

2026年3月18日
先端技術ラボ 大城武史

呼吸脳波の原理とビジネス応用

—生体信号テクノロジーレポート①—

《本レポートの位置づけ》

- 本レポートは、「生体信号テクノロジー(NeuroTech)」の新しい可能性を開拓するための手がかり提供を目指す技術レポートである
- 生体信号テクノロジーを取り巻く国内外の社会環境もスコープに入れつつ、主に生体信号技術に焦点を当て、その社会的価値とそのビジネス応用可能性を模索する
- 「生体信号テクノロジーレポート」はシリーズ刊行。①では「呼吸脳波」に焦点を当てる
- 他の連作レポート、NeuroTech×Art を読むと、より分かりやすくなる

《要点》

- ◆ ビジネス環境を含む日常環境下で生体信号の取得が可能になりつつある
 - ◆ ビジネス環境下で利用されている生体信号は末梢神経に由来するものが多く(例:脈波)、現状、その活用範囲に限界がある
 - ◆ 本レポートで注目する「呼吸脳波」は、中枢神経(脳)に由来する生体信号であり、従来の生体信号の活用範囲を大きく広げられる可能性がある
 - ◆ 呼吸脳波は呼吸周期と連動し、鼻腔内の空気流出入(吸気と呼気)によって誘発される脳活動(脳波)の一種である
 - ◆ 呼吸脳波は様々な脳機能実現に必要な「脳内時間調整」を担っている
 - ◆ 呼吸脳波は、記憶・学習の定着に寄与している可能性がある
- 本件に関するご照会は、当社ホームページの [問い合わせフォーム](#) より、先端技術ラボ 大城 宛にお願いいたします。
 - 本レポートの図表は引用元明記のない限り、当社が作成したオリジナル図表です。
 - 日本総研・先端技術ラボについては、以下をご覧ください。
<https://www.jri.co.jp/company/business/system/advtechlab/>

本資料は、情報提供を目的に作成されたものであり、何らかの取引を誘引することを目的としたものではありません。作成日時点で弊社が一般に信頼出来ると思われる資料に基づいて作成されたものですが、本資料の情報の正確性・完全性を保証するものではありません。また、情報の内容は、経済情勢等の変化により変更されることがあります。本資料の情報に基づき起因してご閲覧者様及び第三者に損害が発生したとしても執筆者、執筆にあたっての取材先及び弊社は一切責任を負わないものとします。

はじめに:調査背景と本レポートの構成について

従来、生体信号の利用目的は、医療に限られていた。しかし、生体信号を簡易的に計測するウェアラブルデバイスの普及に伴って、生体信号を活用するテクノロジー(生体信号テクノロジー)が社会に広がりを見せており、医療目的以外でも、その応用可能性が期待されている。しかしながら、既存の生体信号の殆どは末梢神経由来の信号(例:脈波)であり、その活用範囲には現状限界がある。

本レポートは、呼吸が「脳」を読み解くための「手がかり」となり得るという観点から、新しい生体信号テクノロジーのシーズを提示する技術レポートである。本レポートが注目する「呼吸脳波」は、ビジネス環境を含む日常環境下で用いられてきた従来の生体信号と比べて、**中枢神経(例:脳機能)**に深く結びついた特徴がある。計測技術の進展が進めば、長時間・非侵襲・低負担な環境下でも安定して取得できる可能性もある。このような呼吸脳波の信号特性は生体信号の産業応用を考える上で重要な利点であり、将来的に呼吸が「**信頼性の高い脳状態指標**」となる可能性を有している。

こうした背景を踏まえ、本レポートでは、呼吸がどのような神経メカニズムを通じて脳活動と結びつき、高次脳機能の調整に関与しているのかを体系的に整理する。具体的には、鼻腔を經由する呼吸が脳波を生み出し、中枢性(例:脳幹)の呼吸関連信号と協調しながら、脳全体の働きや**記憶・学習**といった高次脳機能を調整するという最新の科学的知見を、5つの段階に分けて紹介する。第1節では呼吸脳波の発生メカニズムを解説する。第2節では、呼吸脳波が脳の広範囲に波及する仕組みを概説する。第3節では、呼吸脳波と神経細胞の協調に焦点を当てる。第4節では、呼吸脳波が複数の脳活動を「**統合・再調整**」することで、異なる脳領域間の通信効率を高める作用を紹介する。その中で、呼吸脳波が記憶形成プロセスに果たす役割に着目する。第5節では、呼吸脳波の教育、医療、ウェルビーイングなどへの応用、ビジネス展開の可能性について考察する。

