

日本人英語習熟度中級者における単語翻訳時の脳活動パターンの解明

Elucidating Cortical Activation Patterns during Word Translation in Japanese Learners with Intermediate English Proficiency

22N3100016F 川井 和奏 (応用認知脳科学研究室)
Wakana KAWAI / Applied Cognitive Neuroscience Lab.

Key Words : second language proficiency, word translation, intermediate learners, fNIRS

1. 背景

(1) 翻訳の方向による単語翻訳時の脳活動の違い

Revised Hierarchical Model (RHM)¹⁾より、単語翻訳の方向性により、異なる認知処理が行われると説明されている。RHMは第一言語 (L1)、第二言語 (L2)、それぞれの心内辞書と、それに共通する概念から成る。それらは異なる強さのlinkで互いに結び付けられており、linkの強さは習熟度により変化し、その強さによって優先される翻訳ルートが定まる。L1からL2への翻訳は概念を通るルートが²⁾、L2はL1へでは直接向かうルートが優勢となることから、翻訳の非対称性を説明する³⁾。しかし、実際に単語翻訳をする実験パラダイムを用いてこれを検証した研究は少ない。さらにその中でも、翻訳の方向性によって、認知処理や賦活領域に違いがないとする研究⁴⁾も、異なるとする研究⁵⁾もあり、その結論は一貫していない。このような一貫としない結果が表れる要因としてL2習熟度の違い、使用単語の性質の違いや翻訳する2言語の性質の違いなどがあげられる。

(2) L2習熟度が認知過程に与える影響

RHMにおいて、習熟度が上昇すると翻訳の方向による非対称性が薄れるとされていて³⁾、L2習熟度は賦活パターンの違いに影響を与える主な要因と考えられている⁹⁾。多くの先行研究ではL2習熟度を2群以下で扱ってきた¹⁰⁾。しかし、その間程度のL2習熟度をもつ人もいるため、より細分化して扱う必要があげられる。特に中程度のL2習熟度をもつ人の単語翻訳時の脳活動の違いには比較的焦点が当てられてこず、また、中程度者を含む数少ない研究においても、一貫した結果は表れていない¹¹⁾¹²⁾。中程度のL2習熟度をもつ人の翻訳の方向による、単語翻訳時の脳神経基盤の違いを明らかにしていく必要がある。

(3) 単語の性質の違いが認知過程に与える影響

単語の認識や翻訳に単語頻度や単語親密度など課題で使用される単語の性質自体が認知過程に影響を与えることはよく知られている¹³⁾¹⁴⁾。また、L2習熟度の違いによっては、同じ頻度や親密度であっても異なる反応を示すことが明らかになっている¹⁵⁾。つまり、研究の対象となる人のL2習熟度によっては単語頻度や親密度の

高低により異なる認知処理が行われる可能性がある。

この頻度や親密度の違いは、一般的な認知処理における認知負荷の違いに相当すると考えられ、認知負荷の違いにより脳活動は異なるため、翻訳の方向による脳活動パターンの違いの有無の一貫性の無さや、賦活領域の違いを生む可能性があるといえる。

(4) 言語の違いが認知過程に与える影響

もう一つ翻訳の方向による賦活領域の違いを説明できる可能性のある要因の一つとして言語の違いが挙げられる。異なる書字をL1、L2とするものは同じ書字をL1、L2とするものと異なる認知処理を行う可能性が示されている¹⁶⁾。また、異なる書字同士であってもその書字の特徴によっても異なる処理が行われる可能性も示されている¹⁷⁾。先行研究では異なる言語同士の結果であるため、異なる賦活領域を示したかもしれない。先行研究同士の結果を適切に比較するためには言語の違いを考慮する必要があるといえる。

(5) 目的

これまでの先行研究から、単語翻訳時の脳活動パターンの翻訳の方向による違いに、L2習熟度、単語の親密度などの単語の性質、言語の違いが関わることが明らかになっている。しかし、参加者のL2習熟度、単語の性質、言語の性質は研究間で異なり比較は容易ではない。さらに、言語の違いについて異なる書字の使用時の認知処理に関する研究は少ない。単語翻訳時の翻訳の方向による脳活動パターンの違いを明らかにするために、これまで比較的焦点が当てられてこなかった、異なる書字を利用し、単語の性質を揃えた中程度習熟度者の脳活動パターンを見る必要がある。

