

水分摂取間隔の違いが暑熱下運動中の体温調節反応に与える影響

高取直志¹⁾ 長谷川博²⁾ 山崎昌廣²⁾ 小村堯²⁾

EFFECTS OF WATER INGESTION INTERVAL ON THERMOREGULATORY RESPONSES DURING EXERCISE IN A HOT, HUMID ENVIRONMENT

TADASHI TAKATORI, HIROSHI HASEGAWA, MASAHIRO YAMASAKI and TAKASHI KOMURA

Abstract

During exercise at high temperatures, body temperature increases, impairing exercise performance and resulting in heat illnesses. Water ingestion during exercise is a simple and practical strategy to prevent hyperthermia. In the present study, we examined the effects of water ingestion interval on thermoregulatory responses during exercise in a hot, humid environment (32°C, 80% relative humidity). Eight male university students performed a 60-min cycling exercise (60% of the maximal O₂ uptake) under four separate conditions; no drinking (ND), water ingestion (mineral water) at 5 (D5), 15 (D15), and 30 (D30) min intervals. The total volume of water ingestion (TWI) was identical during D5, D15, and D30, and equal to the amount of fluid lost in sweat during ND. TWI was divided equally by the number of drinking times in each experiment. During exercise, both rectal and mean skin temperature were lower in D5 than those in the other conditions ($p < 0.05$). There was no significant difference in total sweat loss between the four conditions, however, evaporative sweat loss and sweat efficiency (evaporative sweat loss/total sweat loss) were significantly ($p < 0.05$) higher in D5 than those in the other conditions. These results suggest that the shorter water ingestion interval increases evaporative sweating and attenuates higher body temperature during exercise in a hot, humid environment.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 2002, 51 : 317~324)

key word : body temperature, evaporative sweat loss, water ingestion, prolonged exercise

I. 緒 言

暑熱環境下での運動中は多量の発汗反応によって脱水が起こる。一般的に体重の約3%脱水すると運動パフォーマンスが低下すると言われている¹⁾。また、運動中の高体温は運動パフォーマンスの低下を引き起こす²⁾。そのため暑熱環境下での持久的運動において、高い運動パフォーマンスを発揮、あるいは維持するためには脱水や体温上昇レベルを低く抑えることが重要である。

暑熱環境下での運動中における暑熱障害、運動パフォーマンスの低下および脱水を防ぐために、運動中の水分摂取に関してこれまで多くの研究が

行われてきた^{3~9)}。McConnell et al. は水分摂取量を発汗量と同量 (FR-100)、発汗量の半分 (FR-50) および水分摂取なし (ND) で実験を行い、FR-100で体温上昇が他の条件と比べ有意に低かったと報告している⁸⁾。また、Criswell et al. は水と電解質溶液を飲水したときの影響について実験を行った結果、直腸温に有意な差はみられなかったが、血漿量、血漿中のナトリウム濃度および塩化物濃度については電解質溶液を飲水した時の方が有意に高く、運動に適した状態を維持できたと報告している⁷⁾。これらの研究から水分摂取量は体水分損失量と同量が望ましいとされており、また摂取水分の成分は汗による血中からの電解質損失を防

¹⁾ 広島大学大学院生物圏科学研究科
〒739-8521 東広島市鏡山1-7-1

²⁾ 広島大学総合科学部
〒739-8521 東広島市鏡山1-7-1

Graduate School of Biosphere Sciences, Hiroshima University
1-7-1 Kagamiyama, Higashihiroshima, 739-8521, Japan
Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University
1-7-1 Kagamiyama, Higashihiroshima, 739-8521, Japan

ぐために電解質溶液を摂取することが適当であるとされている。

一方, 摂取する水分の量や成分と同様に, 水分を摂取するタイミングも重要である。アメリカスポーツ医学会やアメリカ栄養士会の水分摂取に関するガイドラインでは, 運動中の摂取間隔については15分くらいという指標が報告されている^{1,10)}。しかし, 摂取間隔の違いが体温調節反応や運動パフォーマンスに与える影響について明らかにした研究は我々の知る限りでは見当たらない。水分摂取間隔を短くすると, 暑熱下での運動中のような脱水が起りやすい状態においては体水分損失を適宜補給することができ, 効果的な飲水を行うことができると考えられる。そこで本研究では暑熱下運動中の水分摂取間隔の違いが体温調節反応に及ぼす影響について明らかにすることを目的とした。

