

脳波反応で刺激を個別最適化する リハビリ支援技術

 京都橘大学 健康科学部理学療法学科

教授 兒玉 隆之

2026年 2月26日

【脳卒中後の機能予後】

Hendricks, et al., 2002

麻痺残存 50%

歩行可能 60%

日常生活の自立 60%

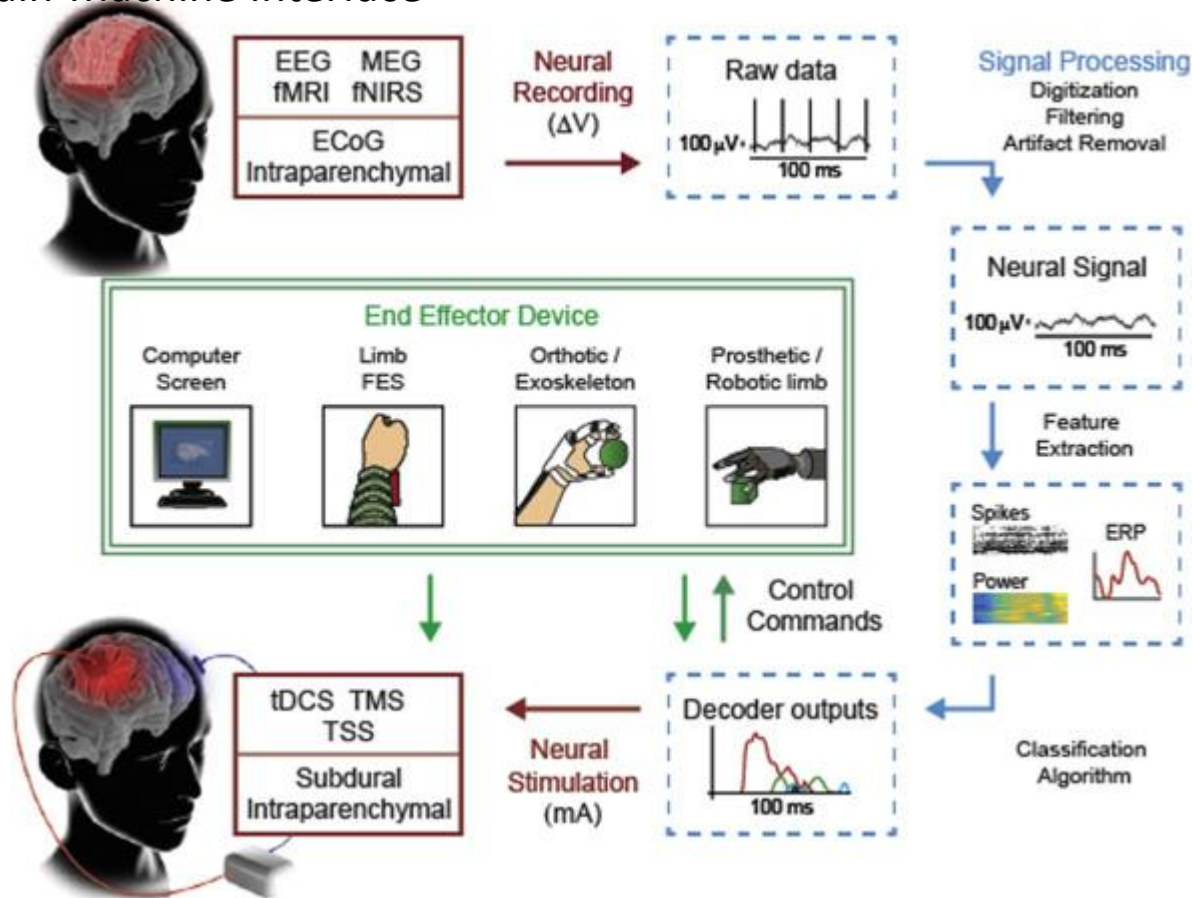
手の回復(実用レベル) **20%**

日本で、**脳卒中後遺症**とともに生活している人は約**115万人**
そのうち、「**感覚障害**」「**身体認知障害**」を有する割合は**50~80%**

従来技術とその問題点

◆ BMI : “脳と機械をつなぐ”技術

Brain-Machine Interface



- Bockbrader et al., 2018 -

思考, 知覚, 運動意図に関連する神経活動をセンシングし, 脳信号を出力用のコマンドにデコード. そして出力装置を通じてユーザーの意図した動作を実行.

