

水中自転車エルゴメータによる 最大下作業について

設楽文朗*¹ 山口仁士*¹ 榎木暢雄*¹
毛利元彦*¹

大気圧環境下と水中3 m環境下で自転車エルゴメータによる作業負荷を与えた際のダイバーに及ぼす呼吸生理学的変化について検討を行った。作業負荷は3強度(50, 75, 100, Watt)の各負荷を7分間づつ連続で行い続けて20 Watt/minの漸増負荷法によって最大下作業まで行った。心拍数, 呼吸数は連続的に計測記録し, 分時換気量, 酸素摂取量, 炭酸ガス産生量は, 各3強度の最後の1分間そして最大下作業では予想される最大下作業の3~4分前から連続的に計測した。

結果は水中下で最大下作業の負荷量に大気圧環境下に対して約15%の減少が認められたが, その時の酸素摂取量には変化がみられなかった。100 Wattまでの負荷量においては水中下で酸素摂取量が20~30%の増加が認められた。これらの結果から陸上と同等作業強度を遂行するには, 少なくとも20%以上の呼吸生理学的負荷が増加するものと推察された。

キーワード: 水中自転車エルゴメータ, 水中作業, 酸素摂取量, 作業負荷

Submaximal Work on an Underwater-cycle Ergometer

Fumiro SHIDARA*² Hitoshi YAMAGUCHI*²
Nobuo NARAKI*² Motohiko MOHRI*²

The respiratory function was examined in a dry 1ATA environment and a wet 3 m depth environment using an underwater-cycle ergometer. The work loads were 50.75 and 100 watts for 7 minutes each, and the submaximal work load increased 20 watts/min to all out.

Heart rate (HR), Respiratory frequency (fR), Respiratory minutes volume ($\dot{V}E$), Oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) and Carborn dioxide elimination ($\dot{V}CO_2$) were measured as physiological responses to the work load.

The submaximal work capacity decreased to 15% in the wet environment but the oxygen uptake did not change. The oxygen uptake with a 50 ~ 100 watt work load increased to 20 ~ 30% in the wet environment.

Through these results, it was suggested that the physiological respiratory

*¹ 潜水技術部

*² Diving Science and Technology Department

function load increased by at least 20%, compared to a similar work load in dry 1ATA condition.

Key word: Underwater-cycle ergometer, Submaximal work, Oxygen uptake, Work load

1. はじめに

人間が水中で作業する場合、陸上と異なった種々の条件（呼吸抵抗・水圧・水温・浮力等）によって作業能力に多大に影響を与えると報告¹⁾²⁾³⁾⁴⁾されている。本実験において水中下で最大下作業を漸増負荷法で実施し、作業能力に及ぼす影響について大気圧下と比較検討した。

2. 実験方法

本実験は、水深 3 m、直径 3 m のオープンタンク底面に防水型電子制御式自転車エルゴメータ（Simens 380 B 改造型，Simens 社製）を設置し、大気圧下でも同型の自転車エルゴメータを使用した。自転車エルゴメータのペダルの回転数を毎分 60 回とし、潜水呼吸器の交話系を介してメトロノーム音を流して制御した。負荷量（Work Load）は、外から制御した。被験者は、表 1 に示す身体条件を有し、豊富な潜水経験を有する健康男子 4 名である。実験環境は、大気圧下では環

境温を $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、水温は $26 \pm 1^{\circ}\text{C}$ とし、呼吸ガスとして空気を使用した。水中運動時の着衣は、厚さ 5 mm のウェットスーツとし、10 kg のウェイトを負荷した。呼吸ガスは、送気圧 9 kg/cm^2 で空気を送気し、潜水呼吸器は、ハードハット式（Superlite-17B）に呼気ガス採取用に排気レギュレータ（Comexpro 社製）を取りつけ改造して使用し、呼気を水面上のダグラスバックに採気した。

表 1 被験者の身体的特徴

Table 1 Physical Characteristics of Subject

Subject	Age(yrs)	Hight(cm)	Weight(kg)	Body surface area(m ²)
K. Y	20	165.0	65.0	1.680
M. N	21	178.0	65.5	1.766
Y. N	21	164.0	64.0	1.656
T. O	21	166.5	68.0	1.738

