

長時間の自転車こぎ運動時における糖質摂取パターンの違いがパフォーマンスと代謝に及ぼす影響

緒方美奈子、三浦 哉、的場 秀樹

INFLUENCE OF CARBOHYDRATE INGESTION PATTERN ON PERFORMANCE AND METABOLISM IN PROLONGED BICYCLE EXERCISE

Minako OGATA, Hajime MIURA and Hideki MATOBA

ABSTRACT

This study examined influence of carbohydrate ingestion pattern on performance and metabolism in prolonged bicycle exercise. Six male subjects cycled at lactate threshold level for 90min. Immediately after the prolonged exercise, the subjects were given performance test in which time to exhaustion was measured during bicycle exercise demanding oxygen consumption the double of lactate threshold level. During the prolonged exercise the subjects ingested either 10% carbohydrate (CHO) drink, 5%CHO drink, or water every 15min on five patterns; 1) 10%CHO drink at the first half followed by water at the second half, 2) 5%CHO drink at the first half and water at the second half, 3) 5%CHO drink throughout exercise period, 4) water at the first half followed by 10% CHO drink at the second half, 5) water at the first half and 5% CHO drink at the second half. When CHO drink was ingested at the first half, plasma glucose was significantly higher at 60min from the beginning of exercise than that of the pattern where CHO was ingested on the second half. There was not a significant difference in blood glucose level at the end of the prolonged exercise, with the values being around 5mM irrespective of the ingestion patterns. The different ingestion patterns induced no significant differences in performance time, the amount of CHO oxidized, and such gas parameters as oxygen consumption, minutes ventilation, respiratory exchange ratio.

Key Words; carbohydrate ingestion pattern, prolonged bicycle exercise, blood glucose level

徳島大学総合科学部 スポーツ科学教室

Laboratory of Sports Sciences, Faculty of Integrated Arts and Sciences, The University of Tokushima, Tokushima 770, JAPAN.

1. 緒言

血糖値レベルと筋および肝の貯蔵グリコーゲン量は持久的運動の重要な制限因子であること、および運動前に筋および肝の貯蔵グリコーゲンの量を増加させたり、運動中に糖質を補充することにより、持久的運動のパフォーマンスを向上させることが可能であることが報告されている (Bagby et al. 1978; Below et al. 1995; Bergstrom et al. 1967; Dill et al. 1932; Gollnick et al. 1974; Wahren et al. 1971; Wright et al. 1991)。また、運動中の糖質溶液の摂取に関する指針 (Gisolfi and Duchman 1992) によれば、1～3時間の競技中は6～8%の糖質溶液を1時間当たり600～1000mlを摂取することが望ましいとされている。しかし、指針では摂取のパターンに関しては特別な示唆は与えられていない。一方、実際の競技における糖質溶液の摂取のパターンは、競技の状況や個人の判断に左右されることが多いため多様である。例えば、運動開始から終了まで継続して糖質溶液を摂取する場合、あるいは、運動の前半や後半にしか糖質溶液を摂取しない場合もある。しかし、このような摂取パターンの違いが運動中の代謝や持久的パフォーマンスに及ぼす影響については明らかでない。

これまでに、運動中の外因性の糖質の利用率は摂取されてから1～1.3時間後に最大となることが PInary et al (1977) によって明らかにされている。彼らの研究から、我々は糖質代謝およびパフォーマンスの改善を目的とした長期間運動中の糖質の補給は運動の前半から行うことが必須であるとの仮説をたてた。

そこで、本研究では持久的運動の期間を前半と後半に二分し、運動中の糖質溶液の摂取パターンを、運動の全期間にわたって摂取する全期間型、運動の前半だけ摂取する前半型、運動の後半だけに摂取を行う後半型の3つに分け、糖質溶液の摂取パターンと濃度の違いが代謝や持久的パフォーマンスに及ぼす影響を調べた。

2. 研究方法

2.1 被検者

被検者は持久的トレーニングを行っていない健康な成人男性6名で、被検者の年齢は 23.5 ± 3.4 (平均値 \pm 標準偏差)才、身長 174.0 ± 8.5 cm、体重 65.5 ± 5.7 kg、最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2\max$) 53.3 ± 5.5 ml \cdot kg $^{-1}\cdot$ min $^{-1}$ であった。

