

## 夕方の激運動後の食事摂取タイミングが翌朝空腹時の 筋グリコーゲン含量に及ぼす影響

齊 藤 慎 一・向 井 直 樹・鈴 木 正 成

### Effect of Time of Evening Meal Ingestion Following an Intense Bout of Exercise on Muscle Glycogen Storage on Next Day Early in the Morning

SAITOH Shinichi, MUKAI Naoki and SUZUKI Masashige

The influence of the time of ingestion of an evening meal following an intense bout of exercise on muscle glycogen storage on the next day early in the morning (12 h postexercise) was examined. Eleven healthy males were subjected to a 10 km run for 50 min pace followed by resistance exercise (bench press and half squat) at an intensity of 80% of one repetition maximum for 3 sets. An evening meal (73% carbohydrate, 18% fat, 9% protein; percent of energy) was consumed within 1 h postexercise (1P-EX) or from 3 h postexercise (3P-EX). Five subjects participated on two separate occasions and the remaining 6 subjects were divided randomly into either 1P-EX or 3P-EX. Muscle biopsies were taken from the vastus lateralis immediately and 12 h postexercise. Muscle glycogen contents immediately postexercise were not significantly different between the 1P-EX and the 3P-EX (mean  $\pm$  SD, 1P-EX vs. 3P-EX:  $58.9 \pm 11.8$  vs.  $58.9 \pm 27.3$  mmol/kg wet wt,  $n=5$ ). Muscle glycogen contents 12 h postexercise increased, but not significantly, in the 1P-EX ( $81.0 \pm 20.0$  mmol/kg wet wt,  $n=5$ ), however, this was not observed in the 3P-EX ( $62.5 \pm 24.0$  mg/g wet wt,  $n=5$ ). Interestingly, there was significant difference in glycogen repletion between the 1P-EX and the 3P-EX (1P-EX vs. 3P-EX:  $22.1 \pm 17.7$  vs.  $3.64 \pm 34.4$  mmol/kg wet wt/12h,  $n=5$ ,  $p<0.05$ ). These trends also obtained when the data of the remaining 6 subjects were pooled and analyzed. The results suggest that compared with delaying the ingestion of a meal postexercise, the immediate ingestion of a meal postexercise will lead to more of a good chance of successful recovery of muscle glycogen storage at 12 h postexercise.

**Key words:** postexercise glycogen repletion, meal-timing

#### I. 緒 言

筋グリコーゲン含量の多少が運動成績に及ぼす影響についてはすでに十分知られている<sup>6,11,32</sup>。また、激運動後に著しく低下した筋グリコーゲンの回復には、少なくとも24時間かかることが古くから指摘されており<sup>17,21</sup>、もし次の試合や練習が1回目の運動後24時間内に予定されている場合には、低下した筋グリコーゲンを次の試合や練習前までの極く短時間内に再補充を行うための栄養処

方が重要となる。これについて、1回目の運動後4～8時間内に2回目の運動が予定されている場合と、睡眠を挟んで比較的時間に余裕のある12～24時間後の場合の2つが考えられる<sup>31</sup>。

ところで、激運動で低下した筋グリコーゲンの再補充については、筋への糖輸送を促進するインスリンの分泌動態に関連して、運動終了後の回復初期とそれ以降の回復後期の2つに分けて考えることが提案されている<sup>15,25,28</sup>。すなわち、運動直

後から30~60分程度つづく非インスリン依存的に筋グリコーゲン再補充が行われる再補充速度の高い時期と、それに続くインスリン依存的に筋グリコーゲン再補充が行われる再補充速度の比較的低い時期とである。これに関して、グリコーゲンの基質となる糖質を、運動終了2時間後にとることに比べて、運動直後にとることが運動後4時間の筋グリコーゲン再補充速度を高めることが明らかにされている<sup>12)</sup>。また、運動後直ちにグリコーゲンの基質となる糖質をとることに加えて、インスリン分泌を刺激するタンパク質を同時にとることが、回復期の筋グリコーゲン再補充速度を高めることも明らかにされている<sup>36)</sup>。しかし、運動終了8時間後の筋グリコーゲン含量には、直後か2時間後かの糖質摂取タイミングの違いはないとの報告がある<sup>23)</sup>。一方、比較的時間に余裕のある12~24時間後の場合の筋グリコーゲン再補充については、これまで運動終了24時間後の筋グリコーゲン再補充が主に検討されてきた<sup>2,3,4,15,16)</sup>。我々の知る限り、運動終了12時間後の筋グリコーゲン再補充を運動後の糖質摂取タイミングとの関係で検討したものはみられない。

