

6-2 ウェアラブル脳波計の開発とその利用に関する研究

6-2 Development of Wearable EEG and Research on its Application

成瀬 康 井原 綾 常 明 松本 敦

Yasushi NARUSE, Aya S. IHARA, Chang MING, and Atsushi MATSUMOTO

NICT では脳情報技術の幅広い分野での応用を目指して、実環境下で誰でも簡単に脳波を計測できるウェアラブル脳波計の開発に成功し、現在、計測した脳波を活用するためのアプリケーションの開発を進めている。本稿では、簡易型ウェアラブル脳波計の基盤技術と、脳波を利用した教育(外国語学習) ICT の研究開発の概要について述べる。

NICT developed a wearable electroencephalograph system with which anyone can easily measure brain waves under actual environment in order to apply the brain information technology in a wide range of fields. Now, we are studying on its practical application to utilize the measured brain waves. In this paper, we introduce our techniques of the wearable electroencephalograph system and our researches to establish an ICT for education (foreign language learning) using brain waves.

1 まえがき

近年、脳科学は医療福祉、ビジネス、教育、娯楽など、幅広い分野での応用が期待されている。脳情報技術が活用されるためには、様々な環境において、誰でも簡単に、かつ高精度に脳情報を抽出できるハードウェアが必要不可欠である。脳活動を空間的に詳細に調べることができる MRI は神経科学の基礎研究をはじめ、最近ではニューロマーケティングなどの社会応用を目指した研究にも使用されているが、装置が大型で病院や研究機関などの限られた施設でしか利用できず、専門家でなければ計測が難しいという制約がある。それに対して、脳波は小型で比較的簡単に測ることができるというメリットがある。とはいえ、てんかんや睡眠障害の検査などの臨床用途や、大学や研究機関などで研究用途に用いられている脳波計は、実環境で使うにはサイズが大きく、また、導電性ペーストやジェルを頭につけなければ計測できず、一般の人が利用するにはユーザビリティが低いという問題点があった(ペーストやジェルを利用した脳波計は専門家でなければ装着が難しく、取り外した後に洗髪が必要となるため被験者に負担がかかる)。そこで我々は誰でも簡単に脳波を計測できるウェアラブル脳波計の開発に取り組み、実用化するに至った。本稿ではまず、その基盤となる高性能のドライ電極チップの開発、ウェアラブルを実現するための脳波計測部の小型化、誰の頭にもフィットするヘッドギアの開発について紹介する[1][2]。簡易型ウェアラブル脳波計の開発により、脳波

計測を社会実装するためのハードウェア的な基盤は整ったが、一般の人に活用していただくには脳波を利用したアプリケーションも必要である。本稿では、脳波の外国語学習への活用を目指した研究開発についても紹介する。

2 誰でも簡単に脳波が測れるウェアラブル脳波計の開発と実用化

従来型の脳波電極では導電性のペーストやジェルを使わない場合、接触インピーダンスが電極間で大きく異なりノイズの要因となる。このノイズは電極の中に入っているアンプの入力インピーダンスを十分に大きくするという手法で軽減することが可能である。近年では、入力インピーダンスが数ギガ~数十ギガオームと大きな脳波電極が市販されており、導電性のペーストやジェルが不要であることからドライ電極と呼ばれている。我々は、市販のドライ電極に対して 300 ギガオームというはるかに高い入力インピーダンスをもち、さらに、頭髪を避けてフレキシブルに頭皮に接触する構造を有するドライ電極チップの開発を行った。一般的な脳波電極は直径 1 cm 程度の円形をしており、これをそのまま頭髪の上に置いても頭皮と十分に接触させることができない。そこで、1つの電極に対して複数本のスプリングを設け、それぞれの先端に直径 1 mm の小さな Ag 球(頭皮との接触部分)を付けることで、頭髪の間を縫って頭皮に接触するドライ電極チップを開発した(図 1、特許第 6112534 号)。

