

ラットのジャンプトレーニングにおけるジャンプ時の 床反力と骨強度および骨重量との関係

長澤省吾*, 梅村義久**

Relationship between Ground Reaction Force and Bone Hypertrophy in Rats Performing a Jumping Exercise

Seigo NAGASAWA and Yoshihisa UMEMURA

Abstract

The purpose of this study was to examine the relationship between the ground reaction force and bone hypertrophy in rats that performing a jumping exercise. The rats (10 weeks) were divided into 3 jump-exercise groups, made to jump to different heights (30 cm, 40 cm and 50 cm) and a sedentary group (n=10). They were in each group made to jump 40 times per day, 5 days a week for 4 weeks. The ground reaction force at the time of take off for the jump was measured on the force plate. The rats' right tibias were afterward dissected out and the ultimate bending load, by three-point bending test, and fat free dry weight were measured. The ultimate bending load and fat free dry weight were significantly greater in all training groups than in the sedentary group. Furthermore, the ultimate bending load in the 40 cm and 50 cm groups was significantly greater than in the 30 cm group. The ground reaction force was significantly greater in the 50 cm group than in the 30 cm group. A positive correlation was found between the ground reaction force and ultimate bending load. The present study indicates that ground reaction force and bone adaptation are greater in accordance with jump height in rats.

I 緒 言

骨粗鬆症の予防法は、少年期から成熟期の骨密度を最大限に上昇させておくことおよび加齢に伴う骨密度の減少を抑制させることである。そのための有効な方法の1つは、運動により骨に対して力学的な刺激を加えることである。

力学的な負荷に対する骨の適応について Frost²⁾は、骨には歪みを受けるとそれに応じて

骨代謝を変化させるレセプターが存在し、その結果骨重量、骨形態および微細構造を変化させるという理論を提唱している。この理論では、骨は力学的ストレスで受けた歪みに適応しようとする働きから骨強度や骨重量を高めることを示している。

運動と骨について Goto ら³⁾は、4-5年間バレーボールやジョギングを行った閉経前の女性を対象に調査を行い、大腿骨骨密度が増加した

*大学院生, **教授

ことを報告している。また Bassey ら¹⁾ は、女性を対象に1年間8.5cm のジャンプトレーニングを行った結果、5ヶ月で2.8%の増加があったことを報告している。これらは、地面反力あるいは強い筋収縮によって骨が歪みを受け、その歪みに骨が適応して骨強度および骨重量が高められたと考えられる。

効率的に骨肥大を起こさせる負荷の種類について Lanyon ら⁵⁾ は、持続的な負荷が加わる静的負荷より繰り返し圧力が加えられる動的負荷のほうが骨肥大に影響が大きいことを報告している。また、強度に着目して研究し、骨に対する負荷強度は骨肥大の増大と比例することを証明している⁶⁾。すなわち短時間にハイインパクトが繰り返し加わるような力学的ストレスが、骨重量を増加させることに有効である。

梅村ら⁷⁾ は、ランニングトレーニングとジャンプトレーニングの比較について研究を行った。その結果、脱脂乾燥重量、大腿骨および胫骨ともに両トレーニング群はコントロール群と比べ有意に増加したが、ジャンプトレーニングの方がより増加が大きかった。すなわち、ジャンプトレーニングの方がハイインパクトを骨に与えるための効果的なトレーニング方法になったと考えられる。

そこで本研究ではジャンプトレーニングを採用し、ジャンプの高さを変えたトレーニング群を設け、その床反力を測定し下肢にかかる負荷と骨強度および骨重量に及ぼす影響について検討する。

II 方 法

1. 飼育方法

実験には、10週齢の Wistar 系雌ラット（日本 SLC）を用い、1週間の予備飼育期間後、4週間をトレーニング期間とした。飼育室は、室温を 23 ± 1 °C に保ち、照明を AM 6:30 ~ PM 6:30 までを暗期、その他を明期に設定した。実験動物は、個別のケージにて飼育し、飼料（日本クレア CE-2）と飲料水（水道水）を自由摂取させた。体重は、1週間毎に測定した。

本実験は、中京大学大学院体育学研究科動物実験委員会の承認を得て行った。

2. トレーニング方法

実験群には、30cm ジャンプさせる群（以下30cm 群）、40cm ジャンプさせる群（以下40cm 群）、50cm ジャンプさせる群（以下50cm 群）およびコントロール群の4群を設けた。各群は、10匹ずつとした。1日当たりのジャンプの回数は40回で、週に5回、4週間のトレーニングを行った。

ラットのジャンプは、木の箱の底に敷いた刺激電極板から行なわせ、木の箱の上端に上肢を掛けるまでとした。木の箱の高さを、30cm、40cm および50cm に変化させてジャンプの高さを決めた。電気刺激は、3秒のうち1秒間流れるように設定したが、トレーニングに慣れてくると電気刺激を用いなくてもジャンプを行ったので、2週目からは電気刺激をほとんど与えなかった。コントロール群には、トレーニング群と同様のストレスを与えるため、1週目は電気刺激を与えた。また2週目からはハンドリングを与えた。

