運動イメージにおける持続時間と 脊髄運動ニューロンの興奮性の関係

Relationship between the Duration of Motor Imagery and the Excitability of Spinal Motor Neuron

福本 悠樹^{1,2)} 鈴木 俊明^{2,3)} 岩月 宏泰¹⁾

YUKI FUKUMOTO, RPT, MS^{1,2)}, TOSHIKI SUZUKI, RPT, DMSc^{2,3)}, HIROYASU IWATSUKI, RPT, PhD¹⁾

¹⁾ Graduate School of Health Sciences, Graduate School of Aomori University of Health and Welfare: 58-1 Mase, Hamadate, Aomori-shi, Aomori 030-8505, Japan TEL +81 17-765-2000 E-mail: fukumoto@kansai.ac.jp

²⁾ Clinical Physical Therapy Laboratory, Kansai University of Health Sciences

³⁾ Graduate School of Health Sciences, Graduate School of Kansai University of Health Sciences

Rigakuryoho Kagaku 34(6): 811-816, 2019. Submitted Jul. 8, 2019. Accepted Aug. 1, 2019.

ABSTRACT: [Purpose] We examined whether the excitability of spinal motor neurons changes over time during 5 minutes of motor imagery of exercise load. [Participants and Methods] First, in order to select subjects who could continue the motor imagery for 5 minutes, an evaluation was made using the Uchida-Klepelin psychiatric examination. Thirteen healthy subjects, excepting those rated as lacking concentration, were included in the study. Next, an exercise task of 50% maximum voluntary contraction (MVC) of pinch force was practiced. Then motor imagery of the exercise task was performed for 5 minutes, and the F wave was recorded in the first and last minutes of the motor imagery. [Results] The frequency of appearance of the F wave and the amplitude F/M ratio did not differ between the two periods. [Conclusion] This result suggests that the excitability of the spinal nerve motor neurons can be sustained for 5 minutes of motor imagery of 50%MVC of pinch grip.

Key words: motor imagery, F-wave, Uchida-Kraepelin test

要旨:〔目的〕設定した運動を5分間にわたりイメージさせた際に、脊髄運動ニューロンの興奮性が時間経過に伴い変化するか検討した。〔対象と方法〕まず、運動イメージを5分間継続できる対象者を選抜するために、内田クレペリン精神検査を用いて評価した。集中力を欠くと評価された者を除いた健常者13名を対象とした。次いで運動課題である50% maximum voluntary contraction (MVC)でピンチ力を調節させる練習を行わせた後に、50% MVCの運動イメージを5分間実施させ、最初の1分間と最後の1分間のF波を記録した。〔結果〕F波の出現頻度や振幅F/M比は最初の1分間と比較した最後の1分間で差を認めなかった。〔結語〕十分な集中力を有した者の場合、50% MVCの運動イメージを5分間させても、最初の1分間の脊髄運動ニューロンの興奮性が5分間継続できることが示唆された。

キーワード: 運動イメージ, F波, 内田クレペリン精神検査

¹⁾ 青森県立保健大学大学院 健康科学研究科 健康科学専攻 基礎研究・実用技術領域: 青森県青森市大字浜館字間瀬58-1 (〒030-8505) TEL 017-765-2000

²⁾ 関西医療大学 保健医療学部 臨床理学療法学教室

³⁾ 関西医療大学大学院 保健医療学研究科

1. はじめに

近年、運動機能のリハビリテーションにおける運動イメージの有効性が注目されている。「運動イメージ(motor imagery)」には様々な定義があるが、Jeannerod¹⁾によると、運動の意図や準備といった認知過程の活性化であり、意識的な運動のイメージであるとしている。本稿で使用する運動イメージの定義はこれに準じる。

