

●原 著

31 ATA における水中作業負荷について

設楽文朗* 楢木暢雄* 山口仁士*
富安和徳* 毛利元彦*

海洋科学技術センターの潜水シミュレータを使用し、水中作業を与えた際の心拍数、酸素消費量、分時換気量を測定した。負荷は、300m 相当圧下で自転車エルゴメータを用い、50, 75, 100 watt の水中作業を7分間ずつ与えた。潜水呼吸ガスは、He-O₂(PO₂=0.51ATA), 31ATA 下の環境ガスは PO₂ 0.4ATA の He-O₂ を使用した。水温は26℃, 環境温は、1ATA 下で26℃, 31ATA 下では31℃とした。

31ATA 下の水中安静時の心拍数・酸素消費量、分時換気量は、同圧下のチェンバー内におけるよりも有意に増加し、1ATA 下でみられる潜水性徐脈は認められなかった。これは、31ATA 下では、1ATA 下よりも寒冷刺激を強く受けるためと考えられた。作業負荷では、1ATA 下、31ATA 下ともに、心拍数、酸素消費量、分時換気量の直線的増加をみたが、31ATA 下では、1ATA 下よりも増加量がゆるやかであった。これは、31ATA 下では呼吸ガス密度、呼吸装置などによる呼吸抵抗の増加により、作業能力が低下したためであろうと考えられた。

キーワード：水中作業負荷、水中自転車エルゴメーター、酸素摂取量、高圧ヘリウム環境

Measurements of heart rate, oxygen uptake and ventilatory minute volume in cycling exercise at a simulated seawater depth of 300 meters.

Shidara Fumiro, Naraki Nobuo, Yamaguchi Hitoshi, Tomiyasu Kazunori and Mohri Motohiko.
Diving Science and Technology Department, Japan Marine Science and Technology Center (JAMSTEC)

The changes in heart rate, oxygen uptake and ventilatory minute volume were measured at 1ATA and 31ATA using hyperbaric chambers in JAMSTEC. The work load was given by bicycle ergometer at 50, 75 and 100 Watt for 7minutes each. Underwater respiratory gas was He-O₂ (PO₂=0.51ATA) and environment gas under 31ATA was He-O₂ (PO₂=0.4ATA). The environmental temperature was 26℃ at 1ATA and 31℃ at 31ATA, and water temperature was 26℃.

Heart rate, oxygen uptake and ventilatory minute volume at 31ATA at underwater resting con-

dition were increased compared to these at resting condition in chamber. Underwater bradycardia, seen at 1ATA, was not observed at 31ATA. This masking was thought to be made by the cold stress felt strong by the diver at 31ATA. Heart rate, oxygen uptake and ventilatory minute volume were increased under work load both at 1ATA and 31ATA, but the rate of increasing was smaller at 31ATA. This was thought to be caused by the increased respiratory resistance and consequently the decreased working ability under 31ATA.

Keywords : _____

Submerged Exercise
Underwater Bicycle Ergometer
Oxygen Consumption
Hyperbaric Helium Environment

はじめに

飽和潜水技術の進歩に伴って潜水深度は、深くなり、1981年には、Duke 大学で686m の飽和潜水

*海洋科学技術センター潜水技術部

表1 被験者の身体的条件
Physical characteristics of subject

Subject	Age(yrs)	Height(cm)	Weight(kg)	Body surface area(m ²)
H.M	37	166.5	63.5	1.666
T.S	34	167.8	63.0	1.670
T.O	21	166.5	67.5	1.733

実験も実施されている。この深度の増大に伴って使用する混合ガス、また、呼吸ガスの密度の増加に伴う呼吸抵抗も増大し、作業能力に多大に影響することが報告されている。(Thalman et al¹⁾, 1979, Lundgren²⁾, 1984, Salzano et al³⁾, 1971)

