

総説

アスリートの効率的な筋量増加にむけた運動と栄養摂取

藤田 聡

立命館大学スポーツ健康科学部

骨格筋はアスリートの筋パワー発揮に欠かせない臓器である。スポーツ競技におけるパフォーマンスを最大に高めるためにも、スキル練習と組み合わせたフィジカルトレーニングをつうじて、筋量を効率的に維持・増加させる方策は重要である。栄養摂取、特にたんぱく質は筋たんぱく質の合成を摂取後1～2時間以内に増加させる。このたんぱく質摂取に伴う筋たんぱく質の同化作用は主に必須アミノ酸のロイシンによって引き起こされており、血中ロイシン濃度の増加に伴い、筋たんぱく質の合成速度も増加する。レジスタンス運動（筋トレ）も筋たんぱく質の合成速度を急激に増加させる介入手段である。レジスタンス運動に伴う筋たんぱく質合成速度の増加は主に力積（トレーニング時の総合的な負荷量）に依存して増加することが報告されている。つまり低強度の負荷重量で疲労困憊まで繰り返し挙上することで力積を増加させれば、高強度運動と同様の筋肥大を獲得することが可能である。レジスタンス運動と組みあわせる際のたんぱく質摂取においては、3つの注意点が挙げられる。1)たんぱく質の摂取タイミングについては、レジスタンス運動実施直後の摂取が最も効果的だが、運動実施から24時間後でも、有意な相乗効果は認められる。2)運動後のたんぱく質の摂取量については、筋たんぱく質の合成速度に対して量依存的な効果が認められるが、若年者では一回の摂取で約20～25gの良質なたんぱく質の摂取で運動との相乗効果が最大となる。3)レジスタンス運動と組みあわせる際のたんぱく質摂取については、同じたんぱく質の含有量であってもその質（ロイシン含有量や消化吸收の違い）によって、運動後のたんぱく質合成速度が異なる。よって、効率的な筋肥大を目的とする運動と栄養摂取の組み合わせを検討する場合には、食事に含まれるたんぱく質の“質”も意識すべきである。

キーワード：レジスタンス運動 骨格筋 たんぱく質 筋たんぱく質代謝 必須アミノ酸

I はじめに

スピードやパワーが求められるスポーツ競技において、骨格筋量の維持・増加は最大筋力の発揮に欠かすことができない。競技ごとに求められる適切な身体組成は異なるが、スキル練習と組みあわせて限られた時間の中で効率的なフィジカルトレーニングを通じた筋量増加が求められる場合、トレーニングメニューの精査のみならず、適切な栄養摂取との組み合わせが重要となる。

一般成人において、筋量は異化作用（空腹時、疾患、ストレスなど）と同化作用（栄養摂取、筋収縮など）の微細なバランスによって一定に保たれている。筋たんぱく質合成と分解の差（出納バランス）がプラスの状態、つまり筋たんぱく質の合成速度が分解速度を上回った場合のみ筋量の増加が可能となり、逆にたんぱ

く質分解速度が合成速度を上回る時間帯が長くなると異化作用が亢進し筋量が減少する。空腹時において筋たんぱく質の出納バランスはマイナスであり、通常食事摂取によってのみ出納バランスがプラスに移行する。その結果、空腹時に失われた筋たんぱく質が食事で補われることで、24時間の出納バランスがプラスマイナスゼロとなり、筋量が維持される（図1）。食事摂取基準で示されているたんぱく質摂取量は体たんぱく質を維持するために必要なたんぱく質摂取量を示している。よって活動量の高いアスリートはエネルギー消費増加に伴いアミノ酸の酸化や筋たんぱく質分解も高まるため、筋たんぱく質の出納バランスをプラスに保つためにも、より多くのたんぱく質が必要となる¹⁾。

