

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K17756

研究課題名（和文）身体状態に基づいて練習量を調整する運動学習支援システムの確立

研究課題名（英文）Development of motor learning support system adjusting the amount of practice based on the physical condition

研究代表者

武見 充晃（Takemi, Mitsuaki）

慶應義塾大学・理工学研究科（矢上）・特任講師

研究者番号：90828302

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、運動中の心身の状態変化を監視し、異常を検知した際には練習を中断したり運動方針を変更することで、心身に負担をかけずに運動技能の習得や発揮を支援するシステムの確立であった。研究期間中、以下の2つの重要な成果を得た。第一に、筋電図の振幅と実際に発揮される力の大きさの比が疲労関連バイオマーカーとなることを発見した。この成果は査読付き英文誌に掲載された。第二に、運動開始前の筋の共収縮が心理的プレッシャーを反映するバイオマーカーの候補であることを明らかにした。この研究はプレプリントとして公開され、現在査読中である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、運動中の心身の状態を客観的に評価する新しいバイオマーカーを提案した点にある。特に、筋電図と筋力の比や運動前の筋の共収縮が有用な指標となることを示した点は、運動生理学やリハビリテーション分野において重要である。社会的意義としては、運動中の過剰な負荷や心理的プレッシャーによるパフォーマンス低下を防ぎ、より安全で効果的なトレーニング方法を提供することが期待される。これにより、スポーツ選手だけでなく、高齢者やリハビリ患者にも広く応用可能な支援システムの開発が見込まれる。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study was to establish a support system that monitors physical state changes during exercise, and when abnormalities are detected, suggests pausing practice or changing exercise strategies, thereby facilitating the acquisition and execution of motor skills without physical strain. Over the two-year research period, we achieved two significant outcomes. First, we found that the ratio of electromyographic (EMG) amplitude to actual exerted force serves as a fatigue-related biomarker correlated with learning conditions. This finding has been published in a peer-reviewed journal. Second, we discovered that pre-movement muscle co-contraction could serve as a potential biomarker reflecting psychological pressure. This study set extreme high-reward conditions to induce "nervous" states in participants and compared muscle activity to normal reward conditions. The preliminary findings have been published as a preprint and are currently under review in a peer-reviewed journal.

研究分野：身体運動の神経科学

キーワード：身体運動 筋電図 疲労 あがり バイオマーカー

1. 研究開始当初の背景

私たちは日常生活の中で、新たな運動技能の習得・維持・向上のためには、反復練習が必要であることを知っている。とりわけスポーツ選手や音楽家といった人々の多くは「優れた技術を身につけるために、できる限りたくさん練習したい」と切に願っている。しかし、この願いは時に心身の疲労や状態変化を無視した過剰な練習を招く。強い疲労を感じたら練習を止めるように心がけていたとしても、競技会やコンクールが近づいてくると高揚感によって身体に生じている疲労に鈍感になるため、練習量はしばしば過大になる。主観的な疲労感と実際に身体に生じている状態変化は一致しないことも多いため[1]、自己判断に基づいて練習量を適切に調整することは簡単ではない。

過剰な運動訓練は、身体に様々な負の影響をおよぼす。例えば筋の過剰使用は、即時的には筋疲労として現れ、動作のばらつき増大や最大発揮張力の減弱といった、運動パフォーマンスの低下を招く[2]。筋疲労をともなう過剰な運動訓練を長期間続ければ、筋挫傷や腱鞘炎といった障害の原因となる。また近年、筋疲労させた腕で新しい運動技能を学習した被験者は、疲労を経験していない被験者と比べて、疲労した当日だけでなく回復した翌日になっても学習率が低いままであることが報告された[3]。この報告ではさらに、片腕の筋疲労は、疲労していない反対側の腕による運動学習をも悪化させることを明らかにした。筋疲労は筋そのものだけでなく、脳を含む運動学習系にも何らかの影響を及ぼす可能性が高い。実際、筋疲労下での運動中は、脳活動も特異的なパターンを示す[4]。過剰な訓練によって繰り返し生じる特異的な脳活動は、必要な機能を阻害する **Maladaptive plasticity** と呼ばれる不適切な脳可塑性を誘導し、局所性ジストニアのような脳神経疾患の発症要因の1つと考えられている[5]。**Maladaptive plasticity** はまた、目的の運動を実行するのに不適切な運動記憶の形成とも関連することが示唆されており[5]、運動学習の阻害因子である可能性が高い。

