

## 4-4 ウェアラブル脳波計が拓げる実生活での脳科学応用

### 4-4 *Applied Neuroscience Research in Real Life Environment by Wearable EEG System*

成瀬 康

NARUSE Yasushi

脳情報通信技術は、言語化が困難な情報を伝えたいと思ったときに伝えることができる究極の情報通信につながる技術であると考えられる。このような技術を実現するために、我々は、実生活でも脳活動計測を可能とするウェアラブル脳波計の開発を行い、これを用いて、病院や実験室以外の実生活に近い環境でも脳波計測が可能なポータブルな脳波実験系の構築を行っている。ここでは、実生活でも計測可能な脳情報を利用した研究として、ニューロフィードバックを用いた外国語リスニング学習及び脳波による外国語のリスニング能力推定法について紹介した後に、人が日常生活においてどのように感じているのかを調べる研究として、ゲーム中の脳活動計測について紹介する。

Brain information and communication technology (ICT) is considered to be the ultimate ICT that can be transmitted when one wants to convey information that is difficult to verbalize. In order to realize such a technology, we have developed a wearable EEG system that can measure brain activity even in real life environment and are constructing a portable EEG experimental system that can measure EEG even in an environment close to real life other than hospitals and laboratories. Here, we introduce foreign language listening learning using neurofeedback and a method of estimating foreign language listening ability by EEG, and then, we introduce the measurement of brain activity during the game.

#### 1 まえがき

人と人のコミュニケーションは主に言語を用いて行われるが、脳の中には感情や無意識等の言語化が困難な情報が数多く存在している。究極の情報通信はこのような言語化が困難な情報を伝えたいと思ったときに伝えることができることであると考えられるが、これを実現し得る一つの方法が脳情報通信であろう。我々は、このような脳情報通信技術の確立を目指して、実生活でも脳活動計測を可能とする研究を進めている。

現在、外科的手術なしに安全に人の脳活動を計測するための非侵襲脳機能計測法として、核磁気共鳴画像法や近赤外分光法、脳波計測法、脳磁界計測法などの手法が利用されている [1]。これら非侵襲脳機能計測法は、空間分解能、時間分解能、計測装置の大きさなどで、それぞれ一長一短があり、万能な計測手法はいまだ存在しない。例えば、核磁気共鳴画像法は、ミリメートルのオーダーの空間分解能で脳活動を計測することが可能である。しかしながら、神経活動はミリ秒

のオーダーで活動しているにも関わらず、核磁気共鳴画像法の時間分解能は秒のオーダーと低く、また装置が大型であることから参加者は動くことができないなどの短所がある [1]。それに対して、脳波計測法の空間分解能は、センチメートルのオーダーと低いが、時間分解能はミリ秒のオーダーと高く、また、装置は小型可が可能であるため、参加者は計測中に動くこともできる [1]。

様々な非侵襲脳機能計測法があり、各々でこれら計測装置の開発も進んでいる。この中で、脳波計測法に関しては、より小型に、そして、より簡易に計測できる計測装置の開発が盛んである。一般的に病院や実験室などで使われている脳波計測装置は、導電性のジェルを電極と頭皮との間に塗布し、電極と頭皮との間の接触インピーダンスを 10 kΩ 以下まで下げることで計測ノイズを軽減させる必要がある [2]。しかし、近年の脳波計測法の大きな発展として、脳波電極の中にアンブが搭載されたアクティブ電極が開発されたことで、接触インピーダンスがこれまでよりも一桁高い 300 kΩ

程度でも脳波が計測できることが示された[3]。これにより、病院や実験室以外でも脳波計測が可能なポータブルな脳波実験系の構築が可能となってきている[4]。このようなポータブルな脳波実験系を利用することで、上述した実生活環境下における言語化が困難な脳情報に関する研究を行うことができるようになった。

