運動前の食事組成が長時間運動中の肝臓及び筋グリコーゲンの 枯渇と脂肪分解能に及ぼす影響 —高炭水化物食と高脂肪食の比較—

鈴木 英 樹¹⁾ 辻 本 尚 弥¹⁾ 山 本 章²⁾

Effects of dietary composition of pre-exercise meal on liver and muscle glycogen depletion and lipolytic activity during prolonged exercise in rats: comparison of a high-carbohydrate diet and a high-fat diet

Hideki Suzuku¹, Hisaya Tsujimoto¹ and Akira Yamamoto²

Abstract

The purpose of this study was to investigate the combined effects of dietary composition of pre-exercise meal and feed-timing to liver and muscle glycogen depletion and lipolytic activity during prolonged exercise in rats.

Rats were meal-fed twice a day with a normal diet for 3 weeks. They were divided into two groups on the final day of the experiment. One group of the rats were given a high-carbohydrate (H-CHO) diet and the other group high-fat (H-FAT) diet. Then, each dietary group were divided two groups. One group of either dietary groups were loaded a bout of 2-h swimming exercise 3 hr after the meal. Another group of either dietary groups were started exercise 7 hr after the meal.

At the end of exercise serum concentration of glucose of that started exercise 3 hr after the meal was higher in H-CHO group than in H-FAT group. However, serum glucose levels in H-CHO group significantly decreased during exercise when started 3 hr after the meal as compared with H-FAT group. Glycogen contents in liver of both dietary groups significantly decreased during exercise. Although liver glycogen contents at the end exercise were significantly higher in H-CHO group that started exercise 3 hr after the meal than in H-FAT group, no significant difference was found between the groups 7 hr after the meal. Furthermore, no significant difference was found on glycogen contents of soleus muscle in both dietary groups at the end of exercise both 3 and 7 hr after the meal. Lipolytic activities in H-FAT group were significantly increased during exercise and there were no differences between two cases of the starting time. However these trends were not observed in H-CHO group.

From these results, it was suggested that effects of dietary composition of pre-exercise meal on the changes of liver and muscle glycogen depletion and lipolytic activity during prolonged exercise were different according to feed-timing.

(Japan J. Phys. Educ., 35: 341—348, March, 1991.)

目 的

持久性運動では、筋のグリコーゲンが一定量

以下に低下すると運動が持続できなくなり、また肝臓グリコーゲンの低下による低血糖によっても運動継続ができなくなる。このことから運

1) 中京大学大学院
〒470-03 愛知県豊田市貝津町床立101
2) 静岡大学教育学部
〒422 静岡県静岡市大谷836

1. Graduate School of Physical Education (Doctor Course), Chukyo University. Tokodate, Kaizu-cho, Toyota-shi, Aichi (470-03)
2. Faculty of Education, Shizuoka University. Ouya, Shizuoka-shi, Shizuoka (422)

動前に肝臓と筋のグリコーゲンを高めておくことが重要であるとされている。しかし生体のエネルギー量からみるとグリコーゲンの貯蔵を最大にしても、脂肪に比べはるかに少ないために、持久性スポーツで良い成績をおさめるためには、運動前に体組織グリコーゲン量を高めておき、しかも運動中に、脂肪酸の供給が高く維持され、グリコーゲンの消費を節約することが望ましいと考えられている¹⁸⁾。

食事組成と運動時の代謝との関係についての最近の研究では、高炭水化物食と高脂肪食で運動時の代謝が異なることが報告されている^{9),10),11)}。また、食事組成の違いに注目した報告以外に、食後の経過時間と運動のエネルギー源の変化との関係も検討されている²³⁾。

これらは、運動時のエネルギー源の変化に及ぼす要因として運動前の食事内容（組成）と摂食から運動開始までの時間を関連づける必要性を示している。そこで、本研究では、ラットを用いて、運動前に高炭水化物食あるいは高脂肪食を給餌し、摂食からの時間が異なる2時点より遊泳運動を負荷した場合に、食事組成の違いと摂食からの時間が運動中のグリコーゲン消費と脂肪分解能に及ぼす影響を検討した。

方 法

実験動物として7週齢のJcl:SD系雄ラット（日本クレア，東京）63匹を用いて、08—09時と20—21時の1回2回の間欠給餌下にステンレス製ワイヤーケージを用いて個別飼育した。飼料は粉末CE-2（日本クレア，東京）を用い、飲水は自由摂取とした。飼育室は19—07時を暗期とする明暗サイクルとし、室温は24℃に調節した。

