

ERSP 解析を用いた英単語テストの正誤における脳波特徴の比較 Comparison of EEG Features Between Correct and Incorrect Responses in an English Vocabulary Test Using ERSP Analysis

大橋 竜之祐[†]
Ohashi Ryunosuke

土屋 誠司[‡]
Seiji Tsuchiya

渡部 広一[‡]
Hirokazu Watabe

1. はじめに

従来の筆記テストや口頭テストには、受験者の精神状態や環境の影響を受けやすいという課題があるため、学習過程をリアルタイムかつ客観的に評価する新たな指標が必要とされている。そこで、本研究は脳波 (EEG) に注目した。脳波は、脳の活動状態をリアルタイムで計測可能であり、注意力や集中力の変化を反映するため、学習や記憶に関連する変動を把握できる。

具体的には、英単語テスト中の α 波、 β 波、 θ 波、 β/α 比などの特定の周波数帯域を測定し、テストの正誤との関連を調べるため、脳波から機械学習モデルの SVM を用いて正解と不正解を脳波の ERSP を用いて比較、分類を行うことができるか調査する。本研究は、学習中の認知的変化を捉えることで、英単語学習の新たな評価手段の可能性を示すことを目的としている。

2. 脳波について

2.1. 脳波 (Electroencephalogram: EEG)

人間の脳を構成する神経細胞が発する微弱な電気信号を読み取り、波を形で表現したもの、あるいは電気信号そのものである。脳波は、脳の状態や活動に応じて異なる周波数帯域で変動し、これにより脳の活動状態や認知的な処理の過程を観察することが可能となる。脳波の周波数分類を表 1 に示す。

表 1 脳波の種類

名称	周波数帯域	雑音の原因
δ 波	1.00~4.00Hz	筋肉・心電
θ 波	4.00~8.00Hz	なし
α 波	8.00~13.00Hz	なし
β 波	13.00~30.00Hz	なし
γ 波	30.00Hz~	周辺の電子機器

2.2. 事象関連スペクトル変動 (ERSP)

刺激や課題に伴う脳波の周波数成分の変化である。特定の時間帯における周波数パワーの増加または減少を評価することで、脳の活動状態をより詳細に捉えることが可能である。

3. 関連技術

3.1. 短時間フーリエ変換 (STFT)

信号を時間ごとに分割し、各区間にフーリエ変換を適用することで、時間とともに変化する周波数成分を分析する手法である。

3.2. Wavelet 変換

信号を時間と周波数の両面から解析できる手法であり、短時間フーリエ変換よりも高い時間周波数分解能を持つ。特に非定常な脳波信号の解析に適しており、時間とともに変化する特定周波数帯のパワーを精度よく抽出できる。

3.3. SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique)

クラス不均衡に対処するためのデータ拡張手法であり、少数クラスのサンプルとその近傍との間に新たなサンプルを補間的に生成することで、データのバランスを改善する。これにより、学習時の偏りを抑え、分類性能の向上が期待される。

4. 関連研究

秋元頼孝らの関連研究^[4]では、英単語の難易度が脳波特性に及ぼす影響を検討し、簡単な単語と難しい単語を用いて被験者の脳波を測定した。この研究では、長岡技術科学大学の男子大学生および大学院生 10 名を対象に、難易度の異なる英単語の視認時における脳波の周波数変化を分析した。簡単な単語は語彙レベル 1 (1000 語相当)、難しい単語はレベル 6 (6000 語相当) から抽出された。英単語提示後の脳波データには事象関連スペクトル変動 (ERSP) 解析が用いられ、 θ 波、 α 波、 β 波の各帯域での変化が評価された。

4.1. 実験手法

脳波は EEG-9100 で記録され、19 箇所電極配置で 1000Hz のサンプリング周波数を使用した。データは EEGLAB を用いて前処理され、1Hz ハイパスフィルタや ASR 法でノイズを低減、単語提示前後のデータを抽出後、独立成分分析 (ICA) でノイズ成分を除去した。ERSP 解析では、時間周波数解析を用いて 3~40Hz の範囲で脳波変化を評価し、特に記憶や認知負荷に関連する θ 波 (3~6Hz)、 α 波 (8~12Hz)、 β 波 (13~30Hz) 帯域に着目した。