大気圧下では全面マスク（アガマスクを改良）を使用して、ダグラスバック法によって行い、被

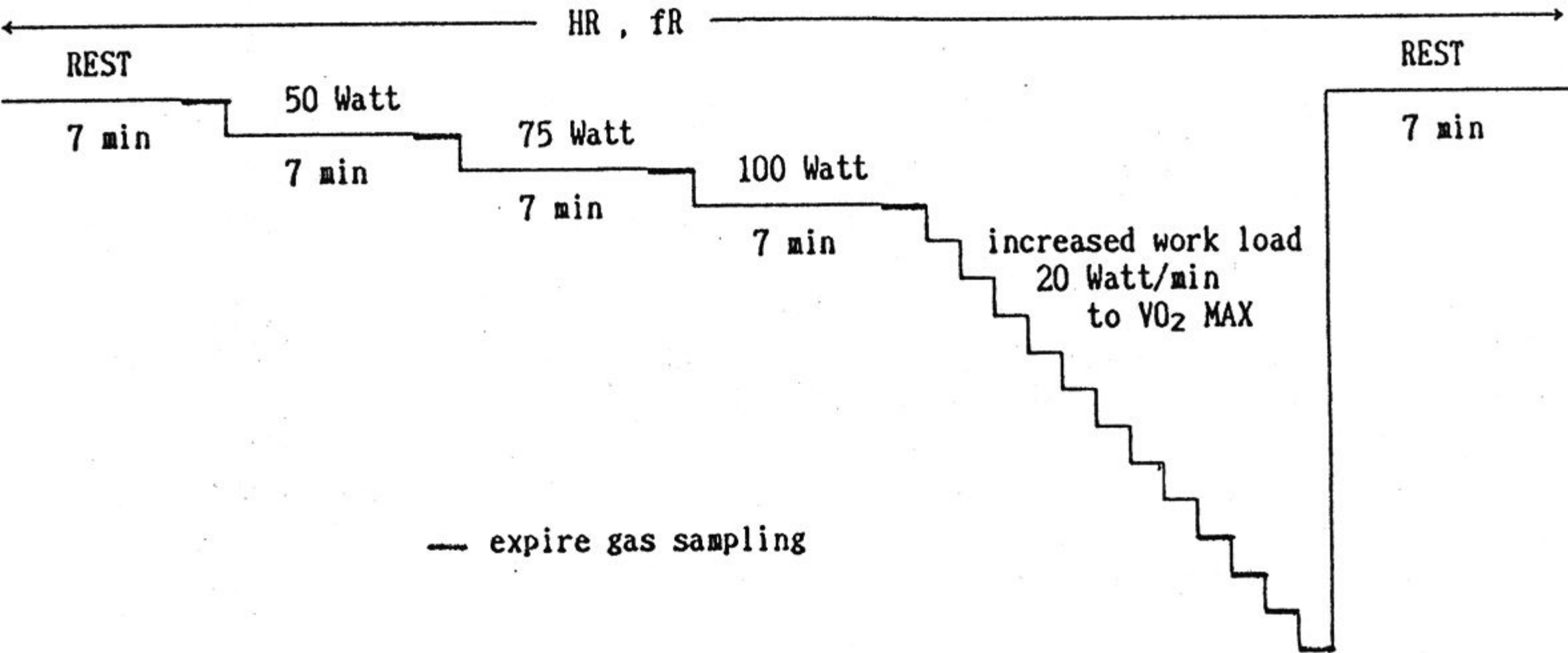


図 1 実験方法
Fig.1 Experimental Procedure of Exercise.

験者の着衣は短パンとTシャツとした。実験方法は図-1に示す。呼気の採取は、7分間の座位安静、50, 75, 100 wattの負荷時の最後の1分間にダグラスバックに採気した。また最大下作業は、各負荷7分間ずつ連続的に行い、それに引き続いて20 watt/minの漸増負荷法によって行った。分時換気量 ($\dot{V}E$) は、採気した呼気ガスを湿式ガスメータ (品川計測器社製, WRDr-10C型) を用いて、また酸素摂取量はダグラスバックからサンプリングチューブに分抽した呼気ガスを、ジルコニア式酸素分析計 (Applied Electrochemistry製S-3A型) を用いて計測した。心拍数 (HR) は、胸部誘導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。

3. 実験結果および考察

結果を表2及び図2～6に示す。
大気圧下の安静時の心拍数は、 74 ± 8 beats/min, 酸素摂取量は、 0.30 ± 0.03 l/min, 分時換気量は、 9.6 ± 0.8 l/min, 呼吸数は、 13 ± 3 breath/min, 水中安静時の心拍数, 酸素摂取量, 分時換気量, 呼吸数は、各々、 69 ± 5 beats/min, 0.37 ± 0.03 l/min, 11.1 ± 0.7 l/min, 13 ± 3 breath/min である。

大気圧下では、水中浸水によって心拍数が減少するといういわゆる潜水性徐脈が認められた。これは、浅井ら (1985)⁶⁾, Dressendorfer et al.

