

●原 著

潜水に伴う労作強度の検討

芝山正治* 水野哲也**

古橋廣之進*** 眞野喜洋*

潜水プロフィールと実際の作業形態を分析した結果、水中作業はかなりの重労作であり、負荷の大きいことが知れた。

そこで、潜水労作に関する研究を行い、その労作を知る上での回帰式が求められた。

一方、5種のSCUBA用のレギュレーターについて機械的な圧抵抗を大気圧から6気圧までの環境下について空気および水中の条件下で調べた。

$\dot{V}_{O_2 \max}$ はSCUBA用レギュレーターで14%も落ち、この原因はその機械的呼吸抵抗によることが知れた。その上、 $\dot{V}_{O_2 \max}$ は水面遊泳で28%も減じられた。レギュレーターの圧抵抗の影響で水深30m以浅ならば、呼吸回数は30回以内に、一回換気量は2l以下にすべきことが予測された。そして、心拍数が150回に達するような潜水労作を強いると% of $\dot{V}_{O_2 \max}$ は23%も減ずるであろう。

キーワード：SCUBA潜水、レギュレーター、運動強度、呼吸抵抗、最大酸素摂取率

A study on diving work load

Masaharu Shibayama*, Tetsuya Mizuno**, Hironoshin Furuhashi*** and Yoshihiro Mano*

*Department of Public Health, Tokyo Medical and Dental University,

**Faculty of Physical Education and Liberal Arts, Tokyo Medical and Dental University

***Nihon University

According to the analysis of diving profiles and real working conditions of divers, underwater work was proved to be considerably hard and to give heavy stress to workers. So, in this paper, through the study of diving work, regression equations were introduced to evaluate the real work load. While the mechanical pressure resistances of five different types of SCUBA regulators were examined both in dry and wet conditions from 1 to 6 ATA (Atmospheres Absolute).

$\dot{V}_{O_2 \max}$ decreased 14% by using SCUBA regulators due to mechanical expiratory resistance. Fin-swimming decreased $\dot{V}_{O_2 \max}$ more significantly as 28%. Due to the effect of pressure resistance

of regulators, it is predicted that, if the diving depth is shallower than thirty meters, respiratory cycle should be kept within 30/min., and tidal volume should be under 2 liters. If the diver is forced to work under such condition as his heart rate reaches 150 beats/min., $\dot{V}_{O_2 \max}$ will decrease 23%. (author's abstract)

Keywords:

SCUBA Diving

Regulator

Work load

Respiratory resistance

% of $\dot{V}_{O_2 \max}$

労働衛生的立場からみた職業潜水者は、伊豆七島などの漁業潜水、石油備蓄や港湾土木などの潜水やサルベージ潜水などに分かれている。漁業などの水産関係潜水者を除いた職業潜水者に対して調査をしたところ全国で2,996名の潜水者が確認できた。また、近年スポーツダイバーの増加もめざましいものがある。

このような中で、海女を対象とした素潜りの研究や高圧環境における実験的研究については、すでに多くの報告がある^{1)~3)}。しかし、ヘルメットや

*東京医科歯科大学医学部公衆衛生学教室

**東京医科歯科大学教養部保健体育

***日本大学文理学部

フーカー潜水または、タンクを背負って潜水する SCUBA (Self-Contained Underwater Breathing Apparatus) 潜水における運動生理学的立場の研究は少ない^{4)~6)}。我々は、開放式 SCUBA 潜水による潜水活動中の運動生理学的研究について、実験研究を行ってきた⁵⁾⁷⁾。

本研究は、SCUBA Divers を対象として、陸上における労作運動と異なる労働強度がどのように負荷されているかを調べる目的で実験室およびプールにおいて最大酸素摂取量などを指標として検討を加えたところ、同一の \dot{V}_{O_2} であっても水中における労作は陸上における以上に過大となるという興味ある新知見を得た。

