水中ランニング運動が腎臓機能に及ぼす影響

林 石 松* 折 笠 敏** 伊 藤 朗***

EFFECTS OF WATER RUNNING EXERCISE ON RENAL FUNCTION

ISHIMATSU HAYASHI, SATOSHI ORIGASA and AKIRA ITO

Abstract

A study was conducted to determine the effect of water running exercise (WRE) on renal function. The study involved 5 healthy males who performed maximal work by both WRE and bicycle ergometer exercise (BEE), and 6 males who performed head-out water immersion. The results obtained were as follows ;

1) The values of $\dot{V}O_{2\max}$ and maximum heart rate (HRmax) during WRE and BEE were approximately similar, and blood lactate concentration after exercise was significantly higher than the basal value in both types of exercise, although the value was significantly higher after WRE than after BEE.

2) Compared with the resting values on land, significant decreases in HR and plasma aldosterone (Ald) concentration were noted in head-out water immersion, but plasma anti-diuretic hormone (ADH) concentration and urinary volume were not changed significantly from the resting values.

3) The secretion of both plasma ADH and Ald was significantly increased at the end of both types of exercise. However, a larger increase in Ald and ADH was observed after BEE than after WRE.

4) The rate of urine flow was obviously decreased soon after both types of exercise ; this was positively correlated with changes in creatinine clearance and negatively correlated with changes in Ald concentration.

The results of the present study suggest that a better venous return is induced by the water pressure and cardiac output during WRE, possibly inducing the release of atrial natriuretic factor (ANF). ANF may impair the release of ADH and Ald to a greater extent in WRE than in BEE.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 1991, 40 : 48~59)

key words : Head-out water immersion, Water running exercise, Atrial natriuretic factor, Antidiuretic hormone, Aldosterone.

I. 結 言

腎臓は、運動代謝によって生成された老廃物を処理し、また内部環境の恒常性維持のために、重要な役割を果たしている。

これまで、運動強度が腎機能に及ぼす影響に関する研究は、トレッドミル運動では、運動強度の増強にしたがい尿排泄量が低下し²³⁾、10.5 km/hr のスピードにおいては、尿量の減少が観察されている¹⁵⁾。また 60% $\dot{V}O_{2\max}$ 以下の運動強度では尿

*岐阜経済大学(非常勤講師)
〒503 岐阜県大垣市北方町5-50

**筑波大学体育科学系
〒305 茨城県つくば市天王台1-1-1

***筑波大学体育科学系運動生化学
〒305 茨城県つくば市天王台1-1-1

Gifu College of Economics (parttime lecturer), 5-50 Kitagata,
Ogaki, Gifu 503

Master's Course in Health and Sports Science, University of
Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305

Laboratory of Exercise Biochemistry, Institute of Health and
Sports Science, The University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai,
Tsukuba, Ibaraki 305

量の変化は見られず、80% $\dot{V}O_2\text{max}$ 以上の運動強度では一過性の尿量の減少が見られたと報告されている²¹⁾。このような尿量の減少は、クレアチニンクリアランスの低下によるものと示唆されている²³⁾。しかしながら、このような運動による減尿現象とは反対に、無酸素性の強い疾走運動後30分に一時的な利尿現象が起こるともいわれている¹⁴⁾。これは、運動中に血漿抗利尿ホルモン(ADH)やaldosterone(Ald)濃度が顕著に上昇したにもかかわらず、これらの作用すべき尿細管receptor側が一過性の変化を起こし、本来の生理現象が表われにくく、利尿現象が起こったのではないかと示唆されている¹⁴⁾。一方、水浸安静の研究では水浸中に水圧などの影響によりvenous returnが増えるため、ADHとAldの分泌は心房で産生されるペプチドであるAtrial Natriuretic Factor(ANF)の分泌によって抑制され、尿量の増加を招来することが報告されている^{1,6,9)}。陸上運動では顕著に増加した血漿ADH²³⁾とAld¹⁰⁾の濃度変化は水中運動の場合、若干抑制されている³⁾。これはレニン活性の影響によるものと示唆され、またアンギオテンシンⅠとⅡの分泌をも同様に抑制する傾向にあると報告されている¹⁰⁾。以上の先行研究を見ると、減尿現象については水中運動においても陸上運動においても、無酸素になるほど顕著な結果を示した^{12,15,21)}ことが共通的な見解である。しかし、このような減尿現象も異なった運動環境では血漿ADHとAldとの分泌レベルが異なり、水浸の先行実験^{1,9)}の結果にも示されたように水中環境ではADHとAldはANFの作用によって抑制されたと報告されている。この

ような先行研究をもとに、本研究は水中運動を用い、腎機能の代謝に影響を及ぼすホルモンである血漿ADHとAldとの分泌レベルが陸上の運動とは違う生理的な反応を示すのであろうと仮説を立てた。

そこで、水中運動としては、浮力を増加させ、身体を直立に保持するための水中用ジャケット(Wet Vest)を用い、最大努力のランニング運動を実施した。このジャケットを着装することにより体重が軽減され、身体が自然に前傾になり、頭部のみが水中から露出した状態の中でランニング運動を実施した。また陸上運動としては自転車エルゴメーター運動を用いた。これは下肢筋にかかる体重の負担が少ないというジャケット着装との共通点があるためであり、疲労困憊までの運動を実施し比較検討した。

