

長時間運動後の糖質・タンパク質混合物摂取が 日本人陸上長距離選手の回復期の血中エネルギー基質 ならびに関連ホルモン動態に及ぼす影響

寺田 新*・大森一伸**・中村好男***・村岡 功***

Influence of Carbohydrate-Protein Supplement on Concentrations of Blood Energy Substrates and Hormones after Prolonged Exercise

Shin TERADA*, Kazunobu OHMORI**, Yoshio NAKAMURA ***
and Isao MURAOKA ***

Abstract

We investigated the influence of carbohydrate-protein supplement on concentrations of blood energy substrates and hormones during 2 hours recovery from 30 km outdoor running. Eight male runners completed 30 km running on two separate occasions. Immediately after each run, they ingested a solution containing carbohydrate (1.5 g/kg body weight) or carbohydrate (1.5 g/kg) + protein (0.5 g/kg). Blood samples were collected before and immediately after running and at 1 and 2 h during the recovery period to determine the concentrations of blood energy substrates (serum glucose and free fatty acids (FFA)), blood lactate and hormones (plasma insulin, adrenaline and noradrenaline). Although there were no differences in the concentrations of glucose, FFA, blood lactate, or adrenaline and noradrenaline between the two treatments, the plasma insulin level of carbohydrate-protein treatment was significantly higher than that of carbohydrate treatment (28.0 ± 4.0 vs. $16.9 \pm 2.4 \mu\text{U/ml}$, $p < 0.05$) at 1 h after running. These results indicate that carbohydrate-protein treatment after running can increase insulin secretion compared with carbohydrate treatment.

Key words: carbohydrate-protein supplement, Japanese athletes, plasma insulin, serum glucose

I. 緒言

運動時にはエネルギー源として主に糖質と脂質が

利用されるが、生体内に貯蔵されている糖質は少ない。そこで、運動前に骨格筋および肝臓のグリコー

* 早稲田大学大学院人間科学研究科 (〒359-1192 埼玉県所沢市三ヶ島2-579-15)
Graduate School of Human Sciences, Waseda University

** 東亜大学総合人間・文化学部総合・人間文化学科 (〒751-8503 山口県下関市一の宮学園町2-1)
Faculty of Integrated Cultures and Humanities, University of East Asia

*** 早稲田大学人間科学部スポーツ科学科 (〒359-1192 埼玉県所沢市三ヶ島2-579-15)
Department of Sports Sciences, School of Human Sciences, Waseda University

ゲン濃度を高めておくことが、パフォーマンスを向上させる上で重要であると言われている^{1,10)}。そして、実際のトレーニングや競技は、一日に数回行われることが多い。したがって、トレーニングの質やパフォーマンスの向上のためには、運動後、速やかにグリコーゲンを再補充し、その後の運動に備える必要があると考えられる。

運動後、グリコーゲンを速やかに再補充する方法として、これまでの研究により、運動後直ちに、体重1 kg 当り0.75g/hの割合で糖質を摂取することが効果的であることが示されている^{8,9)}。また、その際に摂取すべき糖質としては浸透圧が低く、吸収が速やかな多糖類が効果的であると言われている¹⁰⁾。一方、このような方法に加え、摂取する糖質の量を増大させることなどにより、さらにグリコーゲン濃度を高めようという試みがいくつかなされてきたが、いずれも効果的ではないことが報告されてきた^{2,9,12,15)}。

しかしながら、近年 Zawadzki et al.²⁰⁾ は、2時間の自転車運動直後に糖質とタンパク質の混合物を摂取することで、糖質のみもしくはタンパク質のみを摂取した場合と比較して、筋グリコーゲンの回復も促進されたことを報告している。これは、糖質とタンパク質を同時に摂取することで、それぞれ個別に摂取した時のインスリン分泌量を合計したものよりも、多くの分泌量が得られたことによるものであると考えられている¹⁶⁾。この方法は運動後の筋グリコーゲン回復を促進させる新たな方法として注目されている。

ところで、糖負荷試験などを行った際、日本人のインスリン分泌は、欧米人と比較して緩やかであることが知られている⁷⁾。Zawadzki et al.の研究²⁰⁾では、被験者の人種に関して特別な配慮はなされていない。したがって、インスリン分泌能力の低い日本人に対して、Zawadzki et al.²⁰⁾と同様の栄養処方を行った場合に、インスリン分泌の増加が認められる

