

D-1 意味処理を反映する事象関連電位 N400 にマスク下プライミングが与える影響

中島潤^{1,2}、太田真理³

¹九州大学大学院人文科学府、²日本学術振興会特別研究員、³九州大学大学院人文科学研究
院

3LT20205K@s.kyushu-u.ac.jp

要旨：複数形態素からなる語を読んだ際には、語の形態素への分割に続いて、各形態素の意味情報へのアクセス、意味情報の再結合という 2 段階の意味処理が起きる。神経言語学の研究では、これらの意味処理は N400 を生じさせ、N400 の振幅と形態素同士の対数推移確率 (LogTP) が相関することが知られている。しかし、先行研究では形態素数の違いを考慮しておらず、形態素数が意味処理に影響を与えるかどうかは明らかでなかった。本研究では、N400 を指標に、形態素数の異なる語がマスク下プライミングで受ける影響を比較した。線形混合効果モデルを用いて、形態素数や LogTP が N400 と相関を持つ時間窓とその推定値を検討した。その結果、形態素数が N400 と相関する時間窓は 2 つあり、その推定値の正負はプライミング効果により変化した。一方、LogTP では推定値はプライミング効果によらず負の値だった。以上の結果から、N400 と形態素数は意味処理の 2 段階で相関し、その相関は逆であることが明らかになった。また、形態素数と LogTP が N400 に与える影響の違いから、脳の意味処理には形態素数も関わることを明らかにした。

1. 背景

脳波や脳磁図を用いた研究では、単語を画面上に呈示してから、約 170 ms 後に形態素への分割を反映する脳活動 (N170/M170) が生じ、約 500 ms 後までに意味処理を反映する脳活動 (N400/M350) が生じることが報告されており、N400/M350 は以下の 2 つの意味処理を反映すると考えられている (Pykkänen & Marantz, 2003)。

①語の呈示後約 350 ms をピークに起きる形態素毎の語彙情報へのアクセス

②400 ms 以降に起きる形態素の意味情報の再結合

語幹から接辞への対数推移確率 (log transition probability: LogTP) にはこれらの意味処理を反映すると考えられている (Fruchter & Marantz, 2015, Neophytou et al., 2018)。しかし、先行研究では形態素数が意味処理に与える影響が明らかでなかった。

単語の視覚処理に関する研究では、マスク下プライミングという手法が利用される。これは視覚的マスク (“#”等の記号) に続いて、別の語 (プライム語) を短時間 (<50 ms) 呈示し、ターゲット語を呈示する手法である。この手法では、プライム語とターゲット語に形態的関連がある場合 (関連条件: 長い-長さ)、形態的関連が無い場合 (非関連条件: 細い-長さ) よりも反応時間が減少するプライミング効果が生じる。また、関連条件では側頭・頭頂・後頭の領域で N400 の振幅が小さくなることも知られている。これは、プライム語がターゲット語の意味処理に影響を与えるためだと考えられてきた。

マスク下プライミングが N400 に与える影響を検討した Nakajima & Ohta (2022) では、非関連条件では N400 と LogTP がターゲット語呈示後約 350 ms と、約 440-460 ms の 2 つの時間窓で有意な相関を示し側頭・頭頂・後頭の領域で N400 を減少させるが、関連条件では有意な区間がなくなり LogTP の N400 への寄与が小さくなることを報告した。

本研究は、マスク下プライミングを用いて、形態素数の違いが意味処理の 2 段階 (語彙アクセス・再結合) に与える影響を明らかにする。さらに先行研究で N400 との相関が報告されている LogTP と、N400 と形態素数の相関の比較を通して、これらが意味処理に与える影響の違いを示すことを目的とする。

2 脳波実験

2.1 実験参加者

実験には九州大学の 19 名の日本語母語話者 (男性 7 名, 年齢 23.4 ± 2.3 歳 [平均 \pm 標準偏差]) が参加した。実験参加者は、Edinburgh 利き手テストの結果、全員右利きであった (側化指数 88.7 ± 12.9 [平均 \pm 標準偏差]) (Oldfield 1971)。参加者の矯正視力も含む視力は正常であり、言語疾患及び精神疾患の罹患歴もなかった。本実験は九州大学大学院人文科学研究院の研究倫理審査委員会の承認を得て実施した。