方 法

生体への負荷に関する検討として、健康な男子 7 名を被検者とした。平均年齢は、34.4 歳であり、いずれもスポーツダイバーで平均の潜水経験年数は 7.3 年である (表 1)。

SCUBA Diving で用いる呼吸器および水面を泳ぐ運動を比較するため実験は 3 群に分けて行った。第 1 および 2 群は実験室で行い、自転車エルゴメーターを用いる運動を第 1 群とした。第 2 群は、同様の運動であるが、ガス採取用のマスクを SUCBA Diving で用いるレギュレーターとし、機械的呼吸抵抗が加わったときの運動負荷とした。第 3 群は、SCUBA Diving で海面を泳ぐ、いわゆる水面移動法 (fin-swimming) の運動とした (図 1)。そしていずれの群共 All out まで追い込む最大作業までの負荷運動量とした。

呼吸ガス採取に用いるマスク (呼吸器) につい

表 1 被検者の身体物性

Subjects	Age, yr	Height, cm	Weight, kg	Experiences, yr
1	33	177	82	15
2	28	171	60	2
3	28	173	64	9
4	20	179	75	2
5	35	158	60	8
6	49	170	69	7
7	48	170	70	8
mean	34.4	171.1	68.5	7.3
SD	10.7	6.7	8.0	4.4

て、第 2 群は、タバタ社製 TR-60 型のデマンド方式のレギュレーターとしたが、第 1 および 3 群については、フクダ産業社製のマウスピース型である J バルブを用いた。

測定法は、3 群ともダグラスバック法にて呼吸ガスを採取し、AIC 社製 O_2 および CO_2 アナライザー (RAS-31 および RAS-41) によりガス分析し、乾式ガスメーター (KANSAI GAS METER 社製、NDS-5A-T) および日本光電社製の呼吸用アンプ (AR-600G) と換気量ユニット (AQ-600G) の 2 系統によって換気量を測定した。また、心拍数は、日本光電社製のライフスコープ (OEC-5201) により連続的に測定した。しかし、第 3 群のプールでの心拍数測定には、水中で行う実験であるため耐圧ケースの中に送信器を入れ測定記録した。なお、第 3 群においては、測定上の問題から呼吸数の測定は行えなかった。また、運動中の呼吸に伴うマウスピース内圧力を調べるため、第 1 および 2 群に対して圧トランスジューサー (日本光電社製、AP-600G) を用いて測定した。

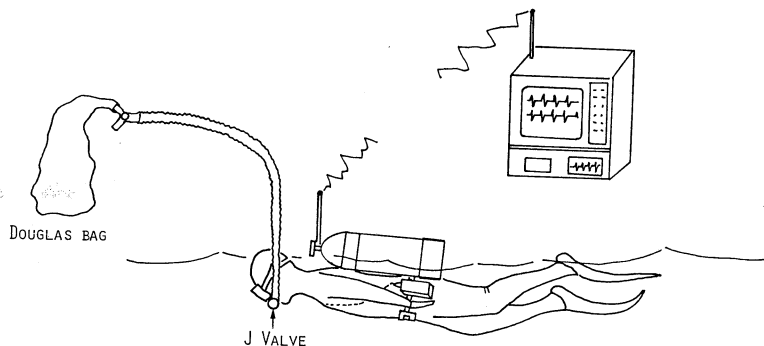


図 1 SCUBA タンクを背負っての fin-swimming 運動負荷実験

表2 異なる運動負荷における最大作業時の呼吸循環機能の変化

	Heart Rate beats/min	\dot{V}_{O_2} liters/min (STPD)	\dot{V}_E liters/min (BTPS)	RR breaths/min	V_T liters (BTPS)
Bicycle	185±18.8	3.22±0.58	98.4±17.2	44.0±4.3	2.46±0.42
Regulator	183±14.3	2.77±0.57	80.4±13.2	31.1±7.4	2.66±0.49
fin-swimming	167±19.7	2.33±0.36	62.1±7.1	—	—

mean±SD; Bicycle=work load by bicycle ergometer; Regulator=work load by bicycle ergometer using the regulated apparatus of SCUBA for their breathing; fin-swimming=work load by fin-swimming; \dot{V}_{O_2} =maximal oxygen uptake; \dot{V}_E =ventilation; RR=respiratory rate; V_T =tidal volume; n=7