のかどうかは不明である。特に運動後は、運動前などの安静状態と比較して糖質摂取時のインスリン分泌が抑制されることが報告されている¹⁴⁾。したがって、インスリン分泌能力の低い日本人が、運動後という状況下で糖質・タンパク質混合物を摂取したとしても、大きなインスリン分泌促進作用が得られないという可能性も考えられる。それゆえ、日本人アスリートにおいても、運動後の糖質・タンパク質摂取により、Zawadzki et al.の研究結果²⁰⁾と同様の効果が期待できるか否かを検討することは、スポーツの現場において実際に利用する前に検討すべき課題であると思われる。

そこで、本研究では、日本人陸上長距離選手を対象として、長時間運動後の糖質および糖質・タンパク質混合物摂取が、インスリンを中心としたホルモン動態ならびに血中エネルギー基質に及ぼす影響について検討することとした。

II. 方法

A. 被験者

被験者は大学陸上競技同好会に所属し、日常的に持久的トレーニングを行っている男子大学生8名であった。彼らの身体的特徴を表1に示した。彼らは実験の主旨、内容およびそれに伴う苦痛と危険性についての説明を受け、それらを十分に理解したうえで、同意書に署名し、自由意思により本実験に参加した。実験期間中は、通常の食事および身体活動を維持するように、また実験24時間前からは、激しい身体活動、カフェインの摂取および飲酒を禁止し、12時間前からは食事を摂取しないように指示した。なお、実験開始3時間前までに軽食を摂取させたが、いずれの場合でも摂取する栄養素およびカロリーは同一のものとした。

B. 運動プロトコール

被験者は、屋外での30kmのランニングを最低1週

Table 1 Physical characteristics of subjects

	Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)	%Body fat (%)	Vo ₂ max (ml/min)
mean	20.3	174.8	62.0	10.9	4526
SE	±0.5	±1.9	±1.6	±1.1	±172

Values are means ± SE for 8 subjects. Vo₂ max; Maximal oxygen uptake measured during graded exhaustive treadmill running

間の間隔を置いて2回行った。各ランニング終了後、直ちに実験室に入り、1) 体重1kg 当り1.5g のグルコースポリマー (dextrose-maltodextrin 混合物, dextrose : maltodextrin = 10 : 7) を含む糖質溶液 (CHO 試行), もしくは, 2) 体重1kg 当り1.5g のグルコースポリマーと体重1kg 当り0.5g のタンパク質 (milk-whey protein isolate 混合物, milk protein isolate : whey protein isolate = 7 : 3) を含んだ糖質・タンパク質混合溶液 (CHO-PRO 試行) のいずれかを, クロスオーバー法により摂取した。両溶液は, いずれも最終濃度が21% (wt/vol) となるように調整されており, 溶液の摂取後は, 実験室内で2時間の安静を保った。なお, 30km のランニング中には水分の摂取を許可したが, 摂取する時間および量は2回の試行で同一とした。

C. 測定項目

30km のランニング開始前, ランニング終了後, 回復60分目および120分目に, 肘正中皮静脈より血液を採取した。採取した静脈血の一部を血中乳酸濃度分析に供した。血中乳酸濃度は, 自動乳酸分析器 (Sports 1500, YSI) を用いて測定した。残りの静脈血は, 血清および血漿に遠心分離し, 血糖, 遊離脂肪酸 (FFA), インスリン, アドレナリン, およびノルアドレナリンの測定に供した。血糖および遊離脂肪酸は, 酵素法にて測定した。インスリンはRIA 法により, またアドレナリンとノルアドレナリンは HPLC 法にて測定した。

30km ランニングの所要時間を測定し, 運動中には連続的に心拍数の測定 (バンテージ XL, Polar) を行った。また, 運動開始前および運動終了後に体重を計測した。

D. 統計処理

各々の測定値は, 平均±標準誤差で表した。全ての測定項目の分析には試行×運動時間の二元配置の分散分析を用い, 多重比較には LSD 検定法を用いた。有意水準は危険率5%未満とした。

III. 結果

A. ランニング所要時間, 心拍数および体重の減少量

30km ランニングの所要時間とその間の平均心拍数, およびランニングによる体重の減少量を表2に示した。ランニング所要時間および心拍数には両試

Table 2 Body weight loss, heart rate and running time.

	CHO	CHO-PRO
Body weight loss (Kg)	2.6±0.3	2.4±0.2
HR during running (bpm)	166.4±3.0	163.1±3.4
Running time (min)	127.0±3.4	125.2±3.2

Values are means ± SE for 8 subjects. Body weight loss was calculated by subtracting post-exercise body weight from that of pre-exercise. Heart rates were measured during the 30km running and then took their average.