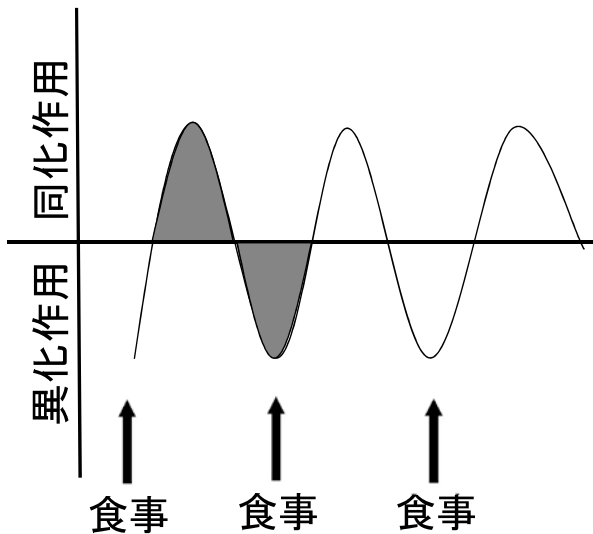


図1 健康な成人における筋たんぱく質の出納バランス
筋たんぱく質の合成速度が分解速度を上回る場合（食後など）は同化作用が促進し、筋たんぱく質分解速度が合成速度を上回る場合（空腹時など）は異化作用が高まる。

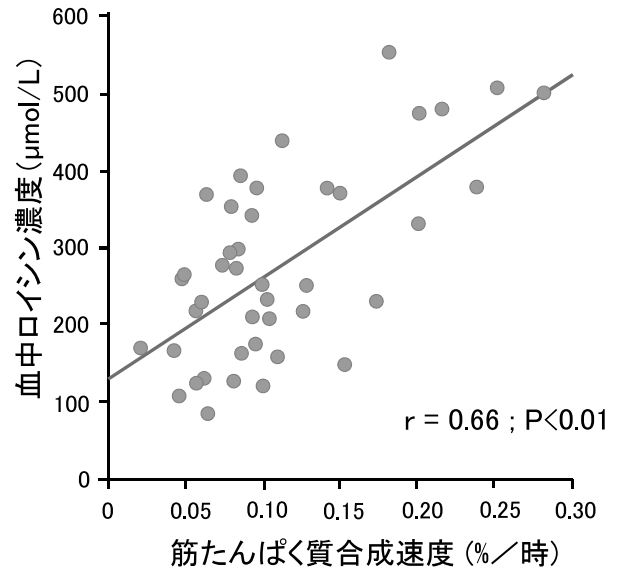


図3 血中ロイシン濃度と筋たんぱく質の合成速度との関係

文献（4）より改変

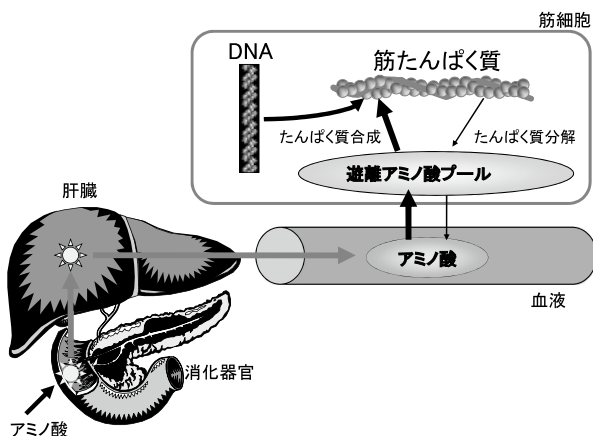


図2 たんぱく質およびアミノ酸の消化吸収と筋たんぱく質合成への利用

Ⅱ 栄養摂取による筋たんぱく質の合成

食事を摂取すると、摂取後1～2時間で筋たんぱく質の合成速度は安静時と比較して約2倍に増加する。この食事による同化作用は主にたんぱく質によるものである。食事に含まれるたんぱく質は、消化・吸収後にアミノ酸として血中に取り込まれ、筋に運び込まれる。血液から筋細胞内に輸送されたアミノ酸は、いったん遊離アミノ酸プールに取り込まれ、必要とされる際にそこから筋たんぱく質の合成に利用される（図2）。このアミノ酸摂取による筋たんぱく質の合成刺激には用量依存効果がある。たんぱく質やアミノ酸摂

