

持続的等尺性収縮期の発揮張力が筋疲労回復期の 表面筋電図に及ぼす影響

蘭 和 真、澤 田 文 吉、市 島 憲 郎

緒 言

筋疲労に際し表面筋電図の平均パワー一周波数 (MPF; Mean Power Frequency) が低下することは多くの報告によりすでに明らかにされている。さらに、低下したMPFが短時間の休息を取ることにより元の状態に戻ることも明らかにされている。従来の報告ではMPFが筋疲労とともに低下する原因として、運動単位の周期化^{8),9)}、運動単位の発火頻度の低下¹²⁾、ならびに運動によって産生される乳酸の影響^{1),10),11),15),22)}をあげている。とくに、乳酸が筋中に蓄積することにより活動電位伝導速度が低下しMPFが低下すると推察している報告は多い。しかしながら、乳酸の影響について否定的な見解を示している報告も見られる。Petrofsky^{19),20)}は回復期におけるMPFが筋中乳酸の除去に要する時間に比べて短い時間で元の状態に戻るという事実から乳酸に代る他の疲労物質の影響を示唆している。Bigland-Ritchie⁴⁾は細胞外液のカリウム濃度とMPFの関係を調べカリウムが電位伝導速度に影響を与えている可能性が大きいと述べている。さらに、Wiles²⁴⁾も解糖機構障害で乳酸の産生が不能な患者を被検者とした実験において筋疲労に伴うMPFの低下が観察されたことから乳酸の影響を否定している。

一般的に、MPFは筋の発揮張力の影響を受けると考えられている。HagbergとEricson⁵⁾は短時間の等尺性収縮を行ったときのMPFは中程度の張力レベルまでは張力がますます高い値を示すと報告している。蘭²⁾も同様に疲労前

の状態では25%MVCの負荷を課したときよりも50%MVCの負荷を課したときのほうがMPFは高い値を示すと報告している。

さらに、ViitasaloとKomi²³⁾は疲労困憊まで持続的に収縮を続けたときのMPFは発揮張力が大きいほど低下が急速でかつ著しいと報告している。

以上のように筋疲労過程の筋の状態については表面電図学的に多くの研究報告がなされている。さらに、筋の発揮張力がMPFに与える影響についても詳細に研究がなされている。しかしながら、疲労期の筋の発揮張力がその筋の回復状態にどのような影響を及ぼしているかについて表面筋電図学的になされた報告は著者らの知るかぎりない。そこで、本研究では二種類の異なる重量負荷を用いて上腕二頭筋の等尺性収縮を疲労困憊まで持続的に行った後、回復期の筋に間欠的なテスト負荷を課すことにより、疲労期の発揮張力が筋の回復に及ぼす影響について表面筋電図の平均パワー一周波数から検討することを目的とした。

実験方法

1. 被検者

本研究における被検者は健康な成人男子5名であった。なお、彼らは日常定期的な運動は行っていなかった。彼らの身体的特性および最大腕屈曲力は表1に示した。

2. 測定方法・手順

(1) 最大等尺性筋力の測定

被検者は多用途筋力台の椅子部に椅座位の姿勢をとり、右上腕部が水平となるように支持台に乗せた、そして、前腕部が台と垂直になるように肘関節を90度に曲げ、手頸部を半回内させ、指を伸展させた状態で手頸部にベルトを巻きワイヤーを介し張力計に接続した。被検者は肘関節屈曲方向へワイヤーを最大努力で牽引した。牽引によって張力計に生じた歪量は動ひずみ計によって増幅され、テクニコーダーに記録された。なお、筋力発揮に際しては上体が関与しないように、体幹を6点式座席ベルトでしっかりと固定した。測定は疲労性実験の約1時間前に十分な休息をはさみ3回実施した。そして、その最大値を最大随意筋力 (MVC:Maximum Voluntary Contraction) とした。

表1 被検者の身体特性及び最大腕屈曲力

SUBJECT	AGE (yr)	HEIGHT (cm)	WEIGHT (kg)	MVC (kg)
S.T.	24.4	180.7	70.9	33.7
N.N.	25.4	172.5	59.9	30.6
A.T.	22.4	173.0	71.3	33.6
H.C.	29.1	167.5	65.1	33.4
M.Y.	21.5	170.4	62.5	34.1
MEAN±SD	24.6±2.7	172.8±4.4	65.9±4.5	33.1±1.5

MVC(MAXIMUM VOLUNTARY CONTRACTION) ; 最大随意筋力

(2) 疲労性実験の手順

実験の姿勢は MVC 測定時と同様であった。被検者は錘負荷により肘関節屈曲方向への等尺性収縮を行なった。肘関節角度は90度に静止保持された。なお、肘関節角度の制御は肘関節部に装着されたゴニオメーターの出力をオシロスコープ上に描きそれを直視することにより行われた。手順としてはまず疲労前 (REST) の筋の状態を観察するためにテスト負荷を5秒間加えた。そして、十分な休息の後、疲労困憊 (Exhaustion) に至るまで負荷を持続的に加えた

