

牛乳摂取とジャンプトレーニングがラットの骨重量・強度に及ぼす影響

中京大学体育学部 助教授 梅村 義久
教授 北川 薫

I 緒言

加齢とともに増加する骨粗鬆症を予防するためには、カルシウムの摂取や適切な身体運動等が有用であることが指摘されている。日本人は欧米人に比べてカルシウムの摂取量が少ないことが知られており、この一因として牛乳を始めとする乳製品の摂取量が不足していることが指摘される(1)。一方、身体運動については、どの様な運動様式が骨量増加に効果的であるかの検討は充分でないものの、骨に荷重を加えることにより骨密度が増加し、骨強度が増す事実については広く知られている(2)。しかし、身体運動とカルシウム摂取の相互作用の影響について、詳細な検討を加えたものは少ない。適切な身体運動に、適切なカルシウム摂取が加われば、相加的な効果が期待される可能性がある。

我々はラットを用いて骨重量を増加させ骨強度を高める運動様式について研究をしている(3-5)。そして、ジャンプトレーニングはランニングよりもラットの下肢の骨重量を増加させ、骨強度を高めるトレーニング様式として優れていることを、これまでの研究において報告してきた。ジャンプトレーニングにおいては足に加わる衝撃の回数は限られるが、衝撃の強度を強く設定することができるため骨への影響が大きいものと考えられる。これに対してランニングでは衝撃の回数は多いが、個々の衝撃は比較的小さいため骨に対する効果が限られると考えられる。しかし、これまでの研究においてはカルシウム摂取については通常食を与えるだけで、詳細な検討は行なっていない。

そこで、本研究においてはラットにジャンプトレーニングをさせたうえ、通常食以外に牛乳を付加することでカルシウム摂取量を増加させる。このことが骨量・骨強度に及ぼす効果について検討をすることを目的とした。また、ジャンプトレーニングの前あるいは後に牛乳を与えるグループを設けて、牛乳によるカルシウム摂取の効果的なタイミングについても検討を行なった。

II 方法

1. 実験動物

実験には Fischer 344系の雌ラット45匹を用い、生後4週齢を購入し(日本エスエルシー)1週間の予備飼育を行なった。ラットが5週齢に達したとき、実験条件の異なる5群に分け、その後の8週間を実験期間(トレーニング期間及びミルク投与期間)とした。実験期間には隔週に体重測定を行なった。実験期間終了後、解剖及び採血を行ない、骨および血液の分析を行なった。飼育期間を通して、飼料(CE-2固形、日本クレア)、水(水道水)は自由摂取とした。飼育環境は飼育期間を通して、室温 23 ± 1 ℃、湿度 $55 \pm 10\%$ に保った。午前7時から午後7時までを暗期、午後7時か

ら午前7時までを明期として、人工照明による12時間サイクルの明期と暗期を設けた。
なお、本実験は「中京大学大学院体育学研究科動物実験指針」を遵守して遂行された。

2. 実験グループ設定

ジャンプトレーニングまたは牛乳摂取の実験条件の異なる5種類のグループを設定して、5週齢のラットをランダムに分けた。1群にはそれぞれ9匹ずつ割り当てた。

① 水摂取&トレーニング群 (water-sedentary group)

牛乳のプラセボとして水(純水)を摂取させ、ジャンプトレーニングは行なわせない群。

② 牛乳摂取&トレーニング群 (milk-sedentary group)

牛乳を規程の量だけ摂取させ、ジャンプトレーニングを行なわせない群。

③ 水摂取&ジャンプトレーニング群 (water-training group)

牛乳のプラセボとして水(純水)を摂取させ、ジャンプトレーニングを行なわせる群。

④ 牛乳摂取後ジャンプトレーニング群 (milk-before-training group)

牛乳を規程の量だけ摂取させた後(約60分後)にジャンプトレーニングを行なわせる群。

⑤ ジャンプトレーニング後牛乳摂取群 (milk-after-training group)

ジャンプトレーニングを行なわせた後(約60分後)に牛乳を規程の量だけ摂取させる群。

3. トレーニング方法および牛乳摂取方法

A. ジャンプトレーニング方法

4方を板で囲んだ箱の底に電気刺激板を設定してその上にラットを乗せる。電気刺激版には3秒に1回の割合で約80ボルトの直流電流が流れるように設定してあるため、ラットは電流を嫌がって4方の板の上端に前肢で捕まるまでのジャンプを行なう (Fig. 1)。その後ラットは前肢お

