

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 3 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K11578

研究課題名（和文）タイミング制御課題学習と小脳機能に関する運動神経生理学的研究

研究課題名（英文）Cerebellar function on timing control motor task

研究代表者

船瀬 広三（Funase, Kozo）

広島大学・人間社会科学研究科（総）・教授

研究者番号：40173512

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：C画面上の移動標的（ボール）をバットで打ち返すタイミング一致課題（coincident timing task: ColT task）中の外乱に対する時間適応学習中の小脳機能を検討した。被験者は、予期せぬバットスイング速度やボール速度の変化に対して、設定範囲内にボールを打ち返すよう、反応タイミング調節を指示された。ペアパルス経頭蓋磁気刺激法を用いて、時間適応学習前、学習中、学習後に小脳抑制（cerebellar brain inhibition: CBI）を測定した。その結果、CBIの脱抑制が、時間適応学習中および学習後に見られ、小脳が時間適応学習に重要な役割を果たすことが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

“タイミング制御に関する運動学習の中枢機序”を探る本研究課題は、野球やテニス等、移動標的に対してバットやラケットを正確にミートさせることが求められるスポーツスキル学習にとって重要な意義を有する。得られた結果は、タイミング一致課題学習の中枢メカニズムの解明に加えて、実際のスポーツ場面で見られる移動標的に対するタイミングスキル学習法に新たな知見を提供し、昨今、指摘される体力劣化要因になる運動の苦手意識を克服するトレーニング法の開発に資すると共に、既に優れた運動スキルを獲得しているアスリートに対して、新たな運動スキル学習の効率化という視点から有益な知見を提供するものである。

研究成果の概要（英文）：The role of the cerebellum in temporal adaptive learning during a coincident timing task, i.e., a baseball-like hitting task involving a moving ball presented on a PC display was investigated. The subjects were required to change the timing of their responses based on imposed temporal perturbations. Using paired-pulse transcranial magnetic stimulation, we measured cerebellar brain inhibition (CBI) before, during, and after the temporal adaptive learning. Reduction of CBI, i.e., disinhibition, were observed during and after the temporal adaptive learning. The results showed that the cerebellum is essential for the temporal learning to control the timing of movements during temporal adaptation.

研究分野：運動神経生理学

キーワード：スポーツ科学 経頭蓋磁気刺激 小脳抑制 タイミング一致課題 時間適応学習

1. 研究開始当初の背景

“ タイミング制御に関する運動学習の中枢機序 ” を探る本研究課題は、野球やテニスなど、ボール等の移動標的に対してバットやラケットを正確にミートさせることが求められるスポーツ種目のスキルにとって重要な意義を有する。動的目標と自身の運動とのタイミングを的確に合わせるためには、移動標的速度や方向性を正確に知覚することに加え、それに対応するための自身の動作に要する時間を正確に把握していることが求められる。これら 2 つの要素に要する時間的予測を正確に行うことができれば、運動開始前に逆算して“ 自身の動作をいつ開始すべきか ” を的確に判断し、より正確なタイミング一致スキルを発揮することが可能になる。

本研究課題で採用した“ タイミング一致課題 (coincident timing task: CoIT task)” は、移動標的をバットやラケットで打ち返すタイプのスポーツ種目にとっては、パフォーマンス結果と直結する重要課題である。CoIT task に関する先行研究では、運動学習に伴うパフォーマンス指標の変化を解析した研究が多く、その背景となる脳の中枢メカニズムについてはブラックボックスとして扱われてきた。しかしながら、ヒトを研究対象とした脳科学研究手法の開発により、これまで主に動物モデルを対象とする神経生理学で実施されてきた中枢神経機能へのアプローチが、ヒトにおいても実施可能となっている。この流れは、スポーツ科学での運動制御研究においても同様で、経頭蓋磁気刺激 (transcranial magnetic stimulation: TMS) や脳磁図、機能的核磁気共鳴画像を用いた先端的な研究が実施されている。このような経緯の中で“ CoIT task ” の中枢メカニズムを、ヒトを対象とした実験手法を用いて迫ろうと点が本研究の特色である。

