

研究報告

リン過剰摂取と運動が脛骨の形態に及ぼす影響

梅村 義久・本田 亜紀子・王 国棟・十河 直太

Effects of jump training and high phosphorus intake on bone

Yoshihisa UMEMURA, Akiko HONDA, Guodong WANG, Naota SOGO

I はじめに

加工食品や食品添加物にはリンが含まれており、この影響で現代の食生活においてはリンを摂取する量が増加している¹⁾。これに対して、カルシウムの摂取量は増えておらず、特に日本人のカルシウム摂取量は、欧米人に比べて少ない²⁾。リン・カルシウム摂取の比率が高くなると、骨量が減少する場合があることが指摘されている³⁾。一方、運動は骨にメカニカルストレスを与え、局所的ではあるものの骨量を増加させる⁴⁾⁵⁾。リンの摂取の機会が増加した今日においては、運動の重要性が増していると考えられる。

我々はラットを用いる先行研究において、リン・カルシウム比が2.0である中程度の高リン食においてもジャンプトレーニングの効果があることを実証した⁶⁾。そこで、本研究においてはリン・カルシウム比が2.5である高強度の高リン食において、運動の効果があるか否かを検証することとした。

II 方法

1. 動物および飼育方法

実験動物には8週齢のWistar-ST系雄ラット55匹（日本エスエルシー）を用いた。1週間の

予備飼育期間中に、すべてのラットにジャンプトレーニングの練習をさせた。予備飼育終了後に、ラットをランダムに下記の6群（3つの食餌条件×2つの運動条件）に分けた。

- ① 通常食 (P/Ca比 = 1.0) コントロール群、n = 10
- ② 通常食 (P/Ca比 = 1.0) ジャンプトレーニング群、n = 10
- ③ 中程度高リン食 (P/Ca比 = 2.0) コントロール群、n = 9
- ④ 中程度高リン食 (P/Ca比 = 2.0) ジャンプトレーニング群、n = 11
- ⑤ 高強度高リン食 (P/Ca比 = 2.5) コントロール群、n = 8
- ⑥ 高強度高リン食 (P/Ca比 = 2.5) ジャンプトレーニング群、n = 7

8週間のトレーニング期間終了後、断頭にてラットを屠殺し、左脛骨を摘出して骨長および骨幹中央部での長径と短径をノギスにて測定した。飼料と水（水道水）は飼育期間を通して自由摂取とした。また全飼育期間を通して設定温度を23 ± 1℃とし、中京大学動物実験棟の飼育室にて、1匹ずつ専用ケージで飼育した。本研究は中京大学動物実験委員会の承認を得て実施した。

2. 餌の設定

本実験に使用した飼料は、リン、カルシウム、ナトリウムなどの含有量が既知である標準的な粉末飼料 (CE2、日本クレア) を基礎飼料とし、先行研究⁷⁾ を参考にCE2にリン酸ナトリウム ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) と塩化ナトリウム (NaCl) およびデキストリンを添加することにより、飼料に含まれるリンの量を調節するとともに、ナトリウム含有量に差異が出ないように調節した。通常食には基本の飼料100gに対してリン酸ナトリウム ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 0.35g、塩化ナトリウム (NaCl) 3.00g、デキストリン5.00gを添加して、リン・カルシウム比 (P/Ca) が1.0となる飼料とした。中程度高リン食には基本の飼料100gに対してリン酸ナトリウム5.69g、塩化ナトリウム1.00g、デキストリン1.66gを添加して、リン・カルシウム比 (P/Ca) が2.0となるようにした。また、高度高リン食には基本の飼料100gに対してリン酸ナトリウム ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 8.35gのみを加えて、リン・カルシウム比 (P/Ca) が2.5となる飼料を作成した。このように設定した餌をジャンプトレーニング期間と同期間 (9週齢～17週齢) の8週間にわたって与えた。

3. ジャンプトレーニングの方法

ジャンプトレーニングは我々の先行研究⁴⁾ と同様の方法で行った。すなわち、自作の木箱の底からジャンプをさせ箱の上端に上肢で捕まるという運動である。箱の上に登ってきたラットは、次のジャンプのために再び箱の底に戻した。箱の底には電気刺激板が用意しており、ジャンプトレーニングの練習期間およびラットがジャンプをしない場合には電流を使用した。ラットは練習日および2～3日のトレーニングにおいてジャンプトレーニングを学習するため、その後はほとんど電流を受けることはなくジャンプをするようになった。木の箱の高さを40cmに設定し、ジャンプ回数は1日20回として、週に5回、8週間のトレーニング (9週齢～17週齢) を行わせた。この間、コントロール群のラットには特別なトレーニングは行わなかった。