II. 方 法

A. 被検者の身体的特徴及び実験の様式

被検者は健康男子全11名であり、その身体的特徴をTable 1に示した。職業はスポーツクラブの体操指導員である。実験前日の生活条件については禁酒をし、就寝時間を23:00から翌日の06:30までと規定した。実験日は、起床後、排便排尿をし、空腹の状態で500 mlの水道を摂取させた。座位で07:30より30分間安静させ、実験は08:00から11:30までの間に行った。水浸安静及び水中ランニング運動時に用いたWet Vest(Start One社製)は浮力効果があり、それを着用することによって、頸部以上が水中から水面上に露出される。室内温水プールの広さは12.5×7.5 mであっ

Table 1. Physical characteristics of subjects studied

Variables (unit)	Age (years)	Hight (cm)	Weight (kg)	BSA (m ²)	$\dot{V}O_2\text{max}$ (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)		HRmax (beats·min ⁻¹)	
					(A)	(B)	(A)	(B)
N	11	11	11	11	5	5	5	5
Mean	24.4	170.3	64.0	1.75	53.43	52.72	191.4	189.6
S D	4.6	5.8	9.4	0.14	5.60	5.80	7.6	6.4

Values are means±SD. BSA: Body surface area. (A): Bicycle ergometer exercise.
(B): Water running exercise.

Fig. 1. Experimental protocol

た。心電図(日本光電社製の Life-Scope 10 とフクダ電子社製の WP-6010 防水用電極セットを使用)は胸部双極誘導法により, 運動中の瞬時心拍数をモニターして記録した。酸素摂取量の測定は Douglas bags 法により呼気を採取し, AIC 社製の CO_2 と O_2 ガス分析器から呼気ガス濃度を求め算出した。

本研究は3つの実験様式で構成され, それぞれのプロトコルの概要は以下のとおりである。

【実験1】

水浸安静の実験(コントロール)では, Wet Vest を着用し, 水中で15分間安静状態(head-out of water immersion)を保った。室内プールの温度は $31.1 \pm 0.9^\circ\text{C}$ で, 相対湿度は $68.8 \pm 8\%$ であった。集尿及び採血の手順は Fig. 1 に示した通りで, 1回目の採血は, プールサイドで30分間の安静を保った後に, 2回目はプールサイドで水浸中での安静終了直後に, 3回目は回復期の60分後に, 4回目は回復期の90分後にそれぞれを実施した。

【実験2】

水中ランニング運動(water running exercise)は, メトロノームの音により手足の前後振の回数を規定した。4分ごとに振回数の頻度を増やし, 50rpm から 70rpm まで3段階に分けて12分間,

Fig. 2. Running form in water

その後の3分間は疲労困憊に至るように追い込み(心拍数が $180 \text{ beats} \cdot \text{min}^{-1}$ 以上), 計15分間の水中ランニング運動を行った。採気は各段階の最終1分間と12分以降は毎分行った。環境条件や採尿及び採血は, 実験1と同じであり, また水中ランニング運動のフォームを Fig. 2 に示した。

【実験3】

陸上運動実験は, 自転車エルゴメーターを用い, 実験2の運動強度に対応するために, 同様に3段階に分けて4分間の漸増負荷を採用し, その後の負荷は徐々に上げていき, 15分以内に, all-out に達するように実験を行った。回転数は 60rpm とし, メトロノームで規定した。採気, 採尿及び採血は実験2と同様に実施した。実験時の室内温度は $24.0 \pm 1.5^\circ\text{C}$ で, 相対湿度は $78.5 \pm 2.6\%$ であった。

B. 血液と尿成分における測定項目と方法

血液は肘正中皮静脈より 15 ml ずつ採取し、遠心分離後血清或いは血漿を凍結保存し、その後分析した。測定項目及び測定方法(カッコ内に示す)は、Ald と ADH (RIA, PEG 法), 血清浸透圧(氷点降下法), 乳酸(酵素法), 血清電解質の Na, K (炎光光度法), 尿酸(酵素法)であった。尿は、その一部をポリエチレン製容器に凍結保存し、その後成分の定量を行った。測定項目は浸透圧, クレアチニン, 尿酸, 尿素窒素, 尿中電解質の Na, K, Cl であり, 測定方法は血清の場合と同様に行った。また, (A): 内因性クレアチニークリアランス (Ccr) や (B): 浸透圧 クリアランス (Cosm) 及び自由水クリアランス (C_{H_2O}) は, 血中と尿中の測定値を元に算出した。それぞれの計算式は次の通りである。

$$Ccr = \frac{UV \times Ucr}{Scr \times BS} \times 1.48 \dots\dots\dots (A)$$

$$Cosm = \frac{Uosm \times UV}{Sosm} \dots\dots\dots (B)$$

$$C_{H_2O} = UV - Cosm \dots\dots\dots (C)$$

但し, UV は 1 分間の尿量

Ucr はクレアチニンの尿中濃度

Scr はクレアチニンの血清濃度

BS は体表面積

Uosm は尿浸透圧濃度

Sosm は血清浸透圧濃度

C. 実験結果の統計処理法

3つの実験で得られた測定値を比較するために, 平均値と標準偏差 ($M \pm SD$) を算出した。運動前値に対する運動後値の差の検定は, paired-t により行った。また各実験間の差の検定は, student's t 検定により行い, 5%水準をもって有意とした。相関係数検定はピアソンの相関係数検定法を用い, いずれも確率水準 5%未満を有意とした。

