

レジスタンストレーニング終了後のホエイたんぱく質と炭水化物の摂取タイミングの違いが若齢鍛錬者の窒素バランスに与える影響

森 博康*

The Different of Intake Timing of Whey Protein and Carbohydrate after the Resistance Training on Nitrogen Balance in Trained Young Men

Hiroyasu MORI *

Summary

The effect was investigated of a intake of whey protein and carbohydrate immediately after resistance training on nitrogen balance. Seven healthy trained young men (22 ± 4 yr, 173.7 ± 3.8 cm, 70.6 ± 3.9 kg) participated in two trials in random order, P0 experimental trial (19.6g of protein and 62.1g of carbohydrate intake immediately after resistance training) and P6 experimental trial (19.6g of protein and 62.1g of carbohydrate intake 6 hours after resistance training). Subjects completed a P0 and P6 experimental period of an energy balance diet while maintaining usual physical activity level. We assessed whole body protein metabolism by nitrogen balance method in P0 and P6 period in the last 3-days. The amount of nitrogen intake was not significantly difference in P0 and P6 period. The amount of nitrogen excretion was significantly lower in P0 period than that P6 period ($p < 0.01$). Nitrogen balance in P0 period was significantly more positive than that in P6 period ($p < 0.01$). In conclusion, the present study showed that intake of whey protein and carbohydrate immediately after resistance training in trained young men enhances nitrogen balance when energy balance is maintained.

Key words: intake timing, whey protein, carbohydrate, nitrogen balance, trained young men

I. 緒言

骨格筋の筋たんぱく代謝は、レジスタンストレーニングといった運動に伴う筋への刺激に応答し、筋たんぱく合成量が筋たんぱく分解量を上回することで正の出納バランスへ傾向し、骨格筋は肥大する⁶⁾。また、骨格筋の肥大にはレジスタンストレーニングにより誘発された内分泌因子も密接に関与しており、なかでも成長ホルモン、インスリン、テストス

テロンなどといったアナボリック作用を持つホルモンが骨格筋の肥大に関与している¹⁶⁾。一方でレジスタンストレーニングにより誘発される内分泌因子の変化は、栄養素によって影響を受けることが明らかとなっており¹⁷⁾、レジスタンストレーニングに伴う適切な栄養素の摂取が筋たんぱく代謝を正の出納バランスへ傾向させ骨格筋を肥大させる。

高強度のレジスタンストレーニングにより筋たん

* 兵庫大学 健康科学部 栄養マネジメント学科 (〒675-0195 兵庫県加古川市平岡町新在家2301)
Faculty of Health Science Department of Nutrition Management, Hyogo University

ばく合成は増大し、トレーニング終了直後から24-48時間持続する^{7,22)}。しかし、筋たんぱく合成の増大はレジスタンストレーニング終了後、時間経過と共に低下するため、早急なたんぱく質の摂取がトレーニング後の筋たんぱく合成に効率よく利用できるとされている⁵⁾。さらに、レジスタンストレーニング終了直後は筋たんぱく合成の他、筋たんぱく分解も増大しているため、筋たんぱく代謝を正の出納バランスへ傾向させるにはたんぱく質の摂取だけではなく、炭水化物の摂取も重要であると考えられている^{4,11,24)}。Miller et al.¹⁸⁾によれば、レジスタンストレーニング終了直後にたんぱく質と炭水化物を同時摂取させたところ、それぞれの単独摂取よりインスリン分泌に相乗効果を与え、筋たんぱく合成が増大するとのことであった。なかでも消化吸收速度の速いホエイたんぱく質は、消化吸收速度の遅いカゼインたんぱく質や大豆たんぱく質と比べ、炭水化物と同時摂取することでインスリン分泌量が高まることが明らかとなっている¹⁾。また、Bird et al.³⁾、Zawadzki et al.²⁷⁾によれば、運動終了直後、早急にたんぱく質と炭水化物を同時摂取することで、コルチゾール分泌の抑制や運動により枯渇した筋グリコーゲン再供給に相乗効果を与え、筋たんぱく質分解の抑制に効果的であるとのことである。すなわち、レジスタンストレーニング終了後、筋たんぱく合成と分解による筋たんぱく代謝を正の出納バランスへ傾向させるには、早急にホエイたんぱく質と炭水化物を摂取する必要がある。

これまでに筆者らは、レジスタンストレーニング習慣のある若齢鍛錬者を対象とし、7週間に渡るレジスタンストレーニング終了後のホエイたんぱく質と炭水化物の早急な摂取タイミング違いが骨格筋肥大に与える影響について検証を行っている²¹⁾。しかし、筆者らの先行研究ではレジスタンストレーニング終了直後の早急なホエイたんぱく質と炭水化物の摂取による骨格筋肥大効果がみられず、本仮説を立証できなかった。その原因として、実験介入期間が短期間であったこと、骨格筋量の多い鍛錬者を被験者としたこと、実験介入期間中のエネルギーや各栄養素量が摂取不足となる実験条件下ではレジスタンストレーニング終了直後のホエイたんぱく質と炭水化物の摂取タイミング効果が得られないことの3つがあげられた。なかでも1日に摂取しているエネルギーや各栄養素量の違いがレジスタンストレーニン