また、SCUBA Diving で用いるレギュレーター
の換気力学的検討として、一般に市販されている
5種類のレギュレーター（コンシェルフ II No.
1141, ダイブマスター 3型 No.1060, タバタ社製
TR-30, TR-50, TR-60）を用い、換気に伴うマ
ウスピース内の圧力を圧トランスジューサー（日本
光電社製 AP-600G）によって測定した。一回換気
量（ V_T ）および換気数（RR）の設定は、 V_T は、
2 l とし、RR は、12, 20, 30, 40, 50 および 60 回/
分とした。使用ガスは、空気ボンベからの送気と
し、周囲の環境は、空気環境および水を満たした
水槽内環境の2種類の手法とした。環境圧力は、
大気圧(1ATA), 2ATA, 4ATA および 6ATA と
した。

換気用ポンプは、本来、正弦波ポンプを用いな
ければならないが、 V_T および RR の最大設定並
びに環境圧力 6ATA 下の操作性の問題から日本
光電社製のレスピレータ用校正ポンプを用いマニ
ュアル操作とした。

結 果

生体への異なる運動負荷による実験結果は、最
大心拍数(HRmax)の平均値で、第1群(185 bea-
ts/min) および第2群(183 beats/min)とも差は
認められないが、第3群(167 beats/min)のfin-
swimmingにおいては、第1および第2群と比較し
て約90%までしかHRmaxの上昇が認められな
かった(P<0.05)。

最大酸素摂取量(\dot{V}_{O_2} max)については、第1群
は3.22l/minとなり第2群の2.77l/minの値は、
平均値で86%の値までであった。第3群におい
ては、2.33l/minとなり第1群と比較して有意に低

表3 最大作業時のマウスピース内圧力の変化

type of the respirator	Resistance (mmH ₂ O)	
	Expiratory pressure	Inspiratory pressure
J Valve SCUBA Regulator	85.1±17.4	35.9±1.9
	121.2±49.9	35.7±8.1

mean±S.D., J Valve: Bicycle, SCUBA Reg-
ulator: Regulator

い値となった(P<0.02)。

最大換気量(\dot{V}_E max)についても第1, 2, 3
群と順次低い値を示した。また、最大呼吸数
(RRmax)は、第1群の44.0 breaths/minに対
して、第2群は、31.1 breaths/minとなり少ない
値を示した(P<0.01)。 V_T の値は、第1群が2.46
lであるのに対して第2群は、2.66 lと第2群の
方が高い値を示したものの有意な差は認められな
かった(表2)。

第1および第2群の労作負荷中、Jバルブ内およ
びレギュレーター内に設定された圧トランスジュー
サーによる呼吸に伴う最大労作時の圧力を表3に
示す。J Valveが第1群の値であり、SCUBA reg-
ulatorが第2群の値である。吸気時は、第1およ
び第2群とも差は認められないが、呼気時に第1群
(85.1mmH₂O)に対して第2群(121.2mmH₂O)
が有意に高いことが知れた(P<0.05)。

レギュレーターそのものの換気力学的実験結果
について、大気圧下の空気環境で5種の機種に
おける平均値は、12~40 breaths/minのRRで
は、吸気時の圧力の方が高く、50~60 breaths/