(1976)⁵⁾ の報告と一致した。酸素脈の面からみると大気圧下では、 4.05 ± 0.08 ml/beatと成人男子の安静時の値と一値した値を示した⁴⁾。

水中下では 5.36 ± 0.06 ml/beat と一拍動ごとの血中に含まれる酸素量の増加を示した。これらの事実は、水中安静時には、寒冷刺激によって Adrenaline, Noradrenaline の分泌が亢進し、この結果、酸素摂取量, 分時換気量の増大を促し、熱産生量を境加させて、水中下で体温を一定に保持しているものと推測された。Thalman et al. (1979)¹⁾ も水中安静時に寒冷による熱放散量の増大に伴って、体温を維持するために熱産量すなわち酸素摂取量を増大させるという類似の報告をしている。大気圧下の自転車エルゴメータによる50, 75, 100 wattの作業時の心拍数は、各々、 $103 \pm 13, 122 \pm 14, 136 \pm 16$ beats/min, 酸素摂取量は、各々、 $0.99 \pm 0.05, 1.27 \pm 0.05, 1.61 \pm 0.06$ l/min, 分時換気量は、各々、 $27.2 \pm 3.1, 35.8 \pm 2.1, 44.9 \pm 2.4$ l/min, 呼吸数は、 $20 \pm 4, 24 \pm 3, 27 \pm 2$ breath/minと作業負荷量の増加に伴って、直線的に増加し、周知の事実と一致した回路曲線を示した⁴⁾。

他方、水中下の50, 75, 100 wattの作業時の心拍数は、各々、 $118 \pm 8, 134 \pm 8, 151 \pm 9$ beats/min, 酸素摂取量は、各々、 $1.56 \pm 0.09, 1.84 \pm 0.10, 2.23 \pm 0.15$ l/min, 分時換気量は、各々、 $35.1 \pm 3.2, 41.1 \pm 3.3, 50.4 \pm 4.2$ l/min, 呼吸数は、各々、 $20 \pm 6, 23 \pm 6, 25 \pm 6$ breath/minで

表2 実験結果
Table 2 Data of $\dot{V}E, \dot{V}O_2, \dot{V}CO_2, RQ, HR, fR$ and VT

		$\dot{V}E$	$\dot{V}O_2$	$\dot{V}CO_2$	RQ	HR	fR	VT
WET	Wet Rest	$11.1 \pm 0.7^*$	$0.37 \pm 0.03^{**}$	$0.28 \pm 0.03^{**}$	0.76 ± 0.04	69 ± 5	13 ± 3	0.9 ± 0.2
	50 Watt	$35.1 \pm 3.2^{**}$	$1.56 \pm 0.09^{**}$	$1.21 \pm 0.09^{**}$	0.78 ± 0.03	$118 \pm 8^*$	20 ± 6	1.9 ± 0.5
	75 Watt	$41.1 \pm 3.3^*$	$1.84 \pm 0.10^{**}$	$1.43 \pm 0.09^{**}$	$0.78 \pm 0.01^{**}$	134 ± 8	23 ± 6	1.9 ± 0.5
	100 Watt	50.4 ± 4.2	$2.23 \pm 0.15^{**}$	$1.77 \pm 0.13^{**}$	$0.79 \pm 0.03^{**}$	151 ± 9	25 ± 6	2.1 ± 0.6
	MAX220 ± 10 Watt	$94.7 \pm 13.0^{**}$	3.48 ± 0.29	3.30 ± 0.32	0.95 ± 0.06	181 ± 7	41 ± 9	2.4 ± 0.5
DRY	Dry Rest	9.6 ± 0.8	0.30 ± 0.03	0.21 ± 0.03	0.71 ± 0.04	74 ± 8	13 ± 3	0.8 ± 0.1
	50 Watt	27.2 ± 3.1	0.99 ± 0.05	0.79 ± 0.09	0.80 ± 0.06	103 ± 13	20 ± 4	1.4 ± 0.1
	75 Watt	35.8 ± 2.1	1.27 ± 0.05	1.07 ± 0.04	0.84 ± 0.03	122 ± 14	24 ± 3	1.5 ± 0.1
	100 Watt	44.9 ± 2.4	1.61 ± 0.06	1.36 ± 0.03	0.84 ± 0.01	136 ± 16	27 ± 2	1.7 ± 0.1
	MAX260 ± 14 Watt	127.7 ± 19.3	3.52 ± 0.23	3.58 ± 0.23	1.02 ± 0.01	186 ± 10	54 ± 13	2.5 ± 0.3

WET:n=8, DRY:n=4 mean $\pm$ S.D. **: $P < 0.01$, *: $P < 0.05$
 $\dot{V}E$ (l/min BTPS). $\dot{V}O_2, \dot{V}CO_2$ (l/min STPD). HR (beat/min). fR (breath/min). VT (l/min BTPS).

