

ラットヒラメ筋に対する降下時の衝撃吸収動作を伴う ジャンプトレーニングの影響

辻本 尚弥¹⁾・鈴木 英樹²⁾

キーワード：Female Fischer 344 rat, Myosin heavy chain, Mature, Fiber type

Effects of jump training with shock-absorbing action during descent on rat soleus muscle

Hisaya TSUJIMOTO and Hideki SUZUKI

We studied the effects of jump training in 15 mature female Fischer 344 rats (12 month old). The animals were divided into two groups: sedentary (S; n = 7) or jump (J; n = 8) group. The animals in the J group were trained with vertical jumps (40 cm high, 100 repetitions/day, 5 days/week) for 8 weeks. This training involves a movement similar to so-called “stepping” to absorb the impact of a fall. The rat’s body sinks while the rat’s lower limbs exert muscle force. This causes the lower limb skeletal muscles to become eccentric. After 8-weeks of training, the soleus muscle (SOL) was isolated, and crude myosin was extracted. Myosin heavy chain (MyHC) isoform composition was analyzed by sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis.

The final body weights of each group were not significantly different. SOL weight of the J group was not significantly higher than those of the S group. Relative SOL weight of the J group was significantly higher than those of the S group. The value of the type I MyHC isoform in the J group was relatively lower than that of the S group. On the contrary, the value of the type IIa MyHC isoform in the J group was relatively higher than that of the S group.

These results indicated that the MyHC isoform composition of the SOL muscle changed with jump training with shock-absorbing action during descent.

Keywords: Female Fischer 344 rat, Myosin heavy chain, Mature, Fiber type

緒 言

加齢に伴う身体活動量の低下は、筋量を減じさせ、基礎代謝量の低下を引きおこし、肥満を助長する(熊谷ら, 2015)。さらに、筋量減少による筋力の低下は骨折や転倒の危険性を高め、怪我によるさらなる活動量の減少と筋力低下といった、いわゆる「負のスパイラル」を引き起こす可能性がある(Aniansson et al., 1984; Lord et al., 1994)。そこで活動的かつ生産的な健康長寿を得るためには、十分な予備力を有した筋力の保持・増進は重要であり、筋力の爆発的力発揮の維持と筋量の増加をめざすパワートレーニングが必要と考えられる。

1) 久留米大学人間健康学部スポーツ医科学科

Department of Sports Medicine and Science, Faculty of Human Health, Kurume University

2) 愛知教育大学保健育講座

Department of Health and Physical Education, Aichi University of Education

近年、高速度の筋力トレーニングやジャンプを含むパワートレーニングについて多くの基礎的研究成果が報告されている。梅村らはラットを用いた一連の研究で骨の構造及び機能に対して、ジャンプトレーニングが有効であることを報告している（梅村ら, 1996; 2001; 2015）。本田ら（2013）、幸ら（2012）、戸塚ら（1989）および山内・春日（1992）もラットを用いてジャンプトレーニングの効果について基礎的な報告を行っている。ヒトにおいてもパワートレーニングの有効性について報告されている（Ramírez-Campillo et al., 2014; Pereira et al., 2012; Piirainen et al., 2014; Correa et al., 2012）。また湯浅ら（1999）は、ヒトの大腿直筋について、ジャンプ運動の筋活動レベル最大値は、最大随意収縮時の30-40%あり、脚筋力向上においてはジャンプ動作が有効であることを報告している。さらにTschopp et al.（2011）は、ジャンプトレーニングについて高齢者においても実行可能であると報告している。本研究ではパワートレーニングとして、ジャンプトレーニングに注目した。ジャンプトレーニングは、短時間で爆発的な筋力発揮を必要とするハイパワートレーニングである（勝田, 1979; 戸塚ら, 1988; 安部・浅見, 1989）。そのため体重に対して相対的な筋力低下がある場合に、ジャンプトレーニングは筋や関節の危険性があると考えられる。しかし、ジャンプ力は筋力により規定されるものであり、筋力が低下した者にとってはジャンプ時や着地時の衝撃は低く抑えられる相対的負荷であり、個々人の体力、筋力に見合う運動と捉えることも出来る。高強度負荷という観点からは、対象者にあった安全に実施できる方法が開発されれば有効なトレーニング法になると考えられる。