1986年11月に海洋科学技術センターの潜水シミュレータで実施したHe-O₂の300m(31ATA)飽和潜水実験で実施した水中自転車エルゴメータによる作業負荷による変化を検討し、実海域での作業の安全で、また、効率よく作業が実施できるかどうかを検討した。

実験方法

被験者は、表1に示す身体条件を有し、豊富な飽和潜水経験を有する健康男子3名である。実験環境は、1ATA(大気圧下)、31ATA(300m相当圧下)下とも、温度調節可能なウェットチェンバー(川崎重工製)を使用し、水温は、両環境下とも26℃に、1ATA下の環境温は、26℃、31ATA下の環境温は31℃とし、1ATA下では、呼吸ガスとして空気を、31ATA下では、呼吸ガスとしてPO₂=0.51ATAのHe-O₂の混合ガスを使用した。また、31ATA下での環境ガスは、PO₂=0.4ATAのHe-O₂の混合ガスである。

水中運動時、着衣は、厚さ5mmのウェットスーツとし、10kgのウェイトを負荷した。

呼吸ガスは、チェンバー装置のラインから各々送気し、潜水呼吸器は、マウスピース型の吸排気レギュレータ(Comexpro社製)を使用し、呼吸を水面上のダグラスバックに採気した。

ウェットチェンバーは、直径3m、深さ3mで、このチェンバー底面に防水型電子制御式自転車エルゴメータ(Simens 380B改造型、Simens社製)を設置し、自転車エルゴメータのペダルの回転数を毎分60回とし、負荷量(Work Load)は、チェンバー外から制御した。呼吸の採取は、安静時、

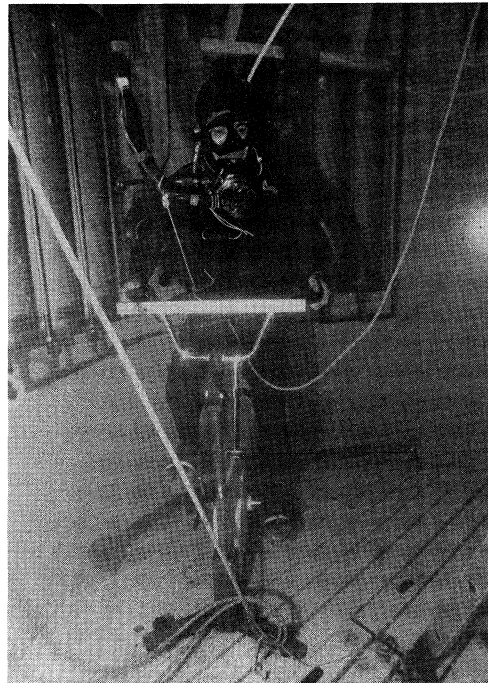


図1 ウェットチェンバー内の被験者

各負荷とも最後の1分間、ダグラスバックに採気した。分時換気量(\dot{V}_E)は、ダグラスバックに採気した呼気ガスをチェンバー内で、湿式ガスメータ(品川計測器社製、WRDr-10C型)を用いて計測し、酸素消費量(\dot{V}_{O_2})は、チェンバー管通路を介してチェンバー外で酸素分析計(Applied Electrochemistry社製、S-3A型)を用いて計測した。心拍数(HR)は、胸部誘導方式による心電図を記録し、呼吸数(fR)は、呼吸器内に取りつけたサーミスタの温度変化を記録し、連続的に計測した。