得られた結果は、ヒトにおけるタイミング一致課題学習の中枢メカニズムに加えて、実際のスポーツ場面で見られる移動標的に対するタイミングスキル学習法に新たな知見を加える可能性がある。同時に昨今、指摘されているされている体力の劣化の要因となる運動の苦手意識を克服するトレーニング法の開発や、既に優れた運動スキルを獲得しているアスリートに対しても、新たな運動スキル学習の効率化という視点から有益な示唆を与える可能性を有している。

2. 研究の目的

我々の研究室では、これまで長期間の運動スキル練習が脳皮質一次運動野 (primary motor cortex: M1) の興奮性を高めること (Hirano et al. 2014)、また、新規運動学習においても学習早期段階に続く学習後期段階期間が長い (学習後の反復練習回数が多い) ほど、主動作筋支配の M1 興奮性は増大し、その学習保持能力も高くなることを報告した (Hirano et al. 2015)。本研究課題では、これまでの研究対象であった M1 機能から視座を展開し、前述した新規運動学習早期段階での学習効果の遅速に影響する小脳の運動学習機能に焦点を当てることとした。先行研究では、運動学習課題として、標的位置の“ ずれ ” を外乱条件とし、“ ずれ ” に対する空間適応学習を行わせ、学習前後における小脳機能を、paired-pulse TMS 法を用いた小脳 - M1 抑制 (cerebellar brain inhibition: CBI) 量の変化を生理指標として測定し、結果として学習による CBI の減弱 (脱抑制) を報告している (Schlerf et al. 2012)。一方、スポーツスキルに限らず楽器演奏等においても、空間適応学習と同様に時間適応学習も重要な問題である。そこで、本研究では、多くのスポーツ種目で見られる移動標的に対する“ CoIT task ” の学習に関わる小脳機序について、CBI 量の変化を生理指標として調べることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 実験1に参加した被験者は健常右利き成人20名であった。利き手の判定にはエジンバラ利き手テストを用いた。実験は、ヘルシンキ宣言に則り、被験者には事前に本実験の目的、方法、安全性について口頭で説明し、書面による承諾を得た上で実施した。TMSの使用については、臨床神経生理学会による安全性に関するガイドラインの基準に従った。なお、実験の実施に当り事前に広島大学総合科学部研究科倫理委員会の承認を得た。被験者を無作為に faster swing (F) グループ(男性10名, 21.6±2.0歳) と slower swing (S) グループ(男性8名, 女性2名, 22.3±2.8歳), 各10名ずつにグループ分けした。

実施した“CoIT task”は、LabVIEW (National Instruments Japan, Co.) を用いて自作した。被験者は、PC モニター (ASUSTeK Computer Inc., ROG SWIFT PG258Q, size: 24.5 inch., refresh rate: 240 Hz) の上部から下部へ一定速度で移動する黒丸(ボール)を画面上に設定した黒の棒状ライン(バット)で打ち返し、打球がPCモニター上部中央に設定された標的範囲内に到達するように、右手人差し指でのPCマウス(Razer Inc., Death Adder Elite, polling rate: 1000 Hz)左クリックによるバットスイング開始時点をコントロールすることが求められた。ボール射出からマウスクリックまでの時間を click time (CT) として測定した。試行完了後、実際にボールが到達した位置と標的範囲中央(エラー0)位置との角度のずれを constant error (CE) として測定した。CEはボールが標的範囲より右側に到達すれば正の値となり、左側に到達した場合には負の値となる。そこで、CoIT task のパフォーマンスの正確性を評価するためにCEの絶対値 absolute error (AE) を併せて求めた。まず、一定のバットスイング速度での練習試行(1ブロック10回×2ブロック)を行わせ、被験者にCoIT task を経験させた。被験者には、できるだけ標的範囲内にボールを打ち返すように指示した。休憩後ベースラインとして15ブロック、計150試行を行わせた。その後、Fグループにはバットスイングを速める(cond F), Sグループにはバットスイングを遅くする(cond S)外乱を与え、ミートタイミングの時間的ずれに対する適応学習(15ブロック計150試行)を行わせた。前半5ブロックを早期学習段階、後半10ブロックを後期学習段階とした。また、両グループともに対照条件としてバットスイングが速くなったり遅くなったりするランダム条件(cond R)を与えた。外乱条件終了後、wash out として再ベースライン条件(15ブロック計150試行)を再び行わせた。ベースライン条件、外乱条件、再ベースライン条件の実施中、被験者にはバットスイング軌跡の視覚フィードバックは与えずに暗黙的学習を行わせた。