本研究で着目したヒラメ筋は緊張筋であり、構成する筋線維組成はその大部分が遅筋線維より成っている。そのためヒラメ筋は、姿勢の維持や持久的運動の際の主動筋となると考えられる。しかしヒラメ筋は瞬発的動作時にも、足底筋と共に協同筋として活動参加することが知られている。これまでヒラメ筋に関するトレーニング効果は数多く報告されているが、それらはいずれも持久性に関係したものが多く、それ以外のトレーニング効果に関する報告は数少ない。

そこで本研究では、実験動物を用いて、骨格筋の重要な収縮蛋白質であるミオシン重鎖（Myosin heavy chain; MyHC）アイソフォーム構成比に着目し、ラットヒラメ筋に対する降下時の衝撃吸収動作を伴うジャンプトレーニングについての基礎的なデータを得る事を目的とした。

方 法

実験動物には、生後12ヶ月齢のFischer344系の雌ラットを用いた（日本SLC）。餌（CE-2: 日本クレア）及び飲水は自由摂取とし、昼夜逆転した12時間の明暗サイクルで室温 $22 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ の環境下で飼育した。実験群として対照群（Sedentary; S群, $N=7$ ）とジャンプ運動群（Jump; J群, $N=8$ ）の2群を設けた。J群には瞬発性運動として刺激電極板を用いたジャンプトレーニングを、高さ40cmへの跳び上がりとその高さからの落下を1日100回、週5日行った（Fig. 1）。トレーニングは1週間の予備トレーニング期間を設けた後、12ヶ月齢に達するまで8週間行った。本トレーニングでは、落下時に衝撃を吸収するためにいわゆる「踏ん張り」に近い動作を伴う。この際にラット後肢は筋力を発揮しつつ体は沈み込むため、後肢骨格筋にとってはエキセントリックな動作となる。トレーニング終了後、ラットの体重を計測、麻酔下にて頸動脈より放血し屠殺した。その後、ヒラメ筋を摘出、筋重量を測定した後ただちに液体窒素により冷却したイソペンタン中で瞬間凍結し、生化学的分析を行うまで -60°C の冷凍庫で保存した。なお飼育および屠殺でのラットの取り扱いにつ

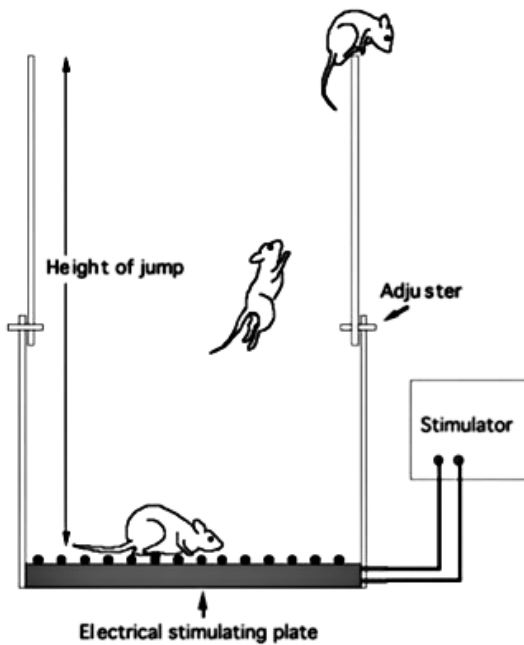


Fig. 1. Illustration of jump training

いては、「実験動物の飼養及び保管に関する基準」に沿って行った（総理府内閣総理大臣官房管理室, 1980；前島ら, 1988）。また本実験では飼育の過程において病的に死亡したラットは除外した。実験に供したラットの観察からは活動、特に自発歩行や走行などの行動に異常は認められなかった。

次に、ヒラメ筋の MyHC アイソフォーム構成比の分析を行った。保存していた筋は分析時に筋腹にて二分し、一方を MyHC アイソフォーム構成比の分析に供した。まず筋を Tsika et al. (1987) の方法に従いホモジナイズし、さらに Bar and Pette (1988) の方法により粗ミオシンを抽出した。蛋白量調整のための蛋白定量には Biuret 法を用いた (Gornall et al., 1949)。次に抽出した粗ミオシンに変性剤を添加し、56℃で10分間インキュベートし変性させた。変性粗ミオシンは、Sugiura ら

