

児童の水泳時心拍数—酸素摂取量関係に 及ぼす水温の影響

広島大学 黒川 隆志

The Effect of Water Temperature on Heart Rate-Oxygen Uptake Relationship During Swimming in Children

by

Takashi Kurokawa

Hiroshima University, Faculty of Education

ABSTRACT

Oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) and heart rate (HR) were measured during sub-maximal and maximal work in bicycling in air at 25°C and tethered swimming in water at 20, 25 and 32°C, in order to compare the response of HR- $\dot{V}O_2$ relationship in those four conditions. Subject were six boys from 10 to 12 years.

The plot of HR- $\dot{V}O_2$ was linear in all conditions, but shifted significantly to the right in cooler water. At a given submaximal $\dot{V}O_2$, HR in 20°C water was lower by 5.9, 14.7 and 20.0 beats/min than in 25°C water, 32°C water and 25°C air, respectively.

Regression equations for relationships of HR (y) to % $\dot{V}O_{2max}$ (x) were as follows:

$$\text{water, (20°C) } y=1.09x+56.8 \quad (r=0.912)$$

$$\text{(25°C) } y=1.25x+52.7 \quad (r=0.975)$$

$$\text{(32°C) } y=1.21x+66.7 \quad (r=0.963)$$

$$\text{air, (25°C) } y=1.21x+73.6 \quad (r=0.964)$$

要 旨

児童の水泳時心拍数 (HR)—酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$)

関係に及ぼす水温の影響を検討するために、気温 25°C での ペダリング および 水温 20, 25, 30°C での牽引水泳における最大下および最大作業中に

$\dot{V}O_2$ と HR を測定した。被検者は10~12歳の男子児童6名であった。

すべての測定条件において、HR と $\dot{V}O_2$ は直線関係を示したが、直線関係式は水温の低下にともない右方向に有意に偏位した。一定の最大下 $\dot{V}O_2$ において、水温 20°C での HR は水温 25°C より5.9拍/分低く、水温 32°C とペダリングよりそれぞれ14.7拍/分、20.0拍/分低かった。

HR (y) と% $\dot{V}O_{2max}$ (x) との間に次のような推定式が得られた。

$$\text{水泳 : (20°C) } y = 1.09x + 56.8 \quad (r = 0.912)$$

$$(25°C) y = 1.25x + 52.7 \quad (r = 0.975)$$

$$(32°C) y = 1.21x + 66.7 \quad (r = 0.963)$$

$$\text{ペダリング : (25°C) } y = 1.21x + 73.6 \quad (r = 0.964)$$

1. 緒 言

近年、学校やスイミングクラブなどの体育現場で水泳授業時の心拍数 (HR) 応答が測定されつつある^{5,24)}。水泳人口は若年層に多いのでこれらの報告は今後ますます増加するものと予想される。したがって、水泳時 HR から運動強度を推定する方法の妥当性を検討しておくことは、水泳による児童の体力の向上を計画する上で急務であると考えられる。

酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) の増加にともなう HR の変化過程を水泳時と陸上時とで比較したこれまでの報告をみると^{4,13,19,21)}、一定 $\dot{V}O_2$ に対する HR は陸上時に比較して水泳時に10~40拍/分低い。したがって、水泳時 HR を陸上時と同一尺度で用いると、水泳時の運動強度を過小評価することになる。このような水泳時 HR の低下には水温の影響が考えられることから、黒川と上田¹⁴⁾は、HR— $\dot{V}O_2$ 関係式に及ぼす水温の影響を系統的に検討している。ただしこの場合の対象は成人であり、児童ではこの関係式が成人と異なる可能性が高い。その理由として、第一に、児童は成人に比べて一定 $\dot{V}O_2$ に対する HR が高いこと、第二

に、児童は成人より身体容量が小さいので水温の影響を直接的に受けやすいことが考えられる。

そこで本研究では、児童を対象として水泳時の HR— $\dot{V}O_2$ 関係式に及ぼす水温の影響を検討することにより、異なる水温環境下での HR から水泳時の運動強度を推定することを目的とした。

