

運動処方のための筋のトレーニング効果に関する研究 —種々の運動に対する骨格筋の機能適性—

山下 晋, 鈴木 英 樹, 春日 規 克, (愛知教育大学)

Study of muscle trainability for prescription —Functional development of various training in rat skeletal muscle—

Susumu YAMASHITA, Hideki SUZUKI and Norikatsu KASUGA
(Aichi University of Education)

The purpose of this study was to make clear the influence of various training on the development morphological physiological and biochemical changes muscle. Fischer 344 female rats were assigned to treadmill running, swimming, jumping, voluntary running, tenotomy, and control group. Muscle had hypertrophied and maximum tetanic tension increased in treadmill running, jumping and tenotomy groups. But whereas swimming is fast exercise, opposite result is indicated because of light load. Speedily exercise swimming and jumping groups, we could not obtain definite change of myosin heavy chain related to contraction time. The endurance ability developed in the all training groups. Particularly we observe significant increase in the type I fiber composition in voluntary running and tenotomy groups, and these groups remarkable developed on endurance ability.

These data indicated the difference of training style results in selective adaptation for a lot of muscle factor affect function, and functional change is not explained with one factor about myosin heavy chain composition, fiber type composition and so on.

【緒言】

骨格筋に対するトレーニングの様式の違いによる効果に関して、多くの報告がある。瞬発的なトレーニングを行うと筋重量が増加したり、収縮速度の速い線維が増加することが知られている^{3) 6)}。反対に、持久性トレーニングを行うと、速筋線維間で酸化系酵素活性の高い線維への移行や毛細血管の増加などを起こす⁸⁾。また、持久性走運動を行うと、筋の収縮タンパクであるミオシン重鎖(myosin heavy chain : MyoHC)において、type II b MyoHCの減少とtype II d MyoHCの増加など、形態的な変化が報告されている。それぞれのトレーニングには強度、持続時間や筋収縮の活動性、間欠性、活動参加様式が種々異なることが考えられる。また、筋の機能を支えるさまざまな要素が

運動様式と複雑に対応して変化することが考えられ、トレーニングによる形態的な変化と、パフォーマンスとして発揮される機能的変化は必ずしも一致していないことも知られている。

本研究では、ラットに種々の運動を行わせ、運動様式の違いがどのように形態的变化を起こすか、また、その発達の違いはどのように機能変化に関わるかを調べ、運動処方作成の一助とした。

【方法】

実験動物にはFischer344系雌ラット38匹を用い、生後4週齢の時点で5群に分けた。各群は持久性トレーニングのモデルとして強制走(treadmill running : TR)群、水泳(swimming : Sw)群、自発走(voluntary running : VR)群、瞬発的なトレーニングのモデルとしてジャンプ(jumping : Ju)群、

Table 1. Body weight, relative muscle weight, and relative heart weight in each group.

	Con	TR	Sw	Ju	VR	Teno
Body weight (g)	156.0±2.0	157.0±2.1	151.3±3.2	148.0±3.0	144.6±2.9	133.0±2.3*
muscle weight (mg)	140.9±3.2	163.2±4.7*	130.7±2.1	158.8±4.7	144.2±4.1	180.3±8.8*
relative muscle weight (mg/100g B.W.)	90.3±1.8	103.9±1.9*	86.9±0.9	107.3±1.3*	99.7±1.9*	140.0±3.5*
relative heart weight (mg/100g B.W.)	270.9±2.5	314.0±2.8*	308.6±3.8*	296.2±2.2*	311.9±4.0*	325.6±5.8*

Values are mean ± SE. *: Significant difference from control group (p<0.05).

