OUKA
Osaka University Knowledge Archive

Title	ヒール高と筋疲労に関する周波数分析
Author(s)	池内, 登; 関, 哲洋
Citation	デザイン理論. 1985, 24, p. 25-39
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/52580
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

ヒール高と筋疲労に関する周波数分析

池内　登・関　哲洋

序　論

履物の製品開発において，足の運動機能や足の保護という点を考慮して歩きやすくかつ疲労の少ない，しかも美しい形態，色彩のものを考案しなくてはならないが，履物の形態や機構，材料などによって，歩幅，歩行時の筋活動，エネルギー代謝等に差違が生じてくることは言うまでもない。歩きやすく疲労の少ない履物の機構上の要件の一つに，ヒール高の問題があり，ヒール高と下肢の疲労に関する研究も幾つかなされている。現在の所，ヒール高の高まりに従って，生体の負担が増大し，下腿三頭筋の緊張・靱帯の伸長・呼吸量の増大がみられ，これらの観点から，ヒール高は2—3cmが適当であるとされている。

本研究は，歩行運動時における表面筋電図（surface electromyogram）の活動電位（action potential）を導出し，高速フーリエ変換（fast fourier transform：FFT）により周波数変換を行い，歩行運動に関与する下肢の骨格筋の筋収縮（muscle contraction）の状況をパワースペクトル分析を行うことにより，筋疲労（muscle fatigue）の生起する過程を分析し，ヒール高の変化が下肢の運動に関わる生理的負担（Physiological cost）について検証を進めることにした。

一般的に筋疲労は，表面筋電図における，振幅の増大，積分値の増加及び徐

波成分の出現，すなわち周波数の低周波数帯域への移行としてあらわれる。こうした点から，周波数帯域区分上での移行の状況と，周波数成分の増大等から，ヒール高の変化に対応して生じる筋疲労の度合を検証した。

検　査　法

1．検査基準

被検者２名の５分間歩行運動時（距離500m）における下肢の骨格筋に対する表面筋電図の活動電位と，積分値を同時導出させ，その活動電位より周波数変換を行い，パワースペクトル図を作成し検証にあたった。

2．測定筋

前脛骨筋（m. tibialis anterior），ヒラメ筋（m. soleus），大腿直筋（m. rectus femoris），大腿二頭筋（m. biceps femoris）の４つの主要骨格筋を被検筋とした。

3．測定法

双極導出法（Bipolar lead）により，10m/m 皿電極２個を point moteur を中心に，２cm間隔で筋線維走向方向に平行して，脳波用ペントナイトで貼り，表面筋電図の活動電位の spike と自動積分装置による積分波を同時記録させ，また，原波形をデーターレコーダーにより記録させ，それより，周波数解析装置により，パワースペクトル変換させ記録した。

4．測定機器，解析・記録機器

a. ELECTROENCEPHALOGRAPH 1A64 (San-ei intrument co, Ltd)

ATTENUATOR—Level 9, TIME CONST—0.03 (s), HUMFILTER—ON, PAPER SPEED—1.5 (cm/sec)

b. CASSETTE DATA RECORDER R—71 (TEAC CO, Ltd)

c. SIGNAL PROCESSOR 7T17, THERMAL PRINTER 2255A (NEC San-ei co, Ltd)

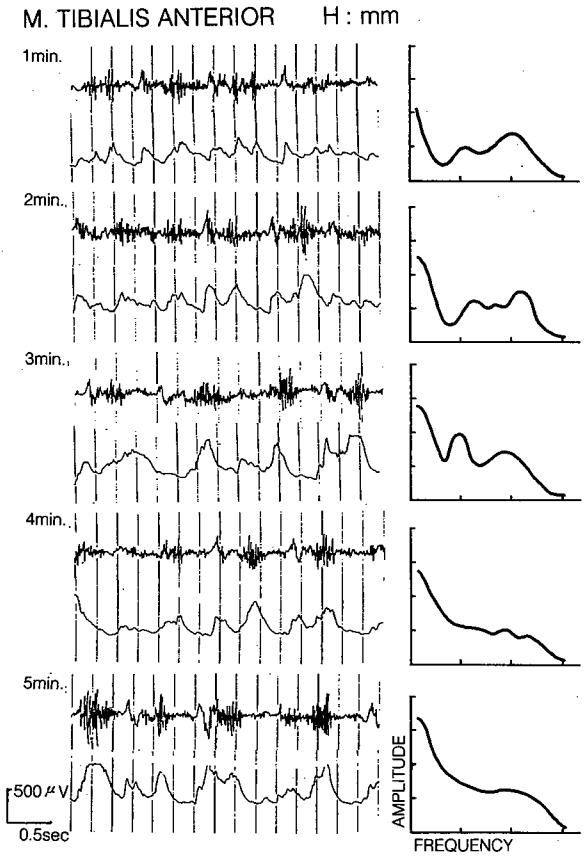

Fig.1 Propagation of SEMG and frequency

分析と考察

Fig 1 は，被検者 A のヒール高 0 m/m における，前脛骨筋，5 分間の表面筋電図と，その積分波，並びにパワースペクトル低周波帯域の分布図である。1 ～ 2 分では，速波が優勢であるが，4 ～ 5 分では，徐波成分の増加がみとめられ，その振幅も次第に増大をしめす。これは，Pipel のいう筋疲労の過程を物