そこで本研究の開始段階においては、運動学習中の脳と筋の状態変化に基づいて練習量を調整する学習支援システムを使用すれば、身体に負の影響が及ばない範囲で最大限の練習量を確保でき、効率的な運動学習を実現できるのではないかと考えた。例えば、筋疲労の発生を検知したら練習を中断することで、その翌日以降の学習効率を損なわずに済む可能性が高い。同様に、過剰な訓練にともなう生じる特異的な脳活動を検知したら練習を中断することで、**Maladaptive plasticity** と不適切な運動記憶の形成を避けて、効率的な運動学習を実現できると考えた。しかし、過剰な運動訓練にともなう筋の状態変化と、その状態が運動学習に及ぼす影響がよく調べられているのとは対照的に、過剰な訓練が即時的に引き起こす脳状態の変化や、その変化が運動学習にどう影響するのかは殆どわかっていなかった。

2. 研究の目的

- 過剰な運動訓練による即時的な脳や筋の状態変化を明らかにし、この異常状態を検知できる脳波および筋電図の指標を同定する (研究項目1)。
- 生体計測情報に基づいて、適切な運動パフォーマンスを実現するための運動支援システムを確立する (研究項目2)。

3. 研究の方法

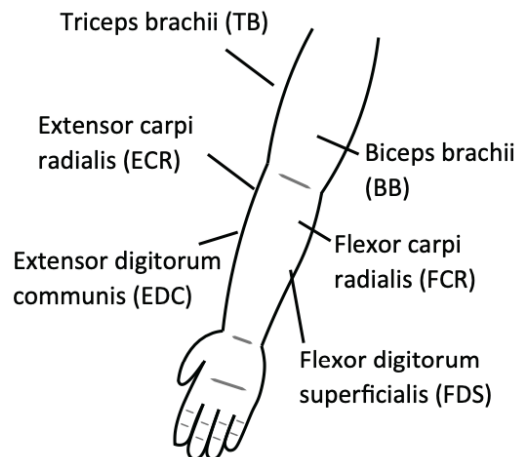
研究項目1：過剰な運動訓練による即時的な脳や筋の状態変化を明らかにし、この異常状態を検知できる脳波および筋電図の指標を同定する

運動学習課題は、楽器のピアノを模した聴覚運動課題とした。実験デバイスには2つの三軸力覚センサが取り付けられており、センサ毎に異なる高さの音が割り当てられ、センサを鉛直方向に押す力に応じてイヤホンから流れる音が大小する。被験者は見本の音源を聞き、非利き手の中指と薬指を使って、音の順番と大きさとリズムを真似て演奏した。被験者はイヤホンから聞こえる音と見本音源との差を手がかりに、運動指令を修正するので、試行を重ねるほど演奏内容は見本音源に近づいていく。このような運動課題を、休憩を1回ないしは2回挟んで、2時間実施した。また、その間の最大発揮張力、力の変動幅、ある一定の力を発揮するのに要する筋電図の振幅、またその際の筋電信号の中央周波数に加えて、**CR-10 Borg scale** を用いた主観的な疲労度を測定した。そして前述の疲労関連指標と、実際の運動パフォーマンスとの関連から、運動学習に関連する疲労関連指標を同定することを目指した。当該の実験は一定年数以上のピアノ経験者を有する者を対象に実施した。その後の追加実験では、脳波計測をとまないつつ、課題内容を簡単にして、一般健康成人を対象に、パフォーマンスに関連する脳波指標を同定する研究を実施した。

研究項目2：生体計測情報に基づいて、適切な運動パフォーマンスを実現するための運動支援システムを確立する

研究項目1の進捗に当初想定より時間を要したため、一部研究計画を変更して、研究項目2は項目1と並行して進めることとなった。そこで対象とする心身の状態を「疲労」から心理的プレッシャーによる「あがり」として、研究を進めることとした。

