

筋疲労および脳疲労が 神経・筋協調性に及ぼす変化 —大腿直筋と大腿二頭筋の silent period を 用いた検討—

Changes in nerve-muscle coordination caused by muscle and brain fatigue:
analysis using the silent period of quadriceps and hamstrings

大西咲子*^{1,2}, 舟崎裕記*¹, 川井謙太郎*^{1,2}
林 大輝*¹, 相羽 宏*^{1,2}, 岡道 綾*²

キー・ワード : silent period, fatigue, nerve-muscle coordination
筋放電休止期, 疲労, 神経・筋協調性

〔要旨〕 筋疲労および脳疲労前後における神経・筋協調性の変化を silent period (SP) を用いて検討した。筋疲労負荷は健康成人 11 名を対象として等速性運動 (CYBEX) を用い、脳疲労負荷は健康成人 12 名を対象として内田クレペリン精神検査を用いて行った。負荷前後で、光反応による片脚ジャンプを行い、その際の表面筋電図から大腿直筋と大腿二頭筋の筋反応潜時 (PMT) と切り換え動作 SP (SSP) を測定した。PMT は、いずれも負荷前後で有意差を認めなかった。一方、SSP は、筋疲労時では負荷・非負荷両側で、また、脳疲労時では負荷直後に持続時間の有意な延長を認めた。筋疲労・脳疲労それぞれが神経・筋協調性を低下させる可能性が示唆された。

はじめに

膝前十字靭帯 (ACL) 損傷の受傷機転として、ターンやツイスティング、ランニングからのストップ動作などが知られているが¹⁾、このような動作では、拮抗筋と主動筋の円滑な切り替えを行うなどの神経・筋協調性が必要である。著者らは、筋放電休止期 (以下 SP) を用いて、ACL 再建術後は神経・筋協調性が低下している可能性があることを報告した²⁾。SP は、筋電図において、急速な反応動作に先行して観察されるもので³⁾、上位中枢での統合の良さを反映しているとされており、動作前 SP と切り換え動作 SP とがある。動作前 SP (以下 PMSP) は、主動筋の筋放電休止期で、目的

動作に合わせて筋出力や動作速度を高め、その調整能力が高いものほど持続時間が短いとされている^{3,4)}。切り替え動作 SP (以下 SSP) は、主動筋と拮抗筋の切替えの良さを反映し、その持続時間が短いと筋収縮の切替えが円滑であり、姿勢調節能力が良く、バランス能力が高いとされ、中枢性の運動制御能力や神経・筋協調性の指標となると言われている^{5,6)}。

一方、ACL 損傷をはじめ、スポーツ傷害は疲労時に発生しやすいことが指摘されているが、疲労と神経・筋協調性との関連については未だ不明である。ACL 損傷の受傷機転で多くみられる動作を円滑に行うために必要とされる神経・筋協調性が、疲労によっていかなる影響を受けるかを知ることが、その発症原因を考えるうえでも極めて有用である。筋反応潜時 (以下 PMT) は、刺激の提示から主動筋の活動開始までの筋電図反応時間

*1 東京慈恵会医科大学スポーツ・ウェルネスクリニック

*2 東京慈恵会医科大学附属病院リハビリテーション科

であり、中枢の処理時間とされており、筋疲労前後における主動作筋のみのPMTの変化については過去に検討されているが^{7,8)}、主動作筋と拮抗筋の切替えの円滑さを反映し、神経・筋協調性の指標となるSSPと疲労に関する報告は未だ皆無である。また、神経・筋協調性は中枢性の運動制御能力を介するとされていることから、疲労の要素として、筋疲労のみならず脳疲労の影響も考慮する必要がある。そこで、今回、著者らは、筋疲労および脳疲労前後の神経・筋協調性の変化についてSSPを用いて検討することを目的とした。

