

ジャンプトレーニング並びに持久走トレーニングによる ラット下肢骨及び骨格筋の発達変化とその関連性

幸 篤武^{*,****}・與谷謙吾^{**}・石道峰典^{*}・田巻弘之^{***}・春日規克^{*}

Relationship Between Tibia Bone and Plantaris muscle Muscle Developments in Running and Jump Trained Rat.

Atsumu YUKI^{*,****}, Kengo YOTANI^{**}, Minenori ISHIDO^{*},
Hiroyuki TAMAKI^{***} and Norikatsu KASUGA^{*}

Summary

The exercise that bones are subjected to the load is effective in bone mass increase. The aim of our study was to examine the relationship between tibia and plantaris muscle developments in endurance-running-trained and jump-trained rat.

Five week-old rats were running-trained and jump-trained for 8 weeks for 6 days/week. The speed of treadmill running progressively increased to 35 m/min. The height of jumping progressively also increased to 40 cm. Histomorphometric analyses were performed on longitudinal sections of proximal tibial metaphyseal secondary spongiosa. We also measured the contractile properties in plantaris muscle.

Eight weeks of endurance running and jump training increased tibial weight and trabecular bone volume. The trainings also increased weight and maximal tension in plantaris muscle. A trabecular bone thickness increased only jump trained rats. The bone weight correlated with body weight ($r=0.689$, $p<0.01$) and plantaris muscle weight ($r=0.909$, $p<0.001$). The trabecular bone area ratio correlated with maximal tension of the plantaris muscle ($r=0.486$, $p<0.05$).

These results suggest that the quantitative and functional development of plantaris muscle induced by jump training and endurance running training associated with a tibial quantitative and structural development. Contractive force of the plantaris muscle increased by training loads proximal metaphysis of tibia as mechanical stress, and developed trabecular bone architecture.

Key words: Running, Jump, Histomorphometry, Trabecular bone, Muscle-bone relationship

-
- * 愛知教育大学保健体育講座（〒448-8542 愛知県刈谷市井ヶ谷町広沢1番地）
Department of Health and Physical Education, Aichi University of Education, Kariya 448-8542, Japan
 - ** 鹿屋体育大学スポーツ生命科学系（〒891-2393 鹿児島県鹿屋市白水町1番地）
Department of Physiological Sciences, National Institute of Fitness and Sports, Kanoya 891-2393, Japan
 - *** 新潟医療福祉大学理学療法学科（〒950-3198 新潟県新潟市北区島見町1398番地）
Department of Physical Therapy, Niigata University of Health and Welfare, Niigata 950-3198, Japan
 - **** 独立行政法人国立長寿医療研究センター予防開発部（〒474-8511 愛知県大府市森岡町源吾35番地）
Department of Preventive Medicine National Center for Geriatrics and Gerontology, Obu 474-0031, Japan

I. 緒言

運動トレーニングによる骨への力学的ストレスの増大は、骨の強度の保持増進に効果的であることが知られている。ボディービル競技者はランナーや水泳競技者と比較して腰椎骨量が有意に高いこと⁶⁾、ウエイトリフティングの競技者はオリエンテーリングやクロスカントリースキーの競技者と比較して高い腰椎骨量をもつことが報告されている⁵⁾。また実験動物を対象とした研究では、ラットに1日1時間のトレッドミルランニングと1日100回のジャンプトレーニングを行わせた場合、ジャンプトレーニングを行った群がランニングを行った群に比較して下肢骨量が有意に高いことを報告している³⁰⁾。また麻酔下の実験動物に対する圧縮負荷装置を用い、骨の長軸方向により強い力学的ストレスを加えることで骨形成率が高まることが報告されている^{15, 26, 31)}。これらの結果は、骨に強い力学的ストレスがより作用する運動様式が骨量増加には効果的であることを示すものである。

運動トレーニングによって筋収縮が繰り返され、さらに筋肥大に伴う筋収縮力の増大が骨に対するストレスを増大させ、骨形成の増加と骨吸収の抑制による骨量増加を示す^{9, 20)}と考えられる。骨格筋の形態を力学的ストレス（量）と捉え、筋横断面積と骨量との関係を調べた研究も多く見られる。ヒト前腕部のCT横断画像から、橈骨の皮質骨面積と骨格筋面積との間に正の相関関係が認められたことが報告されている²³⁾。また、ヒト上腕骨骨量と、核磁気共鳴画像法で測定された上腕部の骨格筋横断面積との間に正の相関関係が認められたことが報告されている²⁾。これらのことから強い筋収縮力は力学的ストレス刺激として骨に加わり、運動トレーニングによる筋の発達は骨の量的変化だけでなく、構造的変化を引き起こすことが推察される。実験動物を用い、明らかに運動強度や運動種目を変えた際の骨量・構造の変化の差がある事が報告されている^{20, 32)}。しかし、力学的ストレスとなる筋の発達と骨構造的変化との関係を検討した報告は見られない。

一方、骨の強度は骨量と骨質によって決定される¹⁸⁾。骨の構造は骨質を規定する一因子とされ、特に海綿骨では骨梁構造が骨強度に関連すると考えられている。運動トレーニングにより海綿骨では骨梁の量的増加や肥厚化、連続性の増加などが認められ