B.W.; body weight

特異的な筋肥大を起こすモデルとして協働筋を切除した後、自発走を行わせた (tenotomy+VR: Teno) 群と対照 (control: Con) 群に分けた。TR群は小動物用トレッドミルを用い、速度40m/min、上り傾斜8度の走行を1時間行った。Sw群は高さ35cm、水温30±1℃に保った水槽内で、体重の5-8%の負荷を課し1時間の水泳を行った。Ju群は高さ40cmの連続ジャンプトレーニングを100回行った。VR群は回転車輪付飼育ゲージにて飼育し、自発走を行った。トレーニングは生後4週齢から開始し、1日1回、週6回の頻度で行い、2週間の予備トレーニング後、8週間行った。Teno群は生後9週齢時に足底筋の協働筋である腓腹筋の筋腹を電気メスで切り取り、ヒラメ筋を腱の部分で切断した。手術後1週間は通常に飼育した後、4週間自発走を行わせた。水は24時間自由摂取、餌(日本ク

レア:CE-2)はトレーニング開始から19日目まで自由摂取としたが、19日以降は各群の体重をそろえるために、摂餌量を調節した。ラットの飼育室は常に換気し、気温24±1℃、明暗サイクルは昼夜逆転の12時間サイクルを保った。

トレーニング終了後、ラットの体重を測定し、ペントバルビタール麻酔下にて、流血を維持した状態で被験筋である足底筋 (Plantaris) の張力測定を行った。張力測定は被験筋を36-36.5℃のリングロック液中に浸漬し、0.1msec短形波による坐骨神経からの間接極大電気刺激により、至適長における単縮時間 (CT)、最大強縮張力および疲労耐性の測定を行った。なお、疲労曲線は1/2最大強縮張力が得られる電気刺激頻度により、450msec間の不完全強縮を1.5sec毎に5分間継続して求めた。

Table 2. Contractile properties in each group.

	Con	TR	Sw	Ju	VR	Teno
Contraction time (ms)	16.9±0.3	16.4±0.7	15.0±0.3	15.5±0.4	16.5±0.7	18.1±0.3
Maximum tetanic tension (g)	189.1±15.4	236.4±13.4	164.6±3.6	257.9±11.1*	233.5±6.4	274.2±8.7*
Maximum tetanic tension (g/100 g M.W.)	131.8±11.0	138.7±6.5	124.9±2.9	166.7±8.6	149.7±4.9	158.1±9.0

Values are mean ± SE. *: Significant difference from control group (p<0.05).

M.W.; muscle weight

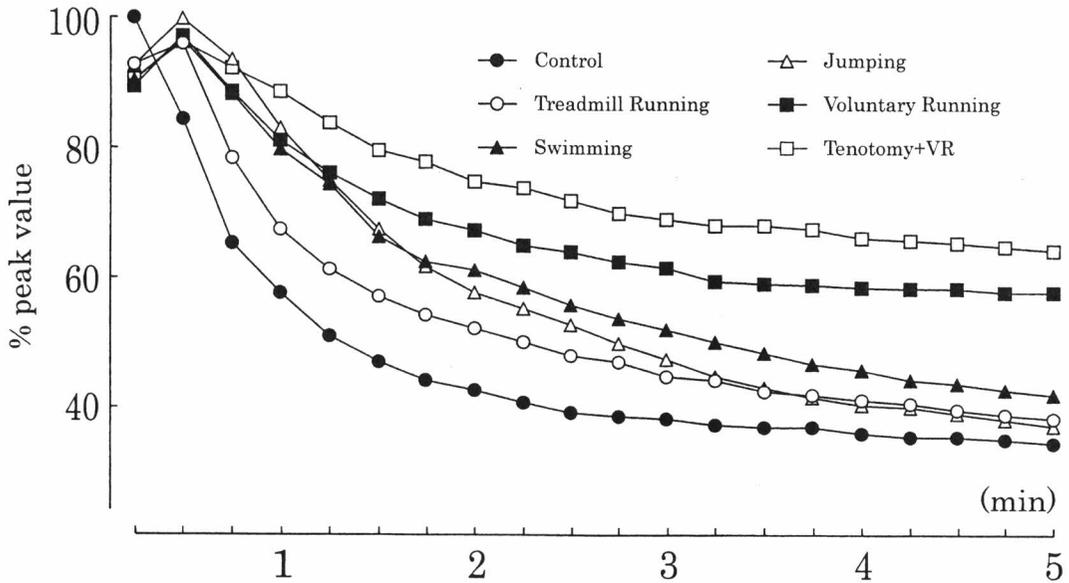


Fig.1. Fatigue curve in each group.