グ終了直後の筋たんぱく代謝応答に大きく影響し、栄養状態の低下がレジスタンストレーニング後の筋たんぱく代謝を負の出納バランスに傾向させると考察した。つまり、レジスタンストレーニング終了直後のホエイたんぱく質や炭水化物の摂取タイミング効果を詳細に検証するには、被験者のエネルギーや各栄養素量に摂取不足のないエネルギー平衡状態が維持された条件下で本仮説を検証する必要がある。しかし、これまでの短期間の筋たんぱく代謝応答について検証した先行研究では、絶食時に行った実験条件や被験者のエネルギー平衡状態の確認がされていない実験条件が多く、レジスタンストレーニング終了直後の早急なホエイたんぱく質や炭水化物の摂取タイミング効果を詳細に検証できていないことが予測される。

一方、これまでの運動や栄養介入による多くの先行研究では、生体内における短期間の筋たんぱく代謝応答を窒素バランスにて評価する窒素出納法が利用されてきた^{13,19,20,23)}。特に窒素バランスは摂取している1日の総エネルギー量の違いにより出納値が大きく変動する。つまり、本仮説を詳細に検証するには総エネルギー摂取量や消費量の平衡バランス、生活活動量にあった各栄養素量を確認した条件下での窒素出納法を用いて検証する必要がある。

そこで本研究の目的は、エネルギー平衡状態が維持された条件下でのレジスタンストレーニング終了直後のホエイたんぱく質と炭水化物の摂取タイミングの違いが若齢鍛錬者の窒素バランスに与える影響について検証することとした。なお、本研究は、筆者らの先行研究結果を再度検証するための実践研究として位置づけるものである。一方、本研究では被験者の総エネルギー摂取量や消費量の平衡バランス、生活活動量にあった各栄養素量を注意深く確認することでこれまでの先行研究と比べ短期間の筋たんぱく代謝応答を精度良く観察できることが予測される。そして、筆者らの先行研究で考察した実験介入期間と骨格筋量の異なる被験者との違いについての検証は、今後の研究課題とさせていただきたい。

II. 方法

A. 被験者

被験者は、19-29歳の健康な男性で、週2-5回のレジスタンストレーニングを行っているウエイトリフター3名とボディビルダー4名の合計7名であ

る。被験者のトレーニング歴は 5.9 ± 2.6 年であり、実験開始前のトレーニング頻度は週 3.7 ± 1.3 回、1週間のトレーニング時間は合計 222.9 ± 75.2 分間であった。実験期間中は春季であり、試合に向けた体重調整を行っていない通常準備期に実施した。本研究は兵庫大学倫理委員会にて所定の手続きを経て承認されており、また被験者には事前に口頭と文書で実験の内容および危険性の説明を行った。全ての被験者はその内容を理解した上で承諾書に署名し、研究に参加した。

B. 実験条件

被験者は、レジスタンストレーニング終了後5分以内にホエイたんぱく質と炭水化物が含まれたサプリメントを摂取する実験条件（P0）と、レジスタンストレーニング終了6時間後にホエイたんぱく質と炭水化物が含まれたサプリメントを摂取する実験条件（P6）をクロスオーバーデザインにて行った。各実験条件はウォッシュアウト期間として7日間以上の間隔を空けて実施した。各実験条件ともに11日間の実験期間を設定し、このうち8日目までを検者

が用意した実験食やサプリメントといった食事に含まれるエネルギーや各栄養素の生体内における筋たんぱく代謝の適応期間とし、9-11日目の3日間は24時間尿の採集期間とした。本研究の実験スケジュールを Fig. 1に示した。

C. 実験開始前

実験開始前、被験者の身体組成、最大挙上重量（以下、1RM）、食事調査、生活活動調査を行った。身体組成は、体重・体組成計（DC-320：TANITA 社製）を用いて0.1kg単位で測定し、生体電気インピーダンス法を用いて体重、体脂肪率および除脂肪量（以下、LBM）を測定した。なお、身体組成の計測は、各実験条件ともに24時間尿を採集する9-11日目の3日間も行った。1RMの測定はベンチプレス、ショルダープレス、プレスダウン、レッグエクステンション、レッグプレス、レッグカール、ラットプルダウン、ロウイング、バーベルカールを測定した。食事調査は秤量法と24時間思い出し法を併用して実験開始前の習慣的な7日間と、P0とP6の各実験期間中の食事内容を記録した。また、総エネルギー