そこで、本研究では日英中程度習熟度者の単語親密度と翻訳の方向による単語翻訳時の脳活動パターンを解明することを目的とした。単語翻訳時の脳活動をfNIRSを用いて測定した。

2. 方法

(1) 参加者

当初60名が計測に参加した。参加者は、英語習熟度の指標として、脳機能計測前後5週間以内に受験したTOEICの点数の提出が求められた。参加者の英語習熟度

はTOEIC470点から725点をもつ中程度に揃えられた。60名のうち、英語習熟度中級者は40名だった。さらに左利きの2名、L1が中国語の1名、計測中の体調不良の1名が除かれ、最終的な解析対象者は36名となった(平均年齢: 19.4±1.3歳, 男性: 11名, 女性: 25名, 平均TOEICスコア: 560.7±61.1, 最小スコア: 480, 最大スコア: 705)。

本研究で行ったfNIRS計測および関連する神経心理学テストは中央大学における研究倫理委員会の実施許可を受けている。実験開始前に、全参加者に対して実験概要の説明を行い、書面にて参加の同意を得た。ヘルシンキ宣言のガイドラインにしたがって実施された。

(2) 実験課題と実験デザイン

先行研究と同様の単語翻訳課題を用いた⁹⁾。単語翻訳課題には翻訳を行う課題ブロックと翻訳を行わないベースラインブロックがあった。課題ブロックには翻訳の方向性(英語から日本語/日本語から英語)と単語の親密度(高い/低い)の全部で4条件があった。課題ブロックは各条件につき5ブロックあり、全20の課題ブロックの前後にベースラインブロックがあった。

課題の刺激は全て名詞であり、親密度の最も高い91単語を親密度の高い単語(e.g. car), 親密度の最も低い91単語を親密度の低い単語(e.g. shareholder)として使用した^{18),19)}。他に147の単語をベースライン単語として選出した。

参加者はモニタ上に表示された単語を見て、キーボードでその翻訳語の綴りをタイピングで回答した。単語が表示されたのちに、回答が頭に浮かんだら、スペースキーを押すように指示した。そしてそののち、回答を行い、タイピングが終了したら、エンターキーを押すように指示した。もし回答が浮かばなかったら何も押さないように指示し、その場合は5秒後に自動的に次の試行へ移った。

課題はMatlab2020b(The Mathworks, Inc., Natick, MA, United States)上で動作するPsychtoolboxを用いて実施した。

(3) fNIRS計測

本研究ではfNIRSを用いて脳機能計測を行った。FNIRS計測にはETG-4000(日立メディコ, 日本)のCW-NIRS装置を使用し、52ch(レーザーダイオード送光器 $\lambda_{12}=695$ | 830 nm) 17個, 平均出力<4mW, アバランシェフォトダイオード検出器 16個)を10Hzでサンプリングした。修正ランベルトベール法²⁰⁾に基づき酸素化ヘモグロビン(HbO)と脱酸素化ヘモグロビン(HbR)をヘモグロビン濃度変化と光路長の積であるmM×mm単位で算出した²¹⁾。

プローブホルダは言語関連領域である前頭及び側頭領域を覆うように配置した。プローブの位置は国際10-20法に基づいて定められた²²⁾。3×11プローブホルダは、その中央に位置するプローブ(受光器26)がFpz上にあり、最も下段に位置するプローブがFpz, T3, T4を通る線に沿

うように配置された。

3Dデジタル(POLHEMUS, Patriot)を用いて計測地点の位置を計測した。確率的レジストレーション法を用いて、計測点をMNI標準脳座標系へ投影した²³⁾。各chの位置する脳の解剖学ラベルはBrodmann (Chris rorden's MRico)による脳地図を参照した²⁴⁾。

(4) fNIRSデータ解析

fNIRSデータはMatlab 2007bを用いて解析した。まず、得られた信号が20dB以下のchは計測不良として以降の解析から除外した。次にデータの5秒の移動平均を行った。さらにデータへのノイズの影響を考慮し、データに対してwavelet-MDL²⁵⁾を行い、canonical hemodynamic response (cHRF)関数を畳み込んで、時系列的平滑化を行った²⁶⁾。