張力測定後、直ちに足底筋を摘出、湿重量測定後、液体窒素中で冷却したイソペンタンにより瞬間凍結させた。凍結組織は筋線維タイプ構成比、毛細血管密度、酸化系酵素活性、筋線維の横断面積を観察するために、筋腹部より厚さ10 μ mの連続横断切片を作成した。トレーニングに対する筋線維組成の変化を知るために組織化学染色の指標としてMyosin ATPase染色を行い、筋線維タイプを分類し、筋線維1本を取り囲んでいる毛細血管の数(CC)を調べた。また、酸化系酵素活性の指標であるコハク酸脱水素酵素(SDH)染色を行い、酵素活性の測定と同時に筋線維の横断面積を調べた。残りの筋は粗ミオシンを抽出し、SDS存在下の電気泳動法(SDS-PAGE)にてMyoHCアイソフォームの分離を行い、構成比を調べた。

総計処理のため、各群の測定値において平均値と標準誤差を算出した。全群間の差を一要因(トレーニング条件)の分散分析(ANOVA)にて検定した。それぞれの分散分析では、主効果が有意になった場合の多重比較をF(t²)とするScheffe法を用いた。すべての検定において有意水準は5%(p<0.05)とした。

【結果】

表1にトレーニング終了時の最終体重、筋重量、相対的筋重量、相対的心重量を示した。体重は摂餌量を調節したが、Con群に比べTeno群が有意に低値を示した。相対的筋重量はCon群に比べSw群を除くトレーニング群で有意に高値を示した。また、Sw群は低値を示したが有意差はなかった。循環器能の持久性発達の指標となる相対的心重量はCon群に比べ、全てのトレーニング群で有意に高値を示した。

表2に足底筋の収縮特性を示した。短縮時間(CT)はCon群に比べSw群、Ju群で短縮、Teno群では遅延する傾向が見られたが有意差はなかった。最大強縮張力(Maximum tetanic tension)はCon群に比べJu群、Teno群が有意に高値を示し、TR群、VR群では有意差はないが高値を示した。また、筋重量あたりの強縮張力ではJu群、VR群、Teno群が高値を示すものの、有意差はなかった。

図1に筋持久力の指標である疲労曲線を示した。持続筋力発揮時間の延長に伴い張力の低下具合はすべての群で異なっていた。刺激1分以内の張力

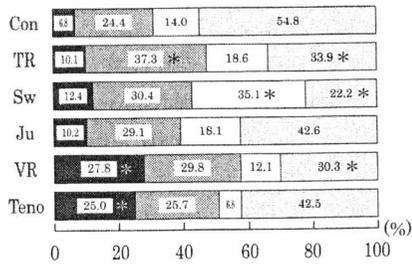


Fig.2. Fiber type composition in each group.

Values are mean. *: Significant difference from control group($p < 0.05$).

■ type I ■ type IIa □ type IIb □ type IIc

下降率はSw, Ju, VR群で差がないが, 3分以降の残存率はVR群が高く, 次いでSw群, Ju群であった。刺激5分後の筋力発揮はC群に比べ全てのトレーニング群で優れていた。

図2に筋線維タイプ構成比を示した。トレーニング群はCon群に比べ, type I, type II a線維の増加とtype II b線維の減少が観察された。またtype I 線維において, Con群 (6.8%) に比べVR群 (27.8%), Teno群 (25.0%) で有意な増加が認められた。

図3に筋線維1本を取り囲む毛細血管の数 (CC) を示した。Con群に比べJu群は低値, TR群, VR群は高値を示す傾向にあり, Sw群, Teno群では変化が見られなかった。