1. 呼吸が脳波を生成する仕組み:呼吸脳波の生成

呼吸は生命維持に不可欠な基本的生理機能の1つであるが、近年の研究により、呼吸周期(呼吸リズム)に同期した脳波が存在することが明らかになっている。本レポートでは、呼吸周期と同期する脳波を「呼吸脳波」と呼ぶ。呼吸脳波は、吸気および呼気によって生じる空気の流れが鼻腔内を通過する際に、鼻腔内の感覚受容器が刺激されることを起点として生成される¹。具体的には、空気の流れや圧力変化を検出する鼻腔内の**機械受容器**(mechanosensory receptor)が刺激され、その信号が嗅覚系を介して脳に伝達されることで、呼吸周期に同期した脳波(脳活動)が生じる(図1A)。

一方で、鼻腔内の機械受容器が刺激されない条件下では(例:口呼吸)、このような呼吸脳波はほとんど観測されなくなることが報告²されている(図1B)。この機械受容器は、匂い分子を検知

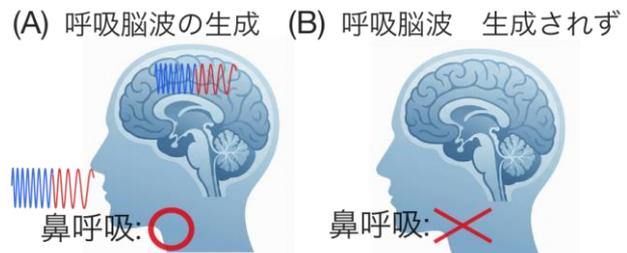


図 1. 呼吸脳波:呼吸による脳波生成メカニズム。(A)呼吸脳波は鼻腔内の機械受容器が呼吸によって生じる空気の流れによって刺激されることによって誘発される脳活動である。(B)呼吸脳波の生成は鼻腔内の空気の流れが起点となるため、鼻腔内の空気の流れを遮断すると生じない(例:口呼吸)

する嗅覚受容器とは異なるものであり、匂い刺激そのものは呼吸脳波の生成に必須ではない。

2. 呼吸脳波が脳全体へ波及する仕組み

呼吸脳波は、嗅覚系に近接した脳領域に限らず、前頭皮質、海馬、扁桃体、視床、さらには視覚野など、脳の広範な領域において同時に観測されることが報告されている^{3,4}。このような特性は、呼吸脳波を単に鼻腔由来の局所的な信号として捉える理解だけでは十分に説明することができない。先行研究では、呼吸リズムそのものは脳幹に存在する「呼吸中枢」によって生成されており、このリズムに同期した信号が広範な脳領域へ伝達されることが知られている^{5,6}。このような中枢性の呼吸関連信号の例として、呼吸性遠心性随伴放電（Respiratory Corollary Discharge: RCD）が挙げられる（図 2）⁷。嗅覚系を介して観測される呼吸脳波は RCD 等の中枢性呼吸関連信号と協調して機能するため、結果として、多くの脳領域において観測されると考えられている⁷。すなわち、呼吸脳波は独立して機能するという信号というよりも、RCD 等の中枢性の呼吸関連信号と協調しながら脳全体の状態を調整していると考えられる（図 2）。このように、呼吸脳波が脳全体へ波及する仕組みとしては、脳内に張り巡らされた中枢性の呼吸関連信号に関する神経基盤と共に機能している点大きいと考えられる¹。

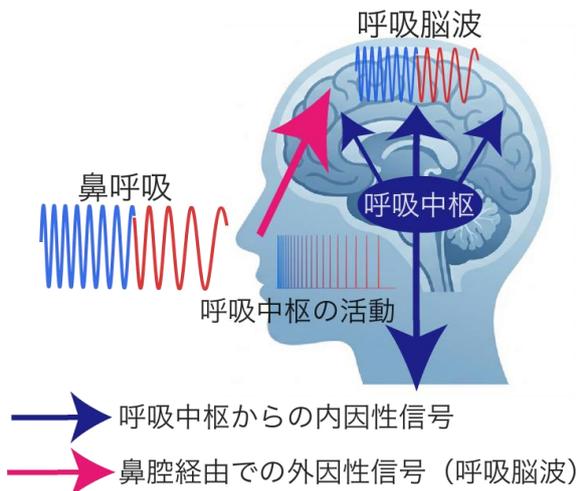


図 2. 呼吸脳波と呼吸性遠心性随伴放電（Respiratory Corollary Discharge : RCD）の協調。脳幹に存在する「呼吸中枢」からの信号（RCD）は、様々な脳領域に伝達される。この信号に加えて、外部からの信号（呼吸）によって生成される呼吸脳波は、いわば車の両輪として機能していると考えられる。