脳卒中治療ガイドライン 2021〔改訂2025〕

VII 亜急性期後のリハビリテーション診療

2 亜急性期後の障害に対するリハビリテーション診療

2-4 上肢機能障害

推奨

1. 軽度から中等度の上肢麻痺に対しては、麻痺側上肢を強制使用させる訓練など特定の動作の回復を含む訓練を行うよう勧められる（推奨度 A エビデンスレベル高）。
2. ロボットを用いた上肢機能訓練を行うことは勧められる（推奨度 A エビデンスレベル高）。
3. Brain-computer interface (BCI) を応用した上肢機能訓練を行うことは妥当である（推奨度 B エビデンスレベル高）。
4. 中等度から重度の上肢麻痺に対して、もしくは肩関節亜脱臼に対して、神経筋電気刺激を行うことは妥当である（推奨度 B エビデンスレベル中）。
5. 他者の動作を観察しながら行う訓練や、バーチャルリアリティを用いた訓練を行うことは妥当である（推奨度 B エビデンスレベル高）。
6. 経頭蓋直流電気刺激 (tDCS)、反復性経頭蓋磁気刺激 (rTMS)、埋め込み型刺激装置を用いた迷走神経刺激を行うことは妥当である（推奨度 B エビデンスレベル高）。

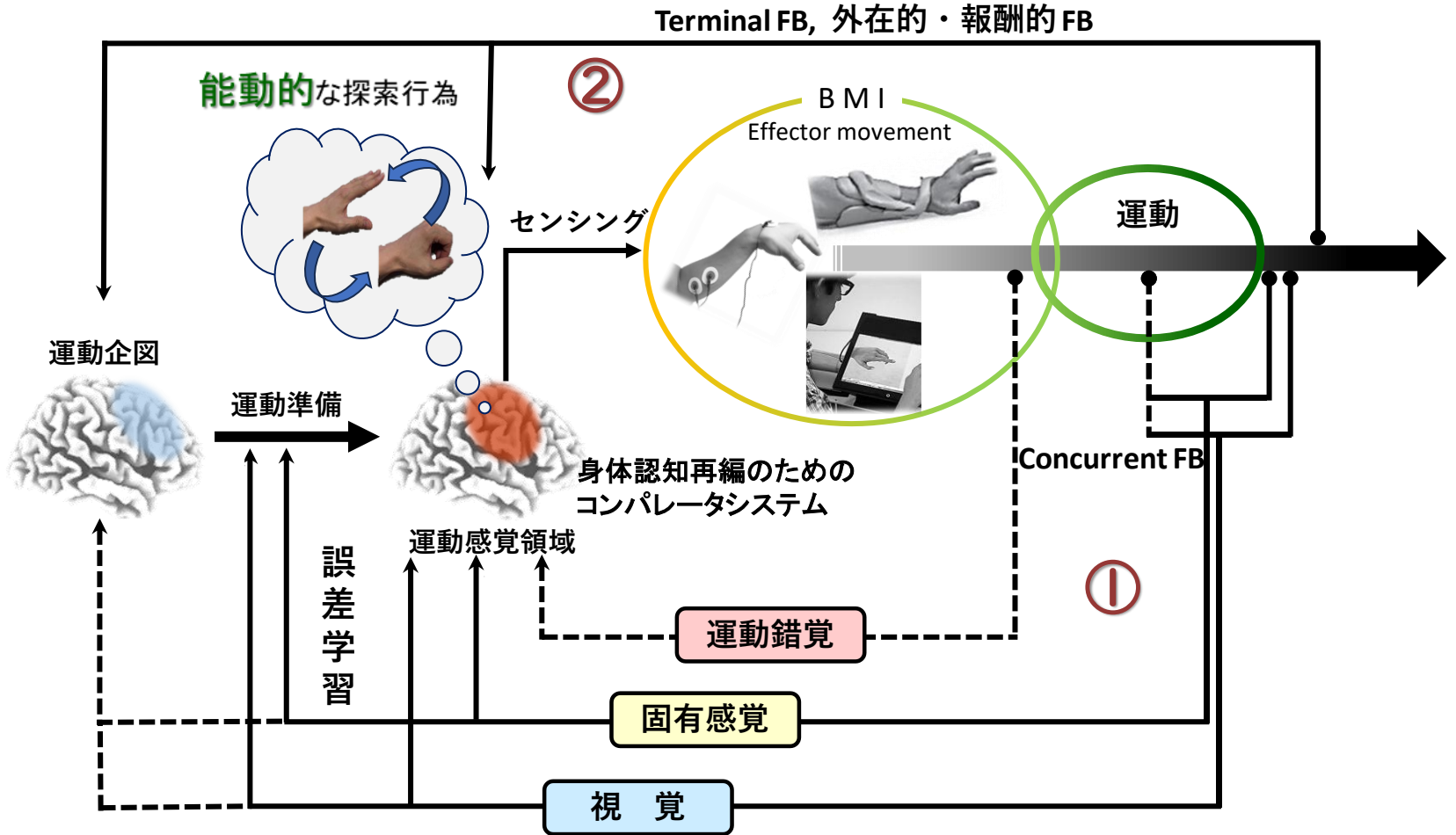
https://www.jsts.gr.jp/img/guideline2021_kaitei2025_kaiteikoumoku.pdf

