

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82401

研究種目：学術変革領域研究(B)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H05715

研究課題名（和文）潜在認知過程による限界の制御とその突破

研究課題名（英文）Control and Transcendence of Limits through Implicit Cognitive Processes

研究代表者

柴田 和久 (Shibata, Kazuhisa)

国立研究開発法人理化学研究所・脳神経科学研究センター・チームリーダー

研究者番号：20505979

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 31,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、人間の発揮できる能力の限界が脳の潜在過程によって制御されているという仮説を検証し、その限界を突破するための手法の創出を目的に行った。この目的のため、行動実験パラダイムのデザイン、脳イメージング実験、脳刺激実験を実施した。研究期間中は、コロナ禍による世界的な研究活動の制限や入国制限により外国人研究員の入国が1年半以上も遅れる等の問題に見舞われた。しかしこれまでに、皮膚電気刺激による反応時間の向上や、気を逸らすことで持続的な握力の発揮を促進するなど、テクノロジーや心理学的知見を利用した複数の限界突破法が見出され、一定の研究成果が得られている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

火事場の馬鹿力はなぜ起こるのだろうか？危険時に一瞬で筋肉が強くなることはない。また平常時はいくら頑張っても出せない力が出せるのだから、火事場の馬鹿力は脳の情報処理、特に潜在過程によって制御されていると考えることができる。この制御を騙す方法の発見、この制御に関わる脳部位の解明や、その脳部位を操作する技術の開発は、学術的に価値が高いだけでなく、新しい訓練法等の創出にも繋がる。また慢性疲労症候群に代表されるように、潜在過程が制御する限界が極端に低くなってしまった患者の状態を改善させるための、新たな医療技術のシーズになる可能性もある。

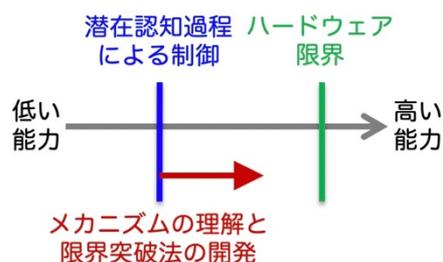
研究成果の概要（英文）：This study aimed to test the hypothesis that the limits of human performance are controlled by implicit cognitive processes in the brain and to develop methods for transcending those limits. To achieve this objective, we conducted well-designed behavioral experiments, brain imaging experiments, and brain stimulation experiments. Throughout the research period, we faced challenges such as restrictions on global research activities due to the COVID-19 pandemic and delays of one and a half years or more in the entry of foreign researchers due to immigration restrictions. However, significant research outcomes have been achieved so far, including the discovery of several methods for transcending limits utilizing technology and psychological insights, such as improving reaction time through skin electrical stimulation and enhancing sustained grip strength through distraction techniques.

研究分野：認知神経科学

キーワード：限界突破 脳 潜在過程 知覚 運動

1. 研究開始当初の背景

私たちの能力限界は、直感的には、運動なら筋肉、認知なら脳領域同士の接続といったハードウェアの限界に依存する。どれだけ意識的に念じても限界はそう安々と突破できないことから、この考えは正しそうに見える。



一方、代表の柴田は、潜在認知過程の操作による認知能力の限界を突破する方法を見出した (Science, 2011; Vision Research, 2009)。これら知見は、ハードウェア限界よりもずっと前に、潜在認知過程によって能力に制限がかかっていることを示す (上図)。

能力限界は、そのときの感覚刺激、感情、社会常識といった文脈から潜在的に影響を受けるのである (Marchant, Cure, 2016)。この潜在認知過程による能力の制御は、あえて余力を残しておくためのものなのだろう。ハードウェア限界に対してマージンをもたせることで普段のエネルギー消費を抑えつつ、緊急時にその抑制を緩めるというやり方である。従って、この抑制は意識的には動かせないが、外的な状況次第で潜在認知過程に変化が起これ、普段以上の能力を無自覚のうちに発揮できる。火事場の馬鹿力はその好例である。