2. 研究方法

1) 被 検 者

被検者としてスイミングクラブに所属する小学校4~6年児童6名を用いた。彼らは水泳練習を1日1~1.5時間、週1~2回、4~6年間(平均5.1年間)続けてきたので水泳運動に習熟していた。しかし、日常の水泳練習は水温29°C前後の室内温水プールで行われていたので、彼らは寒冷刺激には馴化していなかった。彼らの年齢、形態計測値、および水泳とペダリングにおける最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) を表1に示した。実験に先だち、彼らには牽引方式の水泳を十分に習熟させた。

2) 実験手順

水泳の運動様式として牽引水泳を用い、比較のために陸上運動としてペダリングを用いた。牽引水泳は水温調節機構を備えた水槽(精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$)で実施した。温度条件として水温32, 25, 20°Cの3条件を与え、この順序で、1週間おきに測定を実施した。ペダリングでの測定は気温25°Cの人工気象室(精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$)で実施し、水泳での測定の前日に2名ずつ測定した。

これらの各条件について、水泳では1kgから始めて1kgづつ負荷量を増し、ペダリングでは回転数60rpmで、0.5kpから始めて0.5kpづつ負荷量を増して被検者をオールアウトにいたらせた。各作業負荷量で5分間運動を行い、作業間には10分間の休息を置いた。安静時の測定は水温32°Cと気温25°Cの2条件で実施した。

3) 測定項目と測定方法

表1 Physical characteristics of subjects.

Subject	Age (yr)	Weight (kg)	Height (cm)	Skin fold (mm)		Body Density (g/ml)	Body Fat		Lean Body Wt. (kg)	$\dot{V}O_2$ max (l/min)	
				Arm	Back		(%)	(kg)		Swim- ming	Bicycle
1	12.5	42.5	157.7	5.4	5.5	1.0723	14.1	6.0	36.5	2.45	2.60
2	11.0	39.5	144.2	9.9	6.3	1.0634	17.6	7.0	32.5	1.63	1.69
3	11.9	39.5	150.1	8.0	6.1	1.0666	16.4	6.5	33.0	2.07	2.08
4	11.0	34.7	141.3	10.0	7.7	1.0612	18.6	6.4	28.3	1.89	1.91
5	10.2	32.5	137.4	8.1	5.5	1.0674	16.1	5.2	27.3	1.62	1.72
6	11.6	37.0	147.6	7.7	4.8	1.0690	15.4	5.7	31.3	2.06	2.00
\bar{X}	11.4	37.6	146.4	8.2	6.0	1.0667	16.3	6.1	31.5	1.95	2.00
\pm SD	0.7	3.3	6.5	1.5	0.9	0.0036	1.5	0.6	3.1	0.29	0.30

$\dot{V}O_2$ の測定では、水泳、ペダリングともに、頭部にベルトで固定されたシュノーケルタイプの採気装置を通して被検者に呼吸させ、ダグラスバックに呼気を採集した。安静時の測定では30分間の安静の後5分間採気し、最大下負荷量では運動開始後4分目から1分間採気した。最大負荷量では2分目から1分ないし30秒ごとに連続採気した。乾式ガスメータで換気量 (\dot{V}_E) を測定し、 O_2 と CO_2 の分析には呼気ガス用質量分析計 (Perkin-Elmer 社製; MGA-1100) を用いた。HR は胸部双極誘導法による心電図から、呼吸数はサーミスター法による呼吸曲線から、それぞれ運動終了前

30秒間の値を1分間値に換算して求めた。体脂肪率と徐脂肪体重は皮脂厚法から求めた²³⁾。

3. 結 果

1) $\dot{V}O_2$

水泳における負荷量と $\dot{V}O_2$ との関係を図1に示した。すべての温度条件において、 $\dot{V}O_2$ と負荷量とはほぼ直線関係を示した。

温度の影響をみると、4kg 以下の一定負荷量における $\dot{V}O_2$ は水温が低いほど高くなる傾向が認められた。とくに、2kg と 3kg の負荷量において水温 20°C の $\dot{V}O_2$ は水温 32°C の $\dot{V}O_2$ より有