対象および方法

I. 対象

【Study1：筋疲労とPMT・SSPについて】

下肢に本研究に支障を来す様な重篤な整形外科的疾患の既往がなく、現在も上肢・下肢に整形外科的疾患を有さない健常成人男性5例、女性7例、計12例とした。平均年齢：27.8±4.8歳、平均身長：164.5±6.2cm、平均体重：57.8±7.2kg(いずれも平均値±標準偏差)であった。

【Study2：脳疲労とPMT・SSPについて】

下肢に本研究に支障を来す様な重篤な整形外科的疾患の既往がなく、現在も上肢・下肢に整形外科的疾患を有さない健常成人男性7例、女性4例、計11例とした。平均年齢：25.0±3.0歳、平均身長：165.2±10.0cm、平均体重：58.3±10.4kg(いずれも平均値±標準偏差)であった。

尚、本研究はヘルシンキ宣言に基づき、対象者に対し、本研究の目的、個人情報保護等について口頭および文書で十分に説明し、同意を得て実施した。

II. 方法

1. 測定機器

筋電図測定装置はNoraxon社製表面筋電図Tele-Myo DTS [EM-801](サンプリング周波数1500Hz)、電極は同社製アース一体型EMGプローブを使用し、電極パッドはブルーセンサー(M-00-S/50)を使用した。なお、電極貼付前に皮膚表面はアルコール消毒綿を用いて処理し、皮膚インピーダンスを5KΩ以下にした。筋電図の導出は双極誘導法で行い、電極間距離は2cmとした。測定筋は、大腿直筋(以下Quad)と大腿二頭筋長頭(以下Ham)とし、電極の位置はQuadが上前腸骨棘と膝蓋骨上部を結ぶ線の中央、Ham

は膝関節後方と大転子を結ぶ線の遠位2/3周辺とし、いずれも筋腹に筋線維の走行に沿って設置した⁹⁾。

2. 測定手順

測定は騒音など本実験への影響を及ぼす因子のない同じ環境で、佐々木ら^{5,6)}や平上ら¹⁰⁾の方法に準じて以下のように行った。

1) 安静臥位における平均電位の算出

1分間の安静臥位の後、振幅が安定した時点で筋電図波形を5秒間測定した。これより、各筋の安静臥位における平均電位を算出した。測定した5秒間のうち、振幅の安定した3秒間のRoot mean square (RMS)を平均電位とした。

2) 片脚立位での安静立位における最大電位の算出

足底を接地した状態で片脚立位を1分間とり、振幅が安定した時点での各筋の筋電図を5秒間測定し、最大電位を算出した。なお、最大電位は、測定した5秒間のうち振幅の安定した3秒間の最大電位の絶対値とした。

3) ジャンプ課題時の筋電図測定

片脚での膝屈曲30°立位から、膝をそれ以上屈曲させることなく、また、上肢や上体での反動をつけずに、光刺激の直後に出来るだけすばやく高くジャンプすることを課題(ジャンプ課題)とした。光刺激にはランプを用い、被験者の前方1m、目線の高さに設置した。ジャンプ課題については、学習効果の影響を除くため、あらかじめ両側下肢それぞれ5回ずつの十分な練習を行った。Study1では両側下肢で、Study2では利き足側のみでジャンプ課題を5回ずつ実施させ、疲労負荷前と直後で課題時の筋電図を計測した。

4) 筋疲労負荷および脳疲労負荷

Study1の筋疲労負荷では、CYBEX770-NORM(Lumex社製)を使用し、利き足側のみ負荷を課し、角速度60deg/secで3回連続の膝屈伸を行わせ、最大筋力を測定した後、膝伸筋力が最大筋力の50%以下を3回連続記録するまで膝屈伸運動を最大努力にて継続させた。筋疲労負荷前と直後に、負荷側と非負荷側それぞれでジャンプ課題を実施し、その際の筋電図計測を行った。