ている^{10, 20)}。このような骨梁構造の形態的变化は力学的ストレスが加わる骨部位でより顕著に起こると推察されている。

本研究は、ラットに対し骨に強い力学的ストレスを加えることのできる瞬発的ジャンプトレーニングと、比較的弱いストレスを長時間繰り返す持久走トレーニングを行わせた際の筋の形態的、機能的特性、並びに骨量、海綿骨骨梁構造を観察し、運動トレーニング種目の差に伴う筋と骨の発達変化と、両者の関係について検討することを目的とした。

II. 実験方法

A. 実験概略

実験動物は、生後4週齢のFischer 344系雌性ラット17匹を用いた。ラットを生後5週齢時に、対照群（control group, 以下Cont群, n=8）、トレッドミル走を行う持久走トレーニング群（run trained group, 以下Run群, n=4）、ジャンプトレーニングを行う群（jump trained group, 以下Jump群, n=5）の3群に体重の差がないよう（p=0.9711）分類した（表1）。

実験動物は飼育箱（265×425×150mm）内に2匹ずつ入れ、昼夜逆転された12時間の明暗サイクルの小屋にて餌（日本クレア：CE-2）、飲水共に自由摂取の環境下で飼育した。飼育環境は室温23±2℃、湿度55±5%とした。左右両脚を対象脚とし、被験筋はラット下腿三頭筋のひとつである足底筋、被験骨は脛骨とした。実験は、日本生理学会により規定された「生理学領域における動物実験に関する基本

Table 1 Initial body weight and final body weight in each group

	Initial body weight (g)	Final body weight (g)
Cont (n=8)	64.4±3.0	165.0±7.1
Run (n=4)	64.8±2.1 (+0.6%)	181.5±6.0** (+10.0%)
Jump (n=5)	64.6±2.3 (+0.3%)	162.0±8.4** (-1.8%)

Data are the means ± SD, with % changes to age-matched Cont group in parentheses.

Cont: control group Run: run trained group Jump: jump trained group

Initial body weights are data at the 5 week-old

Final body weights are data at the 13 week-old

** p < 0.01 compared with Cont.

** p < 0.01 compared with Run.

指針」ならびに、「愛知教育大学動物実験指針」を遵守して行われた。

B. トレーニング

Run 群に対するトレーニングは、小動物用トレッドミルを用いた持久走トレーニングとした。トレーニング初日に速度を15~20m/min、時間を20~30分とし、速度と時間を徐々に増加させ、トレーニング1週目終了時には速度が30m/min、時間が40分となるように、またトレーニング2週目終了時には、速度が35m/min、時間を50分となるように、ラットの成長及びトレーニングの習熟度に合わせて速度と時間を徐々に増加させた。トレーニング3週目よりトレーニング終了までの期間は、速度35m/minの走行を1日60分間とした。

Jump 群に対するジャンプトレーニングは、四方を木板で囲んだ箱の内にラットを置き、木枠底に2φ銅線にて作成した刺激電極を利用して行った。板の高さは25cmから開始し、ラットの成長及びトレーニングの習熟度に合わせて週に5cmずつ高くし、第4週目よりトレーニング終了までは40cmと固定した²⁶⁾。1日当たりのジャンプの回数は50回とし、1時間内/日にトレーニングは終了した。

両トレーニングはラットが生後5週齢より13週齢時まで、週6日間の頻度で、合計8週間実施した。

C. 張力測定

トレーニングが筋の機能的特性に与える影響を調べるため、トレーニング終了後、張力測定を行った。ラットをpentobarbital sodium 麻酔下(60mg/kg body weight)におき、血流維持の状態で左右両足底筋を露出し、末梢側腱を切断し歪み計に接続した。筋に対する0.1msec 矩形波による支配神経(腓骨神経)からの間接電気刺激により張力を得た。刺激強度は最大単縮張力が得られる電圧の2倍以上(18~25V)とした。張力測定中、被験筋は酸素95%、二酸化炭素5%の混合ガスで飽和され、36.0±0.5℃に保たれたリンゲル液に浸漬された。強縮張力は刺激頻度が200Hz、刺激時間450msecにより最大強縮張力を得た。

D. 組織学的分析

張力測定後に足底筋と共に脛骨を摘出し、湿重量を測定した。なお予備試験を行った結果、脛骨湿重

量は、脱脂乾燥重量(クロロフォルム・メタノール混合液に浸漬後、80℃にて乾燥)の値と強い相関関係にあることから($r=0.833$, $n=19$, $p<0.01$), 骨量の指標として用いた。脛骨は骨近位部を正中断して24時間室温で浸漬固定(1% glutaraldehyde, 1%, paraformaldehyde, 0.05% CaCl₂, 0.1M sodium cacodylate, pH 7.4)した。その後各サンプルは0.1M エチレンジアミン四酢酸と0.1M カコジル酸ナトリウム混合液(pH7.4, 4℃)にて約8週間脱灰化後、パラフィン包埋を行った。包埋試料から厚さ5μmの縦断切片を作成し、アザン染色を施した。染色像は光学顕微鏡(OLYMPUS: BH2-RFCA)観察と同時にデジタルカメラ(Nikon: COOLPIX4000)にて写真撮影を行った。撮影された画像はパーソナルコンピュータに取り込み、画像解析ソフト(Image J ver. 1.38)を用いて脛骨近位端の骨梁骨断面の解析を行った。骨梁形態計測を行う領域は、一次海綿骨を除外するため、成長板から1mm遠位側に離れた1.8×2.4mmの領域とし、全測定領域面積に対する骨梁骨の占める割合として算出した(骨梁面積率)。また、骨梁の幅及び長さ(連続性)を求めた^{14, 28)}。

