

〔博士論文概要〕

運動トレーニングが皮質脊髄路に及ぼす影響

平成27年度

福 本 寛 之

筑波大学大学院人間総合科学研究科体育科学専攻

ヒトの随意運動の発現・制御に重要な役割を果たす皮質脊髄路の興奮性を検査するために、経頭蓋磁気刺激法 (transcranial magnetic stimulation: TMS) が開発され、より簡便な大脳刺激法が実現している¹⁾。また、持続性筋収縮中に TMS を与えると運動誘発電位 (motor evoked potential: MEP) の発現の後に CSP (cortical silent period) が出現し²⁾、100 ms 以上続く CSP duration は大脳皮質を起源とする GABA_B 作動性ニューロンを介した皮質脊髄路に対する抑制効果であることが知られている^{3) 4)}。つまりこの MEP と CSP の両方を測定することで随意運動の発現過程を詳細に評価することが可能となる⁵⁾。これまでに単一運動課題中⁶⁾、または運動イメージ中の皮質脊髄路の興奮性が多く評価されてきたが、実際の日常生活場面やスポーツ場面で遭遇する二重課題時の皮質脊髄路の興奮性ならびに皮質抑制性についてはほとんど明らかにされていない。さらに、一次運動野 (primary motor cortex: M1) や皮質脊髄路は柔軟な可塑性を有することが近年報告されているが、これまでに長期的なスポーツ競技経験者の二重課題遂行時の皮質脊髄路の興奮性の変化を報告したものはほとんどなく、さらに、短期的なトレーニングが二重課題遂行時の皮質脊髄路に及ぼす影響について検討したものも見当たらない。

以上のことから、本研究では二重課題の遂行が皮質脊髄路に及ぼす影響ならびに運動トレーニングが二重課題遂行中の皮質脊髄路に及ぼす影響を検討し、随意運動発現過程に関する知見を得ることを目的とする。このことは、パフォーマンスの向上に伴う背景メカニズムを知るためにも重要であると考えられる。

本博士論文では運動トレーニングが二重課題遂行時の皮質脊髄路に及ぼす影響を検討するために、以下の研究課題を設定して実験を行った。

1. 健康成人男性を対象に、二重課題の遂行が、皮質脊髄路の興奮性に及ぼす影響について MEP を指標に検討する（研究課題 1-1）。
2. 健康成人男性を対象に二重課題の遂行が随意運動発現に及ぼす影響を MEP と皮質抑制性の指標である CSP の両方を指標として検討する（研究課題 1-2）。
3. 長期的な運動トレーニングが二重課題遂行時の皮質脊髄路の興奮性に及ぼす影響について MEP を指標に検討する（研究課題 2-1）。
4. 長期的な運動トレーニングが二重課題の遂行が随意運動発現に及ぼす影響を MEP と CSP の両方を指標として検討する（研究課題 2-2）。
5. 短期間の運動トレーニング（二重課題）が二重課題遂行時の皮質脊髄路に及ぼす影響を MEP と CSP の両方を指標として検討する（研究課題 3）。

【研究課題 1-1】では、運動課題（ハンドグリップ把持課題）と認知課題（計算課題）から成る二重課題の遂行が、皮質脊髄路の興奮性に及ぼす影響について検討した。さらにハンドグリップ把持における異なる筋力発揮が、二重課題遂行中の皮質脊髄路の興奮性の変化に及ぼす影響についても検討した。その結果以下の知見が得られた。

- 1) Rest 条件と Calc 条件の比較において MEP 振幅に有意差はなかった。
- 2) ハンドグリップ把持の収縮強度が 10% MVC での DT 条件では、ST 条件と比較して FDI の MEP 振幅が有意に低下し、30% MVC の収縮強度では、FDI と FCR の MEP 振幅が DT 条件時に有意に低下した。
- 3) 10% MVC, 30% MVC のどちらの筋力発揮時でも、TMS 前 100 ms の背景 EMG (background EMG: bEMG) 面積値に ST 条件と DT 条件との間に有意差は認められなかった。