2.2 最大運動テスト

糖質溶液の摂取をともなう自転車こぎ運動の強度設定のため、最大運動テストを行い、そして $\dot{V}O_2\max$ と乳酸性閾値 (LT) を求めた。各人のLTに相当する強度をその後の実験の運動強度とした。最大運動テストには、自転車エルゴメーター (コンビ社製) を用い、3分間の安静の後、0ワットの負荷から運動を開始した。その後、1分間に25ワットずつ負荷を増加させ、疲労困憊に至らせた。なお、ペダルの回転数は毎分60回転 (60rpm) とした。運動中は心拍数 (HR)、酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$)、換気量 ($\dot{V}E$)、血中乳酸濃度 (LA) を測定した。 $\dot{V}O_2\max$ は、1) $\dot{V}O_2$ にレベリング・オフがみられる、2) HRが年齢からみた推定最大値 ($220 - \text{年齢}$) の90%以上である、3) 呼吸交換比 (RER) が1.0以上である、以上の3つの基準のうちの2つ以上が満たされていることを条件とした。 $\dot{V}E$ の測定は運動中30秒毎に連続的に熱線式流量計 (RM-300:ミナト医科学) を用いて測定し、酸素 (O_2) および二酸化炭素 (CO_2) 濃度はそれぞれジルコニア素子方式および赤外線方式によるガス分析器 (MG-360:

ミナト医科学)を用いて分析した。乳酸測定のために1分おきに指尖より採血し、血液を遠心した後、血漿を自動乳酸分析器(YSI-Model 23L)により分析した。LTは運動負荷中のLAが安静水準から急増しはじめる変移点と定義し、Beaver et al. (1985)の方法に従って決定した。本実験の被検者のLTに相当する酸素摂取量($\dot{V}O_2@LT$)は $29.1 \pm 2.1 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ であった。

2.3 LT強度の90分間の自転車こぎ運動およびパフォーマンステスト

被検者は最大運動テストと同じ自転車エルゴメーターを使い、ほぼ一定の環境条件(室温 $15.06 \pm 2.2^\circ\text{C}$ 、気圧 $766.7 \pm 4.3 \text{ mmHg}$ 、湿度 $52.64 \pm 8.7\%$)で実験を行った。被検者には前日の飲酒、喫煙、および特別な運動を禁止し、実験開始12時間前までに食事を終わらせるように指示した。実験当日は朝食をとらずに実験室にくるようにした。入室後、約30分間安静にして、LT強度で90分間の自転車こぎ運動を行った。また、90分間の運動中は15分おきに、パフォーマンステスト後は直後に呼気ガスを採集し、呼気ガスパラメーター($\dot{V}E$ 、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ 、RER)を計測した。呼気ガスの採集の後、ヘパリン処理された採血管を用いて指尖より採血し、遠心分離によって得られた血漿を用いて血漿グルコース濃度(血糖値)と血漿遊離脂肪酸濃度(FFA)の測定をそれぞれ、グルコーステストワコー(和光純薬)とNEFFA-Cテストワコー(和光純薬)を用いて行った。溶液の摂取は呼気ガスの採集および採血の後に行った。90分間の運動を、開始から45分目までを前半、45分目から90分目までを後半と分け、5%グルコース溶液、10%グルコース溶液あるいは水のいずれかを5つの摂取パターンで、15分おきに体重1kgあたり2ml($131 \pm 1.3 \text{ ml}$)を摂取させた。また、同時に主観的運動強度(RPE)も測定した。

本研究で行った5つの摂取パターンは以下に示すとおりである。

試行1;前半の45分間に10%グルコース溶液を摂取させ、後半の45分間は水を摂取させる。

試行2;前半の45分間に5%グルコース溶液を摂取させ、後半の45分間は水を摂取させる。

試行3;前半、後半ともに5%グルコース溶液を摂取させる。

試行4;前半の45分間に水を摂取させ、後半の45分間は10%グルコース溶液を摂取させる。

試行5;前半の45分間に水を摂取させ、後半の45分間は5%グルコース溶液を摂取させる。

次にパフォーマンステストとして90分間の自転車こぎ運動の終了直後に200%LT強度で疲労困憊に至るまで運動を行わせ、そのタイムを測定した。被検者が規定された回転数を保てなくなった時点(50rpm以下)を疲労困憊と判定し、実験を終了した。