測定は、自転車エルゴメータ上での安静5分後に、作業負荷量50watt、75watt、100wattを各々7分間行った。7分間の負荷で、口渇感が激しか

表2 実験のプロトコール
Experimental procedure

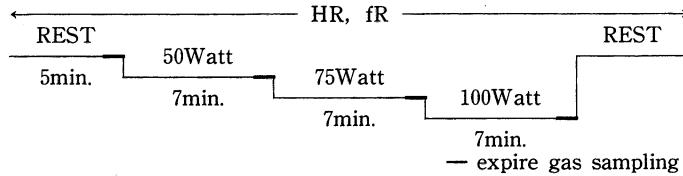


表3 Data of H.R., fR, VE and VO₂

			H.R.	fR	VE	VO ₂
			(beats/min)	(breath/min)	(l/min BTPS)	(l/min STPD)
DRY	1ATA	Rest	74±8	13±3	9.6±0.8	0.30±0.03
WET	1ATA	Rest	69±5	12±4	11.8±3.7	0.37±0.01
		50W	120±5	17±4	31.1±6.3	1.65±0.11
		75W	134±4	23±7	42.1±7.6	1.97±0.04
		100W	149±3	26±8	52.1±9.4	2.29±0.06
DRY	31ATA	Rest	74±3	15±2	14.2±0.4	0.27±0.03
WET	31ATA	Rest	78±7	11±2	17.5±3.7	0.50±0.10
		50W	103±5	14±3	28.9±8.7	1.07±0.29
		75W	117±4	15±4	32.0±7.4	1.26±0.20
		100W	128±4	14±2	35.1±8.4	1.45±0.18

Value : mean±S.D., H.R. : heart rate, f R : respiratory frequency

VE : ventilatory minute volume, VO₂ : oxygen uptake

だったので、負荷と負荷の間に1~2分間、水面上に浮上して飲水を行った。

実験結果および考察

1ATA下におけるチェンバー内の安静時の心拍数は、76±8 beats/min、酸素消費量は、0.30±0.03l/min、分時換気量は、9.6±0.8l/min、水中安静時の心拍数、酸素消費量、分時換気量は、各々69±5 beats/min、0.37±0.03l/min、11.1±0.7l/minで、31ATA下でのチェンバー内安静時の心拍数、酸素消費量、分時換気量は、各々、74±8 beats/min、0.27±0.03l/min、14.2±0.4l/min、水中安静時の心拍数、酸素消費量、分時換気量は、各々、78±7 beats/min、0.50±0.10l/min、17.5±3.7l/minである。1ATA下では、水中浸水による心拍数が減少するという浅井ら⁴⁾(1985)、Dressendorfer et al⁵⁾(1976)の事実と一致した。1ATA下では、水中安静時に潜水性徐脈が認められ、寒冷刺激によってアドレナリン分泌が亢進し、酸素消費量、分時換気量を増加して熱産生量を増

加させて、体温を一定に保持した。一方、31ATA下でも、体温を一定に保持しており、酸素消費量の増加分が1ATA下よりも有意に大きかったことから、31ATA下の方が、1ATAより強い寒冷刺激を受けたことが推測され、その結果1ATA下よりもアドレナリンの分泌が亢進し、潜水性徐脈がマスクされ、心拍数の増加を示したものと推測された。Thalman et al¹⁾(1979)も6.76ATA下で、水中安静時に寒冷による熱放散量の増大に伴って、体温維持するために熱産生量すなわち酸素消費量が增大するという類似の報告をしている。

1ATA下の自転車エルゴメータによる作業では、50W、75W、100W作業時、心拍数は、各々、120±5、134±4、149±3 beats/min、酸素消費量は、1.65±0.11、1.97±0.04、2.29±0.06l/min、分時換気量は、31.1±6.3、42.1±7.6、52.1±9.4l/minと作業負荷量の増加に伴って、心拍数、酸素消費量、分時換気量は直線的に増加し、大気圧下で周知の事実と一致した帰線を示した。他方、31ATAでは、自転車エルゴメータによる作業負