前処理の後、General Linear Model (GLM)解析を行った。基底関数としてHRF関数と矩形関数を畳み込んだcHRFを用いた。HbRの解析についてはdeactivationを検出するため、cHRFを負にして解析を行った。

Adaptive GLMを行い、6sから25sの間で最適な τ_p を探索したうえで解析を行った²⁶⁾。最適な τ_p はともに20sだった。各課題条件における賦活の大きさの指標である β 値を以降の解析に用いた。

各条件について賦活した領域を求めるため、1標本検定(vs.0)を行った。探索的研究である点を踏まえ、type2エラーを防ぐため、効果量が中程度以上のchを賦活したchとして扱い、そのchを含む領域を以降の解析の関心領域とした。次に、課題条件による違いがあるか、関心領域について反復分散分析を行った。

(5) 行動データ解析

単語翻訳課題中の1試行内で、刺激が提示されてからスペースキーを押すまでの時間を反応時間とし、正答した時の全反応時間の平均を算出した。課題の回答は大文字小文字は不問とし、2文字以上のミスは不正答と扱い、正答率が算出された。IBM SPSS Statistics version28 (IBM)を用いて反応時間と正答率のそれぞれについて課題条件による違いがあるか、反復分散分析を行った。

3. 結果

(1) fNIRS結果

HbOについて、両側補足運動野、両側背外側前頭前野、前頭極、ウェルニッケ野、両側ブローカ野の全8領域が賦活した(図-1)。HbRについてはHbOに含まれる領域で賦活がみられた。これらの領域について反復分散分析を行った(表-1, 2)。交互作用の有意だった領域における交互作用の検定を行ったところ、英日翻訳時に低親密度の方が賦活が大きく($p < .05$)、高親密度単語翻訳時に日英翻訳の方が賦活が大きく($p < .05$)、いずれの領域でも同じ傾向がみられた。

(2) 行動データ結果

反応時間による反復分散分析の結果、単語親密度の主効果 $F(1,29) = 60.4, p < .001, \eta^2 = .68$ と翻訳の方向と単語親密度による交互作用 $F(1,29) = 8.00, p = .009, \eta^2 = .22$ が有意だった。それぞれについて交互作用の検定を行ったところ、いずれも同じ傾向がみられ、両方向の翻訳時に低親密度の方が反応時間が短く正答率が高く、高親密度単語翻訳時に日英翻訳の方が反応時間が短く正答率が高かった。

4. 考察

HbOでは前頭極や両側背外側前頭前野、ブローカ野、ウェルニッケ野など全部で8領域で賦活がみられた。前頭極、右背外側前頭前野、ブローカ野において、高親密度単語の翻訳時に日英翻訳で賦活が大きくなり、両側補足運動野や左背外側前頭前野、ウェルニッケ野では低親密度の単語の方が賦活が大きかった。また、左背外側前頭前野と右補足運動野では翻訳の方向により、日英翻訳の方が賦活が大きかった。HbRの結果はこの結

果をサポートするものであった。行動データの結果では高親密度単語でL2からL1の方が反応時間が速く、正答率が高かった。

単語の性質の違いが与える影響を検討すると、言語の切り替え²⁹や課題の保持²⁸などに利用される言語に特有の領域ではない領域と言語理解²⁹や意味処理³⁰など言語に特有の領域の両方で生じたことから、単語親密度による認知負荷の違いが生じていたといえる。中級者においては行動データや脳活動パターンから、高親密度条件で翻訳の方向による差がみられ、低親密度条件では見られなかったことから、高親密度条件が適切な負荷を与えられる課題であり、低親密度条件は負荷が高すぎたと考えられる。

言語の違いが認知過程に与える影響を検討すると、翻訳の方向に関しては、L1からL2翻訳の方でより大きな賦活が見られていた先行研究の結果¹²と似ていることから、中程度の習熟度であれば、言語の書字の違いが