2.2 実験刺激

実験刺激には、2 形態素から成る語 (2 形態素語: 長-い, 長-さ) 26 語と 3 形態素から成る語 (3 形態素語: 細-長-い, 細-長-さ) 26 語を用いた。各語の LogTP は接辞を「-さ」として、語幹 (長-, 細長-) に「-さ」が後続する確率を自然対数に変換して算出した¹。刺激語の語幹は、『現代日本語書き言葉均衡コーパス』 (BCCWJ) ver.1.0 の短単位語彙表から以下に該当する語を除外した上で、形容詞 (プライム語) の頻度順に選定した。

- i. 「-良い」、「-無い」など BCCWJ で「非自立可能」とされる形態素を含むもの
- ii. 有り難いなど、共時的に 3 形態素と捉えづらいもの
- iii. 望ましい、腹立たしいなど、子音語幹動詞から派生したもの

また、ターゲットの語末の「-い」、「-しい」をそれぞれ「-しい」、「-い」に置き換えた非単語 (e.g., *長い, *新しい) を刺激語と同数作成した。これらの非単語は全て BCCWJ 中の出現頻度が 0 であった。また、「可愛い」など慣用読みなどの表記はひらがなに改めた。2 形態素語と 3 形態素語の文字数は、3 形態素語の方が有意に長く、頻度も 3 形態素語の方が有意に小さかった (文字数: $p = .0005$; 頻度: $p = .0014$)。実験条件は、形態素数の違い (2 形態素・3 形態素) と、プライム語とターゲット語の関連の有無 (関連・非関連) の 2 要因に基づく 4 条件 (2 形態素・関連条件、2 形態素・非関連条件、3 形態素・関連条件、3 形態素・非関連条件) を設定した。

実験では、語彙判断課題を用いた。参加者は画面上に表示された文字列 (ターゲット語) が日本語の単語として適格かどうかを、ボタンを押して回答した。刺激呈示には、心理実

¹語幹に「-さ」が続く確率は 1 より小さいため LogTP は負の値を取る。

験用ソフトウェア PsychoPy 3.0.7 (Peirce, 2007) を利用した。刺激語及び記号のフォントはメイリオと Arial を利用した。実験では凝視点 (+) を 500 ms、空白を 500 ms、マスク (####) を 500 ms、プライム語を 48 ms、ターゲット語を参加者が回答するまで提示した (図 1)。回答から次の問題が開始されるまでの間、600-1200 ms のランダムな試行間間隔を設けた。また、参加者は実験開始前に、練習として本番と同様の語彙判断課題を 10 問行った。練習に使用した課題は本番で使用しなかった。

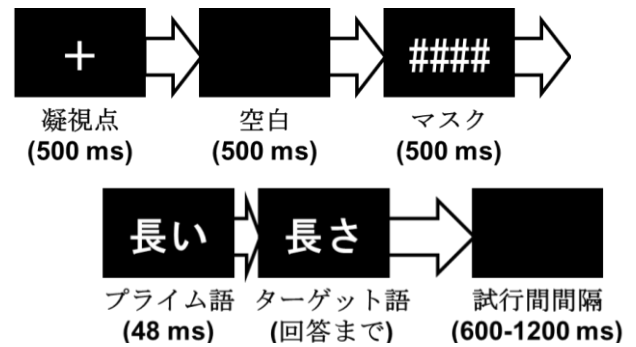


図 1 マスク下プライミングの刺激呈示

2.3 脳波の記録

脳波の記録には、EEG-1200 (日本光電) を使用し、Ag-AgCl 電極を拡張 10-20 法に基づき頭皮上の 64 ヶ所に設置した (図 2)。参照電極は FCz に設置し、両耳朶の電極で再参照した。参加者の眼球運動を記録するため、目の下部と左に電極を設置した。電極間の抵抗値は 45 k Ω 以下とし、サンプリング周波数は 1,000 Hz とした。

2.4 脳波の前処理

脳波の前処理には MNE-Python を利用した (Gramfort et al., 2013)。1-30 Hz の bandpass-filter をオフラインでかけ、独立成分分析により、眼球運動や心拍などのアーティファクトを除去した。脳波データはターゲット語呈示の -100 ms~600 ms までをエポック化し、-100~0 ms までをベースラインとした。エポック化したデータのうちピーク間の差が 80 μ V を超える試行はアーティファクトが混入していると考えられるため、解析から除外した。また、非単語の試行及び誤答も解析から除外した。