上記の条件下で3週間飼育後、実験食給餌直前の20時に7匹屠殺し、残りのラットを体重の平均が等しくなるように2群に分けた。20—21時に、1群には実験食として高炭水化物食（H-CHO群）を、他の1群には高脂肪食（H-FAT群）をそれぞれ給餌した。その際の給餌量は1時間以内に食べられるようにするために、通常の摂取量の85%とした。運動前の値を得るため、食後3、7時間後の00、04時に両群各々7匹ずつ屠殺し、運動後の値を得るために、ラットに摂食3時間後あるいは7時間後から、2時間の遊泳運動を負荷した後02、06時に両群各々7匹ずつ屠殺した。この実験条件を図1に示した。

遊泳運動は、水温35℃、内径約40cm、水深40cmの水槽内で一度に6匹あるいは7匹のラッ

Fig. 1. This figure shows experimental schedules. Rats were kept with described condition for 3 weeks. Control group was killed before meal. H-CHO group ate high carbohydrate diet at 20—21h. H-FAT group ate high fat diet at 20—21h. Each group killed at 02 and 06h was performed 2-h swimming.

トを遊泳させた。運動強度は、中等度であったと考えられる¹⁶⁾。遊泳運動に慣らす目的で、予め15分間の遊泳運動を3週間の飼育期間中に2回経験させた。高炭水化物食は粉末飼料 CE-2をベースにコーン・スターチを加え、総カロリーの74.8%を炭水化物、7.2%を脂肪を占めるに調合した。高脂肪食は粉末飼料 CE-2をベースにコーン・スターチと大豆油を加え、総カロリーの42.0%を炭水化物、40.0%を脂肪が占めるように調合した。なお、蛋白質は両群共に18.0%になるよう調合した。

屠殺後、直ちに採集した体幹血液は4℃で1時間放置後、4℃で2,500rpmで遠心して血清を分離し、Glucose Oxidase 法 (Glucose B-Test: 和光純薬工業 K.K.)により血清グルコース、前畑と中¹³⁾の方法により遊離脂肪酸 (FFA), Fletcher⁴⁾の方法により中性脂肪(TG)の分析を行った。

血液採集後、直ちに肝臓とヒラメ筋を摘出し、

グリコーゲン含量を Lo, et al.¹²⁾の方法で分析した。

また脂肪分解活性は、副睪丸組織より約100 mgの組織片を摘出し、1.9mlの Krebs Ringer bicarbonate buffer (2% Bobine serum albumin, pH 7.4) 中、37℃で毎分120—130回、1時間振盪下に、メディウム中に放出された脂肪酸放出量で表した¹⁴⁾。

差の検定は Student の t-test によった。

結 果

1. 血清グルコース, FFA, TG 濃度の変化(図2)

血清グルコース濃度は、摂食前の値と比べて、運動前の摂食3時間後と7時間後のいずれの食餌群の値を有意な変化が認められなかった。血清グルコース濃度の値は、摂食3時間後からの運動後、H-CHO 群が H-FAT 群に比べて有意 ($p<0.05$) に高値を示したが、摂食7時間後か

Fig. 2. Changes in serum glucose, serum free fatty acid (FFA) and serum triacylglycerol (TG). Control group was killed before meal. H-CHO groups ate high carbohydrate diet at 20—21h. H-FAT groups ate high fat diet at 20—21h. Each group killed at 02 and 06h was performed 2-h swimming. *Difference between rats belonging H-CHO and H-CHO groups, or between rats killed before and after swimming at $p<0.05$; ** $p<0.01$; *** $p<0.001$. Significantly different from 20h (a $p<0.001$, b $p<0.05$). Significantly different from 00h (c $p<0.001$, d $p<0.01$).

Fig. 3. Changes in glycogen content in soleus muscle and liver. Control group was killed before meal. H-CHO groups ate high carbohydrate diet at 20–21h. H-FAT groups ate high fat diet at 20–21h. Each group killed at 02 and 06h was performed 2-h swimming. *Difference between rats belonging H-CHO and H-FAT groups, or between rats killed before and after swimming at $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$. Significantly different from 20h (a $p < 0.001$, b $p < 0.01$). Significantly different from 00h (c $p < 0.001$, d $p < 0.05$).