運動イメージは、実運動と類似する神経基盤を有するとされ、リハビリテーションへの応用を考えた際には、それを深く理解しておく必要がある。運動イメージが記憶、想起などの精神活動を伴うために上位中枢レベルを賦活することは多く報告されている²⁻⁴⁾。一方で、運動イメージが運動の最終出力路である脊髄運動ニューロンに与える影響に関しては、Suzukiら⁵⁾は、ピンチ動作課題における運動イメージ時の脊髄運動ニューロンの興奮性変化を、F波を用いて検討しており、安静時と比較して運動イメージ時には、脊髄運動ニューロンの興奮性が増大すると報告している。さらに、Taniguchiら⁶⁾は、3時間安静にさせると、出現頻度と振幅F/M比は有意に低下するが、安静とともに母指外転の運動イメージを行わせた場合、出現頻度や振幅F/M比は安静前のレベルを維持していたと報告している。また、Kasaiら⁷⁾は、手関節掌背屈の運動イメージを実施させた際、H反射振幅が安静時と差を認めなかったとしている。このように運動イメージ時の脊髄運動ニューロンの興奮性変化に関しては、未だ一定の結論は見出されていない。さらに、臨床応用する際の運動イメージの実施期間について、Yueら⁸⁾は4週間、Guillotら⁹⁾は5週間、Dicksteinら¹⁰⁾は6週間、Ranganathanら¹¹⁾は12週間の運動イメージを実施させており、運動イメージを実施させる適切な期間についても未だ確定されていない。

そのなかで、運動イメージがつまみ動作における運動の正確さに与える影響を脊髄運動ニューロンの興奮性ととも検討した我々の報告¹²⁾では、運動イメージ練習を3日間継続することによって、運動の正確さが向上するとともに、運動イメージ中に脊髄運動ニューロンの興奮性が増大するとわかった。この報告¹²⁾では、1回あたりの運動イメージ実施時間が1分間であった。しかし1回当たり5分間の運動イメージを設けている検討¹³⁾も見受けられた。運動イメージを治療手段の1つとして臨床応用していくために、1回あたりどの程度の運動イメージを実施させることが適切なかを明確にしておく必要がある。また、5分間の運動イメージ課題では、継続的に運動イメージを実施するなかでそれ自体に慣れることが予測される。加えて、5分間の継続した運動イメージが困難であれば、5分間のなかで運動イメージを一時中断した後に、再度運動イメージを開始、つまり運動イメージを繰り返し実施する被験者が出現する可能性

がある。運動イメージを繰り返すことについて、運動イメージの繰り返しは、運動イメージ効果が加重され運動パフォーマンスを向上させる¹⁴⁾とした報告もあることから、これも一つの効果的な運動イメージ方法であると考えられる。ただし、どの程度の時間で1回あたりの運動イメージを実施させるべきかを検討するためには、運動イメージを一時中断するケースに対して、一時中断時の脊髄運動ニューロンの興奮性を把握しておく必要がある。

以上を踏まえ、本研究では、運動イメージを5分間継続して実施させた際に、1分間と比較して脊髄運動ニューロンの興奮性にどのような変化が生じるのかを検討した。そして、追加試験として、運動イメージを一時中断するケースに対し、運動イメージ平均実施可能時間を算出し、その値に最も近かった被験者に対しては、最初と最後の1分間だけでなくその間の運動イメージ開始2分後と3分後、4分後での脊髄運動ニューロンの興奮性も検討した。

脊髄運動ニューロンの興奮性の評価指標は、F波やH反射、T反射と存在するが、F波検査を用いる方法が近年多く報告^{5,6,15)}されている。これまで検討しているようなつまみ動作における運動イメージでは、その運動に参加するのは母指球上の筋群である。このような小さな筋群から脊髄運動ニューロンの興奮性を評価するためには、これを可能とする指標でなくてはならず、それはF波のみとなる。