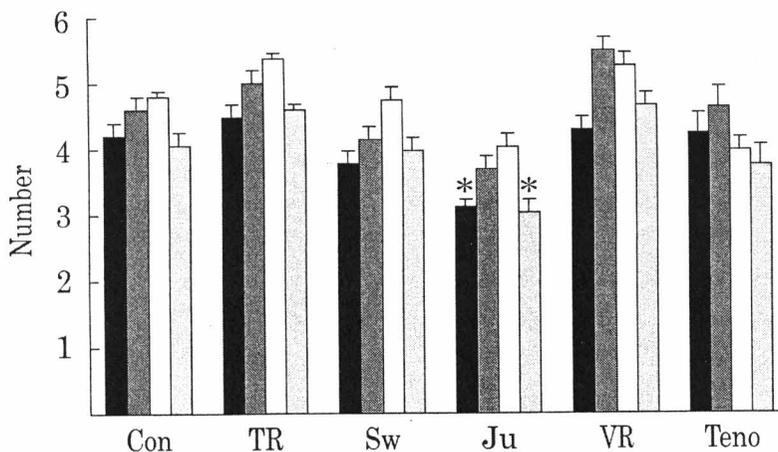


Fig.3. Number of capillary in contact with fiber in each group.

Values are mean \pm SE. *: Significant difference from control group($p < 0.05$).

■ type I ■ type IIa □ type IIb □ type IIc

図4に筋線維の酸化系能力の指標となるSDH活性に筋線維横断面積を掛け合わせたIntegrated succinic dehydrogenase (ISDH) を示した。Con群に比べ, type I 線維では, TR群, type II a線維ではVR群, type II d線維ではTR群, type II b線維ではJu群が高値を示したが有意差はなかった。

図5にMyoHCアイソフォームの構成比を示した。Con群 (1.4%) に比べtype I MyoHCでは, VR群 (20.1%) が有意に高値を示した。また, Con群に比べtype II d MyoHCでは, Sw群, Ju群が有意に高値を示し, type II bではJu群が有意に低値を示した。

【考察】

本研究はラットの下肢底屈筋である足底筋に対し, 種々の運動がどのような形態的变化を引き起こし, 機能変化に関わるかを調べた。

本実験で行ったトレーニングの持久性の有効指標の一つである相対的心重量を比較した結果, Con群に比べ全てのトレーニング群で有意に高値を示し, 適切な強度であり有効な運動であることが示された。

足底筋の相対的筋重量はCon群に比べ, Sw群を除くトレーニング群で有意に高値を示したことから, 水泳運動は下肢の動きは速いものの, 負荷

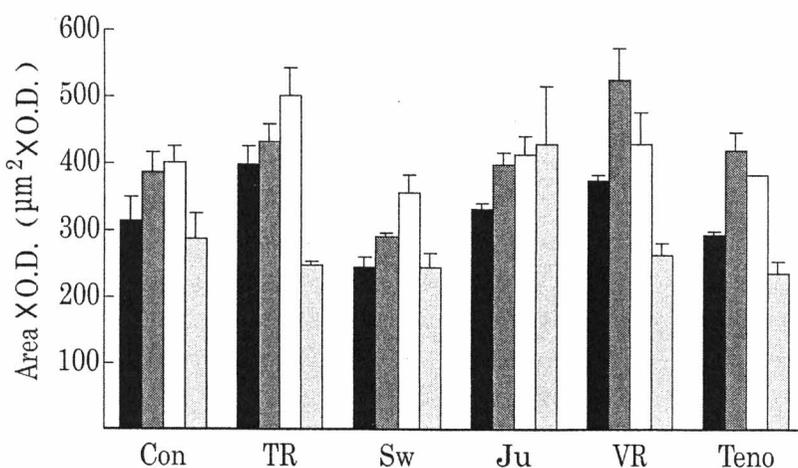


Fig.4. Integrated succinic dehydrogenase activity in each group.