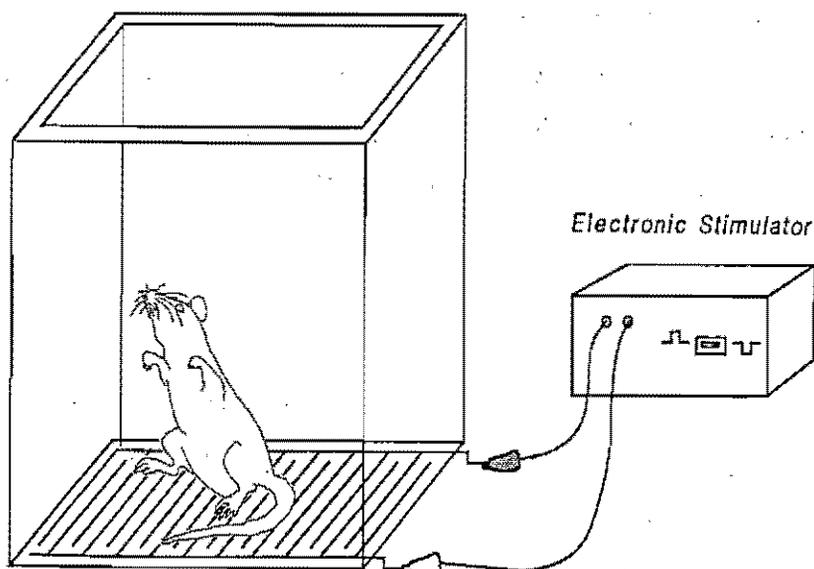


Fig. 1. Jump training in rats.

よび後肢を用いて板の上まで登り上がる。さらに箱の上に登ったラットを手で捉え、次のジャンプをさせるために再び箱の底に戻す。底に戻す時には下肢に大きな力が加わらないように静かに底に置くように留意する。この一連の動作を3秒に一回の割合で行ない、1日20回、週5回行わせた。箱の高さ（4方の板の高さ）は25cmから始め、週に5cmずつ高くして第4週からは40cmとした。ジャンプトレーニングに慣れるに従い電気刺激はほとんど用いる必要がなくなった。また、すべてのトレーニングは午前9時から午前11時の間に行なった。

B. 牛乳摂取方法

牛乳（加工乳：乳脂肪3.4%、カルシウム100mg/100g）および水（純水：Milli-Q）はラット用胃ゾンデ（夏目製作所）を用いて経口投与した。投与量はラットの成長にあわせて、5～6週齢では0.5ml、7～8週齢では1.0ml、9～13週齢では1.5mlとした。すべての投与は午前8時から午後0時までに行なった。

4. データの収集

8週間のトレーニング期間終了後、ペントバビルタルナトリウムを体重の約0.1%腹腔内に投与した麻酔下で断頭を行なった。直後に採血と下肢骨の摘出を行なった。

A. 骨強度試験

ラットから右大腿骨および右脛骨を摘出し、それぞれ注意深く骨質を損傷しないように軟部組織を取り除いた。ノギスにて骨長（最大長）を測定し、骨の中間位に印をつけた。その中間位にプランジャーが当たるように設定（中間位近傍で破断が起こる）して、3点支持の破断試験（アイテクノ、RX1600）を行なった。両支点間の距離は1.6cmとし、プランジャーは10mm/minの速度で下方向に変位させて被検骨を破断した。プランジャーにかかる力をコンピューターに入力し、骨代謝測定システム（アイテクノ）にて分析し、骨の最大曲げ荷重と、破断までに要した破断エネルギーおよび破断するまでのプランジャーの変位を算出した。

B. 骨重量の測定

破断試験の後、被検骨をクロロフォルム・メタノール2：1混合液に5日間浸して脱脂を行なった。その後、120℃で1時間乾燥させた後、脱脂乾燥重量を求めた。

C. 骨横断面の分析

さらに、骨重量を測定した後、破断した骨（脛骨のみ）を接着剤で注意深く修復した。リゴラック、パーメックN、プロモーターE（以上 応研商事）を100：1.5：1.5の割合で混合した溶液に被検骨を浸し、陰圧に吸引した後、3～5日放置して包埋した。破断試験で破断が起こった場所の近傍にて切断し横断面を得て、現物投射機（cannon）を用いて拡大してトレースした。これをデジタイジングすることにより皮質骨面積、骨髓腔面積、皮質骨外周囲、内周囲を求めた。また、断面2次モーメントと重心から切断面までの距離を求め、下記の式により単位断面積当たりの骨強度を示す曲げ強度（Bending Stress）を算出した。

$$\text{Bending stress} = P \times \frac{L}{4} \times \frac{eI}{Ix}$$

P : 最大曲げ荷重

L : 支点間距離

el : 重心から切断面までの距離

Ix : 断面2次モーメント

D. 骨代謝マーカーの分析

解剖時に採取した血液は20分放置した後、冷却遠心(2000rpm、20分)にて血清に分離して、 -80°C にて凍結保存した。保存した血液を用いて50日以内に、血清アルカリフォスファターゼ(ALP)をPNP基質法で、血清I型コラーゲンテロペプチド(ICTP)を2抗体RIA法で分析を行った。血清I型コラーゲンテロペプチドの測定においてはヒトのICTP抗体を使用した。

E. 統計的手法

データはすべて平均値±標準偏差で示した。water-sedentary群、milk-sedentary群、water-training群、milk-training群(milk-before-training群+milk-after-training群)の4群について二元配置(Milk×Jump)の分散分析を行い、主要因間および交互作用の検定を行なった。milk-before-training群とmilk-after-training群の比較には対応のないstudent-t検定を行なった。5%を有意性の検出基準とした。