以上のことから、DT 条件時の皮質脊髄路の変化は、脊髄レベル以下の運動指令の変化よりも、脊髄より上位の運動中枢での興奮性の変化であると言える。このことから、運動課題を遂行しながら、同時に認知課題を遂行することで注

意の分散が起き、M1からの下行性運動指令に干渉が起きたと考えられる。また二重課題遂行による注意の分散は、筋力発揮が大きくなり、より大きな運動単位が動員され、また動員される運動単位が多くなるほど、M1からの下行性運動指令に干渉を与えやすくなるということが示唆された。

【研究課題 1-2】では、健康成人男性を対象に運動課題（ハンドグリップ把持課題）と認知課題（計算課題）から成る二重課題の遂行が、皮質内抑制性に及ぼす影響について MEP ならびに CSP を指標として検討し、以下のような結果が得られた。

- 1) ハンドグリップ把持の収縮強度が 10% MVC での DT 条件では、FDI の MEP 振幅が有意に低下し、30% MVC の収縮強度では、FDI と FCR の MEP 振幅が DT 条件時に有意に低下した。
- 2) 皮質抑制性の指標である CSP duration は 10% MVC での DT 条件時に FDI において、30% MVC では FDI と FCR において CSP duration の有意な延長が見られた。
- 3) 10% MVC, 30% MVC のどちらの筋力発揮時でも、TMS 前 100 ms の bEMG 面積値は ST 条件と DT 条件との間に有意差は認められなかった。

以上のように、二重課題遂行時には bEMG 面積値の変化はなく、CSP duration が延長したことから、運動課題を遂行しながら同時に認知課題を遂行することでそれぞれの課題に注意が分散し、皮質抑制性がより活動的になった結果として皮質脊髄路の興奮性が低下したことが示唆される。そして筋力発揮を大きくさせ、また動員される運動単位が多くなるほど二重課題遂行時の皮質抑制性がより活動的になることが考えられる。また遂行機能に関わり M1 に間接的に線維連絡のある前頭連合野背外側部（dorsolateral prefrontalcortex; DLPFC）で干渉が生じていることも考えられ、結果として二重課題遂行時に皮質脊髄路の興奮性が低下したことが示唆された。

【研究課題 2-1】では、長期的な運動トレーニングを行っているハンドボール選手（アスリート群）と日常的な身体活動習慣のない者（一般群）を対象に長期的な運動トレーニングが二重課題遂行時の皮質脊髄路興奮性に及ぼす影響を

検討することを目的とした。その結果以下の知見が得られた。

- 1) アスリート群の MEP 振幅は筋力発揮の大きさならびに課題に関係なく一般群より有意に高かった。
- 2) アスリート群は、筋力発揮の大きさに関係なく一般群より **dual task interference** の程度が小さかった。
- 3) 両群とも DT 条件の認知課題の正答率が低下し、長期的な運動トレーニングは本研究の認知課題の正答率には影響しないことが示唆された。
- 4) bEMG 面積値に群間の差はなかったことから、アスリート群と一般群の MEP 振幅の違いは、M1 を含む脊髄上位レベルで長期運動トレーニングによる可塑的变化が影響していることが示唆された。

以上のことから、長期的な運動トレーニングによって、二重課題遂行中の一次課題である運動課題への **dual task interference** の程度は小さくなり、M1 を含む脊髄上位レベルで可塑的变化が生じていることが示唆された。

【研究課題 2-2】では、長期的な運動トレーニングを行っているハンドボール選手（アスリート群）と日常的な身体活動習慣のない者（一般群）を対象に長期的な運動トレーニングが二重課題遂行時の皮質抑制性に及ぼす影響について検討することを目的とした。その結果以下の知見が得られた。