BCIをデバイスへ展開する = BMI

ロボットを用いた訓練を行うことで上肢麻痺の改善度が大きくなること、複数のメタ解析で示されている^{6, 追2, 追3, 追a, 追b}。ロボットを用いた訓練の導入時期については、発症後3か月以内に導入した場合とそれ以後に導入した場合を比較すると、その効果には差がなかったことを示したメタ解析がある^{追3}。

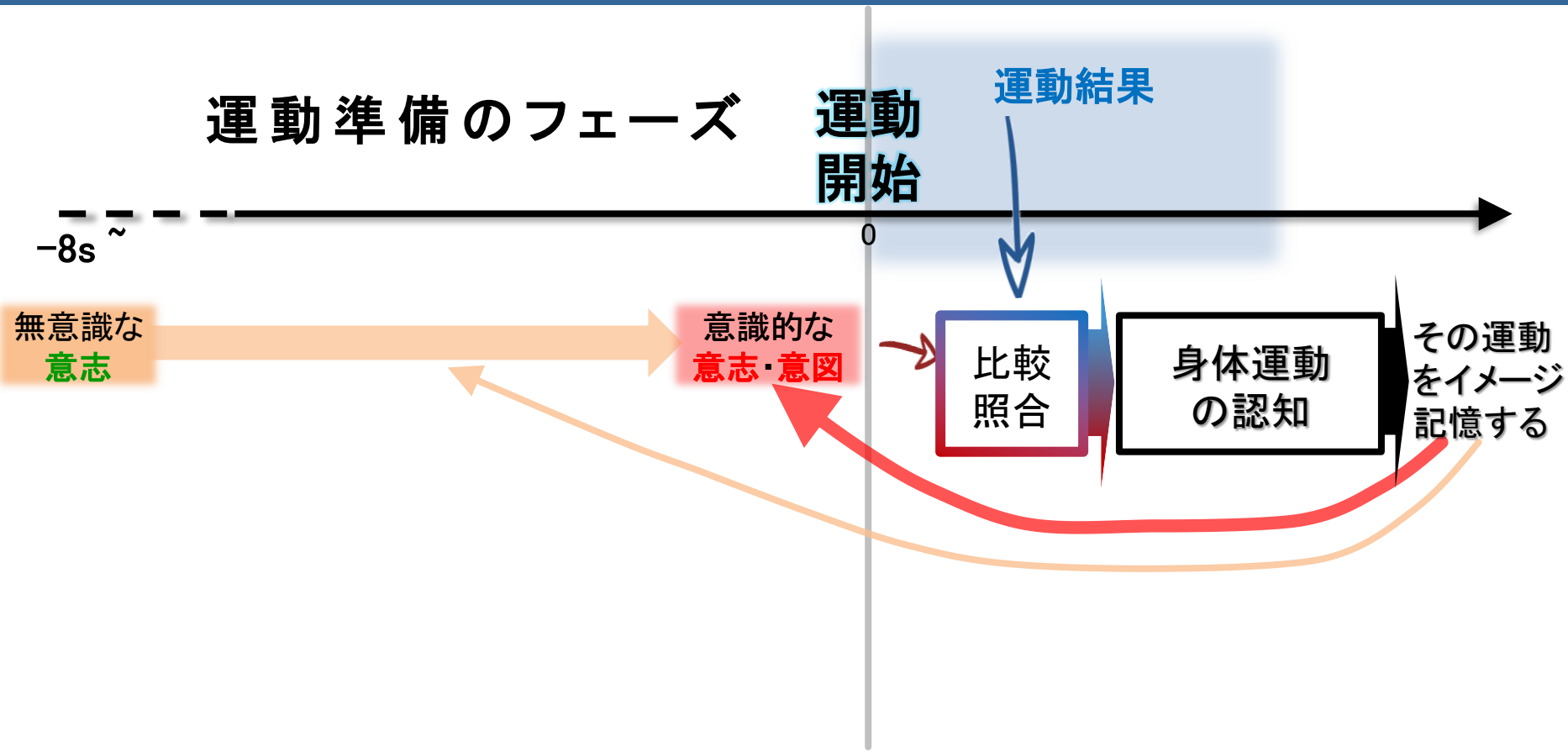
なお、本邦では、ロボットを用いた訓練の一部がすでに保険適用となっている。脳波所見などに基づいてフィードバックを行う brain-computer interface (BCI) を応用した訓練については、それを行うことで上肢麻痺の回復の程度が大きくなること、複数のメタ解析で示されている^{追4, 追c- 追f}。これらのメタ解析のうちの2つは、BCIを応用した訓練は亜急性期もしくは慢性期のいずれの時期に導入しても、上肢麻痺を有意に回復させることを示している^{追c, 追d}。