これまでのわが国の一流長距離ランナーの栄養実態調査からみると<sup>20,29)</sup>、ほとんどのランナーが朝と夕方の2回に分けて練習を行っている。夕方の練習で低下した筋グリコーゲンを翌日の早朝練習前までのおよそ12時間の間にいかに速やかに再補充するかは、長距離ランナーに限らず種々のスポーツ選手の早朝練習効果を左右する意味で重要である。本研究では、夕方のトレーニング後の食

事摂取タイミングについて、運動後1時間以内にとる場合と運動3時間後にとる場合とで、翌朝の朝食前空腹時の筋グリコーゲン再補充に差があるか否かに焦点をあてて検討した。

## II. 実験方法

### 1. 被験者

健康な成人男子11名(平均年齢 $23 \pm 3$ 歳)を用いた(Table 1)。これらの被験者は、実験前の約3ヵ月間は定期的な運動トレーニングを中断していたが、その間週に1, 2回は健康維持のための運動を行っていた。実験を始める前にこれらの被験者には、実験内容を説明し同意を得た。

### 2. 実験概要

被験者を運動後1時間以内に夕食をとる(1P-EX)群と運動3時間後から夕食をとる(3P-EX)群の2群に分け、Table 1に示したno.6-no.11の6名はそれぞれの条件を1回のみ、またno.1-no.5の5名は約2ヵ月の間隔をとって2回の実験(1回目と2回日の実験で食事摂取タイミング条件を入れ替え)を以下の様な方法で行わせた。すなわち、実験日の前日は激しい運動を行わないよう指示した。そして、いずれの条件でも1日目の夕方(16:00-18:00時)に、全被験者に陸上競技場(1周400m)で10kmを50分で走るペース走を負荷し、それに加えてウエイト・トレーニング(ベンチプレス、ハーフスクワット; 最大筋力の約80%, 5-10回, 3セット)を負荷した。1P-EX群の被験者には運動終了後1時間(18:45-19:00時)以内に、3P-EX群の被験者には運動終了3時間後(21:00

Table 1 Physical characteristics of subjects.

Subject	Age (yrs.)	Height (cm.)	Weight (kg.)	$\dot{V}O_2$ max (ml/kg/min)	Body fat (%)
1	21	176	79	45.6	20.4
2	21	169	69	54.3	20.7
3	24	171	65	53.5	15.5
4	21	172	65	48.6	16.7
5	22	173	70	49.6	19.7
6	21	172	63	56.9	17.5
7	21	166	61	54.5	17.7
8	23	177	63	58.6	15.1
9	24	164	58	55.4	12.3
10	21	179	76	54.9	19.4
11	31	163	62	55.5	15.8
Mean	23	171	66	53.4	17.3
SD	3	5	6	3.9	2.6

時)から、高炭水化物食(73.5%, エネルギー比)として調製した食事(ご飯+レトルトカレー;  $1.681 \pm 177 \text{ kcal}$ , 糖質  $4.65 \pm 0.07 \text{ g/kg}$  体重)を10-15分間で摂取させた。なお、調製食の量は、あらかじめ4日間の食事調査を行い、夕食の平均的な量となるように摂取させた。実験食の食事を個人個人に応じて決定することは、動物実験とちがい人間のスポーツと栄養の研究では、食事量に対して自己決定ができるので不満がないことなどの利点があるとされている<sup>28, 33)</sup>。夕食後は休養状態を維持させ、約6時間の睡眠をとらせた翌朝の起床(6:00時)後、実験室に集合させた。実験期間中、水を自由に摂取させたが、それ以外の飲食を禁じた。また、2回の実験に参加した被験者には、2回日の実験の前日からの生活は1回目の食事調査の生活と同じ内容になるよう指示した。Table 1に示した被験者の最大酸素摂取量はトレッドミル漸増負荷法により1回目と2回日の実験の間時点で測定し、また体脂肪率(%)はインピーダンス(BIA)法(タニタ株, TBF-102)により測定した。

