

## ◇ 研修セミナー ◇

## 筋疲労について

眞野 行生\*

## 疲労とは

通常疲労は長引いた活動により、その能率が低下し、疲労感を感じ、回復にかなりの時間を要する状態である。

疲労が生じるには、生物学的現象だけではなく、経済的および社会的現象にも関与している。経済的・社会的要素が脳辺縁系などを介してヒトの運動能や疲労に関与することは多い。外的環境による疲労と、神経系ならびに液性因子や内臓疾患などの内的環境の変化による疲労の区分もある。

疲労には、全身を使う作業により起こる全身疲労と、特定の筋を繰り返し使うために現れる局所的な痛みや違和感を呈する局所疲労がある。

急性疲労は短い休養で回復する一過性の疲労を指し、慢性疲労は蓄積疲労ともいわれ、運動が何日間にもわたり次第に疲労が積み重なって回復が難しくなる疲労で、病的変化を招く。

臨床的に問題となる疲労現象が生じると判定する場合には、機能の遷延が翌日の活動に影響を及ぼし、日常的な活動が困難になる場合を指していることが多い。しかし観察すると、その前に疲労を示唆する現象がみられる。疲労は刺激に対する反応が鈍くなった状態とも考えられる。

## 筋疲労とは

運動をしたり、精神的な仕事をすると疲労を感じる。このうち筋の随意的連続収縮で起こる運動

系に関与する疲労が筋疲労と総括されている。動作する時の最終共通路が筋であり、筋出力に機能的変化が起こり運動での疲労が起こる。随意運動制御システム(図1,2)についてはAllen-Tsukahara model以後、種々に改良が加えられてきている。この随意運動制御系での疲労が筋疲労といえる。

筋萎縮性側索硬化症(ALS)で筋収縮を繰り返していると、筋力は徐々に減少する。これは運動の実行過程の障害である。若年性パーキンソン病には歩行の始まりはうまく歩けるが、長らく歩いているとakinesiaが強まり、ついに歩行が不能となる症例がある。睡眠をとったり、休んだりすると再び回復して歩くことが可能となる。この場合は運動のプログラム過程での疲労と考えられる。