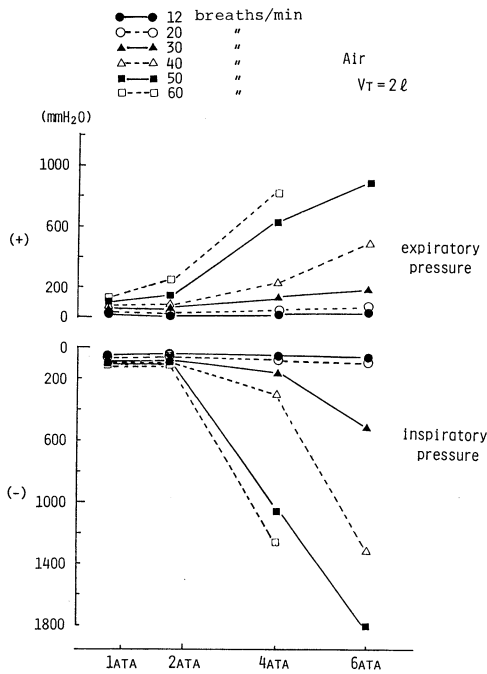


図2 SCUBA レギュレーターの圧力環境と換気回数による吸呼吸抵抗の変化 (空気環境)

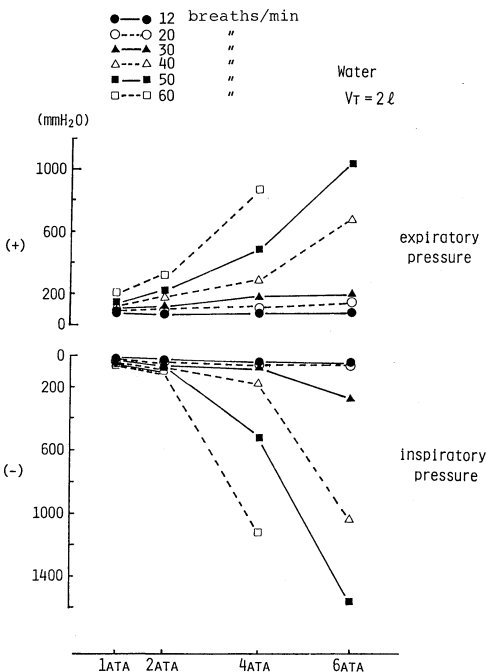


図3 SCUBA レギュレーターの圧力環境と換気回数による吸呼吸抵抗の変化 (水槽内環境)

表4 換気回数に伴うレギュレーターの圧力変化 (IATA, n.5, V_T:2l)

	RR (breaths/min)						
	12	20	30	40	50	60	
Air	expiratory pressure	24.7	44.1	60.4	74.7	94.4	110.3
	inspiratory pressure	17.3	22.8	25.5	33.7	36.9	43.6
Water	expiratory pressure	98.3	118.7	132.0	152.7	176.7	212.6
	inspiratory pressure	18.5	29.5	26.3	30.8	38.7	42.7

upper value : mean, lower value : ±S.D.

min の回数になると値は逆転して呼気時の圧力が高くなった。しかし、水槽環境においては、12~60 breaths/min の全ての RR において吸気よりも呼気が高い値を示した (表 4)。

異なる圧力環境による機械的な吸呼吸抵抗の比較は、図 2 (空気環境) および図 3 (水槽環境) の通りである。空気および水槽環境における 6ATA までの呼気時の値は RR が 30 breaths/min までは、大気圧力下の値とほぼ等しい結果であった。しかし、40 回以上の RR になると空気環境では、平均値で最大 911.3mmH₂O まで上昇し、水槽環境では、最大 1,060mmH₂O まで上昇した。また、吸気時の値については、RR が 20 回までは大気圧力下とほぼ等しい値を示し、30 回以上になると空気環境で最大 1,824.8mmH₂O まで上昇し、水槽環境では、1,568.8mmH₂O まで上昇した。RR が 60 breaths/min になると空気および水槽環境共、圧力抵抗が過大となり、マニュアル操作における限界を超えてしまうために測定不可能となった。

考 察

生体への作業強度を評価するために酸素摂取量と心拍数を指標とした報告は数多くある^{4)~14)}。また、各種スポーツにおける運動強度を評価するために心拍数を指標とした研究も行われている¹⁵⁾。水中環境(潜水および水泳)においては、測定上の問題から心拍数を測定し、評価している研究報告が多い^{1)2)5)~8)10)16)17)}。また、眞野ら¹⁸⁾、は