(1990) の方法に従い SDS-PAGE (KS8020型：マリソル) により MyHC アイソフォームを分離した。泳動後ゲルは銀染色（銀染色キットワコー：和光純薬）を施しタンパク質を可視化した。アイソフォームの相対的構成比の分析は、前報（辻本ら, 1994；1995a；1995b）と同様に蛋白質の泳動パターンを CCD カメラでコンピューターに取り込み、イメージデジタイザーシステム（FDM98-RGB：フォトン）を用いて画像解析により行った。

各測定値は群ごとに平均値及び標準偏差を求め統計学的な検定を行った。体重、筋重量及び相対的筋重量では、それぞれの群の比較に、Aspin - Welch 検定法を用いた。MyHC アイソフォーム相対的構成比では、2組の独立な標本に対する χ^2 検定を行った。全ての検定において有意水準は 5 % ($p < 0.05$) とした。全ての検定は、統計解析ソフト R を用いた (Ihaka and Gentleman, 1996; R Development Core Team, 2005; 山次ら, 2013)。

結 果

Table 1 にラット最終体重を平均値及び標準偏差により示した。ジャンプトレーニング期間中の体重は、S 群で漸増傾向にあり、J 群は減少傾向にあった。最終体重は両群間で有意な差はみられなかった。

Table 1 にラットヒラメ筋の筋重量および相対的な筋重量を、平均値及び標準偏差により示した。筋重量は、S 群に比べ J 群が重い傾向にあったが両群間で有意な差は認められなかった。相対的な筋重量は、S 群に比べ J 群が有意に重く、ジャンプトレーニングの効果が認められた。

Fig.2 にラットヒラメ筋の MyHC のアイソフォーム構成比を示した。12ヶ月齢のラットヒラメ筋における MyHC のアイソフォームは、両群ともに Type I と IIa から構成されていた。それらの構成

Table 1. Body weight, soleus weight and relative soleus weight in each group

	Sedentary	Jump
Body weight (g)	226 ± 18	215 ± 8
Soleus weight (mg)	77 ± 5	83 ± 6
Relative soleus weight (mg/g B.W.)	0.34 ± 0.03	0.39 ± 0.03*

Values are presented as the mean ± SD.

Statistic: * $P < 0.05$ (vs. Sedentary)

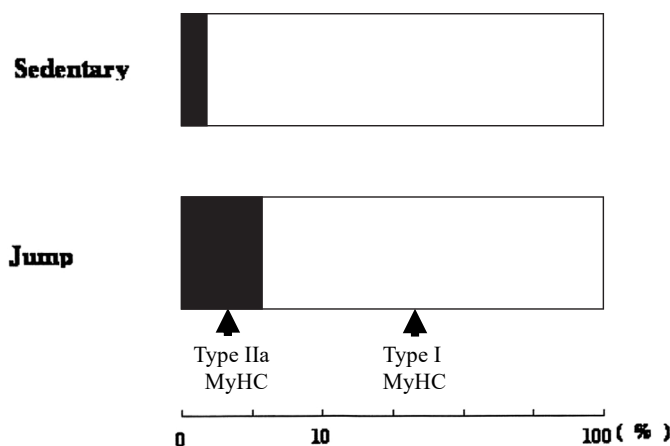


Fig. 2. Myosin heavy chain profiles of soleus muscle

比は、S群に比べJ群でType I MyHCの割合が低値を、Type IIaMyHCの割合が高値を示していた。

考 察

本研究では、衝撃吸収動作を伴うジャンプトレーニングによりヒラメ筋のMyHCアイソフォーム構成比がどのような影響を受けるかについて比較検討した。

J群の筋重量および相対的筋重量はS群に比べてそれぞれ114%，112%で、筋肥大が認められ、これはジャンプトレーニングの効果だと考えられる。これまでジャンプを用いたトレーニングでヒラメ筋重量に対する効果について、戸塚ら（1989）および山内・春日（1992）はトレーニング効果が認められなかったと報告している。一方、鈴木ら（1990）は、若齢期と老齢期のラットに対して、われわれと同様なジャンプトレーニングを課した結果、両齢期のヒラメ筋で筋重量が高値を示す傾向にあったことを報告している。また勝田（1979）は、ジャンプトレーニングにより骨格筋細胞の肥大が観察されたことをトレーニングの効果だと報告している。本研究のジャンプトレーニングは衝撃吸収動作を伴う。8週間のジャンプトレーニング期間中、ジャンプ運動後の実験動物は、跳び上がった台高と同じ高さより落下させて、次のジャンプ運動を行わせていた。梅村（1996）は、ジャンプ運動後に実験動物をどのように刺激板に置くかにより、骨に対するトレーニング効果が異なる

