

## 運動時体温調節反応に及ぼす飲料水の温度の影響

丹羽健市\*

### Influences of the Temperature of Drinking Water on Thermoregulatory Responses During Exercise

Ken-ichi NIWA\*

#### Abstract

To study the effect of the temperature of drinking water on thermoregulatory responses during exercise, quantitative analysis was made for heat production, heat losses through convection, conduction and evaporation, and heat storage during exercise at constant intensity. Subjects drank water of various temperatures (1, 16, 37°C) during exercise.

Heat production and heat storage were constant regardless of water temperature. Evaporative heat loss increased with increase in water temperature, and direct cooling effect increased with decrease in water temperature.

These results indicate that water supply during exercise suppresses rise in body temperature, and this effect is independent of water temperature. But the mechanism of the suppression differs depending on water temperature: that is, when cool water was taken its direct cooling effect was dominant, and when warm water was taken increase in evaporative heat loss contributes more for the suppression of body temperature rise. The effectiveness of water drinking during exercise in a hot environment was thus suggested.

**Key words:** Temperature of drinking, Thermoregulatory responses Exercise

#### I. はじめに

従来、高温環境下における運動時の体温上昇に及ぼす水分補給の効果については詳細に研究がなされ、その有効性は指摘されている<sup>6,9,10,14,18</sup>。著者は先に、実際のスポーツ活動中の飲水量と発汗量は環境温度の上昇に伴って増大するが、体重減少量(脱水量)は環境温度の変化にもかかわらずほぼ一定に保持され、運動中の自由飲水は運動能力を維持するばかりでなく体温の上昇を抑制する上で効果的に作用していることを報告した。<sup>11</sup> それでは飲料水の温

度は運動時の体温調節反応にどのような影響を及ぼすのであろうか。

本報告は、健康な男子学生を対象に、運動時に種々の温度の飲料水を摂取しながら一定強度の運動を負荷し、その際の体温調節反応におよぼす飲料水の温度の影響について定量的な検討を加えた。

#### II. 実験方法

実験は環境条件の設定が可能な人工気象室(タバイエスベック K.K.) で実施した。環境条件は室温

\*山形大学教育学部保健体育(〒990 山形市小白川町1丁目4番12号)

\*Section of Physical Education, Faculty of Education, Yamagata University, Yamagata-shi, Yamagata 990, Japan.

を36℃、相対湿度40%、室内の気流は0.6m/secに設定した。

被験者は10~21歳の健康な男子大学生5名(身長 $171.2 \pm 2.9$ cm, 体重 $65.6 \pm 5.4$ kg)で7~9年間にわたって、ある種の競技を継続している人たちである。被験者には実験に先立ち、実験の主旨と方法などを詳細に説明し、実験協力の了解を得た。

実験は各被験者につき、対象として運動中水分を摂取しない場合(Control実験)と1℃、16℃そして37℃の飲料水を摂取(水分摂取実験)しながら運動を行った際の4条件について行った。水分摂取実験時の飲水量はControl実験時の体重減少量に相当する量( $980 \pm 110$ ml)を運動開始後10分毎に分割して与えた( $196 \pm 26$ ml/10min)。また、飲料水には市販のスポーツ飲料水(ポカリスエット・大塚製薬)を使用した。実験は6月上旬から7月上旬に実施した。なお、同一被験者に関して、上記の条件を無作為に日を変えて行い、体温日周変動の影響を考慮して同一時間帯域(10:00~12:00)に実施した。

運動は自転車エルゴメーター(Monark社)によるペダリング運動を60分間負荷した。なお、運動強度は450kpm/min(73.5W)でペダリングを一定に保ち易くするためにメトロノームで指示した。

実験に先立ち、被験者は $26.0 \pm 2.0$ ℃の室内で30分間の安静を保持した後、実験開始10分前に気象室に入室し(上半身裸体, 下半身は水泳パンツ着用)、熱電対の貼付ならびに挿入、呼気マスクの装備及び心拍数モニター電極を装着した。装備終了後、被験者はベッドバランスに固定した自転車エルゴメーター上で5分間の安静を保持したのち運動を開始した。

測定項目と方法: 呼気採取は運動開始後15分ごとに3分間の呼気を異なるバックに採取した。採取した呼気は直ちに1回転10lの湿式実験用ガスメーターによって計算し、その一部をサンプルとして労研式大型呼気ガス分析器により分析し、酸素摂取量( $\dot{V}_{O_2}$ )ならびに炭酸ガス排泄量を算出した。