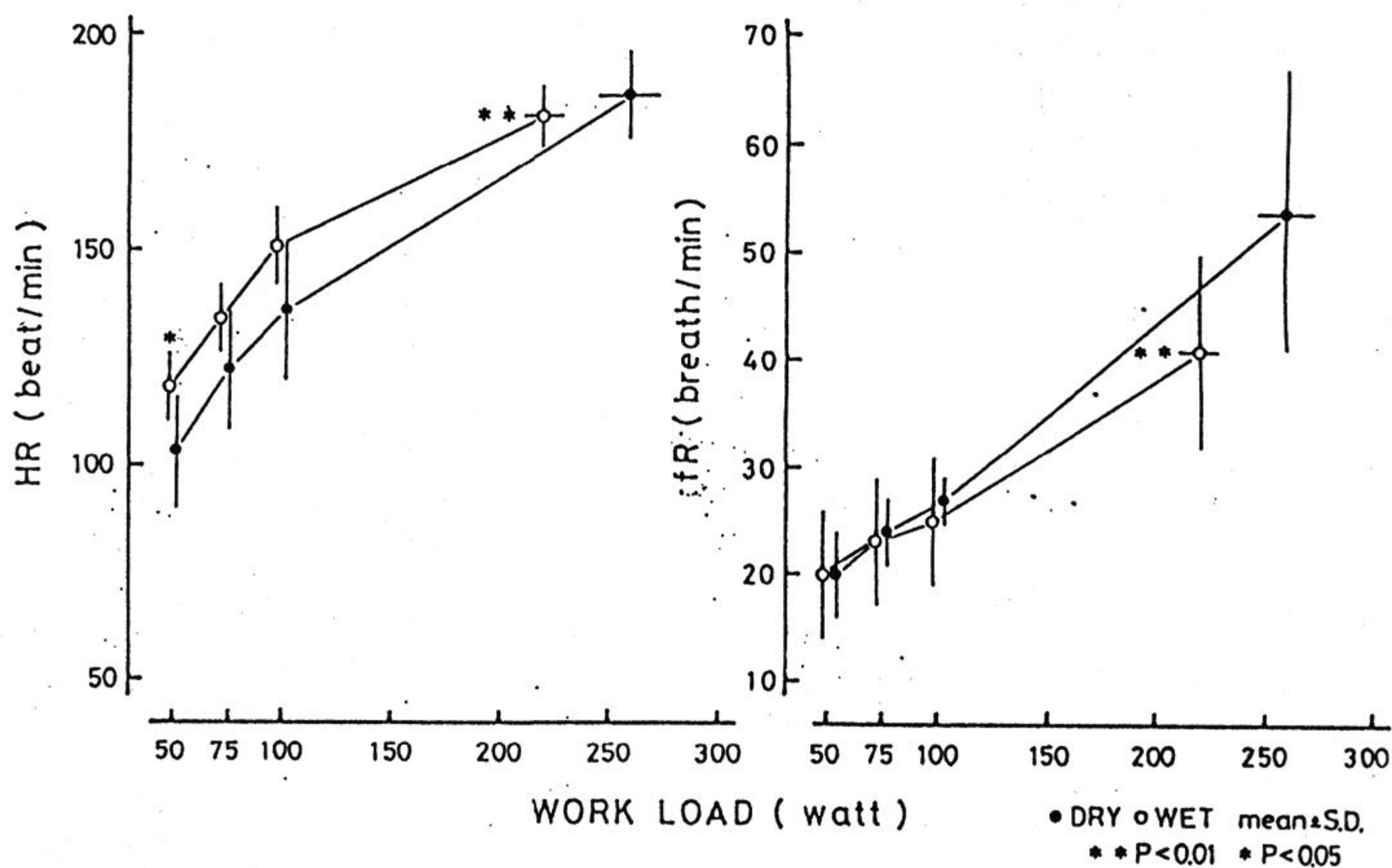


図2 作業負荷に対する心拍数と呼吸数の変化
Fig. 2 HR and fR vs, work load.