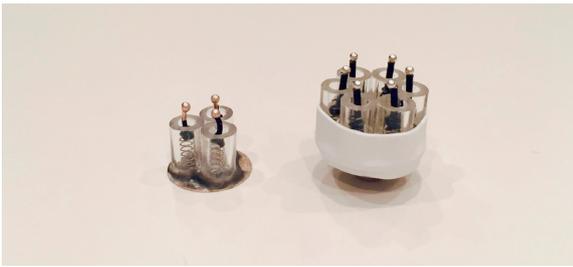


図1 開発したドライ電極チップ。頭皮との接触点が3カ所あるもの(左)と6カ所あるもの(右)。

頭にかぶるだけで計測できるウェアラブル脳波計を実現するべく、高性能なドライ電極の開発に続いて、脳波計測部の小型化を行い、8 cm × 5 cm のサイズ、スマートフォンの半分程度の 80 g の重さを実現した(図2)。脳波計測部は8チャンネルで、計測用パソコンに Bluetooth で信号を送る。次に、脳波計測の簡易化のために、脳波電極を装着する帽子のようなヘッドギアを開発した。頭の形は人それぞれ異なっているため、一般的に利用されている脳波電極キャップでは頭にフィットさせるのは難しい。そこで、脳波電極を柔らかいフレキシブル電極シートに装着し、この電極シートを頭に沿わせることで電極を頭に接触させつつ、フレキシブル電極シートの両端を比較的堅い外殻で保持するというハンモック構造を採用し、フィット性の高いヘッドギアを開発した(図3、特開 2015-221144)。



図2 開発した小型の脳波計の計測部(左)とこれを基にして製品化された脳波計の計測部(右)。計測部に電極をつなぎ、その電極を頭に付着させる。信号は Bluetooth より計測 PC に送られる。

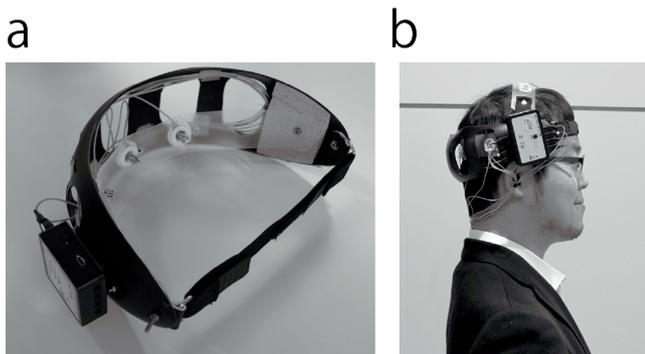


図3 開発したヘッドギア (a) とヘッドギアを装着した様子 (b)。ヘッドギアには小型の脳波計測部と電極が装着されている。

このように、フレキシブルで高性能なドライ電極チップの開発、ウェアラブルを実現するための脳波計測部の小型化、誰の頭にもフィットするヘッドギアの開発により、我々は実環境下で誰でも簡単に脳波を測ることができるウェアラブル脳波計を実現した。その技術は国内企業へ移転し、簡易型ウェアラブル脳波計は既に製品化されて大学や企業で広く使用されている。

3 脳波計測の外国語学習への応用

近年グローバル化が進み、外国語によるコミュニケーション力の強化が社会的に求められている。このような社会背景において、外国語教育の質的向上は重要な課題である。教育分野では最近、個人の能力や習熟度に最適化した学習法を提供するアダプティブラーニングが注目されている。我々は、外国語教育におけるアダプティブラーニングの実現のために、脳波を利用した外国語の習熟度評価法とリスニングのトレーニング法の開発を進めている。

