

運動直後の給餌が筋グリコーゲン量の回復に及ぼす
影響：1日2回の間欠給餌ラットを用いて

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2015-05-01 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 山本, 章, 谷, 健二, 赤田, 信一 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00008373

運動直後の給餌が筋グリコーゲン量の回復に及ぼす影響

— 1日2回の間欠給餌ラットを用いて —

Effect of a meal immediately after prolonged exercise on muscle glycogen repletion in rats meal-fed twice a day

山本 章・谷 健二・赤田 信一

Akira YAMAMOTO, Kenji TANI and Shinichi AKADA

(平成12年10月10日受理)

Abstract

The purpose of this study was to investigate the effect of a meal immediately after prolonged exercise on muscle glycogen content during recovery.

Male 6 wk-old rats of Sprague-Dawley strain were fed meals twice a day at 08:00-09:00h and 20:00-21:00h. Rats were individually housed in a room maintained on a 07:00-19:00h light cycle and at a temperature of 21°C.

After about 4 weeks, rats swam for 3 hours from 00:00h and were randomly divided into two groups. Rats of Group1 were fed a meal at 08:00-09:00h. Rats of Group2 were fed one third of the meal immediately following exercise and remaining two third of the meal from 08:00h. Energy sources of rats were determined immediately postexercise, after 5 h, 9 h and 17 h of recovery.

Serum levels of glucose and lactate were not significantly different between the two groups at any recovery period. Serum FFA level after 9 h of recovery was lower in Group1 than in Group2. Liver glycogen content after 5 h of recovery was higher in Group2 than in Group1. Glycogen contents of soleus muscle and red gastrocnemius muscle after 5 h of recovery were higher in Group2 than in Group1. But white gastrocnemius muscle glycogen content was not significantly different between the two groups after any recovery period.

These results suggest that a meal immediately after exercise may effect the repletion of glycogen in liver and red skeletal muscle after 5 hours of recovery.

緒 言

筋グリコーゲンは長時間の有酸素的運動の重要な燃料であり (Ahlborg et al., 1967; Hermansen et al., 1967)、筋グリコーゲンの枯渇は疲労と関係している (Bergstrom and Hultman, 1967) ことが以前より指摘されており、運動前の筋グリコーゲンの貯蔵量を高めておくことと、運動中に脂肪酸の利用を高めてグリコーゲンの利用を節約することが、パフォーマンスを高めるためには重要であると考えられている。

一方、運動後の筋グリコーゲンの再補充については、長時間の激しい運動をして筋グリコー

ゲンを著しく低下させた場合は、その回復に少なくとも24時間はかかる旨指摘されている (MacDougall et al., 1977; Piehl, 1974)。従って、予選や決勝のあるスポーツでは当日あるいは翌日に予定される次の試合や練習までに速やかに回復を促すような栄養処方が重要である。

筋グリコーゲンの材料は糖質であり、糖質の摂取は合理的であるが、運動で減少したグリコーゲンの再補充の効果は糖の種類 (Bowtell et al., 2000) や食品のグリセミック・インデックス (Burke et al., 1993) 等によって異なり、運動直後から数回に分けて高糖質食を摂取した場合には、十分な量の糖をとることが回数の違いよりもグリコーゲンの回復に重要だと指摘されている (Burke et al., 1996)。

しかし、普通食の一部を運動直後に摂取した場合のグリコーゲンの回復効果についての検討は十分にはなされていない。

そこで、今回は、ラットを実験動物として用いて、普段通りの時刻、即ち運動終了5時間後から給餌する群と運動直後に普段の量の1/3を給餌し、5時間後に残りの2/3を給餌する群とを設け、両群間で筋グリコーゲン量の回復の違いが見られる否かを検討した。

方 法

1. 実験動物および飼育方法

実験動物は生後6週齢(42-44日齢)のJcl:SD系雄ラット(175.43±0.78g、日本クレア株式会社)を用いた。飼育室は07-19時を明期、19-07時を暗期とする12時間の明暗サイクルとし、室温は23°Cに調節した。

ラットは個別に飼育し、入荷日の15時から翌日の10時まで自由給餌し、その後、20時と08時から、2日間は2時間、次の2日間は1時間半、その後は1時間ずつ1日2回間欠給餌した。飼育は粉末飼料CE-7(糖質60%:日本クレア株式会社)を用い、摂食量は毎給餌後測定した。飲水は24時間自由に摂取させた。