事を報告している。それによると、実験動物をジャンプ運動後そっと刺激板においた場合に比べ、跳び上がった台高と同じ高さより落下させた場合、後者の方が大腿骨及び脛骨の脱脂乾燥重量や最大曲げ加重が大きかったと報告している。これは、着地時に骨に対して大きな負荷がかかっていたためではないかと梅村（1996）は考察している。骨に大きな負荷がかかる局面では、骨格筋に対しても大きな負荷がかかっていることが考えられる。このことは本研究のジャンプトレーニングが、戸塚ら（1989）および山内・春日（1992）の方法とは少し異なるところである。そのため本研究と先行研究の結果に違いがみられたものと考えられる。しかし、着地時や他の着地動作においてどの程度の負荷がかかっていたのかを測定していないため詳細については不明である。

MyHC アイソフォーム構成比では、S群に比べJ群で Type IIaMyHC の割合が高値を示した。これまで持久的あるいは瞬発的なトレーニングによって、MyHC アイソフォームが速筋化したという報告は見られない。つまり MyHC アイソフォームは、デフォルトの発現は速筋タイプではあるが、骨格筋の活動量が増加すると必ず遅筋化の方向へ変化することが知られている（Baldwin and Haddad, 2001）。本研究でジャンプトレーニングにより IIa タイプの MyHC が増加したのは、落下時に衝撃を吸収するために後肢骨格筋がエキセントリックな筋収縮をしたことが原因である。骨格筋のエキセントリックな動作では筋の損傷が引き起こされることが知られている。筋損傷は、筋膜系や収縮装置の構造、神経筋の接合部などの損傷を引き起こす場合がある。また筋損傷は、筋の構造と機能維持のための細胞内情報伝達系の混乱をも引き起こす。つまり筋細胞内でのタンパク質発現系の制御が混乱をきたし、損傷がなければ必要な時に適切に分解・合成され置換される筋必須の各種タンパク質の合成が乱れることになる。タンパク質発現系の制御とは、制御の中心があるわけではなく、筋細胞の解剖学的位置によるエネルギーや糖、脂質代謝、特にタンパク代謝の状況、メカノレセプターや神経からの情報が相互作用して、いわば合議的に決定される。したがって、これらの制御がとれなくなった結果により MyHC アイソフォームの多くの種類が発現したと考えられる。Huey et al. (2001) は神経と筋の関係が切断される spinal cord isolation モデルにおいて、ラットヒラメ筋に速筋タイプを含む各種の MyHC アイソフォームが出現したことを報告している。Huey and Bodine (1998) は同様に筋と神経の関係が切断される除神経モデルにおいて各種の MyHC アイソフォームが出現したことを報告している。Bodine and Pierotti (1996) は、ラットヒラメ筋の単一筋線維において後肢骨格筋を支配する坐骨神経の損傷により各種の MyHC アイソフォームが出現したことを報告し、数種の MyHC アイソフォームが混在するハイブリッド繊維が出現したことを報告している。本研究で用いた衝撃吸収動作を伴うジャンプトレーニングでは、エキセントリックな動作による筋損傷で一時的に神経との切断が生じ、それによりタンパク発現の制御が混乱をきたした結果、各種の MyHC アイソフォームが出現したことが考えられる。しかし、一時的に出現した MyHC アイソフォームは、トレーニング時間以外の生活環境におけるヒラメ筋の活動形態から、速筋タイプのなかで比較的酸化エネルギー合成活性が盛んで、かつ通常飼育されているラットにおいても存在する IIaMyHC が淘汰されたことにより、本研究の結果となったと考えられる。ただ、この増加した IIaMyHC の構成比がこのまま維持されていくのかどうかについては、今後検討する必要がある。