語るものであり，表面筋電図にあらわれる徐波化の傾向や，積分値の増大は，周波数分布上において，前脛骨筋の筋活動電位は，50～60c/s あたりの周波数をしめすとされるが，徐波成分の増大にともない，40c/s 附近にピークをしめす山形のパターンがみられ，4～5分においては，30—40c/s の周波数帯域に周波数成分の移行による増大がみられ，そのパワーレベルも全帯域的に増加の過程をたどっている。このことから，筋疲労の増大による徐波化の進行が，より低い周波数帯域へパワーレベルが移行することになる。従って，筋疲労の程度を測定するにあたって，周波数帯域のパワースペクトル分布の状況を検証することにより疲労の度合を量的に判断出来るものと考へる。以上の点から，運動力学的分析（Kinetic analysis）として，歩行運動による下肢の筋疲労の度合いと，ヒール高との関係を周波数解析によって検証を進めた。

1．筋疲労の進行に対するヒール高の影響

Fig 2－1 は，前脛骨筋のヒール高 0，20，53m/m における周波数スペクトル60c/s 以下の低周波数帯域の周波数成分分布グラフであるが，ヒール高 0 m/m での 1 分において，30—40c/s 帯域での300μV にピークをしめす山形のパターンが，徐波成分の増加とみられる20c/s に分布が移行し，5 分においては，20c/s 以下のパワーの増大がいちじるしくなり，30—40c/s 帯域のパワーも全域的に増加がみられる点から，ある一定範囲の時間帯での運動における筋疲労は大きくはないが，長時間においては，筋疲労が大きく進行すると考へられる。次に20m/m においては，1 分では，30—40c/s 帯域に200μV をピークとする山形と，10—20c/s に270μV の山形のパターンがみられるが，3 分では，30c/s 周辺の帯域へのパワーの移行が見られ，20c/s 以下の帯域の徐波成分の漸増がみられる。5 分においては，10—20c/s 帯域の周波数成分がやゝ増大している。これらの点より，ヒール高20 m/m においては筋疲労が徐々に増大して行くことが理解される。次に53 m/m では，1 分において，30—40c/s 帯域に350μV をピークとする山形のパターンがみられ，30c/s 以下の帯域のパ

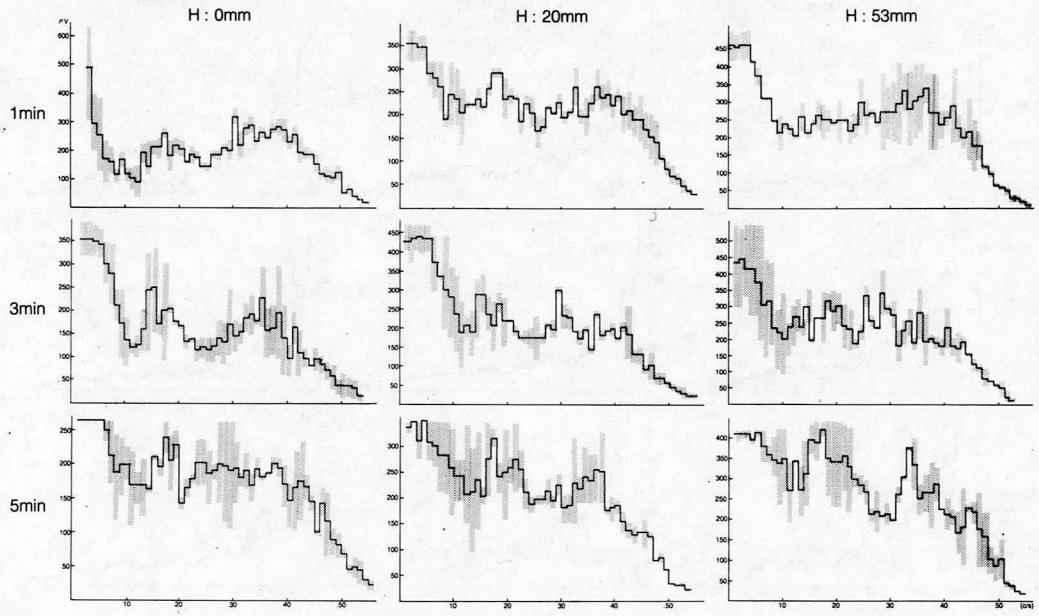

Fig.2-1 Fluctuation between Heel height and Frequency

ワーレベルも前二者に比して高い。3分では，20—30c/s 帯域に350μV をピークとする徐波成分の増大がみられ，5分においては，10—20c/s に400μV の高レベルのピークをもつ山形に移行しているところから，53m/m は，前二者に比して，疲労の進行がいちじるしいと考へられる。