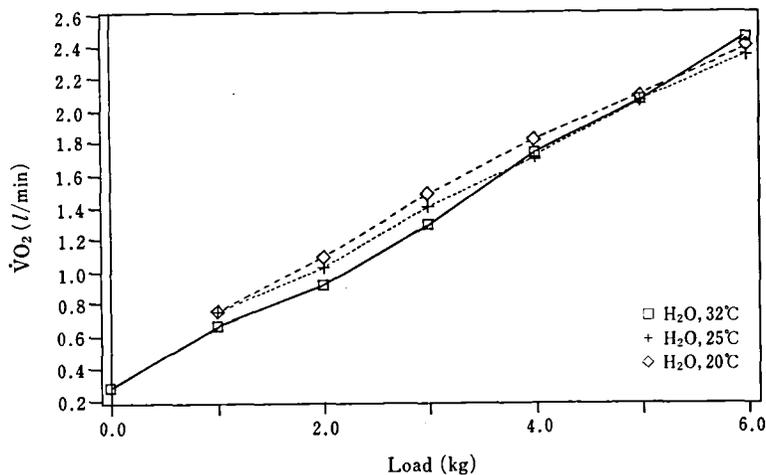


図1 Relationship between oxygen uptake and work load in water of different temperatures.

意に高かった ($p < 0.05$). 4 kg 以上の負荷量では, \dot{V}_{O_2} におよぼす水温の影響は認められなかった.

水温 32°C の場合には, すべての被検者が寒さに対してまったく不平を言わなかった. 水温 25°C の場合には, すべての被検者が寒さに対して若干の不平等をもらすに過ぎなかった. しかし, 水温 20°C においては, すべての被検者が寒さに対して不平を言い, とくに, 最大下強度の水泳において制御できないほどの震えを示した.

2) \dot{V}_E

4つの温度条件間で等価の \dot{V}_{O_2} に対して \dot{V}_E を比較するため, 各被検者の \dot{V}_{O_2} 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 l/分に相当する \dot{V}_E を次のような統計処理により求めた. すなわち, \dot{V}_E を従属変数に \dot{V}_{O_2} を独立変数に取り, 上記の任意の \dot{V}_{O_2} をはさむ2点から各被検者の直線回帰式を求めた. 次に, 任意の \dot{V}_{O_2} をその直線回帰式に代入して \dot{V}_E を算出した. このようにして得られた \dot{V}_E を温度条件ごとに平均して, \dot{V}_{O_2} に対して示したのが図 2 である.

\dot{V}_E は \dot{V}_{O_2} の増加に対していずれの温度条件でも指数関数的に増加した. そして, \dot{V}_E に及ぼす水泳および水温の影響はいずれの \dot{V}_{O_2} においても認められなかった.

3) HR

水温 32°C における各被検者の HR- \dot{V}_{O_2} 関係を示したのが図 3 である. いずれの被検者においても \dot{V}_{O_2} の増加に対して HR はほぼ直線的に増加した.

\dot{V}_{O_2} と HR のこのような直線関係はペダリングと他の水温においても同様に認められた. そこで, 各温度条件ごとに, 全被検者の測定値から HR- \dot{V}_{O_2} 直線関係式を求めて図示したのが図 4 である.

ペダリングに比べて水泳では直線が右方向に移動し, しかも移動の程度は水温の低いほど大きかった. とくに, 20°C と 25°C の水温ではペダリングに比べて, すべての \dot{V}_{O_2} の範囲で HR は有意に低かった ($p < 0.05$). 直線の勾配はペダリング, 水温 32°C, および水温 25°C の温度条件でほぼ等しく, \dot{V}_{O_2} 1 l/分の増加に対して HR 55~