(FATIGUING CONTRACTION)。さらに、回復過程 (RECOVERY) を観察するために、疲労困憊後30秒、1分、1分30秒、2分、3分、

5分、7分、10分、15分を開始時点としてテスト負荷を5秒間加えた。負荷された錘は被検者のMVCの25%および50%に相当する重量であった。それぞれの錘は次に示す4つの順序にしたがって負荷された。(実験1) REST, FATIGUING CONTRACTION, RECOVERYともに50%MVC、(実験2) REST, RECOVERYは50%MVC, FATIGUING CONTRACTIONは25%MVC (実験3) REST, RECOVERYは25%MVC, FATIGUING CONTRACTIONは50%MVC (実験4) REST, FATIGUING CONTRACTION, RECOVERYともに25%MVC。これらの実験はすべて日を変えて行われた。実験のブロックダイアグラムは図1に示されている。

表2 錘の負荷順序

実験 NO	REST テスト負荷5秒間	FATIGUING CONTRACTION	RECOVERY テスト負荷5秒間
1	50%MVC	50%MVC	50%MVC
2	50%MVC	25%MVC	50%MVC
3	25%MVC	50%MVC	25%MVC
4	25%MVC	25%MVC	25%MVC

3. 筋電図の記録方法

筋電図は右上腕二頭筋から直径7mmの銀塩化銀円盤電極を用いて双極導出した。電極は被検者が肘関節を90度に曲げた状態で筋腹中央部に筋線維方向に沿って3cmの間隔で装着した。導出した筋電図は生体電気現象用増幅器で増幅し、ペンオシログラフに記録すると同時に後の分析のためにデータレコーダーに記録した。増幅器はLO-CUTを0.003, HI-CUTをOFF, ハム除去スイッチをOFFにして記録した。電極間抵抗はすべての実験において20KΩ以下であった。