らの運動後では、両群間で有意差は認められなかった。また、摂食7時間後からの運動後のH-CHO群の血清グルコース濃度は、運動前に比べ有意($p < 0.01$)に低値を示した。

血清FFA濃度は、摂食前の値に比べて摂食3時間後の値は、H-FAT群では有意($p < 0.05$)に高値を示したが、H-CHO群では有意($p < 0.001$)に低値を示した。また、摂食7時間後の値は、摂食前の値と比べて両群共に有意差は認められなかった。運動後の血清FFA濃度の値は、運動前に比べていずれの時点からの運動においても両群共に有意に高値を示した。

血清TG濃度は、摂食前の値に比べて摂食3時間後の値は両群共に有意($p < 0.05$, $p < 0.001$)に高値を示し、H-FAT群がH-CHO群に比べて有意($p < 0.05$)に高値を示した。また、

摂食7時間後の値は、両群共に摂食前の値と有意差は認められなかった。運動後の血清TG濃度は、いずれの時点においても両群間に有意差は見られなかった

2. 組織グリコーゲン量の変化 (図3)

ヒラメ筋のグリコーゲン量は、摂食前の値に比べて摂食3時間後の値は、両群共に有意($p < 0.001$, $p < 0.01$)に高値を示したが、摂食3時間後の値はH-CHO群がH-FAT群に比べて有意($p < 0.001$)に高値を示した。また、摂食7時間後の値は、H-CHO群で摂食3時間後の値と比べて有意($p < 0.001$)に低値を示したが、両群間で有意差は認められなかった。摂食3時間後からの運動後のヒラメ筋グリコーゲン量は、運動前の値に比べてH-CHO群のみ有意($p < 0.001$)に低値を示した。摂食7時間後から

Fig. 4. Changes in free fatty acid (FFA) released in epididymal adipose tissue. Control group was killed before meal. H-CHO groups ate high carbohydrate diet at 20–21h. H-FAT groups ate high fat diet at 20–21h. Each group killed at 02 and 06h was performed 2-h swimming. *Difference between rats belonging H-CHO and H-CHO groups, or between rats killed before and after swimming at $p < 0.05$. Significantly different from 20h (a $p < 0.001$, b $p < 0.05$). Significantly different from 00h (c $p < 0.01$).

の運動前の値と運動後の値には、両群間で差は見られなかった。

肝臓のグリコーゲン量は、摂食前の値に比べて摂食3時間後の値は、H-FAT群では差は見られなかったが、H-CHO群では有意 ($p < 0.001$) に高値を示した。摂食3時間後の値に比べて摂食7時間後の値は、H-CHO群で有意 ($p < 0.05$) に低値を示した。運動前の肝臓のグリコーゲン量は、いずれの時点においても、H-CHO群がH-FAT群に比べて有意 ($p < 0.01$, $p < 0.05$) に高値を示したが、運動後の値は、摂食3時間後から運動した場合、両群間の関係は運動前と同様だったが、摂食7時間後から運動を行った場合、両群間に有意差は認められなかった。

3. 副睾丸脂肪組織の脂肪分解活性 (図4)

脂肪酸放出量は、摂食前の値と摂食3時間後

の値に両群共に有意差は認められなかったが、摂食7時間後では両群共に有意 ($p < 0.001$, $p < 0.05$) に高値を示した。いずれの時点から運動を開始した場合にも運動前に比べて運動後の脂肪酸放出量は、H-FAT群で有意 ($p < 0.05$) な増加が認められた。

考 察

食事摂取から3時間経過した時点では、H-CHO群で肝臓及びヒラメ筋のグリコーゲン量の増加が見られたが、H-FAT群ではヒラメ筋にのみ増加がみられ、その増加もH-CHO群より少なかった。本研究結果は、これまでの報告^{2), 5), 25)}とほぼ同様であった。また、摂食3時間後における血清グルコース濃度は、摂食前の値と両食餌群共に変わらなかったのに対し、摂食3時間後の血清TG濃度は、H-FAT群で高値

を示した。Trout, et al.^{21),22)}はラットで胃内のグルコースは脂肪に比べ優先的に消失すると報告しており、特に摂食3時間後の両食餌群間の血清グルコース、TG濃度の違いは、食物由来の糖質が脂質に比べて早く消化吸収されたことと食餌中の脂肪量の絶対量の違いと考えられる。

組織グリコーゲン量の値が、特にH-CHO群で摂食3時間後と比べて食事摂取から7時間経過した時点で低くなっていたことは、すでにこの時点で摂取した糖質に由来するグリコーゲン合成のピークが過ぎたことを示すと考えられる。

