

高濃度糖質溶液によるマウスリンスは 持久性運動能力を向上させるか？ — 認知機能および脳活動の観点から —

広島大学 長谷川 博
(共同研究者) 同 鬼塚 純玲
同 小川 景子

High Concentration of Carbohydrate Mouth Rinse Improve Endurance Exercise Capacity

by

Hiroshi Hasegawa, Sumire Onitsuka,
Keiko Ogawa
Hiroshima University

ABSTRACT

The aim of this study was to examine the effects of different concentrations of maltodextrin solution (CHO) mouth rinse on endurance exercise capacity, physiological and subjective responses. Nine endurance-trained subjects completed cycling trials at 55% of maximum to complete exhaustion. Mouth rinse was done every 5 min for 10 seconds. CHO concentrations are set for 0%, 6% and 18%. Endurance exercise capacity, physiological indexes (rectal temperature, mean skin temperature, heart rate, cerebral oxidation) and subjective indexes (rating of perceived exertion: RPE, comfort in the mouth) were measured every 5 min. Time to exhaustion with 18% (70.6 ± 6.3 min) was significantly longer than that with 0% (62.1 ± 5.1 min) and 6% (65.9 ± 5.5 min). Physiological indexes and RPE increased during exercise; however these are not significantly different between conditions. These results indicate

that high concentration of CHO mouth rinse improves endurance exercise capacity without increase in physiological responses. These results suggested that the increase in exercise performance by CHO mouth rise might be related to the improvement of brain activity during exercise.

要 旨

異なる糖質濃度のマウスリンスが持久性運動能力及び脳活動に及ぼす影響を検討することを目的とした。9人の成人男性の運動鍛錬者を対象とし、最大運動強度の55%の負荷の自転車エルゴメータ運動を疲労困憊まで行った。マウスリンスは運動開始後から5分毎に10秒間行い、マウスリンス溶液の糖質（マルトデキストリン）濃度は0%、6%、18%とした。持久性運動能力、生理的指標（直腸温、平均皮膚温、心拍数、脳の組織酸素飽和度）、主観的指標（主観的運動強度、口腔内不快感）を測定した。糖質濃度18%における運動継続時間（70.6 ± 6.3分）は、0%（62.1 ± 5.1分）及び6%（65.9 ± 5.5分）と比較し有意に延長した。生理的指標及び主観的運動強度は運動時に増大したが、条件間で有意な差は観察されなかった。カラーワードストループ課題を用いた認知機能は変化が観察されなかった。高濃度の糖質溶液を用いたマウスリンスは持久性運動能力を向上させ、生理的指標に条件間で差が観察されなかったことから、この運動能力の向上は中枢神経系が関与していることが示唆された。

緒 言

長時間運動時における糖質溶液摂取は脱水を防ぐだけでなく、運動能力を向上させることが知られている。この運動能力の向上は筋グリコーゲンを温存し¹⁵⁾、正常血糖を維持することが要因であると考えられている⁶⁾。しかし、血糖値が変化しない1時間程度の運動時に糖質溶液を摂取し

た実験においても運動能力の向上が観察されていることから⁴⁾、この運動能力の向上は代謝的要因ではなく、口腔内に存在するとされる糖質を感知する受容器から求心性信号が送られ、脳の報酬系に関わる領域を活性化させたことが関与している可能性がある。

Carterら（2004）はその後の研究において、1時間のサイクリングタイムトライアル中に糖質または生理食塩水を静脈注入したところ、糖質を静脈注入した条件では生理食塩水を注入した条件と比較して血糖値が2倍になったにも関わらず、運動能力に変化がなかったことを報告した⁵⁾。したがって1時間程度の運動では、糖質摂取による運動能力の向上は口腔内の糖質受容器を介した脳活動の活性が関与していることが示唆された。そこで彼らは糖質溶液を摂取しなくても運動能力が向上するのではないかと考え、糖質溶液を摂取せずに数秒間すすぎ吐き出す（糖質マウスリンス）方法を考案し、糖質マウスリンスとプラセボマウスリンスを比較した。その結果、1時間のタイムトライアルにおいて2.9%の持久性運動能力の向上を観察した⁵⁾。その後、多くの研究において糖質マウスリンスによる運動能力の向上が報告されてきた。これらの研究の中でマウスリンスの時間が運動能力に及ぼす影響も検討されており、Sinclairら（2014）は5秒間のマウスリンスよりも、10秒間のマウスリンスがより持久性運動能力を向上させることを報告した¹³⁾。このように口腔内の糖質受容器への刺激の強化方法としてマウスリンス時間の延長や糖質濃度の増加などが考えられるが、これまで糖質濃度に着目し、運動能