新技術の特徴



- ① FBされるモダリティフレームの優位性をどのように考慮するか
- ② FBに対する学習性をどのように可視化し評価するか

新技術の強み: 脳波 (ERN) による学習プロセスの可視化



BMIによって再編成される脳内プロセス

感覚入力と運動に“ズレ”が生じている
多感覚入力情報を統合できない



ERN

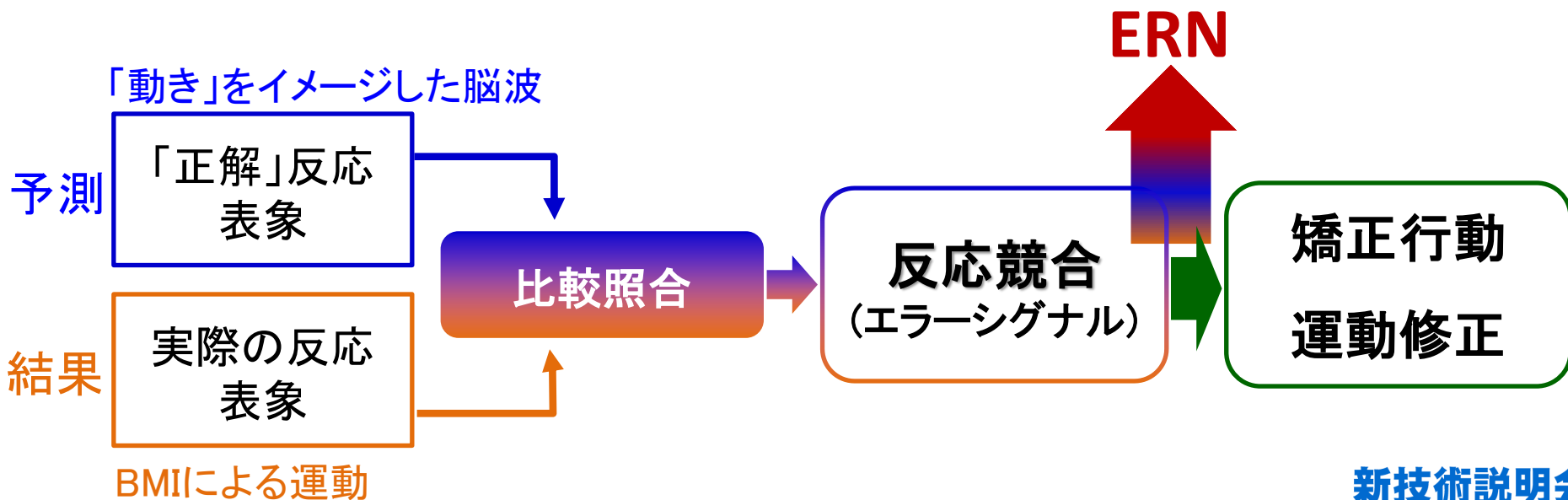
神経生理学的視点でプロセスを評価し
BMIの効果捉える

新技術の強み: 脳波(ERN)による学習プロセスの可視化

反応競合(エラー)時には, 頭皮上で観察される脳波活動に変化が現れる.