直腸温( $T_{re}$ )の測定は熱電対の先端を直腸内に8~10cm挿入し、皮膚温( $T_s$ )の測定は身体8ヶ所(頭, 胸, 背, 腕, 手, 大腿, 下腿, 足)に熱電対の先端を貼付し、 $T_{re}$ と共に自動精密温度測定器(感度0.01℃, 精度 $\pm 0.1$ ℃, CHINO製)1分ごとに打点記録した。さらに、出力をデジタル信号に変換し、マイクロコンピュータにより平均皮膚温

( $\bar{T}_s$ )と平均体温( $\bar{T}_b$ )を算出した。 $\bar{T}_s$ はHardy & DuBois<sup>7)</sup>による算出式に基づいて求めた。

体重減少は運動前後の体重計測(精度 $\pm 50$ g, 積杆型, 大和製衡K.K.)から求めた。また、分泌した汗量( $\dot{m}_{sw}$ )は体重計で計測した体重減少量と飲水量から次式で算出した。発汗量=(運動前体重+飲水量)-運動後体重。一方、皮膚表面で蒸発した有効汗量( $\dot{m}_{sw}^{eff}$ )はベッドバランス(感度1g, 精度 $\pm 2$ g, 米国James Potter社製)を介して実験中連続測定した。なお、本実験では呼吸性の体重減少量は算出しなかった。

運動時の体熱平衡は次の式より算出した。

$$M = E \pm R \pm C \pm W \pm \Delta S \quad (\text{単位は } W/m^2)$$

熱産生量は代謝量(M)から熱に転換された仕事量(W)を差引いて求めた。蒸発(E)によるwetの熱放散量は水分1gにつき0.585kcalを乗じて、また、体表面からのdryの熱放散量( $R \pm C$ )は蒸発熱量(E)と貯熱量( $\Delta S$ )の増減を熱産生量から差引いて間接的に求めた。貯熱量(S)は平均体温<sup>1)</sup>( $\bar{T}_b = 0.8T_{re} + 0.2\bar{T}_s$ )の変化を求め、 $\Delta \bar{T}_b \times$ 比熱(0.83)×体重の式より算出した。1℃および16℃の冷水摂取による体温冷却熱量は運動時の $T_b$ 体重, 飲料水の温度, 量そして比熱(1.0), 体比熱(0.83)から算出した。

なお、統計量は平均値±標準偏差で示し、平均値の有意差検定にはStudentのpaired t-testを用い、5%水準をもって有意とした。

### Ⅲ. 実験成績

#### A. 各種定値の一般的な概要

図1に各実験条件のもとで一定強度の運動を行った際の $T_{re}$ の時間的経過を、表1には運動終了直後の $\dot{V}_{O_2}$ ,  $T_{re}$ ,  $\bar{T}_s$ ,  $\bar{T}_b$ , 心拍数そして運動中の $\dot{m}_{sw}$ と $\dot{m}_{sw}^{eff}$ を示した。

1. 代謝反応: 運動終了直後の $\dot{V}_{O_2}$ は各実験条件の場合とも1,117~1,179ml/minの範囲にあり、水分摂取の有無ならびに飲料水の温度間に有意差は認められなかった。

2. 体温反応: Control実験時の $T_{re}$ は運動開始直後から一定の勾配で上昇し、運動終了直前では $38.30 \pm 0.12$ ℃に達し、その変化量は $0.71 \pm 0.13$ ℃/hrであった。これに対し、水分摂取実験時のそれは飲料水の温度にかかわらず30分以降、緩やかな上