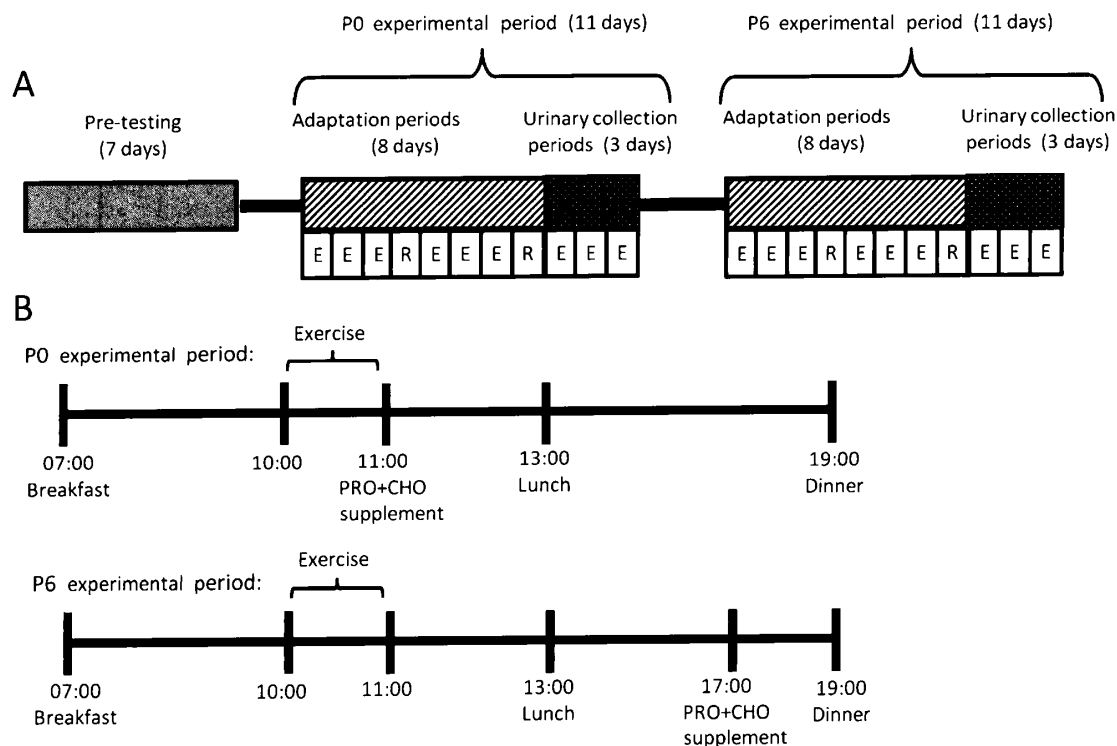


Fig. 1 Study timeline(A) and daily timing of meals, exercise and intake of supplement during P0 and P6 trials(B) P0; whey protein and carbohydrate intake immediately after resistance training, P6; whey protein and carbohydrate intake 6 hours after resistance training, E; resistance training day, R; rest day, PRO+CHO supplement; whey protein and carbohydrate supplement

ギー摂取量（以下、TEI）と総たんぱく質摂取量、体重（kg）あたりのたんぱく質摂取量（以下、たんぱく質/体重）は、エクセル栄養君 ver.6.0（建帛社製）により管理栄養士が計算した。生活活動調査は、三次元加速度センサが内蔵された活動量計（Active Style Pro HJA-350IT：オムロンヘルスケア社製）を7日間装着させ、実験開始前の1日の総エネルギー消費量（以下、TEE）を求めた。また、被験者には睡眠や入浴以外の全ての時間に活動量計を装着するように指示をした。実験開始前の被験者の身体特性を Table 1に示した。

D. 実験期間中

1. レジスタンストレーニングの実施方法

各実験条件ともに1, 5, 9日目はレッグプレスとレッグエクステンション、レッグカール、2, 6, 10日目はベンチプレス、ショルダープレス、プレスダウン、3, 7, 11日目はラットプルダウン、アームカール、ロウイングを80% 1RMで8-10回を4セット行った。各種目におけるセット間の休息は約2分間空けて行った。また、レジスタンストレーニング実施前には自転車エルゴメーター（エアロバイク 800：コンビウエルネス社製）を使用

し、100Wの負荷で10分間のウォーミングアップを行った。なお、各実験条件ともにレジスタンストレーニングの開始時間は午前10時とし、1回のトレーニング時間は合計約60分間であった。

2. 使用したたんぱく質サプリメントと炭水化物サプリメント

今回使用したたんぱく質サプリメント（Big Whey：Bulk Sport 社製）はホエイたんぱく質を25g使用し、たんぱく質が19.6g、脂質が1.5g、炭水化物が2.1g含まれている。また、必須アミノ酸の配合量は、バリンが1100mg、ロイシンが2200mg、イソロイシンが1150mg、リジンが1875mg、メチオニンが400mg、フェニルアラニンが650mg、スレオニンが1125mg、トリプトファンが325mgである。

今回使用した炭水化物サプリメント（Power Gel：Power Bar 社製）はデキストリンを82g使用し、たんぱく質が0.0g、脂質が0.0g、炭水化物が60.0g含まれている。

本研究で使用したたんぱく質と炭水化物サプリメントは、200mlのミネラルウォーターに溶かして経口摂取させた。本研究で使用したたんぱく質サプリメントと炭水化物サプリメントを同時摂取する時間帯であるが、P0はレジスタンストレーニング終了後5分以内（午前11時頃）、P6はレジスタンストレーニング終了6時間後（午後17時頃）であった。