3. 床反力の測定

床反力は、トレーニング期間中の4週目に測定を行った。フォースプレート（KISTLER TYPE 9281B, Switzerland）上で、ジャンプトレーニング装置を設置し、そこでジャンプを5~10回程度行わせて測定した。データの取り込みは、EG-lab（Win Jr. Ver2.00, Micro Science）を使用し1kHzで行い、最大値を各個体の床反力とした。

4. 骨形態・骨強度の測定

トレーニング期間終了後、ジエチルエーテル麻酔下にて断頭し、直ちに右胫骨を摘出した。被検骨は、筋組織および軟部組織をきれいに除去した後、骨長の計測をノギスを用いて行った。

続いて骨強度の測定を、三点支持式の骨代謝試験器（アイテクノ社 RX-1600）を用いて行った。被検骨は、骨幹中部で破断するように設置し、プランジャーにかかる最大曲げ荷重を測定した。

破断された胫骨は、クロロホルムとメタノー

ルの2:1混合液に浸けた状態で1週間脱脂した後、80℃で24時間乾燥させ脱脂乾燥重量の測定をした。

5. 統計的手法

各項目の値は全て平均±標準偏差で示した。各測定項目については、4群間のデータにおいて一元配置分散分析を行い、要因に有意差が認められた場合、Tukey-HSD法によって各群間の有意性の検定を行った。また、床反力と最大荷重および脱脂乾燥重量の相関関係についてはピアソンの積率相関分析を行った。有意水準を危険率5%未満に設定した。以上のデータの処理にはSPSS 10.0 J for Windowsを用いて行った。

III 実験結果

トレーニング終了後の体重および骨長は、群間に有意な差はなかった。

破断試験による最大曲げ荷重は、全てのトレーニング群がコントロール群と比べ有意に高い値を示した。さらに40cm群および50cm群は30cm群と比べても有意に高かった (Fig. 1)。脱脂乾燥重量は、全てのトレーニング群がコントロール群と比べ有意に高い値を示した (Fig. 2)。

床反力については50cm群が30cm群に比べ有意に高かった (Fig. 3)。また、床反力と最大曲げ荷重および脱脂乾燥重量の結果について両者

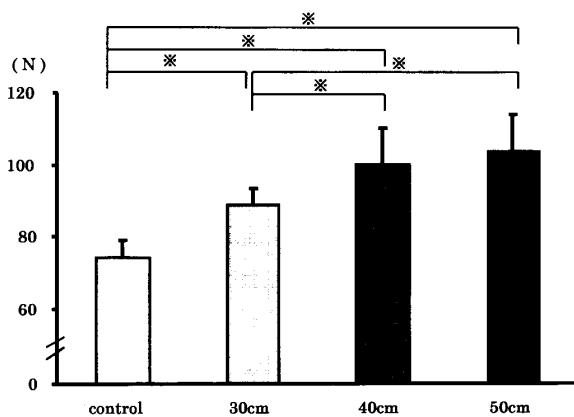


Fig.1. Ultimate bending load of the tibia.

Data are means ± SD.

※ significant differences $P < 0.05$

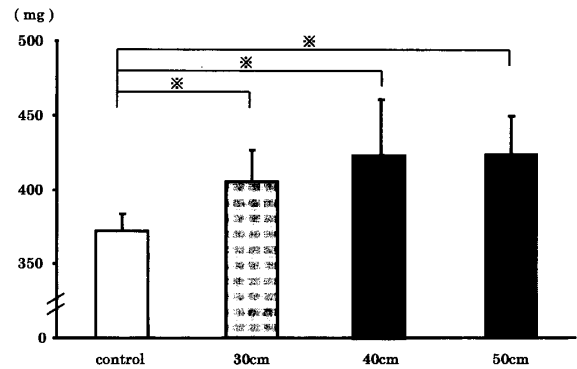


Fig.2. Fat-free dry weight of the tibia.

Data are means ± SD.

※ significant differences $P < 0.05$

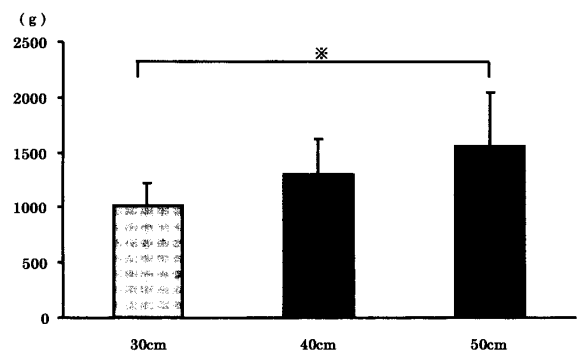


Fig.3. Ground reaction force in jump-exercise.

Data are means ± SD.