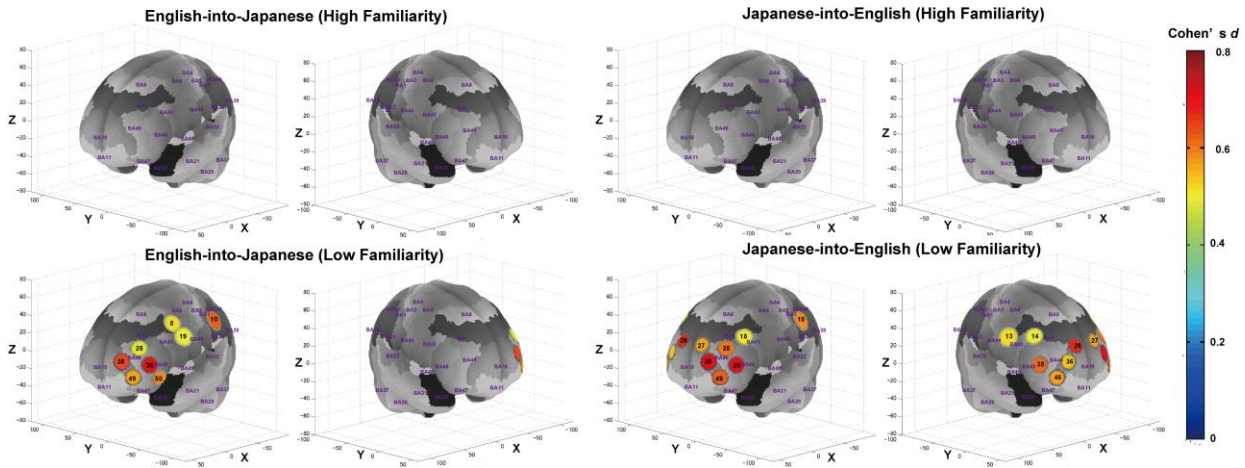


図-1 HbOでの各条件における賦活のみられたch位置

表-1 賦活の見られた領域における分散分析 (HbO)

BA	Effect	F	df	η^2
L-SMA (BA6) (ch8,19)	direction	2.09	1,33	.06
	familiarity	18.72 ***	1,33	.36
	direction x familiarity	2.30	1,33	.07
R-SMA (BA6) (ch13)	direction	6.72 *	1,26	.21
	familiarity	6.25 *	1,26	.19
	direction x familiarity	3.87	1,26	.13
L-DLPFC (BA9/46) (ch18,28)	direction	7.84 **	1,35	.18
	familiarity	19.60 ***	1,35	.36
	direction x familiarity	3.86	1,35	.10
R-DLPFC (BA9/46) (ch14)	direction	1.82	1,29	.06
	familiarity	9.98 **	1,29	.26
	direction x familiarity	4.88 *	1,29	.14
FPA (BA10) (ch26,27,38,46,49)	direction	4.02	1,35	.10
	familiarity	23.50 ***	1,35	.40
	direction x familiarity	4.50 *	1,35	.11
Wernicke's Area (BA40) (ch10)	direction	.25	1,34	.01
	familiarity	9.42 **	1,34	.22
	direction x familiarity	1.94	1,34	.05
Broca's Area (BA45) (ch39,49,50)	direction	4.06	1,34	.11
	familiarity	17.30 ***	1,34	.34
	direction x familiarity	6.95 *	1,34	.17
Mirror Broca (BA45) (ch35)	direction	12.13 **	1,32	.28
	familiarity	13.62 **	1,32	.30
	direction x familiarity	2.43	1,32	.07

表-2 賦活の見られた領域における分散分析 (HbR)

BA	Effect	F	df	η^2
L-DLPFC (BA9/46) (ch17,18,28)	direction	1.05	1,35	.03
	familiarity	4.33 *	1,35	.11
	direction x familiarity	1.20	1,35	.03
R-DLPFC (BA9/46) (ch25)	direction	1.70	1,34	.05
	familiarity	6.79 **	1,34	.17
	direction x familiarity	0.24	1,34	.01
FPA (BA10) (ch37,38,47,48)	direction	2.20	1,35	.06
	familiarity	10.61 **	1,35	.23
	direction x familiarity	7.39 *	1,35	.17
Wernicke's Area (BA40) (ch10)	direction	<.01	1,33	<.01
	familiarity	2.99	1,33	.08
	direction x familiarity	<.01	1,33	<.01
Broca's Area (BA45) (ch29)	direction	2.23	1,34	.06
	familiarity	2.13	1,34	.06
	direction x familiarity	3.04	1,34	.06

Notes. ***: $p < .001$, **: $p < .01$, *: $p < .05$. 補足運動野: SMA; 背外側前頭前野: DLPFC; 前頭極: FPA.