筋疲労は中枢性疲労と末梢性疲労に分けられている。Bigland-Ritchieらの区分(表1)はおおまかなものであり、その区別ははっきりしないが、

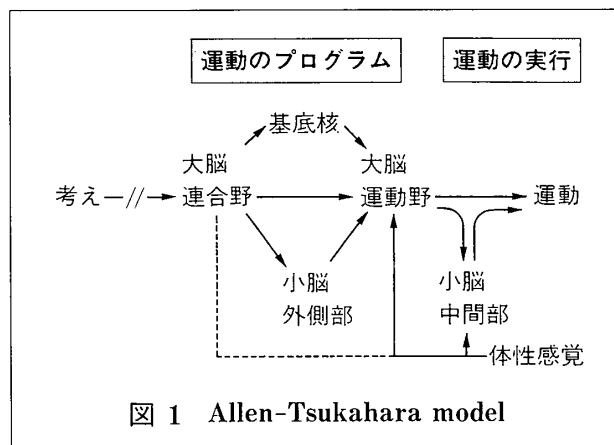


図1 Allen-Tsukahara model

\*奈良県立医科大学神経内科/〒634 奈良県橿原市四条町840

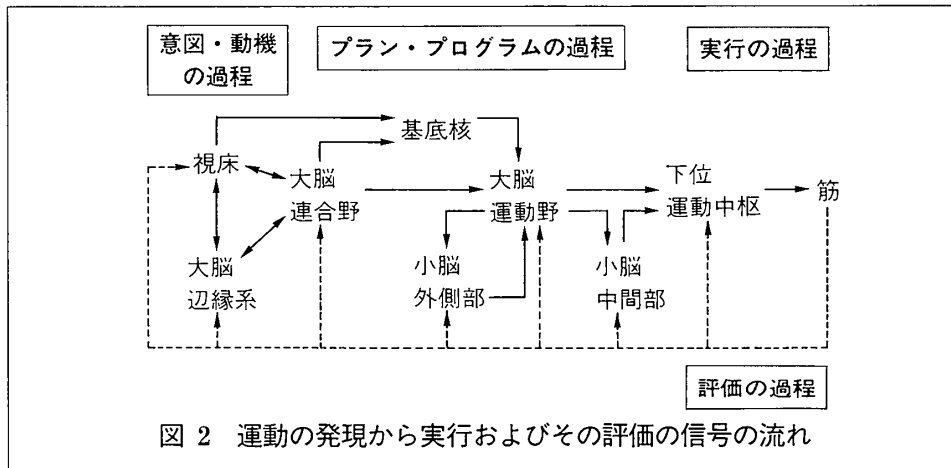


図 2 運動の発現から実行およびその評価の信号の流れ

表 1 ヒトの筋疲労が発現される生理学的機構と検索方法<sup>4)</sup>

筋疲労の誘発要因	要因の検索
中枢性疲労 神経駆動の減弱 運動意識実行力の減弱	機能する運動単位数 運動単位の発射頻度
末梢性疲労 筋張力発生の減弱 神経-筋伝達機能低下 1. ATP 供給速度の減少 (エネルギー減少) 2. 筋線維膜へのエネルギー供給不足 a) 張力低下と筋線維膜活動電位の伝導減少 b) 筋小胞体の $Ca^{++}$ ポンプ機能低下 3. 蓄積物質 a) 細胞内 $H^+$ PFK とリン酸酵素活性の抑制 $Ca^{++}$ 活性アクトミオシンの機能減少 b) 細胞外 $K^+$ 筋小胞体の活動電位と伝導減少 興奮-収縮連関の効率低下 T管系の活動電位の減少	高周波数神経電気刺激法 (high frequency fatigue) NMR スペクトル法 (ATP, PC, Pi, pH, $H^+$ など) 筋生検 (muscle biopsy) 法 低周波数神経電気刺激法 (low frequency fatigue) EMG 積分法 EMG スペクトル法 誘発 EMG 法

中枢性疲労は中枢神経系を主として、末梢性疲労は運動単位、すなわち末梢神経・筋系の疲労を主とする。また随意運動を長く続けていて筋疲労が起る場合、どこでより疲労が起こっているかを判別することは大切である。

### 中枢性疲労

運動の指令が脳運動野の錐体細胞より皮質下行路により脊髄前角細胞まで到着し、運動単位に伝達される。この系は運動の実行過程と呼ばれる。中枢性疲労として、1) 筋への直接的電気最大上刺激や間接的電気最大上刺激を行うと、随意運動での

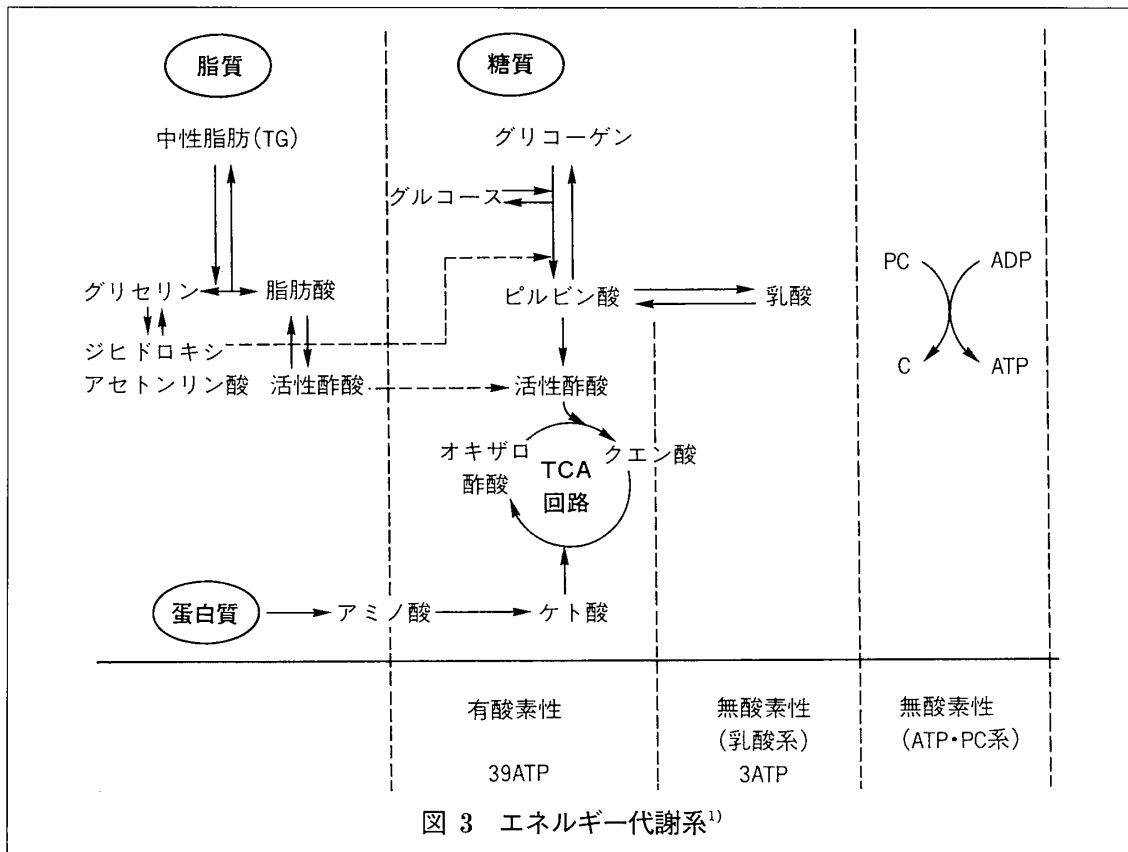
最大張力以上の、誘発張力が得られる、2) 被験者の最大努力での張力が経時的に低下していく過程で、超最大努力によってそれ以上の張力が得られないこと、の2項目がいわれている。しかし運動の中枢制御では運動の動機づけの要素、運動のプログラム過程や固有受容覚などからの各種フィードバック機構があり、それらが中枢性疲労に関与し、複雑にしている。

