©NSCA JAPAN
Volume 27, Number 10, pages 11-15

筋肉量の増加に向けた効果的なレジスタンス運動とたんぱく質摂取

藤田 聡 Ph.D., CSCS, 立命館大学スポーツ健康科学部 教授

1. はじめに

スポーツ競技、特にスピードやパワーが求められる種目において、骨格筋量の維持・増加は最大のパフォーマンス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ものの、限られた時間のなかで効率的な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、トレーニング効果を最大限に高める食事摂取も重要となる。

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**)。日本人の食事摂取基準で示されているたんぱく質摂取量は全身すべての体たんぱく質を維持するために必要な健常者の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などの消費量も高まるため、骨格筋量を維持するためにも、より多くのたんぱく質が必要となる(16)。また、近年の研究で、1日の総摂取量が充足していても、3食それぞれの食事において、十分なたんぱく質が摂取できていない場合、筋量の低下やトレーニングによる筋肥大の抑制に繋がる可能性が報告されている。

本稿では、栄養とレジスタンス運動が筋たんぱく質の代謝に及ぼす影響について詳細し、トレーニングに伴う筋肥大を最大限に高めるためのたんぱく質摂取について議論する。

2. 食事摂取に伴う骨格筋内でのたんぱく質代謝の調節

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。この食事によるたんぱく同化作用は主にたんぱく質摂取に伴うものである。食事に含まれるたんぱく質は、消化・吸収後にアミノ酸(あるいはペプチド)として血中に取り込まれ、骨格筋に運び込まれる。血液から筋細胞内に輸送されたアミノ酸は、一旦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より高め、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、そのなか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、たんぱく質摂取時における筋たんぱく質の合成速度を制御することが報告されている(1,7)。すなわち、栄養摂取によって血液中のロイシ

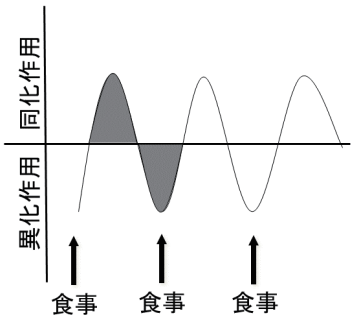

図1　健常な成人における筋たんぱく質の出納バランス

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**)(14)。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、体重当たり平均して約0.24 gのたんぱく質であると報告している(**図4**)(11)。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(ホエイたんぱく質を含む動物性たんぱく質)摂取による応答を評価している。なお、上記の研究において、高齢者を対象としたデータを分析した結果、筋たんぱく質の合成を最大に高めるために体重当たり約0.4 gのたんぱく質が必要であることが示されている。この結果は、加齢に伴い筋合成を最大限に高めるために必要なたんぱく質の必要量が増加することを示唆している。

3. レジスタンス運動の実施に伴う筋たんぱく質の代謝応答

レジスタンス運動は骨格筋のたんぱく質合成を刺激する重要な因子であり、日常生活において唯一、顕著な筋肥大を引き起こすことが可能な運動介入である。レジスタンス運動を行なうと、前述したmTORC1が活性化され、運動後1～2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合成速度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**)(15)。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%の域においてほぼ一定となることから、一般的に低