Fig 2 - 2 は，各ヒール高の違いによるヒラメ筋の筋活動周波数スペクトルの分布グラフであるが，ヒール高 0 m/m においては，1分間では，低周波数成分が10—20c/s 帯域に100—150μV の山形で認められ，30—40c/s 帯域で80μV であり，3分間においては，周波数スペクトル分布上のパターンに変化があまり認められないが，5分間では，30—40c/s 帯域のパワーが80—90μV に増加し，10—20c/s 帯域のパワーもまた130μV まで上昇した。これらの傾向から，ヒール高 0 m/m における筋疲労の推移は，あまり大きく変化しないと考へられる。

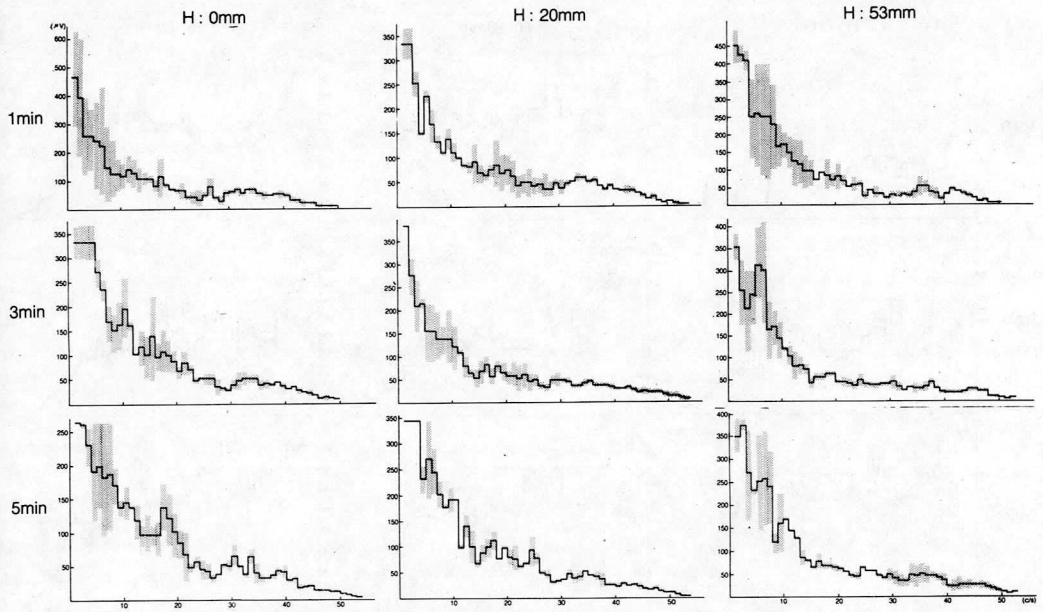

Fig.2-2 Fluctuation between Heel height and Frequency

次にヒール高20m/m では，１分間のスペクトル分布は30—40c/s 帯域に70μV 程度の山形がみられ，10—20c/s 帯域では70—80μV 程度のパワーレベルが認められる。これは３分程度の時間的変化上では，周波数スペクトル分布のパターンには大きな変化が認められず，５分間において10—30c/s 帯域に100—150μV のパワーの漸増が認められるが，安定した分布パターンをしめすところから，筋疲労の大きな進行はないと考へられる。次にヒール高53m/m では，１分間のスペクトル分布は，30—40c/s 帯域に70μV 程度のピークの山形が認められ，10—20c/s 帯域に100—150μV レベルのパワーがみられる。３分間のスペクトル分布は，あまり変化をしないが，５分間において，20—40c/s 帯域のパワーの漸増と，10—20c/s 帯域に100—170μV のパワーの増加が認められた。これらの点からヒール高53m/m の筋疲労の進行は，20m/m に類同した傾向があるようである。