行間で差は認められなかった。したがって, 両試行の運動強度はほぼ同一であったと考えられる。また, ランニングによる体重の減少量も両試行間で同等であった。

B. 血中グルコース, FFA, 乳酸濃度の変化

30km ランニング開始前, ランニング終了直後, 回復60分目および120分目の血糖値, 遊離脂肪酸濃度および血中乳酸濃度を図1に示した。血糖値は, 両試行とも回復60分目に最も高い値を示したが, どの測定時点においても両試行間に差は認められなかった。

遊離脂肪酸濃度は, 運動直後に最も高い値を示し, 回復60分目には運動前のレベルに回復したが, どの測定時点においても両試行間に差は認められなかった。

血中乳酸濃度も同様に, 運動直後に最も高い値を示し, 回復60分目に運動前のレベルにほぼ回復していたが, どの測定時点においても両試行間に差は認められなかった。

C. 血中ホルモン動態

30km ランニング開始前, ランニング終了直後, 回復60分目および120分目の血中インスリン, アドレナリン, およびノルアドレナリン濃度の変動をそれぞれ図2に示した。インスリンは運動により低下したが, 糖質もしくは糖質・タンパク質混合溶液摂取により, 回復60分目に顕著に増加した。回復60分目では, 糖質摂取に比べて糖質・タンパク質混合溶液摂取で有意に高い値を示した ($p < 0.05$)。

アドレナリンとノルアドレナリンはともに運動直

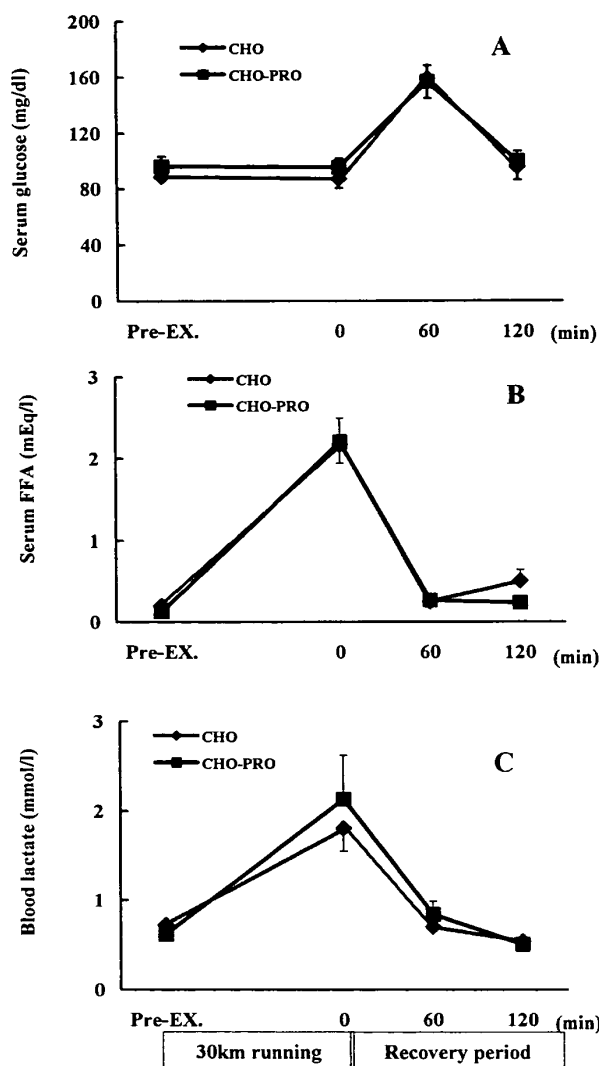


Fig. 1 Serum glucose (A), serum FFA (B), and blood lactate (C) concentration before and at the end of 30km running and during 120 min recovery period for subjects receiving carbohydrate (CHO) or carbohydrate-protein (CHOPRO) supplement. Values are means $\pm$ SE.