- 1) アスリート群の MEP 振幅は筋力発揮の大きさならびに課題に関係なく一般群より有意に高かった。
- 2) アスリート群の **CSP duration** は筋力発揮の大きさならびに課題に関係なく一般群より有意に延長した。
- 3) アスリート群はと一般群の **CSP** に関する **dual task interference** の程度の差はなかった。

以上のことから、二重課題遂行中の皮質抑制性の変化の程度は長期的な運動トレーニングによって影響を受けないが、大脳皮質ニューロンの興奮と抑制のバランスが群間で異なるということが示された。すなわちアスリート群は興奮性ニューロンをより活動的にすると同時に抑制性ニューロンの活動も亢進させ最終的な筋発揮を維持している。一方で、一般群はアスリート群に比べて抑制性

ニューロンの活動を減弱させることで最終的な筋発揮を維持していることが示唆された。

【研究課題 3】では，一般健康成人を対象に短期間の二重課題トレーニングが皮質脊髄路の興奮性ならびに皮質抑制性に及ぼす影響を検討し以下の知見を得た。

- 1) ST 条件と DT 条件における TMS 前 100 ms の bEMG 面積 (% MVC) は短期間のトレーニングの影響を受けなかった。
- 2) 短期間のトレーニングにより，皮質脊髄路の興奮性は増大し，特に DT 条件でその変化が大きかった。
- 3) 短期間のトレーニングによって CSP duration が短縮すること（脱抑制現象）が認められ，その変化は，ST 条件より DT 条件での変化が大きかった
- 4) MEP 振幅は，トレーニング後半での増大が見られたが，CSP duration はトレーニング前半から短縮する結果となった。

本研究課題での MEP ならびに CSP duration の変化は脊髄より上位レベルでの変化と考えられる。短期間のトレーニングは，特に DT 条件での皮質脊髄路の興奮性の増大と皮質抑制性の脱抑制現象を引き起こし，脱抑制現象はトレーニング前半から認められた。このことから短期間のトレーニングによって二重課題遂行中に皮質脊髄路の興奮性が低下するという運動出力の干渉を克服するために皮質抑制性を減弱させている（脱抑制をさせている）ことが考えられる。つまり，短期間のトレーニングは皮質脊髄路の興奮性と皮質抑制性のバランスに影響を及ぼすことが示唆された。

本博士論文全体から，運動トレーニングは随意運動の発現に関わる運動中枢である一次運動野，皮質脊髄路に可塑的な変化を生じさせ，二重課題遂行時には運動出力の干渉を克服するために皮質脊髄路の興奮性と皮質抑制性のバランスに影響を及ぼすことが示唆された。

参考文献

- 1) Barker AT, Jalinous R, Freeston IL: Noninvasive magnetic stimulation of human motor cortex. *Lancet*, i: 1106-1107, 1985
- 2) Rothwell JC, Thompson PD, Day BL, Boyd S, Marsden CD: Stimulation of the human motor cortex through the scalp. *Exp. Physiol.*, 76: 159-200, 1991
- 3) Siebner HR, Dressnandt J, Auer C, Conrad B: Continuous intrathecal baclofen infusions induced a marked increase of the transcranially evoked silent period in a patient with generalized dystonia. *Muscle & Nerve*, 21: 1209-1212, 1998
- 4) Werhahn KJ, Kunesch E, Noachtar S, Benecke R, Classen J: Differential effects on motorcortical inhibition induced by blockade of GABA uptake in humans. *J. Physiol.*, 517: 591-7, 1999
- 5) Hasegawa Y, Kasai T, Tsuji T, Yahagi S: Further insight into the task-dependent excitability of motor evoked potentials in first dorsal interosseous muscle in humans. *Exp. Brain Res.*, 140(4): 387-396, 2001
- 6) Ziemann U: TMS and drugs. *Clin. Neurophysiol.*, 115: 1717-1729, 2004