II. 方 法

A. 被験者

被験者は健康な男子学生 8 名(非鍛錬者)であった。被験者の身体的特性を Table 1 に示した。実験を行うにあたって, 被験者に本実験の目的および危険性についての十分な説明を行い, 実験の被験者となることの同意を得た。

B. 予備テスト

本実験に先立ち予備実験としてまず最大負荷テスト, その後発汗量テストを行った。最大負荷テストでは, 2分毎に 20 W ずつ負荷を増加させる漸増負荷法による自転車エルゴメータ運動(キャ

ットアイ社製, Model EC-1200)を行い, 最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)を測定した。発汗量テストでは本実験と同一の環境, 負荷で自転車エルゴメータ運動を60分間行い, 運動前後の体重変化から総発汗量を測定した。

C. 実験手順

本実験では水分状態を標準化するために被験者は実験の2時間前に500 mlのミネラルウォーター(大塚ペパリジ社製, CRYSTAL GEYSER)を摂取し, 各試行の運動前の状態を同一にした。各試行は4日以上の間隔をあげ, 日内変動を考慮し各被験者については同一の時間帯で実験を行った。被験者は実験準備室入室後に体重計(A & D社製, FW-150K, 精度 ± 20 g)で全裸体重を測定した。その後測定器具を装着し, 半袖シャツ, 短パンに着替えさせた。被験者は室温32°Cおよび湿度80%の実験室に入室し, 自転車エルゴメータ上で約5分間安静にし, 心拍数が落ち着いた時点で $\dot{V}O_{2max}$ 60%の自転車エルゴメータ運動を60分間開始した。水分摂取の条件は次の4つとし, ランダムに実験を行った。①0分時を飲水の始めとしその後5分間隔で摂取する条件(D5), ②0分時を始めとしその後15分間隔で摂取する条件(D15), ③0分時を始めとしその後30分間隔で摂取する条件(D30), ④無摂取条件(ND)とした。摂取水分は14~16°Cのミネラルウォーターとした。実験時の水分摂取量は発汗量テストで求めた各個人の総発汗量と同量とした。各試行内での1回の飲水量は同量とし, それぞれ 97 ± 7 ml (D5), 290 ± 20 ml (D15), および 579 ± 40 ml (D30)であった。運動終了後, 汗をよくふき取り, 再び全裸体重を測定した。

D. 各指標の測定方法

直腸温は医療用潤滑剤ヌルゼリー (Teikoku Medix 社製)を塗ったサーミスタを直腸内に10~12 cm 挿入し, 皮膚温は上腕部, 胸部, 大腿部および下腿部の4点に銅コンスタンタンの熱電対の先端を貼付し, データコレクタ(安立計器社製, AM-7002)を用いて毎分測定した。平均皮膚温は

Table 1. Characteristics of the subjects.

Subjects	Age (yrs)	Height (cm)	Weight (kg)	$\dot{V}O_{2max}$ (ml/min/kg)
T.T	23	179	72.1	34.0
H.K	23	174	71.3	34.6
H.Y	22	164	53.4	43.2
D.H	22	180	61.2	37.2
Y.A	22	179	59.3	39.3
S.W	22	164	58.4	44.7
H.N	21	169	55.9	45.4
Y.S	22	179	65.2	45.0
Means \pm SEM	22.1 \pm 0.2	174 \pm 3	62.1 \pm 2.6	40.4 \pm 1.8