III 結果

牛乳摂取後ジャンプトレーニング群(milk-before-training group)とジャンプトレーニング後牛乳摂取群(milk-after-training group)にはすべての項目について有意な差が検出されなかった。従って、以下の結果では両群を合わせて牛乳摂取&トレーニング群(milk-training group)として処理した。

A. 体重の変化

実験期間中および後の各群の体重変化をTable 1に示した。各群とも実験開始の5週齢時には

Table 1. Change of body weight

Age, weeks	5	7	9	11	13
(training period, weeks)	(0)	(2)	(4)	(6)	(8)
Water-sedentary, g (n=9)	76 ± 5	113 ± 8	142 ± 8	159 ± 8	168 ± 8
Milk-sedentary, g (9)	77 ± 6	112 ± 8	141 ± 8	160 ± 9	171 ± 9
Water-training, g (9)	77 ± 5	111 ± 8	139 ± 6	157 ± 7	167 ± 8
Milk-training, g (18)	76 ± 5	113 ± 6	141 ± 7	158 ± 8	171 ± 10

Values are means ± SD. There were no significant differences among the groups.

76~77gであった体重が実験終了時の13週齢で167~171gに成長したが、各群に有意な差は認められなかった。

B. 脱脂乾燥重量および骨長

実験期間終了時の大腿骨、脛骨の脱脂乾燥重量および骨長を Table 2, Table 3, Fig. 2に示した。大腿骨の脱脂乾燥重量は Jump の主効果に有意差が認められ ($P < 0.01$)、ジャンプトレーニングによる骨重量の増加効果が確認された。しかし、Milk の主効果には有意な差が認められず、交互作用にも有意性がなく、牛乳摂取が骨重量増加に及ぼす効果を確認できなかった。脛骨の脱脂乾燥重量についても Jump の主効果だけに有意差が認められ ($P < 0.01$)、Milk の主効果および交互作用には有意性が認められなかった。

Table 2. Fat-free dry weight and length of the femur

	Water-S	Milk-S	Water-T	Milk-T	Main Effect		Interaction
	(n=9)	(9)	(9)	(18)	Milk	Jump	
FFW, mg	312 ± 26	319 ± 18	341 ± 21	346 ± 23	n. s.	$p < 0.01$	n. s.
FFW/Body weight, %	0.185 ± 0.009	0.187 ± 0.007	0.204 ± 0.005	0.202 ± 0.013	n. s.	$p < 0.01$	n. s.
Length, mm	30.61 ± 0.69	30.52 ± 0.51	30.58 ± 0.67	30.75 ± 0.60	n. s.	n. s.	n. s.

Values are means ± SD. Water-S: water-sedentary group, Milk-S: milk-sedentary group, Water-T: water-training group, Milk-T: milk-training group, FFW: fat-free dry weight.

Table 3. Fat-free dry weight and length of the tibia

	Water-S	Milk-S	Water-T	Milk-T	Main Effect		Interaction
	(n=9)	(9)	(9)	(18)	Milk	Jump	
FFW, mg	242 ± 18	248 ± 13	273 ± 13	278 ± 17	n. s.	$p < 0.01$	n. s.
FFW/Body weight, %	0.144 ± 0.006	0.146 ± 0.004	0.164 ± 0.003	0.162 ± 0.010	n. s.	$p < 0.01$	n. s.
Length, mm	34.36 ± 0.67	34.64 ± 0.49	34.87 ± 0.60	34.84 ± 0.57	n. s.	n. s.	n. s.

Values are means ± SD. Water-S: water-sedentary group, Milk-S: milk-sedentary group, Water-T: water-training group, Milk-T: milk-training group, FFW: fat-free dry weight.