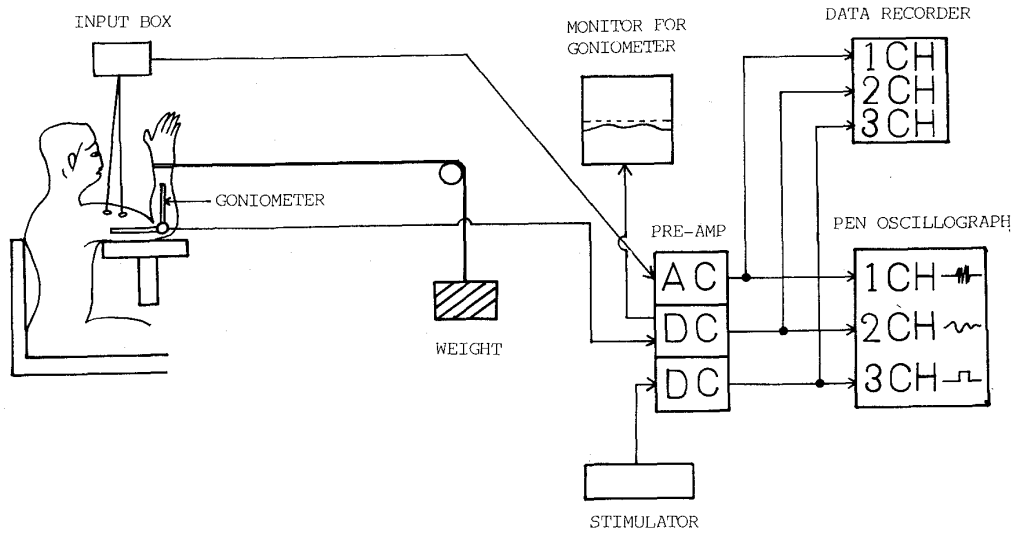


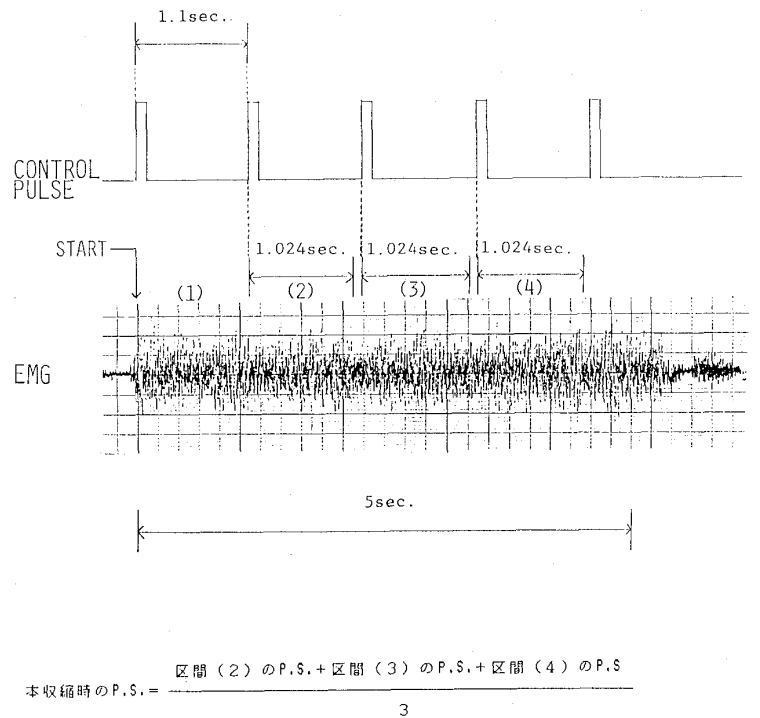
図1 実験のブロックダイアグラム

4. 筋電図の分析方法

データレコーダーに記録された筋電図波形を直接シングルプロセッサー（日本電気三栄社製 ST07A）に入力しパワースペクトラムを算出した後、次式にしたがってMPF を算出した。パワースペクトラムはサンプリング周波数500HZ，データ取り込み時間1.024秒でA/D変換した後，高速フーリエ変換を行い，それを二乗することにより250HZまで算出した。演算は偶然性を消去するために3区間の平均値とした。すなわち，錘の負荷直後に連続的に記録されたコントロールパルスを取りガーとし図2に示された(2)，(3)，(4)の3区間について上記の条件でそれぞれ分析を行い，3区間の演算結果を単純平均しパワースペクトラムとした。なお，FATIGUING CONTRACTIONの場合はExhaustionに至るまでに要した時間の25%，50%，75%，100%に相当する時点で3回の演算が終了するように分析を行った。MPFの算出はシングルプロセッサーによる分析結果をインターフェースを介してパーソナルコンピュータ（NEC社製，PC9801）に入力し次式にしたがい処理プログラムにより行った。

$$MPF = \frac{\sum_{f=0}^{fs} f \cdot p(f)}{\sum_{f=0}^{fs} p(f)}$$

f = frequency
 fs = half the sampling function
 p(f) = the power spectrum function (NaeijeとZorn)¹⁵⁾



P.S.: パワースペクトラム

図2 分析区間の説明図

実験結果

1. 実験 1

疲労性収縮期の持続時間は 70.4 ± 15.3 秒であった。時間経過に伴う平均パワー周波数の変化は図3の△及び図4の△で示されている。なお、図3は時間軸が実時間で表されており、図4は

疲労性収縮の時間軸が疲労困憊に至るまでに要した時間を100とした相対時間で表されている。疲労性収縮期に50%MVC負荷を課し、回復期に50%MVCのテスト負荷を課した場合、平均パワー周波数は疲労に伴いほぼ直線的に低下する傾向を示した。回復期には指数関数的に上昇し5分程度で疲労前の状態に戻った。