以上を踏まえ、本班は健常者を対象に、「潜在認知過程による能力限界制御はどのような脳メカニズムによってなされているか？」を核心的な問いに据え、研究を推進する。

2. 研究の目的

心脳限界の3要素(心、技能、神経接続)に対応した、学習の限界、疲労、反応速度の限界に焦点を当てる(下表)。

心の限界：	学習の限界を制御する潜在的脳メカニズムの理解と限界突破法の開発
技能の限界：	疲労を制御する潜在的脳メカニズムの理解と疲労緩和法の開発
接続の限界：	反応速度の限界を制御する潜在的脳メカニズムの理解と限界突破法の開発

3. 研究の方法

研究1

代表の柴田は、学習の進み具合が潜在認知過程によって制御されることを見出した。この心理実験では、模様の違いを判別する課題の訓練において、情報としては不正確だが、本物の成績評価に比べ伸びの大きい、虚偽の成績評価が用いられた。この虚偽の成績評価が与えられる条件における参加者の成績向上は、本物の成績評価が与えられる条件を上回った。すなわち、虚偽の成績評価によって、学習の限界突破が起こったといえる。この虚偽の成績評価法を援用し、学習の限界を制御する潜在的脳メカニズムを明らかにする。

手順1：心理実験の追試 追試実験を行い、上記結果を再現する。上記結果の効果量は0.6以上と大きく、検定力も高いため、問題なく再現できると見込まれる。

手順2：潜在的脳メカニズムの理解 機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) を用い、訓練中の参加者に本物の成績評価を与える条件および虚偽の成績評価を与える条件における脳賦活パターンを測定する。機械学習技術 (Shibata et al., Science, 2011) を用いて行動および fMRI データを解析し、虚偽の成績評価による学習促進効果を説明する脳部位を同定する。

研究2

技能の繰り返しは疲労を生み、限界に至ると、技能はやがて劣化する。20年ほど前までの疲労研究は、疲労の原因を呼吸循環器や筋肉等の末梢に求めてきた。一方われわれは、疲労は脳で生

じ、末梢の状態とは独立に技能の劣化を引き起こす、という観点に立つ。疲労は、脳が現状をモニターし作りだす、限界の信号とみなせる。すなわち、技能の繰り返しが原因で疲労が生じるのではなく、脳は疲労を自ら作り出し、末梢がダメージを受ける前に技能の繰り返しに歯止めをかけるのである。脳の疲労信号について運動技能を対象にした知見 (Branscheidt et al., eLife, 2019) はあるが、認知技能については手つかずである。以上のことから、「脳で認知的疲労の信号が生じるには、認知技能の繰り返しに対するモニター（意識的知覚）が必要」という仮説を心理実験によって検証し、疲労信号が生じる脳部位の同定と、その部位の操作による疲労緩和法の開発を行う。

手順1：心理実験 予備実験から、片目に提示される縞模様刺激に対する判別課題を繰り返すと、その目に特異的に疲労が起こり、その目に対する縞模様刺激への感度が落ちることがわかっている。これは、参加者が縞模様の繰り返しに意識的に気づいている条件である。一方、もう片方の目にカラフルな動画を提示すると、縞模様の提示が意識にのぼらない条件を作ることができる。もし技能の繰り返しに対する意識が脳内の疲労信号生成に寄与するなら、意識なし条件では繰り返し提示後の縞模様に対する感度の低下が緩和されるはずである。これが確かめられれば、繰り返しに対する意識が潜在的に疲労の蓄積を引き起こす、という仮説が支持される。

手順2：潜在的脳メカニズムの理解 上記研究1の手順2と同様、fMRIにより意識ありとなし条件の脳賦活を測定し、機械学習を用い疲労緩和効果を説明する脳部位を同定する。

手順3：疲労緩和法の開発 意識あり条件で疲労を生じさせたのち、リアルタイム脳情報解読フィードバック法や脳刺激法を用い、意識なし条件における疲労緩和効果に関連する賦活パターンに介入をかける。実際に疲労緩和効果が得られた場合、その部位が脳の疲労信号生成に因果的に関わることがわかり、かつ、疲労を緩和するための脳操作法のプロトタイプができたことになる。