このような実験系を用いて、我々は様々な研究を進めている。ここでは、実生活でも計測可能な脳情報を利用した研究として、ニューロフィードバックを用いた外国語リスニング学習[5][6]及び脳波による外国語のリスニング能力推定法[7]について紹介する。また、人は、日常の実生活の中で、仕事や勉強にいそしみ、余暇を楽しんでいる。このような中で、人が日常生活においてどのように感じているのかを調べる研究として、ゲーム中の脳活動計測[8]について紹介する。

## 2 ニューロフィードバックを用いた外国語リスニング学習[5][6]

外国語を学ぶ際に、母国語には存在しない音を学習することは非常に難しい。例えば、日本人は英語の「L」と「R」の区別が難しいと言うことは有名であり、多くの日本人は「Light」と「Right」の違いを認識することができない。これまでの英単語のリスニングの学習は、聞いた音に対してどちらの音であるかテストを行い、それが正解か不正解かを学習者に伝えて学習を促す場合が多いが、このような学習では、時間がかかるという問題があった。しかし、「Light」と「Right」の音の違いが主観的に分からない日本人であっても、light, light, light, right, light, light, right・・・といった light の中に right がまれに現れる音列を聞いている時の脳波を測った場合、まれに現れる right を聞いたときにミスマッチ陰性電位 (Mismatch Negativity: MMN) という脳波が現れることが分かっている[9]。つまり、意識レベルでは音の違いが分かっていなくても、無意識レベルで脳がその違いに対して反応している。我々は、このミスマッチ陰性電位をニューロフィードバックによって「強化」することで、「Light」と「Right」の音の違いを意識レベルで認識できるようになるのではないかと考えた(図1)。

ニューロフィードバックとは、脳から脳活動パターンを取り出し、その情報を本人に伝えることで、その脳活動パターンを所望のパターンに近づけるための学習を可能とする技術である。本研究では、音の違いに対して反応する MMN を脳波から取り出し、その大きさを実験参加者にフィードバックすることで、MMN を大きくするというニューロフィードバックシステム

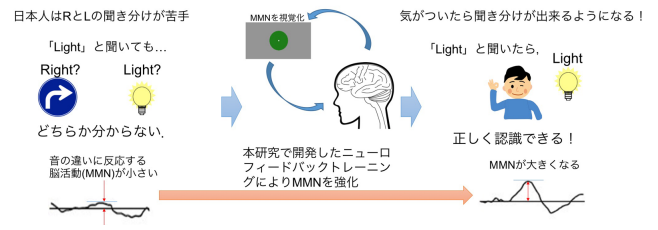


図1 ニューロフィードバックによる外国語リスニング学習



図2 ウェアラブル脳波計を用いたニューロフィードバックトレーニングの様子

を開発した(図2)。我々は、これまでにこのニューロフィードバックシステムを用いることで1,000 Hzと1,008 Hzというわずかに音の高さの異なる音を弁別できるようになることを示した[10]。

ニューロフィードバックトレーニングにおいて、実験参加者には脳波計を装着させ、イヤホンを通して light と right という英単語を聞かせた。light と right は、それぞれ4:1の比率でランダムに出現するように設定した。実験参加者には、ディスプレイを通して、その実験参加者のMMNの大きさに対応した緑の円を提示し、実験参加者には「音を流しますが、音を無視して、何を考えてもよいので、緑の円を大きくするようにしてください」という指示を与えた。このようにニューロフィードバックを行った実験参加者をニューロフィードバックグループと呼ぶ。これに対して、コントロールグループの実験参加者には、ニューロフィードバックグループの実験参加者と同様に、脳波計を装着させ、イヤホンを通して英単語を聞かせたが、目の前に設置されたディスプレイに提示される緑の円の大きさは、自分のMMNの大きさではなく、ニューロフィードバックグループの実験参加者のMMNの