本研究実施にあたり、5分間の運動イメージを実施させるには、相応の集中力が必要とされる。広辞苑によると、集中力とは「ある物事に向ける意識や注意を持続させることのできる力」とされており、対象者の集中力を検討する方法として、内田クレペリン精神検査が存在する。内田クレペリン精神検査は、1分間の連続加算を30施行実施させる検査で、作業量は時間とともに低下する傾向があり、作業線はU字型をとる。したがって、後半の作業量に大幅な落ち込みを認めた場合、集中力の不十分さが示唆される。しかし、集中力の程度は、与えられる課題によって異なることが予測され、その者が得意とする課題に対する集中力と、苦手とする課題に対する集中力が同程度とは考えにくい。これに関して喜岡ら¹⁶⁾は、注意の配分力や集中力を測定する検査の成績と内田クレペリン精神検査の成績、特に本研究と同様の作業量を比較した際に互換性があるとしている。これを踏まえて三隅ら¹⁷⁾は、運動的作業や精神的作業など、異なる作業課題を有する様々な職種に対して、内田クレペリン精神検査の妥当性を検討し、職種によって明確な違いを結論付けられなかったことを報告している。

以上より、内田クレペリン精神検査にて作業曲線がU字を描かずその後に引き続き作業量の減少を認め、集中力低下の可能性を疑われる被験者は、本研究課題を明確

に遂行できるとは考えにくいいため、対象からは除外することとした。

II. 対象と方法

1. 対象

当初の対象者は健常者 14 名であったが、内田クレペリン精神検査の結果が U 字型とならず後半に作業量が減少した者は集中力や精神疲労の耐性に問題があると判定し、1 名を除外して解析対象者は医療系大学生 13 名（男性 6 名、女性 7 名、平均年齢 21.7 歳）とした。対象者には本研究の意義と目的を十分に説明した後に同意を得た。本研究は青森県立保健大学大学院研究倫理委員会（承認番号：1774）の承認を得て行った。

2. 方法

本試験：被験者に運動イメージを実施させるにあたり、まず Thumb Spica Wrist (Bio Skin 社製) を用いて母指と示指を対立肢位にて固定し¹⁸⁾、ピンチ動作を 50% maximum voluntary contraction (以下、MVC) に調節する実運動を 30 秒間実施させて練習させた。そして、ピンチメーター Digital indicator F340A (Unipulse 社製) にてピンチ力を視覚提示し、その 50% に調節させることで 50% MVC を得た。運動イメージは、この実運動練習から得たイメージを想起させ、5 分間実施させた。いずれの被験者に対しても、与えられた 5 分間は可能な限り運動イメージを行うように指示している。5 分間の継続した運動イメージが困難となる場合には、運動イ

メージを一時中断してもよいが、できるだけすぐに運動イメージを再開するように指示した。5 分間には満たずとも、可能な限り 5 分間は運動イメージを実施させておくよう設定した。運動イメージを 5 分間継続して実施可能であったか否かは、実験終了後に対象者から内省報告を得るようにした。

F 波は、誘発筋電計 Viking Quest (Natus Medical 社製) にて記録した。F 波記録条件は、左手関節部から正中神経を刺激し、左母指球上の筋群に探查電極を、左第 1 中手骨頭背側に基準電極を、左前腕中央部に接地電極を貼付した (図 1)。F 波刺激条件は、0.2 ms での刺激時間とし、最大上刺激 (M 波最大振幅の 1.2 倍強度) を、0.5 Hz で 30 回与えた。F 波分析項目は、1 試行の刺激回数に対して出現した F 波の個数の割合を百分率にて示す出現頻度と、全ての F 波の頂点間振幅の平均を最大 M 波振幅で除して百分率にて示す振幅 F/M 比の 2 つとした。出現頻度は再発火する脊髄運動ニューロンの筋線維数とその発火頻度に影響され¹⁹⁾、振幅 F/M 比は再発火する脊髄運動ニューロンの筋線維数に影響される²⁰⁾。F 波の判定は、Eisen らの報告²⁰⁾ に基づき 35 μ V 以上とし、測定バイアスの考慮のため、最終的な F 波の判定は、F 波記録に精通した著者 S が行うこととし、提示した波形が 1 分後であるか 5 分後であるかは告げなかった。

本研究では、5 分間継続して実施させる運動イメージ開始後の、最初の 1 分間と最後の 1 分間にて記録する出現頻度と振幅 F/M 比を、Wilcoxon の符号順位検定で比較した。統計解析には、統計解析ソフト SPSS ver.19 (IBM 社製) を用い、有意水準は 5% とした。