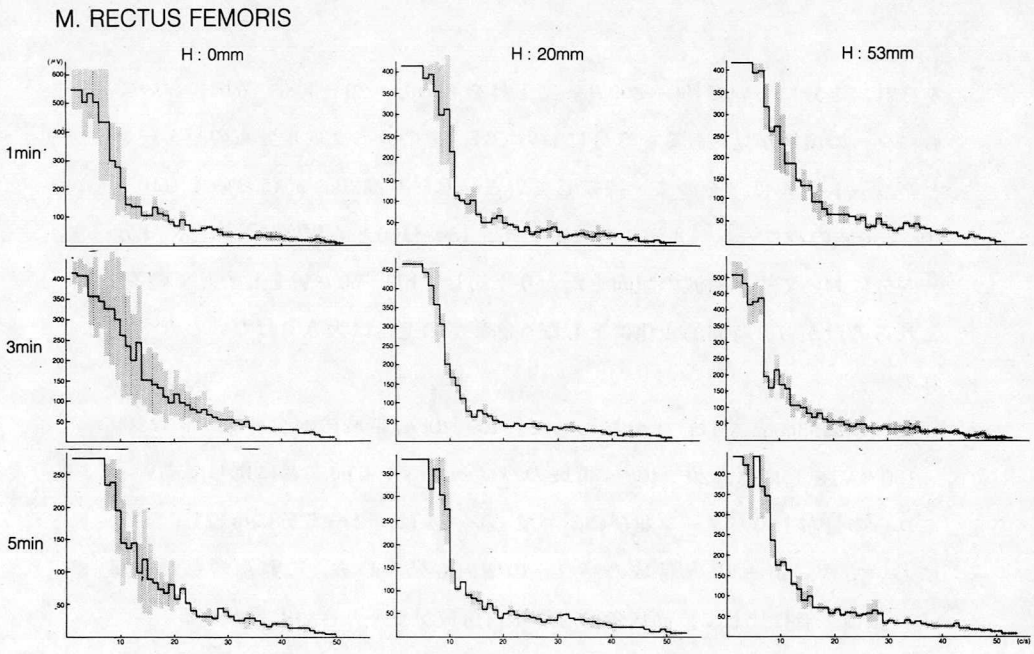

Fig.2-3 Fluctuation between Heel height and Frequency

以上の点を総括すると，ヒール高の条件変化に直接的に対応して働く下腿の二つの骨格筋においては，前脛骨筋の場合，その周波数スペクトル分布のパターンの傾向や，パワーレベルの動揺からして，0 m/m，20m/m は大きな差違にないが，53m/m においては，パワーレベルの時間的経過に対応してその増大がちじるしい点から筋疲労の推移も早く，またその度合も大きいと考へられる。またヒラメ筋では，周波数スペクトル分布は，それぞれに類似した傾向をたどるが，パワー増大変化の度合は53m/m が最もいちじるしく，20 m/m が低い点から，下腿筋にあたえる筋活動負荷量並びに筋疲労の進行からして平均して20m/m が優位であり，0 m/m がそれに次ぎ，53m/m がやや適当でないと考へられる。

Fig 2 - 3 は，大腿直筋の周波数スペクトルグラフであるが，ヒール高 0 m/m では，10—20c/s 帯域に100—150 μV のパワーレベルが，1 分間の特性として

みられ，3分において150—200μVに上昇をしめし，20—30c/s帯域においてもパワーの増加が見られる。5分においては，そのスペクトル分布のパターンとパワーレベルは，そのまゝ持続している。ヒール高20m/mにおいても10—20c/s帯域のパワーレベルが1分において，150—100μV程度に分布し，3分—5分においてやゝ漸減の傾向をたどり平均して100—50μVをしめしている。これらの点から，時間的変化にともなう筋疲労の進行は大きくはないと考へられる。

ヒール高53m/mでは，1分において，10—20c/s帯域のパワーレベルは100—150μVをしめし，20—40c/s帯域のパワーレベルも前二者に比して高い。これらの分布上のパターン並びに，パワーレベルは，3—5分に持続し，5分においては，20—30c/s帯域のパワーの増大も見られる。これらの点から53m/mは前二者に比して，筋疲労に対する負荷量がやゝ大きいと思われる。

Fig 2 - 4は，大腿二頭筋の各ヒール高における周波数スペクトル分布グラフである。ヒール高0m/mにおける1分では，10—40c/s帯域に100—150μVレベルのパワーの分布がみられ，3分では，帯域内周波数成分の増加がみられ，5分でそれぞれの周波数上のパワーの増大が認められた。次に20m/mでは，1分では，30—40c/sに70μVの山形パターンがみられ，10—20c/s帯域に100—150μVのパワーレベルの周波数成分の分布がみられるが，3—5分においてその周波数成分の分布と，パワーレベルは，大きな変化をしめさず持続している。53 m/mでは，1分で10—40c/s帯域に80—170μVレベルのパワーの分布がみられ，3分においては，10—20c/s帯域の周波数成分の増加がみられ，やゝパワー増大の傾向がみられる。

これらの点から，ヒール高の物理的条件の直接関与する下腿の諸筋程，筋疲労による徐波化の進行は，明確ではないが，やはりヒール高20m/mの機能的優位性は他に比して高く，それに次ぐものとして53m/mがあり，0 m/mはやゝ劣るように思われる。