後において最も高い値を示し、回復60分目には、運動前のレベルにまで回復したが、どの測定時点においても両試行間に差は認められなかった。

IV. 論議

本研究で得られた主な知見は、長時間運動後における糖質・タンパク質混合物の摂取により、インスリン分泌能力が低いといわれている日本人においても、糖質単独摂取と比較してインスリン分泌が高められたが、その他のホルモンならびに血中エネルギー基質の動態には両試行間で差は認められなかつ

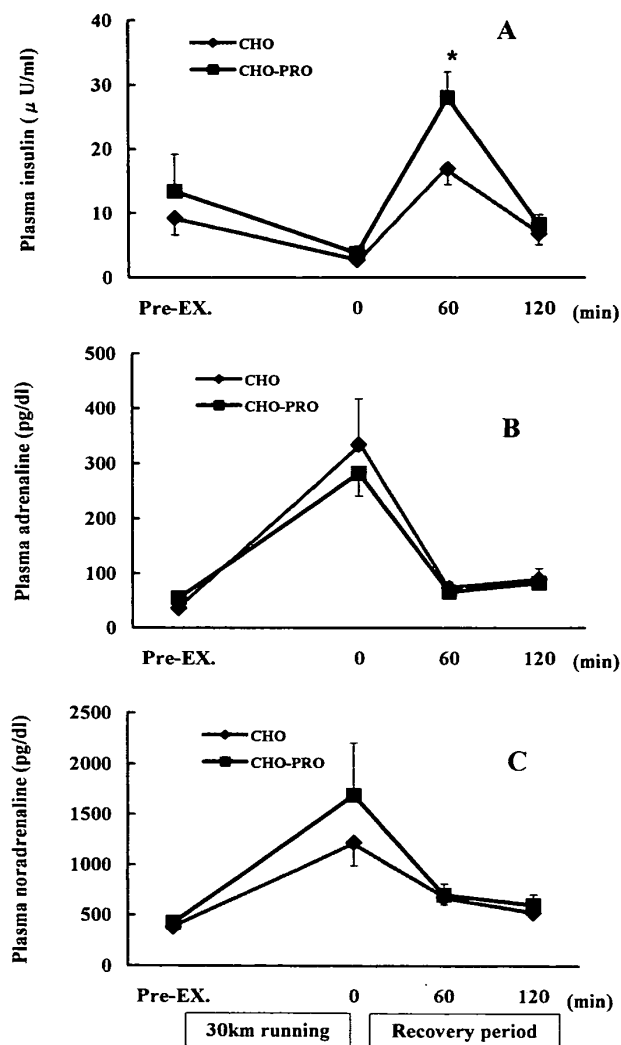


Fig. 2 Plasma insulin (A), adrenaline (B), and noradrenaline (C) concentration before and at the end of 30km running and during 120 min recovery period for subjects receiving carbohydrate (CHO) or carbohydrate-protein (CHOPRO) supplement. Values are means $\pm$ SE.

*significantly different from CHO ($p < 0.05$)

たことである。

日本人は、経口糖負荷試験などを行った場合、欧米人などと比較して、インスリン分泌が緩やかであることが報告されている⁷⁾。そのような日本人に対して、Zawadzki et al.²⁰⁾と同じ栄養処方を行った場合、同様にインスリン分泌の増大が期待できるかどうかは不明であった。本研究における回復60分目の血中インスリン濃度は、糖質摂取、糖質・タンパク質混合物摂取それぞれで、6倍、7.5倍に増加し、 16.9 ± 2.5 , $28.0 \pm 4.0 \mu$ U/mlとなり、糖質・タンパク質混合物摂取で有意に高い値であった(図2)。

本研究では Zawadzki et al.²⁰⁾ が用いた溶液と同一の組成のものを摂取させたが、本研究における被験者のインスリン分泌量は、彼らの結果（糖質摂取、糖質・タンパク質混合物摂取それぞれで約40および60 μ U/ml、運動直後からそれぞれ約9倍、12倍増加）と比べてやはり低いものであった。しかしながら、回復60分目において糖質・タンパク質の同時摂取により、糖質摂取時と比較して有意に高い値を示したという点では同様であった。

運動前安静時と比較して、運動後には糖質摂取時のインスリン分泌が抑制されることが報告されている¹⁴⁾。運動直後には、血中アドレナリンおよびノルアドレナリンが高い濃度を示しており（図2）、これらのホルモンは、 α -アドレナリン受容体を介して、インスリン分泌を抑制することが知られている^{5,6)}。また、運動後には、グルコース依存性のインスリン分泌ペプチドの腸管からの分泌が抑制されることも報告されている³⁾。本研究の結果は、このような運動後というインスリン分泌が抑制されやすい状況においても、糖質にタンパク質を添加することで、インスリン分泌をさらに高めることができることを示すものである。このことから、インスリン分泌能力の低い日本人において、運動後という状況にあっても、糖質に加えタンパク質を同時に摂取することが、インスリン分泌をより促進する上で効果的であると考えられた。