2.5 脳波の解析

本研究では N400 を扱った先行研究に従い、解析する時間窓はターゲット語呈示後 300-500 ms に設定した (Morris & Stockall, 2012)。電極の関心領域は Nakajima & Ohta (2022) に従い、図 2 のように区分した。N400 を解析する関心領域は、プライミングの主効果で有意であった、LT、C、RT および PO の 4 領域であった。この 4 領域に対して、各領域内の電極の電位を 1 ms 毎に平均し、更に 5 ms の区間で移動平均をとり電位の変化を平滑化した。この操作を参加者の各試行に対して行い、線形混合効果 (LME) モデルで分析した。

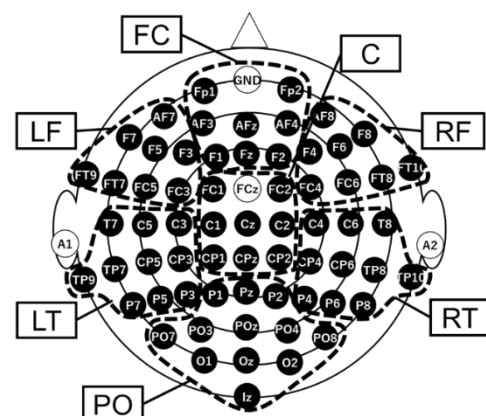


図 2 電極配置と関心領域

LF: 左前頭部, FC: 前頭中央部, RF: 右前頭部, LT: 左側頭部, C: 中央部, RT: 右側頭部, PO: 後頭頭頂部。

多重比較の補正のため、時間に対して 10,000 回のランダムな並べ替えを行い、補正後の p 値が 0.05 未満かつ 10 ms 以上連続したものを有意なクラスターとした (Maris & Oostenveld, 2007)。

解析では Gwilliams et al., (2016) に基づいた時間クラスター解析を行い、N400 の電位と形態素数が有意に相関する区間を LME モデルで算出した。モデリングには R の lme4 package (Bates et al., 2009) を利用した。また、N400 の電位は形態素数に加え、語幹と接尾辞の LogTP と文字列長で有意な相関がみられたため、LME モデルの推定には下記の式を利用した。

$$\text{N400 の電位 (1 ms 毎)} \sim \text{形態素数} + \text{LogTP} + \text{文字長}^2 + (1|\text{参加者})^3$$

3 結果

3.1 行動データ

正答率と反応時間に対して、形態素数 (2 形態素・3 形態素) * プライミング (関連・非関連) の 2 要因反復測定分散分析 (rANOVA) を行った。

4 条件の平均正答率はいずれも 80%以上であったため、実験参加者は正確に語彙判断課題を回答していた。rANOVA の結果、正答率では形態素数とプライミングの主効果は全ての領域で有意であった (形態素数: $p = .0031$; プライミング: $p = .0002$)。また、形態素数とプライミングの交互作用は有意傾向であった ($p = .0755$)。一方、反応時間では、形態素数とプライミングの主効果は全ての領域で有意であったが、交互作用は有意ではなかった (形態素数: $p < .0001$; プライミング: $p < .0001$; 交互作用: $p = .1666$)。3 形態素では正答率が有意に低下し、反応時間も有意に長かったため、3 形態素語は処理負荷が高いことが示された。加えて、関連条件では正答率は有意に高く、反応時間も有意に短かったため、形態素数に関わらずプライミング効果が生じたことも示された。

3.2 脳波データの推定値

まず、形態素数による約 350 ms 前後の N400 への影響を非関連・関連条件間で検討した (図 3 青線 vs. 赤線)。非関連条件 (青線) では約 350 ms 前後で LT、C および PO に共通してクラスターが見られたが (図 3 青枠)、関連条件 (赤線) ではクラスターは見られなかった。続いて、約 400 ms 以降の N400 への影響を非関連・関連条件間で検討した。非関連条件 (青線) では LT にのみクラスターが見られ、非関連条件では分析した全領域でクラスターが見られた (図 3 赤枠)。また、300-317 ms で PO にのみクラスターが見られた (図 3 赤枠)。非関連条件のクラスターの推定値は全て正の値であったため N400 の振幅が減少していたが、関連条件の推定値は全て負の値で N400 の振幅を増大させており、非関連・関連条件間で逆方向の影響が観察された。