※ significant differences $P < 0.05$

の関連性をみるために個々のラットのデータにおいて相関分析を行った (Fig. 4, 5)。その結果、床反力と最大曲げ荷重の間には正の相関 ($r = 0.396$) が認められ ($p < 0.05$)、床反力の増加に伴い最大曲げ荷重が増加した。

IV 考察

この研究で明らかになったことは、ラットにジャンプトレーニングをさせる場合、ジャンプの高さが高いほど跳躍時の床反力が大きくなる事であり、高くジャンプした群の方が骨重量および骨強度が増加した。また、個体でも床反力と骨強度には正の有意な相関があった。

人を対象に骨に対する負荷の強度について着目した研究では、スポーツ種目別に骨密度を測定した場合、体重の3倍以上の床反力で骨密度

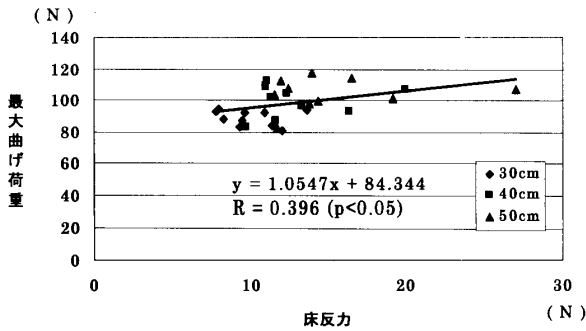


Fig.4. The relationship between ground reaction force and ultimate bending load.

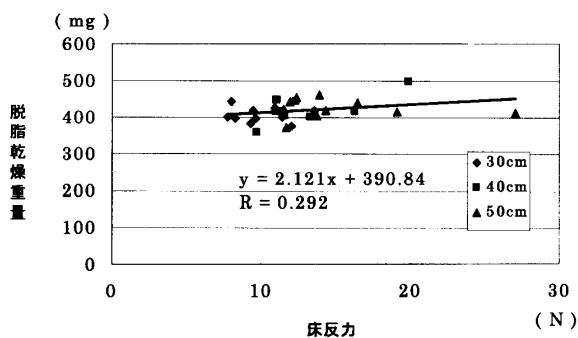


Fig.5. The relationship between ground reaction force and jump height for fat free dry weight.

の上昇が認められたと報告している¹⁾。また、骨の負荷に対する歪みについてFrost²⁾は、1,500~3,000マイクロストレイン(1,000マイクロストレインは0.1%の変形を意味する)以上が与えられた場合、モデリングが亢進し骨重量が増加することをメカノスタットセオリーの中で表している。本実験での、ジャンプ跳躍時の床反力は体重の約4~6倍であった。この4~6倍の力はラットにおいても非日常的な負荷と考えられ骨のモデリングが促進されるのに十分な負荷であると考えられる。

Rubinら³⁾は、七面鳥の尺骨に人工的な力学的ストレス(1Hzサイクルで100回連続)を、強度を変えて加えた時の骨の応答を検討している。その結果、力学的ストレスの強度と皮質骨面積の肥大が直線的な比例関係にあると報告している。本研究では床反力と最大曲げ荷重の関係は有意であったものの、先行研究のような強い直

線関係はなかった。ジャンプ跳躍時には下肢の骨に床反力がかかる上に、ジャンプをするための強い筋収縮による力が骨に加わる。しかし、筋収縮が骨に与える力については今回の実験では評価していないために関係が弱まったと考えられる。また、本研究で設定した50cmのジャンプは、ラットにとって超最大運動であった事も要因の一つと考えられる。したがって、先行研究のような直線的な関係が強く表れなかったものと考えられる。

しかしグループ間の比較をする事から、ラットのジャンプトレーニングはジャンプ跳躍時の床反力が大きいほど下肢骨に加わるメカニカルストレインが大きくなり、その結果骨量および骨強度を増加させ適応が起こることが明らかとなった。

本研究は、平成10年度中京大学特定研究助成金により実施された。

参考文献

- 1) Bassey EJ., Rothwell MC., Littlewood JJ., Pye DW. Pre- and postmenopausal women have different bone mineral density responses to the same high-impact exercise. *J Bone Miner Res* 13 (12): 1805-13 1998
- 2) Frost HM. Bone "mass" and the "mechanostat": a proposal. *Anat Rec* 219 (1): 1-9 1987
- 3) Goto S., Shigeta H., Hyakutake S., Yamagata M. Comparison between menopause-related changes in bone mineral density of the lumbar spine and the proximal femur in Japanese female athletes: a long-term longitudinal study using dual-energy X-Ray absorptiometry. *Calcif Tissue Int* 59 (6): 461-5 1996
- 4) Grimston SK., Willows ND., Hanley DA. Mechanical loading regime and its relationship to bone mineral density in children. *Med Sci Sports Exerc* 25 (11): 1203-1210 1993

- 5) Lanyon LE., Rubin CT. Static vs dynamic loads as an influence on bone remodelling. J Biomech 17 (12) : 897-905 1984
- 6) Rubin CT., Lanyon LE. Regulation of bone mass by mechanical strain magnitude. Calcif Tissue Int 37 (4) : 411-417 1985
- 7) 梅村義久, 石河利寛, 桜井佳世, 益子詔次.
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 (2) : 311-18 1996
- 8) Umemura Y., Ishiko T., Yamauchi T., Kurono M., Mashiko S. Five jumps per day increase bone mass and breaking force in rats. J Bone Miner Res 12 (9) : 1480-5 1997