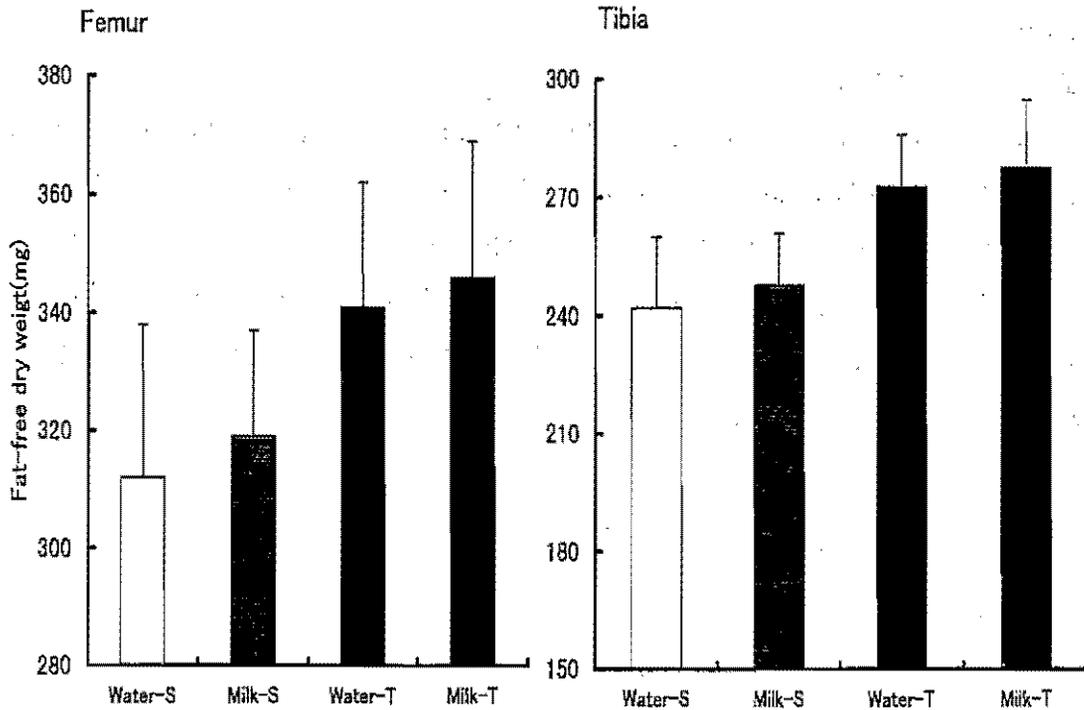


Fig.2 Fat-free dry weights of femur and tibia. Water-S: water-sedentary group, Milk-S: milk-sedentary group, Water-T: water-training group, Milk-T: milk-training group. Error bars represent SD of the means.

さらに、群間内の個体の体重のばらつきを補正するために脱脂乾燥重量を体重比で示した。しかし、大腿骨の脱脂乾燥重量は、Jumpの主効果のみに有意差が認められ ($P < 0.01$)、Milkの主効果および交互作用には有意差が認められなかった。脛骨の脱脂乾燥重量も、Jumpの主効果のみに有意差が認められ ($P < 0.01$)、Milkの主効果および交互作用には有意差が認められず、牛乳摂取の効果が確認されなかった。

大腿骨および脛骨の骨長はJump、Milkの主効果および交互作用に有意性がなく、4群に差が認められなかった。

C. 骨強度

3点支持の骨破断試験で得られた結果を、Table 4, Table 5, Fig.3に示す。大腿骨の最大曲げ荷重 (Maximum load) はJumpの主効果に有意差が認められる ($P < 0.01$) だけでなく、Milkの主効果にも有意性が認められ ($P < 0.05$)、ジャンプトレーニングの効果とともに牛乳摂取の骨強化効果が認められた。交互作用については有意性が認められなかった。脛骨の最大曲げ荷重はJumpの主効果に有意差が認められたが ($P < 0.01$)、Milkの主効果には有意性が認められなかった。しかし、交互作用に有意性が認められ ($P < 0.05$)、ジャンプトレーニングをした群については牛乳摂取をした方がより骨強度が増加することが示された。

大腿骨の破断までに要した総エネルギー (Total energy) についてもJumpの主効果に有意差が

認められる ($P < 0.01$) だけでなく、Milk の主効果にも有意性が認められた ($P < 0.05$)。交互作用には有意差が認められなかった。しかし、脛骨の破断までに要した総エネルギーは Jump の主効果に有意差が認められ ($P < 0.01$)、ジャンプトレーニングによる効果が確認されたが、Milk の主効果には有意な差が認められず、交互作用にも有意性がなかった。

破断時の骨の変位すなわち“撓み” (Deformation) は、大腿骨では Jump の主効果に有意差が認められたが ($P < 0.01$)、Milk の主効果および交互作用には有意性が認められなかった。脛骨における破断時の骨の変位は、Jump および Milk の主効果、ならびに交互作用に有意差がなく、4

Table 4. Mechanical properties at fracture test of the femur

	Water-S	Milk-S	Water-T	Milk-T	Main Effect		Interaction
	(n=9)	(9)	(9)	(18)	Milk	Jump	
Maximum load, N	86.6 ± 7.8	91.1 ± 6.2	95.5 ± 9.1	102.0 ± 8.2	$p < 0.05$	$p < 0.01$	n.s.
Total energy, $J \times 10^{-2}$	1.31 ± 0.29	1.42 ± 0.21	1.54 ± 0.21	1.79 ± 0.28	$p < 0.05$	$p < 0.01$	n.s.
Deformation, mm	0.25 ± 0.05	0.26 ± 0.05	0.28 ± 0.04	0.32 ± 0.05	n.s.	$p < 0.01$	n.s.

Values are means ± SD. Water-S: water-sedentary group, Milk-S: milk-sedentary group, Water-T: water-training group, Milk-T: milk-training group.