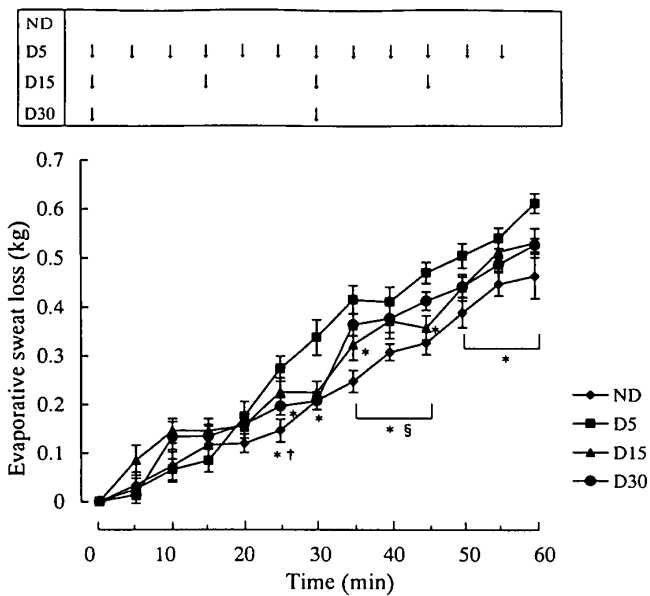


Fig. 2. The cumulative time courses of evaporative sweat loss during exercise in a hot, humid environment (32°C, 80%rh). Values are expressed as mean \pm SEM for 8 subjects. ND, D5, D15 and D30 indicate no drinking, water ingestion of 5, 15, and 30 min interval during exercise, and *, †, and § also indicate significant difference ($p < 0.05$) from D5, D15, and D30, respectively. Arrows in the upper portion of figure indicate the timing of water ingestion in each condition.

終了時の直腸温上昇は、それぞれ $2.16 \pm 0.12^\circ\text{C}$ (ND), $1.49 \pm 0.11^\circ\text{C}$ (D5), $1.66 \pm 0.07^\circ\text{C}$ (D15), および $1.70 \pm 0.07^\circ\text{C}$ (D30)であった。水分摂取を行った3条件を比較すると、D5はD30に比べ有意に上昇度が低く($p < 0.05$), D15と比べると上昇度が低い傾向にあった($p < 0.06$)。平均皮膚温は運動開始後10分間は急激に上昇し、その後は運動終了時まで緩やかに上昇した。各実験条件による運動終了時の平均皮膚温上昇度は、それぞれ $2.68 \pm 0.09^\circ\text{C}$ (ND), $2.20 \pm 0.10^\circ\text{C}$ (D5), $2.58 \pm 0.13^\circ\text{C}$ (D15), および $2.41 \pm 0.10^\circ\text{C}$ (D30)であった。運動開始50分以降ではD5はNDおよびD15に比べ有意に上昇度が低かった($p < 0.05$)。

Fig. 2は体重減少量の経時変化を、運動開始より各時間までの有効発汗量として5分毎に示したものである。有効発汗量は、水分摂取を行った条件で水分摂取を行わなかった場合より運動開始後25分以降で多い傾向にあった。水分摂取を行った条件間で比較すると、D5は常に高く維持されており、D15およびD30は飲水直後に増加する傾向が見られた。特に30分時の飲水に着目すると、