III. 実験結果**A. 運動による血中, 尿中物質の濃度変化**

水浸安静実験時の心拍数 (HR) は 59.1 ± 2.5

Fig. 3. Variation in blood lactate(top), plasma Ald.(middle)and ADH(bottom)at different experiments. ☆ indicates that results differ significantly from pre-study values; ★ in that results differ significantly from water immersion values.

beats $\cdot$ min $^{-1}$ であり, 陸上安静時の HR(66.2 ± 2.7 beats $\cdot$ min $^{-1}$)より有意な低値を示した ($p < 0.001$). 水中ランニング運動により得られた $\dot{V}O_2\text{max}$ (51.89 ± 5.52 ml $\cdot$ kg $^{-1}\cdot$ min $^{-1}$)は, 自転車エルゴメーター運動(52.29 ± 6.55 ml $\cdot$ kg $^{-1}\cdot$ min $^{-1}$)と比較し, 低値傾向を示した. その際の最高 HR も, 水中ランニング運動(187.6 ± 6.3 beats $\cdot$ min $^{-1}$)は自転車エルゴメーター運動(191.6 ± 7.0 beats $\cdot$ min $^{-1}$)と比較すると, 低値傾向にあった(Table 1). しかし, 運動直後の血中最高乳酸値は, Fig. 3 に示したように, 水中ランニング運動(122.5 ± 21.85 mg/dl)の方が自転車エルゴメーター運動 (97.91 ± 14.64 mg/dl)よりも有意に上昇し, 明らかな差が認められた($p < 0.05$).

運動による血漿 ADH と Ald の消長は, Fig. 3 に示したように, 両運動ともに安静時から運動直後に有意な上昇が認められ, 回復期の90分後に安

静値まで回復した. またこの両ホルモンの上昇はともに, 水中ランニング運動よりも自転車エルゴメーター運動の方が高く, 有意な差が認められた ($p < 0.05$).

運動による尿素窒素(UN)の濃度変化を Table 2 に示したが, 両運動ともに安静時から運動後への変化は有意な変化を示さなかった. 一方, 尿中 UN 濃度の変化は, 両運動群ともに安静時から運動直後に有意に低下し, 回復期の90分までにやや上昇する傾向にあった (Table 4). 血中クレアチニン (Creat.)の濃度変化は, 両運動ともに安静時から運動直後に有意な上昇を示し($p < 0.01$), 回復期の60分後に安静値に戻った (Table 2). 尿中 Creat. 濃度は両運動ともに運動直後に有意な低下を示した($p < 0.001$)が, 水中ランニング運動では回復期の90分で逆に上昇を示し($p < 0.05$), 自転車エルゴメーター運動の場合も回復期の60分後より有意な

Table 2. Changes in serum U-Nitrogen (UN), creatinine (Creat), uric acid (UA) and plasma osmolality concentrations following each experiment.

Items Pre-study	Immediately after study 4'	Recovery	
		60'	90'
UN (mg/dl)			
(A) 17.51 ± 3.37	17.48 ± 3.87	17.18 ± 3.62	17.20 ± 3.88
(B) 15.87 ± 2.38	16.12 ± 2.14	15.98 ± 2.24	14.87 ± 1.66
(C) 16.00 ± 4.57	16.13 ± 4.99	14.86 ± 4.99	14.72 ± 5.67
Creat (mg/dl)			
(A) 1.01 ± 0.14	1.18 ± 0.17***	1.06 ± 0.15	1.03 ± 0.16
(B) 0.98 ± 0.13	┌ + 1.17 ± 0.13** └ 1.03 ± 0.08	1.04 ± 0.13	1.05 ± 0.20
(C) 1.00 ± 0.06		1.01 ± 0.07	1.02 ± 0.08
UA (mg/dl)			
(A) 5.56 ± 0.50	5.83 ± 0.64	7.25 ± 1.71**	7.25 ± 1.73*
(B) 5.54 ± 0.69	┌ + 5.74 ± 0.78 └ 4.16 ± 1.20	┌ + 7.42 ± 0.91* └ 4.13 ± 1.30	┌ + 7.12 ± 1.22* └ 4.06 ± 1.25*
(C) 4.13 ± 1.15			
Osmolality (mOsmol/kg. H ₂ O)			
(A) 281.16 ± 3.18	292.50 ± 4.41***	284.33 ± 2.58	282.83 ± 1.94
(B) 284.71 ± 3.69	┌ ++ 295.28 ± 5.21*** └ 284.16 ± 2.92	285.42 ± 4.50	281.75 ± 3.86
(C) 284.16 ± 3.86		283.20 ± 3.89	238.80 ± 1.78

(A) : Bicycle ergometer. (B) : Water running. (C) : Water immersion. Values are means $\pm$ SD. * : Significantly different from per-study value (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$). + : Significantly different from (C) value (+ $p < 0.05$, ++ $p < 0.01$).