力に及ぼす効果を観察した研究はほとんど存在しない。そこで本研究では、異なる糖質濃度溶液でのマウスリンスが持久性運動能力に及ぼす影響、さらには脳活動に及ぼす影響について検討することを目的とした。

1. 研究方法

1.1 被験者

被験者は運動鍛錬者である健康な成人男性9名とした。被験者には実験前に起こりうるリスクを含め、書類と口頭によりインフォームド・コンセントを行った。本実験は広島大学大学院総合科学研究科の倫理委員会の承認を得て行った。

1.2 実験手順

実験は2回の予備実験と、①0%糖質濃度溶液（以下0%）、②6%糖質濃度溶液（6%）、③18%糖質濃度溶液（18%）の3回の本実験から構成された。全ての実験はそれぞれ7日間以上の間隔を空けて行い、サーカディアンリズムの影響を考慮するため各被験者は3回の実験を同一の時間帯に行った。本実験はカウンターバランスを考慮し、3つの条件の順番をランダムに行った。

本実験に先立ち、最大酸素摂取量および最大運動強度の測定を行った。最大運動強度の測定は常温環境下において漸増負荷テストを自転車エルゴメータ（COMBI社製、Aerobike75XLⅢ）を用いて行った。テストは5分間60Wの強度でウォーミングアップを行った後、2分毎に20Wずつ運動負荷を増加させ、被験者がこれ以上運動を継続できなと感じた時点、またはペダルの回転数が60rpmを維持できなくなった時点でテストを終了させた。さらに、本実験を行う前にファミリーリゼーションとして、本実験と同じ測定器具を用いて、最大運動強度の55%で30分の運動を行った。

本実験では被験者は4時間絶食後に実験室を訪問した。食事は1回目の実験前に食べた食事を次

の実験前に複製するよう被験者に依頼した。また、実験当日の体調を統一するため、被験者に実験開始24時間前からアルコールおよびカフェインの摂取と激しい運動を控えることも依頼した。全ての実験は室温23℃、相対湿度50%に設定された人工環境制御室（富士医科産業株式会社製、FLC-23S）にて自転車エルゴメータを使用して行われた。被験者は実験室に到着後、尿比重および裸体重を測定し、直腸温プローブの挿入を終えると、皮膚温プローブおよび心拍数モニタを装着した。実験室に移動し、10分間の座位安静後、最大運動強度の30%で5分間のウォーミングアップを行った。その後5分間の休息後最大の55%、60rpmの運動強度で疲労困憊に至るまでの運動を開始した。

各被験者は全プロトコルの運動開始5分後から疲労困憊まで5分毎に糖質濃度0%、6%または18%のマルトデキストリン溶液25mlが与えられた。被験者は溶液を口に含み10秒間すすいだ後にボウルに吐き出した。なお粉飴（HプラスBライフサイエンス17社）を用いて6%、18%のマルトデキストリン溶液を作成した。全ての溶液の甘味を統制するために人工甘味料（守山乳業株式会社、ノンカロリーシロップ、糖質0%）を入れた。また作成した溶液を23℃に維持するために恒温槽を用いた。運動前後においてストループカラーワード課題を用いた認知機能の測定を行った⁹⁾。各施行について反応時間、正答率を測定した。