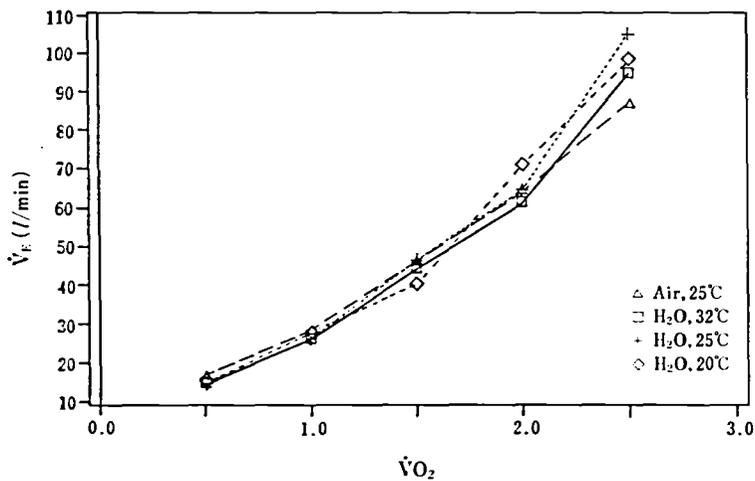


図 2 Minute pulmonary ventilation as a function of \dot{V}_{O_2} during bicycling in air and swimming in water of three different temperatures.

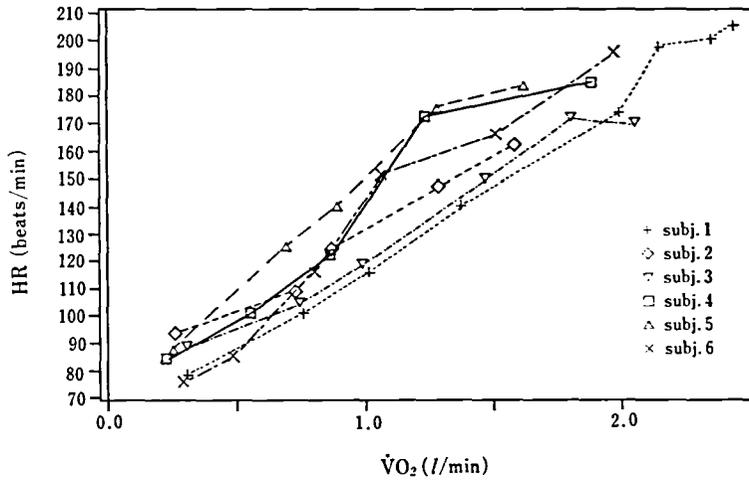


図3 Heart rate as a function of $\dot{V}O_2$ during swimming in water of 32°C for each subject.

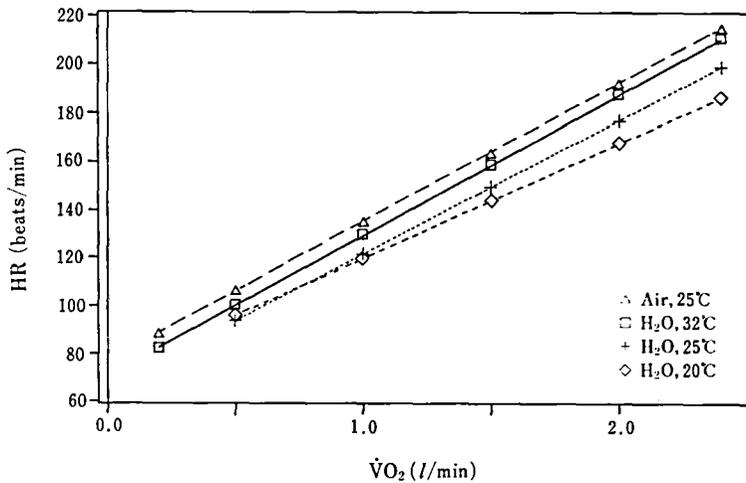


図4 Heart rate as a function of $\dot{V}O_2$ during bicycling in air and swimming in water of three different temperatures.