### 末梢性疲労

末梢性疲労では筋、神経筋接合部、末梢神経での疲労が問題になる。筋ではエネルギー供給機構

表 2 筋でのエネルギー供給機構

- 1) クレアチンリン酸 (PC) の分解 (ATP-PC 系)
- 2) グリコーゲン, グルコースなどの分解 (解糖系)
- 3) 脂肪酸, グルコース, グリコーゲンなどの有酸素的分解 (酸化系)

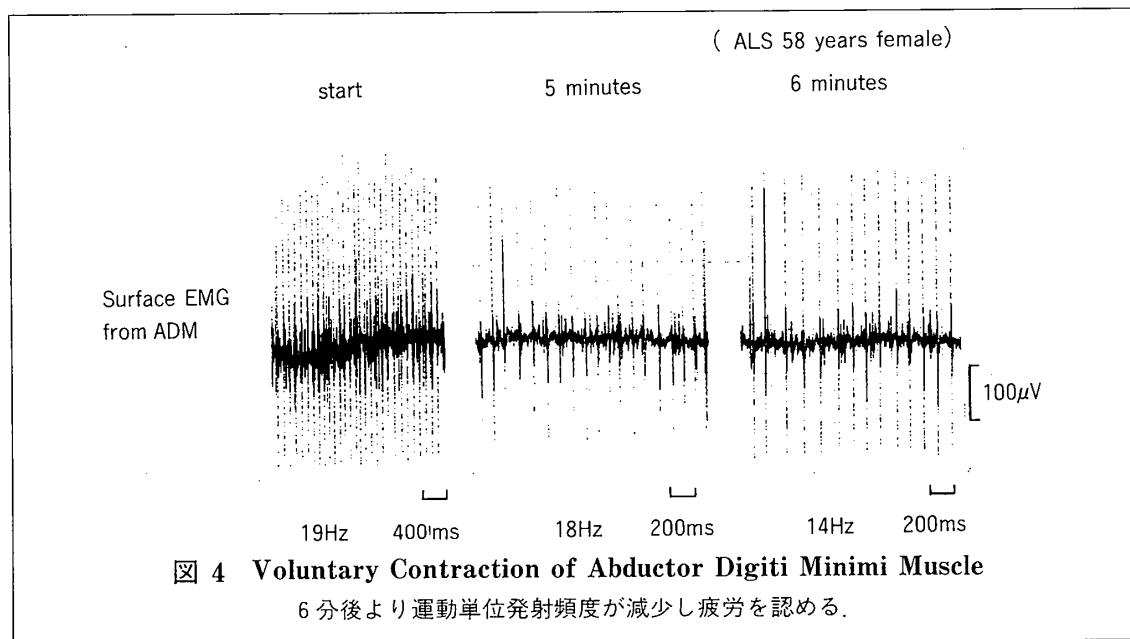


について詳しい研究がなされている。

### 筋でのエネルギー供給機構と疲労 (表 2, 図 3)

疲労はエネルギーの欠乏や代謝産物の蓄積および筋内水素イオン・pH の変化により起こる。運動を開始するとエネルギーとして ATP が消費される。これには筋肉のクレアチンリン酸 (PC) を消費して補充されるが、この系によるエネルギー供給は短時間である。同時に筋内のグリコーゲンが動員され、ATP が作られる。運動の初期には無酸素的解糖により、乳酸になる。運動を続けると、酸素運搬系が働き、グリコーゲンなどを酸素とともに消費し、有酸素的解糖で ATP が作られる。