Table 3. Changes in serum electrolyte concentrations following each experiment.

Items Pre-study	Immediately after study 4'	Recovery	
		60'	90'
Na (mEq/dl)			
(A) 138.00±2.00	141.83±2.63**	139.00±1.78	139.50±2.07
(B) 138.14±1.57	141.28±1.79***	138.71±1.60	138.25±1.70
(C) 138.83±1.16	139.66±1.21	139.80±0.44	140.80±1.78
K (mEq/dl)			
(A) 4.28±0.24	3.96±0.20*	4.10±0.27	4.16±0.20
(B) 4.54±0.33	4.02±0.31*	4.57±0.54	4.47±0.37
(C) 4.01±0.43	4.31±0.45	4.40±0.32	4.22±0.37
Cl (mEq/dl)			
(A) 102.16±3.25	101.50±2.88	102.66±1.96	103.16±2.13
(B) 99.57±2.37	99.85±3.38	101.71±1.38	102.75±2.06
(C) 100.83±1.94	100.83±3.18	101.00±1.41	102.20±1.64

(A) : Bicycle ergometer. (B) Water running. (C) : Water immersion. Values are means±SD. * : Significantly different from pre-study value (*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001).

Table 4. Changes in urine concentration of urea-nitrogen (UN), creatinine (Creat) ruic acid (UA) and osmolality (Osmol) following each experiment.

Items	Pre-study	Immediately after study 4'	Recovery	
			60'	90'
UN (Δ mg/dl)				
(A)	0	−380.00±113.84***	−141.66±109.07	93.33±155.00
(B)	0	[++ −420.00±119.79** −43.00±145.00	−28.33±159.30	45.00±171.36
(C)	0		−150.00±203.86	0.20±207.58
Great (Δ mg/dl)				
(A)	0	−33.66± 11.92***	47.33± 42.22*	47.00± 38.20*
(B)	0	[+ −36.00± 12.44*** 9.83± 46.73	25.57± 27.45*	36.25± 24.29
(C)	0		−3.50± 50.57	23.20± 43.14
UA (Δ mg/dl)				
(A)	0	−16.50± 8.33**	8.66± 10.19*	19.83± 9.82
(B)	0	[+ −13.33± 8.16* −6.66± 11.54	4.28± 16.18	22.50± 22.17
(C)	0		−10.00± 10.00	0.00± 10.00
Osmolality (Δ Osmol/kg. H ₂ O)				
(A)	0	−332.33± 62.67***	−36.33±144.76	−67.33± 61.32*
(B)	0	[+++ −371.16± 42.72*** 29.16± 8.15***	−33.42±176.53	−35.75± 93.95
(C)	0		60.83± 66.58	−18.83± 31.39

(A) : Bicycle ergometer. (B) : Water running. (C) : Water immersion. Values are means±SD. Delta symbol (△) indicate differences from pre-study values. * : Significantly different from pre-study value (*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001). + : Significantly different from (C) value (+p<0.05, ++p<0.01, +++p<0.001).

上昇を示した ($p<0.001$) (Table 4). 血中の尿酸変動については, 両運動ともに安静時から運動直後に変化はなかったが, 回復期の60分から90分までに顕著に上昇し遅延現象が認められた ($p<0.05$) (Table 2). また尿中の尿酸濃度の変動は両運動ともに安静時より運動直後に有意な低下が見られたが, 回復期の60分後より逆に上昇する傾向を示した (Table 4). 最大運動が血清浸透圧に及ぼす影響については, 両運動ともに運動直後に一過性の有意な上昇現象を示した ($p<0.001$) が, 回復期の60分後にはほぼ安静値に戻った (Table 2). また尿浸透圧は両運動ともに運動直後に有意に低下し, 回復期の60分後と90分後でも安静値までは回復しなかった (Table 4).

Table 3 は両運動による血中 Na, K, Cl の変化を示したものであるが, Na は両運動ともに安静値より運動直後に有意な上昇を示したのに対して, K は両運動直後に有意な低下を示した ($p<0.05$), Cl は両運動ともに顕著な変化は見られなかった. 一方, 尿中の Na, K, Cl の動態を Table 5 に示したが, Na と K は両運動ともに安静時から運動直後に有意な低下を示し, 回復期の60分後に

ほぼ安静値に回復した. Cl は両運動ともに運動直後と回復期の60分後にかけて有意に低下を示し, 90分後ではほぼ安静値に戻った.

B. 運動による尿中物質の排泄動態

尿量の排泄及びクレアチニンクリアランスの変化を Fig. 4 に示したが, これらは両運動ともに, 安静時から運動直後に顕著な低下を示し ($p<0.001$), 回復期では水中ランニング運動の値は90分後にはほぼ安静値に回復した. しかし, 自転車エルゴメーター運動では運動直後から回復期の90分後にわたって低下したままであり, 有意な差が認められた ($p<0.05$).