4. 統計的手法

各項目については、すべて平均値±標準偏差で示した。各測定項目については食餌要因×トレーニング要因の2要因における二元配置の分散分析を行い、食餌要因に有意差がある場合にはTukey HSD法にて下位検定を行い、食餌要因間の比較を行った。すべての結果において有意な交互作用は検出されなかったため、各水準における多重比較は行わなかった。危険率5%以下を有意水準とした。

III 結果

ジャンプトレーニング期間終了後の体重は通常食コントロール群 $467 \pm 34\text{g}$ 、通常食ジャンプトレーニング群 $461 \pm 35\text{g}$ 、高リン食 (2.0) コントロール群 $458 \pm 28\text{g}$ 、高リン食 (2.0) ジャンプトレーニング群 $444 \pm 19\text{g}$ 、高リン食 (2.5) コントロール群 $343 \pm 77\text{g}$ 、高リン食 (2.5) ジャンプトレーニング群 $324 \pm 43\text{g}$ であり、トレーニングによる体重の差異は観察されなかった。食餌要因については有意な差が検出され、高リン食 (2.5) の体重が他の2群に比べて有意 ($P < 0.01$) に低値を示した (図1)。

左脛骨の骨長は通常食コントロール群 $44.0 \pm 0.7\text{mm}$ 、通常食ジャンプトレーニング群 $43.8 \pm 0.7\text{mm}$ 、高リン食 (2.0) コントロール群 $43.8 \pm 0.5\text{mm}$ 、高リン食 (2.0) ジャンプトレーニング群 $43.5 \pm 0.6\text{mm}$ 、高リン食 (2.5) コントロール群 $42.2 \pm 1.1\text{mm}$ 、高リン食 (2.5) ジャンプトレーニング群 $41.8 \pm 1.1\text{mm}$ であり、トレーニングによる骨長の差異は観察されなかったが、高リン食 (2.5) は他の2群と比べて有意に低値であり ($P < 0.01$)、骨の縦軸方向への成長が抑制されていた (図2)。

骨幹中央部での短径は通常食コントロール群 $3.0 \pm 0.2\text{mm}$ 、通常食ジャンプトレーニング群 $3.4 \pm 0.3\text{mm}$ 、高リン食 (2.0) コントロール群 $3.0 \pm 0.1\text{mm}$ 、高リン食 (2.0) ジャンプトレーニング群 $3.2 \pm 0.1\text{mm}$ 、高リン食 (2.5) コントロール群 $3.1 \pm 0.1\text{mm}$ 、高リン食 (2.5) ジャンプトレーニング群 $3.3 \pm 0.2\text{mm}$ であり、トレー

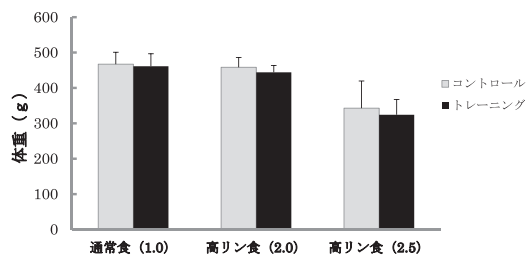


図1 8週間のジャンプトレーニング後の体重

食餌要因においては、高リン食 (2.5) 群が他の食餌条件に比べて有意に低い ($P < 0.01$)。トレーニング要因においては有意差なし。

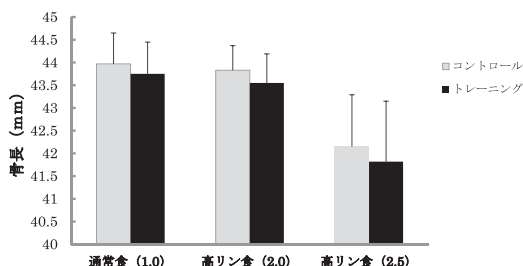


図2 脛骨の骨長

食餌要因においては、高リン食 (2.5) 群が他の食餌条件に比べて有意に低い ($P < 0.01$)。トレーニング要因においては有意差なし。

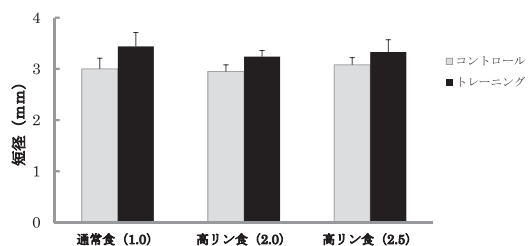


図3 脛骨骨幹中央部の短径

食餌要因においては有意差なし。トレーニング要因においては、トレーニング群が有意に高い ($P < 0.01$)。

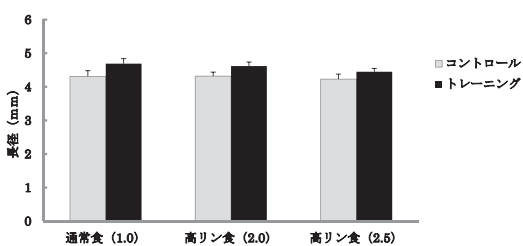


図4 脛骨骨幹中央部の長径

食餌要因においては、高リン食 (2.5) 群が他の食餌条件に比べて有意に低い ($P < 0.01$)。トレーニング要因においては、トレーニング群が有意に高い ($P < 0.01$)。