実験開始5日前までに、水に慣れさせるため、すべてのラットに2日間、1日目は5分間、2日目は15分間泳がせた。

2. 実験手順と運動負荷方法

約4週間飼育後、飼育期間中と同様に給餌にする1群と運動直後にも給餌する2群とに分けた。

実験最終日は、20-21時に給餌した後、00時から3時間の遊泳運動を負荷した。その後、1群には運動終了5時間後の8時に普段通り給餌し、2群には運動直後の3時に給餌量の1/3を、5時間後の8時に残りの2/3を与えた。1群の運動5時間後の給餌量は2群の運動直後と5時間後の合計給餌量と体重当たり等量になるようにした。

遊泳は、前報(山本・谷, 1995)同様、水温35°Cで、直径約40cm、水深約40cmのポリバケツ内で一度に6匹ずつ実施した。

運動直後(3時)に6匹、運動5時間後(8時)と運動9時間後(12時)と運動17時間後(20時)に、両群それぞれ、6匹ずつ屠殺した。

3. 血清の分離と血清基質濃度の分析

屠殺後、体幹より血液を採取し、4°Cの冷暗所で1時間放置した後、3000rpmで15分間遠心

して血清を分離した。血清グルコースと乳酸濃度は、YSI MODEL 2300STAT GLUCOSE & L-LACTATE ANALYZER (Yellow Springs Instrument Co,Inc)、遊離脂肪酸 (FFA) 濃度は ACS-ACOD 法により TOSHIBA TBA-80FR 自動分析機で分析した。

4. 体組織グリコーゲン含量の分析

肝臓、ヒラメ筋、腓腹筋の赤色部位と白色部位を氷上で素早く摘出して、グリコーゲン含量を (Lo et al., 1970) の方法で分析した。

5. 統計的処理

数値は平均値±標準誤差で示した。差の検定は Student の t-test によった。

結 果

1. 飼育期間中の体重と摂食量

入荷時の体重は 175.4 ± 0.8 g、飼育期間中の初体重は 176.7 ± 1.0 g、最終体重は 299.2 ± 2.6 g、飼育期間中の体重増加量は 122.5 ± 2.7 gであった。

飼育期間中の総摂食量は 540.2 ± 6.7 gであり、08時～09時の摂食量は 9.3 ± 0.1 g/日で20時～21時の摂食量の 10.1 ± 0.1 g/日より有意に ($P < 0.001$) 低値を示した。

2. 胃の重量 (Fig. 1)

運動直後は 13.1 ± 1.6 gであった。運動5時間後の8時の時点では、運動直後に約3g給餌した2群 (10.9 ± 1.0 g) が給餌しなかった1群 (8.6 ± 1.1 g) より約2g重たかったが、両群間で有意差は見られなかった。9時間後の12時の時点では、8時に約5g給餌した2群 (11.9 ± 1.2 g) より8時に約8g給餌した1群 (12.5 ± 1.3 g) のほうが高値ではあったが、両群間で有意差は見られなかった。17時間後の20時の時点でも、2群 (2.9 ± 0.6 g) より1群 (3.9 ± 0.001 g) が高値であったが、両群間で有意差は見られなかった。

3. 血清基質濃度の変化 (Table 1)

血清グルコース濃度は運動直後で最高値を示したが、運動5時間後、9時間後、17時間後のいずれの時点でも、両群間で有意な差は見られなかった。

血清 FFA 濃度は運動直後に最高値を示し、9時間後の時点では1群が2群に比べて有意に ($p < 0.01$) 低値を示したが、5時間後と17時間後の時点では両群間で有意な差は見られなかった。