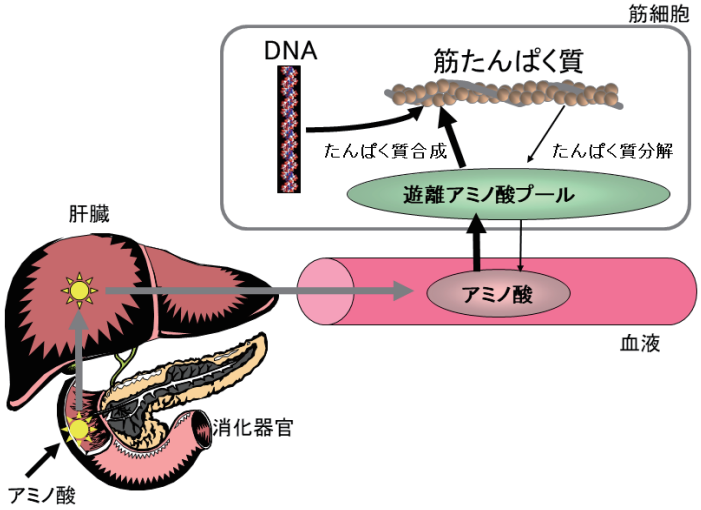

図2　たんぱく質およびアミノ酸の消化吸収と筋たんぱく質合成への利用

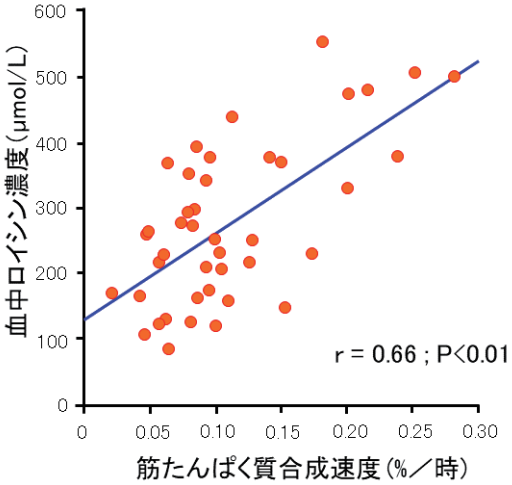

図3　血中ロイシン濃度と筋たんぱく質の合成速度との関係　(14)より改変

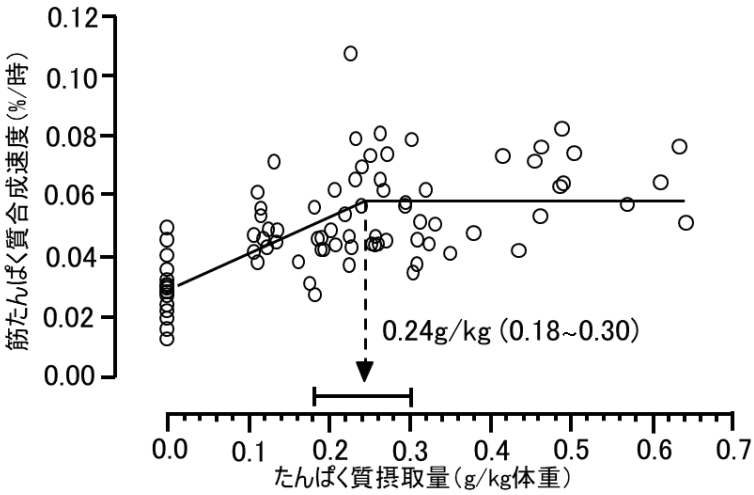

図4　単回のたんぱく質摂取に伴う筋たんぱく質合成速度の応答　(11)より改変

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(9)。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、50 kgの重量を10回挙上した場合は、力積は50×10＝500 kg)が、運動後の筋たんぱく質合成に最も強く影響する要因であることが明らかとなった。運動強度と力積によるトレーニング効果を検討した研究において、最大挙上重量の30％(30％1RM：低強度だが高回数の挙上が可能となる運動強度)と90％1RM(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における筋たんぱく質の合成速度を比較した結果、30％1RM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1,073 kg)では90％1RM条件(1セットにおける力積は約710 kg)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**)(2)。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、むしろ比較的低強度の負荷(～30％1RM)で疲労困憊まで行なうことで、トレーニングセッションにおける力積をできるかぎ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8～12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(8,10,13)、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。

4. 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ぱく質の同化作用は数時間しか持続せず、長期的にも健常な成人の筋量を栄養摂取のみで増加させることは難しい。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24～48時間程度まで持続する。レジスタンス運動の実施は、運動後24時間におけるたんぱく質の出納バランス(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継続的に実施され、適切なたんぱく質摂取と組み合わさった場合には、より効率的な骨格筋量の増加に繋がることが、システマティックレビューにおいて報告されている(4,12)。以下に、レジスタンス運動と組み合わせる際のたんぱく質摂取に関する留意点を挙げる。

たんぱく質摂取のタイミング

レジスタンス運動を実施する際におけるたんぱく質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(5)(**図8**)。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(3)。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、運動

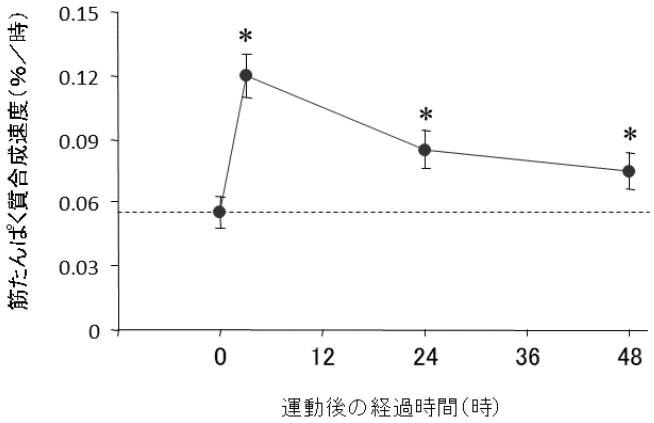

図5　単回のレジスタンス運動後におけるたんぱく質合成速度の変化　(15)より改変
＊安静時と比べて有意差(P<0.01)