4.2. 実験結果と考察

簡単な単語では刺激後 500ms に θ 波のパワー増加が顕著であり、単語の意味の想起成功を示唆した。一方、難しい単語では β 波のパワー減少が刺激後 1000ms まで持続し、高い認知負荷を反映した。これらの結果は、脳波特性が英単語の難易度を反映し、 θ 波のパワー増加が記憶処理の活性化、 β 波のパワー減少が持続する認知負荷を示すことを明らかにしている。この研究は、脳波を用いた言語習熟度測定の有用性を示唆している。

5. 提案手法

本研究では、脳波データの特定の周波数における ERSP を用いて英単語テストの正誤を分類できるかを検証することを目的としている。単語テスト中の脳波データを周波数別に SVM に入力し、脳波の特定周波数が単語テストの正誤の分類に有効かどうかを明らかにする。

本研究では 3 名の被験者を用意し、以下の手順で英単語の学習と脳波測定を行う。

- 単語の準備
被験者に対し、難易度の異なるものを 80 個ずつの計 160 個用意
- 脳波測定とテスト
5 択の選択式の単語テストを行い、テスト中の脳波を測定する。
- 特徴量の抽出
STFT と wavelet 変換を用いて脳波データから周

[†] 同志社大学大学院理工学研究科

[‡] 同志社大学理工学部インテリジェント情報工学科

波数ごとの特徴量を抽出する。(本研究では ERSP を用いる)

4. SVM による分類
得られた特徴量を用いて脳波データを正誤に分類する。

5.1. 脳波測定

脳波測定は、図 1 のミュキ技研製の生体収録装置 Polymate Pocket (MaP8020) と ACT 生体電極を用いて実施する。また、本研究では電極は 10-20 法に基づき、図 2 の赤枠の部分測定する。サンプリング周波数は 1000Hz とする。

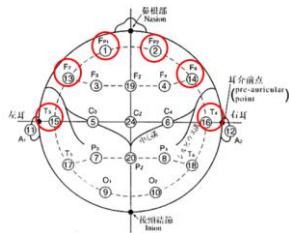


図 2 本研究の脳波測定に用いる電極配置図

図 1 生体収録装置

5.2. 脳波測定実験

英単語のテストと脳波測定は以下の流れで行う

1. 被験者の視点を固定するため、注視点を 1 秒間表示する。
2. 英単語テストを 5 秒間行い、注視点からテスト終了までの脳波を測定する。
3. 単語の提示後、2秒間の待機時間を設け、次の単語が表示する。

図 3 の赤枠部分の 6 秒間が測定区間である。

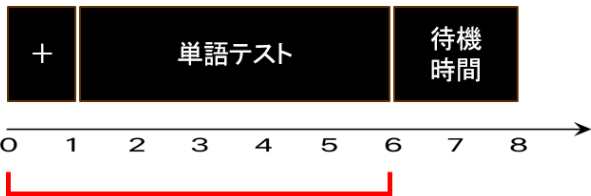


図 3 英単語表示のフローと測定区間

5.3. 脳波データの処理

単語テスト中の脳波データを、1 秒ごとに区切り、STFT または wavelet 変換を用いて周波数ごと(α波、β波、γ波、β/α 比)にパワースペクトルを求めた後、注視点の 1 秒間をベースラインとした ERSP を算出し特徴量とした。特徴量の数は

$$5(\text{区間}) \times 4(\text{周波数帯域}) = 20$$

であり、6 電極の平均を用いている。

また、正誤で脳波データの数に偏りが出てしまったため SMOTE を用いてオーバーサンプリングを行った。

5.4. 評価手法

本研究では、脳波データから抽出した周波数帯域のバンドパワーを特徴量とし、サポートベクタマシン (SVM) を用いて英単語の正誤を分類することで、モデルの識別性能を評価した。また、k 分割交差検証 (本研究では k=10) を行い、ランダムラベルと比較し、t 検定によって p 値を求め、有意差を検討した。また、どの特徴量が分類に有効か調べるため、周波数帯域ごとの特徴量 1 つずつでも分類を行った。