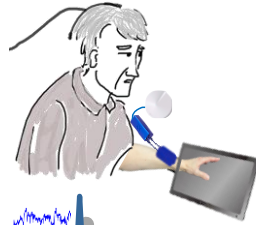
◆ エラー関連陰性電位

error-related negativity: **ERN**



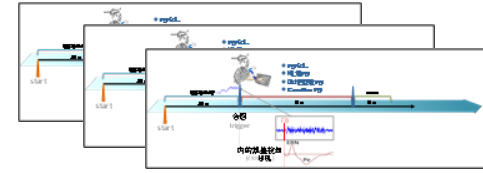
個別最適化ニューロフィードバックシステム

ERN評価モード

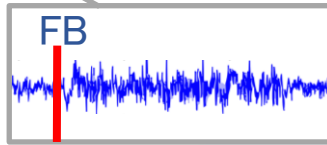
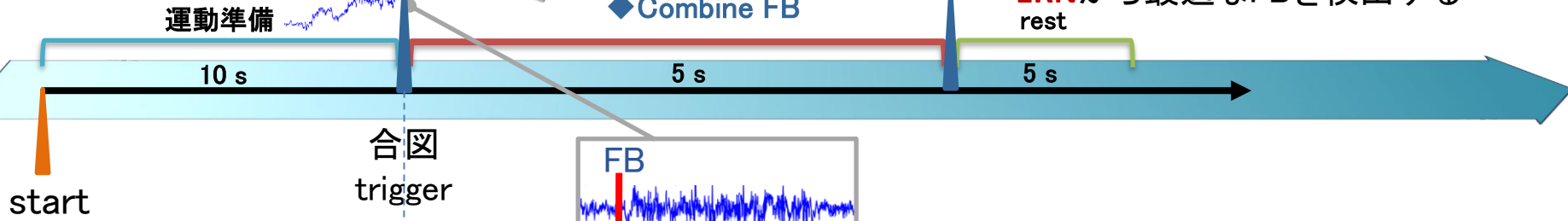


- ◆ FBなし
- ◆ 視覚FB
- ◆ 体性感覚FB
- ◆ Combine FB

×

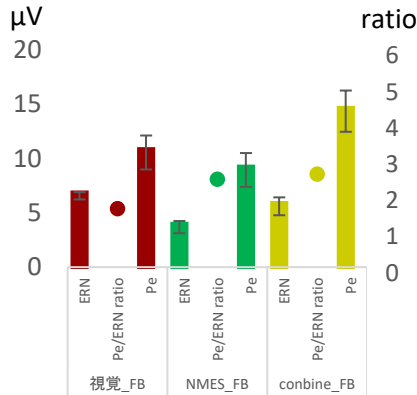


ERNから最適なFBを検出する
rest

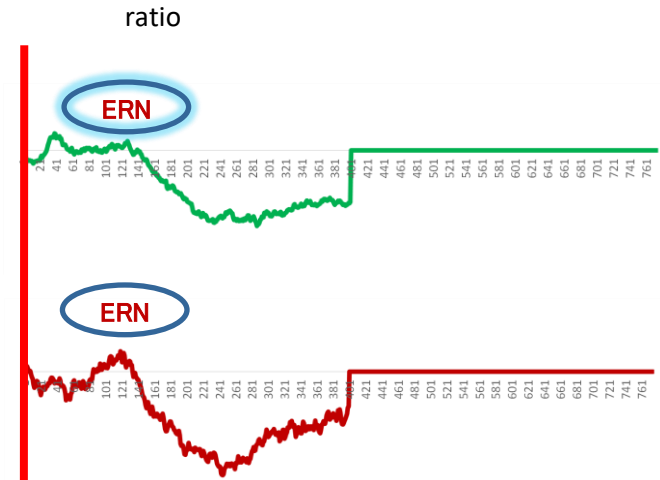
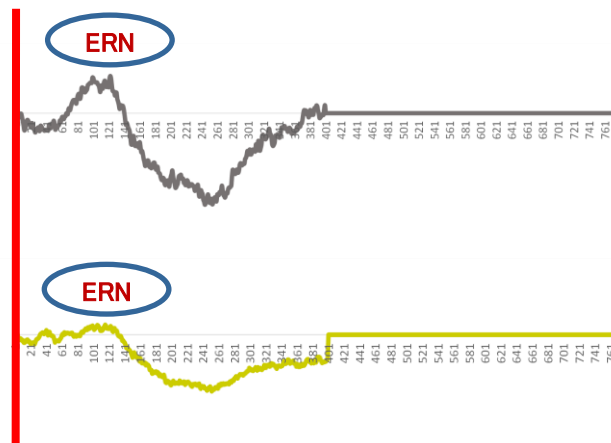


内的誤差検知
(ERN出現)

運動学習支援システム、及び、運動学習支援方法(特願2024-187534)



case 1 左被験者	
発症からの日数	127
MMSE	30
FMA-UE(BRS)	49(IV)
MAL_AOU	0.95
MAL_QOM	0.07



- ◆ 運動イメージとの一致性が低いほどERNは大きくなる
- ◆ 障害によって学習性や気づきは変化する可能性がある

個別最適化ニューロフィードバックシステム

脳波のセンシング指標

sensorimotor rhythm (SMR)