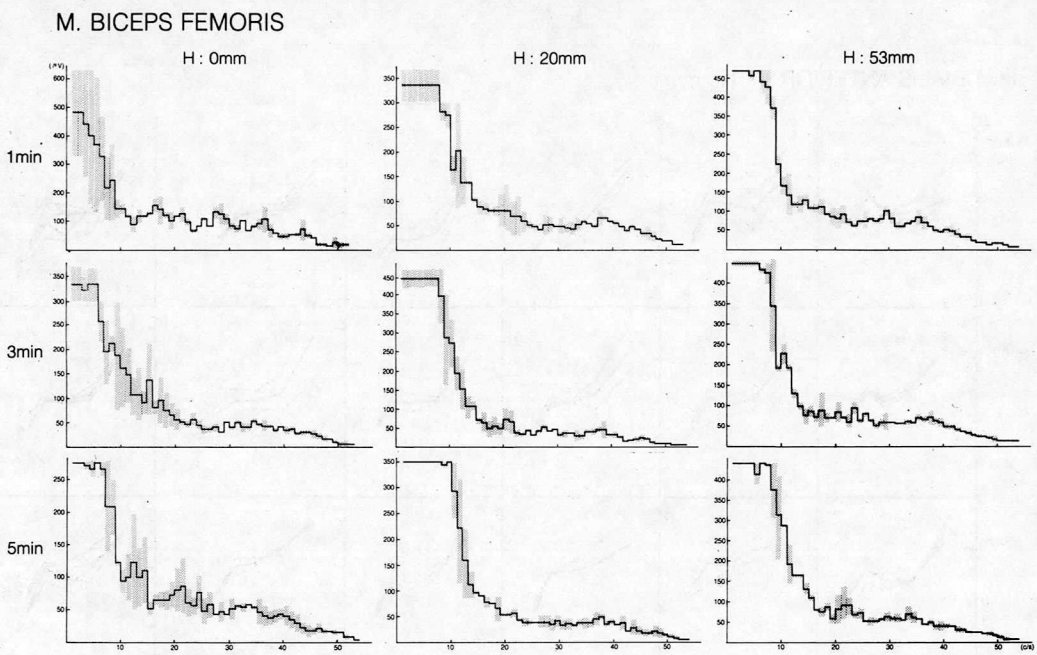

Fig.2-4 Fluctuation between Heel height and Frequency

以上のごとく筋疲労の程度を周波数スペクトル分布上で解析を加えるにあたって，次のごとき基本的条件が考へられる。即ち，筋疲労発生による徐波化をしめす変化の大きい周波数帯域の上限は，総体的に40c/s 前後にあらわれるようであり，筋疲労にともなう徐波成分の増大に相対的に対応して顕著な変化をしめす帯域は30—40c/s 帯域に認められ，被検者の筋疲労の自覚的所見と対応をしめす周波数帯域は，10—30c/s にみられる。従って，より低い周波数帯域への周波数成分の分布の下降の度合や，パワーレベルの増大の程度，あるいは帯域区間分布内での周波数成分の密度等が，筋疲労にともなう徐波成分の増大の程度，ひいては，筋疲労進行とレベルを分析する為の尺度となると考へる。

2．周波数帯域区分上のパワーレベルの変化に対する分析。

Fig（3-1），（3-2）は，低周波数帯域を3—13，13—20，20—30，30—40，40—50c/s の5帯域に区分し，それぞれの帯域内の周波数成分のパワー平