取に伴う血中アミノ酸濃度は摂取量に比例して高値を示す。血中アミノ酸濃度の増加は筋細胞へのアミノ酸輸送を増加させ、筋細胞内の遊離アミノ酸濃度を高めることによって筋たんぱく質の合成を刺激し、同化作用が促される。このアミノ酸による筋たんぱく質の同化作用は主に必須アミノ酸によるものであり、中でも分岐鎖アミノ酸のロイシンが筋細胞内の分子複合体であるmTORC1（mammalian target of rapamycin complex 1）シグナル経路を活性化させることで、栄養摂取時の筋たんぱく質の合成速度を制御していることが確認されている^{2), 3)}。すなわち、栄養摂取によって血液中のロイシン濃度を増加させることができれば、濃度依存的に筋たんぱく質の合成速度を増加させることが可能となる（図3）⁴⁾。さらに、Mooreらは一度の摂取で筋たんぱく質の合成速度を最大限に高めるために必要なたんぱく質摂取量を検討するために、若年者65名を対象とした研究のデータを解析した。その結果、安静時におけるたんぱく質摂取で筋たんぱく質合成速度が最大値となるのは体重あたり平均して約0.24gのたんぱく質であると報告している（図4）⁵⁾。この研究結果は後述する運動との組み合わせによる実験とは異なり、運動をしていない安静状態かつ空腹時でのたんぱく質（ホエイプロテイン）摂取による応答を評価している。

Ⅲ レジスタンス運動による筋たんぱく質の代謝応答

レジスタンス運動（筋トレ）は骨格筋のたんぱく質

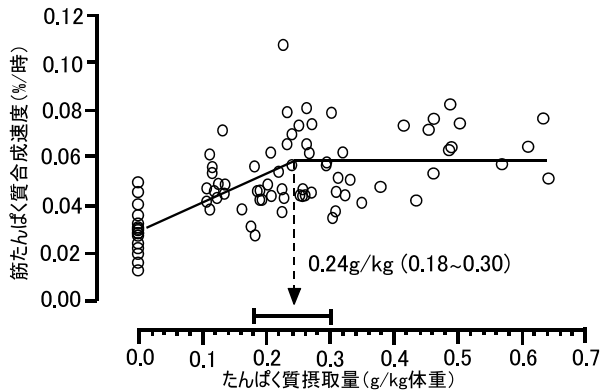


図4 単回のたんぱく質摂取に伴う筋たんぱく質合成速度の応答

文献(5)より改変

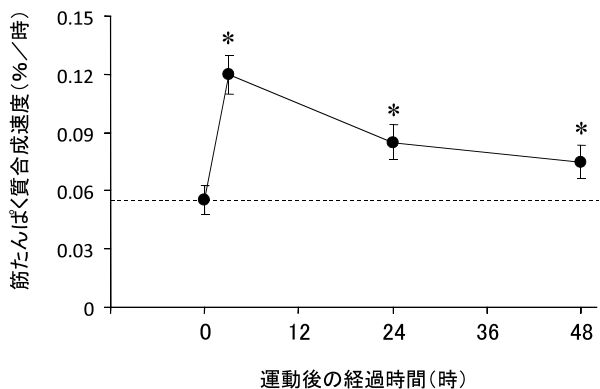


図5 単回のレジスタンス運動後におけるたんぱく質合成速度の変化

*安静時と比べて有意差 ($P < 0.01$)

文献(7)より改変

合成を刺激する重要な因子である。レジスタンス運動を行うと、前述したmTORC1が活性化され、運動後1時間から2時間後には筋たんぱく質の合成速度が安静時と比較して有意に増加する⁶⁾。この1回のレジスタンス運動による筋たんぱく質合成の増加は運動後の約24~48時間は維持されることが示されている(図5)⁷⁾。このレジスタンス運動によるたんぱく質合成速度は低~中強度(最大に挙上できる重量の60%以下を運動の強度とした場合)においては運動強度に依存して増加し、最大挙上重量の60~90%の域においてはほぼ一定となることから、一般的に低強度よりも高強度のレジスタンス運動がより効果的であると認識されていた⁸⁾。しかし、近年の研究で、運動時の力積(各トレーニングセッションにおける総合的な負荷量。例えば、50kgの重量を10回挙上した場合は、力積は $50 \times 10 = 500\text{kg}$)が、運動後の筋たんぱく質合成に最も強く影響することが明らかとなった。運動強度と力積に

