

ダイバーのフィンキックによる常用推進力について (第2報)

山口仁士 *¹ 菊地秀治 *¹ 榎原正実 *¹
設楽文朗 *¹ 檜木暢雄 *¹ 毛利元彦 *¹

水中でダイバーがフィンを使用して遊泳する場合、数分間にわたり持続的に維持できる推進力は 6.5 kg 程度であることがわかっている。しかしこれは水面下 1 m 程度の浅い深度でのもので、水深 300m 付近の高圧下での知見はまだ無い。

ここでは大気圧 (1ATA)、空気環境下と 31ATA、He-O₂ 環境下でダイバーの遊泳能力に対し、その遂行能力をみると同時に生理的反應の相違について比較検討した。

水温は 26±1°C で遊泳エルゴメータにより 3、4、5 kg の3通りの遊泳推進力を負荷した。その結果、5 kg までの推進力は 31ATA 下でも十分に発生可能なこと、心拍数、分時換気量、酸素消費量は 1ATA、31ATA とともに負荷の増大に伴い直線的に増加し、それぞれの回帰直線は良く一致することがわかった。

Studies on the Normal Thrust Force of a Diver's Fin-Kick (2nd Report)

Hitoshi YAMAGUCHI *², Hideharu KIKUCHI *²
Masami ENOHARA *², Fumiro SHIDARA *²
Nobuo NARAKI *², Motohiko MOHRI *²

Swimming underwater with fins requires a diver to generate thrust force up to 6.5 kg constantly for several minutes in shallow depth. However, there have been no reports concerning swimming at deeper zones.

In this report, swimming performance capacity at the depth of 300 m was tested and the physiological responses were compared for 1 and 31 ATA. Water temperature was 26±1°C and the thrust loads applied to divers were 3, 4, 5 kg.

In this experiment, it was found that the thrust performance up to 5 kg was completely achieved even in 31 ATA. The heart rate, respiratory minute volume and oxygen uptake were also found to show similar tendencies both in 1 and 31 ATA.

*¹ 潜水技術部

*² Diving Science and Technology Department

1. はじめに

潜水作業時のダイバーには陸上での作業によるものと異なった負荷がかかると言われているが、水中での作業負荷を定量的に評価出来る形でダイバーの作業能力を論じたものは少ない^{1) 2) 3)}。筆者らは過去に水中での定量作業の負荷装置として遊泳エルゴメータを作成し、浅い深度での持続遊泳能力を調査した⁴⁾。

今回は深々度での持続遊泳能力を取り上げ 31 ATA、He-O₂ 環境下で実験を行い、大気圧 (1 ATA)、空気環境下のものと比較し深度 (圧力) の相違による作業能力や運動生理的な諸元について比較検討したので報告する。

2. 方 法

2.1 遊泳方法

実験の概念図は図 1 のとおりである。試験水槽としては潜水シミュレータのウェットチャンバーを用いた。水深、タンク直径ともに 3 m である。遊泳エルゴメータはカウンターウェイトによりダイバーを押し戻す向きに動こうとし、ダイバーは遊泳エルゴメータを垂直に保つようにフィンを使って泳ぎ、負荷された力を相殺するための前進方向の推力を発生させる。この方法によりカウンターウェイトの重さを変えることでダイバーへの推進負荷を調節する。カウンターウェイトからの力とダイバーが負荷を補償するための推進力とのバランスが崩れ遊泳エルゴメータの垂直状態の位置保持ができなくなると、ダイバーの目の前の警告灯が点灯し推進力の調節を促す (図 1 下)。今回の実験において被験者に与えた推進負荷は 3、4、5 kg の 3 通りであった。また、水中におけるダイバーの重量は浮力と釣り合わせ上下方向の余分な力を取り除いた。

2.2 潜水呼吸器

潜水呼吸器にはスーパーライト 17-B に排圧調整弁を付けたものを用い、潜水呼吸器内の圧力を適切に保ちながらダイバーの呼気ガスを水に触れることなく直接ダグラスバッグに採集した。