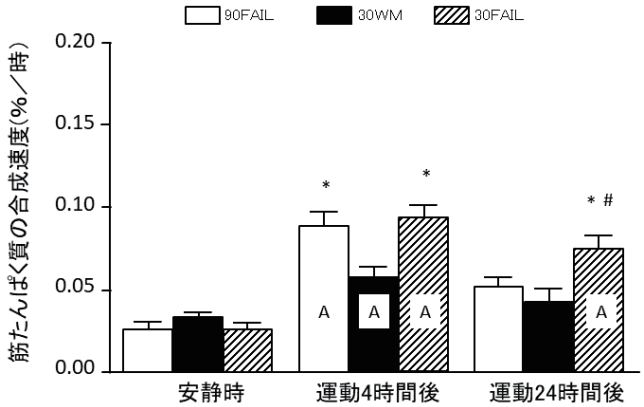

図6　異なる力積のレジスタンス運動を実施した際の筋タンパク質合成速度の応答　(2)より改変
*同じ時間帯における30 WMと有意差(P<0.05)、#同じ時間帯における90 FAILと有意差(P<0.05)、図中の“A”は安静時との有意差を示す(P<0.05)、90 FAIL：90％1 RM強度で疲労困憊まで連続して挙上、30 WM：30％1 RM強度で力積を90％FAILと同じになるように挙上回数を調整、30 FAIL：30％1 RM強度にて疲労困憊まで連続して挙上

後速やかに高品質のたんぱく質を摂取することを意識しつつも、トレーニング期間中における1日の食事を総合的に考慮して、たんぱく質を意識的に摂取することが必要となる。

異なるたんぱく質源とたんぱく同化作用

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、運動後の筋たんぱく質合成が、空腹時での運動と比較して有意に増加す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(17)。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、血中ロイシン摂取量は乳たんぱく質のほう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。

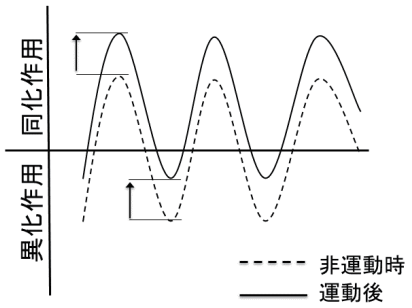

図7　単回のレジスタンス運動の前後におけるたんぱく質の出納バランスの変化
非運同時と比較して、レジスタンス運動実施後は24時間における出納バランスがよりプラスの方向に移行する。

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(14)。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。