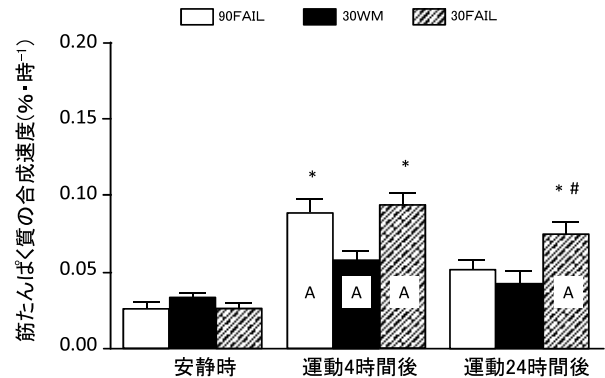


図6 異なる力積のレジスタンス運動を実施した際の筋タンパク質合成速度の応答

*同じ時間帯における30WMと有意差 ($P < 0.05$)、#同じ時間帯における90%FAILと有意差 ($P < 0.05$)、図中の“A”は安静時との有意差を示す ($P < 0.05$)

90%FAIL: 90% 1-RM強度で疲労困憊まで連続して挙上、30WM: 30% 1-RM強度で力積を90%FAILと同じになるように挙上回数を調整、30%FAIL: 30% 1-RM強度にて疲労困憊まで連続して挙上

文献(9)より改変

よる効果を検討した研究では、最大挙上重量の30%(30% 1-RM; 低強度だが高回数の挙上が可能となる運動強度)と90% 1-RM(高強度だが低回数しか挙上できない運動強度)でのレジスタンス運動後の筋たんぱく質の合成速度を比較した結果、30% 1-RMで疲労困憊まで運動を実施した条件(1セットにおける力積は約1,073kg)では90% 1-RM条件(1セットにおける力積は約710kg)よりも運動24時間後における筋たんぱく質の合成速度がより高かった(図6)⁹⁾。したがって、レジスタンス運動による筋たんぱく質合成速度の増大には運動強度が決定要因ではなく、むしろ比較的に低強度の負荷(30% 1 RM程度)で疲労困憊まで行うことで、トレーニングセッションにおける力積をできる限り増加させることが重要である。またレジスタンス運動を長期的に繰り返す10~12週間のトレーニング介入においても前述した運動要因(力積)が筋肥大には重要であることが示されており^{10), 11)}、低強度の運動負荷であっても、疲労困憊まで各セットの運動を実施することで、高強度と同様の筋肥大を獲得することが可能である。

Ⅳ 運動とたんぱく質摂取の組み合わせにおける注意点

たんぱく質やアミノ酸などの栄養摂取による筋たん

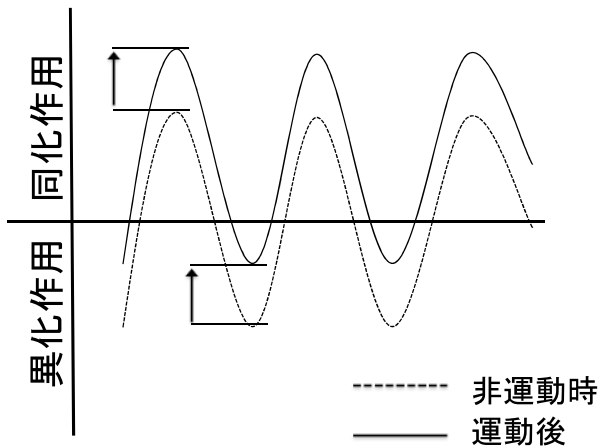


図7 単回のレジスタンス運動の前後におけるたんぱく質の出納バランスの変化
非運動時と比較して、レジスタンス運動実施後は24時間における出納バランスがよりプラスの方向に移行する。