なお、本研究で使用したたんぱく質と炭水化物サプリメントの種類と量、必須アミノ酸の配合量は筆者らの先行研究²¹⁾を参考にした。

3. 食事管理

各実験期間中の食事は検者が用意した実験食を被験者へ提供し、水分補給はカロリーゼロのミネラルウォーターやお茶を摂取するよう指示を行った。なお、実験期間中は検者が用意した実験食やサプリメント以外の食事やカロリーが含まれた飲料水の摂取を禁じた。実験期間中の食事時間であるが、各実験条件ともに朝食は午前7時頃、昼食は午後13時頃、夕食は午後19時頃とした。実験食の献立作成や食品構成は、生活活動調査により得られたTEEの結果や「日本人の食事摂取基準2010年度版」⁸⁾、「日本体育協会監修アスリートのための栄養・食事ガイド」¹⁵⁾を参考に管理栄養士が実験期間中の給与栄養目標量と食品群別摂取目標量を設定した。また、本研究で

Table 1 Physical characteristics of the subjects

	n=7
Age (yr)	22±4
Height (m)	173.7±3.8
Weight (kg)	70.6±3.9
BMI (kg/m ²)	23.4±0.9
Body fat (%)	13.3±3.1
LBM (kg)	61.2±2.6
TEE (kcal)	3110±96
TEI (kcal)	2905±106
Protein (g)	104.2±19.2
Protein (g/kg BW)	1.5±0.1
1RM leg press (kg)	164.3±18.4
1RM bench press (kg)	86.4±7.5
1RM lat pull down (kg)	74.3±8.9

Values are means ±SD

BMI; body mass index, LBM; lean body mass, TEE; total energy expenditure, TEI; total energy intake, 1RM leg press; one repetition maximum leg press, 1RM bench press; one repetition maximum bench press, 1RM lat pull down; one repetition maximum lat pull down

は実験食とたんぱく質サプリメントで1日の総たんぱく質摂取量を体重1 kgあたり1.5gと設定した。なお、給与栄養目標量の詳細な設定方法は筆者らの先行研究²¹⁾を参照されたい。実験期間中の給与栄養目標量を Table 2に示した。実験期間中は作成した給与栄養目標量と食品群別摂取目標量をもとに毎食、管理栄養士が実験食を作成し、被験者のエネルギーや各栄養素量に過不足がないよう努めた。また、実験食は残食量の確認を行い、実験期間中のエネルギーや各栄養素量を詳細に調査した。

4. 尿中生化学検査

尿の採集は、採尿容器（ユーリンメイト P：株式会社 住友ベークライト社製）を用いて24時間の蓄尿を行った。尿の採集期間は、各実験条件ともに9-11日目の3日間とし、8日目のレジスタンストレーニングは禁止した。9日目の蓄尿では第一尿は採集せず、第二尿から10日目の第一尿までを採集した。10日目の蓄尿では10日目の第二尿から11日目の第一尿まで採集した。11日目の蓄尿も同様の方法で行った。採集された尿は即日回収され、ウレアーゼ・GLDH・UV法（N-アッセイ BUN-L ニットーボー：ニットーボーメディカル社製）を用いて尿中尿素窒素を分析した。

窒素出納値の算出方法を以下に示した。

窒素出納値(g) = 摂取窒素量 - (尿中尿素窒素量 + 糞便中窒素量 + 経皮中窒素量)

排泄窒素量は、尿中尿素窒素量と糞便中窒素量、経皮中窒素量の合計値とした。なお、糞便中窒素量は

体重(kg)に5 mgを乗じた値、経皮中窒素量は2 gと仮定した。また、摂取窒素量は、管理栄養士が作成した実験食やサプリメントの栄養計算結果をもとに1日に摂取した総たんぱく質摂取量を算出し、窒素係数の6.25で除した値とした。そして、得られた摂取窒素量と排泄窒素量の差を窒素出納値とした。本研究では、各実験条件の9日目、10日目、11日目で得られたそれぞれの窒素出納値の変化と各実験条件における3日間の窒素出納の平均値を求めた。また、LBM(kg)あたりの3日間の窒素出納の平均値も算出した。

E. 統計処理

本研究で得られたデータの統計処理はIBM SPSS Statistics 21 (SPSS Inc USA)を使用した。P0とP6の各実験条件の平均値の差の検定は対応のあるt検定を行った。なお、危険率5%を有意水準とした。

Ⅲ. 結果

P0とP6の各実験期間中の尿中生化学検値と栄養摂取状況を Table 3に示した。実験期間中に得た3日間の尿量や摂取窒素量の平均値に違いはみられなかったが、P0に比べP6の3日間の尿中尿素窒素量と排泄窒素量の平均値は有意に高い値 ($p < 0.01$)を示していた。また、P0とP6の各実験期間中のTEIや総たんぱく摂取量、たんぱく質/体重の平均値に違いはみられなかった。

P0とP6の各実験期間中における窒素出納の平均値を Fig. 2に示した。P0はP6に比べ有意に高い値 ($p < 0.01$)を示していた。また、P0とP6の各実験条件の9日目、10日目、11日目で得られたそれぞれの

Table 2 Food service standard of energy and nutrients of Experimental diet

TEI (kcal)	3110±96
PAL	1.84±0.06
Protein (g)	105.9±5.9
Protein (g/kg BW)	1.5
Calcium (mg)	650
Iron (mg)	7.5
Vitamin A (mg)	750
Vitamin B ₁ (mg)	1.4
Vitamin B ₂ (mg)	1.6
Vitamin C (mg)	100