2.4 統計

データは全て平均値±標準偏差で示した。各条件間と条件内の経時変化の検定には、分散分析を用い、その結果、有意差が認められた場合にはScheffeのpost hoc testを適用した。本実験における統計的有意水準は5%未満とした。

3. 結果

3.1 血糖値およびFFA

運動時の血糖値およびFFAの変化を図1に示した。前半に糖質を摂取した試行1、試行2および試行3で血糖値は60分目にそれぞれ、 6.05 ± 0.36 、 5.57 ± 0.38 、 $5.79 \pm 0.28 \text{ mM}$ であ

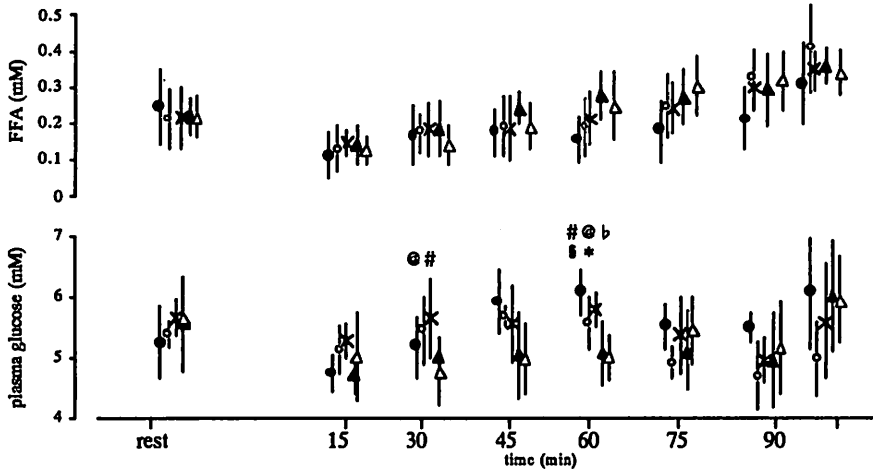


Fig.1. Changes in plasma glucose and FFA during prolonged bicycle exercise and performance test. Values are expressed as means \pm SD. ●: pattern 1, ○: pattern 2, ×: pattern 3, ▲: pattern 4, △: pattern 5. For details of the ingestion pattern, see methods and table 1. @: Significant difference between 1 and 5 ($p < 0.05$). #: Significant difference between 1 and 4 ($p < 0.05$). b: Significant difference between 2 and 5 ($p < 0.05$). §: Significant difference between 4 and 5 ($p < 0.05$). *: Significant difference between 2 and 4 ($p < 0.05$).

った。これらの値は、後半に糖質を摂取した試行4と試行5での値 (5.07 ± 0.51 , 4.99 ± 0.42 mM) より有意に高かったが、60分目以降、試行1、試行2および試行4では、血糖値は徐々に低下した。その後90分目には15分目の値に近いレベルに戻り、5試行間では有意な差は認められなかった (5.474 ± 0.24 , 4.68 ± 0.76 , 4.95 ± 0.38 , 4.95 ± 0.78 , 4.57 ± 0.23 mM)。試行1では、運動の30分目と60分目の血糖値の値は15分目の値 (4.73 ± 0.44 mM) よりも有意に高かった (6.05 ± 0.36 mM)。試行2と試行3でも試行1と同様の傾向が認められたが、統計的には有意ではなかった。運動の後半に糖質溶液を摂取した試行3と試行5では、血糖値に対して有意な影響は及ぼさなかった。FFAはいずれの条件でも90分目には運動開始時 (0.11 ± 0.7 , 0.13 ± 0.06 , 0.15 ± 0.05 , 0.14 ± 0.04 , 0.13 ± 0.04 mM) よりも有意に高値を示したが、各条件間には有意な差は認められなかった。

3.2 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}E$ 、RER、RPEおよび消費カロリー

いずれの試行でも $\dot{V}O_2$ は運動の開始より90分目まで上昇傾向がみられたが、90分目では各試行間で有意な差は認められなかった (図2)。 $\dot{V}E$ も $\dot{V}O_2$ と同様の变化を示した (図2)。RERはいずれの試行でも運動開始より90分目まで、低下傾向があったが、統計的には有意ではなかった (図3)。 $\dot{V}O_2$ とRERから計算した全消費カロリーは各試行間には有意な差は認められなかったが、試行1および試行2では運動の90分目に有意に上昇していた。糖質由来の消費カロリー (糖質の酸化量) は運動中に有意な变化を伴うことはなかった (図3)。RPE、心拍数ともに運動終了時には有意に上昇していたが各条件間に差は認められなかった。