3. 呼吸脳波と神経細胞の協調：

呼吸脳波の位相とスパイク(Spike-phase coupling)

本節では、呼吸脳波の位相（タイミング）と神経細胞の活動に注目する。神経科学では脳活動の指標として、様々な指標が用いられる（例：脳波、血流変化等）。中でも、最も信頼性の高い指標の1つが神経細胞の活動、「スパイク（発火）」である。この名称は、神経細胞が活動する際に生じる尖ったスパイク状の波形に由来する（図 3A）。呼吸脳波は、この神経細胞のスパイクと密接な関係性を有している。神経細胞のスパイクは、脳波に対してランダムに生じているわけではなく、特定の脳波位相にロックして生じることが知られている。この現象は **spike-phase coupling** と呼ばれる。この現象は、2014 年にノーベル賞生理学賞を受賞した場所細胞研究で明らかになった。興味深いことに、神経細胞のスパイクは、呼吸脳波に対しても同じ現象を示すことが近年明らかになっている。

Karalis and Sirota(2022)は、呼吸脳波の位相と、記憶の形成および想起に重要な役割を

担う海馬の神経細胞のスパイクとの間に、spike-phase couplingが生じることを示した(図 3B)⁷。図 3AB が示すように、海馬の神経細胞は、呼吸脳波の特定の位相にロックしてスパイクする。このことは、呼吸脳波が神経細胞の発火タイミングの調整を担っていることを示唆している^{1,7,8}。呼吸脳波に対する spike-phase coupling は、海馬に限らず、前頭皮質、体性感覚野、視覚野、線条体、視床など、脳の広範な領域で生じる¹。このことは、呼吸脳波の活動タイミング調整機能は脳全体の情報処理に及んでいることを示唆している。

また、呼吸脳波の周波数(Hz)は身体的状態や認知的プロセス変化に呼応する(図 3C)。このことは、呼吸脳波が単に呼吸周期のみを反映するのではなく、脳活動や身体的な状態変化と強く結びついて機能していることを示唆している。

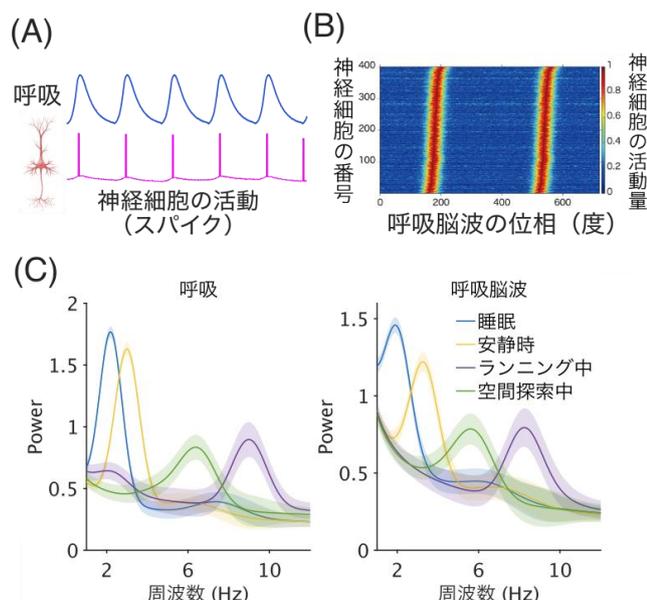


図 3. 呼吸脳波と神経細胞の活動. (A)呼吸脳波と神経細胞の活動(スパイク). (B)呼吸脳波の位相と神経細胞のスパイクの関係.呼吸脳波の特定の位相に集中して神経細胞のスパイクが増大する. (C) 呼吸と呼吸脳波の周波数の対応関係.身体的な状態に応じて呼吸の周波数は変動するが、呼吸脳波の周波数もそれに呼応する.本図は Karalis and Sirota(2022)⁷の論文を根拠に、シミュレーションデータで作成.