血清乳酸濃度はいずれの時点でも両群間で有意差は見られなかった。

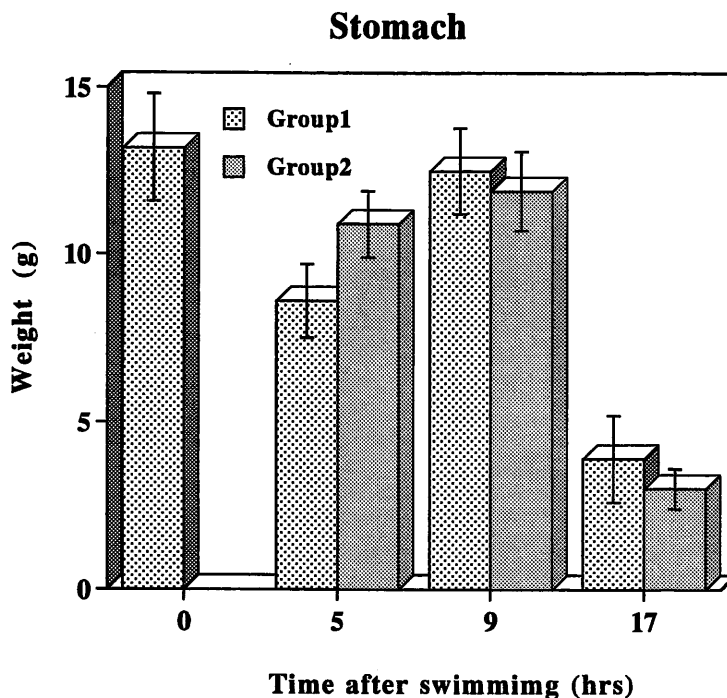


Fig. 1 Changes of stomach weight in rats. Values are means \pm SE.

Table 1. Serum levels of glucose, FFA and Lactate in rats

Group	Time after exercise (hrs)	Glucose (mg/dL)	FFA (μ Eq/L)	Lactate (mM)
	0 (03:00)	182.2 \pm 11.6	1176 \pm 133	3.2 \pm 0.4
Group 1	5 (08:00)	150.7 \pm 3.5	580 \pm 62	3.5 \pm 0.5
	9 (12:00)	163.8 \pm 5.0	267 \pm 20 ^a	4.6 \pm 0.6
	17 (20:00)	149.2 \pm 3.8	448 \pm 70	4.1 \pm 0.5
Group 2	5 (08:00)	158.3 \pm 5.2	560 \pm 82	3.8 \pm 0.5
	9 (12:00)	159.2 \pm 2.7	484 \pm 41	3.5 \pm 0.4
	12 (20:00)	156.2 \pm 6.1	433 \pm 26	2.9 \pm 0.2

Values were means \pm SE.

^a Significantly different from 9 hrs of Group2(P<0.01).

4. 組織グリコーゲン含量の変化 (Fig. 2)

肝臓のグリコーゲン含量は、運動直後 (3.2 \pm 0.5mg/g) に比べて5時間後の時点では両群とも有意に (p<0.001) 高値を示した。しかし、5時間後の時点では、運動直後に給餌されなかった1群 (22.1 \pm 0.9mg/g) より運動直後に給餌された2群 (33.7 \pm 2.4mg/g) の方が有意に (p<0.01) に高値を示した。9時間後の時点では、1群 (31.9 \pm 2.8mg/g) では5時間後の値に比べて有意に (p<0.01) 高値を示したのに対して、2群 (33.0 \pm 2.7mg/g) では5時間後とほぼ同値であり、両群間で差は見られなかった。17時間後の時点では、1群 (36.2 \pm 2.3mg/g) が2群 (27.4 \pm 3.3mg/g) より高値ではあったが有意差は見られなかった (p<0.07)。