記録電極：左母指球上の筋群
基準電極：左第 1 中手骨頭背側
刺激電極：左正中神経
接地電極：左前腕中央部

図 1 F 波計測条件

F 波は、誘発筋電計 Viking Quest (Natus Medical 社製) にて記録した。記録条件として、左手関節部から正中神経を刺激し、左母指球上の筋群に探查電極を、左第 1 中手骨頭背側に基準電極を、左前腕中央部に接地電極を貼付した。

追加試験：運動イメージをできるだけ長く実施させるよう指示したが、運動イメージが継続できなくなった場合は、挙手を行わせることで、継続的に実施可能な運動イメージ時間も検討した。そして、運動イメージが一時中断するケースに対して、平均実施可能時間を算出し、その値に最も近かった被験者に対して、最初と最後の1分間だけでなくその間の3分間目と4分間目でもF波の計測を行った。F波記録条件や刺激条件、分析項目は、本試験と同様とした。

III. 結 果

本試験の結果：運動イメージ開始1分後は、出現頻度が $78.8 \pm 17.2\%$ 、振幅F/M比が $1.76 \pm 0.50\%$ であった。運動イメージ開始5分後は、出現頻度が $76.5 \pm 19.9\%$ 、振幅F/M比が $1.67 \pm 0.56\%$ であった。

運動イメージ開始1分後と5分後の出現頻度と振幅F/M比には統計学的な差異を認めなかった（図2）。また内省報告より、5分間の運動イメージを実施可能な被験者は13名中2名であった。

追加試験の結果：内省報告より、5分間の継続した運動イメージが困難となった被験者11名の運動イメージ平均実施可能時間は、3分32秒であった。そして、平均実施可能時間に最も近く運動イメージを中断した被験者は、出現頻度が50%（安静）、77%（1分間目）、73%（2分間目）、56%（3分間目）、77%（4分間目）、77%（5分間目）であり、振幅F/Mが、1.2%（安静）、

2.2%（1分間目）、2.7%（2分間目）、1.7%（3分間目）、2.2%（4分間目）、2.2%（5分間目）であった。

IV. 考 察

運動イメージ開始1分後と5分後の比較において、振幅F/M比と出現頻度の双方が統計学的な差異を認めなかった。これはいずれも5分間のなかでは継続または繰り返しで5分間後も運動イメージを実施できていたためと考える。運動イメージ中には、一次運動野や運動前野、補足運動野などが活動することは既に報告されており²⁻⁴⁾、Suzukiら⁵⁾は、上位中枢からの下行性線維に影響されて脊髄運動ニューロンの興奮性が調節されることを報告している。また、手指の巧緻的な動作には固有脊髄路に関わることが報告されており²¹⁻²⁴⁾、この固有脊髄路は興奮性と抑制性の双方の作用を有するとされる^{25,26)}。したがって、最初の1分間も最後の1分間も双方にて、運動イメージの実施による運動関連領域からの下行性線維の影響または固有脊髄路を介した間接的経路、またはその両方が複合的に関与した結果、同程度に脊髄運動ニューロンの興奮性が高まったため、統計学的な差異を認めなかったと考えられた。そして本研究のように力量を調節させるような運動イメージ課題には、それに適した脊髄運動ニューロンの興奮性の増加幅が存在している可能性があり²⁷⁾、適した範囲内の興奮性増大が、運動イメージ開始1分後と5分後にて反映された結果、差が出なかった可能性がある。

図2 F波の出現頻度と振幅F/M比の比較

F波の出現頻度と振幅F/M比は運動イメージの最初の1分間と最後の1分間で差を認めなかった。

また、本研究では、50% MVCで5分間の運動イメージを指示したが、内省報告より、13名中11名で5分間の運動イメージが継続できず繰り返し実施していたことがわかった。そしてこの11名から得た運動イメージ平均実施可能時間は3分32秒であり、運動イメージ中断のタイミングがこれに最も近かった被験者に対して、運動イメージ開始1分後と5分後だけでなく、その間の2分後と3分後、4分後でもF波の計測を行った。その結果、出現頻度と振幅F/M比は、いずれもが途中3分間に低下し、安静と似た数値となっていた。これに関して、運動イメージ中に脊髄運動ニューロンの興奮性が増大するが、運動イメージが実施されなくなると、すぐにその興奮性が低下する⁵⁾。これより運動イメージ開始3分後で、継続した運動イメージが実施できなくなり、一度中断された後に、最低でも運動イメージ開始4分後で運動イメージが再開されていた可能性がある。