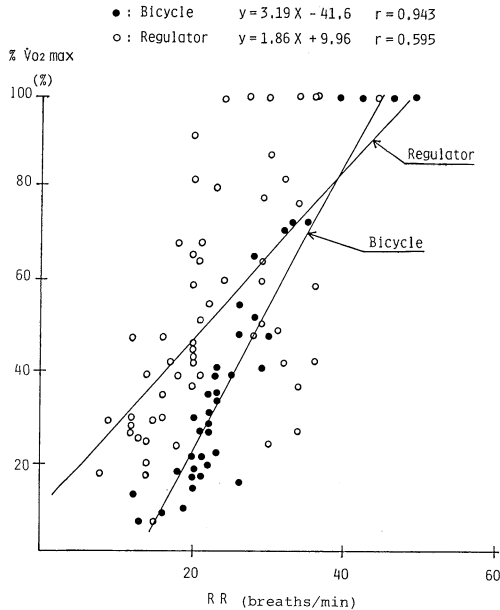


図4 % of $\dot{V}_{O_2 \max}$ と RR の関係
(n.7)

4ATA までの環境圧力下で心肺機能に与える影響を調べている。U.S.Navy の Diving Manual¹⁹⁾によれば深度に関係なく酸素摂取量は一定であると報告されている。

Weissman ら²⁰⁾ はマウスピースやノーズクリップを着けただけで行動性調節が影響され、換気量が増大すると報告している。

以上の研究報告のもとに、本研究結果より SCUBA Diving 労作強度の評価を考察した。

第1群のJバルブを用いた運動に対して、第2群の運動は、最大負荷時の HRmax が、それぞれ同一の心拍数となっており、生体への負荷量は同一であっても、 $\dot{V}_{O_2 \max}$ および $\dot{V}_E \max$ は少なく、且つ、RR も第1群の44 breaths/min に対して、第2群が31.1 breaths/min と少ない値を示していた。一方、レギュレーターそのものの負荷は、デマンド方式のレギュレーターによる呼吸時の圧力の方が1.4倍の機械的抵抗の増大を認めた。また、換気力学的実験によって、大気圧下では、呼吸時に最大 212.6mmH₂O が記録されるにとどまったが、高気圧環境下では、図2および3の通り、水深30m (4ATA) 以上で、RR が30 breaths/min いわゆる毎分換気量が60 l の条件を超えると抵抗

が著しく大きくなり呼吸が困難となってしまうことも示唆された。

第1群に対して、第3群は、HRmax の平均値で10%の低い値を示し、かつ、 $\dot{V}_{O_2 \max}$ のみならず ($P < 0.02$)、 $\dot{V}_E \max$ においても、同様に有意に低い値であった ($P < 0.01$)。これらのことは、呼吸器において第1群と第3群が同一のJバルブを用いているにもかかわらず、第3群の水面移動による負荷は、背中に約15kgのタンクを背負っていること及びフィンをつけて泳ぐという下肢の局所的な疲労の2種の影響により、自転車エルゴメーターによる労作よりも労作がより過大に課せられる結果と考えられた。吉田⁹⁾は、体重の1/4重量を背負った条件下で最大作業を行わせたところ HRmax に差は認められなかったが、All-out 時間に有意の差があったと報告している。今回の実験は、水中環境ではなく、水面を泳ぐ運動でタンクは水面上にあることからタンク重量の影響も現れたと示唆される。

労作強度を表わす方法として、生体負荷の割合を評価する上で、その労作を行ったときの酸素摂取量 (\dot{V}_{O_2}) が同一被検者の示す最大酸素摂取量 ($\dot{V}_{O_2 \max}$) の何%にあたるかを調べ最大酸素摂取率 (% of $\dot{V}_{O_2 \max}$) で表現できる⁹⁾¹¹⁾。この % of $\dot{V}_{O_2 \max}$ を用い、RR との関係から検討したものが図4である。水深30mを超えた場合の30 breaths/minの値は、% of $\dot{V}_{O_2 \max}$ に換算すると第1群で54.1%になり、第2群で65.8%とかなり過酷な労作強度となった。