Values are mean \pm SE. ■ type I ▒ type IIa □ type IIc ◻ type IIb

が軽度な場合には肥大効果が得られないと考えられた。また、水泳運動の主働筋は底屈筋よりも背屈筋であり、活動動員が足底筋では少ないことも考えられた。一方、Ju群とTR群を比べるとJu群の筋重量がより高値を示し、筋をより肥大させるためには、運動時間は短くても、より高強度なトレーニングである必要が示された。また、同じ走運動を行ったTR群、VR群を比べると筋肥大はほぼ同様であった。図表には表していないが、VR群が行った自発走トレーニングを観察したところ、1日の活動は平均で12m/min以下の運動が50分、13~42m/minの運動が161分、43m/min以上の運動が67分、全走運動時間278分、トレーニング期間中の平均距離は6951mであった。これはTR群が行ったトレーニング（1日あたりの運動時

間60分、走行距離2400m）に比べ、運動時間で4.6倍、走行距離で2.9倍と著しく多かったため、肥大という量的な変化ではなく、循環系の発達や、疲労物質処理能など質的な変化を引き起こしたものと考えられる。Teno群が起こした特異的な筋肥大は腓腹筋を切除し慢性的な負荷がかかったうえ、1日平均3999mの自発走トレーニングを行ったものであり、運動強度と時間が十分であった場合には、期間が短くとも肥大効果で得られることが示された。トレーニング条件と筋肥大の結果から、トレーニングは次のようにまとめられる。

	TR	Sw	Ju	VR	Teno
強度	中	低	高	低~中	低~中
時間	中	中	短	長	長
速度	中	高	高	中	中
(週)	10	10	10	10	4

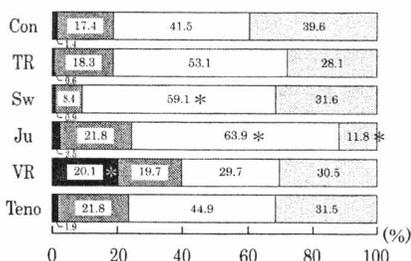


Fig.5. Myosin heavy chain isoform composition in each group.

Values are mean. *: Significant difference from control group ($p < 0.05$).

■ type I ▒ type IIa □ type IIc ◻ type IIb

発揮張力は筋肥大に伴い増加することが知られている。本実験においてもCon群に比べ、Sw群を除いたトレーニング群で高値を示す傾向にあった。トレーニングの質で比較すると、持久性トレーニングを行ったTR群、Sw群、VR群に比べ、瞬発的なトレーニングを行ったJu群が高値を示す傾向にあった。このことから、短時間の運動でも高強度で高速度な運動を行うと、張力測定をするような短時間での、神経-筋の刺激伝達系が発

達する可能性が考えられる。また、同じ走運動を行ったTR群、VR群を比較すると運動時間が長かったVR群が高値を示した。これは自発走運動がさまざまな速度、長時間の運動であったことから、運動には多くの筋線維が動員されることが考えられる。

一方、CTは有意な差は見られないものの、運動速度が高かったSw群、Ju群では短縮、慢性的な負荷が加わり、持続的な運動を行ったTeno群では遅延する傾向にあった。Barany¹⁾は瞬発的なスプリントトレーニングを行うとCTが短縮することを報告しており、この原因をATPase活性の高いFT線維の増加の影響であると報告している。さらに、トレーニングによるCTの変化を筋の収縮タンパクであるMyoHCアイソフォームからも検討されている。辻本ら²⁾はラットに12週間の持久性トレーニングを行わせ、type II b MyoHCの減少と、type II a・II d MyoHCの増加を認めている。本実験ではCon群に比べ、全てのトレーニング群でtype II b MyoHCの減少を観察した。特に、筋の収縮速度が中速度の走運動を行ったTR群は辻本の報告と同様な変化を示した。また、TR群、VR群ではCTの差が見られなかったが、VR群ではtype I MyoHCの有意な増加が観察された。従来、トレーニングにおけるMyoHCの変化は速筋型のサブタイプ間の移行は観察されているが、fastからslowへの変換に関しての報告は見られない。本結果のMyoHCやさらに、図2に示す筋線維構成比からもtype Iに増加が見られることはさまざまな速度で通常のトレーニングよりも長時間な活動に対し、筋タンパクの最大限の適応によるfastからslowへの移行が起こったことを示しているものと思われる。