3.3 パフォーマンステスト

パフォーマンスタイムは、いずれの試行間にも有意な差は認められなかった (表1)。

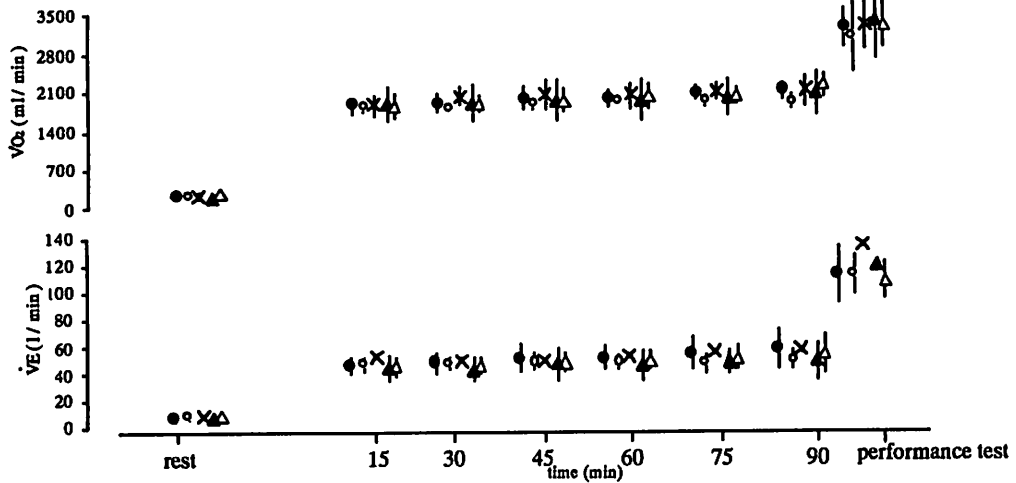


Fig. 2. Changes in $\dot{V}E$ and $\dot{V}O_2$ during prolonged bicycle exercise and performance test. Values are expressed as means \pm SD. ●: pattern 1, ○: pattern 2, ×: pattern 3, ▲: pattern 4, △: pattern 5. For details of the ingestion pattern, see methods and table 1.

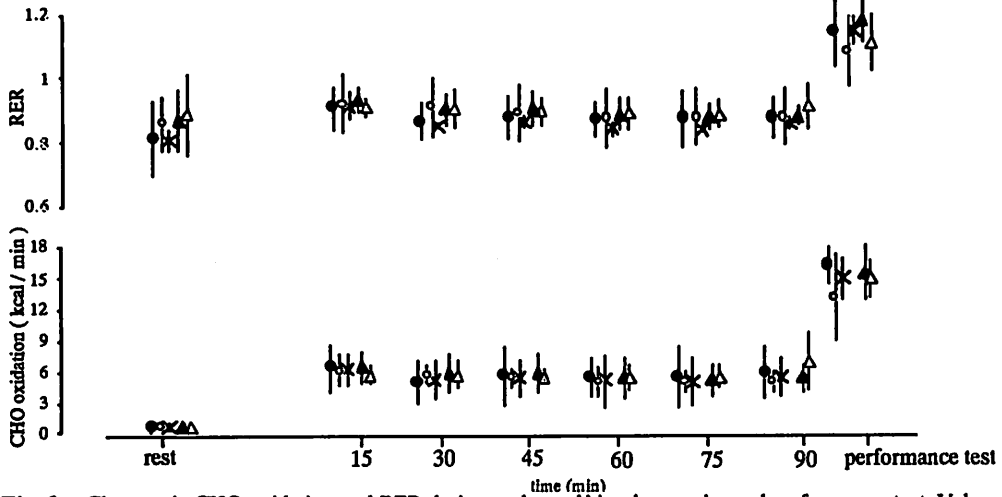


Fig. 3. Changes in CHO oxidation and RER during prolonged bicycle exercise and performance test. Values are expressed as means \pm SD. ●: pattern 1, ○: pattern 2, ×: pattern 3, ▲: pattern 4, △: pattern 5. For details of the ingestion pattern, see methods and table 1.