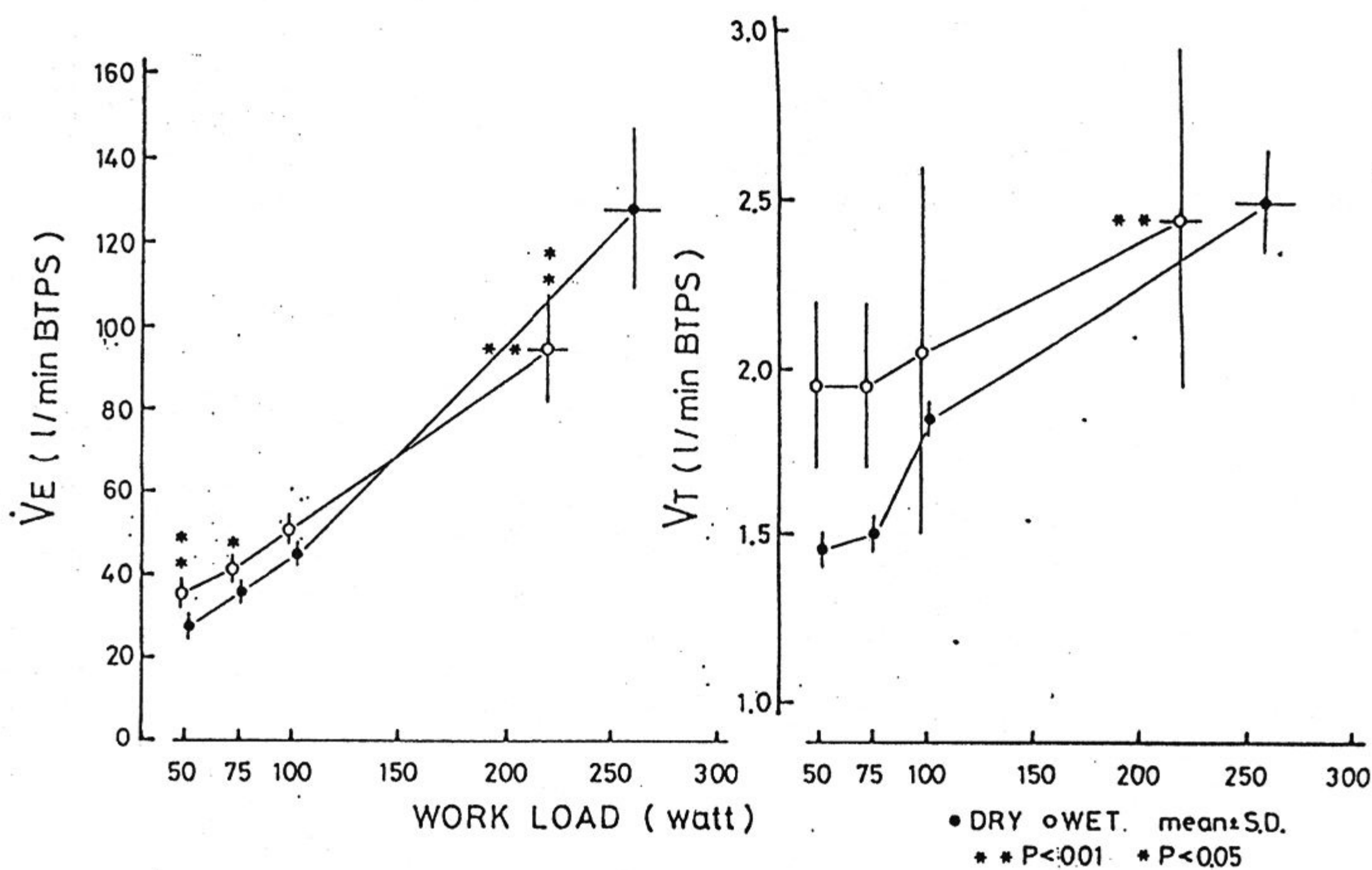


図3 作業負荷に対する分時換気量と一回換気量の変化
Fig. 3 VE and VT vs, work load

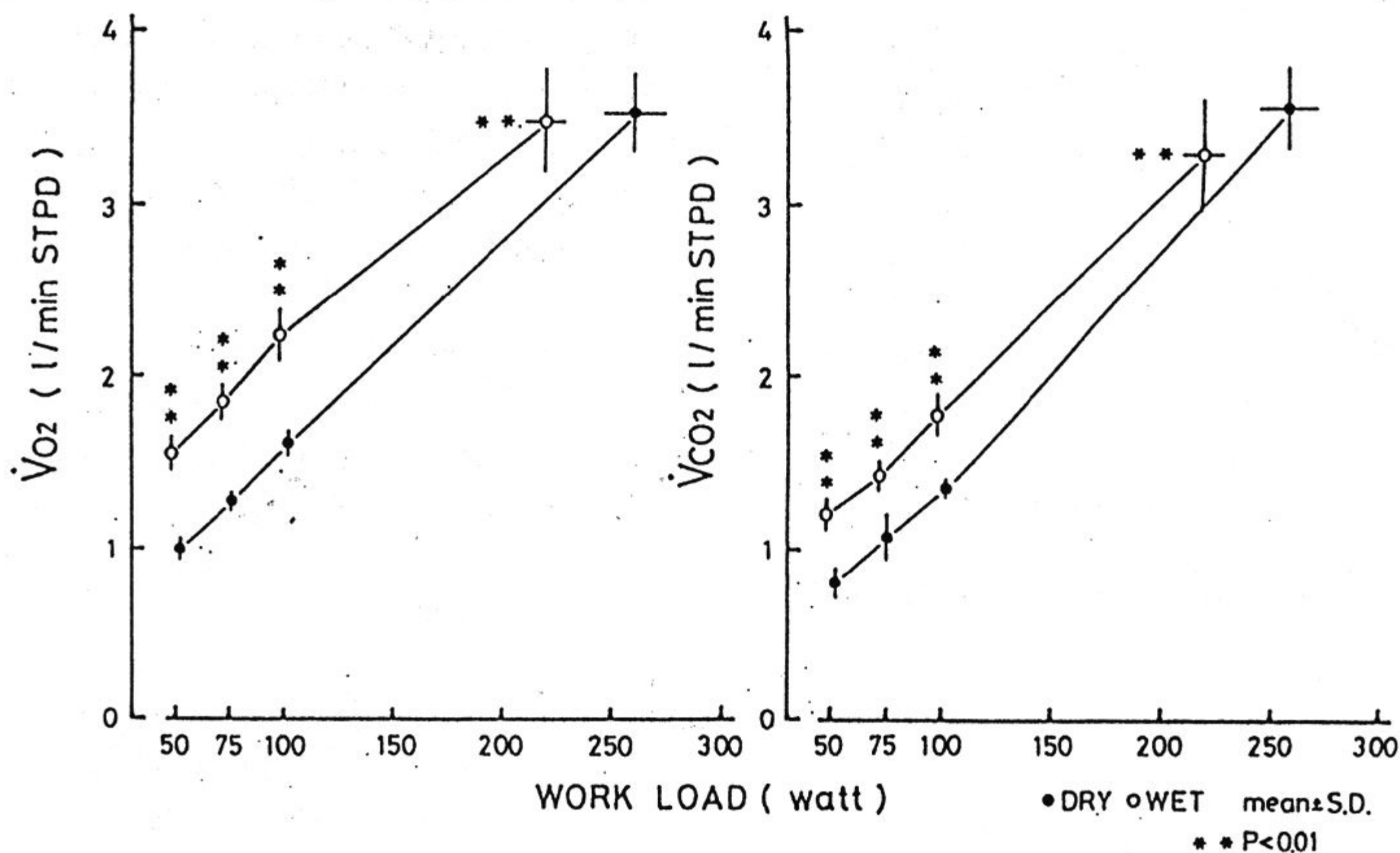


図4 作業負荷に対する酸素摂取量と炭酸ガス産生量の変化
Fig. 4 $\dot{V}O_2$ and $\dot{V}CO_2$ vs, work load

ある。酸素摂取量に対する心拍数の変化は、大気圧下では、 $y = 0.03x + 79.89$ ($r = 0.89$)、水中下では $y = 0.03x + 75.77$ ($r = 0.93$)と正の相関関係を示し、その傾きも同じであったことから、作業負荷量の増加に伴って、心拍数、酸素摂取量、呼吸数は、直線的に増加し、大気圧下と同様な結果を示した。しかしながら、呼吸数を除いて、大気圧下と水中下では、同負荷量に対して、水中下の方が心拍数、酸素摂取量、分時換気量も有意に増加した値を示し、この負荷の増加量は、20%前後と推測され、この負荷の増加は一回換気量の増加によるものと推測される。この一回換気量の増加をもたらす原因は、自転車エルゴメータのペダル作業時の水の抵抗、ウェットスーツ着用による脚力作業時の負荷、水中での呼吸抵抗の増大による呼吸に伴う仕事量の増加、及び水中でのいきこらえ潜水等が加わったことによるものと推測される。酸素摂取量に対する分時換気量の関係は、大気圧下では、 $y = 0.04x - 16.72$ ($r = 0.98$)、水中下では、 $y = 0.03x - 17.43$ ($r = 0.98$)と共に、正の相関関係が認められたが、その傾きが異なっている。この相対的な換気量の低下は呼吸の