3.1 脳波を用いた外国語習熟度の評価法の研究

従来、外国語の習熟度の評価は、ペーパーテストに代表されるように問題に対して回答するという手法しかなく、正解か不正解かでしか評価できない。例えば、外国語が聞き取れない場合、具体的に何が聞き取れていないのか、どこで理解が滞っているかということの評価することはできず、聞いている本人ですら自己認識することは難しい。このように従来型の評価法には限界がある。そこで我々は、脳波計測により、従来型のテストでは反映されない外国語に対する脳の応答をとらえ、新しい習熟度評価法を確立するための研究開発を進めている。外国語の問題に対して回答するのではなく、ただ外国語を聞いたり読んだりするときの脳波で評価できれば、課題を遂行すること自体に難しさを伴う子どもでも正確に習熟度を把握することが可能となる。

初めに、日本語母語話者 44 名を対象として、脳波を利用した英語の語彙力評価法の研究を行った。語彙力評価の指標には事象関連電位の 1 つである N400 を用いた。N400 は意味処理を反映する脳波成分であり、先行する刺激との意味的関連性に応じて振幅が変化する [3]。例えば、2 つの単語を連続的に呈示するプライミングパラダイムでは、後続の単語が先行する単語と意味的に無関連な場合、関連がある場合と比べて振幅は増大する。我々の実験では、被験者に物や状況、動作を表す 1 枚の画像をディスプレイ上に呈示し、その直後にその画像を表す英単語(一致条件)もしくは無関連(不一致条件)の英単語を音声で呈示し、音声に

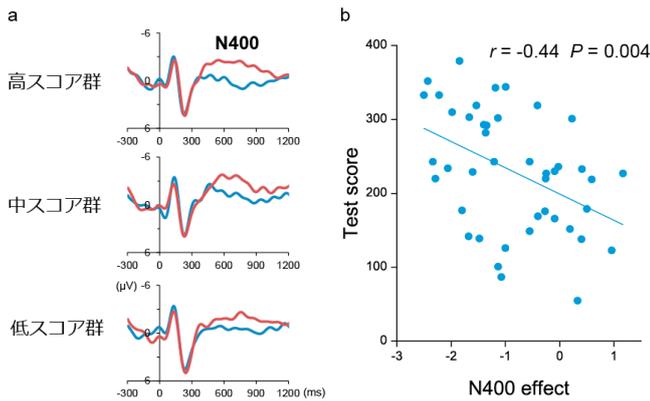


図4 英単語の習熟度を反映する脳波成分 (N400)。(a) 簡単な英単語を聞いているときの N400。青線は先行する画像と一致する英単語を聞いているとき (一致条件)。赤線は先行する画像と無関連の英単語を聞いているとき (不一致条件)。習熟度によって N400 の文脈効果 (不一致条件と一致条件の振幅差) の大きさが異なる (b) N400 の文脈効果 (不一致条件と一致条件の振幅差) とテストスコアは有意な相関を示す。

対する脳波 (N400) を計測した。図 4 (a) は “pencil”, “reading” など基礎的な英単語に対する N400 である。英単語に対する主観的な認知率には差がないにもかかわらず、N400 の文脈効果 (不一致条件と一致条件の N400 振幅の差分) は低スコア群、中スコア群と比べて、高スコア群が大きく、出現も早かった。さらに、N400 効果とテストスコアには有意な相関があった (図 4 b)。これらの結果から、主観ではとらえられない外国語の語彙の習熟度を N400 を指標として定量評価できることを示した。

次に、脳波を利用して英語音声の聞き取りに関して、音素レベル、単語レベルで詳細に評価するための基盤研究を行った。まず、高スコア群 30 名と低スコア群 30 名を対象に中学生レベルの英語のリスニング問題 (英検 3 級) の音声を読んでいるときの脳波を計測した。英語音声は音声分析と言語分析を行い、エンベロープ、音素オンセット、単語オンセット、文章オンセット、会話オンセットに対するモデルを構築し、そのモデルを使って、脳波を重回帰分析することにより各要素に対する脳波応答 (Time response function: TRF) を算出した [4]。