運動イメージにより脊髄運動ニューロンの興奮性増大を求めていく場合には、1分間の運動イメージ実施により、5分間の運動イメージと同程度に神経機能の賦活が得られたため、1分間の運動イメージで十分な効果が得られる。しかし、十分な集中力を有した者であっても、5分間の継続した運動イメージを実施できている者は少なく、不可能な者は繰り返し運動イメージを実施する。

本研究結果より、内田クレペリン精神検査から判断した十分な集中力を有する者に、運動イメージを実施させる際、対象者に適切な運動イメージ時間の設定が可能となる。

検定力分析ソフトG*powerを用いて、本研究に必要なサンプルサイズを算出すると28名となるが、本研究では13名を対象とし検討を行った。今後は、より多くの被験者を対象に同様の検討を行っていくことが必要であると考え。また、5分間と1分間の運動イメージ効果を比較しているが、本研究では5分間継続して運動イメージを実施している者以外に、5分間のなかで運動イメージを繰り返し実施していた者も含めている。5分間のなかで運動イメージを繰り返し実施していたケースは、厳密には5分間の運動イメージを実施していたとは判定し難い面もある。また、運動イメージを繰り返す場合には、運動イメージの一時中断がなされているが、どれほど中断されていたのかを明確に捉えていく必要があり、その時間的差異は運動イメージ鮮明度にも影響される²⁸⁾と考える。これらの点に関して、5分間の継続した運動イメージを実施した者だけの検討を行っていくことや、Vividness of Movement Imagery Questionnaire (VMIQ) や Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaire (KVIQ) といった運動イメージ想起能力をはかる質問指標にて、対象者が鮮明に運動イメージを行えるかも把握していく必要があり、これらは今後の検討課題となる。

利益相反 本研究は青森県立保健大学大学院の院生研究費を主に使用し、当該研究は関西医療大学にてデータ収集および解析を行った。

引用文献

- 1) Jeannerod M: The representing brain: neural correlates of motor intention and imagery. *Behav Brain Sci*, 1994, 17: 187-245.
- 2) Stephan KM, Fink GR, Passingham RE, et al.: Functional anatomy of the mental representation of upper extremity movements in healthy subjects. *J Neurophysiol*, 1995, 73: 373-386.
- 3) Roland PE, Larsen B, Lassen NA, et al.: Supplementary motor area and other cortical areas in organization of voluntary movements in man. *J Neurophysiol*, 1980, 43: 118-136.
- 4) Lotze M, Montoya P, Erb M, et al.: Activation of cortical and cerebellar motor areas during executed and imagined hand movements: an fMRI study. *J Cogn Neurosci*, 1999, 11: 491-501.
- 5) Suzuki T, Bunno Y, Onigata C, et al.: Excitability of spinal neural function by motor imagery with isometric opponens pollicis activity: influence of vision during motor imagery. *NeuroRehabilitation*, 2014, 34: 725-729.
- 6) Taniguchi S, Kimura J, Yamada T, et al.: Effect of motion imagery to counter rest-induced suppression of F-wave as a measure of anterior horn cell excitability. *Clin Neurophysiol*, 2008, 119: 1346-1352.
- 7) Kasai T, Kawai S, Kawanishi M, et al.: Evidence for facilitation of motor evoked potentials (MEPs) induced by motor imagery. *Brain Res*, 1997, 744: 147-150.
- 8) Yue G, Cole KJ: Strength increases from the motor program: comparison of training with maximal voluntary and imagined muscle contractions. *J Neurophysiol*, 1992, 67: 1114-1123.
- 9) Guillot A, Tolleran C, Collet C: Does motor imagery enhance stretching and flexibility? *J Sports Sci*, 2010, 28: 291-298.
- 10) Dickstein R, Dunskey A, Marcovitz E: Motor imagery for gait rehabilitation in post-stroke hemiparesis. *Phys Ther*, 2004, 84: 1167-1177.
- 11) Ranganathan VK, Siemionow V, Liu JZ, et al.: From mental power to muscle power—gaining strength by using the mind. *Neuropsychologia*, 2004, 42: 944-956.
- 12) 今奈良有, 福本悠樹, 鈴木俊明: 継続した運動イメージが運動の正確性に与える影響と脊髄神経機能の興奮性の関連性について: シングルケースによる5日間の検討. *関西理学療法*, 2017, 17: 77-84.
- 13) 文野住文, 鈴木俊明, 岩月宏泰: 異なる筋収縮強度を用いた母指対立運動イメージが脊髄運動神経の興奮性と自律神経活動に及ぼす影響. *理学療法科学*, 2016, 31: 117-125.
- 14) 梅野和也, 中村浩一, 井元 淳・他: 運動イメージ想起能力とメンタルプラクティスの効果との関係—属性の異なる運動イメージ評価法を用いた研究—. *理学療法科学*, 2018, 33: 313-317.
- 15) Rossini PM, Rossi S, Pasqualetti P, et al.: Corticospinal excitability modulation to hand muscles during movement imagery. *Cereb Cortex*, 1999, 9: 161-167.