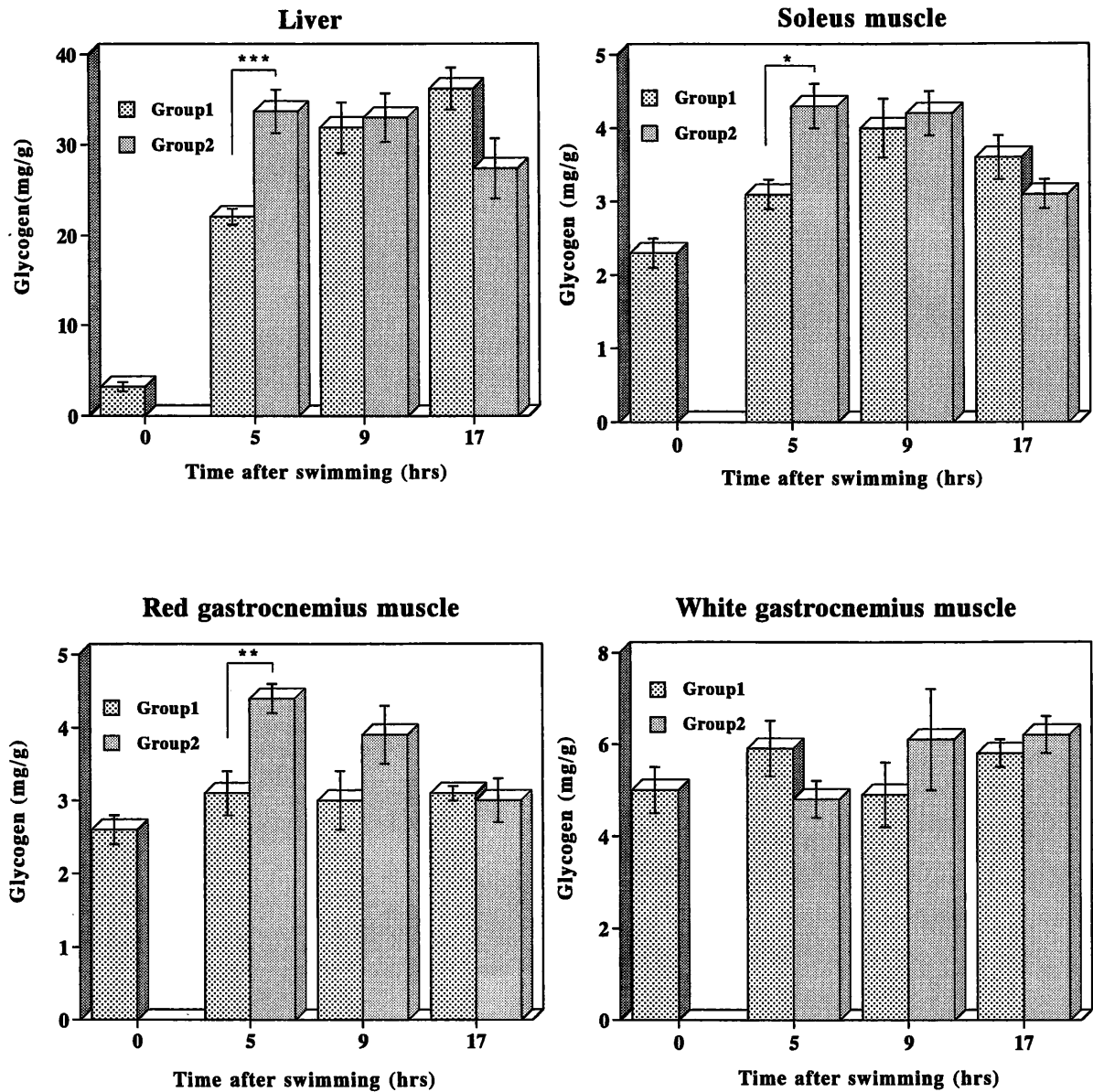


Fig. 2 Glycogen levels for liver, soleus muscle, red and white gastrocnemius muscle in rats. Rats were fed meals twice a day at 08:00-09:00h and 20:00-21:00h during breeding period. On the experimental day all rats swam for 3 hours from 00:00h. Rats of Group1 were given a meal as usual from 08:00h. On the other hand, rats of Group2 were given one third of the meal from immediately after the swimming and remaining two third from 08:00h. Values are means \pm SE.

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

ヒラメ筋のグリコーゲン含量は、運動直後 ($2.3 \pm 0.2 \text{mg/g}$) に比べて5時間後の時点では1群 ($p < 0.01$)、2群 ($p < 0.001$) とも有意に高値を示した。5時間後の時点では、1群 ($3.1 \pm 0.2 \text{mg/g}$) に比べて2群 ($4.3 \pm 0.3 \text{mg/g}$) が有意に ($p < 0.05$) に高値を示した。9時間後の時点では、1群 ($4.0 \pm 0.4 \text{mg/g}$) では5時間後より有意に ($p < 0.01$) 高値を示したが、2群 ($4.2 \pm 0.3 \text{mg/g}$) では5時間後と差が見られず、両群間で有意差は見られなかった。17時間後の時点では、1群 ($3.6 \pm 0.3 \text{mg/g}$) では9時間後と差が見られなかったが、2群 ($3.1 \pm 0.2 \text{mg/g}$) では9時間後より有意に ($p < 0.05$) に低値を示した。しかし、両群間で有意差は見られなかった。