4. 呼吸脳波と学習・記憶：海馬—大脳皮質 Two Stage Model

前節では、呼吸脳波が神経細胞の活動タイミングを調整することを示した(図3AB: spike-phase coupling)。本節では、この時間的調整機構としての呼吸脳波の機能を、学習および記憶の形成過程と関連付けて議論する。特に、学習・記憶形成のプロセスを説明する Two-Stage Model における呼吸脳波の役割に注目する。

学習および記憶の形成は、単一の脳領域で完結するものではなく、複数の脳領域、特に海馬と大脳皮質の協調的な働きによって実現されると考えられている⁹。この考え方は Two-Stage Model と呼ばれ、記憶形成の過程を大きく二つの段階に分けて説明する枠組みである¹⁰。第1段階では、覚醒状態において得られた新規情報が、海馬において一時的に統合・保持される。第2段階では、海馬に一時的に保持されていた情報が、休息中や睡眠中に再活性化され、大脳皮質上で再構築・固定化されていく。この過程は記憶の固定化(memory consolidation)と呼ばれる。

この再活性化過程に観測される海馬の神経細胞の活動は **sharp-wave ripples**(リップル、SPW-Rs, 80-250 Hz) と呼ばれ、学習内容・記憶をより安定した大脳皮質上へ転写する役割を担っていると考えられている¹¹⁻¹⁵。実際に、SPW-Rs の発生有無で、大脳皮質の活動を比較すると、大脳皮質の活動パターンは大きく変動する(図 4)。図4では、大脳皮質の神経細胞集団の同期発火パターンを、呼吸周期に合わせて図示している。SPW-Rs が発生していない場合(図 4A)では、大脳皮質は1つの活動パターンを維持している。一方で、SPW-Rs が発生した場合(図 4B)、大脳皮質は異なった活動パターンへ移行している(青線の渦部分→赤線の渦が重ならない点に注目)。さらに、SPW-Rs の発生を妨害すると、記憶・学習の形成もまた阻害される¹⁵。このようにSPW-Rs は記憶・学習の成立に重要な役割を担っている脳活動である¹¹。

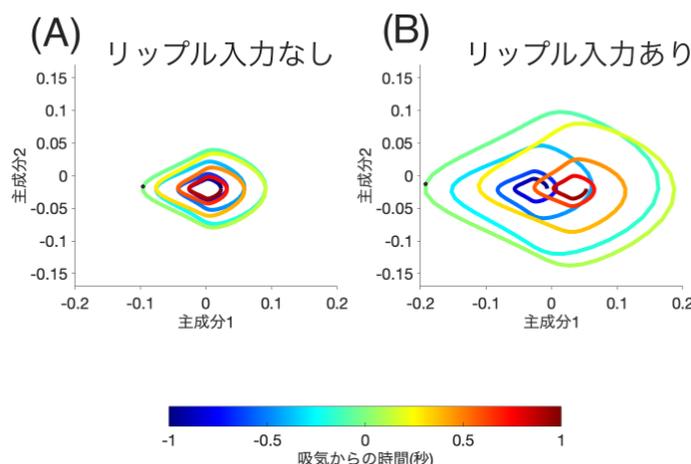


図 4. Sharp-wave ripples(SPW-Rs)の大脳皮質への影響。(A)SPW-Rs が発生していない時の大脳皮質の活動パターン。大脳皮質の活動は呼吸周期に合わせて表示(緑色が吸気の開始を表す)。(B)SPW-Rs がある時の大脳皮質の活動パターン.SPW-Rs が生じることで、大脳皮質の活動パターンが変調する。本図は Karalis and Sirota(2022)⁷ を根拠に、シミュレーションデータで作成。

しかし、ここで重要な問題が生じる。脳内では、複数の異なった情報処理が並列的に進行しているのが常である。そのため、学習・記憶情報の転写(例 海馬→大脳皮質)が円滑に行われるためには、海馬の活動と大脳皮質の活動を時間的に協調させるメカニズムが不可欠となる¹⁴。