また、% of $\dot{V}_{O_2 \max}$ と HR とを比較したものが図5であるが、この回帰式より、最大労作時だけでなく労作開始からすでに第1, 2, 3群と順次、負荷が大きくなり、換気数が30 breaths/min で V_T が2 l とした場合、図4で % of $\dot{V}_{O_2 \max}$ は54.1%となり、これを図5に当てはめて HR を求めると、第1群における HR は150.5 beats/min に相当すると推定される。この HR が150.5 beats/min という数値を第2および第3群に当てはめて % of $\dot{V}_{O_2 \max}$ を求めると、第2群は、61.6%となり、第3群では、70.8%となって、第1群と比較してより強い負荷となる。つまり、陸上労作における第1群に対して、第2群は、レギュレーターの呼吸に伴う抵抗負荷の差が7%あり、第3群の fin-swimming は、下肢の局所的筋疲労に

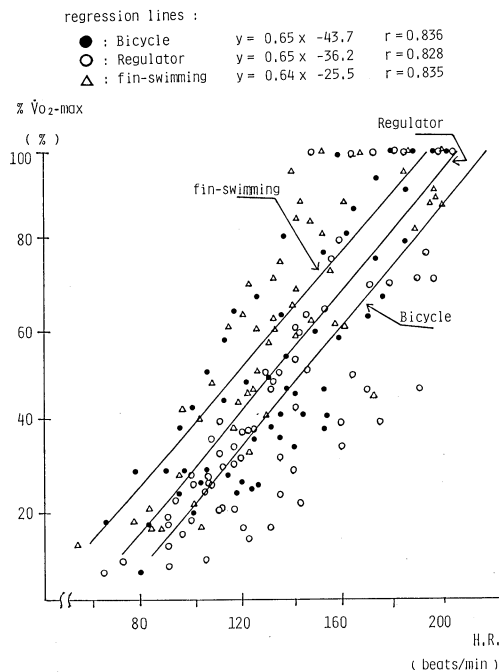


図5 % of \dot{V}_{O_2} max と HR の関係
(n.7)

よって負荷の差が16%となる。このことによって、SCUBA Divingにおける全体の負荷量は、陸上労作と比較して23%も増加されていることが知れた。すなわち、陸上と同一のHRを水中労作で得た場合に陸上では労作継続が可能であっても、水中では、局所的な筋疲労が過大となり過ぎて、疲労困憊となる危険があり、このことを十分に考慮した潜水作業を指導しないかぎり、災害や事故の危険を伴う恐れがある。この指標として% of \dot{V}_{O_2} max を求めることは極めて有効と思われ、本研究で求めた回帰式を利用した心拍数の観察は安全衛生上の一つの対策になるといえる。

まとめ

本研究は、SCUBA Divingの経験者を対象として、3種類の異なる労作を行わせた。また、SCUBA Divingで用いるレギュレーターの大気圧力から6ATAまでの圧力環境における生体への負荷を調べ検討を行った。これらの結果を要約すると次のようになる。

1) 自転車エルゴメーターの労作と比較して、

呼吸器をJバルブからSCUBA用レギュレーターに変えただけでレギュレーターそのものの負荷が加わり最大酸素摂取量で14%も減少した。また、SCUBA Divingで行う水面移動(fin-swimming)においては、下肢の局所的筋疲労によって28%の減少が認められた(表2)。

2) SCUBA用レギュレーターそのものの影響として、高気圧環境下では、6ATA環境下で吸気時に1,824.8mmH₂Oの値を示した。呼吸抵抗の限度としては、4ATA(水深30m)までの換気回数が30 breaths/minで、一回換気量2lまでとすることが水中作業の限界と思われた。