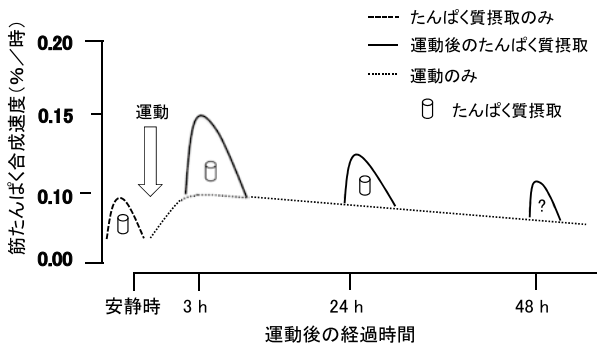


図8 単回のレジスタンス運動後におけるたんぱく質摂取が筋たんぱく質の合成速度に及ぼす影響
文献 (13) より改変

ばく質の同化作用は数時間しか持続しない。それに対して、前述のとおりレジスタンス運動に伴うたんぱく質の合成速度の増加は若年者においては運動後48時間程度まで持続する。レジスタンス運動の実施は、24時間の出納バランス（食事摂取により出納バランスがプラスに移行する時間帯を含む）をよりプラスの方向に移行させる（図7）。このようなレジスタンス運動がトレーニングとして長期にわたって続けられ、適切なたんぱく質摂取と組合わさった場合には、より効率的な骨格筋量の増加につながるが、システマティックレビューにおいて報告されている¹²⁾。以下に、レジスタンス運動と組みあわせる際のたんぱく質摂取に関する留意点を挙げる。

1. 摂取タイミング

たんぱく質（ホエイプロテイン）摂取のタイミングに関しては、運動実施直後が最も相乗効果が高く、運

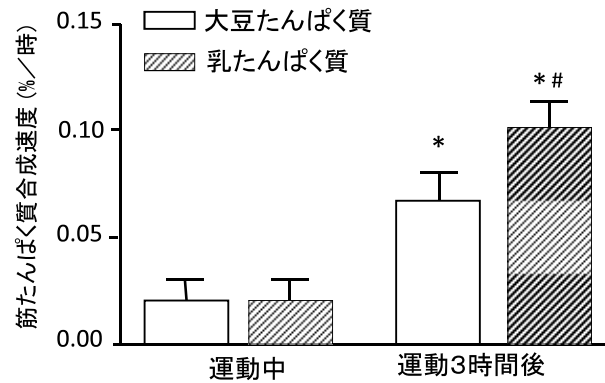


図9 レジスタンス運動後の異なるたんぱく質摂取が筋たんぱく質の合成速度に及ぼす影響
*運動中と比べて有意差 ($P<0.05$)、# 群間で有意差 ($P<0.05$)
文献 (15) より改変

動実施から時間が経過すると同化作用は低下することが報告されている（図8）¹³⁾。これはレジスタンス運動実施に伴うたんぱく質の合成速度が運動直後に最も高いことに起因しているが、運動24時間後においてもたんぱく質摂取による相乗効果は維持されている¹⁴⁾。以上のことから、レジスタンス運動による筋たんぱく質の同化作用を最大限に引き出すためには、運動のセッションとたんぱく質摂取をセットとして考えることを基本としながら、食事によるたんぱく質摂取量を踏まえて1日のたんぱく質摂取量を総合的に検討すべきである。

2. 異なるたんぱく質源の影響

これまで複数の研究で異なるたんぱく質（ホエイやカゼインなどの乳たんぱく質、大豆たんぱく、卵白、牛肉など）をレジスタンス運動後に摂取することで、筋たんぱく質の合成速度を運動実施のみと比較して有意に向上させることが報告されている。しかし、たんぱく質の摂取量が同じであっても、たんぱく質の種類によって運動後の同化応答は異なる。

例えば乳たんぱく質は大豆たんぱく質と比較して運動後の筋たんぱく質合成速度が有意に高くなる（図9）¹⁵⁾。これは同量のたんぱく質に含まれているロイシンの含有量が異なる、あるいはたんぱく質の種類によってその消化吸収速度や吸収率に差異が生じることが原因と考えられる。乳たんぱく質は大豆たんぱく質と比較してロイシン含有量が高い。上記の研究において、乳たんぱく質と大豆たんぱく質のエネルギー量とたんぱく質量は同じだったが、血中ロイシン濃度は乳たんぱく質の方が大豆たんぱく質より約17%高くなり、運動後に摂取した場合の筋たんぱく質の合成速度も、乳たんぱく質摂取がより高い値を示した。よって、効率的に運動後のたんぱく質の合成速度を増加さ