4.2. 呼吸脳波によるタイミング制御:SPW-Rs と UP/Down State の協調

前節で、海馬と大脳皮質の間で記憶情報を転写・固定化するためには、両者の活動を時間的に協調させる機構が必要であることを指摘した。本節では、その時間的協調を実現する 1 つの機構として、呼吸脳波のタイミング調整機能に注目する。第 2 節で述べたように、呼吸周期そのものは、脳幹の呼吸中枢からの呼吸関連信号(例:RCD)によって、広範な脳領域へ送信されている(内部信号)⁷。一方で、鼻腔由来の呼吸脳波は、嗅覚系を介して脳内で誘発される外部信号である¹。これら 2 つの信号は、起源こそ異なるものの、同一の呼吸周期を共有しており、両者の相対的な関係性が評価されることで、身体状態や脳状態に応じた時間的調整が可能になると考えられる。実際、これらの信号が関与することで、記憶固定化に必要な海馬と大脳皮質間のタイミング調整がなされていることが示唆されている(図 5)⁷。例えば、記憶固定化が進行する休息・睡眠中(例: NREM 睡眠)には、海馬では SPW-Rs が生成される(4.1 節)。一方で、大脳皮質では、脳活動が一過的に高まる Up State と、神経細胞の活動が著しく制約される Down State と呼ばれる 2 状態遷移が生じる¹⁶。したがって、海馬から大脳皮質への情報転写が効率的に行われるためには、海馬の

SPW-Rsと大脳皮質の Up/Down State のタイミング調整が重要となる。実際、SPW-Rs が発生するタイミングは、大脳皮質の Up/Down State の遷移タイミングと強く関連している(図 5A)。このタイミング調整を担う機構の1つが呼吸脳波であると考えられている^{1,7}。

近年の研究から、SPW-Rs や皮質の UP/Down State の出現確率が、呼吸脳波位相に依存して変調されることが報告されている(図 5B)。これは、呼吸脳波が単なる背景のリズムではなく、海馬および大脳皮質の活動状態を(位相依存的に)バイアスする役割を果たしている可能性を示唆する。すなわち、特定の呼吸脳波位相において海馬では SPW-Rs が生起されやすくなり、同時に大脳皮質では Up/Down State 遷移が誘発されやすくなることで、海馬と大脳皮質の機能的結合が一時的に強化されると考えられる。このように、呼吸脳波を介した位相依存的な調整機構は、Two-Stage Model において要求される「情報転写に適した時間窓」を形成する役割を担っていると解釈できる。以上の観点から、呼吸脳波は、海馬と大脳皮質の相互作用を統御する時間制御信号の1つとして位置づけることができる。

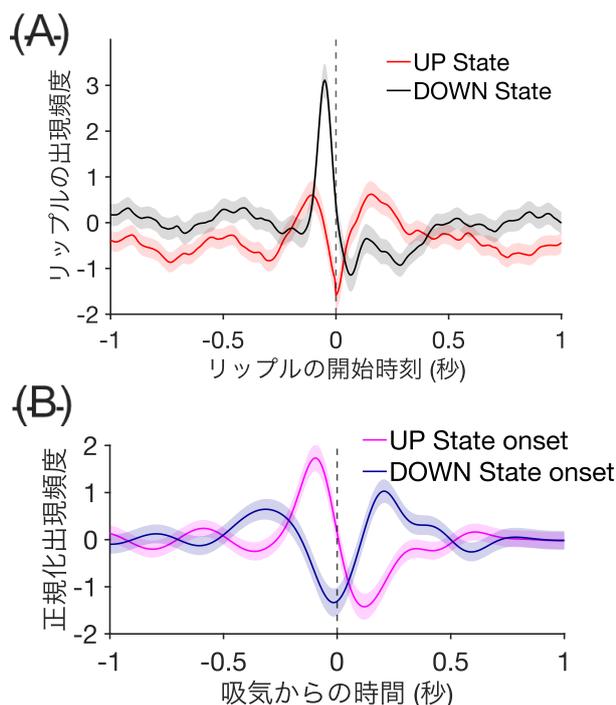


図 5. 呼吸脳波によるタイミング制御:SPW-Rs と UP/Down State の協調.(A)SPW-Rs の発生タイミングと大脳皮質の Up/Down State の遷移タイミング.(B)呼吸位相と Up/Down State の出現頻度。本図は Karalis and Sirota(2022)⁷を根拠に、シミュレーションデータで作成。

5. 呼吸脳波の産業応用:より信頼性の高い生体信号を求めて

近年、計測デバイスの小型化・高性能化に伴い、脈波、心拍、脳波といった各種生体信号が、実験室環境に限らず、自然行動下や業務環境などの日常環境においても取得可能となりつつある。これに加えて、近年の人工知能等を用いた解析技術の向上により、生体信号の活用は従来の医療用途にとどまらず、従業員を対象とした見守り、マーケティング、スポーツ支援、エンターテインメント、保険、ウェルビーイング支援など、多様な分野へと拡張されつつある(図 6)¹⁷⁻²¹。

