

リハビリテーションにおける脳波バイオマーカーの応用
－様々なウェアラブル脳波計を用いた活用事例－

上野慶太（リハ 作業療法学 D3）

脳波（Electroencephalogram; EEG）は、脳の電気活動を非侵襲的に測定するための代表的な手法であり、てんかんや睡眠障害の診断、さらにはブレインコンピュータインターフェース（BCI）など多岐にわたる領域で広く応用されている。EEG は Hans Berger（1873-1941）によって 1924 年に初めて観測され、今年には 100 周年に当たる。以来、関連技術は長足の進歩を遂げ、現在ではデジタル脳波計が主流となり、従来よりも迅速かつ容易に脳波の記録・解析ができるようになっている。

脳波計測技術の進展とともに、脳波を指標とした研究は一層盛んになり、多様な応用が進む一方で、脳波測定には依然としてさまざまな準備作業や不快感が伴う問題が指摘されている¹。これらの課題に対する解決策として、ウェアラブル脳波計の開発が進められており、装着や測定の利便性向上が期待されている。さらにウェアラブル脳波計の登場により、これまで測定が困難であった状況下や多様な活動中においても脳波の記録が可能となり、脳波を活用する研究領域がさらに拡大している。本発表では、ウェアラブル脳波計の特性と応用、および今後の展望について検討する。

1. 従来の脳波計測の課題とウェアラブル脳波計の利点

従来の脳波計測における課題として、主に以下の 3 点が挙げられる¹。第一に、電極の位置計算および貼り付け、接触抵抗低減のための頭皮清拭などの準備作業が煩雑であり、測定開始までに時間を要する点である。第二に、導電性ゲルやペーストが頭皮および髪に付着し、被験者に不快感を与える点がある。第三に、複数の有線センサが頭部に接続されるため、被験者の動きが制限され、日常生活での測定が困難であるといった物理的な制約が生じる。

近年開発が進んでいるウェアラブル脳波計は、装着や計測が従来型よりも簡便であり、被験者への負担が軽減され、かつ実験室外での脳波計測も実現している。このため、従来困難であった環境下での測定や課題遂行中の測定が可能となり、脳波を用いた研究の幅が広がりつつある。

2. ウェアラブル脳波計の応用分野

ウェアラブル脳波計は、認知モニタリング、臨床状態の診断や治療支援、コミュニケーションエイドなど、広範な分野での応用が進んでいる²。それぞれの分野における具体的な応用について述べる。

・ 認知モニタリング

認知モニタリング分野においては、注意や感情の評価が重要な課題とされている。具体的には、情動の評価としての快・不快、作業や刺激に対する注意などがウェアラブル脳波計を通じて測定され、商業用デバイスやゲーム分野で広く活用されている。これにより、リアルタイムでの認知的・感情的反応の測定が可能となり、対象者の心理的状态の把握に寄与している。

・臨床状態の評価

臨床分野では、てんかん、認知症、加齢に伴う機能低下などが主な研究対象になっている。例えば、ウェアラブル脳波計が長時間の脳波測定に応用され、てんかん発作の観察に有用であると報告されている。また認知症の早期スクリーニングや進行評価などでの応用が進んでいる。特にウェアラブル脳波計による被検者の可動性向上により、日常生活下での脳波記録が実現し、疾患のモニタリングや診断支援における価値が高まっている。

・コミュニケーションエイド

コミュニケーションエイドの分野においては、BCI を利用したロボットや外骨格ロボットの制御、およびニューロフィードバックが注目されている。これらの技術は、コミュニケーション困難な患者に対する支援手段としても有効であり、リハビリテーションや VR ゲームを通じた認知的刺激の提供によって、対象者の QOL 向上に貢献している。

3. デバイスの信号品質と PGV 株式会社の HARU

現在、ウェアラブル脳波計の多くが装着の簡便性を重視してドライ電極を使用しているが、ドライ電極は皮膚への圧迫が必要であるため、痛みや不快感が生じやすく、ノイズレベルも高いとされる。これに対し、大阪大学産業科学研究所からスピンオフしたベンチャー企業である PGV 株式会社が開発した HARU は、べたつきのない半固形ゲル電極を使用し、不快感を軽減しつつ、ドライ電極と同様の装着の容易さと、臨床用の脳波計と同様の高い信号品質を両立している³。