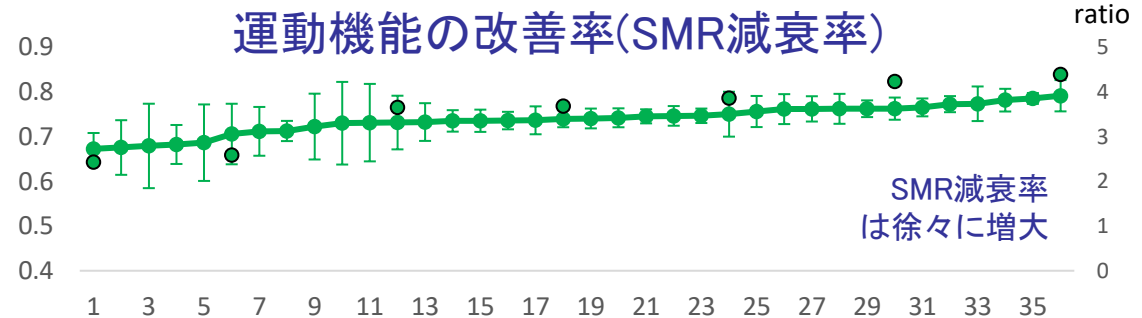
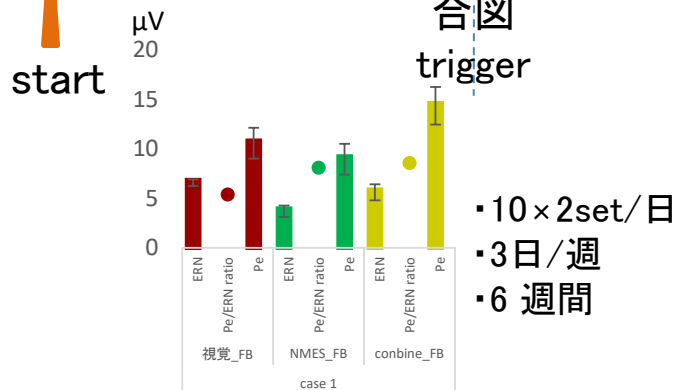
α 波 (μ 波) および β 波周波数(8~30Hz)での感覚運動野のニューロングループの活動に対応する.