しかしながら、生体信号の社会実装を実現するためには、環境ノイズや身体運動の影響を受けにくく、長時間にわたり安定的かつ再現性高く取得・解析できる技術基盤の確立が不可欠であるという課題が依然として存在する。例えば、睡眠判定機能を持つウェアラブルデバイスは数多く存在するものの、睡眠と覚醒の二状態分類さえ精度が不十分であるケースが報告されている²²。したがって、生体信号テクノロジーによる新しいビジネス創出における最重要課題の一つは、ノイズ耐性、再現性、解釈可能性を兼ね備えた、より信頼性の高い指標の確立にある。

このような観点において、呼吸脳波は生体信号の産業応用において強い利点を有している。第1に、呼吸は生命維持に不可欠な自律的リズムであり、安静時のみならず日常活動下においても持続的に観測可能であることから、長時間モニタリングに適している。第2に、呼吸脳波は呼吸によって誘発される脳活動であり、基本的に呼吸周期と同期している(図1,2)。第3に、呼吸脳波は、脳を構成する神経細胞の活動タイミング等(例:スパイク)と密接な関係性を有しており、様々な身体・認知状態とも連動する(図3)。実際、呼吸脳波は記憶形成や学習と密接に関わる脳活動のタイミング制御にも強く関連することからも(図4,5)、そのビジネス利用において高いポテンシャルを有している(図6)。

さらに、呼吸は他の生体信号(例:脳波)と比較して意図的に制御しやすいという特性を有している²³。この点は、受動的な状態推定にとどまらず、介入可能なフィードバック指標として活用できる可能性を示唆する²⁴。例えば、学習状態を推定しながら呼吸リズムを調整することで、脳活動を再編成し、学習効果の最適化や安定化、集中力の向上を図るといった双方向型アプリケーションへの展開も理論的に想定される。呼吸調整は脳機能以外にも広く影響を及ぼすことについては、既に多くの知見が蓄積されている^{24,25}。このような呼吸脳波が持つ機能性は、生体信号テクノロジーの社会実装可能性を高める1つの要因として、今後注目に値するものと思われる。

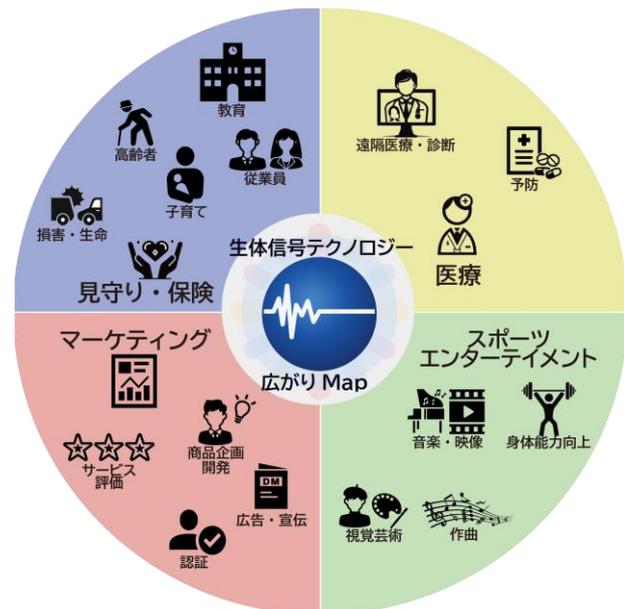


図6. 生体信号テクノロジー広がりMap.生体信号は計測装置の小型化・ウェアラブル化に伴い、様々なビジネス領域で使用されるようになってきている。

引用文献

1. Tort, A. B. L., Laplagne, D. A., Draguhn, A. & Gonzalez, J. Global coordination of brain activity by the breathing cycle. *Nat Rev Neurosci.* 2025 Jun;26(6):333-353.
2. Zelano, C. et al. Nasal Respiration Entrain Human Limbic Oscillations and Modulates Cognitive Function. *J Neurosci.* 2016 Dec 7;36(49):12448-12467.
3. Tort, A. B. L. et al. Parallel detection of theta and respiration-coupled oscillations throughout the mouse brain. *Sci Rep.* 2018 Apr 24;8(1):6432.
4. Kluger, D. S. & Gross, J. Respiration modulates oscillatory neural network activity at rest. *PLoS Biol.* 2021 Nov 11;19(11): e3001457.
5. Smith, J. C., Abdala, A. P. L., Borgmann, A., Rybak, I. A. & Paton, J. F. R. Brainstem respiratory networks: building blocks and microcircuits. *Trends Neurosci.* 2013 Mar;36(3):152-62.