Table 5. Mechanical properties at fracture test of the tibia

	Water-S	Milk-S	Water-T	Milk-T	Main Effect		Interaction
	(n=9)	(9)	(9)	(18)	Milk	Jump	
Maximum load, N	51.3 ± 3.4	50.2 ± 3.6	65.8 ± 4.5	71.1 ± 5.3	n.s.	$p < 0.01$	$p < 0.05$
Total energy, $J \times 10^{-2}$	0.68 ± 0.19	0.70 ± 0.19	1.17 ± 0.29	1.31 ± 0.32	n.s.	$p < 0.01$	n.s.
Deformation, mm	0.18 ± 0.05	0.21 ± 0.09	0.27 ± 0.08	0.30 ± 0.09	n.s.	$p < 0.01$	n.s.
Bending Stress, Nmm^{-2}	224 ± 42	224 ± 44	228 ± 21	249 ± 24	n.s.	n.s.	n.s.

Values are means ± SD. Water-S: water-sedentary group, Milk-S: milk-sedentary group, Water-T: water-training group, Milk-T: milk-training group.

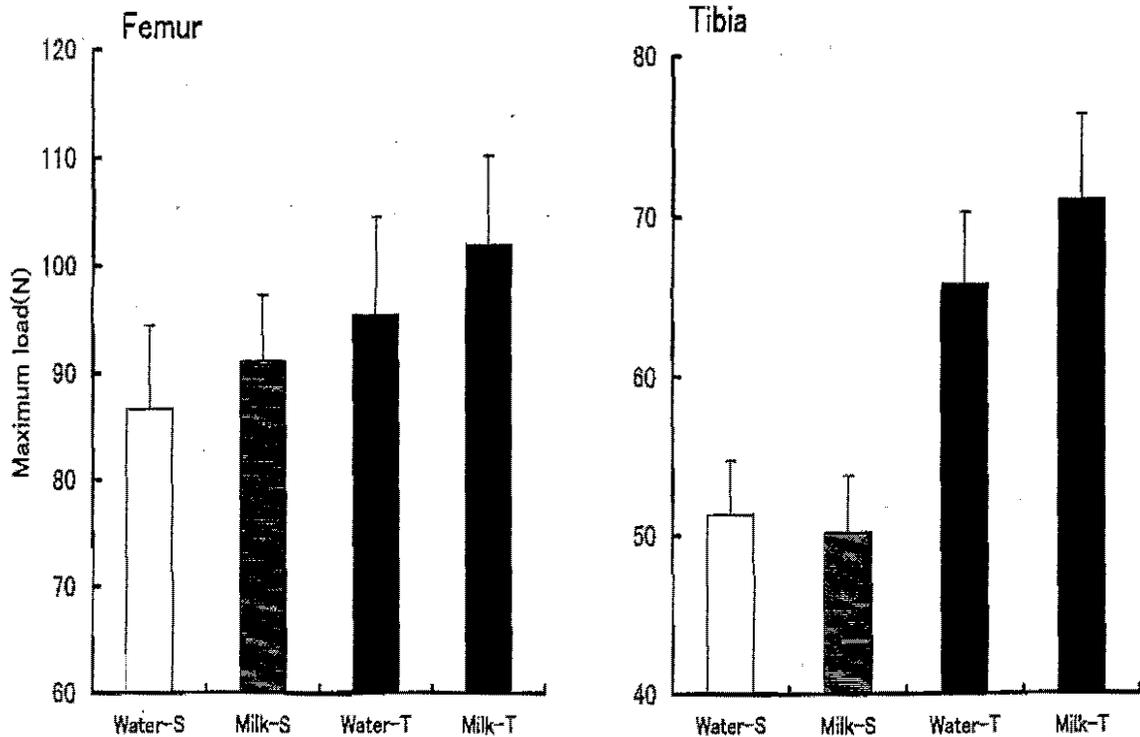


Fig.3 Maximum loads of the femur and tibia at the fracture tests. Water-S: water-sedentary group, Milk-S: milk-sedentary group, Water-T: water-training group, Milk-T: milk-training group. Error bars represent SD of the means.

群間に差が認められなかった。

最大曲げ荷重と、横断面分析結果から得られる断面二次モーメントおよび重心から破断面までの距離から算出される。単位面積当たりの骨の強度を示す曲げ強度 (Bending stress) は、脛骨についてのみ計算された。Milk-training group が平均値で他の3群よりやや高い傾向 (249 v.s. 224, 224, 228) を示したが、Jump および Milk の主効果、ならびに交互作用に有意差が認められなかった。

D. 横断面分析

脛骨の横断面分析の結果を Table 6 に示す。皮質骨内周囲 (Endosteal perimeter) は Jump および Milk の主効果、ならびに交互作用に有意差が認められなかった。皮質骨外周囲 (Periosteal perimeter) は Jump の主効果に有意差が認められたが ($P < 0.01$)、Milk の主効果および交互作用には有意差が認められなかった。骨髓腔面積 (Medullary area) も Jump の主効果のみに有意差が認められ ($P < 0.01$)、Milk の主効果および交互作用には有意差が認められなかった。皮質骨面積 (Cortical area) についても Jump の主効果のみに有意差が認められ ($P < 0.01$)、Milk の主効果および交互作用には有意差が認められなかった。横断面分析の結果、ジャンプトレーニングによる横軸方向の成長促進効果が認められたが、牛乳摂取による横軸方向への成長促進効果は認められなかった。