影響を及ぼさない可能性があげられる。一方で、翻訳の方向性により反応時間や正答率に違いが表れない研究もある¹¹⁾ため、まだ検証は必要である。

先行研究の結果と比較して、L2習熟度が認知過程に与える影響を検討すると、中級者にとっては高親密度単語が適切な難易度だったと考えられる。先行研究の高習熟度者では高習熟度者にとって適切な負荷である低親密度条件において前頭極や右背外側前頭前野、ブローカ野などで賦活がよくみられ、低習熟度者ではそれらの領域では賦活がみられなかった⁹⁾。つまり、中級者の単語翻訳時の脳活動パターンは英語高習熟度者と低習熟度者の間くらいだったことが示唆される。

最後にRHMの翻訳の非対称性の観点から検討すると、翻訳の方向による非対称性はL2学習者それぞれのL2習熟度に応じた適切な負荷がかかったときにのみ生じる可能性があげられる。簡単すぎるときはRHMの通り、両方向で概念を通らないルートを通り、難しすぎる時は両方向で概念を通るルートを通るかもしれない。

参考文献

- 1) Kroll, J. F. and Stewart E. : Category Interference in Translation and Picture Naming: Evidence for Asymmetric Connections Between Bilingual Memory Representations, *J. Mem. Lang.*, Vol.33, No.2, 1994.
- 2) Schwieter, J. and Sunderman, G. : Concept Selection and Developmental Effects in Bilingual Speech Production, *Lang. Learn.*, Vol.59, No.4, 2009.
- 3) Kroll, J. F., Hell, J. G. V., Tokowicz, N. and Green, D. W. : The Revised Hierarchical Model: A critical review and assessment, *Biling. Lang. Cogn.*, Vol.13, No.3, 2010.
- 4) Klein, D., Milner, B., Zatorre, R. J., Meyer, E. and Evans, A. C. : The neural substrates underlying word generation: a bilingual functional-imaging study, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, Vol.92, No.7, 1995.
- 5) Price, C. J., Green, D. W. and Von Studnitz, R. : A functional imaging study of translation and language switching, *Brain*, Vol.122, No.12, 1999.
- 6) Shinozuka, K., Nioka, K., Tokuda, T., Kyutoku, Y., Okuno, K., Takahashi, T. and Dan, I. : Language Familiarity and Proficiency Leads to Differential Cortical Processing During Translation Between Distantly Related Languages, *Front. Hum. Neurosci.*, Vol.15, 2021.
- 7) Christoffels, I. K., Ganushchak, L. and Koester, D. : Language conflict in translation: An ERP study of translation production, *J. Cogn. Psychol.*, Vol.25, No.5, 2013.
- 8) Jost, L. B., Radman, N., Buetler, K. A. and Annoni, J.-M. : Behavioral and electrophysiological signatures of word translation processes, *Neuropsychologia*, Vol.109, 2018.
- 9) Perani, D. and Abutalebi, J. : The neural basis of first and second language processing, *Curr. Opin. Neurobiol.*, Vol.15, No.2, 2005.
- 10) van Hell, J. G. and Tanner, D. : Second Language Proficiency and Cross-Language Lexical Activation, *Lang. Learn.*, Vol.62, No.2, 2012.
- 11) de Groot, A. M. B. and Poot, R. : Word Translation at Three Levels of Proficiency in a Second Language: The Ubiquitous Involvement of Conceptual Memory, *Lang. Learn.*, Vol.47, No.2, 1997.
- 12) Radman, N., Britz, J., Buetler, K., Weekes, B. S., Spierer, L. and Annoni, J.-M. : Dorsolateral Prefrontal Transcranial Direct Current Stimulation Modulates Language Processing but Does Not Facilitate Overt Second Language Word Production, *Front. Neurosci.*, Vol.12, 2018.
- 13) Connine, C. M., Mullennix, J., Shernoff, E. and Yelen, J. : Word Familiarity and Frequency in Visual and Auditory Word Recognition,
- 14) De Groot, A. M. : Determinants of word translation., *J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn.*, Vol.18, No.5, 1992.