せるためには、摂取するたんぱく質の“質”を意識することが重要である。

また、同じ乳由来のホエイとカゼインを比較すると、ホエイはその酸性の特性から胃からの排出速度が早いため、速やかに吸収される。これに対して、カゼインは胃酸により凝固・沈殿するため、胃からの排出が緩やかとなる。その結果、血中ロイシン酸濃度の最大値もホエイと比較してカゼインが低くなる。同量のホエイとカゼイン摂取を比較・検討した研究において、ホエイ摂取後の安静時および運動後の筋たんぱく質の合成速度がカゼインと比較して有意に高くなることが示されている⁴⁾。以上のことから、食事あるいはサプリメントとしてたんぱく質を摂取する際には、消化吸収の違いによる影響も考慮すべきである。

3. 運動後のたんぱく質摂取量

前述したとおり、血中および筋細胞内のロイシン濃度の増加は、濃度依存的に筋たんぱく質合成速度を亢進することから、たんぱく質摂取による筋たんぱく質の合成速度の増加にも容量依存効果がある。異なるたんぱく質源を用いた研究では、運動後の筋たんぱく質の合成速度はたんぱく質の摂取量に依存して増加し、およそ20~25gの良質なたんぱく質摂取（乳たんぱく質や卵たんぱく質など、ロイシン含有量として2~3g）で、筋たんぱく質の合成速度が最大値に達することが報告されている^{16), 17)}。一般的に市販されているホエイなどのプロテインの摂取量も一回の摂取で20~25gが推奨されているようだが、これらの推奨値は70~80kg体重の若年男性を対象に、下肢筋群の運動に焦点を当てた介入研究に基づいており、競技種目の異なる小柄な長距離選手や、体重が100kgを超えるボディビルダーでは効率的に筋量を増加させるたんぱく質量は異なると考えられる。

V おわりに

近年の調査研究によって、筋肥大を目的としたより効率的かつ効果的なレジスタンス運動のプログラムが明確になってきた。限られた練習時間の中でスキル練習とフィジカルトレーニングの実施が求められるアスリートにおいて、トレーニング効果を最大限に引き上げる栄養摂取はトレーニングと同様に重要である。筋たんぱく質の代謝の観点からは、特にロイシン濃度の上昇を目的としたたんぱく質・アミノ酸の摂取が重要であることから、特にプロテインは筋肥大を目指すアスリートの間で当たり前のように摂取されている。しかし、24時間のたんぱく質代謝を総合的に観察すると、1日3食の食事に含まれるたんぱく質も考慮した上で、トレーニングの時間帯だけでなく、試合期・オフ期のトレーニング目標に適したたんぱく質摂取の検

討が求められる。

利益相反

本研究内容に関して利益相反は存在しない。

文 献

- 1) Rodriguez, N.R., Di Marco, N.M., Langley, S.: American College of Sports Medicine position stand. Nutrition and athletic performance. *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 41:709-731 (2009)
- 2) Anthony, T.G., Anthony, J.C., Yoshizawa, F., et al: Oral administration of leucine stimulates ribosomal protein mRNA translation but not global rates of protein synthesis in the liver of rats. *J. Nutr.*, 131:1171-1176 (2001)
- 3) Fujita, S., Dreyer, H.C., Drummond, M.J., et al: Nutrient signalling in the regulation of human muscle protein synthesis. *J. Physiol.*, 582:813-823 (2007)
- 4) Pennings, B., Boirie, Y., Senden, J.M., et al: Whey protein stimulates postprandial muscle protein accretion more effectively than do casein and casein hydrolysate in older men. *Am. J. Clin. Nutr.*, 93:997-1005 (2011)
- 5) Moore, D.R., Churchward-Venne, T.A., Witard, O., et al: Protein ingestion to stimulate myofibrillar protein synthesis requires greater relative protein intakes in healthy older versus younger men. *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.*, 70:57-62 (2015)
- 6) Dreyer, H.C., Fujita, S., Cadenas, J.G., et al: Resistance exercise increases AMPK activity and reduces 4E-BP1 phosphorylation and protein synthesis in human skeletal muscle. *J. Physiol.*, 576:613-624 (2006)
- 7) Phillips, S.M., Tipton, K.D., Aarsland, A., et al: Mixed muscle protein synthesis and breakdown after resistance exercise in humans. *American Journal of Physiology*, 273:E99-107 (1997)
- 8) Kumar, V., Selby, A., Rankin, D., et al: Age-related differences in the dose-response relationship of muscle protein synthesis to resistance exercise in young and old men. *J. Physiol.*, 587:211-217 (2009)
- 9) Burd, N.A., Holwerda, A.M., Selby, K.C., et al: Resistance exercise volume affects myofibrillar protein synthesis and anabolic signalling molecule phosphorylation in young men. *J. Physiol.*, 588:3119-3130 (2010)
- 10) Mitchell, C.J., Churchward-Venne, T.A., West, D.W., et al: Resistance exercise load does not determine training-mediated hypertrophic gains in young men. *J. Appl. Physiol.*, 113:71-77 (2012)
- 11) Morton, R.W., Oikawa, S.Y., Wavell, C.G., et al: Neither load nor systemic hormones determine resis-