また、低強度で高速度の運動を行ったSw群もCon群に比べtype II a MyoHCの減少とtype II d MyoHCの増加が観察された。Schluter³⁾はラット下肢筋の単一筋線維を分析し、type II a線維に比べ、ATPase活性の高いtype II b線維が高い短縮速度を示すことを報告しており、本結果で示すMyoHCの変化がCTの短縮に影響を及ぼすことを裏付けるものであった。しかし、高速度で短時間の運動を行い、CTが短縮したJu群においてtype

II b MyoHCの有意な減少が観察された。このことは連続100回のジャンプトレーニングという運動の特異性がATPase活性の高いtype II d MyoHCの有意な増加を引き起こし、CTの短縮を保証しているものと考えられる。

次に、運動様式の違いと持久性能力への影響に関して検討した。持久性能力を知るための疲労曲線はCon群に比べ全てのトレーニング群で遅延が観察され、トレーニングに対する効果が認められた。特に、5分後の発揮張力はCon群(34.3%)に比べ、VR群(57.8%)とTeno群(64.2%)で有意な高値が認められた。一般的に、運動強度は低くても、持続時間の長い運動を定期的に繰り返すと、持久性能力が亢進することが知られている。持久性トレーニングの主な適応変化として筋線維タイプの変化、心重量、毛細血管密度や最大酸素摂取量など呼吸循環器系の発達、酸化系酵素活性の亢進などが報告されている^{2) 3)}。

持久性能力が著しく亢進したVR群、Teno群において、type I線維の有意な増加が観察された。これまで、持久性トレーニングを行うと、速筋線維のサブグループに移行が起こることは報告されてきたが、速筋線維から遅筋線維への移行を示した例は少ない。筋線維の特性はそれを支配する神経細胞によって、決定されると考えられている。春日⁴⁾は筋線維タイプを決定する過程は、伸張性収縮や薬物により筋崩壊が引き起こされ、脱神経支配→多重神経支配→再神経支配であると報告している。本実験の比較的長時間のトレーニングという運動刺激と運動終板上のターンオーバー(新陳代謝)が速筋線維から遅筋線維の移行を引き起こす可能性が示唆された。

運動様式に違いはあるものの、TR群、Sw群、Ju群ではtype II b線維の減少と、type I・type II a線維の増加する傾向が見られた。しかし、この3群の持久性能力を比較すると、刺激5分の値に差はないものの、刺激開始1～3分の張力の変化様式は異なっていたことから、持久性能力を決定する他の因子が考えられた。

持久性能力の指標であるSDH活性はミトコンドリアの数や大きさに依存する。一方、ミトコンドリアは細胞内に平均的に存在しているのではな

く、毛細血管に近い部位（筋鞘）に存在すること、著しく肥大し筋線維横断面積が増大した分、細胞内の拡散能は希釈されることが知られている。そこで、本実験ではSDH活性と筋線維横断面積とを積分したISDHにて筋の酸化系能力を測ることとした。Con群に比べVR群は有意な差はないもののISDHと、もう一つの筋持久性の指標である毛細血管数に増加する傾向があり、持久性能力の亢進が示された。一方、持久性能力が著しく亢進していたTeno群はCon群に比べ、ISDH、CCともに大きな変化は見られなかった。VR群とTeno群を比較した場合、Teno群はトレーニング期間が半分以下であり、運動により引き起こされるISDH、CCの増加という質的な変化には期間が必要であり、肥大という量的な変化とは異なる刺激条件が必要であることが示された。