- 15) Wolter, B. and Yamashita, J. : WORD FREQUENCY, COLLOCATIONAL FREQUENCY, L1 CONGRUENCY, AND PROFICIENCY IN L2 COLLOCATIONAL PROCESSING: WHAT ACCOUNTS FOR L2 PERFORMANCE?, *Stud. Second Lang. Acquis.*, Vol.40, No.2, 2018.
- 16) Sunderman, G. L. and Priya, K. : Translation recognition in highly proficient Hindi-English bilinguals: The influence of different scripts but connectable phonologies, *Lang. Cogn. Process.*, Vol.27, No.9, 2012.
- 17) Kim, S. Y., Qi, T., Feng, X., Ding, G., Liu, L. and Cao, F. : How does language distance between L1 and L2 affect the L2 brain network? An fMRI study of Korean-Chinese-English trilinguals, *NeuroImage*, Vol.129, 2016.
- 18) Amano, S. and Kondo, T. : Estimation of mental lexicon size with word familiarity database, *5th Int Conf Spok Lang Process ICSLP 1998*.
- 19) Yokokawa, H., Satoi, H., Shimamoto, T., Tanimura, M., Hirai, A. and Yabuuchi, S. : A Comparison of Differences between Auditory and Visual Presentations of English Word Familiarity Ratings among Japanese EFL Learners, *外国語教育メディア学会機関誌*, Vol.44, 2007.
- 20) Delpy, D. T., Cope, M., Zee, P. V. D., Arridge, S., Wray, S., and Wyatt, J. : Estimation of optical pathlength through tissue from direct time of flight measurement, *Phys. Med. Biol.*, Vol.33, No.12, 1988.
- 21) Maki, A., Yamashita, Y., Ito, Y., Watanabe, E., Mayanagi, Y. and Koizumi, H. : Spatial and temporal analysis of human motor activity using noninvasive NIR topography, *Med. Phys.*, Vol.22, No.12, 1995.
- 22) Jurcak, V., Tsuzuki, D. and Dan, I. : 10/20, 10/10, and 10/5 systems revisited: Their validity as relative head-surface-based positioning systems, *NeuroImage*, Vol.34, No.4, 2007.
- 23) Singh, A. K., Okamoto, M., Dan, H., Jurcak, V. and Dan, I. : Spatial registration of multichannel multi-subject fNIRS data to MNI space without MRI, *NeuroImage*, Vol.27, No.4, 2005.
- 24) Rorden, C. and Brett, M. : Stereotaxic Display of Brain Lesions, *Behav. Neurol.*, Vol.12, No.4, 2000.
- 25) Jang, K.-E., Tak, S., Jung, J., Jang, J., Jeong, Y. and Ye, Y. C. : Wavelet minimum description length detrending for near-infrared spectroscopy, *J. Biomed. Opt.*, Vol.14, No.3, 2009.
- 26) Uga, M., Dan, I., Sano, T., Dan, H. and Watanabe, E. : Optimizing the general linear model for functional near-infrared spectroscopy: an adaptive hemodynamic response function approach, *Neurophotonics*, Vol.1, No.1, 2014.
- 27) Hernandez, A. E. : Language switching in the bilingual brain: What's next?, *Brain Lang.*, Vol.109, No.2-3, 2009.
- 28) Koechlin, E. and Hyafil, A. : Anterior Prefrontal Function and the Limits of Human Decision-Making, *Science*, Vol.318, No.5850, 2007.
- 29) Ardila, A., Bernal, B. and Rosselli, M. : How Localized are Language Brain Areas? A Review of Brodmann Areas Involvement in Oral Language, *Arch. Clin. Neuropsychol.*, Vol.31, No.1, 2016.
- 30) Demb, J., Desmond, J., Wagner, A., Vaidya, C., Glover, G. and Gabrieli, J. : Semantic encoding and retrieval in the left inferior prefrontal cortex: a functional MRI study of task difficulty and process specificity, *J. Neurosci.*, Vol.15, No.9, 1995.