2.3 推進力の定量評価方法

図 2 に遊泳エルゴメータの動きと警告灯の連動

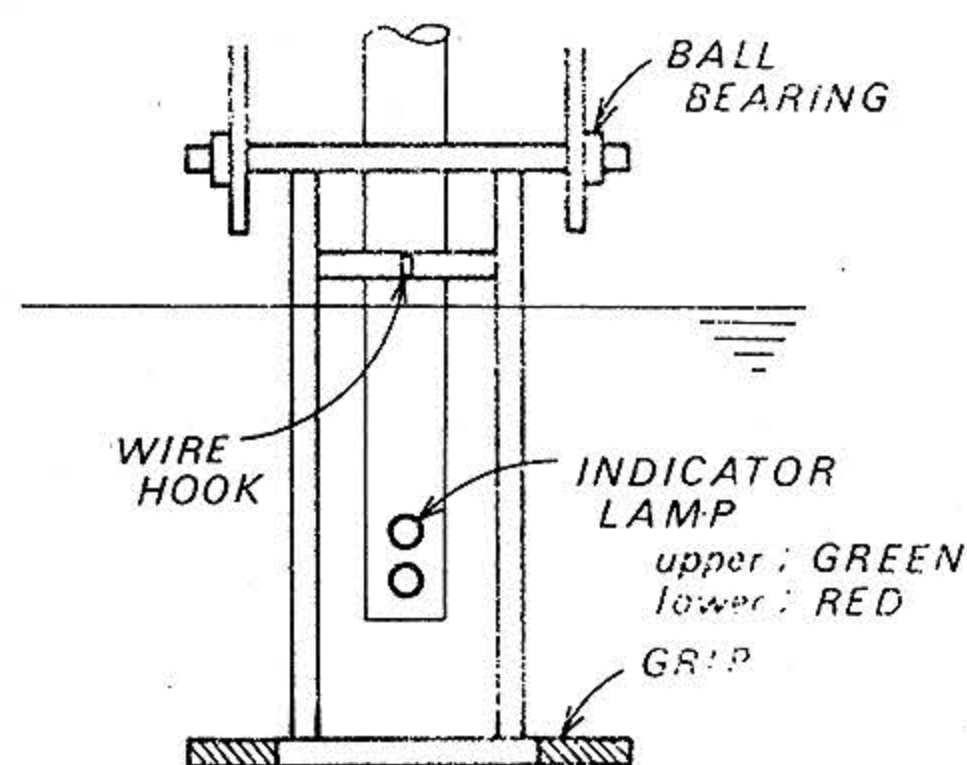