58拍/分の増加であり、水温 20°C ではそれより若干低く47拍/分の増加であった。

一定の最大下 $\dot{V}O_2$ に対して、水温 20°C における HR は水温 25°C より5.9拍/分低く、水温 32°C とペダリングよりそれぞれ14.7拍/分、20.0拍/分低かった。一定の HR にたいして、水温 20°C における $\dot{V}O_2$ は、水温 25°C より 0.12l/

分高く、水温 32°C とペダリングよりそれぞれ 0.28l/分、0.37l/分高かった。

HR (y) と $\dot{V}O_2$ (x) との間に次のような推定式が得られた。

水泳：

$$(20^\circ\text{C}) y=47.3x+72.2 \quad (r=0.806)$$

$$(25^\circ\text{C}) y=55.1x+66.3 \quad (r=0.864)$$

(32°C) $y=58.0x+70.8$ ($r=0.950$)

ペダリング :

(25°C) $y=57.0x+77.6$ ($r=0.957$)

HR—% $\dot{V}O_2$ max 関係式は次のような統計処理により求めた。各個人の HR—% $\dot{V}O_2$ max 関係式から% $\dot{V}O_2$ max 20, 40, 60, 80, 100%に相当する HR を求め、次に上記% $\dot{V}O_2$ max に相当する 6名の HR からある温度条件における HR—% $\dot{V}O_2$ max 直線関係式を求めた。このような手続きで求められた4つの温度条件における HR—% $\dot{V}O_2$ max 関係式を図5に示した。

ペダリングに比べて水泳では直線が右方向に移動し、しかも移動の程度は水温の低いほど大きかった。ペダリングと水温 32°C との間および水温 25°C と水温 20°C との間には、一定の% $\dot{V}O_2$ max における HR の有意な差は認められなかったが、水温 20°C と水温 25°C の HR はともに、ペダリングと水温 32°C に比べてすべての $\dot{V}O_2$ の範囲で有意に低かった ($p<0.05\sim 0.01$)。直線の勾配はペダリング、水温 32°C、水温 25°C、水温 20°C の4条件ではほぼ等しく、% $\dot{V}O_2$ max 10%の増加に対してそれぞれ HR 12.2, 12.2, 12.6, 11.0拍/

分の増加であった。

一定の最大下% $\dot{V}O_2$ max に対して、水温 20°C における HR は水温 25°C より5.2拍/分低く、水温 32°C とペダリングよりそれぞれ17.0拍/分、23.9拍/分低かった。一定の最大下HR に対して、水温 20°C における% $\dot{V}O_2$ max は水温 25°C より6.1%高く、水温 32°C とペダリングよりそれぞれ15.5%、21.1%高かった。

HR (y) と% $\dot{V}O_2$ max (x) との間に次のような推定式が得られた。

水泳 :

(20°C) $y=1.09x+56.8$ ($r=0.912$)

(25°C) $y=1.25x+52.7$ ($r=0.975$)

(32°C) $y=1.21x+66.7$ ($r=0.963$)

ペダリング :

(25°C) $y=1.21x+73.6$ ($r=0.964$)

4. 考 察

本研究では、一定の最大下負荷量において、水温が低くなるほど $\dot{V}O_2$ が増加し、水温 32°C と水温 20°C との間で 200ml/分の差が認められた。これと同様の傾向は他の報告でも認められ、

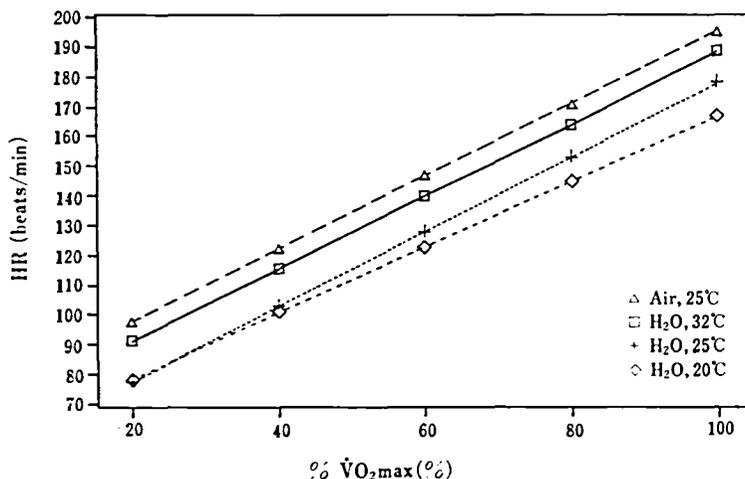


図5 Heart rate as a function of % $\dot{V}O_2$ max during bicycling in air and swimming in water of three different temperatures.