6. 評価

6.1. 評価結果

以下にすべての特徴量用いた際の、被験者 3 人の分類

結果 STFT と wavelet 変換でそれぞれ表 2、表 3 に示す

表 2 STFT を用いた際の分類精度と p 値

	被験者 1	被験者 2	被験者 3
分類精度	0.7065	0.6848	0.6615
P 値	0.0000	0.0000	0.0008

表 3 wavelet 変換を用いた際の分類精度と p 値

	被験者 1	被験者 2	被験者 3
分類精度	0.6010	0.6836	0.6925
P 値	0.0251	0.0002	0.0002

すべての分類精度がランダムより有意に高い結果が得られた。

また、SVM に α 波、β 波、θ 波、β/α 比それぞれ 1 つずつ入力した際の分類精度と p 値を被験者 1、被験者 2、被験者 3、の順に表 4、表 5、表 6 に示す。ただし、脳波の処理は STFT を用いたものである。

表 4 被験者 1 の周波数帯域ごとの分類精度と p 値

	α 波	β 波	θ 波	β/α 比
分類精度	0.6719	0.6206	0.7121	0.4997
P 値	0.0002	0.0007	0.0000	0.9736

表 5 被験者 2 の周波数帯域ごとの分類精度と p 値

	α 波	β 波	θ 波	β/α 比
分類精度	0.5636	0.6162	0.5912	0.5145
P 値	0.0166	0.0009	0.0096	0.5133

表 6 被験者 3 の周波数帯域ごとの分類精度と p 値

	α 波	β 波	θ 波	β/α 比
分類精度	0.6783	0.6464	0.6785	0.5130
P 値	0.0003	0.0009	0.0005	0.4060

被験者によって最も高い分類精度が得られたのは θ 波と β 波とばられたが、β/α 比以外はランダムより有意に高い分類精度を示した。

6.2. 考察

実験結果から、周波数帯域の特徴量による分類は全被験者でランダムより有意に高く、分類に用いる特徴量として有効だと考えられる。

また、脳波データから周波数成分の特徴量を抽出する際に用いた STFT と wavelet 変換について、2 つの手法間で t 検定を行ったところ、有意差がない、もしくは STFT の分類精度が高いという結果になった。これは、特徴量が 1 秒間の平均パワースペクトルであったため、wavelet 変換の周波数帯域に適した高い時間分解能が活かされなかったと考えられる。

脳波の周波数帯域ごとの分類結果では、α 波、β 波、θ 波でランダムより有意に高い分類精度が得られ、正誤の分類に有効な可能性が示唆された。β/α 比については単体では分類精度が低かったが、他の周波数帯域の特徴量と組み合わせることで分類精度が上がり、他の特徴量との相互作用によって有用になる可能性が考えられる。

7. おわりに

本研究では、英単語テスト中の脳波データから α 波、β 波、θ 波、β/α 比を抽出し、正誤の分類を行った。その結果、多くの帯域でランダムより有意に高い分類精度が得られ、特に θ 波や β 波が有効である可能性が示唆された。また、被験者間の差や分類精度には課題が残った。今後は被験者数の増加や wavelet の時間分解能を活かした特徴量、ERP などの記憶状態の分類に使えるような特徴量の活用により、分類モデルの精度向上を目指したい。

参考文献

[1] 秋元頼孝, 五十嵐翔琉, 富澤拓哉, 渡邊怜: “英単語の難易度の違いを反映する脳波の特徴”, 長岡技術科学大学, 長岡造形大学研究紀要, 2023.