Table 1. Performance times in minutes for five ingestion patterns.

ingestion pattern	performance time (min)
1: 10% glucose drink —▶ water	2.70 ± 1.6
2: 5% glucose drink —▶ water	2.45 ± 1.9
3: 5% glucose drink —▶ 5% glucose drink	2.91 ± 1.6
4: water —▶ 10% glucose drink	2.10 ± 1.1
5: water —▶ 5% glucose drink	2.57 ± 1.4

Values are means ± SD.

4. 考察

4.1 グルコースの摂取が糖質代謝に及ぼす影響

本研究では2種類の濃度のグルコース溶液を90分間の運動の前半あるいは後半に摂取させることがパフォーマンスおよび代謝に及ぼす影響を調べた。その結果、本実験の条件下で濃度あるいは投与パターンの違いは、調べたパラメーターのほとんどに対して有意な影響を及ぼさなかった。しかし、運動の前半にグルコースを投与した場合には運動前半の血糖値を高く保つことができること、および投与の量あるいはパターンにかかわらず運動終了時の血糖値を約5 mMに保つ効果があることがわかった。この2点について、以下に考察を加える。

本実験では運動の前半にグルコース溶液を摂取した試行では後半にグルコース溶液を摂取した試行と比べて、60分目までの血糖値の値は有意に高い値を示した。一方、後半だけグルコース溶液を摂取した試行では、摂取後の血糖値の上昇はみられなかった。Pirnay et al. (1977) は摂取された外因性のグルコースの利用は30分以内に始まるが、全糖質の利用に対する貢献は約15%にとどまり、利用が最大になるには摂取後1~1.3時間を要すると報告している。今回の実験で、運動の前半にグルコースを投与したにもかかわらず、血糖値が最大値に達したのが運動開始後60分であったことは、摂取されたグルコースが吸収され、さらに血中へ出現するために必要な時間的遅れを反映していると考えられる。また、後半だけ摂取した試行で血糖値の上昇がみられなかったのは、運動の後半に糖質代謝における血糖への依存が高まることに加えて (Coyle and Montain 1992b)、上述のようなグルコースの血中への出現の時間的遅れによると考えられる。

本実験では、 RER と $\dot{V}O_2$ より計算された消費カロリーは90分間の運動を通して約10 kcal · min⁻¹で、このうち6 kcal · min⁻¹が糖質由来で、残りが脂質由来であった。糖質由来のエネルギーは、運動中にグルコースの補給がない場合は、肝グリコーゲンの分解あるいは糖新生で生じたグルコース (血糖) と筋グリコーゲンの燃焼に依存する (Hargreaves and Briggs 1988)。運動中にグルコース (外因性グルコース) が補給される場合は、補給されたグルコースもエネルギー源として利用できる (Bosch et al. 1994; Coyle 1995)。本研究で投与し

たグルコースが全糖質の消費量に対してどの程度貢献しているか、あるいは肝におけるグルコースの産生や筋グリコーゲンの分解にどの程度影響を及ぼしたかは明らかでない。しかし、運動中に外因性のグルコースを補給することは肝臓からのグルコースの放出を抑制する効果があること（肝グリコーゲンの節約効果）が報告されている（Bosch et al.1994）。したがって、本研究で運動中に摂取された糖質は、タイミングにかかわらず肝グリコーゲンの分解を抑制したと推察される。いずれの条件においても90分目の血糖値が約5 mMに保たれ、低血糖状態をきたすまでに至らなかったとの本研究の所見は、この推察を支持する。

4.2 グルコースの摂取量

運動中の糖質溶液の摂取に関してGisolfl and Duchman (1992) は、1～3時間の競技中は6～8%の糖質溶液を1時間当たり600～1000mlを摂取することを推奨している。また、Coyle and Montain (1992a;1992b) は、1時間を越える持久的運動では、脱水症や高温症あるいは運動後半に生じる低血糖症を防ぐため、1時間に30gから60gの糖質を600～1000mlの溶液として補給することが必要であると述べている。村岡 (1994) も同様の提言をしている。一方、本実験で運動中に摂取された溶液の量は、1時間当たり 524 ± 6.8 ml、グルコースの量は1時間当たり 26.2 ± 3.4 gあるいは 12.5 ± 1.5 gであった。このように、本実験で摂取された水とグルコースの量は、Gisolfl and Duchman (1992)、Coyle and Montain (1992a;1992b) や村岡 (1994) が推奨している量と比べると少なかった。しかし、本実験で用いた量でさえ、90分間の運動の終了時に、胃の膨満による不快感を訴える被検者がいた。したがって、1時間を越える持久的運動中に補給する水や糖質は、主に生理学的見地から推奨されている量をすべての者に機械的に当てはめることには無理があると考えられる。運動時の水あるいはグルコースの補給は競技および競技者の特性、運動の強度、持続時間、運動環境などの要因を考慮して競技者の負担にならないよう配慮することが、実際の競技の場では要求されるであろう。