腕と脚のエルゴメータを用いた McArdle ら²⁰⁾は 400ml/分の差を, さらに自由水泳を用いた Nadel ら²²⁾および Holmer and Bergh⁸⁾はそれぞれ 750ml/分, 500ml/分の差を報告している. 本研究における $\dot{V}O_2$ の増加量は彼らの報告に比べて少ない. この原因として, 彼らの報告では温度差が大きい (33°C と 18°C) こと, さらに本研究の被検者が児童であったために彼らの成人に比べて体熱産生量の絶対量が少ないことが指摘される. このような低水温環境下での最大下運動時における $\dot{V}O_2$ 増加の要因としては, 寒さに起因した震えによる体熱産生量の増加および機械的効率の低下が考えられる.

4kg 以上の負荷量で水温による $\dot{V}O_2$ の差がほとんど認められなかったのは, これらの負荷量ではエネルギー代謝が亢進して, 体温維持に要するエネルギーが少なくすむことによると考えられる.

\dot{V}_E は水泳および水温の影響を受けなかった. 一般に, 水泳時には陸上運動時に比較して \dot{V}_E が低いと報告されていて^{1,2,6,21)}, この原因として体位と水圧の影響, 水泳時の呼気時間の減少等の要因が指摘されている^{9,10,14)}. しかし, 水泳の鍛錬者ではこれらの影響を受けにくいとする報告もある¹⁹⁾. 本研究の被検者も水泳に十分に習熟していたことから, これらの要因の影響を受けにくかったものと考えられる. また, \dot{V}_E に水温の影響が認められなかったことから, 水温の低下は呼吸中枢を直接刺激する要因として作用しないものと考えられる.

水泳時の最大下 HR および最大 HR は, ランニング時や歩行時に比べて低いと報告されている^{4,13,18,21)}. そして, この原因として, 運動媒体, 体位, 水温, 活動筋量などの要因が水泳と陸上運動とで異なること, さらに水泳における潜水性徐脈の存在などが指摘されている^{4,12,13,18,21)}. 本研究で認められたように, 水温の低下にともなって

HR- $\dot{V}O_2$ 関係が右に移動したことから, 水温の低下が徐脈を助長させる大きな要因であることは明らかである.

水泳および冷水によるこのような徐脈助長のメカニズムとして, 次のことが考えられる^{12,17)}. 水中では, 水圧が加わり末梢から胸郭へ血液が移動する. このことは中心静脈圧を増大させ, 心容積も拡大させる. これらの要因により心臓への灌注圧が増大し, ひいては 1 回拍出量が増加する. これらに加えて冷水刺激は末梢血管収縮を引き起こし, 全末梢抵抗が増大する. このことが圧受容器を刺激して HR が低下する. ただし, HR の低下は 1 回拍出量の増大によって応じられることにより, 心拍出量は温水と同程度に維持されることになる²⁰⁾.

文 献

- 1) Astrand, P.-O., L. Engstrom, B.O. Eriksson, P. Karlberg, I. Nylander, B. Saltin, and C. Thoren; Girl Swimmers. *Acta Paediat. Scand.*, Suppl. 147 : 43-63 (1963)
- 2) Dixon, R.W. and J.A. Faulkner; Cardiac output during maximal effort running and swimming. *J. Appl. Physiol.*, 30 : 653-656 (1971)
- 3) Echt, M., L. Lange, and O.H. Gauer; Changes in peripheral venous tone and central transmural pressure during immersion in a thermoneutral bath. *Pflugers Arch.*, 352 : 211-217 (1974)
- 4) Goodwin, A.B. and G.R. Cumming; Radio telemetry of the electrocardiogram, fitness test, and oxygen uptake of waterpolo players. *Canad. Med. Ass. J.*, 95 : 402-409 (1966)
- 5) 合屋十四秋; 「水泳授業時の心拍数変動と時間泳による運動処方」の検討」*デサントスポーツ科学*, 7 : 203-213 (1986)
- 6) Holmer, I.; Oxygen uptake during swimming in man. *J. Appl. Physiol.*, 33 : 502-509 (1972)
- 7) Holmer, I., E.M. Stein, B. Saltin, B. Ekblom, and P.-O. Astrand; Hemodynamic and respiratory responses compared in swimming and