Values are means ±SD
PAL; physical activity level

Table 3 Mean urinary constituents and nutrient intake in trained young man P0 and P6

	P0	P6
Urinary volume (ml/24h)	1609.0±125.7	1613.2±117.7
Urinary urea nitrogen (g/24h)	10.1±0.4**	10.8±0.4
Nitrogen excretion (g/24h)	15.6±0.5**	16.3±0.5
Nitrogen intake (g/24h)	16.5±0.4	16.5±0.4
TEI (kcal)	3113±83	3104±90
Protein (g)	103.1±2.4	103.1±2.4
Protein (g/kg BW)	1.5±0.1	1.5±0.1

Values are means ±SD, Different from P6, **p < 0.01

窒素出納値の変化を Fig. 3 に示した。実験日 9, 10, 11 日目の窒素出納値はいずれも P0 は P6 に対して有意に高い値であった (9 日目: $p < 0.01$, 10 と 11 日目: $p < 0.05$)。

P0 と P6 の各実験期間中における LBM あたりの窒素出納の平均値を Fig. 4 に示した。P0 は P6 に比べ有意に高い値 ($p < 0.01$) を示していた。

IV. 考察

本研究の目的は、レジスタンストレーニング終了直後のホエイたんぱく質と炭水化物の摂取タイミングの違いが若齢鍛錬者の窒素バランスに与える影響について検討することである。また、ホエイたんぱく質と炭水化物による摂取タイミング効果を詳細に検証するため、本研究は被験者のエネルギー平衡状態が維持された条件下で本仮説を検証した。

これまでに筆者らは、レジスタンストレーニング習慣がある若齢鍛錬者を対象とし、7 週間に渡るレ

ジスタンストレーニング終了直後のホエイたんぱく質と炭水化物の摂取タイミングが骨格筋肥大に与える影響について検証を行った²¹⁾。しかし、筆者らの先行研究では、レジスタンストレーニング終了直後の早急なホエイたんぱく質と炭水化物の摂取による骨格筋肥大効果がみられず、本仮説を立証できなかった。その原因として、1 日に摂取しているエネルギーや各栄養素量の違いがレジスタンストレーニング終了直後の筋たんぱく代謝応答に大きく影響し、栄養状態の低下がレジスタンストレーニング後の筋たんぱく代謝を負の出納バランスに傾向させると考察した。つまり、本研究のようにレジスタンストレーニング終了直後のたんぱく質と炭水化物の摂取タイミング効果を詳細に検討するには、実験方法として被験者のエネルギーや各栄養素の摂取不足がないエネルギー平衡状態にて実施する必要がある。

本研究の結果、ホエイたんぱく質と炭水化物をレジスタンストレーニング終了直後に摂取した条件 (P0) の方が、トレーニング終了 6 時間後に摂取させた条件 (P6) と比べ、窒素バランスが有意に高かった。つまり、レジスタンストレーニング直後にたんぱく質と炭水化物を早急に摂取することでインスリン分泌増加による筋たんぱく合成の増大やコルチゾール低下による筋たんぱく分解が抑制されたことで、骨格筋の筋たんぱく代謝が正の出納バランスとなったことが示された。Acheson et al.¹⁾ によれば、消化吸収が速いホエイたんぱく質と炭水化物を摂取することでインスリン分泌量が、摂取後 30 分程度でピークとなることが明らかとなっている。つまり、レジスタンストレーニング直後に早急にホエイ

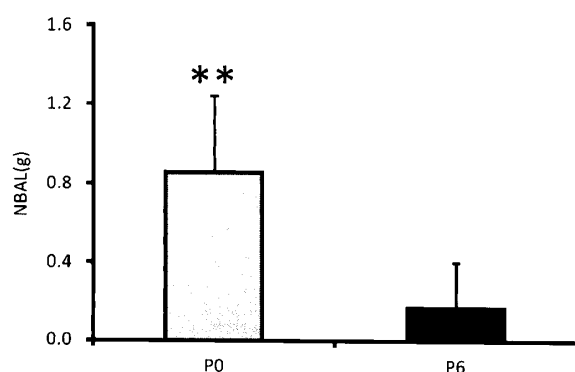


Fig. 2 Mean nitrogen balance for P0 and P6. Values are means $\pm$ SD, Different from P6, ** $p < 0.01$ NBAL; nitrogen balance

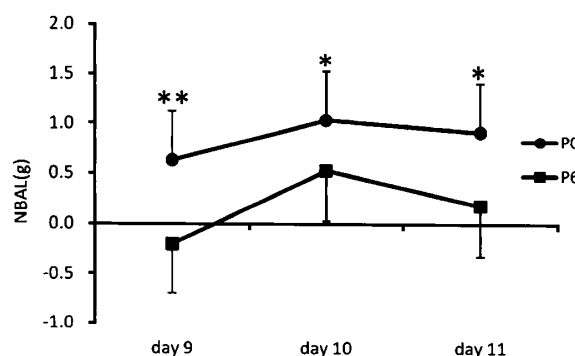


Fig. 3 Nitrogen balance on day9 and day10, day11, of P0 and P6. Values are means $\pm$ SD, Different from P6, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