E. 統計解析

データはすべて平均値±標準偏差(means±SD)で示した。統計には統計ソフト Statistical Analysis System release.9.1.3 (SAS Institute Inc. NC, USA)を用い、一元配置、二元配置の分散分析(Analysis of variance: ANOVA)を用いて有意差検定を行なった。それぞれの分散分析では、主効果が有意となった場合の多重比較には、Tukey-kramer法を用いた。いずれも有意水準は危険率5%未満とした。また、筋重量及び最大発揮張力の変化と骨梁構造の形態的特性の変化との関連を調べるため全群間よりPearsonの単相関係数を算出し、有意水準は危険率5%未満とした。

Ⅲ. 結果

表1に、トレーニング開始時(生後5週齢)、並びに終了時(生後13週齢)の各群の平均体重を示した。トレーニング終了時の体重は分散分析により有意な差が認められ($p<0.01$, $1-\beta=0.677$), Run群がCont群($p<0.01$)及びJump群($p<0.01$)と比較して高値を示した。Cont群とJump群の間に有

意な差は認められなかった。トレーニング開始時から終了時までの平均体重増加量は、Cont 群が約 100.6g (256%), Run 群が約 116.8g (280%), Jump 群が約 97.4g (251%) であり、発育に伴う有意な体重の増加を認めた (いずれも $p < 0.0001$)。また群間における増加量を比較すると、Run 群が Cont 群及び Jump 群に比較して有意に高値を示した。一方、Cont 群と Jump 群の増加量に有意な差は認められなかった。

表 2 に、トレーニング終了時の足底筋重量、脛骨湿重量を示した。筋重量は分散分析において有意となり ($p < 0.0001$, $1 - \beta = 0.821$)、Cont 群に比較してトレーニングを行った Run 群 ($p < 0.0001$) 及び Jump 群 ($p < 0.01$) で高値を示した。また、Run 群が Jump 群に比較して有意に高値を示した ($p < 0.05$)。一方、体重当たりの筋重量は分散分析において有意となり ($p < 0.001$, $1 - \beta = 0.748$)、Cont 群に比較してトレーニングを行った Run 群 ($p < 0.01$) 及び Jump 群 ($p < 0.01$) で有意に高値を示したが、トレーニング群間において差は認められなかった。脛骨湿重量は分散分析において有意となり ($p < 0.0001$, $1 - \beta = 0.815$)、Cont 群に比較してトレーニングを行った Run 群 ($p < 0.0001$) 及び Jump 群 ($p < 0.05$) で高値を示した。また、Run 群が Jump 群に比較して高値を示した ($p < 0.01$)。体重当たりの脛骨湿重量は分散分析において有意となり ($p < 0.05$, $1 - \beta = 0.528$)、ジャンプトレーニングを行った Jump 群が Cont 群に比較して有意に高値を示した ($p < 0.05$)。しかし Run 群と Jump 群との間に有意な差は認められなかった。

図 1 に、各群の足底筋の最大発揮張力を示した。最大張力は、分散分析において有意となり ($p <$

0.05 , $1 - \beta = 0.575$)、Cont 群に比較してトレーニングを行った Run 群 ($p < 0.05$) 及び Jump 群 ($p < 0.05$) で高値を示した。一方でトレーニング群間において差は認められなかった。

図 2 に、各群の脛骨近位骨幹端の骨梁面積率、平均の骨梁幅及び骨梁骨長を示した。図 2 A は骨成長板より 1 mm 遠位側の骨梁をアザン染色によって示したものである。図 2 A に示される濃く染まる部分が平面からみた海綿骨骨梁を表わし、白く写る部分が骨髓部分を表わす。骨梁面積率は分散分析において有意となり ($p < 0.001$, $1 - \beta = 0.743$)、Cont 群に比較して Run 群 ($p < 0.05$) 及び Jump 群 ($p = 0.0004$) が高値を示したのに対して、トレーニング群間において差は認められなかった (図 2 A)。骨梁幅は分散分析において有意となり ($p < 0.01$, $1 - \beta = 0.03$)、Jump 群が Cont 群 ($p < 0.01$) 及び Run 群 ($p < 0.05$) に比較して有意に高値を示したのに対して、Cont 群と Run 群の間に差は認められなかった (図 2 B)。骨梁長は分散分析において有意性を認めず ($p = 0.0758$, $1 - \beta = 0.413$)、各群間に差は認められなかった (図 2 C)。