HARU は医療機器認証を取得し、医療分野での利用が可能である。加えて、柔軟で伸縮性のある電極シートと小型化された本体、Bluetooth によるワイヤレス通信により、日常生活の中での計測が制限されることなく行える。こうした特性から、日常生活での脳波測定や認知モニタリングにおける新たな可能性を開いている。

4. 我々の研究グループにおけるウェアラブル脳波計を用いた研究成果

HARU の研究成果の一例として、開閉眼時の脳律動活動の比較が挙げられる。この研究において、HARU が視覚刺激に対する脳波反応を精確に捉えることが確認された⁴。また、注意集中状態で出現する前頭正中部シータ律動（Frontal midline theta rhythm : Fm θ ）の測定も行われ、集中状態と Fm θ の出現が一致することが示された⁵。Fm θ が確認された被験者においては、 θ 帯域と γ 帯域の活動が課題中に増強する傾向が見られ、HARU が前頭部脳波を高精度に捉えることを示す結果が得られた。この結果は、ウェアラブル脳波計を用いて測定される Fm θ が注意集中状態のバイオマーカーとして応用できる可能性を示唆している。

また我々の研究グループでは HARU の他に、イヤホン型脳波計を用いた研究にも取り組んでいる。まず、イヤホン型脳波計を用いた研究では、運動中における脳波の特徴的変動、特にミューリズムの変動を捉えることを目的としている。ミューリズムは運動や運動イメージに関連して現れる脳波の一種であり、その動態を把握することは運動機能の評価や神経リハビリテーションへの応用が期待される。

5. 今後の展望

今後は、HARUをはじめとしたウェアラブル脳波計を用いた脳波測定の実用範囲をさらに広げ、従来の脳波計では測定が困難であった環境や活動中での計測に取り組む。特に、HARUによる前頭部脳波測定を活用し、不安や抑うつに関連するバイオマーカーを抽出することで、作業療法や臨床支援の有用な指標となるかを検証する予定である。また、脳卒中患者の麻痺や高次脳機能障害に対するニューロフィードバック療法への応用も視野に入れ、介入効果の検討を進める計画である。

まとめ

ウェアラブル脳波計技術の発展は、脳波測定の利便性と精度を向上させ、従来の脳波計測に伴う課題を克服しつつある。一方で、信号品質の証明されていないウェアラブル脳波計を用いた研究や、正確な脳波信号を解析できているか不明である研究も多く存在し、脳波を用いた研究を行う際は基礎的な専門知識が非常に重要である。PGV 株式会社の HARU は、医療機器認証を得たことで、医療用途のみならず認知モニタリングやニューロフィードバックといった幅広い応用可能性を秘めている。今後も、ウェアラブル脳波計の信号品質を検証すると同時に、ニューロフィードバックの応用を進めることで、作業療法および臨床における有効な脳波指標としての実用化を実装していきたい。

引用文献

1. Mihajlovic, V., Grundlehner, B., Vullers, R., & Penders, J. (2015). Wearable, wireless EEG solutions in daily life applications: What are we missing? *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 19(1), 6–21.
2. Niso, G., Romero, E., Moreau, J. T., Araujo, A., & Krol, L. R. (2023). Wireless EEG: A survey of systems and studies. *NeuroImage*, 269, 119774.
3. PGV 株式会社. (n.d.). テクノロジー・デバイス. PGV 株式会社. Retrieved November 13, 2024, from <https://www.pgv.co.jp/technology-device>
4. 城間 千奈, 上野 慶太, 上田 将也, 森田 凜, 畑 真弘, 石井 良平, 内藤 泰男 (2023). シート型脳波計による α 波の測定と解析. *日本作業療法研究学会雑誌*, 26(1), 1–6.
5. Ueno, K., Ishii, R., Ueda, M., Yuri, T., Shiroma, C., Hata, M., & Naito, Y. (2023). Frontal midline theta rhythm and gamma activity measured by sheet-type wearable EEG device. *Frontiers in Human Neuroscience*, 17, 1145282.