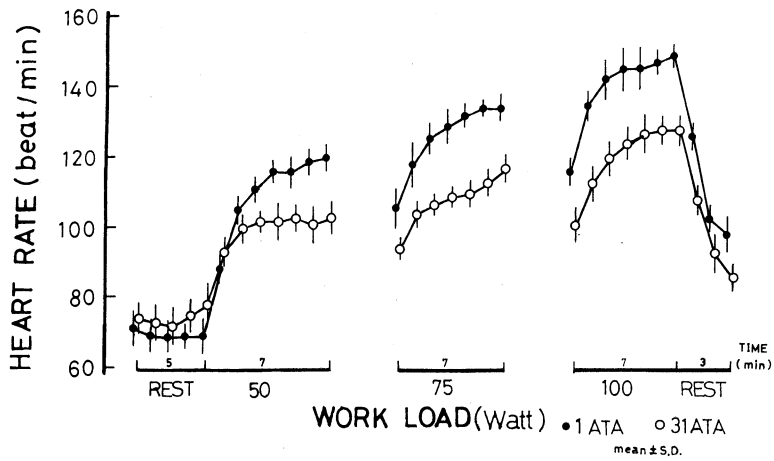


図2 各負荷に対する心拍数の変化

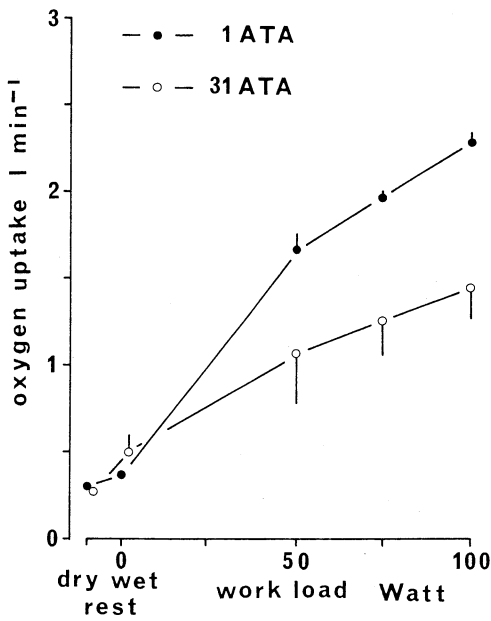


図3 各負荷に対する酸素消費量の変化

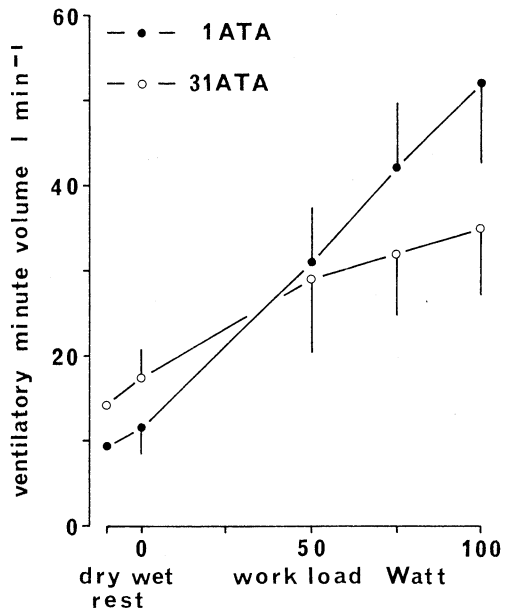


図4 各負荷に対する分時換気量の変化

荷では、50W、75W、100W 作業時、心拍数は、各々、 103 ± 5 、 117 ± 4 、 128 ± 4 beats/min、酸素消費量は、 1.07 ± 0.29 、 1.26 ± 0.20 、 1.45 ± 0.18 l/min、分時換気量は、 28.9 ± 8.7 、 32.0 ± 7.4 、 35.1 ± 8.4 l/min と作業負荷量の増加に伴って直線的に増加した。1ATA、31ATA 下では、作業負荷量に対する、心拍数、酸素消費量の傾きが異なり、31ATA 下の方が、その傾斜はゆるやかであった。しかし

ながら、酸素消費量に対する心拍数の変化は、1ATA 下では、 $y=0.04x+53.25$ ($r=1.00$)、31ATA 下では、 $y=0.05x+49.91$ ($r=0.99$)、また、酸素消費量に対する分時換気量の変化も、1ATA 下では、 $y=0.02x+2.89$ ($r=0.98$)、31ATA 下では、 $y=0.02x+8.27$ ($r=1.00$) と正の相関関係を示し、その傾きは同じであった。Dwyer⁶⁾ (1983) は、運動負荷量が大きくなるにつれて高圧環境下