ベースライン条件、学習早期段階、学習後期段階、各期間終了直後にCBIを3回測定した。被験筋はマウスクリックの主動作筋である右手第一背側骨間筋(first dorsal interosseous: FDI)とし、8の字コイルを用いて、FDI支配の左大脳半球M1にTMSを試験刺激(test stimulus: TS)として安静時閾値の120%強度でTMSを与え、振幅1~2mVの運動誘発電位(motor evoked potential: MEP)を誘発した。CBIはダブルコンコイルを用いて右側小脳半球への条件刺激(conditioning stimulus: CS)し、CS後5~6msの刺激間隔でTSを与えて誘発した。CS強度は、TSで誘発されるMEP振幅の70%(CBI₇₀)になるようTMS強度を調節した。ただし、最大出力の80%強度でもCBI₇₀を得られなかった場合には、最大出力70%でCSを与えた。MEP測定は、TSのみ、CS+TSをランダムに15回ずつ測定し、それぞれの平均振幅値を求めた。

(2) 実験2では外乱条件を変更した。実験1では、一定速度の移動標的であるボールを標的範囲に打ち返すことを課題とし、一定のボール速度条件のもと、外乱条件としてバットスイング速度を暗黙的に変化させ、その外乱に対応して与えられたパフォーマンスを維持するために時間適応学習を行わせてCBIの変化を測定した。実験2では、より現実のスポーツ場面で見られる外

乱条件，例えば，野球において投手が投じる“速球”と“チェンジアップ”のコンビネーション等を想定した外乱条件を設定するために，一定のバットスイング条件のもと，移動標的となるボール速度の変化をさせた．実験 1 ではバットスイング速度の変化は，被験者に暗黙的に提示されるが，実験 2 では打ち返すボールの速度変化が外乱となるため，必然的に明示的に提示される．外乱条件の違いを除く，実験プロトコル，パフォーマンス評価，CBI 測定等は実験 1 と同様であった．実験 2 に参加した被験者は健常右利き成人 16 名であった．利き手の判定，倫理申請手続きは実験 1 と同様であった．被験者を無作為に faster ball (F) グループ (男性 5 名，女性 3 名， 22.5 ± 2.3 歳) と slower ball (S) グループ (男性 3 名，女性 5 名， 21.9 ± 2.4 歳)，各 8 名ずつにグループ分けした．F グループにはボール速度を速める (cond F)，S グループにはボール速度を遅くする (cond S) 外乱を与えた．