表 3 には、トレーニングにより変化が認められた脛骨湿重量、骨梁面積率並びに骨梁骨幅と、骨に対し力学的因子として作用すると考えられる体重、足底筋の重量並びに最大発揮張力との間の単相関係数を示した。骨湿重量は体重 ($p < 0.01$) 及び筋重量 ($p < 0.001$) との間に相関関係を示した。骨梁面積率は足底筋の最大発揮張力と有意な相関関係を示した ($p < 0.05$)。骨梁骨幅は、体重、筋重量及び最大発揮張力のいずれとも有意な相関関係を示さなかった。

Table 2 Muscle weight and tibia weight in each group at the 13 week-old

	MW (mg)	MW/BW (mg/g)	Tibia weight (mg)	Tibia weight/BW (mg/g)
Cont (n=8)	152.9±15.1	0.93±0.10	369.8±13.2	2.24±0.09
Run (n=4)	208.3±12.4*** (+36.2%)	1.15±0.04** (+23.6%)	420.8±11.0*** (+13.8%)	2.32±0.04 (+3.4%)
Jump (n=5)	181.6±7.1***† (+18.8%)	1.12±0.05** (+21.0%)	392.2±10.2**†† (+6.1%)	2.43±0.12* (+8.1%)

Data are the means ± SD, with % changes to age-matched Cont group in parentheses.

Cont: control group Run: run trained group Jump: jump trained group

BW: final body weight MW: plantaris muscle weight

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$ compared with Cont.

† $p < 0.05$; †† $p < 0.01$; ††† $p < 0.001$ compared with Run.

トレーニングによる下肢骨及び骨格筋の発達変化とその関連性

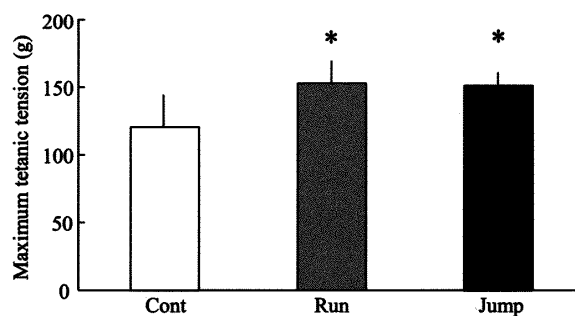


Fig. 1 Maximum tetanic tension in each group
The maximum tension was measured in plantaris muscles by the nerve stimulation. Data are the means $\pm$ SD. * $p < 0.05$, compared with the Cont group.

Table 3 Correlation coefficients of changes in bone volume and trabecular bone (Tb) architecture parameters with changes in body weight, muscle volume, and muscle force at the 13 week-old

	Bone weight	Tb area ratio	Tb thickness
Body weight	0.689**	0.030	-0.263
Muscle weight	0.909***	0.474	0.129
Maximum tension	0.472	0.486*	0.293