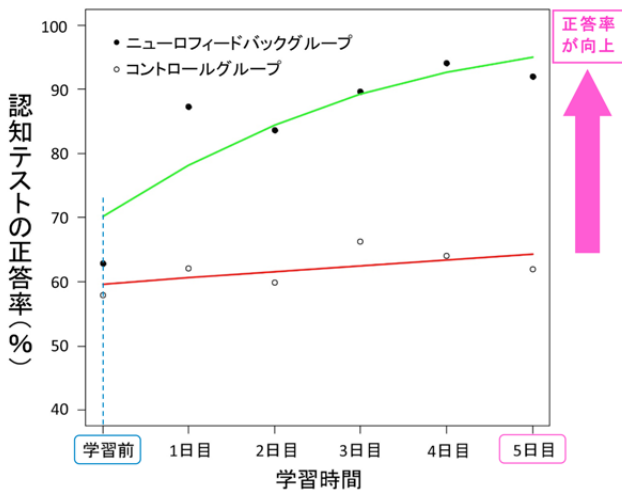


図3 ニューロフィードバックトレーニングによる「right」と「light」の音に対する学習の効果

データを用いて緑の円の大きさを変化させた。つまり、コントロールグループの実験参加者に与えられるフィードバックは自分のMMNの情報ではないため、自分のMMNを大きくするように努力しても大きくすることができない。なお、実験参加者は、自分がニューロフィードバックグループに所属しているか、または、コントロールグループに所属しているかについては知らされていなかった。

ニューロフィードバックグループ及びコントロールグループの実験参加者は、共に1日当たり1時間程度のトレーニングを行い、それぞれ合計5日間のトレーニングを行った。その結果、ニューロフィードバックグループの認知テスト（聞いた音がlightかrightかを答える）の結果は日々向上したのに対して、コントロールグループの結果は向上しなかった（図3）。コントロールグループの実験参加者もニューロフィードバックグループの実験参加者と同様に音を聞いているにもかかわらず、ニューロフィードバックグループの実験参加者のテスト結果のみが向上したということは、単に音を聞いているだけではなく、MMNを大きくするというニューロフィードバックが英単語の聞き分け能力を向上させるために重要であるということを意味している。

ここまでの研究でニューロフィードバックトレーニングによりlightとrightの聞き分け能力が向上することが分かったが、このトレーニングはこの一つの単語ペアに関して1日あたり約1時間、これを5日間実施するというものであり、非常に長いトレーニング時間を要することから、もっと短い学習期間で効果があるかを検証する必要があった。また、「light」と「right」以外の単語ペアでも学習効果が認められるか、さらに、学習効果が長期間継続するのかという点も検証する必

要があった。これらの点を検証すべく、短いトレーニング時間での学習の効果、他の単語ペアに関してのトレーニング効果、そして、長期間の効果の継続に関しての実験を行った。この検証実験において、lightとrightに追加してledとred、leadとreadの合計3単語ペアのニューロフィードバックトレーニングを行った。このニューロフィードバックトレーニングにおいては、それぞれの単語ペアに対して1日あたり約20分のトレーニング（3単語ペアで合計約1時間）を3日間行った。つまり、前回の研究では1単語ペアに対して1日1時間、計5日間の合計5時間程度のトレーニングであったのに対して、今回の検証では1単語ペアに対して1日20分、計3日間の合計1時間程度となっており、1単語ペアあたりのトレーニング時間が1/5になっている。結果として、複数の単語ペアに対して、この短いトレーニング時間でも学習効果が現れることが明らかとなった。さらに、2か月後にも認知テストを行ったところ、学習効果の減少は認められなかった。本研究は、実験室環境ではない、オフィスの一角にある会議室という実環境で行っているにもかかわらず、学習効果が得られており、本ニューロフィードバックトレーニングは実生活環境であっても利用できることを示している。