ニングによって短径が有意に増加することが確認された ($P < 0.01$)。一方、食餌要因については差異が観察されなかった (図3)。

骨幹中央部での長径は通常食コントロール群 $4.3 \pm 0.2\text{mm}$ 、通常食ジャンプトレーニング群 $4.7 \pm 0.2\text{mm}$ 、高リン食 (2.0) コントロール群 $4.3 \pm 0.1\text{mm}$ 、高リン食 (2.0) ジャンプトレーニング群 $4.6 \pm 0.1\text{mm}$ 、高リン食 (2.5) コントロール群 $4.2 \pm 0.1\text{mm}$ 、高リン食 (2.5) ジャンプトレーニング群 $4.5 \pm 0.1\text{mm}$ であり、トレーニングによって長径が増加することが確認された ($P < 0.01$)。一方、食餌要因も有意であり、高リン食 (2.5) は他の2群と比べて有意に低値であった ($P < 0.01$) (図4)。

IV 考察

本研究によって明らかとなったことは、本研究で用いたリン:カルシウム比2.0の中程度高リン食では、脛骨の形態に変化を与えることがなかったが、リン:カルシウム比2.5の高強度高リン食では、脛骨の長軸方向および横軸方向の成長が抑制されることが明らかとなった。一方、ジャンプトレーニングによる運動負荷は、食餌条件にかかわらず脛骨骨幹中央部を太くすることが確認された。

リンの過剰摂取は腸管でのカルシウムの吸収を抑制することにより、血中のリン濃度の増加とカルシウム濃度の減少を引き起こす。カルシウム濃度の減少は副甲状腺ホルモンの分泌を亢進させ、骨からのカルシウム吸収を促進する。このため、リンの極度の過剰摂取は、骨塩量の

減少および骨の発育不全を引き起こすことが知られている³⁾。本研究において、リン：カルシウム比が2.5の高強度の高リン食で骨の成長が抑制されたことは、骨代謝に異常が現れた結果と考えられる。リン：カルシウム比2.0の中等度の高リン食では骨形態に影響を及ぼさなかったが、この結果については我々の先行研究と一致する結果である⁶⁾。

一方、適切な運動は骨量を増加させることが知られている⁴⁾⁵⁾。我々の先行研究においては、リン：カルシウム比2.0の高リン食においてもジャンプトレーニングの効果が観察されている。本研究においてはリン：カルシウム比2.5で発育不全となった脛骨においても、骨幹中央部の短径および長径は、ジャンプトレーニングによって増加することが確認された。リン、カルシウム代謝に異常を起こしている場合においても、骨にメカニカルストレスを与えると、負荷のかかった局所において骨量が増加して骨形態が変化することが示された。今後、本実験で採取した試料の骨塩量や骨代謝マーカーなどを分析して、より詳しくリン過剰摂取および運動が骨代謝に及ぼす影響について検討する必要がある。

参考文献

- 1) MS Calvo, J Uribarri. Public health impact of dietary phosphorus excess on bone and cardiovascular health in the general population. *Am J Clin Nutr*, 98: 6-15, 2013.
- 2) 厚生労働省平成18～25年度国民健康・栄養調査結果の概要, 健康局がん対策・健康増進課栄養調査係.
- 3) Brot C, Jørgensen N, Madsen OR, Jensen LB, Sørensen OH. Relationships between bone mineral density, serum vitamin D metabolites and calcium: phosphorus intake in healthy perimenopausal women. *J Intern Med*, 245: 509-516, 1999.
- 4) 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*, 12:1480-1485, 1997.
- 5) Kato T, Terashima T, Yamashita T, Hatanaka Y, Honda A, Umemura Y. Effect of low-repetition jump training on bone mineral density in young women. *J Appl Physiol* 100: 839-843, 2006.
- 6) 王国棟、本田亜紀子、水野貴正、十河直太、梅村義久. 発育期雄ラットにおけるジャンプトレーニングと高リン食摂取が骨に及ぼす影響. *体力科学* 64 : 295-303, 2015.
- 7) Bégot L, Collombet JM, Renault S, Butigieg X, Andre C, Zerath E, Holy X. Effects of high-phosphorus and/or low-calcium diets on bone tissue in trained male rats. *Med Sci Sports Exerc*, 43: 54-63, 2011.