### 3) 採血と筋サンプル採取の方法

毎回の運動後にシャワーで汗を流した後とその翌日の早朝の2回にわたって、5分間の安静を保持させた後、前腕肘静脈より採血した。得られた血液を血清分離した後 $-20^{\circ}\text{C}$ で保存した。

採血後、各被験者の右大腿外側広筋中央部から、Bard社製デイスポーザブル自動生検装置バードモノプティ(マックスコア)を用い、針生検法にて筋サンプルを約5 mg(3-7 mg)採取した<sup>5)</sup>。採取に際しては、グルコン酸クロルヘキシジン-アルコール液で消毒の後、1%リドカイン2 mlにて皮膚、皮下の局所麻酔を施した。また、運動した翌朝の採取場所は、前日の採取による血腫などの影響を受けないように、運動直後の採取場所から約3 cm 遠位を穿刺して採取した<sup>6)</sup>。なお、運動直後の筋生検サンプルは全て運動後30分以内に完了した。得られたサンプルは直ちに液体窒素で凍結し、分析まで $-60^{\circ}\text{C}$ で保存した。

### 4) 血液と筋グリコーゲンの分析方法

血清グルコース、血清遊離脂肪酸(FFA)、血清3-ヒドロキシ酪酸(3-OHBA)の濃度は以前に報告した方法で測定した<sup>30)</sup>。血清インスリンを2抗体法のラジオイムノアッセイ(シオノリアインスリン、塩野義製薬、大阪)で測定した。

筋グリコーゲン含量は、Loらの方法で測定し

た<sup>16)</sup>。

### 5) 統計処理

データは、平均値と標準偏差で表わした。1回目に参加した11名(1P-EX:  $n=5$ , 3P-EX:  $n=6$ )の筋グリコーゲンの平均値の差の検定には、対応のない場合のStudentのt-テストを用いた。2回とも参加した5名のその平均値の差の検定には、二元配置の分散分析とScheffの多重比較を用いた。また、運動直後と翌朝の筋グリコーゲンの増加の比較には、対応のある場合のStudentのt-テストを用いた。その他の比較には対応のない場合のStudentのt-テストを用いた。いずれの場合も有意水準を5%とした。

## II. 結果

1回目に参加した11名(1P-EX:  $n=5$ , 3P-EX:  $n=6$ )の運動直後の筋グリコーゲン含量は、両群間に差はなかった(1P-EX vs. 3P-EX:  $48.1 \pm 9.2$  vs.  $56.7 \pm 26.5 \text{ mmol/kg wet wt}$ , ns)。運動12時間後の翌朝の筋グリコーゲン含量は、運動直後の値に比べて、1P-EXで有意に上昇したが( $84.2 \pm 22.9 \text{ mmol/kg wet wt}$ ,  $n=5$ ,  $p<0.05$ )、3P-EXではそのような傾向はみられなかった( $62.6 \pm 19.5 \text{ mg/g wet wt}$ ,  $n=6$ , ns)。しかし、翌朝の筋グリコーゲン含量には両群間に差が認められなかった。また、運動直後と翌朝の筋グリコーゲン含量から求めた運動後12時間の筋グリコーゲン再補充にも両群間に差が認められなかった(1P-EX vs. 3P-EX:  $36.0 \pm 29.3$  vs.  $5.9 \pm 22.8 \text{ mmol/kg wet wt/12h}$ , ns)。Fig. 1には、2回の実験に参加した5名の筋グリコーゲン含量の変化を示した。平均値で見ると、運動直後の筋グリコーゲン含量は、両群間に差はなかった(1P-EX vs. 3P-EX:  $58.9 \pm 11.8$  vs.  $58.9 \pm 27.3 \text{ mmol/kg wet wt}$ ,  $n=5$ )。運動12時間後の翌朝の筋グリコーゲン含量は、運動直後の値に比べて、1P-EXで上昇したが有意ではなく( $81.0 \pm 20.0 \text{ mmol/kg wet wt}$ ,  $n=5$ , ns)、3P-EXではわずかであった( $62.5 \pm 24.0 \text{ mg/g wet wt}$ ,  $n=5$ )。一方、運動直後と翌朝の筋グリコーゲン含量から求めた運動後12時間の筋グリコーゲン再補充には両群間に差が認められた(1P-EX vs. 3P-EX:  $22.1 \pm 17.7$  vs.  $3.6 \pm 34.4 \text{ mmol/kg wet wt/12h}$ ,  $n=5$ ,  $p<0.05$ )。なお、それぞれ1回の実験しか参加しなかった被験者のデータを加えて比較すると、運動直後の筋グリコーゲン含量には両群間に