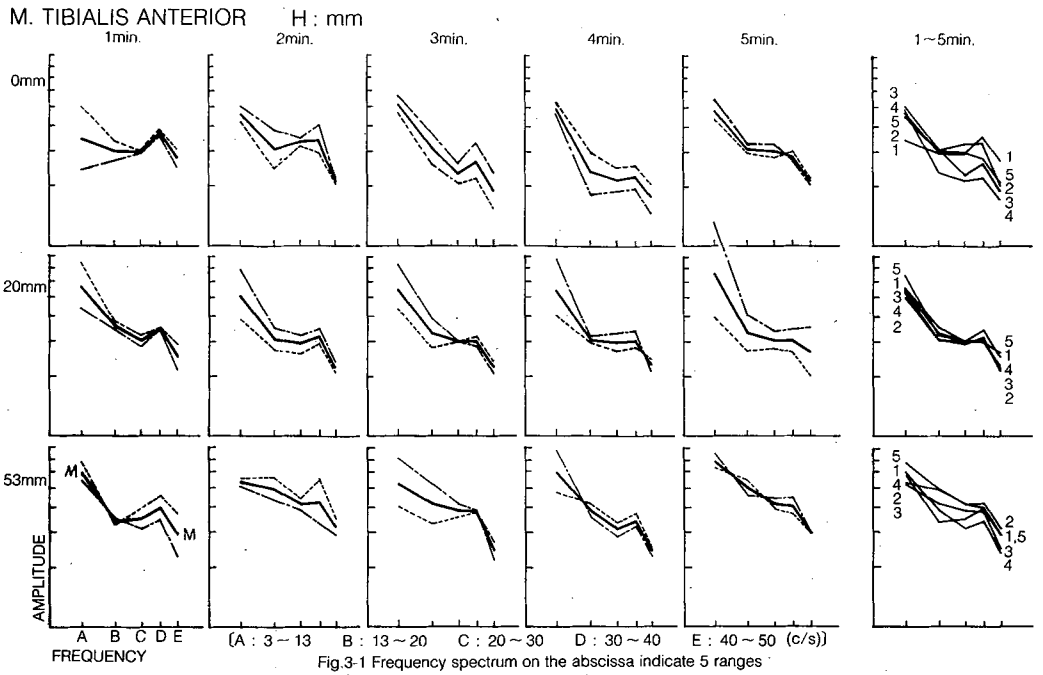

Fig.3-1 Frequency spectrum on the abscissa indicate 5 ranges

均値を算定し，被検者２名のそれぞれの被検筋におけるヒール高の変化による，周波数スペクトル平均値の継時的変化をしめしたものである。これにより，Fig２で分析を試みた周波数成分の分布や移行の状況を総括化して読み取ることが出来る。

前脛骨筋のヒール高０m/m での１分の徐波傾向は，30—40c/s 帯域に山形のパワー分布が見られ，２分では20—30c/s 帯域にパワー移動がおこり，３分では，30—40c/s 帯域のパワーは減衰をたどり30c/s 帯域以下の低周波数帯域へのパワー移動が顕著となる。５分においてその分布パターンのパワーは全体的に増大している。これらの変化を１—５分間の重ねがきグラフで見ると，そのパワーレベルの変化と，移行上の変動はきわめて大きい。

次に20m/m では，１分において30—40c/s 帯域のパワーレベルはやゝ低い傾

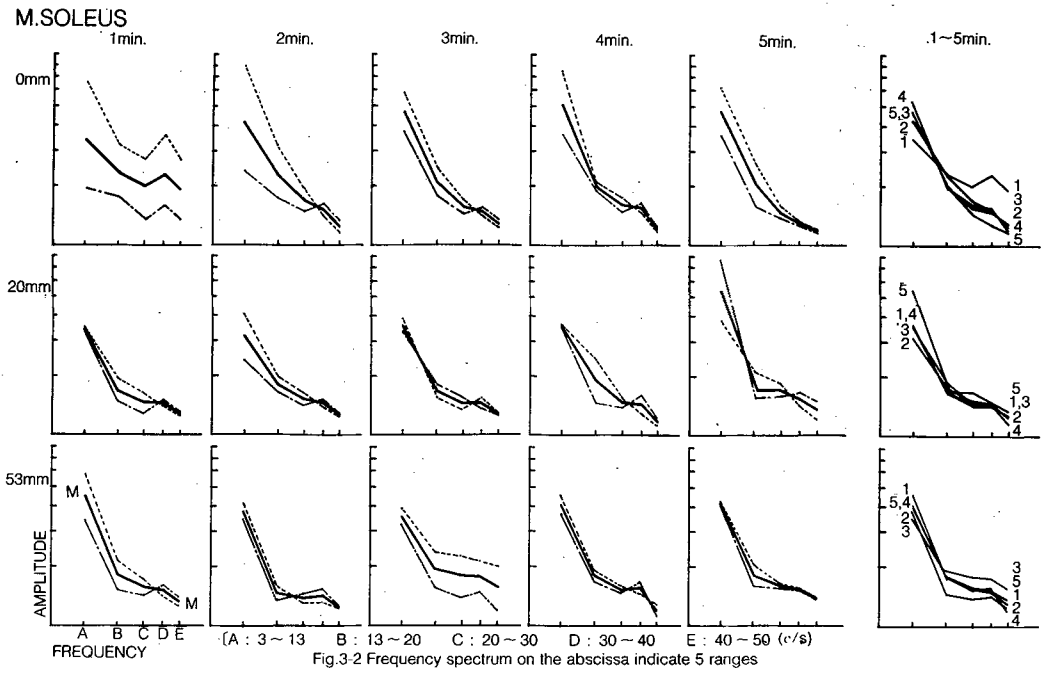

Fig.3-2 Frequency spectrum on the abscissa indicate 5 ranges

向にあるが，20c/s 以下の帯域成分の振幅は 0 m/m より高い。しかしながら，このパターンの傾向は，4 分まで持続し，5 分でやゝそのパワーレベルの上昇が認められるが，それぞれの帯域成分の振幅変化は，1—5 分の重ねがきグラフ上では，変化が小さく，従って筋疲労の継時的進行は大きくはないことが理解される。

次に53m/m の，1 分では，0 m/m のそれに類同し，30—40c/s 帯域に振幅の高い山形がみられ，2—3 分で，13—30c/s 帯域成分の振幅の増大とともに，4 分では，13—20c/s 帯域の振幅もまた増加し，5 分では，低周波帯域成分が全体的にパワーレベルの急速な増大をしめしている。これらの点から，その周波数成分の増大の度合いと，全体的な振幅の増加は，筋疲労の進行を物語るものであるから，20m/m に比べて，0 m/m，53m/m の順で，筋疲労の進行が大