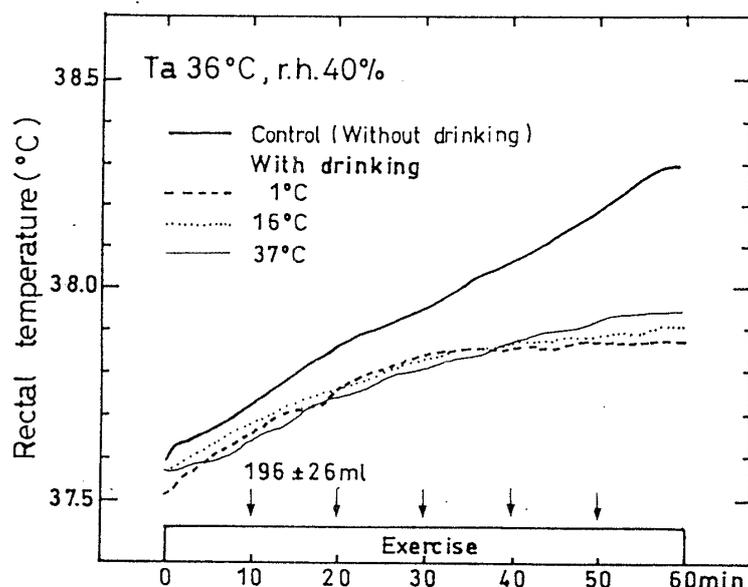


Fig. 1. Changes in rectal temperature during one hour exercise in one subjects. —: Without drinking, with drinking every 10 min of three different water temperature (---: 1°C, .....: 16°C and —·—: 37°C). Arrows indicate times when water was drank. Ta 36°C, R. H. 40%

Table 1. Measured values during last period of one hour exercise at four conditions and their change during the period.

	Control	With drinking water		
		1°C	16°C	37°C
$\dot{V}_{O_2}$ (ml/min)	1,134 ± 66	1,117 ± 107	1,155 ± 62	1,178 ± 46
T <sub>re</sub> (°C)	38.30 ± 0.12	37.87 ± 0.06***	37.91 ± 0.24***	37.94 ± 0.15***
$\bar{T}_s$ (°C)	35.21 ± 0.42	34.84 ± 0.38*	34.69 ± 0.52*	34.82 ± 0.28*
$\bar{T}_b$ (°C)	37.68 ± 0.15	37.15 ± 0.05*	37.25 ± 0.20**	37.31 ± 0.11**
$\dot{m}_{sw}$ (ml/hr)	980 ± 110	950 ± 120	1,146 ± 130	1,320 ± 150*
$\dot{m}_{sw}^{-eff}$ (ml/hr)	564 ± 25	550 ± 18	584 ± 22	620 ± 28*
HR (beats/min)	120 ± 9	106 ± 12	108 ± 13	112 ± 12

$\dot{V}_{O_2}$ : Oxygen intake, T<sub>re</sub>: Rectal temperature,  $\bar{T}_s$ : Mean skin temperature

$\bar{T}_b$ : Mean body temperature,  $\dot{m}_{sw}$ : Sweat rate, HR: Heart rate

$\dot{m}_{sw}^{-eff}$ : Effective sweat rate

Significant levels: \*p < 0.05, \*\*p < 0.01, \*\*\*p < 0.001 (Mean ± SD)

昇勾配に転じ (0.03~0.13°C/30min), 運動終了直前では37.87~37.94°Cの範囲にあり, 飲水の温度にかかわらず Control 実験時との間に有意差が認められた (p < 0.001)。

運動終了直前の  $\bar{T}_s$  は飲料水の温度にかかわらず 34.69~34.84°Cの範囲にあり, 飲料水の温度間に有意差は認められなかった。これに対し, Control 実

験時では,  $\bar{T}_s$  は35.21 ± 0.42°Cに達し, 各飲料水摂取実験群間に有意な差が認められた (p < 0.05)。

運動終了直前の  $\bar{T}_b$  は Control 実験時で37.68 ± 0.15°C, またその変化量は0.65 ± 0.14°C/hrであった。一方, 水分摂取実験時では飲料水の温度にかかわらず  $\bar{T}_b$  は37.15~37.31°C, その変化量は0.17~0.25°C/hrの範囲にあり, Control 実験群との間に

有意差が認められなかった ( $p < 0.01$ )。

3. 発汗量:  $\dot{m}_{sw}$  は Control 実験,  $1^\circ\text{C}$  の飲水時ではそれぞれ  $980 \pm 110\text{ml/hr}$ ,  $950 \pm 120\text{ml/hr}$  とほぼ一定値を示した。しかし  $16^\circ\text{C}$ ,  $37^\circ\text{C}$  の飲水時では  $1,146 \pm 130\text{ml/hr}$ ,  $1,320 \pm 150\text{ml/hr}$  と飲料水の温度の上昇に伴って増大し,  $37^\circ\text{C}$  の飲水実験と Control 実験及び  $1^\circ\text{C}$  の飲水実験との間に有意差が認められた ( $p < 0.05$ )。同様の傾向は蒸発に参与した  $\dot{m}_{sw}^{\text{eff}}$  にも認められた。