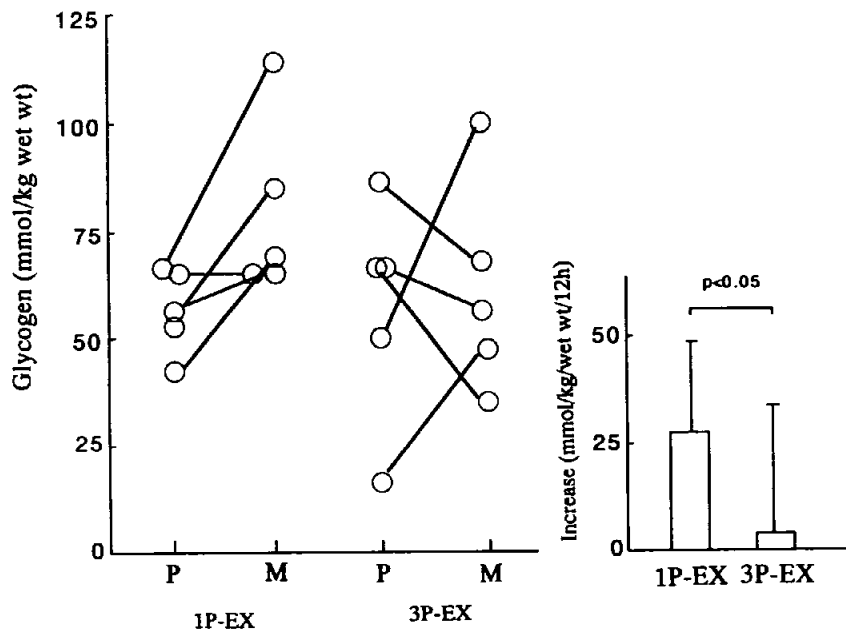


Fig. 1 Muscle glycogen contents postexercise (P) and 12 h after exercise (M) (left), and the difference between P and M (Increase) (right). An evening meal was consumed within 1 h postexercise (1P-EX) or from 3 h postexercise (3P-EX). Data: mean  $\pm$  SD ( $n=5$ ). See text for details.

差はなく (1P-EX vs. 3P-EX:  $54.5 \pm 11.9$  vs.  $59.9 \pm 25.3$  mmol/kg wet wt,  $n=8$ )。運動12時間後の翌朝の筋グリコーゲン含量は、運動直後の値に比べて、1P-EX で有意に上昇したが ( $84.2 \pm 22.6$  mmol/kg wet wt,  $n=8$ ,  $p<0.05$ )。3P-EX ではそのような傾向はなかった ( $67.3 \pm 20.8$  mmol/kg wet wt,  $n=8$ )。一方、運動直後と翌朝の筋グリコーゲン含量から求めた運動後12時間の筋グリコーゲン再補充は両群間に差が認められたが、有意な差ではなかった (1P-EX vs. 3P-EX:  $29.7 \pm 27.0$  vs.  $7.4 \pm 27.5$  mmol/kg wet wt/12 h,  $n=8$ , ns)。運動直後に比べて、翌朝の筋グリコーゲン含量が高くなった被験者は、1P-EX で8名中7名であったが、3P-EX では8名中4名にすぎなかった。

Table 2 には、血液データを示した。血清グルコース濃度は、運動直後と翌朝のいずれも両群間に差はなかった。血清 FFA 濃度と血清 3-OHBA 濃度のいずれも、運動直後には両群間に差が認められなかったが、翌朝のそれらの値は、3P-EX に比べて、1P-EX で有意に高かった。血清インスリン濃度は、運動直後と翌朝のいずれにも両群間に差はなかった。これらの傾向は、2回の実験に参加した被験者のみで計算しても変わらなかった。