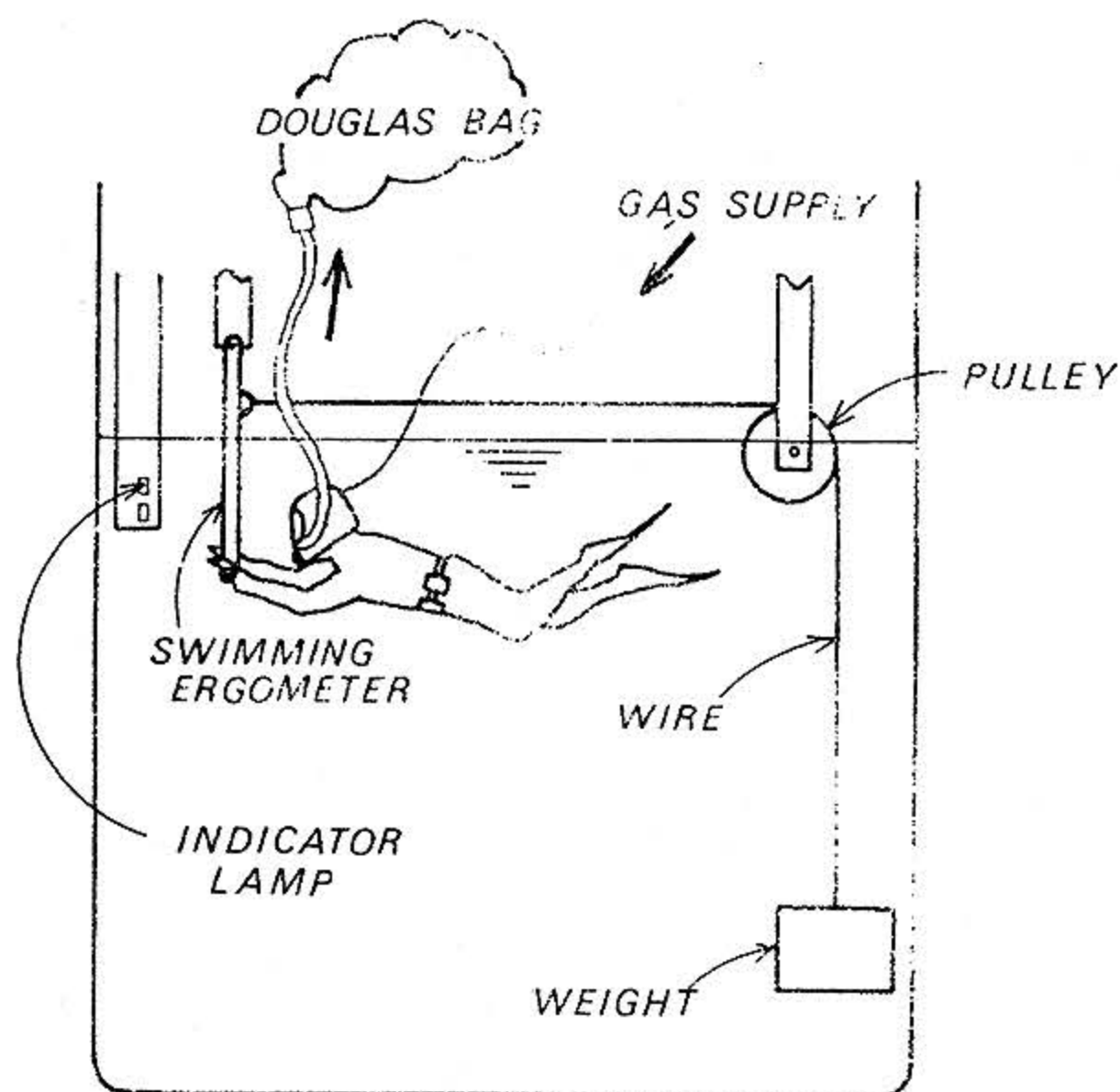