運動時体内水バランスを評価する指標には尿量と並びに Cosm と C_{H_2O} の変化もあり, 本研究はそれぞれを計算し, 結果を Fig. 5 に示した. 前者においては, 両運動ともに安静時より運動直後に有意に低下したが ($p<0.001$), 水中ランニング運動では回復期90分後に安静値に戻ったのに対して, 自転車エルゴメーター運動では回復期全般にわたって, 安静値より有意に低いままであった ($p<0.01$). 後者において, 自転車エルゴメーター運動では運動直後より回復期の全般にわたって上

Table 5. Changes in urine electrolyte concentrations following each experiment.

Items	Pre-study	Immediately after study 4'	Recovery	
			60'	90'
Na (Δ mEq/l)				
(A)	0	$-31.16 \pm 10.07^{***}$	17.34 ± 35.09	$51.45 \pm 19.13^{**}$
(B)	0	$-47.10 \pm 19.13^{***}$	-5.64 ± 42.03	24.49 ± 45.77
(C)	0	19.13 ± 40.50	8.63 ± 55.24	25.21 ± 58.12
K (Δ mEq/l)				
(A)	0	$-10.55 \pm 9.11^*$	-0.50 ± 7.98	2.45 ± 12.05
(B)	0	$-7.92 \pm 4.56^{**}$	4.05 ± 9.92	$16.04 \pm 4.84^{**}$
(C)	0	-0.89 ± 3.91	3.25 ± 8.55	2.46 ± 12.38
Cl (Δ mEq/l)				
(A)	0	$-33.33 \pm 12.98^{**}$	$-16.19 \pm 9.50^{**}$	6.19 ± 6.10
(B)	0	$-27.14 \pm 15.82^{**}$	$-16.73 \pm 13.54^*$	$13.46 \pm 4.81^*$
(C)	0	2.37 ± 3.18	-5.22 ± 13.08	3.99 ± 18.02

(A): Bicycle ergometer. (B): Water running. (C): Water immersion. Values are means $\pm$ SD. Delta symbol (Δ) indicate differences from pre-study values. *: Significantly different from pre-study value (* $p<0.05$, ** $p<0.01$, *** $p<0.001$). +: Significantly different from (C) value (+ $p<0.05$, ++ $p<0.01$).

Fig. 4. Variation in urine volume and creatinine clearance following different experiments. ☆ indicates that results differ significantly from pre-study values; ★ indicates that results differ significantly from water immersion values.

Fig. 5. Changes in Cosmo and CH_2O following different experiment. Values given are the differences from the Pre-study levels (☆) and from water immersion values (★).

昇したままであり, 有意な差が認められたが, 水中ランニング運動では運動直後より, 回復期の60分までに有意に高い値であった($p < 0.01$).

IV. 考 察

運動の方法は多種多様であるが, 最近, 体力づくりやリハビリテーションなどに, 多目的な水中運動が注目されるようになってきた¹⁶⁾. この水中運動とは, 特殊ジャケットを着装し, 水の浮力によって, 水中でエアロビックスやランニング運動などが十分に実施できるという新たな運動方法である¹⁶⁾.

一般に生体内における水と電解質の調節については, 本質的に下垂体後葉ホルモンの ADH と副腎皮質ホルモンの Ald がそれぞれ腎臓における水と Na の再吸収を高めることによって, 体内水と Na の恒常性が維持される²⁰⁾. また, この両ホルモンの変動は血漿浸透圧の刺激^{5, 18)} 及びレニンの分泌¹⁰⁾によって増減を示すことが知られている. ところが長時間の water immersion により, 利尿現象が起こり^{1, 9)}, それは venous return の増加が心房の伸展受容器を刺激し, それによってレニン・アンギオテンシンⅡ・アルドステロン系及び ADH の分泌が抑制されたためと示されている^{8, 9)}. しかし, 最近では同様な条件による利尿現象は, ANF の調節が関与し, この ANF は腎臓の輸入細動脈の弛緩を起こすとともにレニンや Ald の分泌を抑制した結果, ナトリウム性利尿が起こると言及されている¹⁾. いずれにしろ水浸安静による利尿の本質的な機序について, 統一された意見は示されていないが, 水浸による利尿の現象が起こるということに異論はないであろう.

本実験の水浸安静はわずか15分間のみであったが, HR の結果は陸上安静レベルより有意に低下し, 血中 Ald 濃度も陸上安静レベルと比較して有意に低下した. また, 血漿 ADH は陸上安静値より水浸直後の値の方が低い傾向にあり, 尿の排泄量は増加する傾向にあった. これはおそらく, HR は心房内の伸展受容器が venous return の増加を受けて反応した結果と推測され, また, それによって心容積も増大したと考えられる. したが

ってこの水浸安静による血中 ADH と Ald 濃度の低下は, Greenleaf⁹⁾ に示されたように水の刺激により venous return の増加が心房を伸展させ, それによって, もっと強力な利尿作用である ANF¹⁾ の分泌刺激が, ADH と Ald の分泌を抑制しながら利尿傾向をもたらしたのであろう.