きいことが理解される。

Fig 3 - 2 は，ヒラメ筋のヒール高 0，20，53m/m の周波数帯域区分上での，継時的周波数スペクトル分布平均グラフである。ヒール高 0 m/m の 1 分では，30—40c/s 帯域にピークをしめす山形の分布があり，13—20c/s 帯域で同レベルのパワーレベルをしめしているが，2—5 分の継時的変化にともない，20c/s 以下の周波数成分の量的増加と，振幅の増大がしめす傾斜が見られ，1—5 分の重ねがきグラフ上では，30—40c/s 帯域の周波数成分や振幅の増大の程度は低いことが理解される。

20m/m の 1 分では，すでに13—20c/s 帯域のパワーレベルがやゝ高いが，0 m/m に比べると低い。それは 3 分まで持続するが，4 分でやゝ増大をしめした。5 分では10c/s 以下のパワーの増大がやゝみられる。1—5 分の重ねがきグラフ上では，13—20c/s 帯域での変化が 4—5 分の間でみられる他は，ほとんど同じであり，これらの点から20m/m での筋疲労の進行は，さほど大きくはないと考へられる。

53m/m では，1—2 分で13—20c/s 帯域に山形をしめす分布がみられ，3 分より13—20c/s 帯域のパワーレベルが上昇をみせると共に，30—40c/s 帯域でのパワーの増大も付髄してあらわれる。これは 5 分においても持続したパターンをしめしている。これを 1—5 分の継時変化の重ねがきグラフ上でみると，13—20c/s，30—40c/s 帯域成分のパワー上昇がみられる点から，ヒラメ筋の筋疲労の進行は，20m/m，53m/m 0 m/m の順に高くなると考へられる。

以上のごとく，周波数帯域区分上での，周波数成分の増加の傾向や，振幅の増大の様相から，すでに述べたごとく，筋疲労の発生と，進行に対応した徐波化の帯域は，大体，20—40c/s の間におさまって来ており，30c/s を中心としてそれぞれの帯域のもつ周波数成分の密度と振幅レベルの変化によって，筋疲労の進行レベルを計量できるように思われる。

3．筋の周波数スペクトル変化の相関分析

ヒール高０m/m においては，前脛骨筋，ヒラメ筋の周波数成分の量的変化が，30c/s から漸次20c/s 以下の帯域に移行し，尚振幅の増大が認められることから，筋疲労の進行を知ることが出来る。しかもヒラメ筋における振幅の増大は前脛骨筋よりも顕著である。それに比して，大腿直筋の30—40c/s 帯域の振幅も低く，継時的変化も大きくない。しかし大腿二頭筋においては，20—40c/s 帯域の周波数成分の振幅も大きく，20c/s 以下への振幅の増大が継時的にみられる。これらの諸点から，下腿筋の筋活動負荷量程に大腿筋の負荷量が大きくなく，疲労の進行もまた，少ないが，ヒラメ筋，大腿二頭筋（屈筋）の側に疲労の進行や負荷量が大きいことが理解される。

ヒール高20m/m においては，前脛骨筋，ヒラメ筋の周波数スペクトル分布のパターンとそのパワーレベルは良く類同しており，時間経過にともない20—40c/s 帯域のピークは，次第に20c/s 以下の帯域へ移動し，その振幅も増大する。これに比べ，大腿直筋の周波数スペクトル分布は，０m/m に類同し，大差がみられない。大腿二頭筋では０m/m に比べ，20—40c/s 帯域の周波数成分の振幅は低く，継時的変化も大きい変化はみられない。また20m/m においても下腿筋の側に筋活動負荷量が大きく，屈筋の側に筋疲労進行上の徐波成分の増大がみられるが，０m/m よりも少ない。

ヒール高53m/m では，前脛骨筋，ヒラメ筋は20m/m に比べ，20—40c/s 帯域に全体的な周波数成分の増加がみられ，そのパワーレベルも高い。大腿直筋は，０m/m，20m/m と類同するが，大腿二頭筋の周波数成分の分布は０m/m，20m/m よりもそのパワーレベルはやゝ高い。以上のごとく三次元グラフ上にしめした周波数スペクトルの継時的帯域上の周波数成分の移行と，そのパワーレベルを相関的に述べたが，すでに検証した二つの分析結果と合せて総括的に考察すると，やはりヒール高20m/m，０m/m，53m/m の順にその機能的優位性が考へられる。