図 1 実験概念図

Fig. 1 Schematic diagram of the Swimming ergometer setup

状況を示す。また、与えた負荷と被験者の発生した推進力とのバランス状況を水上でモニターするため、警告灯の点灯状況をさらに他の電気信号に置き換え水上のペンレコーダに導出するが、その信号 (+、0、-) の連動状態も示してある。この信号のうち、(+) と (0) が出た場合は被験者は少なくとも与えられた負荷以上の推進力を発生していたと考えられる。逆に (-) の場合は負荷に押し返されていたと思われる。これらの信号を実際にペンレコーダに記録させたのが図 3 であり中心線が (0)、左に振れているのが (+)、右が (-) である。このうち (+) と (0) の時間を秒単位で合計し、1 分間のうちどれ程の割合であったかをパーセンテージで表した。これを「推進成功率」と定義し、被験者が与えられた負

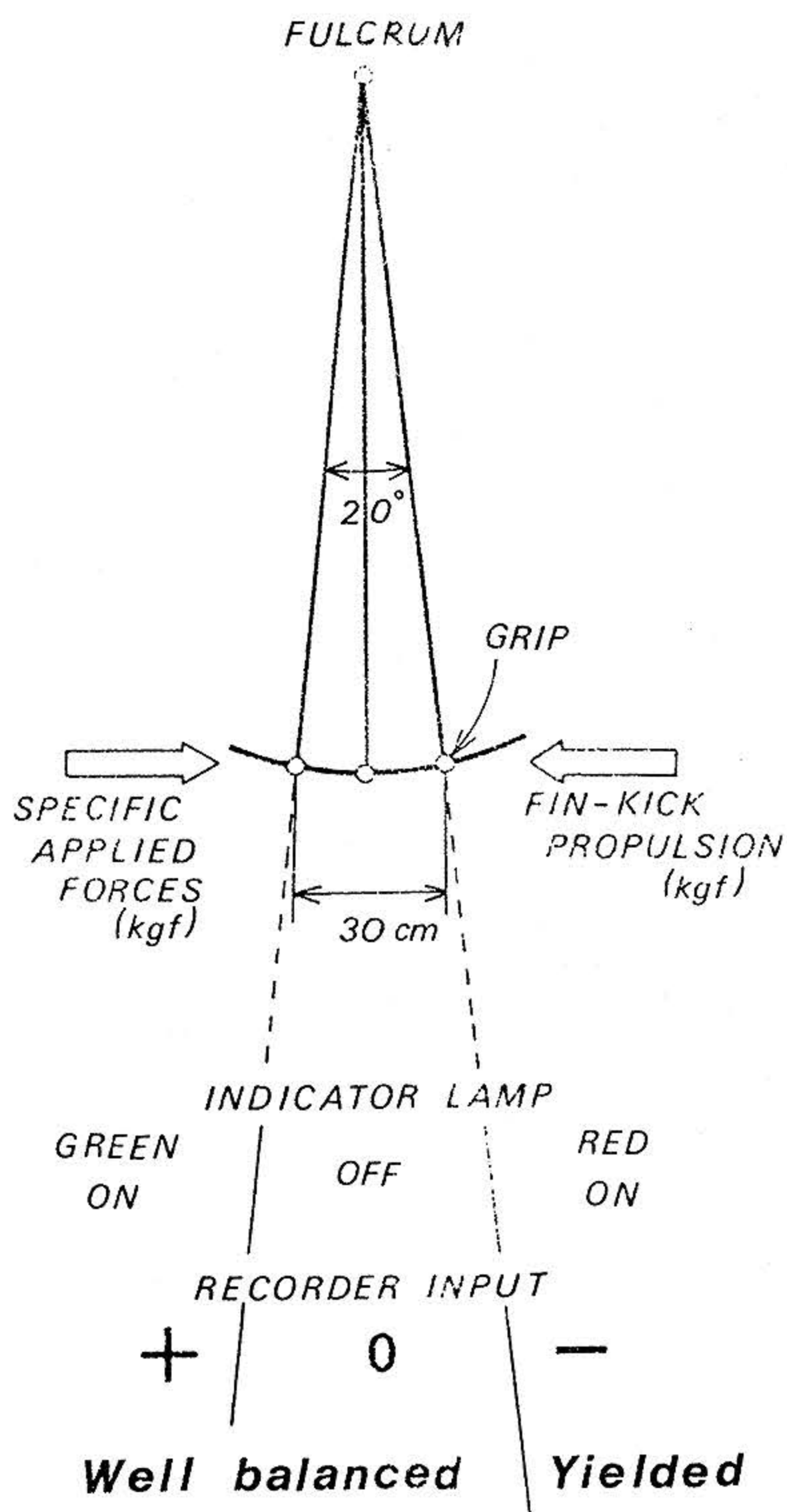


図2 遊泳エルゴメータ機能概略図
Fig. 2 Function of swimming ergometer