4. 心拍数: 運動終了時点の心拍数は水分摂取実験時 (106~112拍/子) に比して Control 実験 ( $120 \pm 9$  拍/子) の方が 7~12% 高い水準にあるが, 各実験条件下に有意差は認められなかった。

#### B. 体熱平衡

表 2 に熱産生量ならびに各熱放散経路からの熱放散量と貯熱量を示した。代謝量から熱に転換されて外になされた仕事量 ( $41.3\text{W/m}^2$ ) を差引いた熱産生量は Control 実験時で  $170\text{W/m}^2$ , 水分摂取時のそれは飲料水の温度にかかわらず  $167\sim 179\text{W/m}^2$  の範囲にあり, 水分摂取の有無ならびに飲料水の温度間に差異は認められなかった。蒸発による熱放散量は摂取した飲料水の温度が高くなるにつれ増大し, 特に  $37^\circ\text{C}$  の飲水実験時では  $234 \pm 10\text{W/m}^2$  を示し, Control 実験時及び  $1^\circ\text{C}$  の飲水実験時との間に有意差が認められた ( $p < 0.05$ )。間接的に算出した輻射と対流による熱放散量は各実験条件にかかわらず負の値 ( $-49\sim -64\text{W/m}^2$ ) を示した。貯熱量は Control 実験時で最も大きく ( $23 \pm 5\text{W/m}^2$ ), 摂取した飲料水の温度にかかわらず Control 実験との間に有意差が認められたが ( $p < 0.01$ ), 飲料水の温度間に差異は認められなかった。冷水補給による体温冷却熱量は  $1^\circ\text{C}$  の飲水時で  $22\text{W/m}^2$ ,  $16^\circ\text{C}$  の飲水時で  $13\text{W/m}^2$  であった。

#### IV. 考察

高温環境下での長時間運動に伴う脱水の進行は, 循環機能に支障を来すとともに<sup>12)</sup> 体液量の減少と浸透圧の上昇, 特に血漿浸透圧の上昇をもたらす, 結果的に発汗の抑制と体温の上昇を加速すると指摘されている<sup>3,5,13)</sup>。また Fortney et al. (1981)<sup>4)</sup> らは血液量の減少も発汗量の減少をもたらすとし, Oga- wa & Sugeno-ya (1993) は, 脱水は汗腺への直接の影響は少ないが, 体温調節中枢機構に強く作用すると指摘している<sup>15)</sup>。従って, 運動中の水分補給は体液量や血漿浸透圧を改善するばかりでなく発汗を促し体温調節機構にも働いて体温の上昇を抑え, 運動能力を維持する上で効果的に作用しているといえる。それでは摂取する飲料水の温度は運動時の体温調節反応にどのような影響を及ぼしているのであろうか。Gisol- fi & Copping (1974)<sup>6)</sup> は運動中に種々の温度の飲料水を摂取させた際, 温水 ( $37^\circ\text{C}$ ) より冷水 ( $10^\circ\text{C}$ ) 補給の方が直腸温の上昇を抑制する上でより効果的であると指摘している。このことは飲料水の温度によって体温調節反応が異なることを示唆している。そこで, 本実験では室温を一定 ( $36^\circ\text{C}$ ) にした環境条件のもとで 3 つの異なる温度の飲料水を摂取させながら一定強度の運動を負荷し, その際の体温調節反応に及ぼす飲料水の温度の影響を定量的に検討した。

そこで, 本実験での実測値を用いて熱産生量, 各熱放散経路からの熱放散量及び貯熱量を算出した。その結果, 代謝量から外になされた仕事量を差引いた熱産生量は Control 実験時及び飲料水の温度にかかわらず  $167\sim 179\text{W/m}^2$  の範囲にあり, 各飲料水間に差異は認められなかった。従って, 熱産生量は飲料水の温度と直接的な関係を持つとは考えられない。むしろ飲料水の温度によって影響を受けるのは

Table 2. Heat production and heat loss during one hour exercise at four conditions.