腓腹筋の赤色部位のグリコーゲンは含量は、運動直後 ($2.6 \pm 0.2 \text{mg/g}$) に比べて5時間後の時点では、1群 ($3.1 \pm 0.3 \text{mg/g}$) では差が見られなかったが、2群 ($4.4 \pm 0.2 \text{mg/g}$) では有意に ($p < 0.001$) に高値を示した。5時間後の時点では、1群 ($3.0 \pm 0.4 \text{mg/g}$) に比べて2群 ($3.9 \pm 0.4 \text{mg/g}$) が有意に ($p < 0.02$) 高値を示した。しかし、9時間後の時点では1群 ($3.0 \pm 0.4 \text{mg/g}$) と2群 ($3.9 \pm 0.4 \text{mg/g}$) で有意差は見られなかった。17時間後の時点でも、1群 ($3.1 \pm 0.1 \text{mg/g}$) と2群 ($3.0 \pm 0.3 \text{mg/g}$) で有意差は見られなかった。

腓腹筋の白色部位のグリコーゲン含量は、時点間でも両群間でも有意差は見られなかった。

考 察

Ryan et al. (1993) は4時間の遊泳運動の3時間後も肝臓のグリコーゲンはほとんど回復せず、低値のままであったと報告し、Maehlem et al. (1978) は疲労困憊運動の回復の初局面では肝臓より骨格筋のグリコーゲンの回復の方が優先されると指摘した。しかし、本研究の運動5時間後の肝臓のグリコーゲン含量は運動直後に給餌されなかった1群でも運動直後に比べ著しく回復し、約7倍に増加していた。この相違の原因は、Ryan et al. (1993) は12時間絶食したラットを用いていたが、本研究では運動開始まで3時間しか絶食していないラットを用いたためであり、肝臓のグリコーゲンの材料になる腸からの糖質の供給に違いがあったことによるのではないかと考えられる。実際、運動直後の胃には餌が残っており、1群の5時間後の胃の重量は運動直後の重量に比べて約4.5gも低かった。運動直後に給餌された2群では、5時間後の肝臓のグリコーゲン量は運動直後の値の約10倍に増加し、1群に比べて約1.5倍も高値を示した。2群の5時間後の胃の重量は運動直後に比べ約2.2g低かったが、運動直後に約3g給餌したので、正味では約5.2g減少したことになる。正確な餌の量ではないが、腸からの糖質の供給は2群が1群より多かったと推測され、そのことが1群より2群で高値を示した大きな理由ではないかと考えられる。

しかし、9時間後の肝臓のグリコーゲン含量は両群間で差はなくなった。運動5時間後に普段通り給餌された1群も、運動直後に3分の1と運動5時間後に3分の2を給餌された2群も、5時間後から9時間後の間の給餌量を含めた胃の減少量は約4gであった。従って、1群では運動直後に給餌されなかったので5時間後では十分に回復せず、5時間後からの給餌によって9時間後には回復し、2群では運動直後に給餌されたので5時間後までに回復し、9時間後でもその値は変わらなかったのであろう。17時間後の肝臓のグリコーゲン含量は1群より2群が低値を示す傾向 ($p < 0.07$) にあったが、この理由は17時間後の2群の胃の中に餌はほとんど残っておらず、腸からの糖質の供給がなくなっていたためではないかと考えられる。

運動後の筋グリコーゲンの再補充に関連して、Nesher et al (1985) は血中グルコース濃度

が高いと筋でのグルコースの取り込みが高いと報告している。運動5時間後のヒラメ筋と腓腹筋の赤色部位のグリコーゲン含量は運動直後に給餌された2群が1群に比べ高値を示した。この理由は、運動直後から運動5時間後までの腸からの糖質の供給と運動5時間後の血清グルコース濃度が、有意差は見られなかったものの、2群が1群に比べて高値だったことによるのかもしれない。Goodyear et al (1996) は糖質摂取により血中インスリン濃度の増加が筋の GLUT-4 トランスポーターを細胞内プールから細胞膜へトランスロケーションし、グルコースの取り込みを高めると指摘し、Cohen (1986) はインスリン濃度の増加が筋のグリコーゲン合成にかかわる酵素の活性を増加し、ホスホリラーゼの活性を抑制することからグリコーゲンの回復を促すと報告している。本研究ではインスリン濃度を測定していないので明かではないが、糖質を60%含む餌を運動直後に給餌した2群ではインスリンの分泌が促された可能性が高い。そのことがグリコーゲン含量の回復を促したのかもしれない。いずれにしろ、運動直後に普通食が給餌されることで運動5時間後の筋グリコーゲンの回復が著しく高まることが明らかにされた。