### 3 脳波によるリスニング能力推定法 [7]

英語の習得はグローバル化の時代においてますます重要になっている。英語リスニング力を測るためのテストはいくつかあるが、これらのテストは基本的に複数の選択肢から最も適切であると考えた答えを選択する。つまり、評価をするために、受験者は回答を行う必要がある。しかし、これまでの脳波の研究成果を応用することで、英語を聞いているときの脳波からリスニング力を推定できる可能性がある。例えば、意味処理に関連することが知られているN400と呼ばれる脳波成分は英語の習熟度が下がると現れるまでの時間が長くなるということが知られている[11]。しかし、これまでの脳波と習熟に関する研究は一単語ずつ提示するなど、自然な文章とはかけ離れたものであった。

そこで、本研究では、multivariate Temporal Response Function (mTRF)[12]と呼ばれる手法を利用して、自然な文章の音読を聞いているときの255人分の脳波データからN400など言語処理に関連する脳波成分の抽出を試みた。mTRFとは、様々なラベルに対しての脳波成分を分離するものであり、本研究では文章中の各単語に対して、品詞や発話速度、文章中の単語の位置などのラベルをつけ、それぞれに対して脳波成分の分離を行った。また、脳波実験後に英語のリスニング



## 4 ゲーム中の脳活動計測 [8]

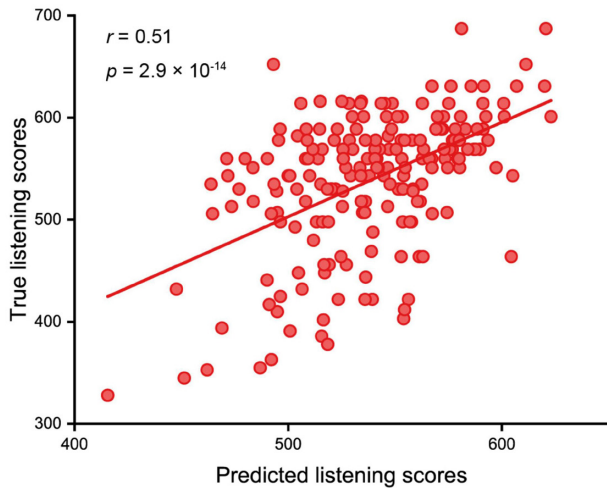


図4 脳波から推定されたリスニングスコアと実際のリスニングスコアとの関係 [7]

テストを行い、その人のリスニングスコアも計測した。

その結果、N400に相当するmTRFにより得られた脳波成分がリスニングスコアに従って出現するタイミングが遅くなるなど、これまでに得られた知見に一致するような結果が得られた。さらに、mTRFにより得られた脳波成分の中の17個の成分がリスニングスコアと有意に相関した。そして、この17個の成分からLeast Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO) と呼ばれる機械学習モデルを用いてリスニングスコアを推定したところピアソン相関係数は0.51 ( $p = 2.9 \times 10^{-14}$ ) となり、統計的に高い有意性を持って脳波データからリスニングスコアを推定することに成功した(図4)。

この結果から、受験者がテストに対して回答しなくても、英語を聞いているときの脳波データからその人のリスニングスコアを推定できる可能性が示唆された。また、mTRFを用いることで、品詞や発話速度、文章中の単語の位置などのラベルごとの脳波成分を抽出することができる。これまでの通常のテストでは、回答結果が間違いだった場合、リスニングの過程のどのような脳内処理で間違えたのか、原因を明らかにすることは難しかったが、本研究成果を利用することで、例えば、名詞は聞き取れているが動詞の認識が悪いなど、どのような原因でリスニングができていないかなどを明らかにすることができる可能性がある。これまでのテストは評価で終わっていたが、本研究成果を利用して原因を明らかにすることができれば、次にどのような学習を重点的に行えば良いか分かることから、英語力の向上につなげる評価法として、これまでの通常のテストにない価値を提供することができる可能性がある。