Zawadzki et al.の研究²⁰⁾ では、糖質・タンパク質混合物摂取と糖質単独摂取では、摂取カロリーが異なっていた。したがって、彼らの研究¹⁷⁾ で認められた高いインスリン分泌と筋グリコーゲン再合成率が、果たしてその摂取物の組成によるものであるのか、それとも単に摂取カロリーが増加したことによるものであるのかは明らかでない。そこで、Tarnoplosky et al.¹⁷⁾ や Carrithers et al.⁴⁾ は、摂取エネルギーを同一にした糖質単独摂取と糖質・タンパク質および脂質の併用摂取を比較検討している。

一方、本研究では、糖質・タンパク質混合物摂取による高いインスリン分泌と筋グリコーゲン再合成の機序の解明というよりも、むしろ、運動後のインスリン分泌を効果的に高めるといわれるこの方法が、日本人アスリートに対しても有効であるのかという、スポーツの現場に即した課題に取り組むことを目的とした。そのため、Zawadzki et al.ら²⁰⁾ の方法と同一の方法を採用した。

ところで、Zawadzki et al.²⁰⁾ の研究において、糖質・タンパク質混合物摂取では、運動後回復期における血糖値が、同量の糖質を単独で摂取した場合と比較して、有意に低いことが示されている。このことから、彼らは、増大した筋グリコーゲン再合成は、インスリン分泌の増大に伴い、骨格筋での糖取り込みが増加したことによるものであろうと推察している。本研究では、運動後回復期60分目の血中インスリン濃度は、糖質・タンパク質混合物摂取で有意に高かったものの、血糖値は Zawadzki et al.²⁰⁾ の結果とは異なり、両試行で同等であった（図1）。したがって、彼ら²⁰⁾ の推測に基づけば、本研究では、骨格筋における糖取り込みは両試行でほぼ同等であり、それゆえ、本研究では測定を行っていないものの、筋グリコーゲン合成率にも両試行間で差は無かった可能性が考えられる。

実際、Zawadzki et al.²⁰⁾ の結果とは異なり、同様の糖質・タンパク質混合物摂取により、インスリン分泌が糖質単独摂取と比較して有意に高い値を示すものの、骨格筋における糖取り込みおよび筋グリコーゲン再合成のさらなる増加は認められないという知見も、最近報告されている^{10,19)}。したがって、長時間運動後の糖代謝という点に関して、糖質に加えタンパク質を同時に摂取することによる影響は、それほど大きなものではないのかもしれない。この点に関しては、今後更なる検討が必要であろう。

本研究およびこれまでの先行研究^{10,19,20)} では、運動直後の糖質・タンパク質混合物摂取の効果について検討を行っている。一方、この糖質・タンパク質混合物摂取を運動前に行うことで、肝および筋グリコーゲン濃度を予め高めておくことが可能となるかもしれない。ただし、運動開始直前（～30分前）の糖質摂取は運動中に低血糖症を引き起こすことが知られていることから¹³⁾、その摂取のタイミングについては十分注意する必要があるといえる。

さらに、近年の研究により、レジスタンス・トレーニングの直後に糖質を摂取し、インスリン分泌を高めることで、運動後の筋タンパク質の分解が抑制されることが報告されている¹³⁾。このことは、タンパク質代謝に対しては、糖質・タンパク質混合物摂取による効果が期待できることを示唆するものである。それゆえ、今後、この可能性についての検討も必要であると思われる。

以上まとめると、本研究では、長時間運動直後の

糖質・タンパク質混合物摂取は、血中エネルギー基質濃度やアドレナリン、ノルアドレナリンなどのホルモン濃度の動態には大きな影響を及ぼさないものの、日本人陸上長距離選手においても、インスリン分泌を増大させるうえで効果的であることが示唆された。

