

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：20103

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12610

研究課題名（和文）テキスト理解を測る脳波指標の開発

研究課題名（英文）Development of an electroencephalographic index measuring text comprehension

研究代表者

佐藤 直行（Sato, Naoyuki）

公立はこだて未来大学・システム情報科学部・教授

研究者番号：70312668

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、文章読解中の「理解の程度」を推定するための脳波解析技術を開発することである。期間を通して、実用的な観点で特に重要である頭部非拘束時の脳波計測・解析に着目し、アーチファクト混入に頑健と考えられる脳波進行波解析を検討した。また、同手法を、オンラインおよび対面講義受講中の頭皮脳波データに適用し、講義条件により脳波進行波の方向が有意に異なることを明らかにした。残念ながら理解度と関連した有意な脳波成分は見いだせなかったが、本研究で開発した解析技術は教育・学習の実環境脳波計測の基盤となりえる意味で重要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の脳波研究では視線・頭部固定条件が一般的だが、頭部固定条件では教育・学習の状況を阻害する懸念が強く、応用性の点で問題がある。そこで、本研究では、視線・頭部とも自由条件でアーチファクトに対して頑健と思われる、脳波進行波に関する解析手法を検討した。また、頭部自由条件でもオンラインと対面の講義での脳波進行波の方向の差異を検出することに成功した。同技術は、今後の実環境での脳波計測応用の点で重要な基盤となりえる。

研究成果の概要（英文）：This study was aimed to construct an electroencephalogram decoding method of “level of understanding” during text reading. We developed an analytical method for EEG propagation on the scalp surface, which is essential for the application of EEG measurements in the classroom setting. We applied the method to EEG data during online and face-to-face lectures and found significant difference of EEG propagating directions between the two conditions. Unfortunately, we did not find any significant EEG components related to the text understanding, while the proposed method is thought to produce the important basis of head-free EEG measurements in the classroom setting.

研究分野：計算論的神経科学

キーワード：脳情報処理 脳科学 認知科学 高次脳機能計測 ブレインマシンインターフェイス

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究代表者は、Subsequent memory パラダイムに自然言語処理の技術を導入し、40 分程度の読書経験 (随筆文) のうち、読後に再生できる文章部分 (文や段落) と脳波の関連を明らかにした (Sato & Mizuhara, 2018)。結果では、海馬近傍のみならず、顕在性回路やデフォルトモードネットワークのような大域機能脳回路の活動 (特に抑制的活動) 及び脳波シータの増大が読後の再生に関わることを示した。これは、読書経験のような複雑な認知過程に関して、「読解中に後で思い出せるかどうか」を脳波から予測できることを示し、教育や学習場面への応用が考えられた。しかし、記憶対象の再生だけでは、(理解せずに 40 分の読書内容を記憶できると思えないもの) 実験参加者が文章内容を「理解」しているのか、文字列を覚えているだけなのか、は明らかでなかった。記憶機能よりも複雑な認知過程が含まれるであろう「理解」と脳波の関係を実験的に明らかにすることは、応用的観点では不可欠と考えられた。

(2) 安価な携帯脳波計が市販されており、脳波信号の産業応用がしばしば議論されている。例えば、Dikker ら (2017; Curr Biol) は安価脳波計 (EMOTIV 社 EPOC) を用いて、講義中の生徒 12 名からのデータを計測し、脳波同期指標を用いてグループ学習の状態を定量化できることを示した。安価脳波計を用いて計測される信号は、実験用途脳波計のそれよりも S/N 比が悪いが、個人毎に長時間の計測を行うことや (例えば、講義時間 90 分 × 15 週) 大規模被験者を同時に計測することができれば (例えば、60 名規模) 科学的な検証にも十分耐えられるデータになると見込まれる。特に、近年のオンライン講義の浸透の状況を考えると、応用的な観点から、各学習者が脳波計測から有益な情報を得られる見込みを示すことが重要と考えられた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、文章読解中の読者のテキスト理解を推定するための脳波解析技術を開発することである。従来の Subsequent memory パラダイムを用いた脳計測研究では記憶の働きが網羅的に調べられており、本研究では再生テストに加えて理解を測るテストを導入することで、より複雑な処理過程である「理解」に関する脳活動を捉えようとする点に特徴がある。