Baldwin, et al.¹⁾はラットで中等度の持久性運動を行った場合の、疲労困憊の原因は、肝臓のグリコーゲンの枯渇と、それに伴う血清グルコース濃度の低下によると報告している。Strubbe and Alingh Prins¹⁹⁾は中枢神経系のエネルギー源として適当な血中グルコース濃度を維持するためには、運動前に肝臓にできるだけ多くグリコーゲンを蓄えておくことが重要であろうと報告している。摂食3時間後から運動を開始した場合、運動後の肝臓グリコーゲン量、血清グルコース濃度は共に、H-CHO群でH-FAT群に比べ高値を示した。これは、運動前の高炭水化物摂取がより血中グルコースを高く維持することが期待される。

Costill, et al.³⁾はヒトで、Hickson, et al.⁶⁾, Rennie, et al.¹⁷⁾はラットで、脂質代謝の亢進は、筋グリコーゲンの利用を節約すると報告している。一方、Bergström, et al.²⁾は運動による骨格筋のグリコーゲンの利用は、運動前のグリコーゲンの貯蔵量が多いほど著しいと報告している。

高炭水化物食の摂取は、血中インスリン濃度を高め⁵⁾、脂肪組織の脂肪分解を数時間にわたり抑える²⁴⁾ことが知られており、高脂肪食は、脂肪組織の脂肪分解を増加させる^{7),20)}ことが報告されている。また、Jansson and Kaijser⁹⁾はヒトで高脂肪食摂取後の運動は、高炭水化物食摂取後に比べて運動中のエネルギー供給における脂質の貢献の上昇を報告している。摂食7時間

後から運動を開始した場合、H-CHO群で血清グルコース濃度に運動前に比べ運動後は有意に低値を示したのに対し、H-FAT群では運動前後で有意な差は見られなかった。この理由は、H-CHO群では運動前後で肝臓グリコーゲン量の減少がH-FAT群に比べ著しく、脂肪分解活性は変わらなかったのに対し、H-FAT群では運動前後での脂肪分解活性が高まっていたことより、H-CHO群ではエネルギー源を糖質に強く依存し、H-FAT群ではエネルギー源をより脂質に依存していたため糖の減少を抑えたと考えられる^{2),8),9),15)}。従って摂食7時間後より運動を開始する場合、機能維持の立場から血中グルコースの維持は高脂肪食摂取により期待されると考えられる。

以上のことから、運動前の食事内容によって運動中のエネルギー供給経路が影響を受けること、食事組成のみならず摂食から運動開始までの時間が運動のエネルギー供給経路に強く影響する要因となることが考えられ、持久性運動を行う場合に高いパフォーマンスを獲得するためには、食事と運動開始タイミングは食事内容を十分考慮しなければならないことが示唆された。

要 約

本研究は、ラットを用いて運動前に高炭水化物食あるいは高脂肪食を給餌し、摂食後、異なる2時点より持久性運動を負荷した場合のエネルギー源の消長に及ぼす影響を検討した。生後7週齢の雄ラットを1日2回の間欠給餌で3週間飼育後、運動前に高炭水化物食あるいは高脂肪食を給餌する群とに分け、両群共摂食3時間後あるいは7時間後から2時間の遊泳運動を負荷した。そして、両群の運動のエネルギー源を遊泳前後で測定した。

1) 血糖値は、摂食3時間後からの運動後でH-CHO群で高値を示した、摂食7時間後からの運動でH-CHO群で減少し、高脂肪食群では変化しなかった。

2) 血清FFA濃度は、摂食3時間後から、7

時間後からのいずれの運動においても両群共に増加し、運動後の値も両群間で差が認められなかった。

3) 肝臓のグリコーゲン量は、摂食3時間後からの運動で両群共に減少したが、運動後の値はH-CHO群がH-FAT群より有意に高く、摂食7時間後からの運動においても両群共に減少したが、運動後両群間で違いは認められなかった。

4) 脂肪分解能は、いずれの時点からの運動においてもH-FAT群で亢進していた。以上のことから、運動のエネルギー供給経路は、運動前の食事内容の影響を受け、さらに、その影響は摂食から運動開始までの時間で異なることが示唆された。