このように筋では 3 種のエネルギー産生が行われる。運動によって生じる生理生化学的変化が過度になり疲労となる。筋線維種類別にみると、速筋は無酸素性代謝により乳酸が蓄積されやすく、疲労が容易に起こる。一方遅筋においては、有酸素性代謝のため疲労は起こりにくいが、筋グリコーゲンの欠乏により疲労は起こる。筋での T 管系の伝導と筋小胞体の  $Ca^{++}$  の放出などの機構は張力低下の要因となり、筋疲労との関係が注目されている。運動により酸素要求が生じるが、 $\dot{V}O_2max$  は持久性運動能の有用な指標である。筋疲労は脱水、脱塩、体温上昇、ビタミン欠乏、薬剤などにも関与する。疾患、特に筋疾患、神経筋接合部疾患、その他の運動系疾患、循環器疾患、呼吸器疾患などにより疲労は生じる。



廃用性萎縮	維持	許容運動域		損傷
		訓練効果	訓練効果プラトー	
ベッド上臥床	日常生活活動	訓練プログラム		過用
	最小効果 訓練量		最大効果 訓練量	

図5 訓練の治療域について

### 疲労に伴う運動単位の発射の変化

筋負担が大きくなると、筋放電の振幅は増大し、積分値も増す。また運動単位発射の同期化が起こる。筋疲労では運動単位発射周波数スペクトルは変化し、低周波成分へ変化し発射の徐波化が認められる(図4)。

神経筋接合部疾患である重症筋無力症では4~6 Hzの神経刺激で運動誘発電位の振幅の漸減現象が認められる。このような筋では長時間の筋収縮で著明な筋力低下が認められる。

### overwork weakness

リハビリテーションの運動訓練では overwork weakness が注目されている。運動訓練をする時に運動量が足りないと、廃用症候群となる。運動量が多すぎると過用症候群となり、その代表的状

態が overwork weakness であり、筋痛、腱断裂なども出現する(図5)。ALSでは運動単位の脱落により、神経の発芽再生が起こっているが、多くの筋線維を支配するようになった大きな運動単位は多量の axoplasmic flow が必要となり、overwork となり、ついに死に至るといわれている。また、Guillain-Barré 症候群の早期には末梢神経近位部で浮腫が起こっており、そこでの axoplasmic flow は障害されており、この時激しい運動訓練を行うと過用によりかえって脱力が起こる。ポリオ後遺症での脱力でも過用により weakness が出現すると推測され、ALS 様に進行する症例が報告されている。同じような現象は糖尿病性ニューロパチーで末梢神経の末梢部ほど障害される dying back 現象では、同じような機構の存在が推測される。

## 筋 痛

急に訓練した時や、激しい訓練をした後に遅発性筋痛を感じる。筋収縮の方法の中では伸張性収縮が筋疲労を最も早く現し、遅発性筋痛が発現しやすい。遅発性筋痛は、CK 値の上昇を伴っていることが多く、時に急性横紋筋融解症を呈する。筋痛は筋線維に起こっている異常事態のサインと防御機構に伴って誘発される現象と考えられ、これが過度になると障害が悪化する。

リハビリテーションでの運動訓練では、1) 疾患により運動障害が起こり、疾患急性期に安静にし、運動不足になり、 $\dot{V}O_2\max$  の低下などが起こることに対応する訓練と、2) 障害された機能を増強あるいは代償するための訓練がある。運動訓練をすると、代謝的には同じ運動量でも、乳酸の

蓄積が少なくなり、乳酸耐性が高くなり、筋グリコーゲンの消費節約と脂肪消費が行われ、また  $\dot{V}O_2\max$  が高められ、疲労が少なくなり、連続的な筋収縮力は増強し、活動の能率を上げることができる。

### 参考文献

- 1) 朝比奈一男：運動とからだ。大修館書店，東京，1991.
- 2) Bigland-Ritchie B, Jones DA, Hosking GP, Edwards RHT: Central and peripheral fatigue in sustained maximum voluntary contractions of human quadriceps muscle. Clin Sci Mol Med 54: 609-614, 1987.
- 3) 森谷俊夫, 根本 勇(編)：スポーツ生理学. 朝倉書店, 東京, 1994.
- 4) 室 増男：筋疲労：筋痛のスポーツ生理学. 森谷俊夫, 根本 勇(編)：スポーツ生理学. 朝倉書店, 東京, 1994, pp. 86-100.
- 5) 永田 晟：筋と筋力の科学. 不昧堂出版, 東京, 1988.