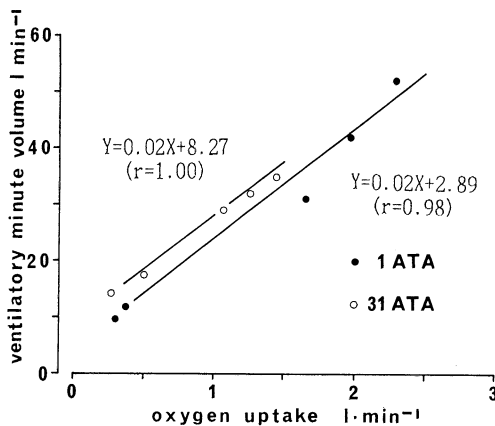


図5 酸素消費量に対する分時換気量の変動

での心拍数の減少が著明になるが、酸素消費量が2.0l/min以下の軽作業負荷量では、この傾向が認められないと報告している。本実験でも、31ATA下では、酸素消費量は、各負荷量に対してすべて2.0l/min以下であり、軽作業と考えられる。1ATA下で酸素消費量 1.65 ± 0.11 l/minの時の心拍数は 120 ± 5 beats/min、31ATA下で酸素消費量 1.45 ± 0.18 l/minの時の心拍数は、 128 ± 4 beats/minで、1ATA、31ATA下で同程度の酸素消費量に対する心拍数には有意な差が認められず、Dwyer⁶⁾の結果を支持する結果を得た。Linnarison et al⁷⁾(1978)は、軽作業負荷量では、吸入酸素分圧の差はほとんど影響を与えないと報告しており、31ATA下での各負荷量に対する酸素消費量、心拍数を1ATA下と比較して著しく減少しているが、この事実は、圧力および吸気酸素分圧の差によるものでないと推測される。

一方、呼吸数は、1ATA下安静時には、 12 ± 4 /min、31ATA下安静時には、 11 ± 2 /minとほぼ一致していたが、各負荷量の増加に伴って、呼吸数は、1ATAでは、 17 ± 4 、 23 ± 7 、 26 ± 8 /minと増加したが、31ATA下では、 14 ± 3 、 15 ± 4 、 14 ± 2 と呼吸数の増加は非常に少なく有意な差は認められなかった。この事実は、水中環境下でのマウスピース呼吸での息こらえによる熟練ダイバーの特長を示しており、31ATA下では、1ATA下よりも一回換気量の増加が認められた。Salzano et al⁹⁾(1971)は、31.3ATA He-O₂ (PO₂=0.28)のドライの作業負荷実験で、分時換気量が変化せ

ずに酸素消費量の増加、心拍数、呼吸数の減少、1回換気量の増加を報告しているが、本実験、31ATA (PO₂=0.51)での水中作業負荷実験であるが、分時換気量の軽度上昇を認めるほかは、Salzano et alと一致した結果を得た。これらの結果からも、吸気酸素分圧の差によるものでないことが推測される。しかしながら、Dwyer et al⁸⁾(1977)は、43.4ATA (He-O₂, PO₂=0.43ATA, 呼吸ガス密度7.338g/l BTPS), 4.4°Cでの水中での最大下作業では、呼吸ガス密度の増加によって作業能力の低下が起こり、その結果、酸素消費量の減少、分時換気量の減少を報告しているが、本実験でも31ATA下での呼吸ガスはPO₂=0.51, ガス密度5.75g/l BTPSであり、1ATAに比して呼吸ガス密度が約6倍増加しており、またダイバーの訴えにより呼気の排出に多大の努力が必要としたと報告していることから、酸素消費量、分時換気量の減少は、呼吸ガス密度の増加による作業能力の低下によって換起されたものかもしれない。最大下作業での作業限界は、1ATA下では、筋力の限界であり、31ATA下では、呼吸抵抗の限界によって作業量が決定されることになる。