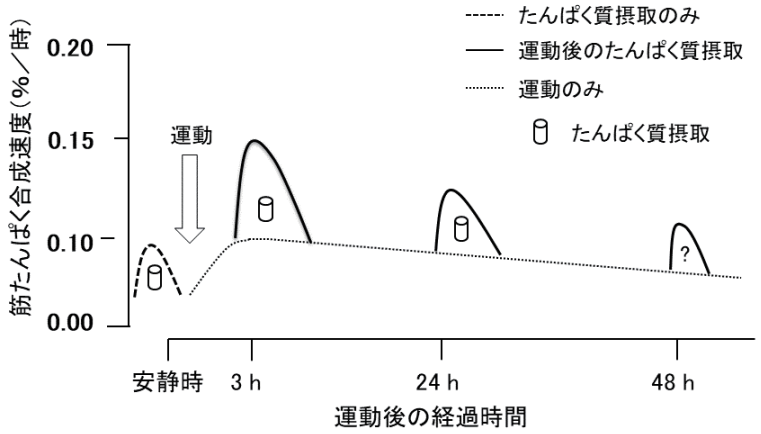

図8　単回のレジスタンス運動後におけるたんぱく質摂取が筋たんぱく質の合成速度に及ぼす影響　(5)より改変

1日に摂取すべき量と3食の各食事で摂取すべきたんぱく質量

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。そのため、たんぱく質摂取に伴う筋たんぱく質合成速度の増加にも用量依存効果があるが、若年者においてはおよそ0.24 g/kg体重の良質なたんぱく質摂取で、筋たんぱく質の合成速度が最大値に達する(11)。つまり、朝・昼・夕食と1日3食摂取することを前提とした場合、それぞれの食事で、0.24 g/kg体重のたんぱく質が摂れていない場合、筋合成を最大に高めることができない可能性が示唆される。しかし、我々が大学生266名を対象とした調査において、3食すべての食事でたんぱく質の規定量を満たしていたのは全体の3割程度だった(18)。特に朝食でのたんぱく質不足が顕著であったことから、筋肥大を目的としたトレーニング期における、朝食でのたんぱく質摂取量には注意が必要である。また近年の調査において、大学生の朝食にたんぱく質を付加した群(通常の朝食ではたんぱく質摂取量が不十分だが、たんぱく質の付加で規定値を満たす群)は、同量のたんぱく質を夕食に付加した群(夕食はたんぱく質の規定値を満たしているが、朝食は不足の群)と比較して、3ヵ月間のレジスタンストレーニングによる筋肥大がより顕著だった(19)(**図9**)。以上の結果からも、3食それぞれの食事で十分なたんぱく質を摂取することはトレーニング効果を最大に高める上でも欠かせない。

5. おわりに

効率的な筋肥大を実現するためには、個々の体力に合わせた運動プログラムの策定は最も重要な要素である。また同時に、骨格筋のたんぱく質の代

謝を考慮すると、トレーニング期間中におけるバランスのとれた栄養摂取、特にたんぱく質の摂取は、トレーニング効果を最大限に引き出すためには必須の要件であり、トレーニングメニューと同様に計画的に実行されなければならない。近年、特に血中ロイシン濃度の上昇を目的としたたんぱく質・アミノ酸の摂取は、筋肥大を目指すアスリートのみならず、活動的な成人の間でも一般化されつつある。しかし、24時間のたんぱく質代謝を考慮すると、トレーニングの時間帯だけでなく、試合期・オフ期など個々人のトレーニング目標に適したたんぱく質摂取を、1日3食の食事に含まれるたんぱく質の質や量も考慮した上で、総合的に検討することが求められる。◆