1.3 測定項目

生理的指標として直腸温、平均皮膚温、心拍数、尿比重、体重、脳の組織酸素飽和度、皮膚血流を測定した。皮膚温は胸部、上腕部、大腿部にサーミスタプローブをテープで貼り付け測定した。直腸温および身体各部位の皮膚温は、データ収集型温度計（Gram Corporation社製、LT-8A）を用い

て1分毎に測定し、5分間の平均値で算出した。また、平均皮膚温はRobertsら(1977)の3点法を用いて算出した¹²⁾。算出式は以下のとおりである。

$T_{sk} = 0.43 \times T_1 + 0.25 \times T_2 + 0.32 \times T_3$ (T_{sk} : 平均皮膚温, T_1 : 胸部温, T_2 : 上腕部温, T_3 : 大腿部温)

心拍数はハートレートモニタで測定した(Polar社製, RS800CX)。体温と心拍数は運動開始20分前から運動終了10分後まで5分毎に測定した。体重は運動前後に測定した。尿比重はデジタル尿比重屈折計(アタゴ社製, UG-D)を用いて運動前後で測定した。血糖値は左手人差し指の指先より採血し、血糖値を測定した(TERUMO社製, MS-GR102)。皮膚血流はレーザー血流計(ブレインサイエンス・イデア社製, OMEGAFLOW FLO-C1)を用いて、前額部正中にて10Hzで測定した。脳の組織酸素飽和度は近赤外線分光法(NIRS)(OMEGAWAVE社製, BOM-L_{TR}W)を用いて、左前額部にて10Hzで測定した。レーザー血流計およびNIRSを用いて測定した値は、運動開始10分前から9分前の値の平均値を0として5分毎の平均値をベースラインからの相対変化率として算出した。

主観的運動強度(RPE)を運動開始5分後から疲労困憊時まで5分毎に全身、心肺、脚についてBorg(1973)のスケールを用いて測定した³⁾。また、温熱感覚は運動開始20分前から運動10分後まで5分毎にGaggeら(1963)のスケールを用いて測定した⁸⁾。口腔内快・不快感はTyler and Sunderland(2011)のスケールを用いて測定した¹⁶⁾。

1.4 統計処理

実験結果は全て平均値 ± 標準偏差で示した。運動継続時間、主観的指標(甘さ、粘り気、おいしさ)は一要因の分散分析を用い、直腸温、平均皮膚温、心拍数、温熱感覚、主観的運動強度は二要因(条件 × 時間)の繰り返しのある分散分析

を用いて、SPSS(Ver.17.0)より分析した。有意差が認められた場合には、対応のあるT検定により各群間の差の検定を行った。有意水準は5%未満とした。

2. 研究結果

各条件における運動継続時間を図1に示した。0%条件、6%条件と比較して18%条件で有意に運動継続時間が延長した($p < 0.05$)。また、0%条件と比較して6%条件で $8.4 \pm 3.8\%$ 、18%条件で $15.5 \pm 5.2\%$ 運動継続時間が延長した。

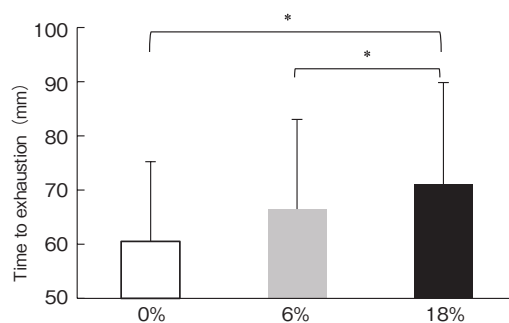


図1 Exercise capacity

*indicates significant difference between conditions ($P < 0.05$)

直腸温の経時変化を図2に示した。全条件において、運動完了0%時と比較して20%時から疲労困憊時まで有意に上昇した($p < 0.05$)。条件間に有意な差は観察されなかった。平均皮膚温は、全条件において運動完了0%時と比較して10%時から疲労困憊時まで有意に上昇した($p < 0.05$)。