- Pfurtscheller et al., 2006 -

- μ 波帯域: 実運動または運動イメージによって抑制(ERD)される
- β 波帯域: 実運動または運動イメージによって抑制もしくは増加

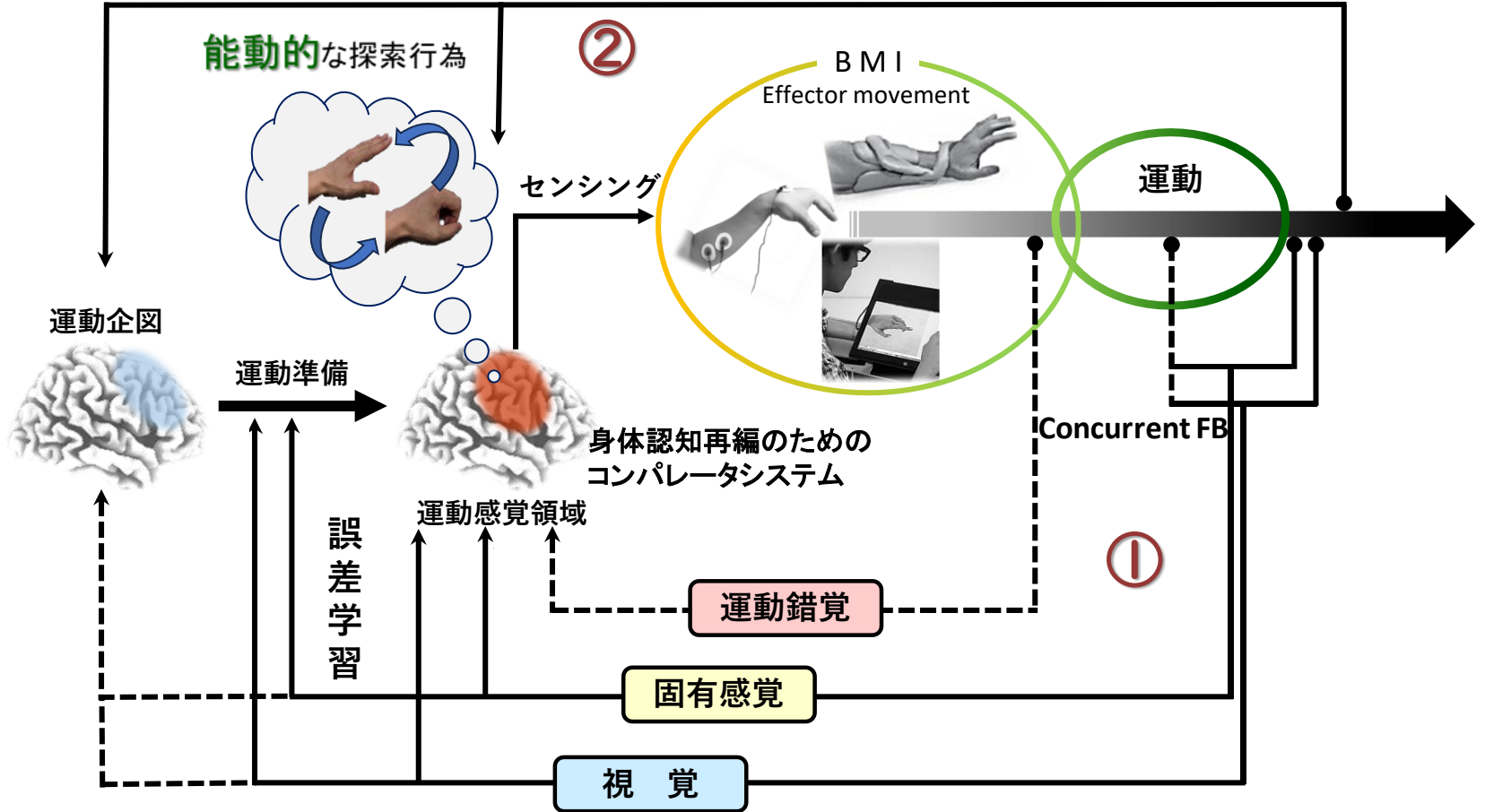
$$\log \frac{\mu}{\beta}$$

トレーニングモード



本技術による介入アプローチ

Terminal FB, 外在的・報酬的FB



- ① FBされるモダリティフレームの優位性をどのように考慮するか
→ 感覚運動機能の状態や合目的性の理解の程度に応じてFB情報は選択されるべき
- ② FBに対する学習性をどのように可視化し評価するか
→ BMIによる学習成果は結果のみでなく、そのプロセスを神経生理学的側面から定量的定性的に評価されるべき【運動学習支援システム、及び、運動学習支援方法(特願2024-187534)】

◆ 医療機関・リハビリテーション施設

- 脳卒中後遺症患者への個別最適化リハビリテーション
- 感覚障害・身体認知障害に対する新たな介入手段

◆ 在宅医療・遠隔リハビリテーション

- ウェアラブル脳波計を用いた、通院困難者への在宅トレーニング提供

◆ ヘルスケア・メンタルヘルス分野

- 自身の脳活動(SMR等)をモニタリングすることによる、ストレスケアやニューロフィードバック・リラクゼーション

◆ 技能伝承・トレーニング支援

- 熟練者と初心者の「脳内学習プロセス」の比較による、効率的な技能習得支援

ERN検出技術

- 現状：データ測定後、リアルタイムな評価ができていない。
- 課題：評価・介入後、即時に結果を提示できないため、ERNをリアルタイムで高精度に検出し、即時評価を可能にする解析アルゴリズム・ソフトウェアは未だ未開発。

脳波開発

- 現状：市販の脳波計でプロトタイプが稼働。
- 課題：臨床・在宅で使うには装着が煩雑でやや高価なため、より簡便・安価で高精度な「ウェアラブル脳波計」の開発が必要である。

フィードバック刺激技術

- 現状：市販の電気刺激装置を使用。
- 課題：BCIとシームレスに連動し、最適な「感覚」をフィードバックする専用機が必要であるため、BCI連動型の「小型・多感覚フィードバック装置（電気刺激等）」の開発が必要である。

社会実装への道筋

時期	技術開発・検証フェーズ	社会実装・ビジネス展開
現在 ～ 1年後	<ul style="list-style-type: none">・ウェアラブル脳波計・アプリのプロトタイプ完成・病院や施設での探索的臨床研究（プロトタイプでのPoC実施）	<ul style="list-style-type: none">・パートナー企業様との共同開発契約・非医療機器（ヘルスケアモデル）としての仕様策定
2～3年後	<ul style="list-style-type: none">・量産モデルの開発・安全規格（PSE等）の取得	<ul style="list-style-type: none">・ヘルスケア機器として販売開始（自費リハビリ・在宅向け）・ユーザーデータの収集開始
4年後～	<ul style="list-style-type: none">・収集データを用いた医療用アルゴリズムの確立	<ul style="list-style-type: none">・医療機器認証（クラスII）の申請準備・保険収載に向けたエビデンス構築