状態が機械的に異なること、例えば水中下では、⁺胸郭へ水圧が加わること等がその要因と思われる。

大気圧下、水中下での最大下作業は大気圧下では、 260 ± 14 watt、水中下では、 220 ± 10 wattと水中下の方が有意に減少していた。しかしながら、心拍数は、 186 ± 10 beats/min、 181 ± 7 beats/min、酸素摂取量も 3.58 ± 0.23 l/min、 330 ± 0.32 l/min と有意な差は認められなかった。一般に最大下作業時における最大酸素摂取量は 3.5 l/min、心拍数は 187.3 ± 7.5 beats/min、と報告⁴⁾されていることから推測すると、大気圧下、水中下ともほぼ最大下作業に達していることが示唆された。一方、分時換気量は最大下作業時の大気圧下では、 127.7 ± 19.3 l/min、水中下では、 94.7 ± 13.0 l/minと、水中下の方が有意に減少していた。一回換気量は、100 watt 負荷時では、水中下の方が増加の傾向が認められたが最大下作業時には、 2.5 ± 0.3 l/min、 2.4 ± 0.5 l/min と有意な差が認められなかった。また、最大酸素脈においても大気圧下では、 18.92 ml/beats、水中下における 19.22 ml/beats とほとんど有意な差が認められなかった。Thalman et al.