	H	E	R±C	S
Control	$170 \pm 13$	$214 \pm 16$	$-67 \pm 13$	$23 \pm 5$
With drinking ( $1^\circ\text{C}$ )	$167 \pm 20$	$209 \pm 17$	$-49 \pm 9$	$7 \pm 5^{**}$
With drinking ( $16^\circ\text{C}$ )	$174 \pm 18$	$222 \pm 10$	$-56 \pm 12$	$8 \pm 3^{**}$
With drinking ( $37^\circ\text{C}$ )	$179 \pm 18$	$234 \pm 15^*$	$-64 \pm 12$	$9 \pm 5^{**}$

H : Heat production      E : Evaporative heat loss

R±C : Radiative and convective heat loss      S : Body heat storage

$\text{W/m}^2$ , Significant levels : \* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$  (Mean ± SD)

蒸発性熱放散量と体冷却熱量である。すなわち蒸発性熱放散量は飲料水の温度が高くなるにつれて増大し、特に37℃の飲水実験時に最大値(234W/m<sup>2</sup>)を示した。また、輻射と対流による熱放散は実験条件にかかわらず負の値を示し、-49~-64W/m<sup>2</sup>の熱が体内に流入した。冷水摂取による体冷却熱量は1℃の飲水時では22W/m<sup>2</sup>、16℃の飲水時で13W/m<sup>2</sup>に相当し、それはT<sub>b</sub>をそれぞれ0.62℃、0.37℃低下させたことに相当する。一方、貯熱量は飲料水の温度にかかわらずほぼ一定値(7~9W/m<sup>2</sup>)を示した。それでは熱産生によって体温は何度上昇し、熱放散によって何度低下したのであろうか。平均体重65.6kg、人体の比熱0.83として算出すると、熱産生量(負の値を示した輻射と対流による熱放散量を加える)によって体温はControl実験時で6.77℃、1℃、16℃そして37℃の飲水時ではそれぞれ6.28℃、6.57℃、6.94℃上昇したことになる。一方、蒸発性熱放散量によって体温はControl実験時で6.11℃、1℃の飲水実験時で5.97℃、16℃で6.34℃、37℃の飲水実験時では6.68℃低下したことになる。従って、熱産生による体温上昇度から蒸発による体温低下度を差引くと、体温はControl実験時で0.66℃、1℃の飲水時では0.20℃、16℃の飲水時で0.23℃、37℃の飲水時では0.26℃それぞれ上昇したことになる。このように蒸発性熱放散量は飲料水の温度によって影響を受けるといえる。また、1℃の冷水摂取時の蒸発性熱放散量(209W/m<sup>2</sup>)はControl実験時(214W/m<sup>2</sup>)のそれとほぼ同量であるにもかかわらず貯熱量に有意な差異が認められた。しかし1℃の冷飲料水による体冷却熱量(22W/m<sup>2</sup>)を消去するとControl実験時の貯熱量との差はなくなる。従って、1℃の冷飲料水では物理的な体冷却効果により体温上昇が抑制され、一方、37℃の温飲料水では蒸発性熱放散の増大によって体温上昇を抑制し、結果的に摂取する飲料水の温度にかかわらず同様の効果を示した。

飲水と発汗量に関して、Kuno (1950)<sup>8)</sup>は、本来、発汗は体温を調節する機転であって、水分を調節する機転ではないので発汗量は飲水によって影響を受けにくいと指摘した。著者らは、先に、一定環境条件下における運動時の水分摂取の有無は発汗量にほとんど影響を及ぼさないが、水分摂取の効果は体液量の維持という生理的な効果と体熱の冷却という物理的な効果にあることを報告した<sup>16)</sup>。これに対し、

Banerjee (1970)<sup>2)</sup>は温水・冷水摂取は発汗量の増減を来し、これは頬や咽頭粘膜受容器からの反射であると報告した。また、Yamada et al. (1982)らは<sup>17)</sup>冷水(2℃)及び温飲料水(36℃)を補給した際の蒸発性熱放散は冷水摂取時の方が有意に少ないが、体重減少量から求めた発汗量には差が認められず、これは冷飲料水摂取群ではその分無効発汗量が多くなることを意味し、最高発汗時には冷飲料水摂取による発汗抑制作用はほとんど存在しないと指摘した。

本実験を通して、運動時の水分摂取は飲料水の温度にかかわらず体温上昇と心拍数の増加を抑制する。しかし、その作用様式は飲料水の温度によって異なり、冷飲料水では体冷却効果により、温飲料水では蒸発性熱放散量の増大によって体温上昇は抑制され、飲料水の温度にかかわらず高温環境下における運動時の水分摂取の有効性が示された。

## V. 要約

健康な男子大学生を対象に、運動時体温調節反応に及ぼす飲料水の温度の影響を熱平衡の側面から定量的に検討するために、運動時に水分を摂取しない場合ならびに3つの異なる温度の飲料水を摂取しながら運動を負荷し、その際の代謝、貯熱量の変化、輻射及び対流そして蒸発による熱放散量を算出した。