Table 6. Cross-sectional perimeters and areas of the tibia

	Water-S	Milk-S	Water-T	Milk-T	Main Effect		Interaction
	(n=9)	(9)	(9)	(18)	Milk	Jump	
Endosteal perimeter, mm	3.74 ± 0.28	3.73 ± 0.25	3.88 ± 0.20	3.85 ± 0.21	n. s.	n. s.	n. s.
Periosteal perimeter, mm	7.21 ± 0.35	7.31 ± 0.30	7.78 ± 0.44	7.82 ± 0.27	n. s.	<i>p</i> <0.01	n. s.
Medullary area, mm ²	0.97 ± 0.15	0.93 ± 0.09	1.06 ± 0.11	1.05 ± 0.11	n. s.	<i>p</i> <0.01	n. s.
Cortical area, mm ²	2.55 ± 0.39	2.70 ± 0.34	3.04 ± 0.28	3.11 ± 0.23	n. s.	<i>p</i> <0.01	n. s.

Values are means ± SD. Water-S: water-sedentary group, Milk-S: milk-sedentary group, Water-T: water-training group, Milk-T: milk-training group.

E. 骨代謝マーカー

血清アルカリフォスファターゼ (ALP) および血清 I 型コラーゲンテロペプチド (ICTP) 測定結果を Table 7 に示す。血清 ALP は Jump の主効果に有意差が認められたが ($P < 0.01$)、Milk の主効果および交互作用には有意差が認められなかった。従って、ジャンプトレーニングによって血清 ALP 値は高くなることが確認されたが、牛乳摂取による差は確認されなかった。血清 ICTP は Milk の主効果に有意差が認められたが ($P < 0.01$)、Jump の主効果には有意差が認められなかった。また、交互作用に有意差が認められた ($P < 0.05$)。この結果、血清 ICTP 値は牛乳摂取により増加すること、牛乳を摂取している群としていない群ではトレーニングによる影響が異なることが示された。

Table 7. Serum alkaline phosphatase (ALP) and carboxyterminal telopeptide of type I collagen (ICTP)

	Water-S	Milk-S	Water-T	Milk-T	Main Effect		Interaction
	(n=9)	(9)	(9)	(18)	Milk	Jump	
Serum ALP	558 ± 43	548 ± 58	652 ± 60	657 ± 69	n. s.	<i>p</i> <0.01	n. s.
Serum ICTP	2.13 ± 0.37	2.54 ± 0.48	1.70 ± 0.39	2.73 ± 0.49	<i>p</i> <0.01	n. s.	<i>p</i> <0.05

Values are means ± SD. Water-S: water-sedentary group, Milk-S: milk-sedentary group, Water-T: water-training group, Milk-T: milk-training group.

IV 考 察

この実験で明らかとなったことは、ラットのジャンプトレーニングおよび牛乳付加実験において、骨重量の増加に関してはジャンプトレーニングによる効果のみしか認められなかったが、骨強度の増加に関しては牛乳摂取の効果が表れ、特にジャンプトレーニングをしている群に効果が明確に表れたことである。

また、骨の横断面分析の結果にも牛乳摂取の効果は認められなかった。従って、3点支持の骨破断試験結果に表れた、牛乳摂取の骨強度を増加させる効果は骨の量的な変化よりも質的な変化の結果であると推測される。骨の単位面積当たりの骨の強度を示す曲げ強度について、有意差は認められなかったものの、牛乳摂取&ジャンプトレーニング群だけが他の3群よりやや高い傾向を示している。この結果は骨の質的な変化に対応している可能性がある。

血清のALP値は骨形成のラフな指標であるが、ジャンプトレーニングで骨形成が盛んであることを示唆している。一方、血清ICTP値はヒトの抗体を用いて測定したため参考値ではあるが、一般に骨吸収マーカーと考えられている(6)。本実験では血清ICTPは牛乳を摂取すると高くなること、ジャンプトレーニングをしているとこの差が明確になることが示された。この結果は牛乳を摂取した方が骨の吸収が多いという示唆で、骨強度の結果とは一見矛盾するように考えられる。しかし、本実験では測定していないがI型コラーゲンに対応する骨形成マーカーの値次第では、骨の代謝回転が早いとの考え方も否定できない。牛乳摂取が骨重量を増加させずに、骨の質的な変化をもたらして骨強度を増加させるならば、骨のカルシウムではなくて蛋白質代謝が質的または量的に変化した可能性が指摘される。血清ICTPの結果は骨の蛋白の90%をしめるコラーゲン代謝が牛乳摂取によって変化したことを示している。牛乳のどのような成分が骨蛋白代謝に影響を与えるのかについては、今後の検討が必要である。