陸上の自転車エルゴメーターと水中ランニング運動による $\dot{V}O_2\text{max}$ と HRmax の結果はほぼ同水準にあったが, 血中乳酸レベルは自転車エルゴメーター運動より水中ランニング運動の方が20%高く, 有意な差が認められた. この運動中における乳酸濃度の上昇はアドレナリン濃度の上昇と関係し, これは運動中にアドレナリンが血中のグリコーゲンを分解し, 筋肉中と血中の乳酸濃度を高める作用があるからである. また同レベルの無酸素性運動を異なる環境下で実施し比較する場合, 自転車エルゴメーターの局所運動より, 水泳運動における全身運動の方が, 運動中筋肉の動員量が多く¹¹⁾血中カテコルアミン濃度の増加¹⁰⁾も有意に高いことが認められている. さらに血中の乳酸濃度と温度変化との関係においては, 21℃, 27℃及び33℃の異なった水温条件下で, かつ同レベルの $\dot{V}O_2$ 68% の運動強度の水泳運動を60分間行った Galbo らの研究がある. その結果, 低水温ほど核心温度が低下し, 血漿アドレナリン濃度も顕著に上昇したため, 血中乳酸濃度の上昇が増加したと報告されている⁷⁾. このように, 本実験の両運動間の呼吸・循環機能の結果はほぼ同様であったが, 陸上運動よりこの水中ランニング運動直後の乳酸の顕著な上昇現象における差は, おそらく水泳運動では低水温の影響や筋肉の動員量が多いことや, カテコルアミンが上昇しやすい^{7, 10)} ことに直接関連しているからであろう. この点についてはさらに検討を重ねる必要がある.

血中成分は強い運動強度の影響を受け, 運動直後に顕著な反映を示すことが知られている²¹⁾. 本実験の運動直後における血中 Ald と ADH ホルモン濃度は, 水中ランニング運動より自転車エルゴメーター運動の方が有意に高く, これは Gurzennec ら¹⁰⁾と Böning ら³⁾に報告された結果と同様であり, 彼らによると, 陸上運動時では血漿

Ald や ADH の濃度は大きな上昇現象を示すが、最大努力下の水泳運動では陸上運動のような上昇は、見出されなかったと言及されている³⁾。また最近では身体運動^{17,22)}と water immersion¹⁾という生理的負荷に対し血漿中 ANF という物質の存在が確認され、その生理作用には水利尿、Na 利尿作用などがあるとともに、血漿 Ald と ADH の分泌を抑制する作用もあると示されている。またこの血漿 ANF の濃度は in vitro の実験²⁾や人間の運動時^{17,19,22)}における HR、心拍出量、血漿浸透圧および血清 Na 濃度等の上昇によっても影響されることが報告されている。これらのことから、この ANF というホルモンは全身の体液および循環調節に重要な役割を担っている可能性があると考えられる。したがって本研究の結果から二つのことが考えられる。その一は、水浸安静での HR 低下、および水中ランニング運動で見られた血漿 ADH と Ald の低下現象は、おそらく水中という同様な環境においては、身体に対する刺激条件が異なってもこの両ホルモンの血漿への分泌が何らかの同様な抑制因子によって影響を受けていることが考えられる。その二は、最近、この両ホルモンに拮抗性を持つ物質として ANF が上げられている¹⁾。この物質は心臓から分泌され、体液の調節にかなり関与していることが注目されている。またこの血漿 ANF の濃度変化と運動に関する研究は、陸上安静や陸上運動より水浸安静および水中運動の方が水圧の影響を受け、より大きな venous return となるため、心房筋の伸展が ANF の分泌をより促進させているのではないかと示唆されている^{1,10)}。そのため、本研究の水浸安静および水中ランニング運動で得られたこの血漿 ADH と Ald の分泌低下現象は、おそらくこの ANF の拮抗作用、あるいはほかの強力な調節因子がこの両ホルモンの分泌を抑制しながら腎機能の代謝、および体液調節に修飾しているからと考えられる。

尿の生成は、糸球体濾過量(GFR)の変動と尿細管における水の再吸収によって決定される。運動と腎血流量との関係においては、運動中のエネルギー代謝の速度が速まるほど動脈血の血流再配分

の現象が起こり¹⁰⁾、活動筋への血流量が増大するために、腎血流量は減少する¹²⁾。また腎血流量の指標となる GFR は長時間の激しい運動を実施するほど低減し¹²⁾、ひいては尿排泄量の低下を導くと言われている¹³⁾。一般に、身体運動による尿の分時量は減少することが通説となっている^{20,23)}が、運動後、時間の経過にしたがって一過性の運動性利尿が発生することも指摘されている¹⁴⁾。本実験の結果では前者と同様な傾向にあり、その減尿現象についてはいくつかの生理反応の複合作用によるものと考えられる。まず、Ccr の変化による影響からは、激運動時に腎臓の輸入細動脈が plasma volume 及び細動脈圧の変化を感知することによって収縮し、GFR の低減を招来すると言われている²³⁾。本研究の水中と陸上の両運動で得られた Ccr は、最大努力運動の直後に前者は約 63%、後者は 65% までの低下を示し、これは鈴木²¹⁾の最大運動時に得られた 54% 低下した結果とはほぼ同様である。つまり激運動により腎機能の anoxia 現象を強く反映した結果と考えられる。また水中と陸上の両運動での Ccr と尿排泄量との相関は、 $r=0.401(p<0.05)$ と $r=0.525(p<0.01)$ のそれぞれであったため、運動パターンに関係なく運動時における尿量の調節は、Ccr の減少による影響が大きい^{21,23)}ことを示唆している。