研究3

健常者において脳の神経接続が重要な役割を果たす機能として、視覚運動反応があげられる。特に、視覚刺激に対する運動反応速度には、脳部位同士の大域的な機能的結合パターンが関係する (Zhou et al., Neurosci, 2012)。本研究では、この脳の機能的結合パターンに規定される反応速度限界のメカニズムと、その限界を突破するための脳操作法を開発する。

手順1：心理実験の追試 視覚刺激に対する運動反応速度の限界が、背景刺激の種類に応じて変化するという現象がある。赤い四角が提示されたらボタンをできるだけ早く押すという課題において、課題に関係のないバイオモーション（人が動いているように見える運動するドット群）を背景に提示すると、ランダムなドット運動を提示した場合に比べ、ボタン反応が早まる。つまり、背景刺激を変えるだけで、反応速度の限界を操作できるのである。まず追試実験を行い、この現象を再現する。

手順2：潜在的脳メカニズムの理解 fMRIを用いて、上記2つの条件における脳賦活を測定する。機械学習手法 (Yahata, Shibata et al., Nat Commun, 2016)を用い、反応速度促進効果を説明する脳部位間の機能的結合パターンを同定する。

4. 研究成果

2020年度

本課題は2020年10月に開始され、2020年度は5ヶ月間のみの実施であった。この5ヶ月は特に、2021年度からの研究を加速するため、研究環境を整備・構築し、研究アイデアを蓄積し、予備的な実験を開始することに主に注力した。2020年度内の着任を見込んでいた外国人研究員は、コロナの蔓延に伴う日本政府のビザ発給停止による影響で、来日時期が未定になった。研究者側の努力ではどうにもならない問題で、日本政府の方針に依存するが、着任は早くとも2021年度の夏以降になると見込まれた。従って、当初予定していたよりも研究計画は多少後ろ倒しにする必要が出た。研究技術員についても、コロナ禍の混乱等が主な原因で、2020年度の雇用には至

らなかった。しかし、2021 年度初頭の着任にこぎつけることはできた。提案研究に関わる実験について、予備的な検討を進め、これまで、行動実験パラダイムの追試を試みた。詳細な解析に至っておらず、まだ明確な結果は得られていないが、2021 年度に継続して検討を行う予定である。コロナ禍において実験の実施に制限があった一方、関連文献を読み込む時間や研究内容について考える時間を取ることはできたので、2021 年度以降の活動に活用した。研究環境や研究技術の整備・構築として、計算用パソコンの購入とセットアップを行った。また理化学研究所の MRI センターに勤務する研究技術員と協力し、リアルタイム脳情報解読フィードバック法を実施するための機材やソフトウェア、アルゴリズムを整備し、リアルタイム脳情報解読フィードバック法を用いた実験のための環境を整えた。

2021 年度

コロナ禍が原因で着任が遅れていた研究技術員は 2021 年度初頭に着任が叶ったものの、外国人研究員の着任は 2021 年 11 月下旬まで最終的にずれ込んだ。そのため 研究計画に一定の遅れがあったが、2021 年度は主として行動実験、脳刺激実験、脳波実験を行った。研究 1 に関して、行動実験と脳刺激実験で、指運動の学習の限界を超える方法を調べるために指の系列順序運動訓練の前後に異なる訓練を挟んだり、系列順序運動訓練のあとに 脳の特定の部位を経頭蓋磁気刺激 (TMS) を断続的に刺激する実験を行った。TMS を一次運動野に打った場合と体性感覚野に打った場合で学習結果が異なるという 知見が得られつつあり、この実験を予備実験として 2022 年度に本実験を行う予定を立てた。また研究 3 に関して、指を動かす単純な反応時間課題を用いて、反応時間の限界を超えるための方法を模索した。ソニー・コンピュータ・サイエンス・ラボラトリーとの共同研究から、皮膚電気刺激により筋肉を人工的に駆動させる方法によって、通常の訓練では達成不可能な反応時間の向上を達成する方法を見つけた。この成果をヒューマン・コンピュータ・インターフェイス分野のトップ国際会議である CHI 21 で発表した。脳波実験では柔軟な認知的判断を促進する脳の仕事みや判断の締切に迫られた極限状態での意思決定のメカニズムについて調べている。2021 年度はデータ計測に費やしたが、2022 年度も継続して実験を行う。その他、視覚の学習において、既知のパラダイムでは学習が成立しない状況で学習を起こすことが可能なパラダイムを発見し、国際学会である Vision Sciences Society で発表した。また、本研究におけるコア技術のひとつである fMRI ニューロフィードバックの本の執筆に関わり、一章分を担当した。

当該年度成果として出版された論文・書籍：

Preserving Agency During Electrical Muscle Stimulation Training Speeds up Reaction Time Directly After Removing EMS, Kasahara S, Takada K, Nishida J, Shibata K, Shimojo S, & Lopes P, Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 1-9.