#### IV. 考 察

本研究の結果、夕方の運動後の夕食摂取タイミングが3時間後の場合に比べて、1時間以内の場合には、翌朝までの筋グリコーゲン再補充速度が高いことがわかった。Ivy ら<sup>12</sup> は、グリコーゲンの基質となる糖質を、運動終了2時間後にとることに比べて、運動直後にとると運動後4時間の筋グリコーゲン再補充速度が高まることを明らかにしている。最近 Parkin ら<sup>13</sup> は、運動直後か運動2時間後かの食事タイミングの差はあったとしても、その後2時間毎に食事を追加すると運動8時間後の筋グリコーゲン含量には差はないと報告している。この結果から、Ivy ら<sup>12</sup> の認めた運動後4時間の筋グリコーゲン再補充速度の差は、それ以後食事を追加すると、無くなることが考えられる。一方、本研究では夕食後から翌朝まで絶食を続けたので、運動後の夕食摂取タイミングの違いは、運動終了後数時間以内だけでなく翌朝まで影響することが考えられる。

一方、翌朝の筋グリコーゲン含量の値には食事摂取タイミングの違いによって差が認められたが、有意な差ではなかった。激運動で低下した筋グリコーゲンの再補充については、摂取タイミン

**Table 2** Serum concentrations of glucose, free fatty acid (FFA), 3-Hydroxybutyric acid (3-OHBA), and insulin.

	1P-EX*		3P-EX	
	Postexercise*	Morning	Postexercise	Morning
Glucose (mg/100ml)	94.0±9.4	89.1±13.8	96.0±9.7	88.5±6.6
FFA (mmol/l)	0.89±0.48	0.40±0.21 <sup>‡</sup>	0.74±0.61	0.15±0.12 <sup>‡</sup>
3-OHBA (mmol/l)	0.185±0.158	0.065±0.041 <sup>‡</sup>	0.144±0.151	0.014±0.0011 <sup>‡</sup>
Insulin (μU/ml)	6.7±2.1	7.6±3.0	12.5±15.7	9.1±3.9

\*Details see text. Mean ± SD (n=8). <sup>‡</sup>Significant difference between 1P-EX and 3P-EX (p<0.05).

グに加えて、どのような糖質源をどれくらい与えるか<sup>1,13,33)</sup>も重要である。これに関連して、運動直後から30～60分間の非インスリン依存的に筋への糖輸送が促進しグリコーゲン再補充速度の高い時期と、それに続くインスリン依存的に筋への糖輸送が行われグリコーゲン再補充速度の比較的低い時期のあることが知られている<sup>18,25,26)</sup>。実際 Zawadzki ら<sup>36)</sup>は、運動直後に糖質とインスリン分泌を刺激するタンパク質を同時にとると、糖質だけをとるのに比べて、インスリン分泌がより高まり、運動4時間後の筋グリコーゲン含量が高まることを明らかにした。これ対して、最近 Tarnopolsky ら<sup>33)</sup>は、摂取エネルギーを同じにすれば糖質単独でも糖とタンパク質と脂肪の食べあわせでもインスリン分泌を同程度に刺激するので、グリコーゲン再補充速度に差はないとしている。これらのことから、運動後直ちに血糖上昇反応が大きく、インスリン分泌を刺激し易い High Glycemic Index<sup>34)</sup> (HGI)の糖質を摂取することは、筋への糖輸送の促進を通じて、回復期の筋グリコーゲン再補充速度を高めると考えられる<sup>12)</sup>。先に示した Ivy ら<sup>12)</sup>の結果も HGI のグルコースポリマー(体重1 kg あたり 2 g)を用いたことによるかもしれない。本研究ではご飯を糖質源としたが、これまでの研究で用いられているグルコースポリマーやコーンフレークのGI値120～140に比べて、ご飯のGI値は60～80にしかすぎない<sup>35)</sup>。一方、翌朝までの12時間の回復に対して、4.6±0.1g/kg 体重(4.55-4.87g/kg bw, n=11)の糖質を与えたが、これまでの多くの研究が用いている24時間内に7-10g/kg 体重の糖質を与えるのに比較すると不十分な量であるとは考えられない<sup>2,3,10,13,37)</sup>。ま

た、血糖とインスリン濃度の結果には食事摂取タイミングの影響による差はなかった(Table 2)。これらのことを考えあわせると、本研究で、翌朝の筋グリコーゲン含量に食事摂取タイミングの影響が無かった理由には、GIの値が小さいご飯を糖質源としたことが一部関係していると考えられる。