1. 熱産生量は飲料水の温度にかかわらず177~189W/m<sup>2</sup>の範囲にあり、ほぼ一定値を示した。
2. 蒸発性熱放散量は飲料水の温度が高くなるにつれて増大し、特に37℃の飲水時では234±15W/m<sup>2</sup>を示し、1℃の飲水時(209±17W/m<sup>2</sup>)との間に有意差が認められた(p<0.05)。
3. 間接的に算出した輻射及び対流による熱放散量は実験条件にかかわらず負の値(-49~-67W/m<sup>2</sup>)を示し、体内に逆流した。
4. 貯熱量は各飲料水の温度の場合とも6~9W/m<sup>2</sup>とほぼ一定値を示し、水分非摂取時(23±5W/m<sup>2</sup>)との間に有意差が認められた。
5. 冷水摂取による体冷却熱量は1℃の飲水時で22W/m<sup>2</sup>、16℃の飲水時で13W/m<sup>2</sup>であり、それは0.62℃、0.37℃の体温低下に相当した。

## 参考文献

- 1) Burton, A. C. (1975) The average temperature of

- the body tissues. *J.Nutr.*, 9, 261-280.
- 2) Banerjee, M. R. (1970) Transient changes in sweating activity of man following ingestion of water at different temperature. *Int. J. Biometeorol.*, 14, 381-390.
  - 3) Fortney, S. M., Wenger, C. B., Bove, J. R. and Nadel, E. R. (1984) Effect of hyperosmolality on control of blood flow and sweating. *J. Appl. Physiol.*, 57, 1688-1695.
  - 4) Fortney, S. M., Nadel, E. R., Wenger, C. B. and Bove, J. R. (1981) Effect of blood volume on sweating rate and body fluids in exercising humans. *J. Appl. Physiol.*, 51, 1594-1600.
  - 5) Greenleaf, J. E. and Castle, B. L. (1971) Exercise temperature regulation in man during hypohydration and hyperhydration. *J. Appl. Physiol.*, 30, 847-853.
  - 6) Gisolfi, C. V. and Copping, J. R. (1974) Thermal effects of prolonged treadmill exercise in the heat. *Med. Sci. Sports.*, 6, 108-113.
  - 7) Hardy, J. D. and DuBois, E. F. (1938) The technic of measuring radiation and convection. *J. Nutr.*, 15, 461-475.
  - 8) Kuno, Y. (1956) *Human Perspiration*. C. C Thomas, Springfield.
  - 9) Londeree, B. R., Updyke, W. F. and Burt, J. (1969) Water replacement schedules in heat stress. *Res. Quart.*, 40, 725-732.
  - 10) Moroff, S. V. and Bass, D. E. (1965) Effects of overhydration on man's physiological responses to work in the heat. *J. Appl. Physiol.*, 20, 267-270.
  - 11) Niwa, K., Nakai, S. et al. (1996) A survey of ambient temperature, drinking, sweating, and body temperature. *Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med.*, 45, 151-158.
  - 12) Nadel, E. R., Fortny, S. M. and Wenger, C. B. (1980) Effect of hydration state on circulatory and thermal regulation. *J. Appl. Physiol.*, 49, 715-721.
  - 13) Nielsen, B. (1974) Effects of changes in plasma volume and osmolarity on thermoregulation during exercise. *Acta Physiol. Scand.*, 90, 725-730.
  - 14) Nose, H., Morimoto, T. and Ogura, K. (1983) Distribution of water losses among fluid compartments of tissues under thermal dehydration in the rat. *Jpn. J. Physiol.*, 33, 1019-1029.
  - 15) Ogawa, T. and Sugeno, J. (1993) Pulsatile sweating and sympathetic sudomotor activity. *Jpn. J. Physiol.*, 43, 275-289.
  - 16) Sato, Y. and Niwa, K. (1997) Effects of water replacement on sweating and body cooling during exercise. *Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med.*, 46, 113-122.
  - 17) Yamada, S., Matsubara, C., Nose, H. et al. (1982) Cooling effect of fluid replacement during heavy sweating. *Jpn. J. Biometeor.*, 19, 45-51.
  - 18) Yorimoto, A., Nakai, S. et al. (1965) Relationship between drinking behavior and body temperature during exercise in heat. *Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med.*, 44, 357-364.

(平成9年4月11日 受付)  
(平成9年6月16日 受理)