運動5時間後のヒラメ筋のグリコーゲン量が、運動直後の値に比べて、運動直後に給餌されなかった1群でも有意に増加した理由は、前述した運動直後にも胃に残っていた餌が消化吸收され、糖質が供給され、血中グルコース濃度も正常範囲に維持されていたことに加えて、筋収縮即ち運動によりインスリンに依存しない GLUT-4の細胞内から細胞膜へのトランスロケーションが起こったためではないかと考えられる (Hansen et al, 1998; Ivy and Kuo, 1998)。Van Hall et al (2000) は運動後の回復初期20-30分間には、細胞膜に GLUT-4が残っているためグルコースの取り込みが高いと報告している。

腓腹筋の白色部位のグリコーゲン含量は両群間でも時点間でも差が見られなかった。前報(山本ら, 1986; 山本と谷1995) で指摘したように、持久的な遊泳運動ではヒラメ筋や腓腹筋の赤色部位のグリコーゲンが減少してから腓腹筋の白色部位のグリコーゲンが減少する。Kuo et al. (1999) はラットに6時間の遊泳運動を負荷した場合には、腓腹筋の白色部位のグリコーゲン含量も有意に減少したと報告しているが、本研究では遊泳時間が3時間と短かったため赤筋タイプの筋のグリコーゲンの利用だけでエネルギーが供給がほぼ満たされ、運動直後も高値を維持できたのではないかと考えられる。また、筋グリコーゲンの回復は主に運動後の筋グリコーゲンレベルによって調節されている (Price et al., 2000) ので、運動直後といずれの回復時点の間でもグリコーゲンレベルに差はみられなかったのではないかと考えられる。

運動9時間後と17時間後の筋グリコーゲン含量はいずれの筋でも両群間で差は見られなかった。運動後の筋グリコーゲンの回復には二つの局面があり、最初の局面は回復初期の45-60分間で回復が著しく、インスリンに依存していないが、第二局面はグリコーゲンが完全に再貯蔵されるまで24時間ゆっくりと続き、インスリンに依存していると報告されている (Maehlum et al., 1997; Price et al., 2000)。運動5時間後の時点では、1群では運動直後に給餌されなかったために、第二局面の糖質補給に伴うインスリン依存のグリコーゲン再貯蔵が不十分であり、そのことがグリコーゲン含量に群間で差をもたらしたが、9時間後と17時間後の時点では両群とも二つの局面に大きな差がなくなったため、群間で差が見られなくなったのではないかと考えられる。

以上のことから、今回のような持久性運動直後の給餌は5時間後のグリコーゲンの回復には大きな効果を与えるが、9時間後、17時間後のグリコーゲンの回復には大きな効果を与えない

ことが明らかにされた。

要 約

本研究は持久性運動直後の食事が筋グリコーゲンの回復に効果があるかどうかを明らかにするために行われた。

6週齢のSD系雄ラットを08-09時と20-21時の1日2回の間欠給餌で飼育した。飼育室は07-19時を明期とする12時間の明暗サイクルとし、室温は21度に調節した。約4週間後、00時から3時間の遊泳運動を行わせ、ラットを2群に分けた。1群には普段通り、08-09時に給餌し、2群には3分の1を運動直後に、残りの3分の2は08-09時に給餌した。そして、運動直後、5時間後、9時間後、17時間後の時点で運動のエネルギー源の変化を比較した。

結果は次の通りであった。

- 1) 血清グルコースと乳酸濃度は両群間でいずれの時点でも有意差は見られなかった。
- 2) 血清FFA濃度は運動9時間後の時点で1群が2群に比べ低値を示した。
- 3) 肝臓のグリコーゲン含量は運動5時間後の時点で1群に比べ2群が高値を示した。
- 4) ヒラメ筋と腓腹筋の赤色部位のグリコーゲン含量は運動後5時間後の時点で1群に比べ2群が高値を示した。
- 5) 腓腹筋の白色部位のグリコーゲン含量はいずれの時点でも両群間で差が見られなかった。