3. 研究の方法

(1) 令和 3 年度は、頭部が非拘束の場合でもアーチファクトに影響を受けづらい脳波指標について検討を行った。脳科学応用の観点では、講義受講中の理解度を検討する場合には、まず、頭部や視線を自由にした条件での脳波計測が必要になる。しかし、伝統的な脳波計測では、視線移動に伴う眼電位や体動に伴う電極動揺関連のアーチファクトが混入すると想定されるため、頭部自由条件では計測が行われてこなかった。そこで、これらアーチファクト混入に対して頑健な脳波指標を検討した。特に、体動や眼電位などのアーチファクトは全電極に同時的に混入すると想定されるため、頭皮上の時空間パターンである脳波進行波に着目して検討を行った。検討方法として、コネクトームを用いた全脳神経回路を構築し、大域的な脳波進行波パターンがどのような性質をもつのかを計算機シミュレーションにより検討した。

(2) 令和 3 年度及び、令和 5 年度は、オンライン及び対面講義の理解に関わる脳波計測・解析を行った。頭部・視線自由条件で講義を受講中の脳波を計測し、脳波パワ及び脳波進行波と、講義形式の関連について検討を行った。講義後には理解度テストを実施した。

(3) 頭皮脳波による脳波進行波解析は空間解像度の点で不十分かもしれない、皮質脳波に現れる脳波進行波を解析することで、より詳細な脳機能ダイナミクスを検出できるかもしれないと考えた。そこで、令和 4 年度は、脳波進行波解析をより発展させる目的で、絵画呼称課題での意味処理の際の皮質脳波の脳波進行波パターンの解析を行った。

(4) 脳波進行波に基づく脳波指標の検討に加え、そもそも、頭部非拘束条件で混入するアーチファクトについては十分な報告がない。また、脳波進行波解析にとって十分なアーチファクト減弱手続きは明らかに必要不可欠である。そこで、脳波計測とともに、視線・頭部運動を計測し、両者のコレジストレーション法を用いて脳波解析の信頼性を高めるための解析手法を検討した。

4. 研究成果

(1) 全脳神経回路シミュレーションを行い、脳波進行波パターンの特性を調べた結果、脳波進行波は安定的な構造を持ち、いくつかの特徴があることが示された (Sato, 2022)。 (a) 頭頂部と前頭部に進行波の吸い込み部位があること (図 1)、 (b) 全体的なパターンは個別の部位の活動度の影響をほとんど受けず、大域的脳機能回路の構造との関連が強いこと、 (c) 進行波のパターンは階層的な構造を持ち、5cm 未満は脳機能回路内部の、5cm 以上は機能回路間の情報統合と関わりがあり得ること、を示した。進行波は特定のパターンを示しやすいものの、全体的な脳活動パターンの推移に伴い、進行波パターンが即時的に変化することが明らかになった。この結果は、

脳波進行波は、頭部自由条件でもアーチファクトに頑健な脳波指標であり、機能的な脳活動としても意義があることを示唆するものである。

(2) オンライン及び対面講義の理解に関わる脳波計測を行った (Iwasaki, Tominaga, Sato; NOLTA2023)。理解度については、両条件について有意な差は得られなかった。脳波パワーについては、両条件で差が見られなかったが、前頭部から後頭部への脳波進行波については、対面条件では波帯域 (9-13 Hz) で有意に大きく、オンライン条件では波帯域 (15-30 Hz) で有意に大きかった。後者については、安静時の脳波進行波パターンとの類似から、安静状態に近いことを示唆するものと思われた。一方、前者については、先行研究の知見も少なく、解釈が難しかった。

(3) 皮質脳波解析の結果として、 α -波帯域 (9 Hz 帯域) の脳波の空間位相パターンは課題時系列とはほぼ無関係にほぼ安定した空間位相差 (側頭極側が位相進み、頭頂・後頭部側が位相遅れ、神経回路シミュレーションの結果と合致) をもつことが示された (Sato et al., SfN 2022) (図2)。また、事象関連の空間位相差解析では、課題イベントが位相差に与える影響は少ないものの、位相の安定性 (ばらつき) には影響を与えうることが明らかになった。この結果は、頭皮脳波の進行波解析において、位相安定性の評価が重要である可能性を示唆する。