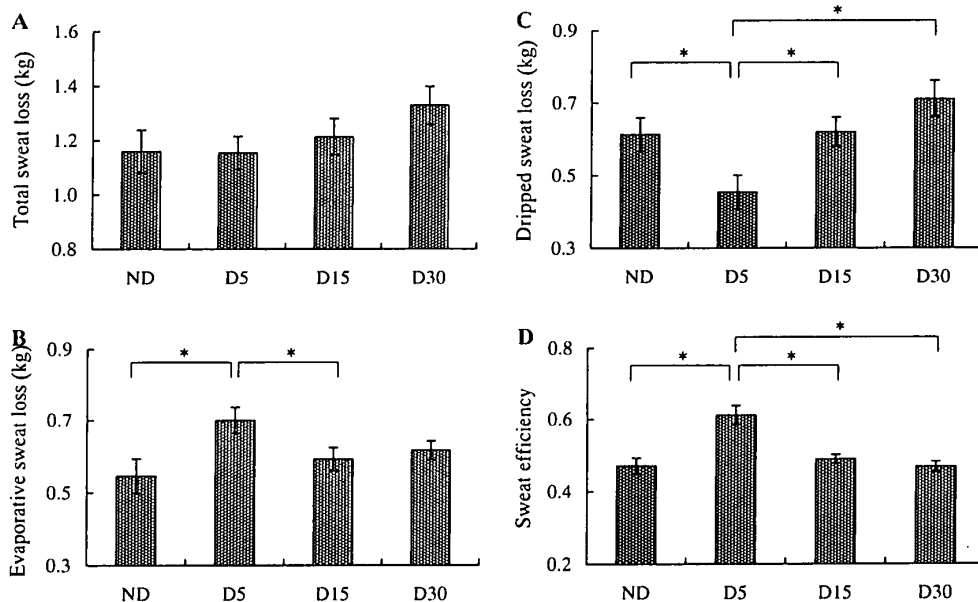


Fig. 3. Comparison of total sweat loss (A), evaporative sweat loss (B), dripped sweat loss (C) and sweat efficiency (evaporative sweat loss/total sweat loss; D) during 60 min exercise in a hot, humid environment (32°C, 80%rh). Values are expressed as mean \pm SEM for 8 subjects. ND, D5, D15 and D30 indicate no drinking, water ingestion of 5, 15, and 30 min interval during exercise, respectively. * indicates significant difference ($p < 0.05$) between conditions.

30分から35分での有効発汗量の増加が D30 と D15 で顕著な増加を示した。

総発汗量 (total sweat loss, A), 運動終了時の有効発汗量 (evaporative sweat loss, B), 無効発汗量 (drilled sweat loss, C), および発汗効率 (sweat efficiency, D) を Fig. 3 に示した。総発汗量は、それぞれ 1.16 ± 0.22 kg (ND), 1.15 ± 0.17 kg (D5), 1.21 ± 0.19 kg (D15), および 1.33 ± 0.20 kg (D30) であり、4条件間に有意な差はなかった。運動終

了時における有効発汗量は、それぞれ 0.55 ± 0.13 kg (ND), 0.70 ± 0.10 kg (D5), 0.59 ± 0.09 kg (D15), および 0.62 ± 0.07 kg (D30) であり、D5 は ND, D15 と比べ有意に高い値を示した ($p < 0.05$)。無効発汗量は、それぞれ 0.61 ± 0.13 kg (ND), 0.45 ± 0.13 kg (D5), 0.62 ± 0.11 kg (D15), および 0.71 ± 0.14 kg (D30) であり、D5 は ND ($p < 0.05$), D15 ($p < 0.05$), D30 ($p < 0.001$) と比べ有意に低い値を示した。発汗効率は、それぞれ 0.47 ± 0.06 (ND), 0.61 ± 0.07 (D5), 0.49 ± 0.04 (D15), および 0.47 ± 0.04 (D30) であり、D5 は ND, D15, D30 と比べ有意に高い値を示した ($p < 0.001$)。

RPE および Thirst level の経時的変化を Fig. 4 に示した。4条件とも RPE は運動中緩やかに上昇した。運動開始50分以降で ND は他の3条件と比べ有意に高い値であった ($p < 0.05$)。Thirst level は ND において運動中低下した。そのため運動開始20分以降で ND は他の3条件と比べ有意に低い値を示した ($p < 0.05$)。しかし、D5 では被験者はほとんどのどの渇きを感じず、また D15 と D30 では水分摂取後にのどの渇きが回復していた。運動中の心拍数の経時的変化は4条件間に有意な差はみられなかった。

IV. 考 察

運動中の水分摂取は体温上昇を軽減することが多くの研究で示されてきた^{3,4,8,9}。本研究においても運動中の直腸温上昇度は、水分摂取を行わない条件 (ND) と比べ、水分摂取を行った条件 (D5, D15, D30) の方が低い結果であり (Fig. 1), これまでの報告と同様に水分摂取の有効性を示したと言える。

また運動中の水分摂取の効果については、これまでは主に摂取量および摂取成分について多くの研究が行われてきたが、水分摂取の間隔については15分ぐらいという指標はあるものの^{1,10}、詳細な報告はほとんどない。Armstrong et al. は、極度の脱水状態 (hypohydration) と通常の体水分状態 (euhydration) の2条件を、さらに水分摂取を行う条件と行わない条件の4つに分けて実験を行った³。その結果、euhydration での水分摂取