次に、血漿 ADH と Ald の両ホルモンが尿量の調節に及ぼす影響については、ADH と尿量変化との間には両運動様式とも顕著な相関は認められなかったが、水中と陸上の両運動での血漿 ADH と血漿浸透圧との相関は、 $r=0.840(p<0.001)$ と $r=0.866(p<0.001)$ のそれぞれであり、血漿 ADH と尿中浸透圧濃度との相関は、 $r=-0.787(p<0.001)$ と $r=-0.696(p<0.001)$ の逆相関であった。また尿浸透圧濃度と自由水クリアランスとの相関も、 $r=-0.855(p<0.001)$ と $r=-0.854(p<0.001)$ の逆相関であった。これらのことから、ADH の分泌は血漿浸透圧濃度の上昇と循環血液量の増大による影響を受け²³⁾、またこの ADH の作用は尿細管と集合管の水の透過性を促進し、尿中への純水の排泄を抑制したものと類推される。いずれにしろ、本研究の両運動による

ADH 濃度と尿量との間には、低い相関しか見られなかったため、激運動の刺激によって上昇した ADH の腎機能への作用は明らかでない^{21,23)}と考えられる。一方、Ald は遠位尿細管及び集合管において Na の再吸収を調節し、またその分泌量は高い運動強度と持続時間に依存して上昇することが報告されている^{4,23)}。本研究の結果では、水中と陸上の両運動による血漿 Ald 濃度と尿中 Na 排泄量との相関は、 $r = -0.694$ ($p < 0.001$) と $r = -0.698$ ($p < 0.001$) のそれぞれであり、また血漿 Ald 濃度と尿量との相関は $r = -0.465$ ($p < 0.05$) と $r = -0.434$ ($p < 0.05$) のそれぞれであった。このことから、本実験の両運動による Ald が尿量の調節に及ぼす影響は、Ald が遠位尿細管と皮質集合管に作用し、Na の再吸収を促進させながら水を体内に貯留した結果、減尿現象を招来したと推測される。

このように本研究の両運動では、ともに尿量の減少現象は Gcr の低下及び Ald と ADH 濃度の上昇に関係したため、激運動時における尿量の調節は、複合因子の作用によって影響されたと考えられる。また両運動間における尿濃縮能の指標である尿浸透圧、Ccr、 C_{H_2O} 及び尿量の結果は、有意な差が認められなかった。しかし、この両運動直後に得られた血漿ホルモンである ADH と Ald は水中運動においても、水浸実験においても同様に抑制されたため、先行研究^{3,10)}の結果と一致している。これらのことから、腎機能の代謝に影響を及ぼすホルモンである ADH と Ald との分泌レベルは水中運動と陸上運動によって違う反応を示すという仮説が成立した。また、強い運動強度では生体内の体液調節バランスは ADH と Ald に対して拮抗作用を持つ ANF 或いはほかの作用因子が特に水浸及び水中運動において腎機能代謝に対して、優位に働いたため ADH と Ald の分泌を相殺したかもしれない。この点については今後検討を重ねる必要があると考えている。

V. 要 約

本研究の目的は、水中の最大ランニング運動が腎機能に及ぼす影響を調べることである。健康男

子 5 名に、最大努力水中ランニング運動と、最大陸上自転車エルゴメーター運動とを実施し、また 6 名の被験者に、水浸の安静実験を行った。

それぞれの実験結果から、以下に示す知見を得た。

1) $\dot{V}O_2\max$ と HRmax は、水中ランニング運動と陸上の自転車エルゴメーター運動ではほぼ同程度であった。また運動直後の血中乳酸値においては、両運動ともそれぞれの安静値より有意な増加を示し、さらにこの増加は、陸上運動より水中ランニング運動の方が有意な高値を示した。

2) HR と血漿 Ald は、水浸安静時の方が陸上安静時より有意な低値を示した。血漿の ADH は陸上安静より低い傾向にあり、また分時尿量の増加変化も有意な差が認められなかった。

3) 両運動の運動直後に得られた血漿 ADH と Ald は安静値より増加し、有意な差が認められた。またこの増加は、水中ランニング運動より陸上の自転車エルゴメーター運動の方が有意な高値を示した。

4) 両運動の運動直後に得られた尿量変化は、安静値より有意な低値を示し、またそれは、それぞれの Ccr の減少との間に正の相関が認められ、Ald 濃度の増加との間に、負の相関関係が認められた。

以上の結果より、水中ランニング運動では、水圧の影響及び心拍出量の増大により、より大きな venous return をもたらした。そのため、心房筋の伸展が心房内にある ANF の分泌をさらに促進させたと推測できる。また、この水浸及び水中運動時において血漿 ADH と Ald に対して拮抗作用を持つ ANF 或いはほかの作用因子の優位な働きがあるため、血漿 ADH と Ald との分泌が抑制されながら体内の体液調節バランスが維持したと考えられている。

謝 辞

稿を終えるにあたり、御助言を頂いた東京慈恵会医科大学馬詰良樹教授に厚く御礼申し上げます。また、実験に多大な便宜を図って下さった東京都中野区、暢東京アスレティッククラブ体育研究所取締役社長正村孝至氏に慎んで感謝致します。

(受付 平成元年 9 月 6 日)