また、本研究ではジャンプトレーニングの前あるいは後に牛乳を与えるグループを設けて、牛乳によるカルシウム摂取の効果的なタイミングについても検討を行なった。しかし、すべての測定値に2つの群に有意差が認められず、本研究の実験設定では、牛乳によるカルシウム摂取の効果的なタイミングについては検討するに至らなかった。

一方、ジャンプトレーニングによる骨強度の増加は、骨量の増加、皮質骨面積の増加によって説明される。したがって、骨の単位面積当たりの骨の強度を示す曲げ強度の指標には大きな差は表れなかった。ジャンプトレーニングによる骨量の増加は、形態的には骨の断面積の増加として観察された。特に皮質骨の外周囲および皮質骨面積の増加が著しく、骨髓腔面積にも差が認められたものの、皮質骨内周囲には有意差が認められなかった。Burrら(7)は機械的衝撃で起こる骨の横断面積の増加は、骨膜での骨形成増加と内腔での再吸収減少によると報告しており、本研究の結果と一致する。また、ジャンプトレーニングによって骨強度・骨重量・皮質骨面積が増加し、曲げ強度が変化しないことについては我々の先行結果と一致するものである。

骨強度を高める身体的トレーニングの様式についての検討は不足していると考えられる。一般に身

体トレーニングが骨代謝に及ぼす効果に関する研究においては、動物実験においてもヒトにおいてもランニングが採用されることが多い。しかし、ヒトの場合その結果は必ずしも一致しておらず、効果を認めない場合(8-10)や比較的小さな効果しか認めない場合がある(11-13)。動物実験においても持続的走運動が骨に与える効果は一致せず(14)、適度な強度のランニングでは骨量を増加させるが(15-17)、高強度や長時間のランニングは逆に骨量を減少させることが知られている(18-20)。これらの結果から見るとランニングが骨強度を増加させる運動様式として優れているか否かについて再検討が必要であると考えられる。

一方、実験動物の対象とする骨に外力を加えて骨量の変化を観察するという実験設定でいくつかの研究がなされている。外力とは身体の外部から骨に物理的な力を与えるものである。研究結果では、外力は一定の圧力を続けるような静的な力よりも、衝撃力のような動的な力の方が骨量の増加には有効であることが報告されている(21,22)。また、骨量の増加は外力の最大値によく比例すること(23,24)、与える外力の反復回数は少なくともよいことなどが知られている(25)。

このような結果から考えて、我々はジャンプトレーニングを採用し、このトレーニング様式がラットの骨重量を増加させ骨強度を高める運動様式として優れていることを報告してきた(3-5)。すなわち、ジャンプトレーニングは下肢に加えられる負荷の回数は限られるが、負荷は動的であり、ジャンプの高さを調節することにより大きな負荷を与えることができると考えられるからである。これに対してランニングは下肢にかかる負荷の回数は多いが、一回にかかる負荷の大きさについては比較的小さいものと考えられる。本研究で water-training の大腿骨脱脂乾燥重量は water-sedentary に比較して 10.9%、milk-training は milk-sedentary に比較して 10.8% の増加を示している。これはラットに 1 時間のランニングをさせた Raab ら(17)の先行研究でのコントロール比 3.2% の増加(2.5 カ月齢ラット)や、McDonald ら(16)の先行研究での 4.6% (7 カ月齢ラット)増加などに比較して、大きな増加になっていることから、ジャンプトレーニングが有用であることが示される。

本研究でのジャンプトレーニングでは、ジャンプの回数を 1 日 20 回に設定した。これは、骨量を増加させるための負荷は 1 日 20 回程度で充分であるとの先行研究結果に基づいている。すなわち、Rubin ら(25)は自律神経切除を施した七面鳥の尺骨に動的な外力を加えて、骨量増加効果を研究した。その結果、負荷の回数が 1 日 4 回でも自律神経切除による不動のために起こる骨萎縮を防ぐことができ、36 回では骨量が切除手術前より増加した。しかし 36 回と 1800 回の負荷は同等な効果であったことを報告している。また、我々の先行研究においても(5)、ジャンプの回数は 10 回以上なら十分な効果が期待できることを確認している。

本研究で用いたラットは 5 から 13 週齢と成長期から成熟期にあたるものであった。我々の先行研究では老齢ラットについても、ジャンプトレーニングによる骨量増加の効果を認めている。しかし、牛乳摂取による骨代謝の変化については、若齢ラットと老齢ラットとでは異なる可能性があり、この点について今後検討する必要がある。

V. まとめ

ラットにジャンプトレーニングおよび牛乳摂取を行なわせ、後肢の骨の骨重量、骨強度、骨形態および血清骨代謝マーカー値について分析を行なった。その結果、骨重量の増加に関してはジャンプトレーニングによる効果が認められ、牛乳摂取の効果は認められなかった。骨強度の増加に関してはジャンプトレーニングの効果とともに牛乳摂取の効果が表れ、特にジャンプトレーニングをしている群に効果が明確に現れた。また、牛乳摂取は骨のコラーゲン代謝を変化させた可能性が指摘された。