引用・参考文献

- 1) Baldwin, K.M., Reitman, J.S., Terjung, R.L., Winder, W.W. and Holloszy, J.O., "Substrate depletion in different types of muscle and in liver during prolonged running," *Am J Physiol*, 225: 1045—50, 1973.
- 2) Bergström, J., Hermansen, L., Hultman, E. and Saltin, B., "Diet, muscle glycogen and physical performance," *Acta Physiol Scand*, 71: 140—50, 1967.
- 3) Costill, D.L., Coyle, E., Dalsky, G., Evans, W., Fink, W. and Hoopes, D., "Effect of elevated plasma FFA and insulin on muscle glycogen usage during exercise," *J Appl Physiol*, 43: 690—95, 1977.
- 4) Fletcher, M.J., "A colorimetric method for estimating serum triglycerides," *Clin Chim Acta*, 22: 393—97, 1968.
- 5) Galbo, H., Holst, J.J. and Christensen, N.J., "The effect of different diet and of insulin on the hormonal response to prolonged exercise," *Acta Physiol Scand*, 107: 19—32, 1979.
- 6) Hickson, R.C., Rennie, M.J., Conlee, R.K., Winder, W.W. and Holloszy, J.O., "Effect of increased plasma fatty acid on glycogen utilization and endurance," *J Appl Physiol*, 43: 829—33, 1977.
- 7) Holloszy, J.O. and Booth, E.W., "Biochemical adaptation to endurance exercise in muscle," *Ann Rev Physiol*, 38: 273—91, 1976.
- 8) Jansson, E., "On the significance of the respiratory exchanges ratio after different diets during exercise in man," *Acta Physiol Scand*, 114: 103—10, 1982.
- 9) Jansson, E. and Kaijser, L., "Effect of diet on the utilization of blood-borne and intramuscular substrates during exercise in man," *Acta Physiol Scand*, 115: 19—30, 1982.
- 10) Jansson, E. and Kaijser, L., "Effect of diet on muscle glycogen and blood glucose utilization during a short-term exercise in man," *Acta Physiol Scand*, 115: 341—47, 1982.
- 11) Jansson, E. and Kaijser, L., "Leg citrate metabolism at rest and during exercise in relation to diet and substrate utilization in man," *Acta Physiol Scand*, 122: 145—53, 1984.
- 12) Lo, S., Russell, J.C. and Taylor, A.W., "Determination of glycogen in small tissue sample," *J Appl Physiol*, 28: 234—36, 1970.
- 13) 前畑英介・中 甫, 「2-(2-Thiazolylazo)-p-cresolを用いた遊離脂肪酸の比色定量」*臨床化学*, 1: 447—56, 1972.
- 14) Saitoh, S. and Suzuki, M., "Nutritional design for repletion of liver and muscle glycogen during endurance exercise without inhibiting lipolysis," *J Nutr Sci Vitaminal*, 32: 343—53, 1986.
- 15) Miller, W.C., Bryce, G.R. and Conlee, R.K., "Adaptation to a high-fat diet that increase exercise endurance in male rats," *J Appl Physiol*, 56: 78—83, 1984.
- 16) Oscai, L.B., Caruso, R.A. and Wergeles, A.C., "Lipoprotein lipase hydrolyzes endogenous triacylglycerols in muscle of exercised rat," *J Appl Physiol*, 52: 1059—63, 1982.
- 17) Rennie, M.J., Winder, W.W. and Holloszy, J.O., "A sparing effect of increased plasma fatty acid on muscle and liver glycogen content in the exercising rat," *Biochem J*, 156: 647—55, 1976.
- 18) Sherman, W.M. and Costill, D.L., "The marathon; Dietary manipulation to optimize performance," *Am J Sport Med*, 12: 44—51, 1984.
- 19) Strubbe, J.H. and Alingh Prins, A.J., "Reduced insulin secretion after short-term food deprivation in rat plays a key role in the adaptive interaction of glucose and free fatty acid utilization," *Physiol Behav*, 37: 441—45, 1986.
- 20) 鈴木正成・岡野五郎・下村吉治, 「高糖質食または高脂肪食摂取ラットの脂肪組織の脂肪酸放出能とPTU投与への反応」*栄養と食料*, 34: 335—40, 1981.
- 21) Trout, D.L., Putney, J.D. and Conway, E.S., "Relative rates of gastric emptying of glucose vs. fat in rats fed nonliquid meals," *Am J Physiol*, 234: E660—66, 1978.
- 22) Trout, D.L., Ryan, R.O., Bickard, M.C. and Bren-

- dza, D.J., "Gastric emptying of glucose and nutrient energy in meal-fed rats," J Nutr, 112: 1151-61, 1982.
- 23) 山本 章・磐井邦子・稲垣正男, 「摂食から運動開始時間の違いが持久性運動によるエネルギー源の消長に及ぼす影響」デサントスポーツ科学, 6: 265-71, 1985.
- 24) 山本 清, ホルモンと脂質の代謝, 共立全書, 1982, p. 55.
- 25) Zaragoza, N. and Felber, J.P., "Studies on the metabolic effects induced in the rat by a high fat diet," Eur J Biochem, 25: 89-95, 1972.

(平成2年1月24日受付)