以上のことから、衝撃吸収動作を伴うジャンプトレーニングにより、ラットヒラメ筋では MyHC アイソフォーム構成比の IIaMyHC が増加することが示唆された。

文 献

- 熊谷秋三・田中茂穂・岸本裕歩・内藤義彦 (2015) 三軸加速度センサー内蔵活動量計を用いた身体活動量, 座位行動の調査と身体活動疫学研究への応用. 運動疫学研究, 17 (2): 90-103. <https://doi.org/10.24804/ree.17.90>
- Aniansson, A., Zetterberg, C., Hedberg, M., and Henriksson, K.G. (1984) Impaired muscle function with aging. A background factor in the incidence of fractures of the proximal end of the femur. Clin. Orthop. Relat. Res., 191: 193-201.
- Lord, S.R., Ward J.A., Williams, P., and Anstey, K.J. (1994) Physiological factors associated with falls in older community-dwelling women. J. Am. Geriatr. Soc., 42 (10): 1110-7. <https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.1994.tb06218.x>.
- 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 (2): 311-7. <https://doi.org/10.7600/jspfsml949.45.311>
- 梅村義久・長澤省吾・本田亜紀子 (2001) 1 回および 2 回のジャンプトレーニングがラットの骨量・強度に及ぼす影響. 中京大学体育研究所紀要, 15: 47-9. <https://iss.ndl.go.jp/books/R100000002-I000000050490-00>
- 梅村義久・本田亜紀子・王 国棟・十河直太 (2015) ジャンプトレーニングと高リン食がラットの血清 FGF23 に及ぼす影響. 中京大学体育研究所紀要, 29: 33-6. <https://iss.ndl.go.jp/books/R100000002-I000000050490-00>
- 本田亜紀子・水野貴正・王 国棟・原田健次・瀧本未来・梅村義久 (2013) トレーニングがラットの血清 FGF23 濃度に及ぼす影響—ジャンプトレーニングを用いて—. 中京大学体育研究所紀要, 27: 51-4. <https://iss.ndl.go.jp/books/R100000002-I000000050490-00>
- 幸 篤武・與谷謙吾・石道峰典・田巻弘之・春日規克 (2012) 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. 日本運動生理学雑誌, 19 (2): 65-73. <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009479353>
- 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 (2): 133-40. <https://doi.org/10.5432/jjpehss.KJ00003391696>
- 山内秀樹・春日規克 (1992) ジャンプおよびアイソメトリックトレーニングにともなう骨格筋の機能変化: 筋線維組成との関連性. 体育学研究, 37 (1): 87-95. <https://doi.org/10.5432/jjpehss.KJ00003391856>
- Ramírez-Campillo, R., Castillo, A., de la Fuente, C.I., Campos-Jara, C., Andrade, D.C., Álvarez, C., Martínez, C., Castro-Sepúlveda, M., Pereira, A., Marques, M.C., and Izquierdo, M. (2014) High-speed resistance training is more effective than low-speed resistance training to increase functional capacity and muscle performance in older women. Exp. Gerontol., Oct; 58: 51-7. doi: 10.1016/j.exger.2014.07.001
- Pereira, A., Izquierdo, M., Silva, A.J., Costa, A.M., Bastos, E., González-Badillo, J.J., and Marques, M.C. (2012) Effects of high-speed power training on functional capacity and muscle performance in older women. Exp. Gerontol., Mar; 47 (3): 250-5. doi: 10.1016/j.exger.2011.12.010.
- Piirainen, J.M., Cronin, N.J., Avela, J., and Linnamo, V. (2014) Effects of plyometric and pneumatic explosive strength training on neuromuscular function and dynamic balance control in 60-70year old males. J. Electromyogr. Kinesiol., 24 (2): 246-52. doi: 10.1016/j.jelekin.2014.01.010.
- Correa, C.S., LaRoche, D.P., Cadore, E.L., Reischak-Oliveira, A., Bottaro, M., Kruehl, L.F., Tartaruga, M.P., Radaelli, R., Wilhelm, E.N., Lacerda, F.C., Gaya, A.R., and Pinto, R.S. (2012) 3 Different types of strength training in older women. Int. J. Sports Med., Dec; 33 (12): 962-9. doi: 10.1055/s-0032-1312648.
- 湯浅景元・島野敬一郎・藤松 博 (1999) 日常生活動作およびスポーツ基本動作の骨格筋活動レベル. 中京大学体育学論叢, 40 (2): 1-8.
- Tschopp, M., Sattelmayer, M.K., and Hilfiker, R. (2011) Is power training or conventional resistance training better for function in elderly persons? A meta-analysis. Age Ageing. 40 (5): 549-56. doi: 10.1093/ageing/afr005.
- 勝田 茂 (1979) ジャンプ・トレーニングがラット骨格筋線維におよぼす影響の組織化学的研究. 健康科学, 1: 27-33.
- 戸塚 学・安部 孝・広田公一 (1988) ハイ・パワー・トレーニングがラットの骨格筋線維におよぼす影響. 第