Muscle weight: plantaris muscle weight

Maximum tension: tension of the plantaris muscle

Bone weight: tibia bone weight

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$

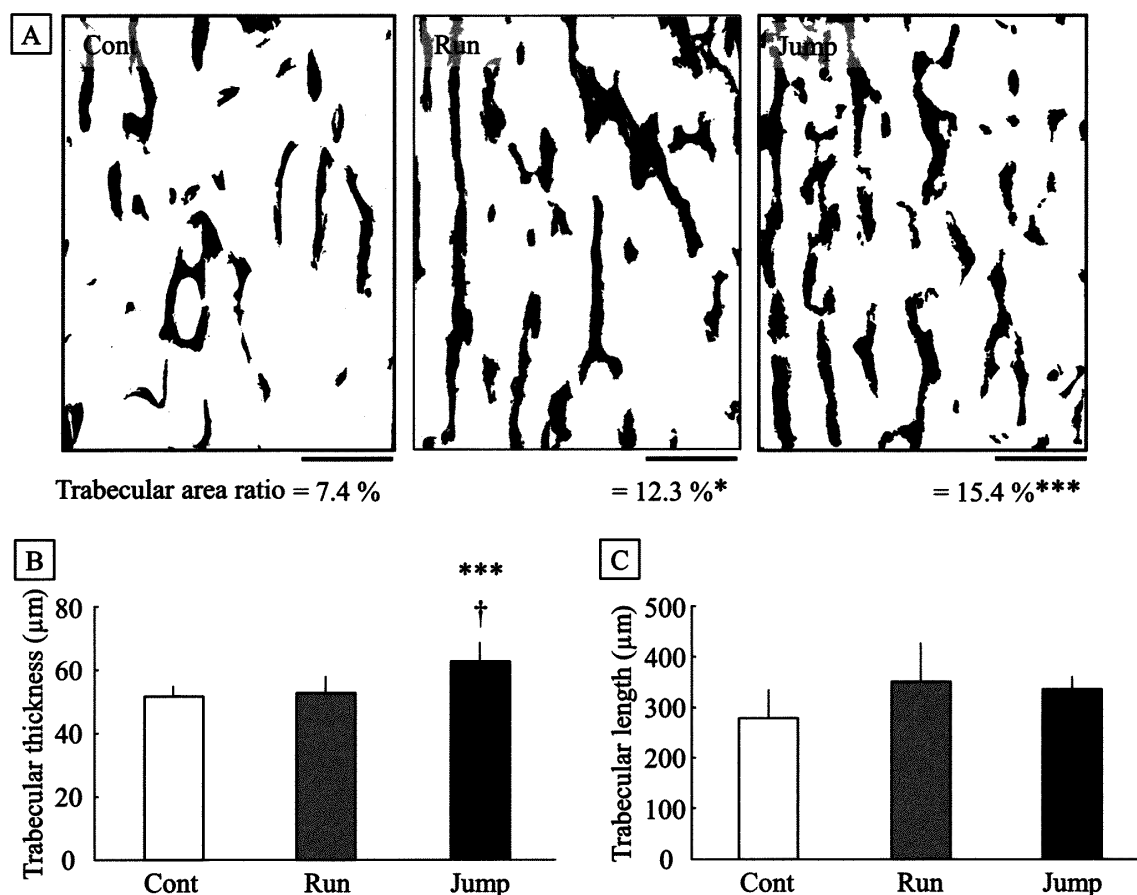


Fig. 2 Trabecular bone architecture parameter in each group

Light-micrographs of proximal tibial metaphysis in the analysis area from the trained and untrained rats (A). Specimens stained with Azocarmine G and Aniline blue-orange G (Azan). White and black area showed bone marrow and trabecular bone area, respectively. BAR=500 μm . Trabecular bone thickness (B) and length (C) in the proximal tibial metaphysis from the trained and untrained rats. Data are the means $\pm$ SD.

* $p < 0.05$; *** $p < 0.001$ compared with Cont.

† $p < 0.05$ compared with Run.

IV. 考察

本研究では、ラット下肢に異なる強度の力学的ストレスを加えるジャンプトレーニングと持久走トレーニングを行わせた場合の、下肢筋の発達と脛骨の量的、構造的発達について分析を行い、トレーニング種目の差に伴う筋と骨の発達変化と、両者の発達の関係性について検討した。

ラット足底筋は、ジャンプトレーニング及び持久走トレーニングにおいて主働筋として機能する^{4, 12, 25, 34}。トレーニング終了時の筋重量値のCont群に対する増加率は、Run群及びJump群でそれぞれ約36%, 19%となり(表2)、Run群の値はCont群及びJump群より高値であった。発育期の筋重量は体重の増加にも依存すると考えられた。そこで、筋重量値を体重で除した値をCont群に対する増加率を算出したところ、Run群及びJump群では差が無くなり、それぞれ23%, 20%となった(表2)。従って、本研究において用いられた持久走トレーニングとジャンプトレーニングの筋の量的発達に対する効果は、発育に伴う体重増加の影響を除くとほぼ同等であったと考えられた。

筋の機能的指標である発揮張力は筋量に依存する。トレーニング終了時において、持久走トレーニングを行ったRun群のラットがJump群のラットに比較して有意に大きい筋量を有する結果を得た(表2)。しかしながら、Cont群に対する最大発揮張力の増加率はRun群及びJump群でそれぞれ26%, 25%と、トレーニング群間に差を認めなかった。このことは、トレーニング終了時におけるJump群の筋の単位量当たりの収縮能は、Run群に比較して高いことを意味する。本研究では各群の筋線維組成比について分析を行っていないが、本研究におけるトレーニング群間の筋の最大発揮張力の差は、筋線維組成比やミオシン重鎖(MyHC)アイソフォームの変化を主要因の一つとした可能性が推察される。足底筋と同じく足関節の底屈に働く腓腹筋を対象とした研究では、発育期ラットに持久走トレーニングを行わせた際の腓腹筋表層部において、FG線維の占有率が90%から66%に減少し、FOG線維の占有率が10%から35%に増加したことが報告されている¹¹。一方、同じく発育期においてジャンプトレーニングを行ったマウスの腓腹筋深層部では、FG線維の占有率が13%から27%に増加したことが報告されている¹³。さらに走トレーニングは遅筋線維の肥

大が⁸、ジャンプトレーニングにより速筋線維の肥大が顕著であることが報告されている^{1, 17}。トレーニングに伴う足底筋のMyHCアイソフォームの構成比を検討した研究では、持久走トレーニングにより、タイプIIb MyHCアイソフォームの発現が減少し、タイプIIa MyHCアイソフォームの発現が増加することが報告されている³⁰。また、トレーニングに伴う筋重量に対する最大発揮筋力が一定ではないことは、細胞間質液や収縮タンパク量の変動なども影響した可能性が考えられた。

バスケットボール選手やバレーボール選手のような、跳躍系のスポーツ選手は高い骨密度を有する²¹。また、実験動物を対象とした研究では、ジャンプトレーニングが走トレーニングに比較して骨量の増加効果が高いことが報告されている^{30, 32}。トレーニング終了時の脛骨湿重量は、Cont群に対しRun群及びJump群でそれぞれ約14%, 6%の有意な増加を認めた(表2)。一方、体重当たりの脛骨湿重量の値は、Jump群のみにCont群との有意な差を認め、ジャンプトレーニングは走トレーニングに比較して骨量の増加効果に優れるとした過去の報告^{20, 32}と一致した結果を得た。