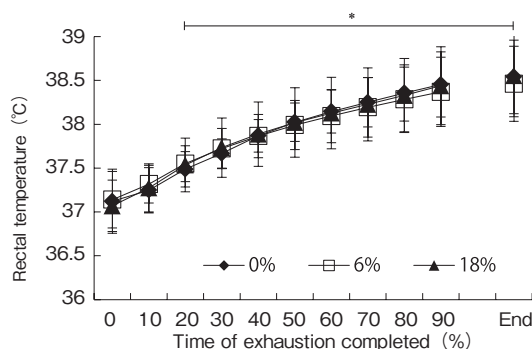


図2 Changes in rectal temperature

*indicates significant difference vs baseline ($P < 0.05$)

0.05) が, 条件間に有意な差は観察されなかった. 心拍数は全条件において運動完了 0% 時と比較して 10% 時から疲労困憊時まで有意に高い値を示した ($p < 0.05$) が, 条件間に有意な差は観察されなかった. 運動開始前, 運動開始後に測定した血糖値の変化を図 3 に示した. 運動前後, 条件間に有意な差は観察されなかった. 脳の組織酸素飽和度の経時変化率を図 4 に示した. どの条件も 20% 時まで減少したがその後, 徐々に増加した. 条件間に有意な差は見られなかった. 前額部皮膚血流量はどの条件も徐々に増加したが, 条件間に差は見られなかった. カラーワードストループ課題を用いた認知機能は運動による変化および条件間による差は観察されなかった.

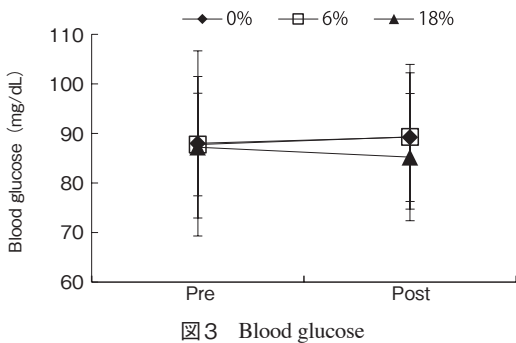


図3 Blood glucose

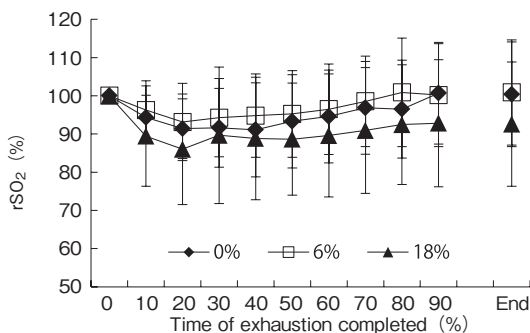


図4 Regional saturation of oxygen

全身の主観的運動強度は全条件において運動開始 10% 時と比較して 20% 時から疲労困憊時まで有意に高い値を示した ($p < 0.05$) が, 条件間に差は見られなかった. 心肺の主観的運動強度は運

動中わずかに増加したが有意な増加は見られなかった. 脚部の主観的運動強度は運動開始 10% と比較して 30% 時から疲労困憊時まで有意に高い値を示した ($p < 0.05$) が, 条件間に差は見られなかった.

3. 考 察

本研究の目的は, 糖質濃度の異なる溶液でのマウスリンスが持久性運動能力に及ぼす影響を調査することであり, 主な発見は糖質濃度 0% 条件, 6% 条件と比較した際に高濃度の 18% 条件で運動継続時間の延長を観察したことである. また, 糖質濃度依存的に運動継続時間が延長する傾向も観察された.