英語の母語話者を対象とした先行研究では、類似する音素ではその脳波応答も類似性を示し、音素の種類によってクラスター化することが報告されている [5]。そこで我々は、各音素に対する脳波応答を用いて全ての音素間で相関分析を行い、各音素間で脳波応答がどれくらい似ているかを定量評価し、習熟度との関連性について検討した。図 5 は、子音の音素に関して得られた相関マトリックスを多次元尺度構成法 (MDS) を用いて 2 次元空間上にプロットしたものである。高スコア群では破裂音や摩擦音など子音の種類に応じてクラスター化されているが、低スコア群ではこのような

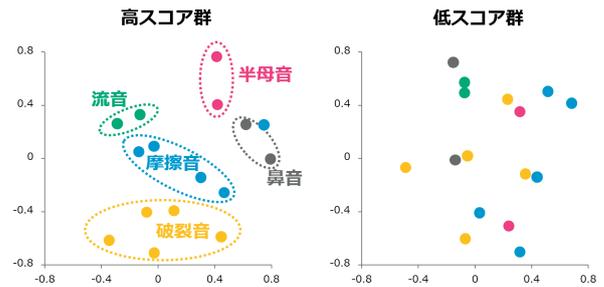


図5 子音音素に対する脳波応答の類似性。高スコア群は子音の種類によってクラスター化されている。

クラスター化が認められなかった。この結果から、英語に習熟した被験者は子音に対する反応が音素ごとに異なっており、子音を系統的に的確に処理していることがわかる。これは、母語ではない言語の音素に対する反応の可塑性を示しており、学習することで音素の聞き取りに対する応答が改善することを示している。

これらの研究の結果は、外国語を読んでいるときの脳波を用いて、従来型のテストでは評価できない習熟度を定量的に評価できることを示している。我々はこれらの基礎的知見に基づき、脳活動計測を用いた外国語の習熟度評価法を提案し (特許出願済み)、現在、その実用化に向けた研究開発を進めている。脳波を指標として、学習者個々人の脳波データから外国語の習熟度を要素ごとに詳細に評価することができれば、脳波を用いた外国語のアダプティブラーニングにつながり、学習の効率化を図ることが可能となるだろう。

3.2 脳波を用いた外国語のニューロフィードバックトレーニングの研究

日本語母語話者にとって、外国語の聞き取りは読み書きと比べて難しく、習得に時間を要する。その要因の 1 つは音素体系の違いである。例えば、英語の音素は 44 種類あるが (音素数は諸説ある)、日本語の音素は他の言語と比べても少なく 24 種類しかない。先行研究では生後 6 カ月の乳児において既に母語に含まれる音素と含まれない音素に対する反応が異なり、成長に伴って母語にはない音素への感受性は減少することが報告されている [6]。言い換えると、日本母語話者の音素の分解能は英語の音素数には不十分で、そのため /l/ と /r/, /b/ と /v/, /s/ と /θ/ などの聞き分けが難しい [7][8]。したがって、外国語の聞き取りを向上させるには、母語にない音素の弁別能力を上げることが必要不可欠である。しかし、単語や文法は正解、不正解がわかりやすく自主学習がしやすいが、音素の聞き取りはどのように改善すべきか認識しづらく、指導も難しい。

そこで我々は、ミスマッチ陰性電位 (MMN) と呼ば

れる脳波成分を用いて外国語のリスニング能力を向上させる手法を考案した。事象関連電位の1つであるMMNは、例えば、高頻度で出現する音(標準刺激)の中に、逸脱する音(逸脱刺激)を与えたとき、逸脱刺激に対して誘発される脳波成分であり、音刺激に注意を向けていないときにも出現することから、注意が関与する前の自動処理を反映している [9]。先行研究では意識上での聴覚弁別トレーニングにより、MMNが増強されることが示されていることから [10][11]、我々は、逆に、MMNを増強させることができれば弁別能力を上げることができるのではないかと考えた。そこでまずは単純な音の弁別を向上させることを目指して、純音のニューロフィードバックトレーニングを行った。実験ではピッチの異なる純音により誘発されるMMNを計測し、その振幅の大きさの情報を円のサイズとして表現し被験者に視覚的にフィードバックした。被験者はその円を大きくするように集中するトレーニングを行うが、視覚的な情報が自分の脳波と関係していることや、どのようにしたら円のサイズが大きくなるかについては知らされなかった。しかし、純音の弁別能力は有意に向上し、MMNを用いた純音のニューロフィードバックトレーニングに成功した [12]。