Frost³が提唱するメカノスタット理論では、骨に対する力学的ストレスを産出する因子は筋収縮であるとしている。骨格筋の収縮は身体運動を可能にすると同時に、身体運動時の力学的ストレスが骨量の保持増進に重要な役割を果たすと考えられている。そこで、運動トレーニングにおいて骨に対する力学的ストレスの要因となると考えられる体重、筋重量及び最大発揮張力と、トレーニングによって発達が認められた骨湿重量、骨梁面積率及び骨梁幅との単相関係数を算出し、両者の関係について検討した(表2)。

本研究では、脛骨湿重量と体重との間に正の相関関係($r=0.689$, $p<0.01$)を認めた。高校生や大学生を対象とした研究では、体重が重いほど骨量は高値を示す傾向にある^{7, 6}。体重そのものは活動時には負荷となり骨への力学的ストレスとして働くことから、体重は運動トレーニング時において、骨量の増加にプラスの因子として作用したことが考えられた。

プロバレーボール選手では、脛骨骨量と下腿の筋量が一般人と比較して高く、両者の間に有意な正の相関関係が認められることが報告されている²²。ま

た、テニス選手の利き手においても、上腕骨の骨量と上腕部の筋量との間に正の相関関係が認められることが報告されている²⁾。本研究では、脛骨湿重量と足底筋の筋重量との間に正の相関関係 ($r=0.909$, $p<0.001$) を認め、運動による筋の量的発達が、骨の量的発達と関係するとして過去の報告と一致する結果であった。

一方、最大発揮張力と脛骨湿重量との間に有意な相関関係を認められなかった。しかし、脛骨近位骨幹端部の骨梁面積率と正の相関関係が認められた ($r=0.486$, $p<0.05$)。このことは、運動トレーニングに伴う筋の機能的発達は、必ずしも骨全体に一樣の量的発達を生じさせるわけではなく^{10,35)}。肥大した筋によるより強い収縮によって産出される骨への力学的ストレスは、局所的に影響すると考えられ、ラットの足関節底屈動作による足底筋収縮が、足底筋起始部である膝関節に近い脛骨近位骨幹端に強い力学的ストレスを加えていたことが推察された。

また、単に骨量の増加ではなく骨内部構造が力学的ストレスに対応した変化を示し、骨強度を増すことも考えられた。海綿骨は、代謝速度が皮質骨に比較して速い¹⁹⁾。この特性は、骨に荷重される力学的ストレスに応答すべくその構造様式を柔軟に変化させる骨の適応性と考えられた。海綿骨の骨量を反映する骨梁面積率は、トレーニングを実施した Run 群、Jump 群共に増加を示し (図 2 A)、トレーニング群間に有意な差を認めなかった。従って、持久走トレーニングとジャンプトレーニングのどちらも、海綿骨の量的増加を誘導するに十分な効果を有する運動トレーニングであることが示唆された。骨梁骨の肥厚化は Jump 群でのみ認められた (図 2 B)。光学顕微鏡レベルで観察される骨梁骨の肥厚化は、肉眼的にみることで骨の形状変化を表すマクロモデリングに対してミニモデリングと呼ばれる²⁷⁾。ミニモデリングは力学的ストレスに対する骨の適応と考えられており、強い力学的負荷が骨に加わる環境下で継続的に進行する。持続的であるが弱い力学的ストレスではなく、より強い力学的ストレスが加わるジャンプトレーニングによってミニモデリングがより顕著であったことが示唆された。この骨梁骨幅と体重、筋重量及び最大発揮張力との間のいずれとも有意な相関関係はみられなかった。特に骨梁幅と最大発揮張力との関係が見られなかったことは、骨に対する力学的ストレスが、筋収縮の他に床反力

が作用したことが考えられた。四足動物では走速度の上昇によって、疾走動作が足を交互に接地させる Trot から、全ての足が床面を離れる Gallop へと移行し、走行から跳躍に近い動作へと変化する。ラットにおける疾走動作の移行速度は 55m/min であるとされる²⁹⁾。本研究において、持久走トレーニングのトレッドミルスピードは最大で 35m/min であり、実際に走行する Run 群のラットの走動作を観察すると、足が接地する Trot 動作であった。一方、垂直方向に跳躍するジャンプ動作では、重力の影響を受けることから大きな床反力が荷重される。本研究において、床反力は測定していないが、本研究と同様のモデルを用いた報告では、ラットのジャンプ時の床反力は体重の 4～7 倍になると見積もられている^{16,29)}。筋の収縮によるストレス以上に、強い床反力に曝された Jump 群において、骨梁幅が顕著に肥厚したことが結果的に最大発揮筋力との関係性を弱めたと考えられる。