(4) 脳波と頭部運動のコレジストレーション法を用いた脳波解析では、脳波に混入するアーチファクトの大部分は眼電位もしくは視線運動関連のアーチファクトであり、頭部運動そのものに関するアーチファクトは極めて小さいことが明らかになった。ただし、眼球運動関連のアーチファクトに比べて、頭部運動関連のアーチファクトは個人差が大きく、一部の個人データでは問題が大きい場合もあった。このため、個人差を緩和するようなアーチファクト減弱処理が特に重要であることが示唆された。

これら一連の研究では、残念ながら、実用の観点で有益と思われた「理解の程度」を推定する技術を十分に確立することができなかった。一方、頭部非拘束において脳波信号を検出できる新しい基盤的な解析技術として、脳波進行波解析、脳波-頭部運動コレジストレーション法を開発した。これらの解析技術は教育・学習の実環境の脳波計測を実現するために必須の技術であり、今後の研究の重要な足掛かりとなると期待される。

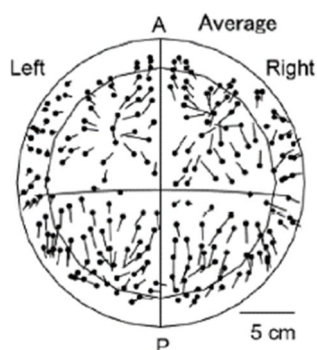


図1 全脳神経回路における脳波進行波パターン (Sato, 2022)

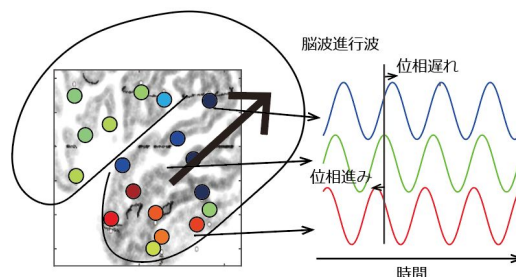


図2 言語処理中の皮質脳波進行波 (Sato et al., SfN 2022)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Naoyuki Sato	4. 巻 12
2. 論文標題 Cortical traveling waves reflect state-dependent hierarchical sequencing of local regions in the human connectome network	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-04169-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Naoyuki Sato, Riki Matsumoto, Akihiro Shimotake, Masao Matsuhashi, Mayumi Otani, Takayuki Kikuchi, Takeharu Kunieda, Hiroaki Mizuhara, Susumu Miyamoto, Ryosuke Takahashi, Akio Ikeda	4. 巻 31
2. 論文標題 Frequency-Dependent Cortical Interactions during Semantic Processing: An Electroencephalogram Cross-spectrum Analysis Using a Semantic Space Model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Cerebral Cortex	6. 最初と最後の頁 4329-4339
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/cercor/bhab089	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Naoyuki Sato, Riki Matsumoto, Akihiro Shimotake, Mayumi Otani, Takayuki Kikuchi, Takeharu Kunieda, Ryosuke Takahashi, Akio Ikeda
2. 発表標題 Phase advance of theta-alpha oscillation in anterior temporal lobe during semantic processing
3. 学会等名 Society for Neuroscience, 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本田司, 佐藤直行, 伊勢田元, 常岡優吾, 丘本道彦, 高橋祐樹, 徳村朋子, 伊藤翔, 瀧中南咲, 徐天舒
2. 発表標題 執務者の位置情報と生体情報の計測によるオフィス空間評価その5 都内本社オフィスビルにおける実測評価 - 座席別にみた緑視率とリラククス度の相関 -
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中山奈々, 佐藤直行
2. 発表標題 脳波計測を用いた屋外と屋内における有酸素運動のリラクゼーション効果の検討
3. 学会等名 情報処理学会第85回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤直行
2. 発表標題 皮質脳波進行波は大域脳回路のリアルタイム協調に寄与する：コネクトーム回路シミュレーション研究
3. 学会等名 第99回日本生理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kohei Iwasaki, Atsuko Tominaga, Naoyuki Sato
2. 発表標題 Electroencephalogram phase gradients reflect the differences in neural processing during online versus face-to-face learning
3. 学会等名 NOLTA2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naoyuki Sato
2. 発表標題 What decoding can tell us about language?
3. 学会等名 第53回日本臨床神経生理学会学術大会・第60回日本臨床神経生理学会技術講習会(招待講演)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	水原 啓暁 (Mizuhara Hiroaki) (30392137)	京都大学・情報学研究科・准教授 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------