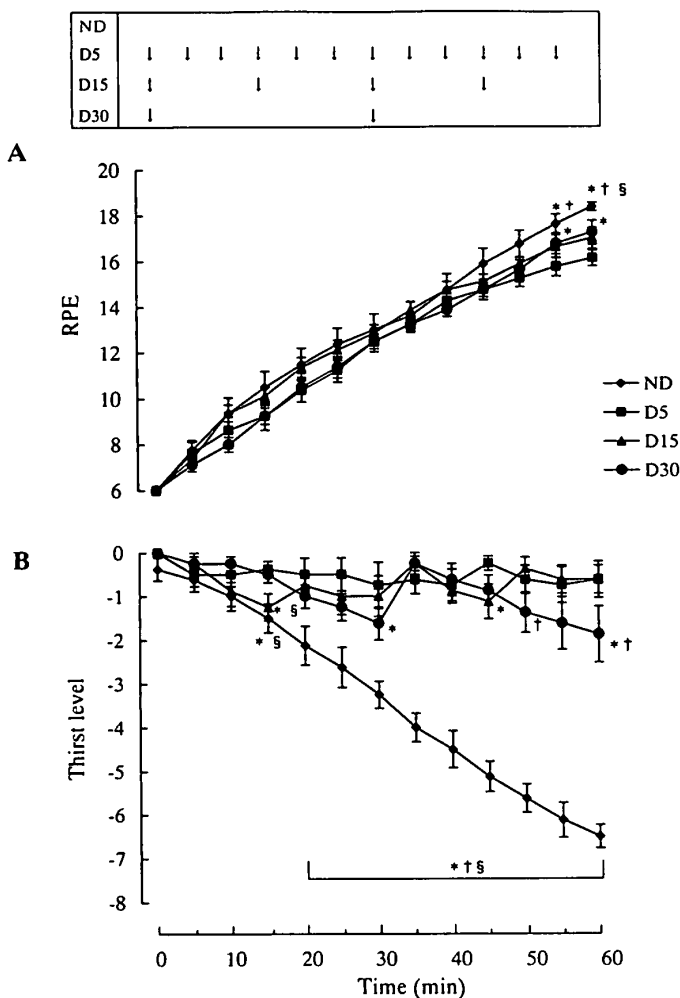


Fig. 4. The time courses of changes in rating of perceived exertion; RPE (A) and thirst level (B) during exercise in a hot, humid environment (32°C , $80\%\text{rh}$). Values are expressed as mean \pm SEM for 8 subjects. ND, D5, D15 and D30 indicate no drinking, water ingestion of 5, 15, and 30 min interval during exercise, and *, †, and § also indicate significant difference ($p < 0.05$) from D5, D15, and D30, respectively. Arrows in the upper portion of figure indicate the timing of water ingestion in each condition.

を行った条件で最も体温上昇が抑えられたため、暑熱環境下では運動中の体水分損失をいかに抑えることが重要であるかが示された。そのため水分を摂取する間隔は、本研究の D5 のようにこまめに行う方が体水分損失に見合った水分収支バランスの取れた効果的な補給ができると考えられた。実際に本研究では、水分摂取を行った条件において摂取間隔の短い D5 で発汗効率がよく (Fig. 3-D)、体温上昇が低かった (Fig. 1)。D5 の直腸温が他の 3 条件と比較して低く抑えられた原因は以下のことが考えられる。

暑熱環境下での主な熱放散の手段は蒸発性熱放散 (有効発汗) である。有効発汗量について運動終了時のものを比べると、D5 は ND および D15 と比べ有意に多かった。また運動終了時の直腸温上昇度は D5 で有意に低く、平均皮膚温上昇度は運動開始 50 分以降で D5 は ND および D15 と比べ有意に低かった。D5 で直腸温および平均皮膚温の上昇度が低かったのは、深部からより多くの熱が運ばれ、皮膚表面から気化熱によってより多くの熱が奪われた結果であると考えられる。Takamata et al. によると、血漿浸透圧上昇状態では飲水による反射によって発汗が生じるので¹⁵⁾、本研究のように血漿浸透圧が上昇する運動時においても飲水による発汗増加の可能性が考えられる。本研究の 5 分毎の有効発汗量は、D5 では運動開始以降高く維持され、また D15 および D30 ではそれぞれ飲水後に有効発汗量が増加する傾向であった。従って、飲水回数の多い D5 では発汗の増加が頻繁に生じ、結果的に有効発汗量増加が起こり、皮膚温が低下し、直腸温の上昇を抑制したと考えられる。