² 固定効果のうち文字長は、今回の研究目的と異なり、またすべての時間窓で有意であったため予稿集内では報告しない。

³ 切片は分析対象の 4 領域全てで共通したものを式に利用した。

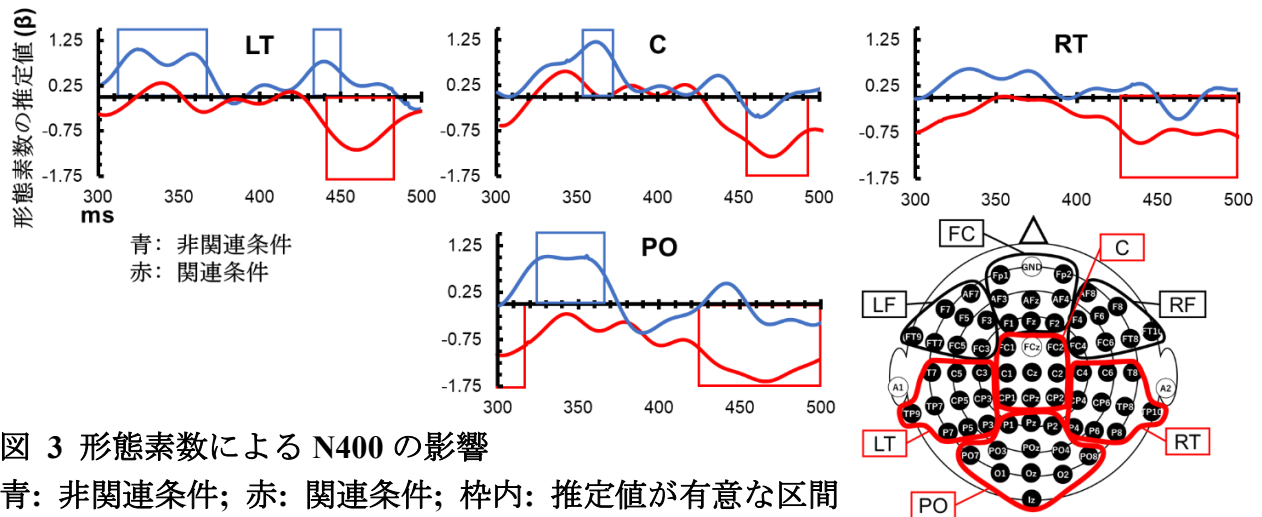


図 3 形態素数による N400 の影響

青: 非関連条件; 赤: 関連条件; 枠内: 推定値が有意な区間

形態素数は正の値をとるため、推定値が正の場合は N400 のピークは減少し、負の場合は増大する。

次に、LogTP による約 350 ms 前後の N400 への影響を非関連・関連条件間で検討した (図 4 青線 vs. 赤線)。非関連条件 (青線) では約 350 ms 前後で C、PO および RT に共通してクラスターが見られた (図 4 青枠)。関連条件 (赤線) では RT と PO にクラスターは見られたが、LT と C には、350 ms 前後の時間窓でのみクラスターが存在しなかった (図 4 赤枠)。続いて、約 400 ms 以降の N400 への影響を非関連・関連条件間で検討した。非関連条件 (青線) では分析した全領域でクラスターが見られた。非関連条件では LT、C、RT でクラスターが見られた (図 4 赤枠)。また、380-425 ms で PO にのみクラスターが見られた (図 4 赤枠)。非関連・関連条件のクラスターの推定値は全て負の値であったため N400 の振幅が減少しており、非関連・関連条件間で同一方向の影響が観察された。