V. 参考文献

- 1) Bergstrom, J., L. Hermansen, E. Hultman, and B. Saltin. (1967) Diet, muscle glycogen and physical performance. *Acta. Physiol. Scand.*, 71: 140-150
- 2) Blom, P., A.T. Hostmark, O. Vaage, K.R. Kardal, and S. Maehlum. (1987) Effect of different post-exercise sugar diets on the rate of muscle glycogen synthesis. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 19: 491-496
- 3) Blom, P.C.S., A.T. Hostmark, O. Flaten, and L. Hermansen. (1985) Modification by exercise of the plasma gastric inhibitory polypeptide response to glucose ingestion in young men. *Acta. Physiol. Scand.* 123: 367-368.
- 4) Carrithers, J.A., D.L. Williamson, P.M. Gallagher, M.P. Godard, K.E. Schulze, and S.W. Trappe (2000) Effects of postexercise carbohydrate-protein feedings on muscle glycogen restoration. *J. Appl. Physiol.*, 88: 1976-1982
- 5) Christensen, N.J., and H. Galbo. (1983) Sympathetic nervous activity during exercise. *Annu. Rev. Physiol.*, 45: 139-153
- 6) Galbo, H. (1986) The hormonal response to exercise. *Diabetes/Metabolism Reviews.*, 1: 358-405
- 7) 石田 均 (1999) Type 2 糖尿病のインスリン分泌不全の分子機構. *医学のあゆみ*, 188: 390-394
- 8) Ivy, J.L., A. Katz, C.L. Cutler, W.M. Sherman, and E. F. Coyle. (1988) Muscle glycogen synthesis after exercise: effect of time of carbohydrate ingestion. *J. Appl. Physiol.*, 64: 1480-1485
- 9) Ivy, J.L., M.C. Lee, J.T. Brozinick Jr., and M. J. Reed. (1988) Muscle glycogen storage after different amount of carbohydrate ingestion. *J. Appl. Physiol.*, 65: 2018-2023
- 10) Jentjens, R.L. P.G., L.J.C. van Loon, C.H. Mann, A.J.M. Wagenmakers, and A.E. Jeukendrup. (2001) Addition of protein and amino acids to carbohydrates does not enhance postexercise muscle glycogen synthesis. *J. Appl. Physiol.* 91: 839-846
- 11) Karlsson, J., and B. Saltin. (1971) Diet, muscle glycogen and endurance performance. *J. Appl. Physiol.*, 31: 203-206
- 12) Keizer, H.A., H. Kuipers, G. Vankranenburg, and P. Guerten. (1986) Influence of liquid and solid meals on muscle glycogen resynthesis, plasma fuel hormone response and maximal physical capacity. *Int. J. Sports Med.*, 8: 99-104
- 13) Koivisto, V.A., M. Harkonen, S.L. Karonen, P.H. Groop, R. Elovainio, E. Ferrannini, L. Sacca, and R. A. Defronzo. (1985) Glycogen depletion during prolonged exercise: influence of glucose, fructose, or placebo. *J. Appl. Physiol.* 58: 731-737.
- 14) Krzentowski, G., F. Pirnay, A.S. Luyckx, N. Palikarakis, M. Lacroix, F. Mosora, and P.J. Lefebvre (1982) Metabolic adaptations in post-exercise recovery. *Clin. Physiol.* 2: 277-288.
- 15) Reed, M.J., J.T. Brozinick Jr., M. Lee, and J.L. Ivy. (1989) Muscle glycogen storage postexercise: effect of mode of carbohydrate administration. *J. Appl. Physiol.*, 66: 720-726
- 16) Spiller, G.A., C.D. Jensen, T.S. Pattison, C.S. Chuck, J.H. Whittam, and J. Scala. (1967) Effect of protein dose on serum glucose and insulin response to sugar. *Am. J. Clin. Nutri.* 46: 474-480
- 17) Tarnopolsky, M.A., M. Bosman, J.R. Macdonald, D. Vandeputte, J. Martin, and B.D. Roy. (1997) Postexercise protein-carbohydrate and carbohydrate supplements increase muscle glycogen in men and women. *J. Appl. Physiol.* 83: 1877-1883
- 18) 寺尾 保, 山下泰裕, 張 楠, 杉浦克巳, 森山嘉夫, 大崎久子, 中野昭一 (1995) 激運動終了後のラットに対する2種類の異なった糖質投与が筋グリコーゲンの回復に及ぼす影響. *体力科学*, 44: 375-384
- 19) Van Hall, G., S.M. Shirreffs, and J.A.L. Calbet. (2000) Muscle glycogen resynthesis during recovery from cycle exercise: no effect of additional protein ingestion. *J. Appl. Physiol.*, 88: 1631-1636
- 20) Zawadzki, K. M., B.B. Yaspelkis III, and J. L. Ivy. (1992) Carbohydrate-protein complex increase the rate of muscle glycogen storage after exercise. *J. Appl. Physiol.*, 72: 1854-1859

(平成13年5月18日受付, 平成13年9月10日訂正,
平成13年10月11日受理)