実験では実世界志向の運動課題、すなわち空間的・身体的制約の少ない環境下で実施でき、かつ実際のスポーツと似たような課題を用いることとした。そのような運動課題を実施している際に、金銭報酬によるプレッシャーをかけて、どのように種々の生体信号が変化するかを明らかにすることで、あがりに関連した生体指標を同定することを目指した。生体信号には、筋電図と心電図を用いた。筋電図は、用いた運動課題の実行にかかわる上腕と前腕の伸筋と屈筋（右図参照）から計測した。伸筋と屈筋を相互に計測したのは、あがり状態においては力みが発生することが予想され、運動パフォーマンスの低下と筋の共収縮が相関すると考えたためである。心電図に関しては、心拍変動から導かれる自律神経系の指標であるLow-frequency powerやHigh-frequency powerを生体指標候補として用いた。あがり状態においては、交感神経や副交感神経の活動が変動することが見込まれるためであった。

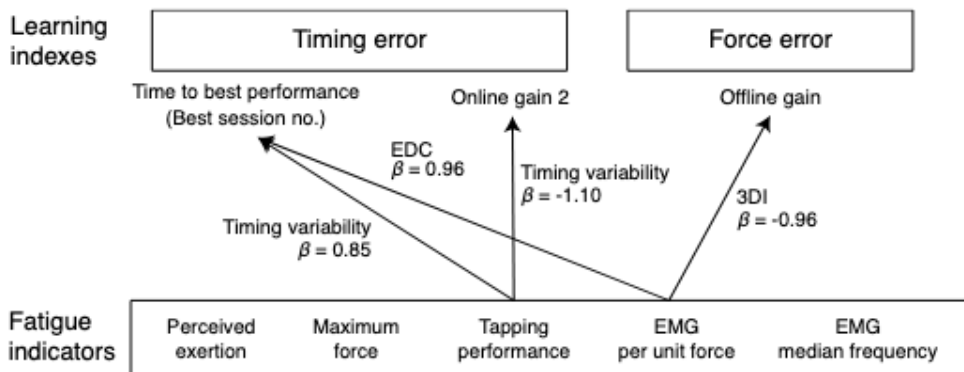
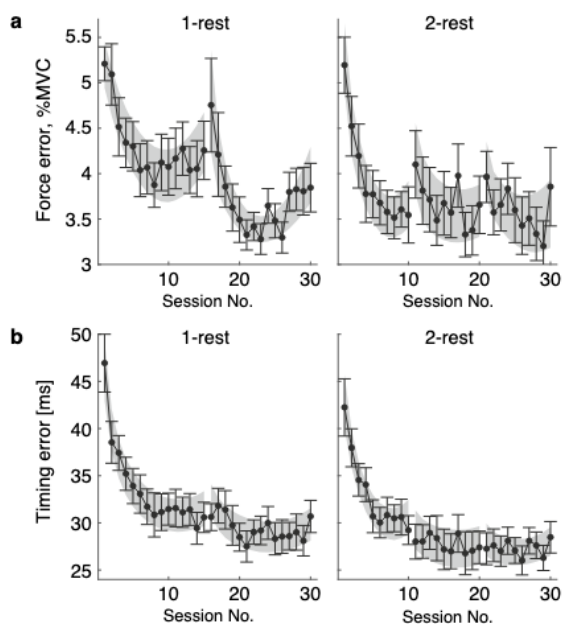


4. 研究成果

研究項目1：過剰な運動訓練による即時的な脳や筋の状態変化を明らかにし、この異常状態を検知できる脳波および筋電図の指標を同定する

ピアニストを対象とした研究結果は査読付き雑誌に掲載された[6]。第一に、右図に示す通り、休憩頻度は力やタイミングの正確さの向上には影響しないことがわかった。この結果は、疲労のしやすさには個人差があるため、全ての人に共通した画一的な休憩戦略は、運動技能の向上を目的とした際には相応しくないことを示唆している。実際、疲労に関連する行動指標や生理学的指標には、両群間で明確な差は認められなかった。

第二に、個人差を加味した回帰分析の結果、下図に示す通り、タッピング速度の変動や単位力あたりの筋電図振幅など、いくつかの疲労関連指標が、タイミングと力の制御の学習を説明できることが明らかになった。とりわけ、筋電図の振幅と実際に発揮される力の大きさの比が疲労関連バイオマーカーとなることが示唆された。