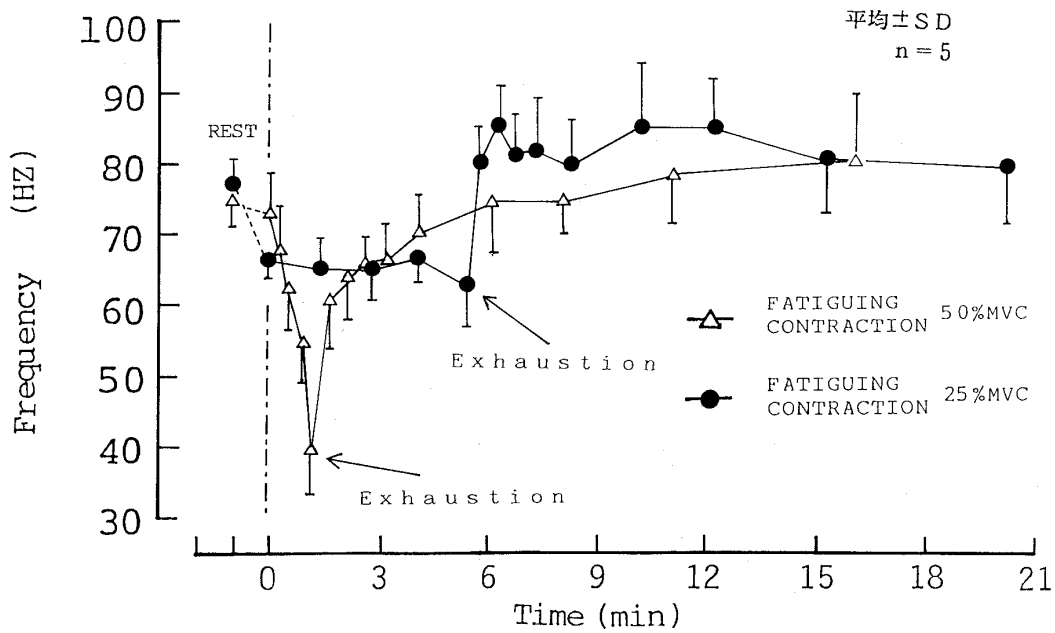


図3 時間経過に伴う平均パワー周波数の変化

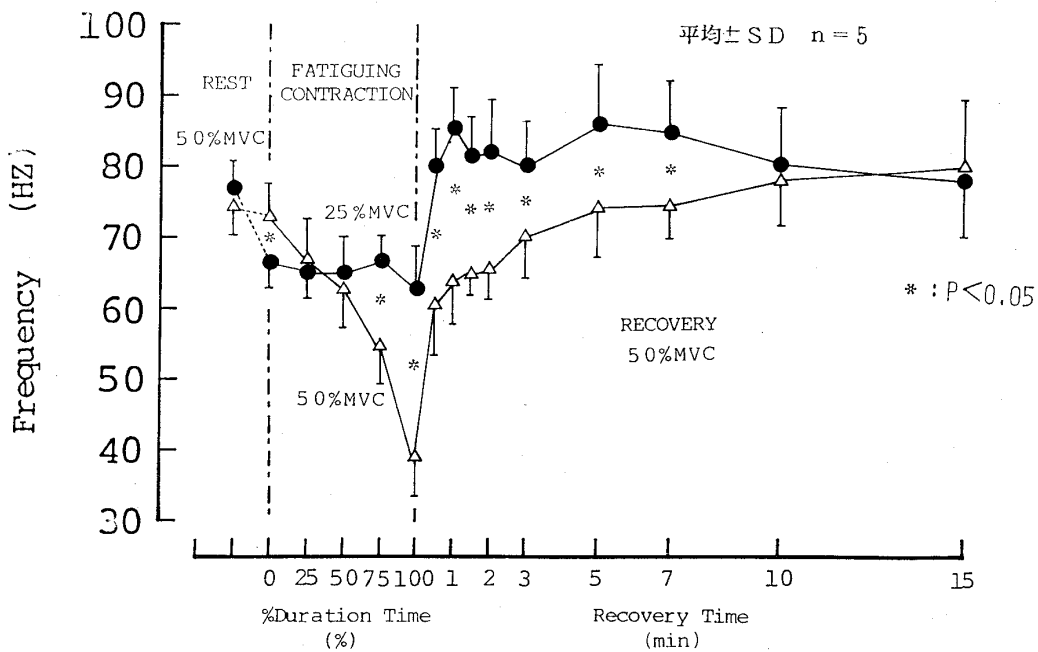


図4 時間経過に伴う平均パワー周波数の変化

2. 実験2

疲労性収縮の持続時間は 324.4 ± 62.6 秒であった。時間経過に伴う平均パワー周波数の変化は図3の●及び図4の●で示されている。疲労性収縮期に25%MVC負荷を課し、回復期に50%MVCのテスト負荷を課した場合の更均パワー周波数は、疲労期にはほとんど変化が見られず横

這いの状態であった。回復期には疲労期に比べて非常に高い値を示した。さらに、疲労性収縮期に50%MVC負荷を課し、回復期に50%MVCのテスト負荷を課した場合に比べて、回復期の平均パワー周波数はテスト負荷重量が同じなのにもかかわらずRecovery Time 7分まで有意に高い値を示し続けた ($P < 0.05$)。