日常の実生活の中で、空いた時間にゲームをやるという人は数多くいる。このようにユーザは自ら進んで自発的にプレイするという特徴性から、モチベーションに関する研究の題材としてゲームは適していると考えられる。また、ゲーム中には様々なイベントが発生することから、イベントに対する脳波である Event-Related Potential (ERP) の取得も可能である。本研究では市販されている対戦型野球ゲームを用いて実験を行った。

本研究において技術的に重要な点は、対戦している2人の脳波及びゲーム中のイベントをミリ秒のオーダーで同期させることである。脳波計測法の時間分解能はミリ秒のオーダーであるため、脳波データはゲームイベントとミリ秒のオーダーで同期させる必要がある。それ故、多くの研究では、脳波計測を有線ケーブルで接続してデータ間の同期をとることが一般的であったが、有線ケーブルの接続は、参加者の動きを制約するため、普段のようにゲームを楽しむことができない。そこで、我々は、GPS信号が受信可能な脳波計を開発し、GPS信号から時刻情報を取り出し、この時刻情報を用いて各脳波データ及びイベント情報に対してタイムスタンプを押せるようにした。このタイムスタンプを通して、脳波データ及びイベント情報をミリ秒以上の精度で同期させた。

実験は、野球ゲームを二名で対戦しているときの脳波を、GPS信号を受信可能なウェアラブル脳波計を用いて計測した。そして、野球ゲーム中にバッターが空振りストライク、ボール、見逃しストライクと判定されたときの脳反応に注目をした。その結果、バッターが空振りをしたときにERPの一種である Error-Related Negativity (ERN) と呼ばれる脳波が強く観測された。このような実験系を用いることで、身体的な制約もなく通常に生活をしているときであっても脳活動を計測できるということを示すことができた研究成果である。

そして、このERNは、常に同じように出るわけではなく、試合展開が緊迫しているなかで、やや負けている状態で強く見られ、勝ち始めると小さくなることを明らかにした(図5)。野球ゲームにおいて、やや負けているときの空振りが一番悔しいということは、直感的にも理解できるが、そのことを脳活動からも示すことができた。つまり、このようにゲームにおけるモチベーションに関連する脳活動の計測に成功しており、実生活中的脳活動の一端の可視化にも成功したと言える。この後、研究を進展させ、Virtual Reality中の脳活動計測にも成功している [13]。

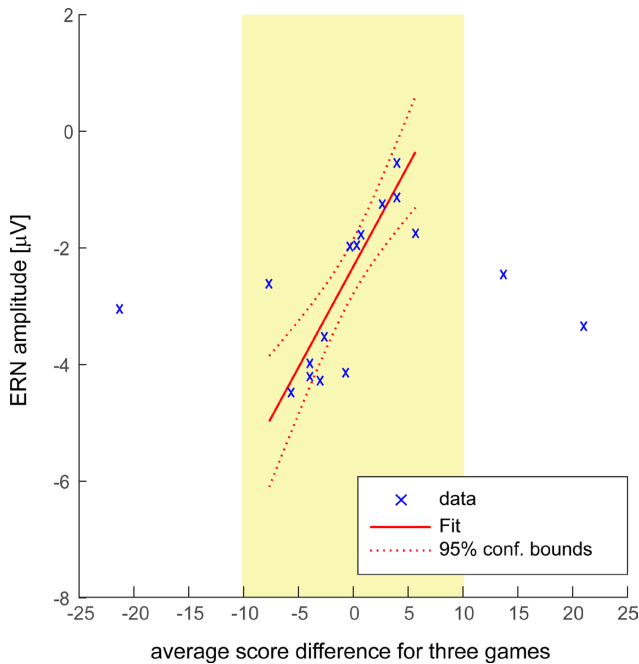


図5 得点と空振りストライク時のERNの振幅との関係 [8]

## 5 まとめと将来の展望

このように、我々は、脳波計測法を発展させ、より小型に、そして、より簡易に計測できるポータブルな脳波実験を開発し、これを用いた研究を進めてきた。これにより、実生活環境下で様々な脳情報の取得が可能であることを示すことに成功した。今後も実生活下での脳情報の取得に関する研究を進め、伝えたくても伝えられなかった情報を伝えることができる脳情報通信技術の確立を目指して研究を進めていく予定である。