骨梁は力学的ストレスに相応して量的な増加を示し、また骨梁構造の連続性を増すと考えられている。ジャンプトレーニングを行ったラットの腰椎の海綿骨骨梁には連続性が増加することが報告されている²⁰⁾。しかし本結果では、トレーニング群の骨梁骨長に有意な伸長はみられなかった。力学的ストレスに対する骨梁の応答は部位によって異なるため、骨梁構造を分析した部位が近位骨幹端部のみであったことがトレーニングに伴う変化を導き出せなかった原因と考えられた。また本研究ではサンプルから縦断切片を作成し、二次元画像を得ることで海綿骨骨梁の構造解析を行っているが、骨梁は荷重方向に構築されることから、得られる骨梁長データは画像間で大きく異なるものとなっていた。このことが検出力の低下を引き起こし、群間の差を導き出すに至らなかった可能性が考えられた。今後はマイクロ CT などを用いた三次元画像データをもとに骨形態計測を行うことで、力学的ストレスに対する骨梁変化を捉えることが出来ると考えられた。しかし、運動トレーニングに伴う筋量、筋力の増大・発達が骨量増加を促し、また運動強度やトレーニング種目の違いによる骨への力学的ストレスの大きさの違いが骨梁構造の変化に影響することが本結果から明らかとされた。

V. 結語

本研究は、骨に強い力学的ストレスが加わるジャンプトレーニングと、比較的弱いストレスを長時間繰り返す持久走トレーニングをラットに行わせた際の筋の形態的、機能的特性、並びに骨量、海綿骨骨梁構造を観察し、トレーニング種目の違いによる筋と骨の発達変化と、両者の関係について検討した。

トレーニングを行った Run 群及び Jump 群の足底筋において、筋重量及び最大発揮張力の増加が認められた。脛骨において、骨湿重量及び骨梁面積率の増加が認められ、Jump 群においてのみ、骨梁骨幅の上昇が認められた。また、運動トレーニングにおいて力学的ストレスと考えられる体重、筋重量及び最大発揮張力と、トレーニングによって発達が認められた骨湿重量、骨梁面積率及び骨梁幅との関係について検討したところ、骨湿重量は、体重、筋重量と正の相関関係を示すが最大筋力とは相関関係を示さず、骨梁面積率は、最大発揮張力とのみ正の相関関係を示した。

以上の結果から、ジャンプトレーニング及び持久走トレーニングによる下肢筋の形態的発達は、脛骨の量的発達と関連し、筋収縮力増加は、脛骨の力学的ストレスの加わる局所構造の発達と関連することが示された。また運動特性が異なるためジャンプトレーニングにより生じる強い力学的ストレスは、持久走トレーニングと比較して脛骨の骨梁構造を顕著に発達させることが示唆された。

VI. 文献

- Costill DL, Coyle EF, Fink WF, Lesmes GR and Witzmann FA (1979) Adaptations in skeletal muscle following strength training. *J. Appl. Physiol.*, 46: 96-99
- Daly RM, Saxon L, Turner CH, Robling AG and Bassa SL (2004) The relationship between muscle size and bone geometry during growth and in response to exercise. *Bone* 34: 281-287
- Frost HM (1997) On our age-related bone loss: insights from a new paradigm. *J Bone Miner Res* 12: 1539-1546
- Gardiner KR, Gardiner PF and Edgerton VR (1982) Guinea pig soleus and gastrocnemius electromyograms at varying speeds, grades, and loads. *J. Appl. Physiol.* 52: 451-457
- Heinonen A, Oja P, Kannus P, Sievanen H, Mantari A and Vuori I (1993) Bone mineral density of female athletes in different sports. *Bone-Miner* 23: 1-14
- Heinrich CH, Going SB, Pamentier RW, Perry CD, Boyden TW and Lohman TG (1990) Bone mineral content of cyclically menstruating female resistance and endurance trained athletes. *Med Sci Sports Exerc* 22: 558-563
- 石川和子, 太田壽城, 瀧本秀美, 戸谷誠之, 上松初美, 野中芳子, 益本義久 (2000) 女子高校生の超音波による踵骨骨量と生活習慣との関連. *日本臨床スポーツ医学会誌* 8: 38-42
- 伊藤一生 (1981) ラット骨格筋線維に及ぼす持久性トレーニングの影響に関する組織化学的研究. *体力科学* 30: 157-166
- Iwamoto J, Yeh JK and Aloia JF (1999) Differential effect of treadmill exercise on three cancellous bone sites in the young growing rat. *Bone* 24: 163-169
- Joo YI, Sone T, Fukunaga M, Lim SG and Onodera S (2003) Effects of endurance exercise on three-dimensional trabecular bone microarchitecture in young growing rats. *Bone* 33: 485-493
- 金尾洋治, 勝田 茂 (1983) 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及ぼす影響. *体力科学* 32: 311-319
- 春日規克, 山下 晋, 小笠原仁美, 鈴木英樹, 辻本尚弥, 石原昭彦 (1999) 加負荷式回転車輪によるラットの自発走特性と骨格筋への効果. *体力科学* 48: 99-110
- 春日規克, 山内秀樹, 伊藤晶生, 安藤暢洋, 那須ひとみ (1989) 若年期の激運動が筋の発達に及ぼす影響. *体力研究* 72: 162-168
- Mellish RWE, Ferguson-Pell MW, Cochran GVB, Lindsay R and Dempster DWA (1991) A new manual method for assessing two-dimensional cancellous bone structure: comparison between iliac crest and lumbar vertebra. *J Bone Miner Res* 6: 689-696
- Mosley JR, Lanyon LE (1998) Strain rate as a controlling influence on adaptive modeling in response to dynamic loading of the ulna in growing male rats. *Bone* 23: 313-318
- 長澤省吾, 梅村義久 (2001) ラットのジャンプトレーニングにおけるジャンプ時の床反力と骨強度及び骨重量との関係. *中京大学体育学論叢* 42: 27-31
- 中川喜直, 佐藤智明, 福田芳郎, 広田公一 (1988) 有気的, 無気的トレーニングがラット腱の