一般健康成人を対象に、脳波計測もともないながら実施した研究に関しては、二年間の研究期間中に明確な結果を得ることができなかった。

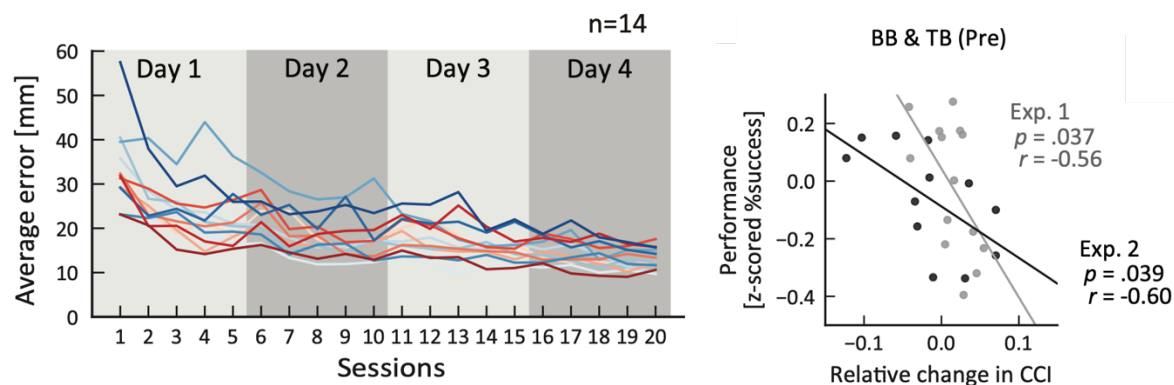
研究項目2. 生体計測情報に基づいて、適切な運動パフォーマンスを実現するための運動支援システムを確立する

研究項目1の進捗が芳しくなかったため、一部研究方針を変更して臨んだ本項目だが、2年

間の研究期間中に査読前原稿（プレプリント）として成果をまとめることができた[7]。

健常成人 14 名を対象に、ゴルフのパッディングを模した運動課題を 4 日間実施した。最初の 3 日間は訓練期間であり、4 日目に金銭報酬をともなうテストを行った。被験者は 3 日間で運動技能をよく学習し、エラーは十分に減少した（下左図）。4 日目のテスト時の筋活動や心拍状態の変化と、運動パフォーマンスに注目した解析を実施したところ、運動開始前の上腕二頭筋と上腕三頭筋の共収縮状態が、あがりを誘導すると考えられる最高報酬金額条件での運動パフォーマンスと有意に相関することを見出した（下右図、Exp.1）。同様の実験を、新たに募集した 12 名の健常成人を対象に実施したところ、やはり上腕二頭筋と上腕三頭筋の共収縮状態が、最高報酬金額条件での運動パフォーマンスと有意に相関していた（下右図、Exp.2）。また、心拍指標に関しては、Low frequency power と運動パフォーマンスが相関していたものの、Low frequency power は交感神経と副交感神経のはたらきをいずれも反映しているため、その生理学的なメカニズムの解釈が難しい。以上のことから、本研究では「運動開始前の筋の共収縮が心理的プレッシャーを反映するバイオマーカーの候補である」と結論づけた。

一方で、同指標を用いた運動支援システムの確立、すなわち運動開始前の筋の共収縮を抑制することで高額報酬条件における運動パフォーマンスの低下を抑制できるか、という検討までは完了することができなかった。この点については今後の課題となっている。



<引用文献>

[1] Gibson et al., Sports Med 2003; [2] Taylor et al., J Physiol 1996; [3] Branscheidt et al., eLife 2019; [4] Ushiyama et al., J Appl Physiol 2011; [5] Quartarone & Hallet, Mov Disord 2013; [6] Takemi et al., Sci Rep 2023. [7] Senta et al., Research Square 2024.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Takemi Mitsuaki、Akahoshi Mai、Ushiba Junichi、Furuya Shinichi	4. 巻 13
2. 論文標題 Behavioral and physiological fatigue-related factors influencing timing and force control learning in pianists	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 21646
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-023-49226-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Senta Naoki、Ushiba Junichi、Takemi Mitsuaki	4. 巻 1
2. 論文標題 Pre-movement muscle co-contraction associated with motor performance deterioration under high reward conditions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Research Square	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21203/rs.3.rs-3689807/v1	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 千田直輝、牛場潤一、武見充晃
2. 発表標題 高額な報酬条件下における運動パフォーマンスと筋活動の変容
3. 学会等名 第16回Motor control研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 N. SENTA, J USHIBA, M TAKEMI
2. 発表標題 Pre-movement muscle co-contraction and motor performance deterioration under high-reward conditions
3. 学会等名 Neuroscience 2023（国際学会）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------