- tance training-mediated hypertrophy or strength gains in resistance-trained young men. *J. Appl. Physiol.*, (1985) 121:129-138 (2016)
- 12) Cermak, N.M., Res, P.T., de Groot, L.C., et al.: Protein supplementation augments the adaptive response of skeletal muscle to resistance-type exercise training: a meta-analysis. *Am. J. Clin. Nutr.*, 96:1454-1464 (2012)
 - 13) Churchward-Venne, T.A., Burd, N.A., Phillips, S.M.: Nutritional regulation of muscle protein synthesis with resistance exercise: strategies to enhance anabolism. *Nutr. Metab (Lond)*, 9:40 (2012)
 - 14) Burd, N.A., West, D.W., Moore, D.R., et al.: Enhanced amino acid sensitivity of myofibrillar protein synthesis persists for up to 24 h after resistance exercise in young men. *J. Nutr.*, 141:568-573 (2011)
 - 15) Wilkinson, S.B., Tarnopolsky, M.A., Macdonald, M.J., et al.: Consumption of fluid skim milk promotes greater muscle protein accretion after resistance exercise than does consumption of an isonitrogenous and isoenergetic soy-protein beverage. *Am. J. Clin. Nutr.*, 85:1031-1040 (2007)
 - 16) Moore, D.R., Robinson, M.J., Fry, J.L., et al.: Ingested protein dose response of muscle and albumin protein synthesis after resistance exercise in young men. *Am. J. Clin. Nutr.*, 89:161-168 (2009)
 - 17) Phillips, S.M., Van Loon, L.J.: Dietary protein for athletes: from requirements to optimum adaptation. *J. Sports. Sci.*, 29 Suppl 1:S29-38 (2011)

Review

Effective exercise and nutritional strategy to increase muscle mass for athletes

Satoshi FUJITA

Faculty of Sport and Health Science, Ritsumeikan University

ABSTRACT

Skeletal muscle is a critical organ for generating force. To increase muscle mass effectively and to maximize performance, the combination of resistance exercises with skill training is important. Nutritional intake, especially protein, stimulates muscle protein synthesis within 1 to 2 hours. This anabolic response is induced mainly by leucine, which is an essential amino acid. An increase in the blood leucine concentration leads to muscle protein synthesis. Resistance exercise is another intervention that acutely increases muscle protein synthesis. Resistance exercise-induced augmentation in muscle anabolism depends on the force-time integral (load $\times$ contraction time). Therefore, low-intensity resistance training with a high number of repetitions until failure can induce as much muscle hypertrophy as that achieved using high-intensity exercise. There should be three considerations in respect to protein intake with resistance exercise: 1) the additive effect of protein intake is most prominent when provided immediately after exercise, but protein intake for up to 24 hours after exercise can still induce a significant additive anabolic effect, 2) the dose-response relationship of protein intake reaches a plateau with 20 to 25 g of high-quality protein, and 3) the quality of protein (i.e., the leucine content as well as the absorption of the protein) can affect post-exercise muscle protein synthesis significantly.

Keywords: resistance exercise, skeletal muscle, protein, muscle protein metabolism, essential amino acids