- 16) 喜岡恵子, 宮地由芽子, 山内香奈: 鉄道における運動適性検査の研究 (4) —作業性検査と注意力 (注意配分・集中・持続) との関連性—. 日本教育心理学会総会発表論文集, 2003, 45: 187.
- 17) 三隅ニ不二, 白樫三四郎, 安藤延男・他: 内田・クレベリン精神検査の妥当性に関する研究. 教育・社会心理学研究, 1961, 2: 139-159.
- 18) 前田章裕, 福本悠樹, 文野住文・他: 装具を用いて母指と示指を対立肢位に固定した時の運動イメージが脊髄神経機能の興奮性に与える影響. 関西理学, 2017, 17: 97-103.
- 19) 小森哲夫, 高橋良輔, 広瀬和彦・他: F波の波形と出現頻度. 臨床脳波, 1988, 30: 1-6.
- 20) Eisen A, Odusote K: Amplitude of the F wave: a potential means of documenting spasticity. *Neurology*, 1979, 29: 1306-1309.
- 21) Kinoshita M, Matsui R, Kato S, et al.: Genetic dissection of the circuit for hand dexterity in primates. *Nature*, 2012, 487: 235-238.
- 22) Takei T, Seki K: Spinal interneurons facilitate coactivation of hand muscles during a precision grip task in monkeys. *J Neurosci*, 2010, 30: 17041-17050.
- 23) Takei T, Seki K: Spinal premotor interneurons mediate dynamic and static motor commands for precision grip in monkeys. *J Neurosci*, 2013, 33: 8850-8860.
- 24) Alstermark B, Isa T, Ohki Y, et al.: Disynaptic pyramidal excitation in forelimb motoneurons mediated via C(3)-C(4) propriospinal neurons in the *Macaca fuscata*. *J Neurophysiol*, 1999, 82: 3580-3585.
- 25) Pauvert V, Pierrot-Deseilligny E, Rothwell JC: Role of spinal premotoneurons in mediating corticospinal input to forearm motoneurons in man. *J Physiol*, 1998, 508: 301-312.
- 26) Pierrot-Deseilligny E: Propriospinal transmission of part of the corticospinal excitation in humans. *Muscle Nerve*, 2002, 26: 155-172.
- 27) 福本悠樹, 鈴木俊明, 岩月宏泰: 練習時間の違いによって運動イメージが運動の正確さと脊髄前角細胞の興奮性に与える影響は異なる. 臨床神経生理学, 2019, 47: 82-92.
- 28) 野村 真, 前田剛伸, 嘉戸直樹・他: 運動イメージの明瞭性の個人差が脊髄神経機能の興奮性に及ぼす影響. 理学療法科学, 2017, 32: 195-199.