3) 以上のことから、SCUBA Divingによる水中労作運動は、心拍数150 beats/minに対して最大酸素摂取率(% of \dot{V}_{O_2} max)に換算するとfin-swimmingで16%、レギュレーターで7%の負荷が陸上労作と比較してより多く課せられ、それらを合計すると23%の負荷がSCUBA Divingを行う上で過大な強度として課せられていることが知れた。

参考文献

- 1) Scholander P.F., H.T.Hammel, H.LeMessurier, E.Hemmingsen and W.Garey: Circulatory adjustment in pearl divers. J.Appl. physiol. 17(2):184-190, 1962.
- 2) 中山英明: 潜水中の海女の心電図変化に関する研究, 日内誌, 55(7): 47-57, 1966.
- 3) 黒川隆志: 水中運動の循環反応, 体育の科学, 34(7): 510-517, 1984.
- 4) Dwyer J.: Estimation of oxygen uptake from heart rate response to undersea work. Undersea Biomed. Res. 10(2):77-87, 1983.
- 5) 芝山正治, 眞野喜洋, 石山明, 高橋茂樹, 土井庸正, 大串貫太郎, 柏倉章男, 高野尚志, 黒岩京子, 前田博: 潜水者の心拍数からみた運動強度, 日高匠医誌, 19(1): 129-131, 1984.
- 6) Dwyer J. and Pilmanis A.A.: Physiological studies of divers working at depths to 99 fsw in the open sea. In: Shilling C.W. Beckett M.W., eds. Underwater physiology VI. Proceedings of the sixth symposium on underwater physiology. Bethesda: Federation of American Societies for Experimental Biology, 167-178, 1978.
- 7) 眞野喜洋, 芝山正治: スクーバ(SCUBA)潜水とスポーツ医学, 臨床スポーツ医学, 2(4): 369-374, 1985.

- 8) 櫻村修生：運動直後の心拍応答における環境条件の影響，日生気誌，23(1)：29-34，1986.
- 9) 吉田勝志：最大酸素摂取量による負荷重量の検討—自転車エルゴメーターにおけるルックサック重量の影響について—，中部工業大学紀要，10(B)：7985，1974.
- 10) 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タ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.
- 11) 石河利寛：負荷強度の指標としての心拍数，体育の科学，33：821-826，1983.
- 12) 満園良一，勝田茂，金尾洋治，田淵健一，永井純：中・長距離ランナーにおける筋線維組成，毛細血管，酸化酵素活性と有酸素の作業能との関係，体力科学，35：182-191，1986.
- 13) 宮村実晴，進藤宗洋，猪飼道夫：種々な吸気酸素分圧における全身持久性，体育学研究，14(1)：9-18，1969.
- 14) 猪飼道夫，山地啓司：心拍数からみた運動強度，体育の科学，21(9)：589-593，1971.
- 15) 今井創，山地啓司，関岡康雄：各種運動時の心拍数からみた運動強度，新体育，50(1)：72-79，1980.
- 16) Oldridge N.B., G.J.F.Heigenhauser, J.R.Sutton and N.L.Jones: Resting and exercise heart rate with apnea and facial immersion in female swimmers, J.Appl. Physiol. 45(6): 875-879, 1987.
- 17) Kanwisher J., K.Lawson and R.Strauss: Acoustic telemetry from human divers. Undersea Biomed. Res. 1(1):99-109, 1974.
- 18) 眞野喜洋，芝山正治，石山明，高橋茂樹，前田博，笠原幹夫：高圧下救護用呼吸保護具の検討，日災医誌，31(11)：713-723，1983.
- 19) U.S. Navy: U.S. Navy, Diving manual, Washington, DC; Department of the Navy. 1975, 3-11.
- 20) Weissman C., J.Askanazi, J.Milic-Emili and J.M. Kinney: Effect of respiratory apparatus on respiration. J.Appl. Physiol. 57(2): 475-480, 1984.