トレーニングによる下肢骨及び骨格筋の発達変化とその関連性

- コラーゲン線維に与える影響. 体力科学 37 : 100-108
- 18) NIH Consensus (2001) Development Panel on Osteoporosis Prevention, Diagnosis, and Therapy. JAMA, 285, 785-795
 - 19) 野中希一 (2000) pQCTを用いた骨の力学的性質の非侵襲的評価－材料と構造－ Clinical Calcium 10 : 675-681
 - 20) Notomi T, Okazaki Y, Okimoto N, Saitoh S, Nakamura T and Suzuki M (2000) A comparison of resistance and aerobic training for mass, strength and turnover of bone in growing rats. Eur J Appl Physiol 83: 469-474
 - 21) Risser WL, Lee EJ, LeBlanc A, Poindexter HB, Risser JM and Schneider V (1990) Bone density in eumenorrheic female college athletes. Med Sci Sports Exerc 22: 570-574
 - 22) Rittweger J, Beller G, Ehrig J, Jung C, Koch U, Ramolla J, Schmidt F, Newitt D, Majumdar S, Schiessl H and Felsenberg D (2000) Bone-muscle strength indices for the human lower leg. Bone 27: 139-326
 - 23) Schoenau R, Neu CM, Mokov E, Wassmer G and Manz F (2000) Influence of puberty on muscle area and cortical bone area of the forearm in boys and girls. J Clin Endocrinol Metab 85: 1095-1098
 - 24) 志手典之, 石原昭彦, 勝田 茂 (1986) Trot と Gallop による間欠的走トレーニングがラット拮抗筋のグリコーゲン消耗パターンに及ぼす影響. 体力科学 35 : 209-216
 - 25) Smith JL, Edgerton VR, Betts B and Collatos TC (1977) EMG of slow and fast ankle extensors of cat during posture, locomotion, and jumping. J Neurophysiol. 40: 503-513
 - 26) 十河直太, 本田亜紀子, 長澤省吾, 梅村義久 (2007) ハイインパクトトレーニングの頻度および強度がラットの骨量・骨強度に及ぼす影響. 体力科学 56 : 233-240
 - 27) 須田立雄, 小沢英浩, 高橋榮明, 田中 栄, 中村浩彰, 森 諭史 (2007) 新骨の科学 第10章 骨のリモデリングとモデリング, 医歯薬出版, 東京, 231-246
 - 28) 田巻弘之, 我妻 玲, 春日規克, 竹倉宏明 (2004) 坐骨神経切除ラット脛骨骨幹端の骨梁構造変化並びに骨格筋の萎縮. 体力科学 53 : 403-410
 - 29) 戸塚 学, 安部 孝, 広田公一 (1989) 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
 - 30) 辻本尚弥, 鈴木英樹 (2010) 成熟期中期のラット足底筋に対する走トレーニングの影響. 久留米大学健康・スポーツ科学センター研究紀要 18 : 19-23
 - 31) Turner CH (1998) Three rules for bone adaptation to mechanical stimuli. Bone 23: 199-407
 - 32) 梅村義久, 石河利寛, 桜井佳世, 益子詔次 (1996) ジャンプトレーニングがラットの骨形態・強度に及ぼす影響. 体力科学 45 : 311-318
 - 33) Umemura Y, Ishiko T, Tsujimoto H, Miura H, Mokushi N and Suzuki H (1995) Effects of jump training on bone hypertrophy in young and old rats. Int J Sports Med 16: 364-367
 - 34) Walmsley B, Hodgson JA and Burke RE (1978) Forces produced by medial gastrocnemius and soleus muscles during locomotion in freely moving cats. J Neurophysiol. 41: 1203-1216.
 - 35) 山内秀樹, 益子詔次, 木村真規, 宮野佐年, 米本恭三 (2003) 等尺性抵抗運動が非荷重に伴う骨密度低下とその回復に及ぼす影響. 体力科学 52 : 119-130
 - 36) 横内樹里, 安藤大輔, 小野悠介, 尾崎芳雅, 浅川和美, 北川 淳, 中原凱文, 小山勝弘 (2003) 女子大学生の踵骨超音波計測値と体格の関係. 体力科学 52 : 639-646
- (2011年7月15日受付, 2011年10月21日訂正,
2011年11月7日受理)