? *Brain and Language*, 109(2-3), 133-140
- [3] Chee MW, Soon CS, Lee HL, (2003) Common and segregated neuronal networks for different languages revealed using functional magnetic resonance adaptation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15, 85-97
- [4] Humphreys GF, Hoffman P, Visser M, Binney RJ, Lambon Ralph MA, (2015) Establishing task- and modality-dependent dissociations between the semantic and default mode networks, *PNAS* 112 (25) 7857-7862; <https://doi.org/10.1073/pnas.1422760112>
- [5] Castellazzi G, Bruno SD, Toosy AT, Casiraghi L, Palesi F, Savini G, D'Angelo E, Wheeler-Kingshott CAMG, (2018) Prominent Changes in Cerebro-Cerebellar Functional Connectivity During Continuous Cognitive Processing, *frontiers in Cellular Neuroscience*, <https://doi.org/10.3389/fncel.2018.00331>
- [6] Gonzalez-Castillo J, Bandettini PA, (2018) Task-based dynamic functional connectivity: Recent findings and open questions, *Neuroimage*. doi: 10.1016/j.neuroimage.2017.08.006
- [7] Eguiluz VM, Chialvo DR, Cecchi GA, Baliki M, Apkarian AV. (2005) Scale-free brain functional networks. *Phys. Rev. Lett.* 94, 018102.
- [8] Bassett DS, Meyer-Lindenberg A, Achard S, Duke T, Bullmore E, (2006) Adaptive reconfiguration of fractal small-world human brain functional networks. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 103, 19518-19523
- [9] Telesford QK, Morgan AR, Hayasaka S, Simpson SL, Barret W, Kraft RA, Mozolic JL, Laurienti, PJ (2010) Reproducibility of graph metrics in fMRI networks, *frontiers in Neuroinformatics*, doi: 10.3389/fninf.2010.00117
- [10] Tan LH, Liu HL, Perfetti CA, Spinks JA, Fox PT, Gao JH, (2001) The neural system underlying Chinese logograph reading. *NeuroImage*, 13, 826-846.
- [11] Yoon HW, Cho KD, Chung JY, Park H, (2005) Neural mechanisms of Korean word reading: A functional magnetic resonance imaging study. *Neuroscience letters*, 373(3), 206-211
- [12] Peer M, Salomon R, Goldberg I, Blanke O, and Arzy S, (2015) Brain system for mental orientation in space, time, and person, *PNAS* 112 (35); www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1504242112
- [13] Mitchell RLC, Crow TJ, (2005) Right hemisphere language functions and schizophrenia: the forgotten hemisphere? *Brain*, 128, 963-978
- [14] Lindell AK, (2006) In your right mind: right hemisphere contributions to language processing and production, *Neuropsychol Rev.* 2006 Sep;16(3):131-48

- [15] Taylor KI, Regard M, (2003) Language in the Right Cerebral Hemisphere: Contributions from Reading Studies *Physiology* Vol. 18, No. 6, <https://doi.org/10.1152/nips.01454.2003>
- [16] van Ettinger-Veenstra HM, Ragnehed M, Hällgren M, Karlsson T, Landtblom AM, Lundberg P, Engström M, (2009) Right-hemispheric brain activation correlates to language performance, *Neuroimage*, (49), 4, 3481-3488. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.10.041>
- [17] Patterson K, Nestor PJ, Rogers TT, (2007) Where do you know what you know? The representation of semantic knowledge in the human brain, *Nature Reviews Neuroscience* volume 8, pages 976–987
- [18] Lambon Ralph MA, Sage K, Jones RW, Mayberry EJ, (2010) Coherent concepts are computed in the anterior temporal lobes, *PNAS* 107 (6) 2717-2722; <https://doi.org/10.1073/pnas.0907307107>