そこで我々はこの手法を、英語の“light”と“right”の聞き分けのトレーニングに適応した [13]。“light”と“right”の聞き分けができない日本語母語話者を対象とした脳波実験を行い、被験者自身の脳波をフィードバックしてトレーニングする群とフィードバックしないコントロール群でトレーニングによるリスニング能力の変化を比較した。被験者には、高頻度で与える標準刺激として“light”の音声と、低頻度で与える逸脱刺激として“right”の音声をランダムな順で0.7秒間隔で連続的に呈示し、手前に置かれたディスプレイに緑の円を呈示した(図6)。ニューロフィードバック群の実験では、円の大きさは直前の20回の音声刺激によって誘発されたMMNの振幅の大きさを反映し

ており、音声呈示されるたびに円の大きさが更新される。MMNの振幅が大きくなると、それに応じて円は大きくなり、MMNの振幅が小さくなると円は小さくなるという仕様である。一方、コントロール群では、円の大きさはニューロフィードバック群の被験者のデータを用いて変化させ、被験者自身の脳波はフィードバックしなかった。被験者には音声は無視して円を大きくすることに集中するよう教示し、円の大きさの変化が脳波と関連することは知らせていない。実験は1日につき12セッション(1セッションは300回の音声呈示)を5日間実施した。

“light”と“right”の聞き取りが向上したかどうかを確認するため、5日間のトレーニングの前、トレーニング5日目、トレーニングを終了して1週間後に、弁別テストと認知テストを実施した。弁別テストでは各試行で“light”と“right”の音声を連続的に呈示し(“light” - “light”, “right” - “right”, “light” - “right”, “right” - “light”)、被験者は2つの単語が同じか否かをボタン押しで回答した。認知テストでは各試行で“light”の音声か“right”の音声がどちらか1つを呈示し、被験者はその単語が“light”か“right”かをボタン押しで回答した。弁別テストの結果を図7(a)に示す。トレーニング前の正答率はニューロフィードバック群とコントロール群の間に有意差は認められなかったが、トレーニング後の正答率はコントロール群と比べてニューロフィードバック群の方が有意に高かった。コントロール群ではトレーニング前後で正答率に変化がないのに対し、ニューロフィードバック群では5日間のトレーニングによって、正答率が35%上がった。さらに、トレーニングによる弁別の向上は、トレーニングを終了して1週間後も持続していた。次に、認知テストの結果を図7(b)に示す。弁別テストと同様に、トレーニング前の正答率は群間で有意差はなかったが、トレーニング後の正答率はコントロール群よりニューロフィードバック群の方が有意に高かった。また、コ

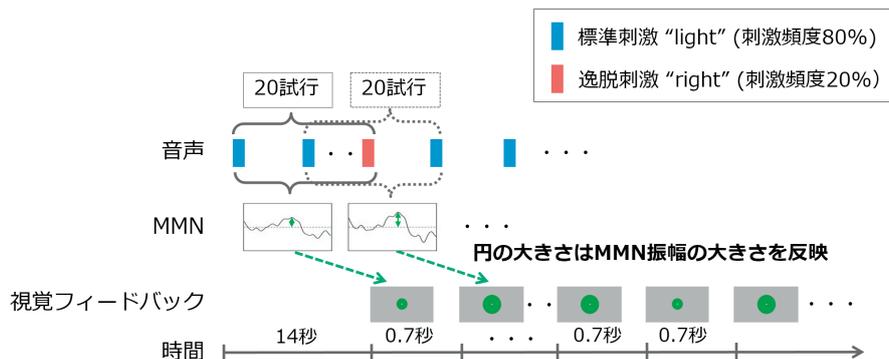


図6 ニューロフィードバックトレーニング(ニューロフィードバック群)の概要。被験者は音声(“light”と“right”)には注意を向けず、円を大きくすることに集中する。ニューロフィードバック群では円の大きさはMMNの振幅の大きさを反映して変化するが、コントロール群ではランダムに変化する。