以上の結果から、運動直後の給餌は運動5時間後の肝臓や赤筋のグリコーゲンの回復には効果があることが示唆された。

引用文献

- Ahlborg B, Bergstrom J, Ekelund LG, and Hultman E (1967) Muscle glycogen and muscle electrolytes during prolonged physical exercise. *Acta Physiol Scand* 70, 129-142.
- Bergstrom J, Hermansen L, Hultman E, and Saltin B (1967) Diet, muscle glycogen and physical performance. *Acta Physiol Scand* 71, 140-150.
- Bowtell JL, Gelly K, Jackman ML, Patel A, Simeoni M, and Rennie MJ (2000) Effect of different carbohydrate drinks on whole body carbohydrate storage after exhaustive exercise. *J Appl Physiol* 88, 1529-1536.
- 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.
- Burke LM, Collier RG, Davis PG, Fricker PA, Sanigorski AJ, and Hargreaves M (1996) Muscle glycogen after prolonged exercise: effect of the frequency of carbohydrate feedings. *Am J Clin Nutr* 64, 115-119.
- Cohen P (1986) Muscle glycogen synthase. *Enzymes* 17, 461-497
- Goodyear LJ, Hirshman MF, Napoli R, Calles J, Markuns JF, Ljungqvist O and Horton ES (1996) Glucose ingestion causes Glut 4 translocation in human skeletal muscle. *Diabetes* 45, 1051-1056.
- Hansen PA, Nolte LA, Chen MM and Holloszy JO (1998) Increased GLUT-4 translocation

- mediates enhanced insulin sensitivity of muscle glucose transport after exercise. *J Appl Physiol* 85, 1218-1222.
- Hermansen L, Hultman E, and Saltin B (1967) Muscle glycogen during prolonged severe exercise. *Acta Physiol Scand* 71, 129-139.
- Ivy JL and Kuo C-H (1998) Regulation of Glut 4 protein and glycogen synthase during muscle glycogen synthesis after exercise. *Acta Physiol Scand* 162, 295-304.
- Kuo C-H, Hunt DG, Ding Z, and Ivy JL (1999) Effect of carbohydrate supplementation on postexercise GLUT-4 protein expression in skeletal muscle. *J Appl Physiol* 87(6), 2290-2295.
- Lo S, Russell JC, and Wegeles AW (1970) Determination of glycogen in small samples. *J Appl Physiol* 28, 234-236.
- MacDougall JD, Ward GR, Sale DG, and Sutton JR (1977) Muscle glycogen repletion after high-intensity intermittent exercise. *J Appl Physiol* 42, 129-132.
- Maehlum S, Hostmark AT, and Hermansen L (1997) Synthesis of muscle glycogen during recovery after severe exercise in diabetic and non-diabetic subject. *Scand J Clin Lab Invest* 37, 309-316.
- Maehlum S, Felig P, and Wahren J (1978) Splanchnic glucose and muscle glycogen metabolism after glucose feeding post-exercise recovery. *Am J Physiol Endocrinol Metab Gastrointest Physiol* 235, E255-E260.
- Nesher R, Karl SE, and Kipnis DM (1985) Dissociation of effects of insulin and contraction on glucose transport in rat epitrochlearis muscle. *Am J Physiol Cell Physiol* 249, C226-232.
- Piehl K (1974) Time course for refilling on glycogen stores in human muscle fibres following exercise-induced glycogen depletion. *Acta Physiol Scand* 90, 297-302.
- Price TB, Laurent D, Peteren KF, Rothman DL and Shulman GI (2000) Glycogen loading alters muscle glycogen resynthesis after exercise. *J Appl Physiol* 88, 698-704
- Ryan C, Ferguson K, and Radziuk J (1993) Glucose dynamics and gluconeogenesis during and after prolonged swimming in rats. *J Appl Physiol* 74, 2404-2411.
- Van Hall G, Shirreffs SM, and Calbet JAL (2000) Muscle glycogen resynthesis during recovery from cycle exercise : no effect of additional protein ingestion. *J Appl Physiol* 88, 1631-1636.
- 山本章・谷健二・国崎弘 (1986) 欠食が運動によるエネルギー源の変化に及ぼす影響. *東海体育科学* 8, 35-45.
- 山本章・谷健二 (1995) 給餌時刻の変更が運動のエネルギー源に及ぼす影響. *静岡大学教育学部研究報告 (自然科学編)* 45, 55-63.