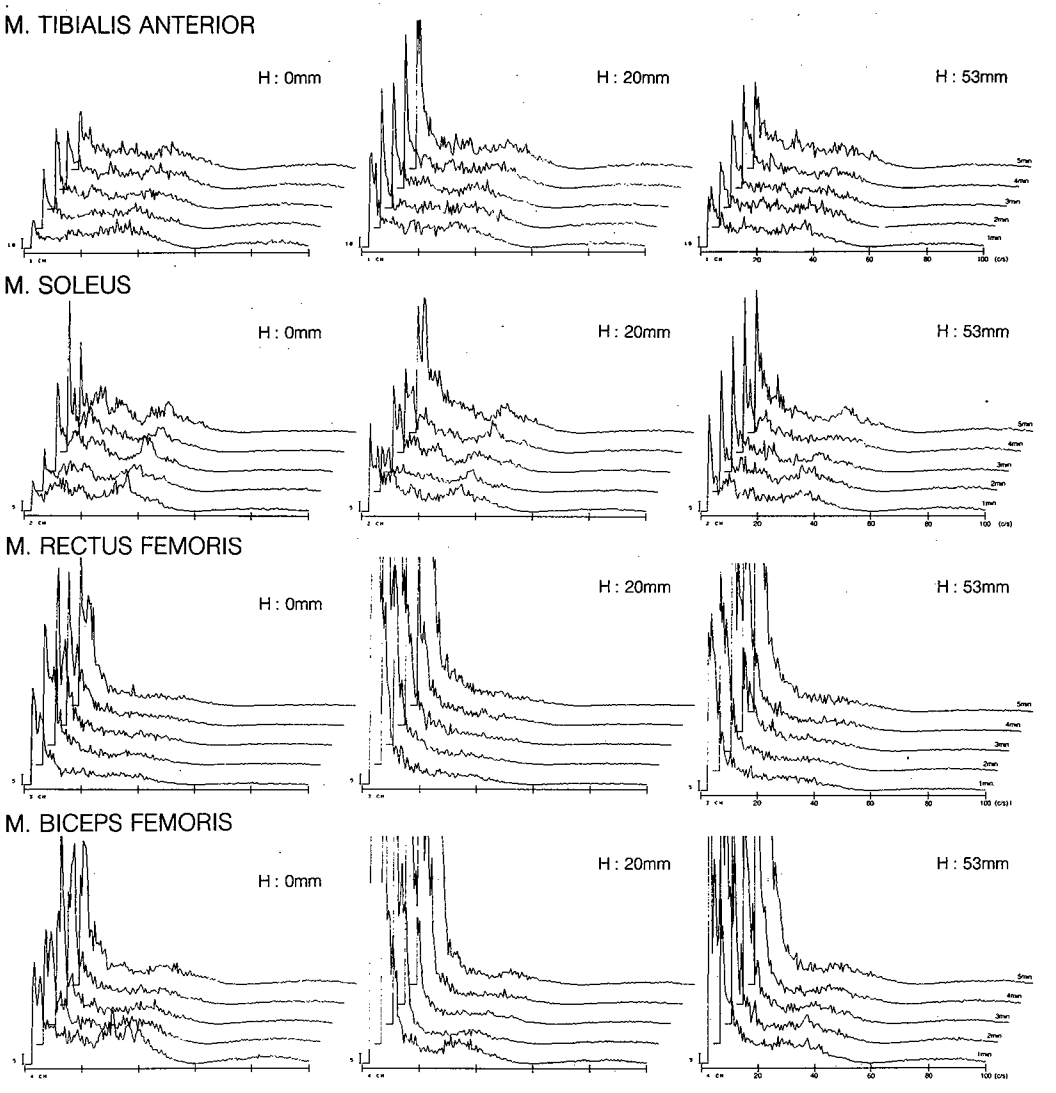

Fig.4 Flactuation of Frequency with the time elepsed

要　約

すでに検証してきた，ヒール高の物理的変化にともなう，筋疲労の度合いを周波数スペクトル分布上の，周波数成分の量的な増加，並びに振幅の増大，あるいは周波数帯域の変化等の分析を通じて，筋疲労の発生と進行の程度を考察し，その機能的なヒール高に対して再度の検証を加えた。

従来，筋疲労にともなう表面筋電図活動電位の振幅の増大や，積分値の漸増[1]が報告される一方，筋疲労に対応して表面筋電図の徐波化が生起すること[2]は，Piper を始め，cobb，altenburger 等により報告され，疲労しない時点での周波数レベルは，50—60c/s が定常的であるとされ，それに比して，疲労の進行にともない20—30c/s の波が優勢になる[3]ことも述べられている。筋疲労の進行にともなう徐波化の外見上の周波数分析の古典的手法から，周波数スペクトル分布上での分析は，筋疲労時の徐波化の度合を量的に測定することが出来，上記の報告を裏付ける結果を得ることが出来た。

参考文献

1．Lippold, O, C, J. Redfearn, J.W.T & Vucō, J. : The electromyography of fatique. Ergonomics 3 : 121—131, 1960.

2．Cobb,S. & Forbes,A : Electromyographic studies on musclear fatigue in man. Amer J.Physiol 65 : 234—251, 1923.

3．Altenburger,H : Der Einfluss der Ermüdung auf die AKtionsströme menschlicher Muskeln. Pflüg. Arch. 202 : 645—657, 1924.