Study2の脳疲労負荷は、精神ストレステストとして広く用いられている内田クレペリン検査を用いた。検査方法は、羅列した隣り合った数字を加算していき、答えの一桁の数字を書き込むもので、

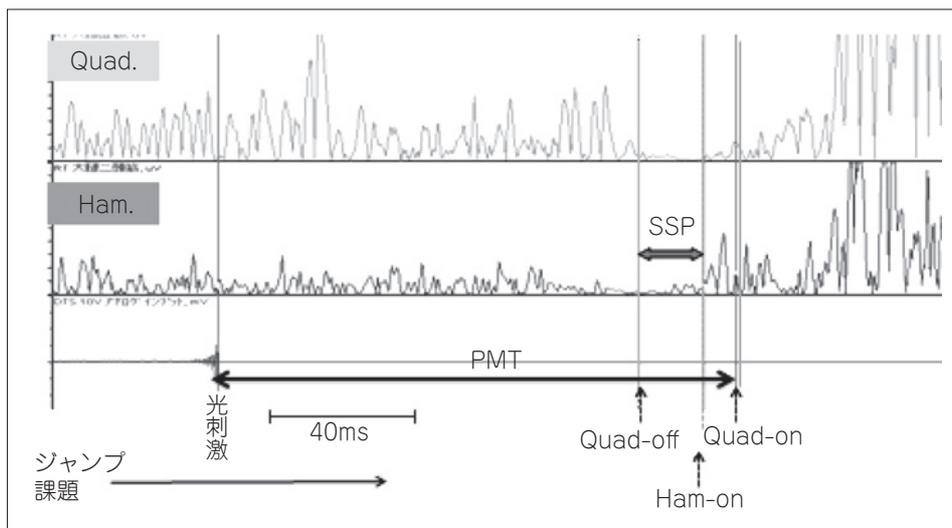


図1 筋電図上でのPMTおよびSPの算出

作業時間は15分間であった。検査用紙には、(株)日本・精神技術研究所の内田クレペリン検査用紙を用いた。内田クレペリン検査の前と直後で、利き足側のみジャンプ課題を実施し、その際の筋電図計測を行った。さらに、主観的脳疲労度として脳疲労負荷直後のVisual Analogue Scale (以下VAS)を測定した。

3. 筋電図のデジタル信号処理

表面筋電図Tele-Myo DTSで計測したデータをNoraxon社製マイオリサーチXP (EM-129M)に取り込み、波形を全波整流した後に解析を行った。

4. PMTおよびSP算出方法

PMTは、光刺激からQuadが片脚立位での最大電位以上となった時点であるQuad-onまでとした。また、SSPは、Quadの安静臥位での平均電位以下となった時点であるQuad-offからHamが片脚立位での最大電位以上となった時点であるHam-onまでとした(図1)。

5. 統計学的処理

Study1: 筋疲労負荷側と非負荷側の疲労前後比較、および疲労前と疲労後の負荷側・非負荷側の比較はWilcoxon符号付順位和検定を用いた。

Study2: 脳疲労負荷前後での比較はWilcoxon符号付順位和検定を用いた。

有意水準はいずれも5%未満とした。

結果

【Study1: 筋疲労とPMT・SSPについて】

PMTは、負荷側・非負荷側間、また負荷前・直後のいずれの比較においても有意差は認めなかった。また、SSPは、負荷前、直後ともに負荷側・非負荷側間の有意差は認めなかったが、いずれの側も負荷直後では負荷前に比べて有意に持続時間が延長した(表1)。

【Study2: 脳疲労とPMT・SSPについて】

主観的脳疲労度(VAS)は 58.3 ± 21.9 mm(平均値 \pm 標準偏差)であり、中等度の疲労であった。PMTは、負荷前・直後の比較では有意差はなかったものの、SSPでは、持続時間が負荷直後では負荷前に比べ有意に延長した(表2)。