### 【参考文献】

- 1 宮内 哲, “脳を測る 一改訂 ヒトの脳機能の非侵襲的測定”, 心理学評論, vol.56, no.3, pp.414-454, 2013.
- 2 入戸 野宏, “理学のための事象関連電位ガイドブック”, 北大路書房, 2005.
- 3 Higashi, Y., Yokota, Y., and Naruse, Y., “Signal correlation between wet and original dry electrodes in electroencephalogram according to the contact impedance of dry electrodes,” Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc., pp.1062-1065, 2017.
- 4 成瀬 康, 横田 悠右, “ウェアラブル脳波計によるポータブルな脳波実験系の構築,” 日本神経回路学会誌, vol.23, no. 3, pp.104-111, 2016.
- 5 Chang, M., Iizuka, H., Kashioka, H., Naruse, Y., Furukawa, M., Ando, H., and Maeda, T., “Unconscious improvement in foreign language learning using mismatch negativity neurofeedback: A preliminary study,” PLOS ONE, vol.12, no.6, e0178694, 2017.
- 6 Chang, M., Ando, H., Maeda, T., and Naruse, Y., “Behavioral effect of mismatch negativity neurofeedback on foreign language learning,” PLOS ONE, vol.16, no.7, e0254771, 2021.
- 7 Ihara, A.S., Matsumoto, A., Ojima, S., Katayama, J., Nakamura, K., Yokota, Y., Watanabe, H., and Naruse, Y., “Prediction of second language proficiency based on electroencephalographic signals measured while listening to natural speech,” Frontiers in Human Neuroscience, vol.15, 665809, 2021.
- 8 Yusuke Yokota, Takahiro Soshi, and Yasushi Naruse, “Error-related negativity predicts failure in competitive dual-player video games,” PLOS ONE, vol.14, no.2, e0212483, 2019.
- 9 Sachiko Koyama, Reiko Akahane-Yamada, Atsuko Gunji, Rieko Kubo,

Timothy P.L Roberts, Hirooki Yabe, and Ryusuke Kakigi, “Cortical evidence of the perceptual backward masking effect on /l/ and /r/ sounds from a following vowel in Japanese speakers,” NeuroImage, vol.18, no.4, pp.962-974, 2003.

- 10 Chang, M., Iizuka, H., Naruse, Y., Ando, H., and Maeda, T., “Unconscious learning of auditory discrimination using mismatch negativity (MMN) neurofeedback,” Scientific Reports 4, 6729, 2014.
- 11 Ojima, S., Nakata, H., and Kakigi, R., “An ERP study of second language learning after childhood: effects of proficiency,” J. Cogn. Neurosci., vol.17, pp.1212-1228, 2005.
- 12 Crosse, M. J., Di Liberto, G. M., Bednar, A., and Lalor, E. C., “The multivariate temporal response function (mTRF) toolbox: a MATLAB toolbox for relating neural signals to continuous stimuli,” Frontiers in Human Neuroscience., vol.10, 604, 2016.
- 13 Yusuke Yokota, Yasushi Naruse, “Temporal fluctuation of mood in gaming task modulates feedback-negativity: EEG study with virtual reality,” Frontiers in Human Neuroscience., vol.15, 536288, 2021.



成瀬 康 (なるせ やすし)

未来 ICT 研究所  
脳情報通信融合研究センター  
脳機能解析研究室  
室長  
博士 (科学)  
脳機能計測  
【受賞歴】

- 2011年 IEEE Computational Intelligence Society Japan Chapter, Young Researcher Award
- 2010年 計測自動制御学会生体・生理工学部会研究奨励賞
- 2007年 第22回日本生体磁気学会大会 研究奨励賞