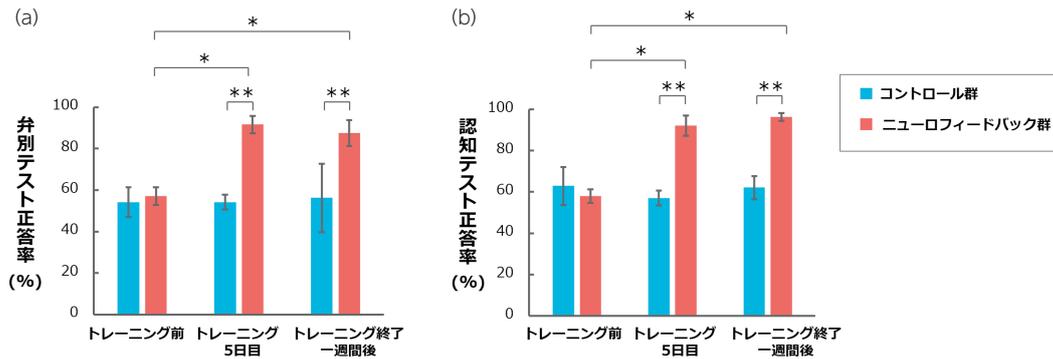


図7 弁別テストと認知テストの正答率

コントロール群ではトレーニング前後で正答率に差がないのに対し、ニューロフィードバック群ではトレーニングによって正答率が34%向上し、トレーニング1週間後にもその効果は持続していた。また、トレーニング前、トレーニング後、トレーニング終了1週間後に2種類のテストの直後に計測したMMNの振幅は、コントロール群ではトレーニング前後で差がないのに対して、ニューロフィードバック群ではトレーニングによって有意に増大していた。そのMMNの振幅増大の効果はトレーニング1週間後にも持続しており、弁別テストと認知テストの正答率向上と同様の変化が認められた。これらの結果から、音声には注意を向けずに聞き流していても、音声によって誘発される脳波を視覚刺激としてフィードバックすることでリスニング能力が向上することを示した。

さらには、ニューロフィードバックトレーニングによる“right”と“light”のリスニング能力の向上が、/l/と/r/を含む他の単語のリスニング能力にも波及しているかを検討した。“light”と“right”に含まれる/lai/, /rai/を含む単語ペア(例、“blight”-“bright”), /lai/, /rai/を含む単語(例、“fly”-“fry”), /la/, /ra/を含む単語ペア(例、“glass”-“grass”), /l/, /r/を含む単語ペア(例、“flesh”-“fresh”)の4種類のペアを用いて認知テストを行った。この4条件のうち、/lai/と/rai/, /lai/と/rai/, /la/と/ra/を含む単語ペアは、“light”と“right”のニューロフィードバックトレーニングによって有意に認知正答率が向上した。この結果は、単語を用いたニューロフィードバックトレーニングによるリスニング能力の向上は、単語に含まれる子音の音素単独のリスニング能力を向上させるには至らないものの、母音を伴う音素系列に対しては汎化するということを示している。

4 むすび

本稿では脳情報技術の社会実装を目指した脳波計の

開発と、脳波計測の教育(外国語学習)分野での応用を目指した研究開発について述べた。現在、脳情報工学的研究室では、様々な業種の企業と我々が開発した脳波計を活用して共同研究を進めており、今後の産業応用が期待される。