6. Krohn, F. et al. The integrated brain network that controls respiration. *Elife*. 2023 Mar 8;12:e83654.
7. Karalis, N. & Sirota, A. Breathing coordinates cortico-hippocampal dynamics in mice during offline states. *Nat Commun*. 2022 Jan 24;13(1):467.
8. Ohki, T. Measuring phase-amplitude coupling between neural oscillations of different frequencies via the Wasserstein distance. *J Neurosci Methods*. 2022 May 15;374:109578.
9. Tonegawa, S., Morrissey, M. D. & Kitamura, T. The role of engram cells in the systems consolidation of memory. *Nat Rev Neurosci*. 2018 Aug;19(8):485-498.
10. Buzsáki, G. Two-stage model of memory trace formation: a role for 'noisy' brain states. *Neuroscience*. 1989;31(3):551-70.
11. Buzsáki, G. Hippocampal sharp wave-ripple: A cognitive biomarker for episodic memory and planning. *Hippocampus*. 2015 Oct;25(10):1073-188.
12. Ohki, T. et al. Multivariate sharp-wave ripples in schizophrenia during awake state. *Psychiatry Clin Neurosci*. 2024 Sep;78(9):507-516.
13. Ohki, T., Kunii, N. & Chao, Z. C. Efficient, continual, and generalized learning in the brain - neural mechanism of Mental Schema 2.0. *Rev Neurosci*. 2023 Mar 27;34(8):839-868.
14. Ohki, T. & Takei, Y. Neural mechanisms of mental schema: a triplet of delta, low beta/spindle and ripple oscillations. *Eur J Neurosci*. 2018 Oct;48(7):2416-2430.
15. Girardeau, G., Benchenane, K., Wiener, S. I., Buzsáki, G. & Zugaro, M. B. Selective suppression of hippocampal ripples impairs spatial memory. *Nat Neurosci*. 2009 Oct;12(10):1222-3.
16. Steriade, M., Nuñez, A. & Amzica, F. A novel slow (< 1 Hz) oscillation of neocortical neurons in vivo: depolarizing and hyperpolarizing components. *J Neurosci*. 1993 Aug;13(8):3252-65.
17. Magee, P., Ienca, M. & Farahany, N. Beyond neural data: Cognitive biometrics and mental privacy. *Neuron*. 2024 Sep 25;112(18):3017-3028.
18. Apple Inc. Using Apple Watch for Arrhythmia Detection. 2020. https://www.apple.com/healthcare/docs/site/Apple_Watch_Arrhythmia_Detection.pdf
19. Prieto-Avalos, G. et al. Wearable Devices for Physical Monitoring of Heart: A Review. *Biosensors* (Basel). 2022 May 2;12(5):292.
20. Ohmura, N. et al. A method to soothe and promote sleep in crying infants utilizing the transport response. *Curr Biol*. 2022 Oct 24;32(20):4521-4529.e4.
21. Kimura, K. Cardiac cycle modulates reward feedback processing: An ERP study. *Neurosci Lett*. 2019 Oct 15;711:134473.
22. Ode, K. L. et al. A jerk-based algorithm ACCEL for the accurate classification of sleep-wake states from arm acceleration. *iScience*. 2022 Jan 1;25(2):103727.

23. Alkoby, O., Abu-Rmileh, A., Shriki, O. & Todder, D. Can We Predict Who Will Respond to Neurofeedback? A Review of the Inefficacy Problem and Existing Predictors for Successful EEG Neurofeedback Learning. *Neuroscience*. 2018 May 15;378:155-164.
24. Lehrer, P. et al. Heart Rate Variability Biofeedback Improves Emotional and Physical Health and Performance: A Systematic Review and Meta Analysis. *Appl Psychophysiol Biofeedback*. 2020 Sep;45(3):109-129.
25. Yoshimoto, A., Morikawa, S., Kato, E., Takeuchi, H. & Ikegaya, Y. Top-down Brain Circuits for Operant Bradycardia. *Science*. 2024 Jun 21;384(6702):1361-1368.