4．研究成果

(1) 実験 1 で得られた結果は以下の通りである．CoIT task パフォーマンスは，概ね実験計画通りの結果を得た．CT は外乱直後に，cond F ではバットスイング開始を遅くし，cond S ではバットスイング開始を早くした．両条件とも cond R ではベースラインに比較して変化せず，学習は成立しなかった．CE は cond F，cond S ともに外乱直後に増加したが，試行数を重ねるに連れて減衰し学習効果が認められたが，cond R では認められなかった．CBI は，cond F，cond S ともに，学習早期段階，後期段階においてベースラインに比較し脱抑制を示したが，cond R では示さなかった．実験 1 では，CoIT task 中に与えられるバットスイング速度の変化という暗黙的外乱に対して時間適応学習が進み，CBI は脱抑制を示した．CBI は小脳プルキンエ細胞の抑制性出力が，小脳核 - 視床経路を経て M1 興奮性に対して抑制効果をもたらす．これは，CoIT task 遂行中に与えられる外乱によって生じる行為 (CT) と行為の結果 (標的範囲へのボールの打ち返し) の“時間的ずれ”が，反復性誤差修正学習によって小脳プルキンエ細胞に長期抑圧が生じたためと解釈できる．したがって先行研究 (Schlerf et al. 2012) で示された空間適応学習に対する小脳機能の変化は，時間適応学習によっても生じることが示された．

(2) 外乱に対して暗黙的学習となった実験 1 に比較して，外乱に対して明示的学習となった実験 2 における CoIT task パフォーマンスには実験 1 との差異が見られた．CT はボール速度の変化に対応するために，外乱直後に，cond F ではバットスイング開始を早く，cond S ではバットスイング開始を遅くした．Cond R では CT の変化は認められなかった．CE は cond F，cond S ともにベースラインに比較して外乱直後も変化しなかった．これは外乱が明示的に与えられたことで外乱に対しても，標的範囲への打ち返しが可能となったものと考えられる．CE は，cond F，cond S，cond R，いずれにおいても明確な変化は示さなかったが，AE の変化を検討したところ，実験 1 では学習効果が見られなかった cond R において，AE に学習効果が認められた．外乱が明示的に提示されたことで，外乱直後にベースラインに比較して AE は増大し，試行数を重ねるに連れて減衰し，cond R においても学習効果が認められた．CBI は cond F，cond S では実験 1 の結果と同様，学習早期段階，後期段階においてベースラインに比較して脱抑制を示した．加えて，実験 2 において学習効果が見られた cond R においても，CBI の脱抑制が認められた．以上の結果は，移動標的の速度変化に対する時間適応学習においても，実験 1 と同様の小脳機能の変化が生じたものと考えられる．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tanaka S, Hirano M, Funase K	4. 巻 239
2. 論文標題 Modulation of cerebellar brain inhibition during temporal adaptive learning in a coincident timing task	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Experimental Brain Research	6. 最初と最後の頁 127-139
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00221-020-05963-z	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 -

1. 著者名 Hirano M, Funase K	4. 巻 122
2. 論文標題 Reorganization of finger covariation patterns represented in the corticospinal system by learning of a novel movement irrelevant to common daily movements	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Neurophysiology	6. 最初と最後の頁 2458-2467
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1152/jn.00514.2019	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 -

1. 著者名 Tanaka S, Funase K	4. 巻 28
2. 論文標題 Role of cerebellum for the temporal adaptation to the changes of velocity of a moving target in a coincident timing task	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advances in Exercise and Sports Physiology	6. 最初と最後の頁 65-73
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 田中新也, 船瀬広三
2. 発表標題 一致タイミング課題における標的速度変更後の速度変更後の再学習における小脳の役割
3. 学会等名 第29回日本運動生理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中新也, 船瀬広三
2. 発表標題 運動開始タイミング学習における小脳役割
3. 学会等名 第27回日本運動生理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 船瀬広三
2. 発表標題 ヒト運動制御研究の成果と未来
3. 学会等名 第27回日本運動生理学会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tanaka S, Funase K
2. 発表標題 Modulation of cerebellar brain inhibition during adaptive learning in coincident timing task
3. 学会等名 Australian Neuroscience Society, Sensorimotor Satellite Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

広島大学人間社会科学部人間総合科学プログラム運動神経生理学研究室
<https://home.hiroshima-u.ac.jp/funase/index1.htm>

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