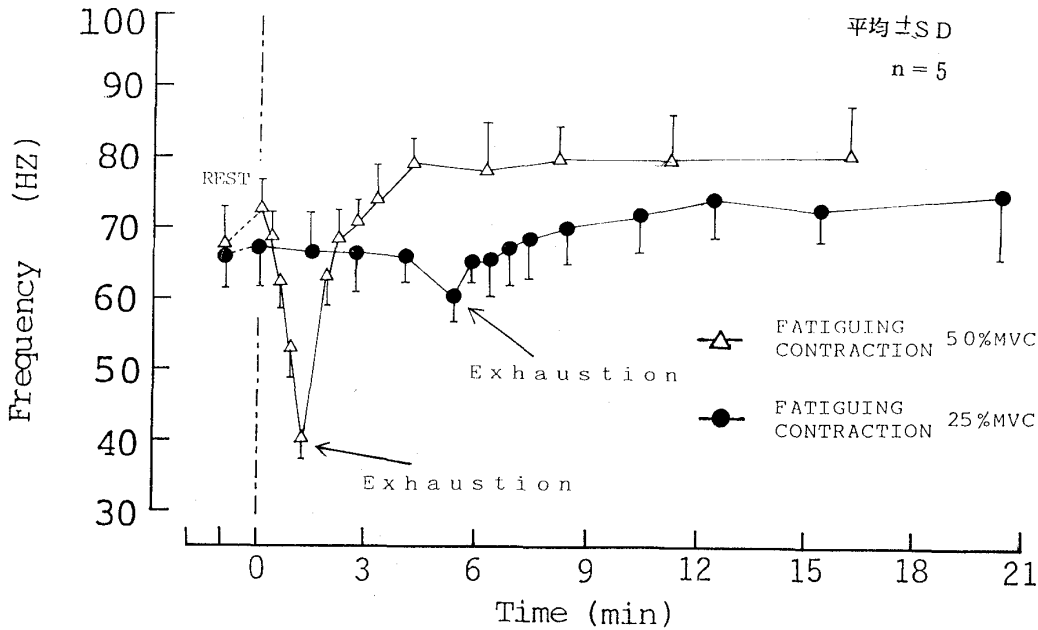


図5 時間経過に伴う平均パワー周波数の変化
テスト負荷25%MVCの場合 時間軸は実時間

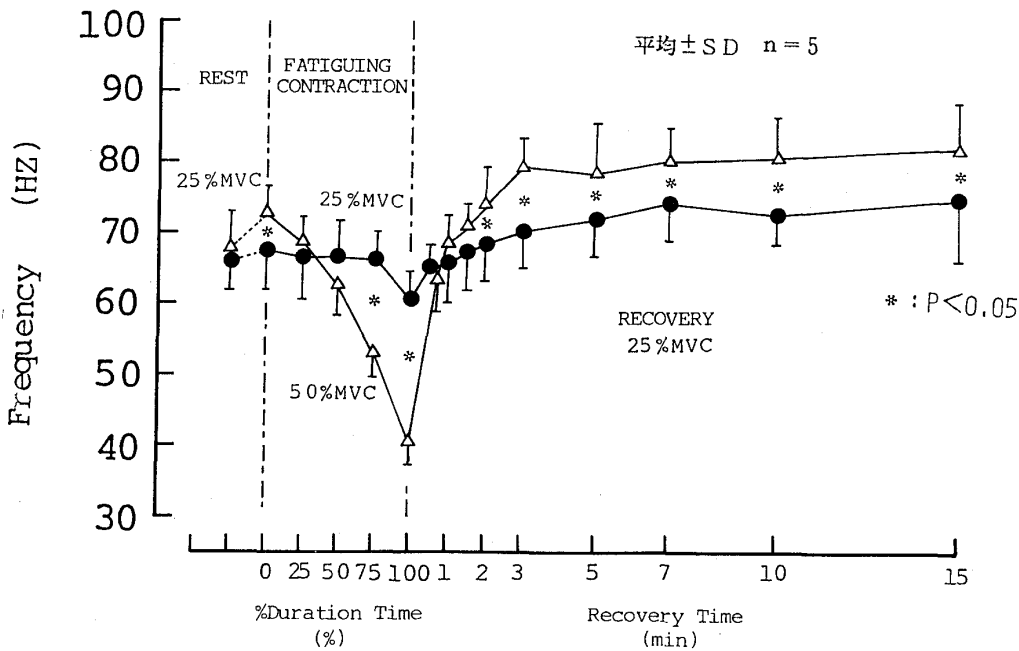


図6 時間経過に伴う平均パワー周波数の変化
テスト負荷25%MVCの場合
FATIGUING CONTRACTIONの時間軸は相対時間

3. 実験3

疲労性収縮の持続時間は 66.6 ± 9.0 秒であった。時間経過に伴う平均パワー一周波数の変化は図5の△及び図6の△で示されている。なお、図5は時間軸が実時間で表されており、図6は疲労性収縮期の時間軸が疲労困憊に至るまでに要した時間を100とした相対時間で表されている。疲労性収縮期に50%MVC負荷を課し、回復期に25%MVCのテスト負荷を課した場合、平均パワー一周波数は疲労性収縮期に50%MVC負荷を課し回復期に50%MVCのテスト負荷を課した実験1と同様に疲労に伴いほぼ直線的に低下し短時間の休息で疲労前の状態に戻った。しかしながら、回復期の平均パワー一周波数は実験1に比べて、高い値を示す傾向であった。さらに、疲労性収縮期に25%MVC負荷を課し、回復期に25%MVCのテスト負荷を課した場合に比べてテスト負荷重量が同じなのにもかかわらずRecovery Time2分以後は有意に高い値を示した($P < 0.05$)。