一方、Thalman et al¹⁾、Lundgren²⁾は、水中で肺と水圧との圧力差が ± 20 cmH₂Oの範囲で検討をくわえ、6.76ATA下での最大下作業で、呼吸抵抗の増大によって呼吸困難を引き起こし、作業能力を低下させると報告している。先に述べた酸素消費量、分時換気量の減少は、この水圧差(-20cmH₂O)が加わり、呼吸抵抗の増大によるものとも考えられる。

以上の結果より、31ATA He-O₂環境下での水中作業は、1ATA空気環境下と比較して、酸素消費量、分時換気量、心拍数の減少など効率的な作業の実施を示唆する結果を得たが、反面、呼吸ガス密度の増大による呼吸抵抗の増加、潜水呼吸装置による呼吸抵抗の増加によって、酸素消費量、分時換気量の減少が起こることから、さらに検討を重ねていく必要がある。

ま と め

300m (31ATA)のシミュレーション実験によって、31ATAの本実験条件下では、潜水性徐脈が認められず、強い寒冷刺激によって徐脈がマスクされたものと推測される。また、作業負荷量の増加

に伴って、心拍数、酸素消費量は直線的に増加することが認められた。31ATA He-O₂環境下での水中作業では、1ATA 空気環境下と比較して、作業能力の低下を起こさず同一負荷を与えられたと仮定すれば、酸素消費量、分時換気量、心拍数の減少は、1ATA 下よりも効率的な作業を実施することが出来ることを示唆しているが、現実には、潜水深度の増加に伴って、呼吸ガス密度が増大し、呼吸抵抗が増し、また、潜水呼吸装置によってさらに呼吸抵抗が増大することが推測されるので、本実験で得られた、酸素消費量、分時換気量、心拍数の減少は、呼吸抵抗の増大によって作業能力が減少した結果であることと推測される。

〔参 考 文 献〕

- 1) Thalman, E.D., Sponholtz, D.K. and Lundgren, C.B.G.: Effects of immersion and static lung loading on submerged exercise at depth. *Undersea Biomed. Res.* 6 : 259-289, 1979
- 2) Lundgren, C.E.G.: Respiratory function during simulated wet dives. *Undersea Biomed. Res.* 11 : 139-147, 1984
- 3) Salzano, J., Overfield, E.M., Rausch, D.C., Saltzman, H.A., Kylstra, J.A., Kelley, J.S. and Summitt, J.K.: ARTERIAL BLOOD GASES, HEART RATE AND GAS EXCHANGE DURING REST AND EXERCISE IN MEN SATURATED AT A SIMULATED SEAWATER DEPTH OF 1000 FEET ed. by Lambertsen, C.J. *Underwater Physiology, Proceeding of the 4th symposium on underwater physiology*, 347-356, 1971.
- 4) 浅井利夫, 森田正人, 粟倉 眞: 水泳中の心電図変化に関する研究—特に心電図記録装置について—*日本小児循環器誌* 1 : 28-34, 1985
- 5) Dressendorfer, P.H., Morlock, J.F., Baker, D. G. and Hong, S.K.: Effects of head-out water immersion on cardiorespiratory responses to maximal cycling exercise. *Undersea Biomed. Res.* 3 : 177-187, 1976.
- 6) Dwyer, J.: Estimation of oxygen uptake from heart rate response to undersea work. *Undersea Biomed. Res.* 10 : 77-87, 1983.
- 7) Linnarsson, D. and Hesser, M.: Dissociated ventilatory and central respiratory responses to CO₂ at raised N₂ pressure. *J. Appl. physiol.*, 45 : 756-761, 1978.
- 8) Dwyer, J., Saltzman, H.A. and O'Bryan, R.: Maximal physical-work capacity of man at 43.4ATA. *Undersea Biomed. Res.*, 4 : 359-372, 1977.