ところで、運動により筋グリコーゲン含量が低下すればするほど、その後の回復期の筋グリコーゲン再補充が加速することは古くより知られた事実であり<sup>14,38)</sup>、その理由として筋の糖輸送体 GLUT4 の細胞膜への移動<sup>5)</sup>とそのタンパク合成の促進<sup>27)</sup>、またグリコーゲン合成酵素活性の上昇<sup>14)</sup>などが明らかにされている。最近 McCoy ら<sup>19)</sup>は、運動後の筋グリコーゲン再補充が運動直後の筋グリコーゲン含量に反比例するとともに、糖輸送体 GLUT4 のタンパク量が直接に関係していることをヒトで明らかにした。Price ら<sup>35,26)</sup>は、運動直後の筋グリコーゲン含量がおよそ40mmol/kg 湿重量以下であると運動直後の非インスリン依存的筋グリコーゲン再補充速度が非常に高く、それ以上であると逆に極端に低いことを明かにしている。本研究では、運動前の筋グリコーゲン含量を測定してはいないので、運動により筋グリコーゲン含量が十分低下したかどうかはわからない。しかし、運動負荷として最大酸素摂取量の約75% (74±6 %  $\dot{V}O_{2max}$ )、50分間のベース走に加え、レジスタンス運動も負荷したが、上述の値に比較して、運動直後の筋グリコーゲン含量がおよそ55-60mmol/kg 湿重量であり筋グリコーゲン含量が十分に低下したとは思われない。これまでの研究から、外側広筋の筋グリコーゲンは、自転車エ

ルゴメーターやローラー上の競技自転車シュミレーションによる運動負荷により容易に低下するの比べて、レジスタンス運動やランニングでは比較的低下しないようである<sup>7,21,22,28</sup>。

血液データでは、翌朝の遊離脂肪酸とケトン体の濃度に食事摂取タイミングの違いが有意に認められた。動物をもちいた研究から、肝臓グリコーゲン濃度と血中遊離脂肪酸およびケトン体濃度の間に負の関係があることは良く知られた事実である<sup>30</sup>。したがって、食事摂取タイミングの違いは翌朝の肝臓のグリコーゲン濃度に影響する可能性が考えられたが、本研究からはわからない。おそらく、夕方の食事からの絶食時間の長さの違いが、脂肪(酸)代謝に影響したものと思われる<sup>11</sup>。

## V. 要 約

本研究では、夕方の激運動後の食事摂取タイミングについて、運動後1時間以内にとる場合と運動3時間後にとる場合とで、翌朝(朝食前・空腹時)の筋グリコーゲン再補充に差があるか否かに焦点をあてて検討した。

1. 健康な男子学生11名をランダムに2群に分け、夕方(16:00-18:00時)に10kmを50分で走るペース走を負荷し、それに加えてウエイト・トレーニング(ベンチプレス、ハーフスクワット; 最大筋力の約80%, 5-10回, 3セット)を負荷した。1群の被験者には運動終了1時間以内(18:45-19:00時)(1P-EX)に、もう1群の被験者には運動終了3時間後(21:00時)(3P-EX)に、調製食(ご飯+レトルトカレー; 糖質 $4.65 \pm 0.07$ g/kg体重)を10-15分間で摂取させた。毎回の運動直後とその翌日の早朝の2回にわたって、各被験者の右大腿外側広筋より局所麻酔下にディスポーザブル自動生検装置を用いて筋サンプルを採取した。なお、被験者のうち5名は両条件とも、また残りの6名の被験者は3名ずつに分けそれぞれの条件を1回だけ行わせた。

2. 両条件とも参加した5名の被験者では、運動直後の筋グリコーゲン含量は両タイミング間に差はなかった(1P-EX vs. 3P-EX:  $58.9 \pm 11.8$  vs.  $58.9 \pm 27.3$ mmol/kg wet wt)。運動12時間後の翌朝の筋グリコーゲン含量は、運動後1時間以内に食事をとった場合に上昇したが有意ではなく(1P-EX:  $81.0 \pm 20.0$ mmol/kg wet wt), 運動3時間後にとった場合にはそのような傾向はなかった

(3P-EX:  $62.5 \pm 24.0$ mg/g wet wt)。運動直後と翌朝の筋グリコーゲン含量から求めた運動後12時間の筋グリコーゲン再補充速度は両タイミング間に差が認められた(1P-EX vs. 3P-EX:  $2.28 \pm 2.0$  vs.  $0.30 \pm 2.87$ mmol/kg wet wt/12h,  $p < 0.05$ )。この傾向は、条件を1回だけ行った6名のデータを加えてもほぼ同様であった。