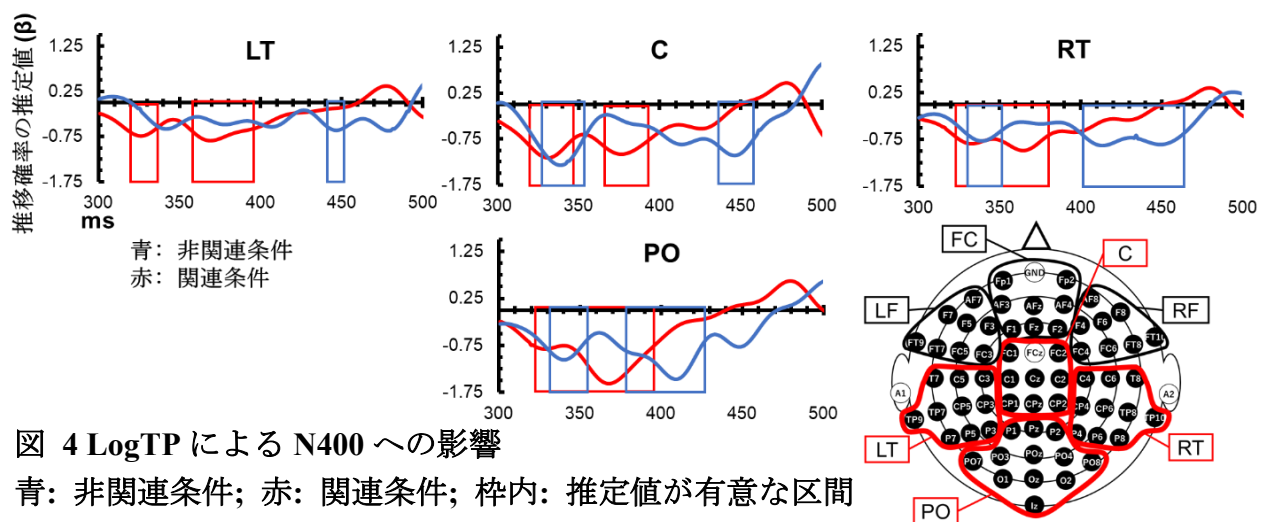


図 4 LogTP による N400 への影響

青: 非関連条件; 赤: 関連条件; 枠内: 推定値が有意な区間

LogTP は 0 以下の値を取るため、推定値が負の場合は N400 のピークは減少し、正の場合は増大する

4. 考察

本研究では N400 に着目して、語の形態素数が意味処理に与える影響をマスク下プライミングで検討した。行動データでは、語の形態素数に関わらずプライミング効果が生じることが示された。脳波データでは、形態素数が N400 に 2 段階で関連し、非関連・関連条件

が与える影響が逆方向であることが分かった。一方、LogTP は N400 と 2 段階で関連し、非関連・関連条件に与える影響が同一方向であることが分かった。以上の結果から、脳の意味処理には形態素数も関わるということが明らかになった。

正答率・反応時間に対して rANOVA を行なった結果、2 形態素語と 3 形態素語でプライミング効果が生じることが明らかになった。2 形態素語と 3 形態素語は、文字数や頻度に有意差があるため、これらがプライミング効果の原因である可能性がある。

脳波データでは、プライム条件間での N400 の振幅が形態素数から推定できるかを検討した。加えて、既に知られている LogTP と N400 の推定値との比較から、形態素数と LogTP が意味処理を反映する N400 をどのように変調するかを検討した。

形態素数の違いによる N400 への推定値は、プライム条件間で反対であり、非関連条件では正、関連条件では負の値をとった。これらは意味処理を反映する N400 が形態素数に対して、プライミングの有無でピークの増大と減少という逆の影響を受けることを示すものであった。約 350 ms の時間窓では、非関連条件でのみ RT を除く 3 領域に推定値が正の値である有意なクラスターが存在した。この結果は、非関連条件で形態素数が多ければ、N400 の振幅が減少することを示す。この時間窓は語彙アクセスの時間窓と一致するため、Fruchter & Marantz (2015) の脳磁図の研究で報告された左中側頭回の活動を反映することが示唆された。一方、約 440-460 ms の時間窓では、非関連条件の LT、関連条件の 4 領域全てでクラスターが存在し、条件間でクラスターの推定値の正負は反対であった。この結果は、形態素数が多ければ、N400 の振幅は非関連条件で減少、関連条件で増大することを示す。脳波の研究 (Lavric et al., 2007, Morris & Stockall, 2012) では、関連条件の 400 ms 以降側頭・頭頂・後頭の領域で N400 が減少することが報告されているが、本研究では新たに、同時間窓・同領域において形態素数に相関して N400 が増大することを示した。また、この時間窓は N400 と相同の M350 を対象とした脳磁図の研究 (Fruchter & Marantz, 2015, Neophytou et al., 2018) で報告された再結合のものと一致し、関連条件が再結合の脳活動を増大させることが示唆された。