Mechanisms of fMRI neurofeedback, Shibata K, in fMRI Neurofeedback, Edited by Michelle Hampson, Academic Press, 2021.

2022 年度

2022 年度は運動学習、運動パフォーマンス、視覚の学習に関わる研究に従事した。研究 1 に関して、運動学習の限界突破についての研究では、2 つの成果が得られた。第一に、指の系列順序運動訓練の前後に異なる訓練を挟んだり、脳の特定の部位を経頭蓋磁気刺激 (TMS) で刺激する実験を行った。TMS を一次運動野に打つか体性感覚野に打つかで結果が異なるという知見が得られ、Motor Control 研究会にて発表を行った。第二に、外骨格ロボットを用いて受動的に指を動かす実験系を構築した。すでに学習した指運動に対して、学習の 1 日から数日後に同じ運動を受動的に被験者に経験させると、さらなる運動学習の促進が得られることがわかった。この知見は班会議で発表した。研究 2 に関して、運動パフォーマンスの限界突破に関わる研究では、「運動課題から気をそらすことで運動パフォーマンスの限界を超えることができる」という仮説にもとづいた実験を行った。グリップを最大限の力で握り続けるという課題を行う傍らいくつかの認知課題を行うと、認知課題が難しいほどグリップをより強く握れることが わかった。この結果は、脳が自己の運動をパフォーマンスに対して普段は能動的に抑制をかけており、記憶課題によって気が散った結果この抑制が弱まることを示唆している。これらの知見も班会議で発表した。視覚の学習に関わる実験では、2 つの成果が得られた。第一に、異なる課題を用いたとしても 2 つの学習の干渉が避けられない状況があることを発見し、視覚の学習における限界メカニズムの理解に寄与した。この知見は iScience 誌に掲載された。第二に、伝統的な人工視覚刺激では学習が不可能であった訓練条件において、自然界に見られる視覚特徴を備えた視覚刺激を用いれば、これまで考えられていた学習の限界を超えた学習結果が得られることを発見した。またその学習における脳メカニズムを示すための脳イメージング実験も行った。

当該年度成果として出版された論文・書籍：

Decrease in signal-related activity by visual training and repetitive visual stimulation, (*co-first author) Marzoll A*, Shibata K*, Toyozumi T, Chavva I, & Watanabe T, *iScience*, 2022, 25(12):105492.

The phase of plasticity-induced neurochemical changes of high-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation are different from visual perceptual learning, Lin SN, Lien YR, Shibata K, Sasaki Y, Watanabe T, Lin CP, & Chang LH, *Scientific Reports*, 2023, 13:5720.

「心の病」の脳科学 なぜ生じるのか、どうすれば治るのか(第10章担当), 講談社.

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Kasahara Shunichi, Takada Kazuma, Nishida Jun, Shibata Kazuhisa, Shimojo Shinsuke, Lopes Pedro	4. 巻 1
2. 論文標題 Preserving Agency During Electrical Muscle Stimulation Training Speeds up Reaction Time Directly After Removing EMS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3411764.3445147	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kazuhisa Shibata, Daiki Ogawa, Yuka Sasaki, & Takeo Watanabe
2. 発表標題 Higher-order statistics contained in natural scenes allow task-irrelevant visual perceptual learning of supra-threshold orientation to occur
3. 学会等名 Vision Sciences Society Annual Meeting（国際学会）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Michelle Hampson, Kazuhisa Shibata	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Academic Press	5. 総ページ数 345
3. 書名 fMRI Neurofeedback	

〔産業財産権〕

〔その他〕

心脳限界のメカニズム解明とその突破
<https://www.brainlimit.jp/>

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
---------	---------