糖質マウスリンスに用量反応が存在することはさまざまな研究で報告されている. その中で Sinclair ら (2014) はマウスリンスの時間が持久性運動能力に及ぼす影響に着目し, 30 分のサイクリングタイムトライアルを行った¹³⁾. その結果, 10 秒間の糖質マウスリンス (20.4 ± 2.3 km) はプラセボマウスリンス (19.2 ± 2.2 km) よりも有意に走行距離を延長させた. また, Lane ら (2013)¹⁰⁾ と Beelen ら (2009)²⁾ は, 同じプロトコルを用いて糖質マウスリンスの効果を調査したが, Lane らの研究のみ糖質マウスリンスのエルゴジェニック効果を観察した. 両研究の相違点は, マウスリンス時間と糖質溶液の濃度であった. Beelen らは 6% の糖質溶液で 5 秒間マウスリンスを行ったのに対し, Lane らは 10% の糖質溶液で 10 秒間マウスリンスを行った. この結果の違いに関して Lane らはマウスリンスの溶液濃度と口腔内の溶液接触時間は, マウスリンスの有効性に影響を与える可能性があることを示唆している. 本研究では糖質濃度を増加させてマウスリンスの用量反応を検討した. その結果, 糖質マウスリンスにはマウスリンス時間だけでなく, 糖質濃度に関しても用量反応があることを明らかにし, 先行

研究による仮説を強化した。

本研究における運動能力向上のメカニズムは中枢神経系が関与している可能性がある。糖質摂取による運動能力向上は長時間運動時において筋グリコーゲンを温存し¹⁵⁾、正常血糖を維持することが要因であると考えられている⁶⁾。しかし、血糖値が変化しないとされる1時間程度の運動においても運動能力の向上を示した研究がいくつか存在し、この運動能力の向上は中枢神経系が関与している可能性がある。Carter ら (2003) は1時間程度の運動時に糖質溶液を摂取し運動能力を向上させた⁴⁾。その際に生理的指標として直腸温や平均皮膚温を測定しており、それらの指標に糖質溶液摂取による変化は観察されず、糖質溶液摂取による運動能力向上は中枢神経系が関与している可能性があることを示唆した。本研究においても直腸温や平均皮膚温などの生理的指標に条件間で差は観察されず、Carter らの結果と同様の結果が観察された。糖質マウスリンスの研究において直腸温や平均皮膚温を測定した研究はほとんどなく、本研究の直腸温や平均皮膚温は糖質マウスリンスの影響を受けず、これらの指標は糖質マウスリンスによる運動能力向上のメカニズムに関係がないという証拠を提供する。血糖値に関して本研究では、運動前後また条件間に差は観察されなかった。多くの糖質マウスリンスの先行研究において運動前後またはプラセボ、糖質マウスリンス間で血糖値に変化がないにもかかわらず運動能力を向上させることを報告している^{7, 11)}。そのため、本研究は先行研究の結果を支持する結果となった。以上のことから糖質マウスリンスによる運動能力向上は中枢神経系が関与していることが示唆された。

糖質マウスリンスによる脳活動が糖質濃度依存的に運動能力に影響を及ぼすことを調査した研究は存在しないが、異なる糖質濃度の溶液を摂取した際に fMRI を使用して脳活動を調査した研究が

存在する。Smeets ら (2005) は糖質濃度 8.3%、25% の糖質溶液を摂取した際の脳活動を調査し、濃度依存的に視床下部の脳活動が変化していることを観察した¹⁴⁾。またこの反応は吸収または代謝効果が表れる前に観察されたため、非代謝性である可能性があり、マウスリンスにおいても糖質濃度依存的に脳活動が変化している可能性がある。そこで本研究では、糖質濃度依存的に中枢性の指標に影響を及ぼすのかを調査するために脳の組織酸素飽和度を測定したが、条件間に差が観察されなかった。本研究で測定した脳の組織酸素飽和度は運動による体動が大きかったため測定値のばらつきが大きく、条件間の比較をすることができなかった。脳の組織酸素飽和度は神経活動に伴う脳血流の変化を計測しており¹⁷⁾、頭部の血流は運動中のわずかな変動も測定するためこのようなばらつきになった可能性がある¹⁾。今後、頭部を固定した状態で運動時における脳の組織酸素飽和度を測定するなど、糖質マウスリンスの中枢効果をさらに調査する必要があるだろう。

4. 結 語

高濃度の糖質マウスリンスは持久性運動パフォーマンスを向上させることが明らかになった。この効果のメカニズムは報酬や行動反応に関連した脳領域の活性に起因することが示唆された。