本研究では D15, D30 は D5 に比較して無効発汗量が多く、飲水間隔が長くなるにつれて、無効発汗が増加する傾向がみられた (Fig. 3-D)。水分摂取を行った条件間で比較すると、水分摂取の間隔が短くなるにつれ、無効発汗量が低く抑えられる傾向がみられた。本研究の運動開始時の飲水量は D5 で 97 ± 7 ml, D15 で 290 ± 20 ml, D30 で 579 ± 40 ml (D30) であった。Rehrer et al. によると、胃における水分吸収は水分摂取後 10 分間で約 300

ml 行われ、その後吸収率は低下していくと報告されている¹⁶⁾。従って、1 度の飲水量が D5 よりも多い D15, D30 は飲水によって hyperhydration になる可能性がある。Lyons et al. らは hyperhydration では運動中の発汗量が増加することを報告し¹⁷⁾、上述したように Takamata et al. は Hyperosmolarity では飲水による発汗増加を認めた。本研究では Fig. 2 に示したように D15, D30 は飲水によって有効発汗量は増加する傾向にあった。これらのことから D15, D30 では、1 度の飲水で D5 よりも多く発汗していたことが推察され、有効発汗量に加えて蒸発しないでこぼれ落ちる無効発汗も D5 よりも多くなったと思われる。また、本研究の D15, D30 では 1 度の飲水による発汗量は多いが、飲水による発汗の回数は D5 より少ないために、結果として総発汗量は各条件間で顕著な差異は見られなかったと思われる。そのため、D15 および D30 は D5 と比べ水分の補給方法が悪く、運動後半においては体水分損失をうまく補いきれなかったと考えられる。すなわち、無効発汗が少なく、発汗効率も高い D5 の飲水方法は体水分を効果的に使っていることになり、暑熱環境下での運動に適していると言えることができる。

本研究では運動終了時および運動終了直前の RPE は D5 で有意に低かった (Fig. 4-A)。また、心拍数は有意ではないが RPE と同様な傾向が見られた。これらのことから水分摂取の間隔を短くすることによって運動中の生体にかかる負担度を減少させる可能性があると考えられる。

運動中の Thirst level は D5 では低いのに対し、ND, D15 および D30 ではのどの渇きを感じている傾向にあった (Fig. 4-B)。Kay and Marino は、のどの渇きを覚えた時点ですでに体水分損失が起こっており、体は脱水状態に陥っていると報告している¹⁸⁾。このことから、ND, D15 および D30 ではのどの渇きが起こっていた時点ですでに脱水状態に陥っていると考えられる。体水分損失を防ぐためにはのどの渇きを覚える前に適宜水分補給をすることが必要であり、D5 の水分摂取方法が最も望ましいと考えられる。

本研究では水分摂取の間隔を変化させることが体温調節反応にどのような影響を与えるのかを調べた。その結果、摂取間隔の短い D5 で直腸温上昇度が最も低かった。また、体温上昇を抑制する有効発汗量も D5 で多く、発汗効率も高かった。そのため、水分摂取の間隔を短くすることにより、体水分損失を適宜補給し、暑熱環境下での運動に適した体水分状態を維持することができ、体温上昇を抑えられることが示された。

V. ま と め

暑熱環境下における運動中の熱産生量増加は体温を上昇させ、この体温上昇は運動パフォーマンスの低下や暑熱障害を引き起こす原因となる。運動中の水分摂取はこれらを防ぐ簡便で実用的な方法である。本研究では、暑熱環境下における水分摂取間隔の違いが運動時の体温調節反応に与える影響を検討した。室温32℃、湿度80%の環境下で8名の男子学生に60% \dot{V}_{O_2max} の自転車エルゴメータ運動を60分間行わせ、直腸温、皮膚温、心拍数、酸素摂取量、RPE、Thirst level、総発汗量および有効発汗量を測定した。実験条件は無摂取 (ND)、5 (D5)、15 (D15)、30分間隔摂取 (D30) の4条件とした。水分摂取量はND時の発汗量と同量とし、各試行内での1回の飲水量は同量とした。運動終了時の直腸温は D5 で有意に低かった。運動時の総発汗量は各条件間において差はなかったが、有効発汗量と発汗効率は D5 で有意に高い値を示した。これらの結果により、水分摂取の間隔は短い方が体水分損失を適宜補給することで、熱放散に重要な有効発汗量を高く維持でき、そのため運動中の体温上昇が抑えられることが示唆された。