## 謝辞

本研究の一部は文部省科学研究費基盤研究(C)課題番号80114081によった。

## 引用・参考文献

1. Van Den Bergh AJ, Houtman S, Heerschap A, Rehner NJ, Boogert HJ, Van Den, Oeseburg B, and Hopman MTE (1996): Muscle glycogen recovery after exercise during glucose and fructose intake monitored by <sup>13</sup>C-NMR. *J Appl Physiol* 81: 1495-1500.
2. Burke LM, Collier GR, and Hargreaves M (1993): Muscle glycogen storage after prolonged exercise: effect of the glycemic index of carbohydrate feedings. *J Appl Physiol* 75: 1019-1023.
3. Burke LM, Collier GR, Beasley SK, Davis PG, Fricker PA, Heeley P, Walder K, and Hargreaves M (1995): Effect of coingestion of fat and protein with carbohydrate feedings on muscle glycogen storage. *J Appl Physiol* 78: 2187-2192.
4. Burke LM, Collier GR, Davis PG, Fricker PA, Sanigorski AJ, and Hargreaves M (1996): Muscle glycogen storage after prolonged exercise: effect of the frequency of carbohydrate feedings. *Am J Clin Nutr* 64: 115-119.
5. Coderre L, Kandror KV, Vallega G, and Pilch PF (1995): Identification and characterization of an exercise-sensitive pool of glucose transporters in skeletal muscle. *J Biol Chem* 270: 27584-27588.
6. Costill DL, Bowers R, Branam G, Sparks K (1971): Muscle glycogen utilization during prolonged exercise on successive days. *J Appl Physiol* 31: 834-838.
7. Costill DL, Sherman WM, Fink WJ, Maresh C, Witten M, and Miller JM (1981): The role of dietary carbohydrates in muscle glycogen resynthesis after strenuous running. *Am J Clin Nutr* 34: 1831-1836.
8. Costill DL, Pearson DR, Fink WJ (1988): Impaired muscle glycogen storage after muscle biopsy. *J Appl Physiol* 64: 224-2248.
9. Cote AM, Jiménez L, Adelman LS, Munsat TL