考察

疲労とスポーツ傷害の関連について、Hawkinsら¹¹⁾は、91のプロサッカーチームにおける傷害の発生状況を調査したところ、傷害は試合の終盤で最も発生率が高かったと報告した。また、McLeanら¹²⁾は、疲労前後にドロップジャンプを行ったところ、疲労後では膝関節の外反モーメントが増加したことから、疲労がACL損傷のリスクを高める可能性を示唆した。同様に、Chappellら¹³⁾は、疲労前後のストップジャンプタスクでは、疲労後に膝関節前方剪断力のピーク値が増加し、同時に外反モーメントの増加、膝関節屈曲角度の減少を認めたと報告している。このように現在までの報

表 1 筋疲労と PMT・SSP

	PMT		SSP	
	非負荷側	負荷側	非負荷側	負荷側
負荷前 (msec)	253.9 ± 54.5	259.3 ± 67.3	42.5 ± 13.1	44.0 ± 16.3
負荷直後 (msec)	253.2 ± 52.1	278.6 ± 89.5	55.9 ± 6.2	60.9 ± 18.1

* $P < 0.05$

表 2 脳疲労と PMT・SSP

	PMT (msec)	SSP (msec)
負荷前	214.2 ± 97.2	42.2 ± 16.7
負荷直後	208.7 ± 75.2	55.4 ± 17.3

** $P < 0.01$

告では、筋疲労によって、ACL 損傷などのスポーツ傷害のリスクが高まることが指摘されている。

筋疲労と PMT について、Yeung ら⁷⁾は、内側広筋の等尺性最大随意収縮（5 秒間の持続収縮と休息を 30 回反復）での疲労負荷前後では PMT は有意に短縮したと報告した。一方、西上らは、光刺激に対する立ち上がり動作に筋疲労が及ぼす影響を検討したところ、疲労課題直後は大腿直筋の PMT が有意に遅延したと報告し⁸⁾、未だ一定の見解が得られていない。本研究では、筋疲労によって、負荷側、非負荷側いずれの側においても PMT は延長する傾向にあったが、有意差は認めなかった。主観的に中等度の疲労感をもたらした精神ストレステストによる脳疲労負荷後においても PMT は短縮する傾向にはあったが、有意差はなかったことから、筋疲労、脳疲労のいずれも PMT には影響を及ぼさないことが示唆された。

一方、疲労と SSP の関連性に関する報告は皆無であるが、今回の検討では、疲労を筋疲労と脳疲労それぞれについて検討したところ、いずれも疲労直後における SSP の持続時間の有意な延長を認めたことから、疲労が神経・筋協調性を低下させる可能性が示唆された。

特に今回、片側下肢の筋疲労によって、負荷側のみならず、非負荷側の SSP の持続時間が有意に延長していたことは興味深い。その原因は今回の検討では明らかではないが、片側下肢の筋疲労が、負荷側のみならず、非負荷側の神経・筋協調性を低下させる可能性があると考えられる。神経・筋協調性を反映する SSP は、中枢性の運動制御能力を介するとされていることから、大腿直筋と大腿

二頭筋の筋疲労負荷により、末梢から大脳皮質内にその情報が伝達され、片側の筋負荷による疲労が中枢を介して両側下肢に影響を及ぼしたことが推測される。

また、今回の結果は、末梢性の筋疲労が中枢性の運動制御にも影響を与えている可能性も示唆している。石井ら¹⁴⁾によれば、最大随意収縮の 50% 負荷強度で 90 秒のハンドグリップ運動を実施すると、血圧上昇や血中乳酸値の上昇を認め、乳酸が中枢神経系に作用し、骨格筋の情報をフィードバックしていると述べている。Dalsgaard ら¹⁵⁾も、末梢からの感覚入力を増大させるような、虚血した状態での運動は、脳血流を低下させると報告している。SSP については、大脳皮質内での出現機構がまだはっきりと解明されていないが、大腿直筋や大腿二頭筋の筋疲労が、大脳皮質内にフィードバックされ、脳疲労を同時に生じたことによる影響の可能性があると推測した。