謝 辞

本研究に対して多くの助言を賜りました横浜国立大学の田中英登先生、ならびに愛知みずほ大学の西大範和先生に心から感謝いたします。また、本研究にご協力頂いた被験者の方々に深く感謝いたします。

(受理日 平成14年3月20日)

参 考 文 献

- 1) American College of Sports Medicine. Position Stand on Exercise and Fluid Replacement. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1996), **28**, i-vii.
- 2) Hargreaves, M., and Febbraio, M. Limits to Exercise Performance in the Heat. *Int. J. Sports Med.*, (1998), **19**, S115-S116.
- 3) Armstrong, L. E., Maresh, C. M., Gabaree, C. V., Hoffman, J. R., Kavouras, S. A., Kenefick, R. W., Castellani, J. W., and Ahlquist, L. E. Thermal and circulatory responses during exercise: effects of hypohydration, dehydration, and water intake. *J. Appl. Physiol.*, (1997), **82**, 2028-2035.
- 4) Below, P. R., Mora-Rodriguez, R., Gonzalez-Alonso, J., and Coyle, E. F. Fluid and carbohydrate ingestion independently improve performance during 1h of intense exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1995), **27**, 200-210.
- 5) Coggan, A. R., and Coyle, E. F. Reversal of fatigue during prolonged exercise by carbohydrate infusion or ingestion. *J. Appl. Physiol.*, (1987), **63**, 2388-2395.
- 6) Coyle, E. F., Hagberg, J. M., Hurley, B. F., Martin, W. H., Ehsani, A. A., and Holloszy, J. O. Carbohydrate feeding during prolonged strenuous exercise can delay fatigue. *J. Appl. Physiol.*, (1983), **55**, 230-235.
- 7) Criswell, D., Powers, S., Lawler, J., Tew, J., Dodd, S., Iryiboz, Y., Tulley, R., and Wheeler, K. Influence of a carbohydrate-electrolyte beverage on performance and blood homeostasis during recovery from football. *Int. J. Sport. Nutr.*, (1991), **1**, 178-191.
- 8) McConell, G. K., Burge, C. M., Skinner, S. L., and Hargreaves, M. Influence of ingested fluid volume on physiological responses during prolonged exercise. *Acta. Physiol. Scand.*, (1997), **160**, 149-156.
- 9) Montain, S. J., and Coyle, E. F. Influence of the timing of fluid ingestion on temperature regulation during exercise. *J. Appl. Physiol.*, (1993), **75**, 688-695.
- 10) 小澤礼子. 運動中の水分補給の基礎と競技別にみた摂取のポイント, *Coaching Clinic*, (2001), **7**, 14-17.
- 11) Ramanathan, N. L. A new weighting system for mean surface temperature of the human body. *J. Appl. Physiol.*, (1964), **19**, 531-533.
- 12) Borg, G. Perceived Exertion: a note on "history" and methods. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1973), **5**, 90-93.
- 13) Rolls, B. J., Wood, R. J., Rolls, E. T., Lind, H., Lind, W., and Ledingham, J. G. Thirst following water deprivation in humans. *Am. J. Physiol.*, (1980), **239**, R476-R482.
- 14) Mitchell, J. W., Nadel, E. R., and Stolwijk, J. Respiratory weight losses during exercise. *J. Appl. Physiol.*, (1972), **32**, 474-476.
- 15) Takamata, A., Mack, G. W., Gillen, C. M., Jozsi, A. C., and Nadel, E. R. Osmoregulatory modulation of

- thermal sweating in humans: reflex effects of drinking. *Am. J. Physiol.*, (1995), 268, R414-R422.
- 16) Rehrer, N. J., Beckers, E., Brouns, F., Hoor, F. T., and Saris, W. H. M. Exercise and training effects on gastric emptying of carbohydrate beverages. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1989), 21, 540-549.
- 17) Lyons, T. P., Riedesel, M. L., Meuli, L. E., and Chick, T.W. Effects of glycerol-induced hyperhydration prior to exercise in the heat on sweating and core temperature. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1990), 22, 477-483.
- 18) Kay, D., and Marino, F. E. Fluid ingestion and exercise hyperthermia: Implications for performance, thermoregulation, metabolism and the development of fatigue. *J. Sports Sci.*, (1999), 18, 71-82.