- (1992): Needle muscle biopsy with the automatic biopsy instrument. *Neurology* 42: 2212-2213.
- 10) Hawley JA and Burke LM (1997): Effect of meal frequency and timing on physical performance. *Br J Nutr* 77: S91-S103.
- 11) 堀田 昇, 堀田朋基, 石河利寛(1984): 炭水化物ローディングが健康な日本人青年男子の筋グリコーゲン量および自転車エルゴメーターによる持久的能力に及ぼす影響, *体力科学*33: 184-191.
- 12) Ivy JL, Katz AL, Cutler CL, Sherman WM, and Coyle EF (1988): Muscle glycogen synthesis after exercise: effect of time of carbohydrate ingestion. *J Appl Physiol* 64: 1480-1485.
- 13) Ivy JL, Lee MC, Bronzinick JT Jr, and Reed MJ (1988): Muscle glycogen storage after different amounts of carbohydrate ingestion. *J Appl Physiol* 65: 2018-2023.
- 14) Ivy JL and Kuo CH (1998): Regulation of GLUT4 protein and glycogen synthase during muscle glycogen synthesis after exercise. *Acta Physiol Scand* 162: 295-304.
- 15) Jozsi AC, Trappe TA, Starling RD, Goodpaster B, Trappe SW, Fink WJ, Costill DL (1996): The influence of starch structure on glycogen resynthesis and subsequent cycling performance. *Int J Sports Med* 17: 373-378.
- 16) Lo S, Russel JC, and Taylor AW (1970): Determination of glycogen in small tissue samples. *J Appl Physiol* 28: 234-236.
- 17) MacDougall JD, Ward GR, Sale DG, and Sutton JR (1977): Muscle glycogen repletion after high-intensity intermittent exercise. *J Appl Physiol* 42: 129-132.
- 18) Mahlum S, Hostmark AT, and Hermansen L (1978): Synthesis of muscle glycogen during recovery after prolonged severe exercise in diabetic subjects. Effect of insulin deprivation. *Scand J Clin Lab Invest* 38: 35-39.
- 19) McCoy M, Proietto J, and Hargreaves M (1996): Skeletal muscle GLUT-4 and postexercise muscle glycogen storage in humans. *J Appl Physiol* 80: 411-415.
- 20) 水沼俊美, 菊石五月, 坂井堅太郎, 山本 茂, 山上文子, 木路修平, 河野 匡, 川野 因, 高橋保子 (1997): 一流中・長距離走選手の栄養指導, *体力科学*46: 383-388.
- 21) Pascoe DD, Costill DL, Robergs RA, Davis JA, Fink WJ, Pearson DR (1990): Effects of exercise mode on muscle glycogen restorage during repeated days of exercise. *Med Sci Sports Exerc* 22: 593-598.
- 22) Pascoe DD, Costill DL, Fink WJ, Robergs RA, and Zachwieja JJ (1993): Glycogen resynthesis in skeletal muscle following resistive exercise. *Med Sci Sports Exerc* 25: 349-354.
- 23) Parkin JAM, Carey MF, Martin IK, Stojanovska L, and Febbraio MA (1997): Muscle glycogen storage following prolonged exercise: effect of timing of ingestion of high glycemic index food. *Med Sci Sports Exerc* 29: 220-224.
- 24) Piehl K (1974): Time course for refilling of glycogen stores in human muscle fibres following exercise-induced glycogen depletion. *Acta Physiol Scand* 90: 297-302.
- 25) Price TB, Rothman DL, Taylor R, Avison MJ, Shulman GI, Shulman RG (1994): Human muscle glycogen resynthesis after exercise: insulin-dependent and -independent phases. *J Appl Physiol* 76: 104-111.
- 26) Price TB, Perseghin G, Duleba A, Chen W, Chase J, Rothman DL, Shulman RG, and Shulman GI (1996): NMR studies of muscle glycogen synthesis in insulin-resistant offspring of parents with non-insulin-dependent diabetes mellitus immediately after glycogen-depleting exercise. *Proc Natl Acad Sci USA* 93: 5329-5334.
- 27) Ren JM, Semenkovich CF, Gulve EA, Gao J, and Holloszy JO (1994): Exercise induces rapid increases in GLUT4 expression, glucose transport capacity, and insulin-stimulated glycogen storage in muscle. *J Biol Chem* 269: 14396-14401.
- 28) Roy BD and Tarnopolsky MA (1998): Influence of differing macronutrient intakes on muscle glycogen resynthesis after resistance exercise. *J Appl Physiol* 84: 890-896.
- 29) 齊藤 慎一, 河合美香(1996): トレーニング(練習)時間と食事のタイミング, *臨床スポーツ医学*13: 199-203.
- 30) Saitoh S, Chang H, Morinaga A, Lee SJ, Tagami K, and Suzuki M (1997): Effects of short-term dietary change from a high fat diet to a high carbohydrate diet and with or without energy restriction on muscle and liver glycogen stores in untrained rats. *Adv Exerc Sports Physiol* 3: 75-81.
- 31) Sherman WM and Wimer GS (1991): Insufficient dietary carbohydrate during training: does it impair athletic performance? *Int J Sport Nutr* 1: 28-44.
- 32) Simonsen JC, Sherman WM, Lamb DR, Dernbach AR, Doyle JA, and Strauss R (1991): Dietary carbohydrate, muscle glycogen, and power output during rowing training. *J Appl Physiol* 70: 1500-1505.
- 33) Tarnopolsky MA, Bosman M, MacDonald JR, Van-

- deputte D, Martin J, and Roy BD (1997): Postexercise protein-carbohydrate and carbohydrate supplements increase muscle glycogen in men and women. *J Appl Physiol* 83: 1877-1883.
- 34) Wolever TMS (1990): The glycemic index. (Ed.) Bourne GH (In) Aspects of some vitamins, minerals and enzymes in health and disease. *World Rev Nutr Diet*: 62. Karger, Basel, pp. 120-185.
- 35) Zachwieja JJ, Costill DL, Pascoe DD, Robergs RA, and Fink WJ (1991): Influence of muscle glycogen depletion on the rate of resynthesis. *Med Sci Sports Exerc* 23: 44-48.
- 36) Zawadzki KM, Yaspelkis BB 3rd, and IVY JL (1992): Carbohydrate-protein complex increases the rate of muscle glycogen storage after exercise. *J Appl Physiol* 72: 1854-1859.