参考文献

1. Anthony, T.G., J.C. Anthony, F. Yoshizawa, S.R. Kimball, L.S. Jefferson. Oral administration of leucine stimulates ribosomal protein mRNA translation but not global rates of protein synthesis in the liver of rats. *J Nutr*. 131(4): 1171-1176. 2001.
2. Burd, N.A., A.M. Holwerda, K.C. Selby, D.W. West, A.W. Staples, N.E. Cain, J.G. Cashaback, J.R. Potvin, S.K. Baker, S.M. Phillips. Resistance exercise volume affects myofibrillar protein synthesis and anabolic signalling molecule phosphorylation in young men. *J Physiol*. 588(Pt 16): 3119-30. 2010.
3. Burd, N.A., D.W. West, D.R. Moore, P.J. Atherton, A.W. Staples, T. Prior, J.E. Tang, M.J. Rennie, S.K. Baker, S.M. Phillips. Enhanced amino acid sensitivity of myofibrillar protein synthesis persists for up to 24 h after resistance exercise in young men. *J Nutr*. 141(4): 568-73. 2011.
4. Cermak, N.M., P.T. Res, L.C. de Groot, W.H. Saris, L.J. van Loon. Protein supplementation augments the adaptive response of skeletal muscle to resistance-type exercise training: a meta-analysis. *Am J Clin Nutr*. 96(6): 1454-64. 2012.
5. Churchward-Venne, T.A., N.A. Burd, S.M. Phillips. Nutritional regulation of muscle protein synthesis with resistance exercise: strategies to enhance anabolism. *Nutr Metab (Lond)*. 9(1): 40. 2012.
6. Dreyer, H.C., S. Fujita, J.G. Cadenas, D.L. Chinkes, E. Volpi, B.B. Rasmussen. Resistance exercise increases AMPK activity and reduces 4E-BP1 phosphorylation and protein synthesis in human skeletal muscle. *J Physiol*. 576(Pt 2): 613-624. 2006.
7. Fujita, S., H.C. Dreyer, M.J. Drummond, E.L. Glynn, J.G. Cadenas, F. Yoshizawa, E. Volpi, B.B. Rasmussen. Nutrient signalling in the regulation of human muscle protein synthesis. *J Physiol*. 582(Pt 2): 813-823. 2007.
8. Kikuchi, N. K. Nakazato. Low-load bench press and push-up induce similar muscle hypertrophy and strength gain. *J Exerc Sci Fit*. 15(1): 37-42. 2017.
9. Kumar, V., A. Selby, D. Rankin, R. Patel, P. Atherton, W. Hildebrandt, J. Williams, K. Smith, O. Seynnes, N. Hiscock, M.J. Rennie. Age-related differences in the dose-response relationship of muscle protein synthesis to resistance exercise in young and old men. *J Physiol*. 587(Pt 1): 211-217. 2009.
10. Mitchell, C.J., T.A. Churchward-Venne, D.W. West, N.A. Burd, L. Breen, S.K. Baker, S.M. Phillips. Resistance exercise load does not determine training-mediated hypertrophic gains in young men. *J Appl Physiol*. 113(1): 71-77. 2012.
11. Moore, D.R., T.A. Churchward-Venne, O. Witard, L. Breen, N.A. Burd, K.D. Tipton, S.M. Phillips. 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(1): 57-62. 2015.
12. Morton, R.W., K.T. Murphy, S.R. McKellar, B.J. Schoenfeld, M. Henselmans, E. Helms, A.A. Aragon, M.C. Devries, L. Banfield, J.W. Krieger, S.M. Phillips. A systematic review, meta-analysis and meta-regression of the effect of protein supplementation on resistance training-induced gains in muscle mass and strength in healthy adults. *Br J Sports Med*. 52(6): 376-384. 2018.
13. Morton, R.W., S.Y. Oikawa, C.G. Wavell, N. Mazara, C. McGlory, J. Quadrilatero, B.L. Baechler, S.K. Baker, S.M. Phillips. Neither load nor systemic hormones determine resistance training-mediated hypertrophy or strength gains in resistance-trained young men. *J Appl Physiol (1985)*. 121(1): 129-138. 2016.
14. Pennings, B., Y. Boirie, J.M. Senden, A.P. Gijsen, H. Kuipers, L.J. van Loon. Whey protein stimulates postprandial muscle protein accretion more effectively than do casein and casein hydrolysate in older men. *Am J Clin Nutr*. 93(5): 997-1005. 2011.
15. Phillips, S.M., K.D. Tipton, A. Aarsland, S.E. Wolf, R.R. Wolfe. Mixed muscle protein synthesis and breakdown after resistance exercise in humans. *Am J Physiol*. 273(1 Pt 1): E99-107. 1997.
16. Rodriguez, N.R., N.M. Di Marco, S. Langley. American College of Sports Medicine position stand. Nutrition and athletic performance. *Med Sci Sports Exerc*. 41(3): 709-731. 2009.
17. Wilkinson, S.B., M.A. Tarnopolsky, M.J. Macdonald, J.R. Macdonald, D. Armstrong, S.M. Phillips. 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(4): 1031-40. 2007.
18. Yasuda, J., M. Asako, T. Arimitsu, S. Fujita. Association of Protein Intake in Three Meals with Muscle Mass in Healthy Young Subjects: A Cross-Sectional Study. *Nutrients*. 11(3). 2019.
19. Yasuda, J., T. Tomita, T. Arimitsu, S. Fujita. Evenly Distributed Protein Intake over 3 Meals Augments Resistance Exercise-Induced Muscle Hypertrophy in Healthy Young Men. *J Nutr*. 150(7): 1845-1851. 2020.

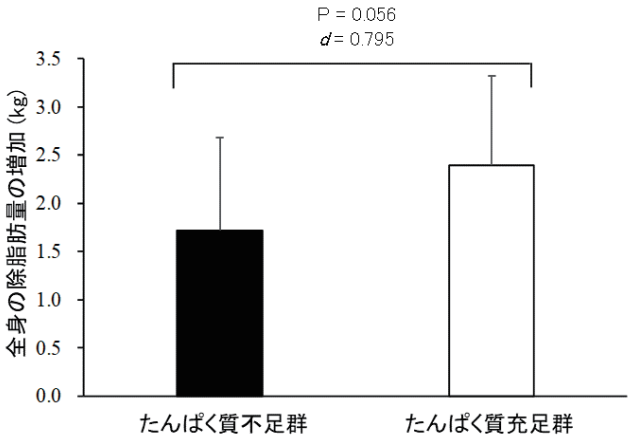

図9　トレーニング期間中に朝食にたんぱく質を付加した群（たんぱく質充足群）と夕食に付加した群（たんぱく質不足群）における除脂肪量の増加の比較　（19）より改変

著者紹介

藤田 聡：
2002年南カリフォルニア大学大学院にて博士号修了し博士(運動生理学)を取得。2006年テキサス大学医学部内科講師、2007年東京大学大学院新領域創成科学研究科特任助教を経て、2009年より立命館大学。米国生理学会（APS）や米国栄養学会（ASN）より学会賞を受賞。専門は運動生理学、特に運動や栄養摂取による骨格筋の代謝応答。監修本に『図解眠れなくなるほど面白い 図解 たんぱく質の話』、共著に『体育・スポーツ指導者と学生のためのスポーツ栄養学』など。