- ◆ **ハードウェア開発企業様(医療・健康機器メーカー)**
 - 臨床現場や在宅で手軽に使用できる「ウェアラブル脳波計」および「小型電気刺激装置」の試作・製品化・量産化.
- ◆ **ソフトウェア・アプリ開発企業様**
 - 脳波(ERN)をリアルタイムで解析し, フィードバックを制御するアルゴリズムの実装・アプリ化.
- ◆ **ヘルスケア事業を展開する企業様**
 - まずは非医療機器(トレーニング機器)としての市場投入に向けた, 共同実証実験および事業化検討.

◆ 特許技術の独占的利用

- 「学習プロセス(ERN)」に着目した独自の評価・介入技術(特許出願中)を活用し, 競合他社と差別化したリハビリ・ヘルスケア製品の開発が可能.

◆ 医学的エビデンスの構築支援

- 京都橘大学および連携医療機関のフィールドを活用し, 製品の有効性検証(臨床データ収集)から成果報告までを強かにサポート.

◆ 「医療」と「ヘルスケア」の2段階展開

- まずはヘルスケア機器として早期に市場投入し, 蓄積したデータを基に将来的には医療機器承認を目指す着実なロードマップを共有可能.

- 発明の名称 : 運動学習支援システム、及び、運動学習支援方法
- 出願番号 : 特願2024-187534
- 出願人 : 学校法人京都橘学園、ハプキタス株式会社
- 発明者 : 兒玉 隆之

発表者の他技術に関する知的財産権

番号	特許・公開番号	名称	共同出願人
1	特許第6553492号	脳波を用いた対象物制御方法 および制御装置	単独(京都橘学園)
2	特許第7768512号	技能取得支援方法、技能取得 支援システム、および制御プロ グラム	名古屋工業大学 コニカミノルタ(株)
3	特許 US 12,164,691 B2	SKILL ACQUISITION ASSISTANCE METHOD, SKILL ACQUISITION ASSISTANCE SYSTEM, AND COMPUTER READABLE RECORDING MEDIUM STORING CONTROL PROGRAM	名古屋工業大学 コニカミノルタ(株)
4	特開2024-153308	関節の角度測定装置及び関節 の曲がり具合の測定方法	単独(京都橘学園)

※ 特許第6947001号「覚醒支援装置及び覚醒支援システム」、
特許第6840955号「眠気解消装置」、
特許第6716990号「運動誘導装置」、
については、発明者のひとりである(特許権者は株式会社アイシン)。

産学連携の経歴

- 2016年 – 2025年 株式会社アイシンと共同研究実施
- 2017年 – 2019年
2023年 – 2025年 日本ロレアル株式会社と共同研究等実施
- 2019年 – 2023年 株式会社ファンケルと共同研究等実施
- 2019年 – 2020年 KDDI株式会社と共同研究実施
- 2020年 – 2024年 コニカミノルタ株式会社, 名古屋工業大学と共同研究実施
- 2021年 – 2022年 サントリーウエルネス株式会社と
学術指導実施

研究契約数: 17

■ 主な公的資金獲得(代表分)科研費:

- 基盤研究(B) (2022-現在): 脳卒中感覚運動機能障害改善のための個別最適化リハビリテーションシステムの創成
- 挑戦的研究(萌芽) (2022-2024): pre-MCIの早期発見・改善に向けた抑制機能を指標とするソフトウェア開発

他

本日のまとめ

1. **革新性**：従来のリハビリでは評価できなかった「学習プロセス(脳の気づき)」を可視化・活用する世界初のアプローチ.
2. **有効性**：既存のリハビリで効果が出にくかった感覚障害・身体認知障害に対しても、臨床的に有意な改善を確認済み.
3. **事業性**：「ヘルスケア機器」としての早期参入と、「医療機器」としての本格展開の2軸で事業拡大が可能.
4. **募集**：ウェアラブル化・小型化を実現し共に社会実装を目指すパートナー企業を求む.

お問い合わせ先

京都橘大学 学術振興課

TEL 075-574-4186 (内線: 1701)

e-mail aca-ext@tachibana-u.ac.jp