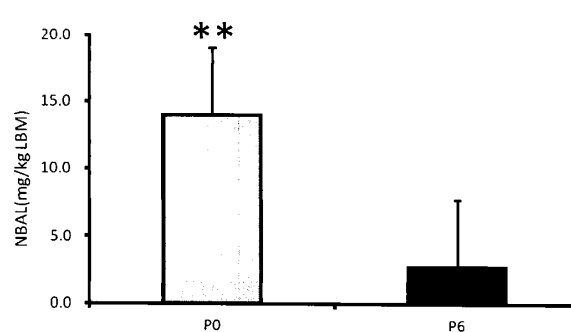


Fig. 4 Mean nitrogen balance, calculated per LBM for P0 and P6. Values are means $\pm$ SD, Different from P6, ** $p < 0.01$

たんぱく質と炭水化物を摂取することで、筋たんぱく合成が最も増大する時間帯に効率よく利用でき、その結果、筋たんぱく代謝が正の出納バランスへ傾向したと考えられる。一方、レジスタンストレーニング6時間後にホエイたんぱく質と炭水化物を摂取した条件（P6）であるが、実験期間中の窒素バランスは正の出納バランスに傾向しているものの、P0と比べ有意に低い値であった。Esmarck et al.¹⁰⁾, Suzuki et al.²⁰⁾によれば、筋たんぱく合成が最も増大するのはレジスタンストレーニング直後であり、時間経過とともに筋たんぱく合成は低下する。また、Esmarck et al.¹⁰⁾, Suzuki et al.²⁰⁾によれば、レジスタンストレーニング終了2時間後のたんぱく質や炭水化物の摂取は遅く、筋たんぱく合成に効率よく利用できないことも指摘している。本研究では、P6はレジスタンストレーニング終了2時間後に検者が用意したたんぱく質や炭水化物が多く含まれた実験食（昼食）をとっているのだが、摂取する時間帯が遅いこともあり効率よく筋たんぱく合成に利用できなかったことが予測される。従って、本研究の結果から、レジスタンストレーニング終了直後に早急にホエイたんぱく質と炭水化物を摂取することで、トレーニングにより増大した筋たんぱく合成に効率よく利用できるため、さらなる骨格筋肥大の効果を高めることが示唆された。

本研究では、レジスタンストレーニング終了後のホエイたんぱく質と炭水化物の摂取タイミング効果を詳細に検討するためにエネルギー平衡状態の条件下にて検証を行っている。Phillips et al.²¹⁾によれば、絶食時における栄養状態が低下した条件下でのレジスタンストレーニングは筋たんぱく分解を増大させるため、筋たんぱく代謝が負の出納バランスへ傾向するとのことである。また、若齢鍛錬者を対象としたHoffman et al.¹²⁾によれば、長期間に渡るレジスタンストレーニング直前と直後にたんぱく質と少量の炭水化物の同時摂取させたところ、実験期間中のTEIが少なかったことが要因で骨格筋肥大の相乗効果がみられていない。高齢者を対象としたJordan et al.¹³⁾によれば、栄養状態が維持されたエネルギー平衡状態でレジスタンストレーニング終了直後にたんぱく質を摂取させたところ、筋たんぱく代謝が正の出納バランスへ傾向したとのことである。つまり、エネルギーが不足した低栄養状態では糖新生が行われ、たんぱく質が優先的にエネルギーとして利

用されることが要因となりレジスタンストレーニング終了後にたんぱく質や炭水化物を摂取しても筋たんぱく代謝が正の出納バランスへ傾向しない可能性がある。しかし、本研究では、被験者の給与栄養目標量を設定しているため、実験期間中はエネルギーや栄養素に不足のないエネルギー平衡状態で実施している。つまり、本研究ではレジスタンストレーニング終了直後のホエイたんぱく質と炭水化物の摂取タイミング効果を詳細に確認することができたということである。従って、本研究の結果から被験者のエネルギー平衡状態が維持された条件下では、レジスタンストレーニング終了直後のホエイたんぱく質と炭水化物による摂取効果をさらに高め、筋たんぱく代謝を正の出納バランスへ傾向させることが明らかとなった。

一方で、本研究の限界は3つ挙げられる。本研究の第1の限界は、レジスタンストレーニング終了直後の早急なたんぱく質と炭水化物の摂取タイミング効果について検証できたが、たんぱく質と炭水化物の同時摂取による相乗効果について検証できていないことである。これまでの先行研究でも必ずしも明らかになっていないのはレジスタンストレーニング終了後の摂取するタイミングではなく、たんぱく質と炭水化物の同時摂取の効果である。しかし、本研究ではたんぱく質単独の摂取条件を設けていないことから炭水化物との同時摂取による効果を検証できていない。従って本研究から、たんぱく質単独の摂取条件でも本研究と同様の摂取タイミング効果が得られる可能性もあるため、同時摂取の効果を検証できるような摂取条件を再度、考案していく必要がある。

本研究の第2の限界は、骨格筋量の異なる被験者での摂取タイミングの違いについて検証できていないことである。本研究では、対象者を筆者らの先行研究と同様、レジスタンストレーニングを習慣的に行っている若齢鍛錬者とした。Bird et al.^{2,3)}によれば若齢非鍛錬者を対象にレジスタンストレーニング中のたんぱく質と炭水化物の同時摂取を12週間行ったところ、それぞれの単独摂取と比べ、筋たんぱく代謝が正の出納バランスに傾向し、有意に骨格筋が肥大したとのことである。しかし、Tang et al.²⁰⁾によれば、若齢者において習慣的にレジスタンストレーニングを行い鍛錬された実験条件は、鍛錬されていない実験条件と比べトレーニング後の筋たんぱ