LogTP による N400 への推定値は、プライム条件間で共に負の値であった。これらは N400 が LogTP に対して、プライミングに関わらずピークの減少という同一の影響を受けることを示すものであった。約 350 ms の時間窓では、非関連条件では C、RT および PO クラスターが存在した。関連条件ではより広い約 320-390 ms で RT と PO にクラスターが存在したが、LT と C では約 350 ms の時間窓にのみクラスターが存在しなかった。以上の結果は、プライミングにより約 350 ms で LT、C を中心に LogTP の語彙アクセス段階の影響が小さくなったことを示唆する。一方、約 440-460 ms の時間窓では、非関連条件の LT、C および PO にクラスターが存在し、関連条件ではどの領域でもクラスターは存在しなかった。この結果は、LogTP が小さければ N400 は非関連条件で減少するが、関連条件では LogTP の値は N400 への影響が小さくなることを示す。以上の結果は、関連条件のプライミングにより N400 が減少することを示し、LogTP が 2 段階のクラスターに分かれるというマスク下プライミングを利用した Nakajima & Ohta (2022) の先行研究を支持する結果である。

以上の結果から、形態素数は、意味処理を反映する N400 に 2 つの段階で逆の影響を与

えることが明らかになった。これらの結果は、先行研究で示されていた LogTP に加えて形態素数も語の意味処理に関わることを明らかにした。

謝辞

データの解析にご協力頂いた山田絵美氏に感謝いたします。本研究は科研費 JP19H01256, JP21K18560, JP17H06379, JP19H05589 (太田) 及び JP 22J11843 (中島) の助成を受けて行われたものです。

参考文献

- Bates, D., & Martin, M. 2009. lme4: Linear mixed-effects models using S4 classes [Software]. Available from <<http://CRAN.R-project.org/package=lme4>>
- Fruchter, J., & Marantz, A. 2015. Decomposition, lookup, and recombination: MEG evidence for the full decomposition model of complex visual word recognition. *Brain and Language* 143:81–96.
- Gramfort, A., Luessi, M., Larson, E., Engemann, D. A., Strohmeier, D., Brodbeck, C., Goj, R., Jas, M., Brooks, T., Parkkonen, L., & Hämäläinen, M. 2013. MEG and EEG data analysis with MNE-Python. *Frontiers in Neuroscience* 267:1-13.
- Gwilliams, L., Lewis, G., & Marantz, A. 2016. Functional characterisation of letter-specific responses in time, space and current polarity using magnetoencephalography. *NeuroImage* 132:320–333.
- Lavric, A., Clapp, A., & Rastle, K. 2007. ERP evidence of morphological analysis from orthography: A masked priming study. *Journal of Cognitive Neuroscience* 19:866–877.
- Morris, J., & Stockall, L. 2012. Early, equivalent ERP masked priming effects for regular and irregular morphology. *Brain and Language* 123:81–93.
- Maris, E., & Oostenveld, O. 2007. Nonparametric statistical testing of EEG- and MEG-data. *Journal of Neuroscience Methods* 164:177-190.
- National Institute for Japanese Language and Linguistics. 2018. The Balanced Corpus of Contemporary Written Japanese: Short unit word list ver.1.0 (BCCWJ).
- Nakajima, J., & Ohta, S. 2022. Decompositional similarities between semantically transparent and lexicalized nominal suffixation in Japanese: An ERP study. Masatoshi Koizumi (ed.) *Issues in Japanese Psycholinguistics: From Comparative Perspectives* (Mouton-NINJAL Library of Linguistics).
- Neophytou, K., Manouilidou, C., Stockall, L., & Marantz, A. 2018. Syntactic and semantic restrictions on morphological recomposition: MEG evidence from Greek. *Brain and Language* 183:11–20.
- Oldfield, R. C. 1971. The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9:97–113.
- Peirce, J. W. 2000. PsychoPy-Psychophysics software in Python. *Journal of Neuroscience Methods* 162. 8–13.
- Pylkkänen, L., & Marantz, A. 2003. Tracking the time course of word recognition with MEG. *Trends in cognitive sciences* 7:187–189.