次に、同様な筋線維タイプに変化したTR群、Sw群、Ju群の疲労耐性を比較すると、刺激2分ではTR群（52.2%）<Ju群（57.7%）<Sw群（61.2%）、刺激5分ではJu群（37.1%）<TR群（38.1%）<Sw群（41.8%）という結果であった。CCに差はなかったものの、筋の肥大が見られず、ISDHが低下したSw群の持久性能力が亢進したことは本結果から説明しにくい。ISDHという評価が適切であるかを検討する必要もあるが、実際の活動時には神経性擬機構による活動参加や筋収縮様式が複雑に至適運動を可能にしているのに対し、実験で捉えることができる機能は全ての筋・筋線維に対する同時刺激であり、また%最大張力としての刺激条件でしか得られないことにその一原因があると考えられた。また、ISDH、CCが最も発達していたTR群の疲労耐性が3群の中でも低値を示したことから、疲労曲線を2つに分けて検討した。刺激2分時に対する5分時の張力の割合を比較すると、Ju群（64.3%）<Sw群（68.3%）<TR群（73.0%）となり、ISDH、CCの発達は刺激開始初期より、2分以降に影響を及ぼすことが示された。

この疲労耐性の結果から、高強度の瞬発的トレーニングは筋肥大がISDHを増加させ、2分までの持久性能力の亢進を保証しているものの、毛細血管の発達が見られず2分以降の持久力の亢進には

つながらないこと、また、持久性トレーニングはISDH、CCを増加させ、エネルギー生産が高まり、老廃物の蓄積が抑制され、持久性能力の亢進につながることを示された。しかし、ISDH、CCの発達は5分以降の張力発揮にどのように関わってくるのか、また、Sw群の結果から持久性能力の亢進に関わる他の因子について明らかにする必要があると考える。

以上、本研究を運動処方観の観点よりまとめると、重い負荷をかけることにより筋重量や最大筋力の増加が期待される。このことはトレーニング期間以上に重要であった。また、断続的な運動を長期間続けることにより、筋線維タイプ、さらにはその基本となるMyoHCも十分に持久的な発達を起こす、つまり、筋線維タイプ移行を促す結果が得られた。そして、このような運動は疲労耐性も十分に発達させるものであった。一方、筋肥大を起こしただけのトレーニングや軽い負荷での長時間の運動だけでは、機能の発達が望めないことが示された。

【参考文献】

- 1) Barany, M. ATPase activity of myosin correlated with speed of muscle shortening. *J. Gen. Physiol.* 50 : 197-218, 1967
- 2) Davies, K.J.A, L.Packer, and G.A.Brooks. Biochemical adaptation of mitochondria, muscle, and whole-animal respiration to endurance training. *Arch. Biophys.* 209 : 539-554. 1981
- 3) 金尾洋治, 勝田茂, スプリントおよび持久トレーニングがラットの骨格筋線維および毛細血管の発達におよぼす影響 体力科学32, 311-319, 1983
- 4) 春日規克, 骨格筋の損傷および再生に対する運動と加齢の影響 平成7年度～平成8年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))研究成果報告書
- 5) Schluter, J.M, and Fitts, R.H. Shortening velocity and ATPase activity of rat skeletal muscle fiber: effects of endurance exercise training. *Am. J. Physiol.* 266 : C1699-C1713, 1993
- 6) 戸塚学, 安部孝, 広田公一, 高強度ジャンプ・トレーニングがラット骨格筋線維組成に及ぼす影響 体育学研究34 : 133-140, 1989
- 7) 辻本尚弥, 鈴木英樹, 平野朋枝, 西沢富江, 小坂井留美, 山下晋, 春日規克, ラット骨格筋に対するトレーニング期間の違いによる影響 東海保健体育科学18 : 1-8, 1996
- 8) 辻本尚弥, 鈴木英樹, 春日規克, 石河利寛, 走およびジャンプトレーニングによるラット骨格筋ミオシン重鎖アイソフォーム組成の変化 体力科学44 : 97-104, 1995