表3 疲労性収縮の持続時間

Subj.	50%MVC			25%MVC		
	実験1	実験3	NEAN	実験2	実験4	MEAN
S.T.	73.7	66.8	67.7	246.3	253.0	249.7
N.N.	97.9	78.1	88.0	322.3	276.1	299.2
A.T.	52.8	50.5	51.7	280.6	314.6	297.6
H.C.	64.9	68.7	66.8	430.5	455.4	443.0
M.Y.	62.7	69.1	65.9	342.3	312.4	327.4
MEAN±SD	70.4±15.3	66.6±9.0	68.0±11.6	324.4±62.6	322.3±70.5	323.5±64.8

(単位: sec)

4. 実験4

疲労性収縮の持続時間は 322.3 ± 70.5 秒であった。時間経過に伴う平均パワー一周波数の変化は図5の●及び図6の●で示されている。疲労性収縮期に25%MVC負荷を課し、回復期に25%MVCのテスト負荷を課した場合、平均パワー一周波数は疲労期、回復期を通じてほとんど変化がなかった。疲労前の平均パワー一周波数は25%MVC負荷時に比べ50%MVC負荷時の方が有意に高い値を示した($P < 0.05$)

考察

疲労前のMPFはすべての実験において25%MVC負荷時より50%MVC負荷時の方が有意に高い値を示した($P < 0.05$)。この結果は前報¹⁾と同様であった。FT線維はST線維に比べ閾値張力が高い¹³⁾。そのため、50%MVC負荷時には25%MVC負荷時に比べ活動電位伝導速度の高いFT線維¹⁴⁾の参加率が高くなりMPFが高い値を示したと考えられる。

50%MVC負荷で疲労性収縮を行ったとき、MPFは疲労に伴い低下した。しかし、25%MVC負荷時にはほとんど変化が見られなかった。一般的にMPFは筋に蓄積した乳酸の影響を受けると考えられている^{1), 10), 11), 15), 22)}。乳酸が筋細胞のPHを低下させ活動電位伝導速度を低下させるためである¹⁸⁾。筋中乳酸濃度が高くなればMPFが低下するのは当然のことと考えられる。FT線維は解糖能に優れているため乳酸を多く産生するが、ST線維は有酸素能に優れているため乳酸の産生量が少ない²¹⁾。したがって、50%MVC負荷時には25%MVC負荷時に比べてFT線維の参加率が高いため乳酸濃度が高くなっていると考えられる。また、50%MVCの筋力発揮では明らかに血管が圧迫され血液量が低下することから⁶⁾、疲労物質の除去が遅れることが考えられる。このこともMPF低下の一因であると考えられる。しかしながら、Petrofskyら^{19), 20)}は乳酸がMPFに影響を与えているという推察に対して否定的な見解を示している。回復期におけるMPFが筋中乳酸の除去に要する時間に比べて短い時間で元の状態に戻るということがその理由である。本研究では5分程度の休息でMPFは元の状態に戻った。Karlssonら⁷⁾が等尺性収縮を疲労困憊まで行った際に蓄積した筋中乳酸の除去には最低20分の時間を要すると報告していることから推察するとMPFが乳酸の影響を受けているとは考えられない。しかしながら、本研究では25%MVC負荷時にはMPFの低下がなかったが筋収縮時に乳酸が全く産生されなかったとは考えにくい。乳酸が産生されたにもかかわらずMPFが低下しなかったことから筋細胞

が乳酸に反応するための量的な閾値が存在することが推察された。MPFが乳酸の影響を受けている可能性が考えられた。

一般的に、筋の発揮張力が高くなればMPFも高い値を示すと考えられている^{5), 17)}。しかしながら、このことは疲労前の筋についてのみ認められる傾向であると考えられる。本研究において、25%MVC負荷でExhaustionまで疲労性収縮を行った後、疲労回復期の筋に25%MVC及び50%MVCのテスト負荷を課したとき、MPFは50%MVCのテスト負荷を課したときの方が高い値を示した。しかしながら、50%MVC負荷でExhaustionまで疲労性収縮を行った後、回復期の筋に25%MVC及び50%MVCのテスト負荷を課したときには、MPFは25%MVCのテスト負荷を課したときの方が高い値を示した。テスト負荷を課したときの筋の状態はいずれのテスト負荷重量の場合も50%MVC負荷で疲労性収縮を疲労性困憊まで行った後であるので同じであったと考えられる。それにもかかわらず、発揮張力が低い25%MVC負荷時の方が高いMPFを記録したのは、疲労性収縮期に課した負荷重量と回復期に課したテスト負荷重量に違いがあったことが原因であると考えられる。さらに、図4、図6に示されているように、回復期のテスト負荷重量が等しく、疲労性収縮期の負荷重量が異なる二つの実験を比較したときにも同様の現象が見られた。すなわち、疲労性収縮期に25%MVC負荷を課し、回復期に50%MVCのテスト負荷を課したときの回復期のMPFは、疲労性収縮期及び回復期ともに50%MVC負荷を課した時に比べ高い値を示した。また、疲労性収縮期に50%MVC負荷を課し、回復期に25%MVCのテスト負荷を課したときの回復期のMPFも、疲労性収縮期及び回復期ともに25%MVC負荷を課した時に比べ高い値を示した。いずれの実験も疲労困憊後に同じ負荷重量を課したものであるが、疲労困憊に至る過程で発揮した筋の張力レベルの違いにより回復期のMPFの値に差異が生じたものと考えられる。これらの結果から、回復期に疲労性収縮期に課した負荷重量と異なる負荷重量を課した時には、