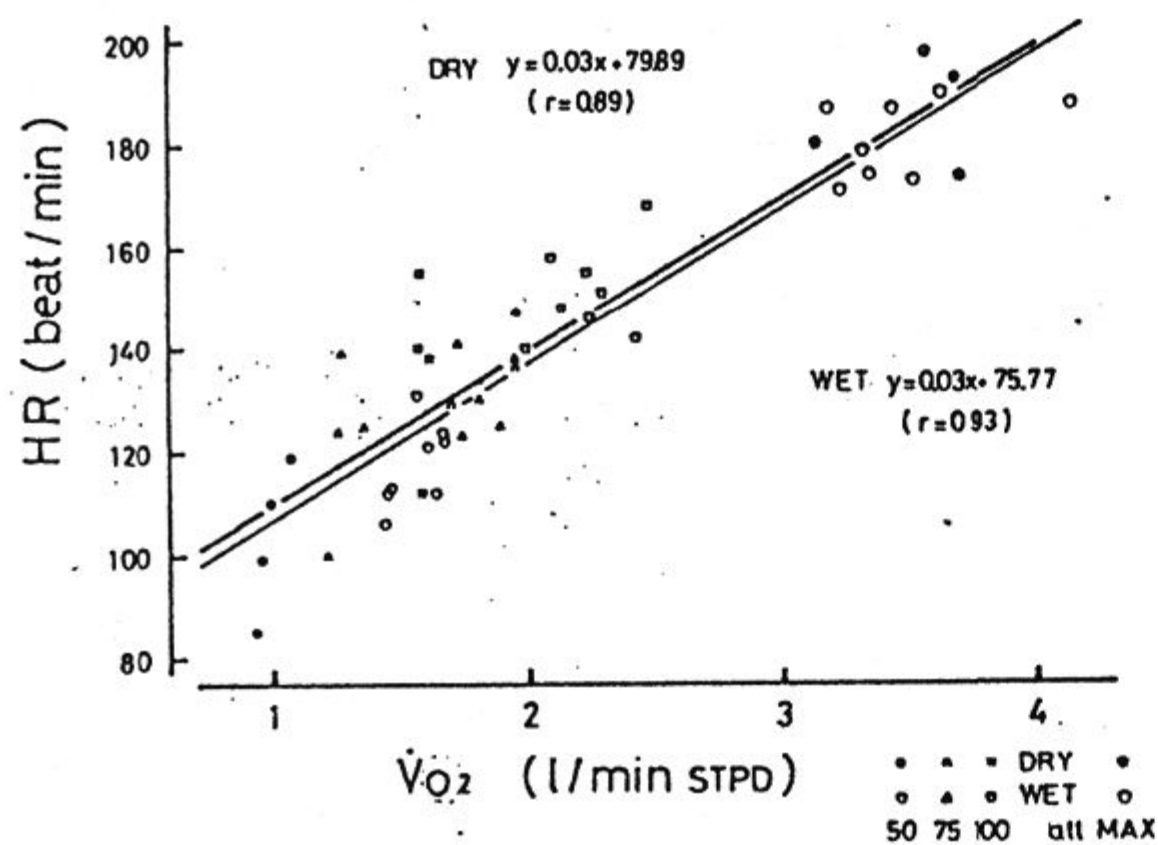


図5 酸素摂取量に対する心拍数の変化
Fig. 5 HR vs. $\dot{V}O_2$

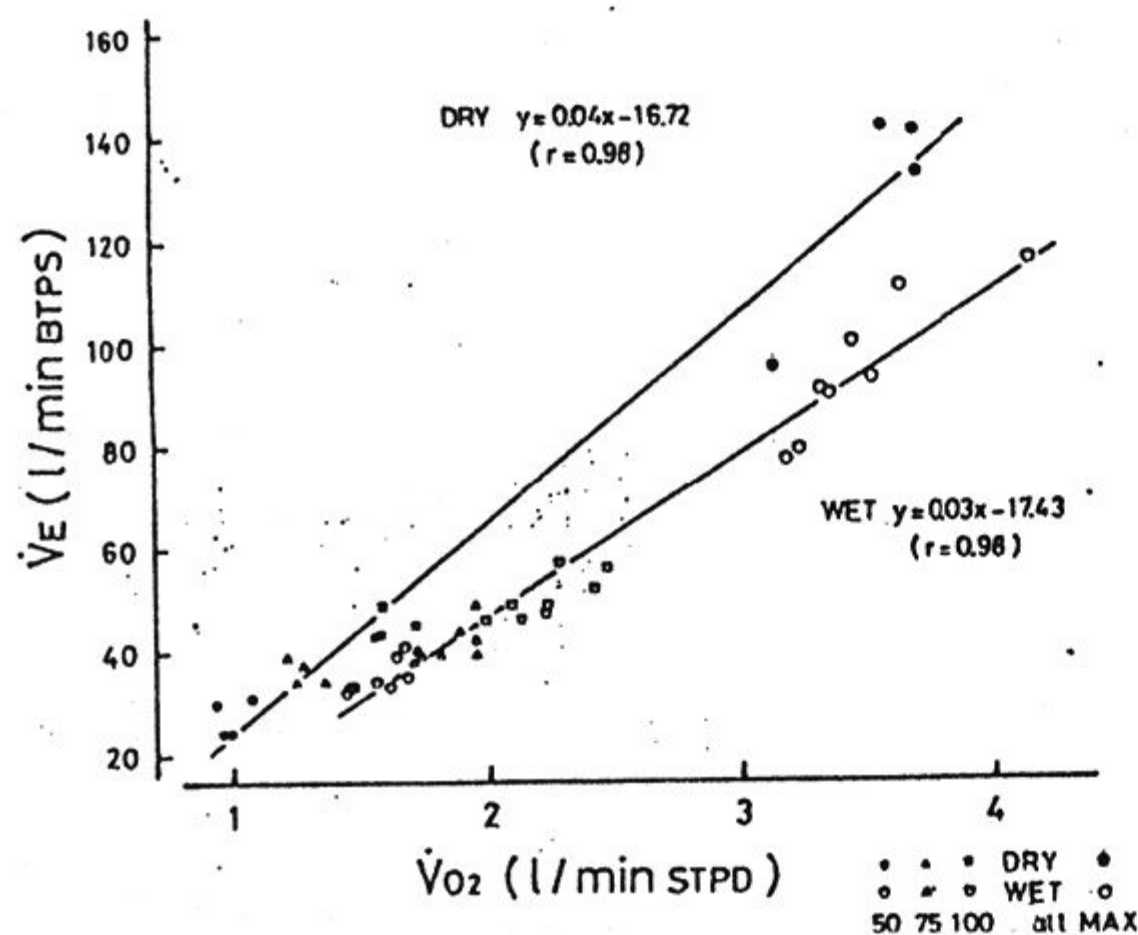


図6 酸素摂取量に対する分時換気量の変化
Fig. 6 $\dot{V}E$ vs. $\dot{V}O_2$

(1979)¹⁾, Lundgren (1984)²⁾は、水中で肺と水圧との圧力差を ± 20 cm H_2O の範囲内として検討をくわえた結果、最大下作業時に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。一方、本実験において、最大作業は水中下では15%減少しているが、持久性能の指標となる最大酸素脈、心拍数および最大酸素摂取量には、有意な差が認められなかったことなどから、この最大下作業の制限因子は、循環系よりも呼吸系にあることが示唆された。

以上の結果より水中下での最大下作業の減少は、水中下で呼吸抵抗の増大によるもののほかに、さらに水の抵抗、スーツ着用による脚力負荷の増大等によって機械的負荷にさらに作業負荷量が加わったことによるものと推測され、見かけ上の作業遂行作業量が減少した結果と考えられた。

参 考 文 献

- 1) Thalman, E. D., Sponholz, D. K., 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. B. G., Respiratory function during simulated wet dwer, 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 change during rest and exercise in men saturated at a simulated sea water depth of 1,000 feet, Underwater Physiology Proceeding of the 4th Symposium on underwater physiology, ed by Lamberstein, C. J., 347-356. (1971)
- 4) 猪飼道夫編, 身体運動の生理学, 杏林書院 (1979)
- 5) Dressendorfer, R. H., Morlock, J. F., Baker, D. G. and Hong, S. K., Effects of head-out water immersion on cardio-respiratory responses to maximal cycling exercise, Undersea Biomed: Res., 3, 177-187 (1976)
- 6) 浅井利夫, 森田正人, 栗倉 真, 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, Vol. 1 No. 1, pp. 28-34. (1985)

(原稿受理 1988年4月12日)