参考文献

- 1)厚生省. 国民栄養調査. 1995.
- 2)Chilibeck, P. D., D. G. Sale, and C. E. Webber. Exercise and bone mineral density. *Sports Med.* 19: 103-122, 1995.
- 3)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: 311-318, 1996.
- 4)Umemura, Y., T. Ishiko, H. Tsujimoto, H. Miura, N. Mokushi, and H. Suzuki. Effects of jump training on bone hypertrophy in young and old rats. *Int. J. Sports Med.* 16: 364-367, 1995.
- 5)Umemura, Y., T. Ishiko, T. Yamauchi, M. Kurono, and S. Mashiko. Five jumps per day increase bone mass and breaking force in rats. (unpublished)
- 6)福永仁夫, 大塚信昭, 小野志磨人. I型コラーゲン Cross-linked carboxy-terminal telopeptide(ICTP) の血中濃度の測定 *ホルモンと臨床* 41:729-736, 1993.
- 7) Burr, D. B., and R. B. Martin. Errors in bone remodeling: Toward a unified theory of metabolic bone disease. *Am. J. Anat.* 186: 186-216, 1989.
- 8) Cavanaugh, D. J., and C. E. Cann. Brisk walking does not stop bone loss in postmenopausal women. *Bone* 9: 201-204, 1988.
- 9) Dalen, N., and K. E. Olsson. Bone mineral content and physical activity. *Acta. Orthop. Scand.* 45: 170-174, 1974.

- 10) Martin, D., and M. Notelovitz. Effects of aerobic training on bone mineral density of postmenopausal women. *J. Bone Miner. Res.* 8: 931-936, 1993.
- 11) Hatori, M., A. Hasegawa, H. Adachi, A. Shinozaki, R. Hayashi, H. Okano, H. Mizumura, K. Murata. The effects of walking at the anaerobic threshold level on vertebral bone loss in postmenopausal women. *Calcif. Tissue Int.* 52: 411-414, 1993
- 12) Smith, E. L., C. Gilligan, M. McAdam, C.P. Ensign, and P. E. Smith. Deterring bone loss by exercise intervention in premenopausal and postmenopausal women. *Calcif. Tissue Int.* 44: 312-321, 1989.
- 13) Snow-Harter, C., M. L. Bouxsein, B. T. Lewis, D. R. Cahter, and R. Marcus. Effects of resistance and endurance exercise on bone mineral status of young women: a randomized exercise intervention trial. *J. Bone Miner. Res.* 7: 761-769, 1992.
- 14) Booth, F.W., and E. W. Gould. Effects of training and disuse on connective tissue. *Exerc. Sport Sci. Rev.* 3: 83-112, 1975.
- 15) Beyer, R. E., J. C. Huang, and G. B. Wilshire. The effect of endurance exercise on bone dimensions, collagen, and calcium in the aged male rats. *Exp. Gerontol.* 20: 315-323, 1985.
- 16) McDonald, R., J. Hegenauer, and P. Saltman. Age-related Differences in the bone Mineralization pattern of rats following exercise. *J. Gerontol.* 41: 445-452, 1986.
- 17) Raab, D. M., E. L. Smith, T. D. Crenshaw, and D. P. Thomas. Bone mechanical properties after exercise training in young and old rats. *J. Appl. Physiol.* 68: 130-134, 1990.

- 18) Hou, J. C.-H., G. J. Salem, R.F. Zernicke, and R. J. Barnard. Structural and mechanical adaptations of immature trabecular bone to strenuous exercise. *J. Appl. Physiol.* 69: 1309-1314, 1990.
- 19) Li, K.-C., R. F. Zernicke, R. J. Barnard, and A. F-Y. Li. Differential response of rat limb bones to strenuous exercise. *J. Appl. Physiol.* 70: 554-560, 1991.
- 20) Matsuda, J. J., R. F. Zernicke, A. C. Vailas, V.A. Pedrini, A. Pedrini-Mille, and J. A. Maynard. Structural and mechanical adaptation of immature bone to strenuous exercise. *J. Appl. Physiol.* 60: 2028-2034, 1986.
- 21) Lanyon, L. E., and C. T. Rubin. Static vs dynamic loads as an influence on bone remodelling. *J. Biomech.* 17: 897-905, 1984.
- 22) Perren, S. M., A. Huggler, and M. Russenburge. The reaction of cortical bone to compression. *Acta. Orthop. Scand.* 125 (suppl) : 19-29, 1969.
- 23) Carter, D. R. Mechanical loading histories and cortical bone remodeling. *Calcif. Tissue Int.* 36: S19-S24, 1984.
- 24) Rubin, C. T., and L. E. Lanyon. Regulation of bone mass by mechanical strain magnitude. *Calcif. Tissue Int.* 37: 411-417, 1985.
- 25) Rubin, C. T., and L. E. Lanyon. Regulation of bone formation by applied dynamic loads. *J. Bone Joint. Surg.* 66A: 397-402, 1984.