更に、脳疲労負荷と反応時間の関連性については、尾上ら¹⁶⁾が、サルに単純視覚反応課題をさせると、脳疲労を認め、課題施行に要する反応時間が遅延したとしているが、SSP との関連性を検討した報告は見当たらない。本研究では、精神ストレス負荷による脳疲労が、主観的疲労度として中等度の疲労感をもたらしていた。尾上ら¹⁶⁾によれば、単純作業による疲労感、ドーパミン神経など報酬系に関わる神経活動維持の部分に何らかの疲労的な機能低下があるために起こる可能性があり、反応時間の遅延は、課題を続けようとする動機づけややる気に関連する部分での疲労の影響が大きいとしている。今回、脳疲労負荷直後に SSP の持続時間が有意に延長したことから、精神ストレス負荷によって引き起こされた神経活動の低下が、SSP が関連する上位中枢にも何らかの影響を与え、神経・筋協調性を低下させた可能性が考えられるが、本研究では実際の脳への影響については定かではない。

本研究の限界として、対象数が少ないこと、精

神ストレステストによる脳疲労負荷が実際にスポーツ場面で要求される脳疲労とは異なっていること、筋疲労と脳疲労の関連性が不明なことなどが挙げられる。今後は、対象数を増やすとともに、不安定なバランスマット上での視覚反応課題などのスポーツ場面で求められる多重課題による脳負荷がSSPにいかなる変化を及ぼすかなどを検討する必要があると考える。しかし、今回の研究で、筋疲労、脳疲労は、反応潜時よりも、上位中枢によって運動制御される神経・筋協調性に強く影響している可能性があることが判明したことは、神経・筋協調性の評価が、関連すると考えられるスポーツ障害の原因、治療を研究していく上で重要であると考えられる。

結 語

- 1) 筋疲労、脳疲労の前後で、反応潜時には有意差を認めなかった。
- 2) 筋疲労後では、負荷側、非負荷側いずれにおいてもSSPの持続時間の延長を認めたことから、筋疲労によって神経・筋協調性が低下することが示唆された。
- 3) 精神ストレスによる脳疲労後でSSPの持続時間が有意に延長したことから、筋疲労のみならず、脳疲労によっても神経・筋協調性が低下することが示唆された。