謝 辞

稿を終えるにあたり、本研究に対して研究助成を賜りました財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また本実験の被験者としてご協力いただいた方々、脳活動の測定にご指導いただいた電気通信大学の安藤創一先生に深謝致します。

文 献

- 1) Ando S., Yamada Y., Kokubo M., Reaction time to peripheral Visual stimuli during exercise. *J. Appl. Physiol.*, **108**(5) : 1210-1216(2010)
- 2) Beelen M., Berghuis J., Bonaparte B., Ballak S.B., Jeukendrup A.E., van Loon L.J., Carbohydrate mouth rinsing in the fed state: Lack of enhancement of time-trial performance. *Int. J. Sport Nutr. Exer. Met.*, **19**: 400-409(2009)
- 3) Borg G.A., Rating of perceived exertion and heart rates during short-term cycle exercise and their use in a new cycling strength test. *Int. J. Sports Med.*, **3**: 153-158(1982)
- 4) Carter J., Jeukendrup A.E., Mundel T., Jones D.A., Carbohydrate supplementation improves moderate and high-intensity exercise in the heat. *Eur. J. Physiol.*, **446**: 211-219(2003)
- 5) Carter J.M., Jeukendrup A.E., Jones D.A., The effect of carbohydrate mouth rinse on 1-h cycle time trial performance. *Med. Sci. Sports Exer.*, **36**: 2107-2111(2004)
- 6) Coyle E.F., Hagberg J.M., Hurley B.F., Martin W.H., Ehsani A.A., Holloszy J.O., Carbohydrate feeding during prolonged strenuous exercise can delay fatigue. *J. Appl. Physiol.*, **55**: 230-235(1983)
- 7) Fraga C., Velasques B., Koch A.J., Macahdo M., Paulucio D., Ribeiro P., Pompeu A.M.S., Carbohydrate mouth rinse enhances time to exhaustion during treadmill exercise. *Clin. Physiol. Funct. Imaging*, doi: 10.1111/cpf.12261.(2015)
- 8) Gagge A.P., Stolwijk J.A., Hardy J.D., Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. *Environ. Res.*, **1**: 1-20(1967)
- 9) 風間 彬, 高津理美, 長谷川 博. 体温上昇が持久的運動時における認知機能に及ぼす影響. 体力科学, **61**: 459-467(2012)
- 10) Lane S.C., Bird S.R., Burke L.M., Hawley J.A., Effect of a carbohydrate mouth rinse on simulated cycling timetrial performance commenced in a fed or fasted state. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, **38**(2) : 134-139(2013)
- 11) Pottier A., Bouckaert J., Gilis W., Roels T., Derave W., Mouth rinse but not ingestion of a carbohydrate solution improves 1-h cycle time trial performance. *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, **20**(1) : 105-111(2010)
- 12) Roberts M.F., Wenger C.B., Stolwijk J.A., Nadel E.R., Skin blood flow and sweating changes following exercise training and heat acclimation. *J. Appl. Physiol.*, **43**: 133-137(1977)
- 13) Sinclair J., Bottoms L., Flynn C., Bradley E., Alexander G., McCullagh S., Finn T., Hurst H.T., The effect of different durations of carbohydrate mouth rinse on cycling performance. *Eur. J. Sports Sci.*, **14**(3) : 259-264(2014)
- 14) Smeets P.A., de Graaf C., Stafleu A., van Osch M.J., van der Grond J., Functional MRI of human hypothalamic responses following glucose ingestion. *NeuroImage.*, **24**: 363-368(2005)
- 15) Tsintzas O.K., Williams C., Wilson W., Burrin J., Influence of carbohydrate supplementation early in exercise on endurance running capacity. *Med. Sci. Sports Exer.*, **28**: 1373-1379(1996)
- 16) Tyler C.J., Sunderland C., Cooling the neck region during exercise in the heat. *J. Athl. Train.*, **46**(1) : 61-68(2011)
- 17) 綿貫啓一 平山健太. NIRSを用いた随意運動および他動運動の脳賦活分析. *Calsonic Kansei Tech. Rev.*, **8**: 74-81(2011)