5. まとめ

持久的運動時における糖質摂取パターンの違いが運動中の代謝と運動後の全力運動のパフォーマンスに及ぼす影響を調べるために、90分間の運動の前半あるいは後半に濃度の異なる糖質溶液を5つのパターンで6人の男性被検者に摂取させた。結果は以下のように要約できる。

- 1) 運動の前半に糖質が摂取されることによって前半の血糖値が高く保たれた。
- 2) いずれの条件でも運動終了時の血糖値は約5 mM程度に保たれた。
- 3) 糖質の摂取されるパターンの違いは90分の運動後の全力運動パフォーマンスに影響を及ぼさなかった。

したがって、持久的運動中に糖質を摂取することによって肝グリコーゲンの分解が抑制されることが推察された。

謝 辞

本研究を遂行するにあたって実験に協力された被検者各位に深謝する。

文 獻

Bagby GJ, Green HJ, Katsuta S and Gollnick PD (1978) Glycogen depletion in exercising rats infused with glucose, lactate, or pyruvate. *J Appl Physiol* 45:425-429.

Beaver WL, Wasserman K and Whipp BJ (1985) Improved detection of lactate threshold during exercise using a log-log transformation. *J Appl Physiol* 59:1936-1940.

Below PR, Rodriguez RM, Gonzalez AJ and Coyle EF (1995) Fluid and CHO ingestion independently improve performance during 1h of intense exercise. *Med Sci Sports Exerc* 27:200-210

Bergstrom J, Hermansen L, Hultman E and Saltin B (1967) Diet, muscle glycogen and physical performance. *Acta Physiol Scand* 71:140-150.

Bosch AN, Dennis SC and Noakes TD (1994) Influence of carbohydrate ingestion on fuel substrate turnover and oxidation during prolonged exercise. *J Appl Physiol* 76:2364-2372.

Coyle EF (1995) Substrate utilization during exercise in active people. *Am J Clin Nutr* 61:968-79.

Coyle EF and Montain SJ (1992a) Carbohydrate and fluid ingestion during exercise: are there trade-offs? *Med Sci Sports Exerc* 24:671-678.

Coyle EF and Montain SJ (1992b) Benefits of fluid replacement with carbohydrate during exercise. *Med Sci Sports Exerc* 24:324-330.

Dill DB, Edwards HT and Talbott JH (1932) Studies in muscular activity. VII. Factors limiting the capacity for work. *J Physiol* 77:49-57.

Gisolfi CV and Duchman SM (1992) Guidelines for optimal replacement beverages for different athletic events. *Med Sci Sports Exerc* 24:679-687.

Gollnick PD, Piehl K and Saltin B (1974) Selective glycogen depletion pattern in human muscle fibres after exercise of varying intensity and at varying pedalling rates. *J Physiol* 241:45-57.

Hargreaves M and Briggs CA (1988) Effect of carbohydrate ingestion on exercise metabolism. *J Appl Physiol* 65:1553-1555

Pirnay F, Lacroix M, Mosora F, Luyckx A and Lefebvre P (1977) Glucose oxidation during prolonged exercise evaluated with naturally labeled [^{13}C]glucose. *J Appl Physiol* 43:258-261.

村岡 功(1994) 液体摂取の運動生理学, スポーツ生理学 (森谷敏夫・根本 勇編), pp225-232, 朝倉書店.

Wahren J, Fellg P, Ahlborg G and Jorfeldt L (1971) Glucose metabolism during leg exercise in man. *J Clin Invest* 50:2715-2725.

Wright DA, Sherman WM and Dernbach AR (1991) Carbohydrate feedings before, during, or in combination improve cycling endurance performance. *J Appl Physiol* 71:1082-1088.