利益相反

本論文に関連し、開示すべき利益相反はなし。

文 献

- 1) Noyes, FR, Mooar, PA, Matthews, DS, Butler, DL. The symptomatic anterior cruciate-deficient knee. Part1: the long-term functional disability in athletically active individuals. *J Bone Joint Surg Am*. 1983; 65: 154-162.
- 2) 伊藤咲子, 舟崎裕記, 林 大輝, 川井謙太郎. 膝前十字靭帯再建術後における筋放電休止期の手術側と非手術側の比較. *JOSKAS*. 2014; 39(3): 821-825.
- 3) 川初清典. 身体活動における巧みさの科学. 初版. 東京: 杏林書院; 128, 1982.
- 4) 矢部京之助, 三田勝巳, 青木 久. 姿勢変化にともなう動作前 silent period の出現. *臨床脳波*. 1982; 24(6): 401-405.
- 5) 佐々木久登, 荒井隆志, 金村尚彦, 田中幸子, 白濱 勲二, 宮本英高, 森山英樹, 吉村 理, 前島 洋. 筋放電休止期と反応時間およびバランス能力との関係一切断者と健常者の比較. *日本職業・災害医学会誌*. 2002; 50: 145-151.
- 6) 佐々木久登, 丸尾朝之, 松尾 篤. 反応時間の筋電図学的評価: 切り換え動作時 Silent period の臨床応用. *理学療法*. 2004; 21(6): 855-860.
- 7) Yeung, SS, Au, AL, Chow, CC. Effects of fatigue on the temporal neuromuscular control of vastus medialis muscle in humans. *Eur J Appl Physiol*. 1999; 80(4): 379-385.
- 8) 西上智彦, 榎 勇人, 野村卓生, 岡崎里南, 石田健司, 谷 俊一. 筋疲労前後での立ち上がり動作—筋活動開始時間の存在—. *国立大学理学療法士学会誌*. 2005; 26: 24-26.
- 9) 下野俊哉. 表面筋電図マニュアル基礎編 EM-TS1. 東京: 酒井医療株式会社; 111-114, 2004.
- 10) 平上二九三, 香月達也, 西林喜代美, 石黒由利子, 永富史子, 伊勢真樹, 小野仁之, 平田敏彦. 起立動作開始前にみられる Silent period の出現率とその持続時間について—健常人と片麻痺患者との比較—. *総合リハビリテーション*. 1985; 13(1): 35-41.
- 11) Hawkins, RD, Hulse, MA, Wilkinson, C, Hodson, A, Gibson, M. The association football medical research programme: an audit of injuries in professional football. *Br J Sports Med*. 2001; 35: 43-47.
- 12) MacLean, SG, Felin, RE, Suedekum, N, Calabrese, G, Passerallo, A, Joy, S. Impact of fatigue on gender-based high-risk landing strategies. *Med Sci Sports Exerc*. 2007; 39: 502-514.
- 13) Chappell, JD, Herman, DC, Knight, BS, Kirkendall, DT, Garrett, WE, Yu, B. Effect of fatigue on knee kinetics and kinematics in stop-jump tasks. *Am J Sports Med*. 2005; 33: 1022-1031.
- 14) 石井秀明, 西田裕介. 末梢性疲労モデルから中枢性疲労モデルへの仮説の移行. *理学療法科学*. 2009; 24(5): 761-766.
- 15) Dalsgaard, MK, Lars, Nybo, Yan, Cai, Niels, H Secher. Cerebral metabolism is influenced by muscle ischaemia during exercise in humans. *Exp Physiol*. 2003; 88(2): 297-302.
- 16) 尾上浩隆. 単純視覚反応課題による疲労の客観的評価—疲労による反応時間の遅延—. *医学のあゆみ*. 2003; 204(5): 371-376.

(受付：2017年4月11日，受理：2018年1月19日)

Changes in nerve-muscle coordination caused by muscle and brain fatigue: analysis using the silent period of quadriceps and hamstrings

Oonishi, S.^{*1,2}, Funasaki, H.^{*1}, Kawai, K.^{*1,2}

Hayashi, H.^{*1}, Aiba, H.^{*1,2}, Okamichi, A.^{*2}

^{*1} Department of Sports and Wellness Clinic, Jikei University School of Medicine

^{*2} Department of Rehabilitation Medicine, Hospital, Jikei University School of Medicine

Key words: silent period, fatigue, nerve-muscle coordination

[Abstract] Changes in neuromuscular coordination after muscle fatigue and weariness of the brain were assessed based on the silent period (SP). Isokinetic exercise (CYBEX) of the dominant leg was performed by 11 healthy adult subjects and the Uchida-Kraepelin Psychodiagnostic Test was applied to 12 healthy adult subjects, respectively. Premotor time (PMT) and switched silent period (SSP) of the rectus femoris muscle and biceps femoris muscle were measured during the pre- and post-light-triggered single-leg jumping tolerance test using a surface electromyogram. PMT did not show any significant differences between the pre- and post-tolerance tests. In contrast, SSP under muscle fatigue conditions was significantly prolonged both for the loaded side leg and the non-loaded side leg, which were the same before and after the tolerance test, while the SSP under the condition of weariness of the brain was significantly prolonged immediately after the tolerance test. These results suggest that a decrease in neuromuscular coordination is induced by muscle fatigue and weariness of the brain.