く合成のピークまでの到達時間が早いこと、筋たんぱく合成のピークが長時間持続できないことを指摘している。つまり、本研究のような若齢鍛錬者の場合、筋たんぱく合成の変化に応じた摂取方法として、ホエイたんぱく質と炭水化物を早急に同時摂取することでインスリン分泌のピーク到達時間を早めることができ、その結果、筋たんぱく代謝を正の出納バランスに傾向させることができるのであろう。一方、筋たんぱく合成のシグナルとして必須アミノ酸のなかでも分岐鎖アミノ酸であるロイシンがmTORシグナル伝達経路とたんぱく質翻訳開始因子の活性化による筋たんぱく合成を増大させることが明らかとなっている⁹⁾。Katsanos et al.¹⁴⁾によれば、若齢者の筋たんぱく合成を増大させるためには、ロイシン量が1700mg必要であるとのことだが、本研究で使用するホエイたんぱく質には、それを上回る2200mgのロイシンが配合されていた。今後、レジスタンストレーニングを行っている鍛錬者で行っていない非鍛錬者との比較や、たんぱく質や炭水化物の量や種類、必須アミノ酸の配合量などを変えてさらなる検証を行っていく。

本研究の第3の限界は、本研究における介入期間が筆者らの先行研究の7週間に対して11日間と短期間となっていることである。本研究では、窒素出納法における食事への適応期間や24時間尿の採集期間、トレーニング計画等をもとに摂取条件の介入期間を11日間とした。本研究では、摂取タイミングによる筋たんぱく代謝応答を短期間の窒素バランスの変動をもとに評価することとし、今回は身体組成の変動は評価の対象としなかった。従って本研究では、介入期間後の身体組成の測定を行わなかったが、摂取タイミング効果と介入期間の違いについて、身体組成の変動を指標にして検証すべき課題として挙げられる。

V. 結語

本研究の目的は、レジスタンストレーニング終了後のホエイたんぱく質と炭水化物の摂取タイミングの違いが若齢鍛錬者の窒素バランスに与える影響について検証することとした。また、ホエイたんぱく質と炭水化物による摂取タイミング効果を詳細に検証するため、本研究は被験者のエネルギー平衡状態が維持された条件下で本仮説を検証した。

本研究の結果よりレジスタンストレーニング終了

直後のホエイたんぱく質と炭水化物の早急な摂取は窒素バランスを高め、筋たんぱく代謝を正の出納バランスへ傾向させることが明らかとなった。また、本研究ではエネルギーや各栄養素量に摂取不足のないエネルギー平衡状態で検証していることから、本研究で得られたデータはレジスタンストレーニング終了直後のホエイたんぱく質と炭水化物の摂取タイミング効果を詳細に検証することができた。しかし、本研究では摂取条件としてたんぱく質単独摂取条件を設けていないことから炭水化物との同時摂取効果について検証できていない。レジスタンストレーニング終了後の摂取タイミング効果より同時摂取効果について今後、検証すべき研究課題として挙げられるため、たんぱく質単独摂取条件との比較の他、習慣的にレジスタンストレーニングを行っている鍛錬者だけでなく非鍛錬者との比較やたんぱく質や炭水化物の量や種類、必須アミノ酸の配合量、身体組成をもとにした長期間に渡る介入期間の効果等を加えてさらなる検証を行っていく。

謝辞

本研究の実験計画を作成するにあたり、多くのご指導をいただきました兵庫大学 徳田泰伸准教授と兵庫大学 ウエイトリフティング部監督 田島俊信氏に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Acheson KJ, Blondel-Lubrano A, Oguey-Araymon S, Beaumont M, Emady-Azar S, Ammon-Zuferey C, Monnard I, Pinaud S, Nielsen-Moennoz C, Bovetto L (2011) Protein choices targeting thermogenesis and metabolism. *Am J Clin Nutr* 93: 525-534.
- 2) Bird SP, Tarpenning KM, Marino FE (2006) Independent and combined effects of liquid carbohydrate/essential amino acid ingestion on hormonal and muscular adaptations following resistance training in untrained men. *Eur J Appl Physiol* 97: 225-38.
- 3) Bird SP, Tarpenning KM, Marino FE (2006) Liquid carbohydrate/essential amino acid ingestion during a short-term bout of resistance exercise suppresses myofibrillar protein degradation. *Metabolism* 55: 570-577.
- 4) Borsheim E, Cree MG, Tipton KD, Elliott TA, Aarsland A, Wolfe RR (2004) Effect of carbohydrate intake on net muscle protein synthesis dur-