- 9 回日本バイオメカニクス学会大会論集, 80-4.
- 安部 孝・浅見俊雄 (1989) ジャンプ・トレーニングがラットのコレステロール代謝に及ぼす影響. 東京大学教養学部体育学紀要, 22 (3) : 23-30.
- 総理府内閣総理大臣官房管理室 (1980) 実験動物飼育保管研究 実験動物飼育及び保管等に関する基準の解説. 1 版. 東京: ぎょうせい.
- 前島一淑・江崎孝三郎・篠田元扶・山内忠平・光岡知足・菅野 茂・辻 茂・土井邦雄 (1988) 新実験動物学. 1 版. 東京: 朝倉書店.
- Tsika, R.W., Herrick, R.E., and Baldwin, K.M. (1987) Interaction of compensatory overload and hindlimb suspension on myosin isoform expression. *J. Appl. Physiol.*, 62 (6): 2180-6.
- Bär, A., and Pette, D. (1988) Three fast myosin heavy chains in adult rat skeletal muscle. *FEBS Lett.* 235 (1-2): 153-5.
- Gornall, A.G., Bardawill, C.J., and David, M.M. (1949) Determination of serum proteins by means of the biuret method. *J. Biol. Chem.*, 177: 751-6.
- Sugiura, T., Morimoto, A., Sakata, Y., Watanabe, T., and Murakami, N. (1990) Myosin heavy chain isoform changes in rat diaphragm are induced by endurance training. *Jpn. J. Physiol.*, 40 (5): 759-63.
- 辻本尚弥・鈴木英樹・春日規克 (1994) 走及びジャンプトレーニングの前脛骨筋に対する効果. 名古屋経済大学・市屯学園短期大学 自然科学研究会会誌, 29 (1) : 5-18.
- 辻本尚弥・鈴木英樹・春日規克・石河利寛 (1995a) 走及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. DOI <https://doi.org/10.7600/jspfsml1949.44.97>
- 辻本尚弥・鈴木英樹・春日規克 (1995b) 高齢期ラット下肢骨格筋における走及びジャンプトレーニングの効果. 名古屋経済大学・市屯学園短期大学 自然科学研究会会誌, 30 (1) : 9-21.
- Ihaka, R., and Gentleman, R. (1996) R: a language for data analysis and graphics. *J. Comp. Graph. Stat.*, 5: 299-314. <http://www.R-project.org>.
- R Development Core Team (2005) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- 山次俊介・鈴木宏哉・高橋信二・出村慎一 (2013) 健康・スポーツ科学のための R による統計解析入門 1 版. 東京: 杏林書院.
- 鈴木英樹・辻本尚弥・春日規克・石河利寛 (1990) 瞬発性トレーニングがラットのヒラメ筋に及ぼす影響—異なる週齢での比較—. *日本体育学会 第41回大会号*, p 301. doi https://doi.org/10.20693/jspeconf.41A.0_301
- 梅村義久 (1996) ジャンプの着地衝撃がラットの骨に及ぼす影響. *中京大学体育論叢*, 38 (1) : 79-83.
- Baldwin, K.M., and Haddad, F. (2001) Effects of different activity and inactivity paradigms on myosin heavy chain gene expression in striated muscle. *J. Appl. Physiol.*, 90 (1): 345-57. doi: 10.1152/jappl.2001.90.1.345.
- Huey, K. A., Roy R., Baldwin, K. M., and Edgerton, V. R. (2001) Temporal effects of inactivity on myosin heavy chain gene expression in rat slow muscle. *Muscle Nerve*. Apr; 24 (4): 517-26. doi: 10.1002/mus.1035.
- Huey, K. A. and Bodine, S. C. (1998) Changes in myosin mRNA and protein expression in denervated rat soleus and tibialis anterior. *Eur. J. Biochem.* Aug 15; 256 (1): 45-50. doi: 10.1046/j.1432-1327.1998.2560045.x.
- Bodine, S. C. and Pierotti, D. J. (1996) Myosin heavy chain mRNA and protein expression in single fibers of the rat soleus following reinnervation. *Neurosci. Lett.* Aug 30; 215 (1): 13-6. doi: 10.1016/s0304-3940(96)12926-8

(2022.1.13. 受付 2022.2.15. 受理)