回復期に疲労性収縮期に課した負荷重量と等しい負荷重量を課したときに比べて回復期のMPFは高い値を示すことが明らかとなった。このことはFT線維の閾値張力の差異に起因するものではないかと考えられる。疲労性収縮期と回復期の負荷重量が異なる場合には回復期に動員される筋線維が疲労期に動員されたのと異なることが予想される。したがって疲労困憊後においても疲労度の低い運動単位の参加が優勢になると考えられる。しかしながら、回復期に課した25%MVC負荷時のMPFが疲労前前に課した50%MVC負荷時のMPFより高い値を示したということから他の要因による影響も考えられた。中枢部からの影響因子として発火頻度の増加が、さらに、末梢部における因子として疲労物質による影響が考えられたが、これらの点に関する検討は今後の課題である。

要約

本研究の目的は疲労期の筋の発揮張力が筋の回復に及ぼす影響を表面筋電図の平均パワー周波数から検討することであった。そのため、健康な成人男子5名を被検者とし、二種類の異なった重量負荷を用いて上腕二頭筋の等尺性収縮を疲労困憊まで持続的に行わせた。さらに、回復期の筋に間欠的にテスト負荷を課し短時間の等尺性収縮を行わせた。負荷された錘は被検者のMVCの25%及び50%に相当するものであった。疲労期及び回復期の表面筋電図が上腕二頭筋より導出された。その結果以下のことが明らかになった。

1) 50%MVC負荷で疲労性収縮を行ったとき、MPFは疲労に伴い低下した。しかし、25%MVC負荷時にはほとんど低下しなかった。

2) 回復期に疲労性収縮期に課した負荷重量と異なる負荷重量を課した時の回復期のMPFは、回復期に疲労性収縮期に課した負荷重量と等しい負荷重量を課したときに比べて高い値を示した。

以上の結果はFT線維とST線維のリクルート

メントオーダーの違いに起因するものではないかと推察された。疲労回復期の表面筋電図は疲労期に発揮した筋張力の影響を受けていることが明らかになった。

謝辞

本研究は中京大学体育学部教授山本高司博士との共同研究である。山本教授には多大な協力を頂き深く感謝すると共に、中京大学体育学部運動生理学研究室の皆様には被検者として協力を頂いた。併せて感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 蘭 和真・澤田 文吉・市島 憲郎「表面筋電図のパワースペクトラムからみた筋疲労回復過程」東海女子大学紀要, 6:49-59, 1987.
- 2) 蘭 和真・山本 高司「筋疲労回復過程の筋電図学的分析」中京大学体育学論叢, 28-2:1-23, 1987.
- 3) 浅井 英典・石河 利寛「幼児の短時間及び持続的等尺性収縮における表面筋電図の周波数および振幅の分析」体育学研究, 29-2:115-23, 1984.
- 4) Bigland-Ritchie, B., Jones, D.A. and Woods, J.J., "Excitation frequency and muscular fatigue," *Exp.Neurol.*, 64:414-27, 1979.
- 5) Hagberg, M. and Ericson, B.E., "Myoelectric power spectrum dependence on muscular contraction level of elbow flexors," *Eur.J.Appl. Physiol.*, 48:147-56, 1982.
- 6) Hamphreys, P.W. and Lind, A.R., "The blood flow through the forearm during hand-grip contraction at different tension and muscle temperature," *J.Physiol.*, 161:53-54, 1962.
- 7) Karlsson, J., Funderburk, C., Essen, B. and Lind, A.R., "Constituents of human muscle in isometric fatigue," *J.Appl.Physiol.*, 38:208-11, 1975.
- 8) 小木 和孝・袴田 忠「筋疲労時の表面筋電図の周波数分析」労働科学, 38-9:519-28, 1962.
- 9) Kogi, K. and Hakamada, T., "Slowing of surface electromyogram and muscle strength in muscle fatigue," Report of the institute for Science for Labour, 60:27-46, 1962.
- 10) Komi, P.V. and Viitasalo, J.H.T., "Signal characteristics of EMG at different levels of muscle tension" *Acta Physiol. Scand.*, 96:267-76, 1976.
- 11) Komi, P.V. and Tesch, P., "EMG frequency spectrum, muscle structure, and fatigue during dynamic contractions in man," *Eur.J.Appl. Physiol.*, 42:41-50, 1979.
- 12) Lindstrom, L., Magnusson, R. and Peterson, I., "Muscular fatigue and action potential conduction velocity changes studied with frequency analysis of EMG signals," *Electromyogr. Clin. Neurophysiol.*, 10:341-56, 1970.
- 13) Milner-Brown, H.S., Stein, R.B. and Yemm, R., "The orderly recruitment of human motor units