- ing recovery from resistance exercise. *J Appl Physiol* 96: 674-678.
- 5) Borsheim E, Tipton KD, Wolf SE, Wolfe RR (2002) Essential amino acids and muscle protein recovery from resistance exercise. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 283: 48-57.
 - 6) Burd NA, Tang JE, Moore DR, Phillips SM (2009) Exercise training and protein metabolism: influences of contraction, protein intake, and sex-based differences. *J Appl Physiol* 106: 1692-1701.
 - 7) Chesley A, MacDougall JD, Tarnopolsky MA, Atkinson SA, Smith K (1992) Changes in human muscle protein synthesis after resistance exercise. *J Appl Physiol* 73: 1383-1388.
 - 8) 第一出版編集部編：厚生労働省策定日本人の食事摂取基準2010年度版，第一出版（2010）
 - 9) Drummond MJ, Rasmussen BB (2008) Leucine-enriched nutrients and the regulation of mammalian target of rapamycin signalling and human skeletal muscle protein synthesis. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care* 11: 222-226.
 - 10) Esmarck B, Andersen JL, Olsen S, Richter EA, Mizuno M, Kjaer M (2001) Timing of postexercise protein intake is important for muscle hypertrophy with resistance training in elderly humans. *J Physiol* 15: 301-311.
 - 11) Hamada K, Matsumoto K, Minehira K, Doi T, Okamura K, Shimizu S (1998) Effect of glucose on ureagenesis during exercise in amino acid-infused dogs. *Metabolism* 47: 1303-1307.
 - 12) Hoffman JR, Ratamess NA, Tranchina CP, Rashti SL, Kang J, Faigenbaum AD (2009) Effect of protein-supplement timing on strength, power, and body-composition changes in resistance-trained men. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 19: 172-185.
 - 13) Jordan LY, Melanson EL, Melby CL, Hickey MS, Miller BF (2010) Nitrogen balance in older individuals in energy balance depends on timing of protein intake. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 65: 1068-1076.
 - 14) Katsanos CS, Kobayashi H, Sheffield-Moore M, Aarsland A, Wolfe RR (2005) Aging is associated with diminished accretion of muscle proteins after the ingestion of a small bolus of essential amino acids. *Am J Clin Nutr* 82: 1065-1073.
 - 15) 小林修平，樋口 満（2006）アスリートのための栄養・食事ガイド，第一出版
 - 16) Kraemer WJ, Gordon SE, Fleck SJ, Marchitelli LJ, Mello R, Dziados JE, Friedl K, Harman E, Maresh C, Fry AC (1991) Endogenous anabolic hormonal and growth factor responses to heavy resistance exercise in males and females. *Int J Sports Med* 12: 228-35.
 - 17) Kraemer WJ, Volek JS, Bush JA, Putukian M, Sebastianelli WJ (1998) Hormonal responses to consecutive days of heavy-resistance exercise with or without nutritional supplementation. *J Appl Physiol* 85: 1544-1555.
 - 18) Miller SL, Tipton KD, Chinkes DL, Wolf SE, Wolfe RR (2003) Independent and combined effects of amino acids and glucose after resistance exercise. *Med Sci Sports Exerc* 35: 449-455.
 - 19) Minor BD, Heusinger DE, Melanson EL, Hamilton KL, Miller BF (2012) Energy balance changes the anabolic effect of postexercise feeding in older individuals. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 67: 1161-1169.
 - 20) Moore DR, Del Bel NC, Nizi KI, Hartman JW, Tang JE, Armstrong D, Phillips SM (2007) Resistance training reduces fasted- and fed-state leucine turnover and increases dietary nitrogen retention in previously untrained young men. *J Nutr* 137: 985-991.
 - 21) 森 博康，中本光彦，北川 薫（2010）ラグビー練習直後のタンパク質と炭水化物の同時摂取が与える身体組成と身体諸機能への影響。栄養学雑誌 68：173-182.
 - 22) Phillips SM, Tipton KD, Aarsland A, Wolf SE, Wolfe RR (1997) Mixed muscle protein synthesis and breakdown after resistance exercise in humans. *Am J Physiol* 273: E99-107.
 - 23) Picosky MA, Smith TJ, Grediagin A, Castaneda-Sceppa C, Byerley L, Glickman EL, Young AJ (2007) Increased protein maintains nitrogen balance during exercise-induced energy deficit. *Med Sci Sports Exerc* 40: 505-512.
 - 24) Roy BD, Tarnopolsky MA, MacDougall JD, Fowles J, Yarasheski KE (1997) Effect of glucose supplement timing on protein metabolism after resistance training. *J Appl Physiol* 82: 1882-1888.
 - 25) Suzuki M, Doi T, Lee SJ, Okamura K, Shimizu S, Okano G, Sato Y, Shimomura Y, Fushiki T (1999) Effect of meal timing after resistance exercise on hindlimb muscle mass and fat accumulation in trained rats. *J Nutr Sci Vitaminol* 45:401-409.
 - 26) Tang JE, Perco JG, Moore DR, Wilkinson SB,

森 博康

Phillips SM (2008) Resistance training alters the response of fed state mixed muscle protein synthesis in young men. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 294: 172-178.
27) Zawadzki KM, Yaspelkis BB 3rd, Ivy JL (1992)

Carbohydrate-protein complex increases the rate of muscle glycogen storage after exercise. *J Appl Physiol* 72: 1854-1859.

(2013年4月1日受付, 2013年7月10日訂正,
2013年8月14日受理)