- running. *J. Appl. Physiol.*, **37** : 49—54 (1974)
- 8) Holmer, I. and V. Bergh; Metabolic and thermal response to swimming in water at varying temperatures. *J. Appl. Physiol.*, **37** : 702—705 (1974)
- 9) 黒川隆志, 池上晴夫; 「肺換気力学特性に及ぼす体位, water immersion 及び水泳トレーニングの影響」, 体力科学, **29** : 98—109 (1980)
- 10) 黒川隆志, 池上晴夫; 「水泳 および 陸上運動時肺気量とクロージングボリューム」, 体力科学, **30** : 220—227 (1981)
- 11) 黒川隆志; 「換気能力, 無酸素的能力 および 有酸素的能力からみた水泳の生理学的特性」, 教育学博士論文, 筑波大学 (1983)
- 12) 黒川隆志; 「水中運動の循環反応」, 体育の科学, **34** : 510—517 (1984)
- 13) 黒川隆志, 野村武男, 富樫泰一, 池上晴夫; 「水泳, ランニングおよびペダリングにおける水泳選手の呼吸循環系の反応」, 体力科学, **33** : 157—170 (1984)
- 14) 黒川隆志; 「水泳とガス交換」, *J.J. Sports Science*, **4** : 505—511 (1985)
- 15) 黒川隆志, 富樫泰一, 野村武男, 池上晴夫; 「最大酸素負荷量, 最大酸素摂取量および酸素需要量と水泳記録との関係」, 体育学研究, **29** : 295—305 (1985)
- 16) 黒川隆志, 上田毅; 「水泳時の心拍数—酸素摂取量関係に及ぼす水温の影響」, 体力科学, **35** : 304 (1986)
- 17) Lange, K., S. Lange, M. Echt, and O.H. Gauer; Heart volume in relation to body posture and immersion in a thermo-neutral bath. *Pfluegers. Arch.*, **352** : 219—226 (1974)
- 18) Magel, J.R. and J.A. Faulkner; Maximal oxygen uptake of college swimmers. *J. Appl. Physiol.*, **22** : 929—933 (1967)
- 19) Magel, J.R.; Comparison of the physiologic response to varying intensities of submaximal work in tethered swimming and treadmill running. *J. Sports Med.*, **11** : 203—213 (1971)
- 20) McArdle, W.D., J.R. Magel, G.R. Lesmes, and G.S. Pechar; Metabolic and cardiovascular adjustment to work in air and water at 18, 25, and 33°C. *J. Appl. Physiol.*, **40** : 85—90 (1976)
- 21) McArdle, W.D., R.M. Glaser and J.R. Magel; Metabolic and Cardiorespiratory response during free swimming and treadmill walking. *J. Appl. Physiol.*, **30** : 733—738 (1971)
- 22) Nadel, E.R., I. Holmer, V. Bergh, P.-O. Astrand, and J.A.J. Stolwijk; Energy exchange of swimming man. *J. Appl. Physiol.*, **36** : 465—571 (1974)
- 23) Nagamine, S., K. Yamakawa, S. Isobe, S. Ichinose, and A. Kaga; Body composition and body density in adolescent boys and girls. *Jap. J. Nutr.*, **32** : 198—204 (1974)
- 24) 高本美和子, 埴田矢子, 齊藤昇; 「学校体育における水泳」, 日本水泳連盟科学技術委員会 (編), 水泳医学百科, 南江堂, PP. 10—14 (1987)