文 献

- 1) Anderson, J. V., Millar, N. D., O'hare, J. P., Mackenzie, J. C., Corral, R. I. M. and Bloom, S. R.(1986) : Atrial natriuretic peptide : physiological release associate with natriuresis during water immersion in man. *Clin. Sci.* **71**, 319-322.
- 2) Arjamo, O., and Vuolteenaho, O.(1985) : Sodium ion stimulates the release of atrial natriuretic polypeptides(ANF)from rat atria. *Biochem. Biophys. Res. Comm.* **132**, 357-381.
- 3) Böning, D., Mrugalla, M., Maassen, N., Busse M. and Wagner, T. O. F.(1988) : Exercise versus immersion : antagonistic effects on water and electrolyte metabolism during swimming. *Eur. J. Appl. Physiol.* **57**, 248-253.
- 4) Convertino, V., Keil, L., Bernaure, E., and Greenleaf, J.(1981) : Plasma volume, osmolality, vasopressin and renin activity during graded exercise in man. *J. Appl. Physiol.* **50**, 123-128.
- 5) Dunn, f. L., Breman, T. J., Nelson, A. E., and Robertson, G. L.(1973) : The role of blood osmolality and volume in regulating vasopressin secretion in the rat. *J. Clin. Invest.* **52**, 3212-3219.
- 6) Epstein, M.(1978) : Renal effects of head out water immersion in mans : implication for an understanding of volume hemeostasis. *Physiol. Rev.* **58**, 529-603.
- 7) Galbo, H., Houston, M. E., Christensen, N. J., Holst, J. J., Nielsen, B., Nygaard, E., and Susuki, J.(1979) : The effect of water temperature on the hormonal response to prolonged swimming. *Acta. Physiol. Scand.* **105**, 326-337.
- 8) Gauer, OH. Henry, JP.(1986) : Neurohormonal control of plasma volume. In : Guyton, AC., Cowl-ey, AW (eds) *Cardiovascular physiology II*, vol. 9. University Park, Baltimore, M. D. PP 145-190.
- 9) Greenleaf, JE.(1984) : Physiological response to prolonged bed rest and fluid immersion in humans. *J. Appl. Physiol : Respirat E5viron Exercise Physiol.* **57**, 619-633.
- 10) Guezennec, C. Y., Defer, G., Cazorla, G., Sobathier, C., Lhosie, F.(1986) : Plasma renin activiey, aldosterone and catecholamine levels when swimming and running. *Eur. J. Appl. Physiol.* **54**, 632-637.
- 11) Holmer, I, Stein, E. M., Saltin, B., and strand, P-O(1974) : Hemodynamic and respiratory responses compared in swimming and running. *J. Appl. Physiol.* **37**(1), 49-54.
- 12) 井川幸雄(1977) : 身体運動と腎臓および消化器のはたらき. *新体育*, **47**(8), 622-625.
- 13) 井川幸雄, 鈴木政登, 塩田正俊(1984) : カテコラミン, アンギオテンシン及び cAMP 反応に及ぼす運動負荷強度の影響. *体育科学*, **12**, 201-212.
- 14) 井本岳秋, 沢田芳男, 小郷 敏(1985) : 疾走負荷による運動性利尿の発見. *体力科学*, **34**, 247-258.
- 15) Kachadorian, W. A., Johnson, R. E.(1971) : The effect of exercise on some clinical measures of renal function. *Amer. Heart J.* **82**(2), 278-280.
- 16) Koszuta, L. E.(1986) : Water excise causes ripples. *The physician and sports-medicine.* **14**, 163-167.
- 17) Lijnen, P., Hespel, P., Mbuyamba-kabangu, J. R., Goris, M., Lysens, R., Vandeneynde, E., Fagard, R. and Ahery, A.(1987) : Plasma atrial natriuretic peptide(α -ANP)concentration and levels of cyclic nucleotides before and after a marathon. *J. Appl. Physiol.* **63**, 1180-1184.
- 18) 丸茂文昭, 坂本尚登(1983) : Vasopressin の腎における作用機序. *日本臨床*, **502**, 387-400.
- 19) Nielsen, B.(1983) : Fluid shifts and heart responses during prolonged swimming. In : Hol-lander, AP., Huiging, PA., de Grppt, G (eds) *Biomechanics and medicine in swimming*, Int Ser Sport Sci 14. Human Kinetics Publ Inc Cham-paign, Illinois, pp 302-309.
- 20) Poortmans, JR.(1984) : Exercise and renal function. *Sports Medicine.* **1**, 125-153.
- 21) 鈴木政登(1987) : 運動負荷時の腎機能判定法—とくに健常成人における腎濃縮能と運動強度との関連—. *慈恵医大誌*, **102**, 89-105.
- 22) Tanaka, H., Shindo, M., Gutkowska, J., Kinoshita, A., Urata, H., Ikeda, M., and Arakawa, K.(1986) : Effect of acute excise on plasma immunoreac-tiveatrial factor. *Life Sci.* **39**, 1685-1693.
- 23) Wade, CH., Claybaugh, JR.(1980) : Plasma renin activity, vasopressin concentration and ruinary excretory responses to exercise in men. *J. Appl. Physiol.* **49**(6), 930-936.