謝辞

脳波を利用した外国語の習熟度評価法の研究は、関西学院大学の片山順一教授、滋賀大学の尾島司郎准教授(現、横浜国立大学)との共同研究である。脳波を利用したニューロフィードバックの研究は、大阪大学の前田太郎教授、安藤英由樹准教授、古川正紘助教、北海道大学の飯塚博幸准教授との共同研究である。研究メンバーの皆様に感謝する。

【参考文献】

- 成瀬康, “ウェアラブル脳波計が拓く新しいコミュニケーション,” 自動車技術会誌, vol.69, no.3, pp.77-80, 2015.
- 成瀬康, 横田悠右, 東佑一朗, “ウェアラブル脳波計の開発,” ヘルスケアを支えるバイオ計測, シーエムシー出版, pp.201-208, 2016.
- M. Kutas and S. A. Hillyard, “Reading senseless sentences: brain potentials reflect semantic incongruity,” *Science*, vol.207 : 4427, pp.203-205, 1980.
- M. J. Crosse, G. M. Di Liberto, A. Bednar, and E. C. Lalor, “The Multivariate Temporal Response Function (mTRF) Toolbox: A MATLAB Toolbox for Relating Neural Signals to Continuous Stimuli,” *Front Hum Neurosci.*, 10 :604, 2016.
- G.M. Di Liberto, J.A. O’Sullivan, and E.C. Lalor, “Low-Frequency Cortical Entrainment to Speech Reflects Phoneme-Level Processing,” *Current Biology*, vol.25, Issue 19, pp.2457-2465, 2015.
- M. Cheour, R. Ceponiene, A. Lehtokoski, A. Luuk, J. Allik, K. Alho, and R. Näätänen, “Development of language-specific phoneme representations in the infant brain,” *Nature Neuroscience*, vol.1, no.5, pp.351-353, 1998.
- P. K. Kuhl, “Learning and representation in speech and language,” *Current Opinion in Neurobiology*, vol.4, no.6, pp.812-822, 1994.
- S. E. Lively, D.B. Pisoni, R. A. Yamada, Y. I. Tohkura, and T. Yamada, “Training Japanese listeners to identify English/r/and/l/. III. Long-term retention of new phonetic categories,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol.94, no.6, pp.2076-2087, 1994.
- K., Alho, D.L. Woods, and A. Algazi, “Processing of auditory stimuli during auditory and visual attention as revealed by event-related potentials,” *Psychophysiology*, vol.31, no.5, pp.469-479, 1994.
- H. Tiitinen, P. May, K. Reinikainen, and R. Näätänen, “Attentive novelty

6 先端的脳機能計測技術

- detection in humans is governed by pre-attentive sensory memory," Nature, vol.327, pp.90-92, 1992.
- 11 K. Tremblay, N. Kraus, and T. McGee, "The time course of auditory perceptual learning: neurophysiological changes during speech-sound training," Neuroreport, vol.9, no.18, pp.3557-3560, 1998.
 - 12 M. Chang, H. Iizuka, Y. Naruse, H. Ando, and T. Maeda, "Unconscious learning of auditory discrimination using mismatch negativity (MMN) neurofeedback," Scientific Reports, vol.4, 6729, 2014.
 - 13 M. Chang, H. Iizuka, H. Kashioka, Y. Naruse, M. Furukawa, H. Ando, and T. Maeda, "Unconscious improvement in foreign language learning using mismatch negativity neurofeedback: A preliminary study," PLoS ONE, vol.12, no.6, e0178694, 2017.



成瀬 康 (なるせ やすし)

脳情報通信融合研究センター
脳情報工学研究室
室長
博士(科学)
脳機能計測



井原 綾 (いはら あや)

脳情報通信融合研究センター
脳情報工学研究室
主任研究員
博士(保健学)
言語神経科学



常 明 (ちゃん みん)

脳情報通信融合研究センター
脳情報工学研究室
研究員
博士(情報科学)
脳情報科学、ニューロフィードバック



松本 敦 (まつもと あつし)

脳情報通信融合研究センター
脳情報工学研究室
研究員
博士(心理学)
認知神経科学