- during voluntary isometric contractions," *J. Physiol.*, 230 : 359-70, 1973.
- 14) 宮田 浩文・佐渡山 亜兵・勝田 茂「等尺性収縮における外側広筋の筋電位伝導速度—その筋組成との関連—」*体力科学*, 34 : 231-38, 1985.
- 15) Mortimer, J.T., Magnusson, R. and Peterson, I., "Conduction velocity in ischemic muscle : effect on EMG frequency spectrum," *Am. J. Physiol.*, 219-5 : 1324-29, 1970.
- 16) Naeije, M., and Zorn, H., "Relation between EMG power spectrum shifts and muscle fibre action potential conduction velocity changes during local muscular fatigue in man," *Eur. J. Appl. Physiol.*, 50 : 23-33, 1982.
- 17) 永田 晟, 「筋と筋力の科学」pp149, 不昧堂出版, 1984.
- 18) Nakamaru, Y. and Schwartz, A., "The influence of hydrogen ion concentration on calcium binding and release by skeletal muscle sarcoplasmic reticulum," *J. Gen. Physiol.*, 59 : 22-32, 1972.
- 19) Petrofsky, J.S. and Lind, A.R., "Frequency analysis of the surface electromyogram during sustained isometric contractions," *Eur. J. Appl. Physiol.*, 43 : 173-82, 1980.
- 20) Petrofsky, J.S., "Quantification through the surface EMG of muscle fatigue and recovery during successive isometric contractions," *Aviat. Space. Environ. Med.*, 52-9 : 545-50, 1981.
- 21) Tesch, P., "Relationship between lactate accumulation, LDH activity, LDH isozyme and fibre type distribution in human skeletal muscle," *Acta Physiol. Scand.*, 103 : 40-46, 1978.
- 22) Tesch, P., Komi, P.H., Jacobs, I., Karlsson, J. and Viitasalo, J.T., "Influence of lactate accumulation on EMG frequency spectrum during repeated concentric contractions," *Acta. Physiol. Scand.*, 119 : 61-67, 1983.
- 23) Viitasalo, J.T. and Komi, P.V., "Signal characteristics of EMG during fatigue," *Eur. J. Appl. Physiol.*, 37 : 111-21, 1977.
- 24) Wiles, C.M., Jones, D.A. and Edwards, R.H.T., "Fatigue in human metabolic myopathy In : Human muscle fatigue," *Physiological Mechanisms (Ciba Foundation Symposium 82)*, 264-77, 1981.

RELATION BETWEEN THE MUSCULAR TENSION DURING SUSTAINED ISOMETRIC CONTRACTIONS AND THE SURFACE ELECTROMYOGRAM DURING RECOVERY FROM THE MUSCULAR FATIGUE

Kazuma Araragi, Bunkichi Sawada and Norio Ichishima

Summary

The purpose of the present study was to investigate the relation between the muscular tension during fatiguing contractions and the surface EMG during recovery from the muscular fatigue. Healthy five male subjects took part in this experiment. They were asked to sustain respective elbow flexions at the strength of 25, 50%MVC to exhaustion followed by intermittent brief isometric elbow flexions at the strength of 25, 50%MVC. The Mean power frequency (MPF) was computed from the surface EMG recorded over the muscle of biceps brachii.

The results were as follows:

1. During sustained isometric contractions at 50% MVC MPF showed rapid decrement with time, but during those at 25% MVC MPF were almost unchanged.
2. When the muscular tension is different between during fatiguing contractions and during recovery from the muscular fatigue, MPF during recovery is higher in value than that the in case when the muscular tension is the same between during fatiguing and during recovery.

It seemed that those results were caused by the difference of recruitment order of motor units between FT and ST fibre. It was clarified that the surface EMG during recovery from the muscular fatigue was effected by the muscular tension during sustained isometric contractions.