荷をどれほど相殺していたかの定量式評価指標とした。

2.4 心拍数、分時換気量、酸素消費量

被験者にある一定の負荷を与えた場合の運動生理的反応の指標として、心拍数、分時換気量、酸素消費量のデータは他の実験と比較するうえで欠くことができない。

心拍数は水密を保った3点の電極を被験者の胸部に張りつけ、胸部誘導法により有線で導出した。

分時換気量、酸素消費量はダイバーの呼気をダ

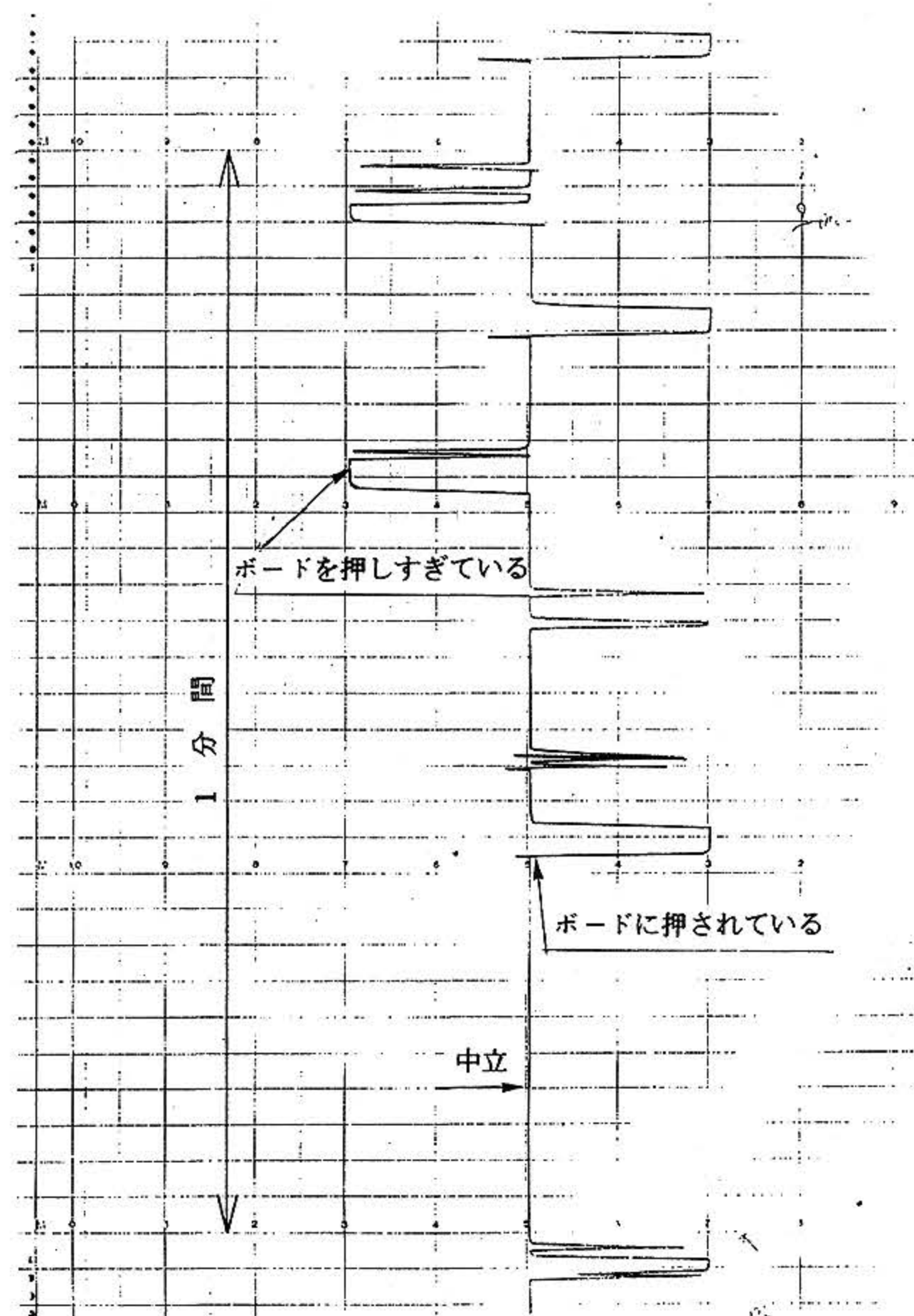


図3 推進成功率データ記録例
Fig. 3 Recording example of Performance ratio

クラスバッグに採取したものから分析した。

2.5 負荷時間及び計測時間

図4に示すように被験者は水没前に椅座位で6分間の安静をとった後そのまま水中に入り、さらに6分間の水中安静をとった。水中、水上ともに同じ潜水装備状態である。その後6分ずつの遊泳運動を3、4、5 kg と負荷を増しながら連続して18分行った。心拍数や酸素消費量などは負荷を増加した後徐々に上がりはじめ、3分から5分経過して定常状態に達するのでそれぞれ6分間の最後の1分を計測時間とした。

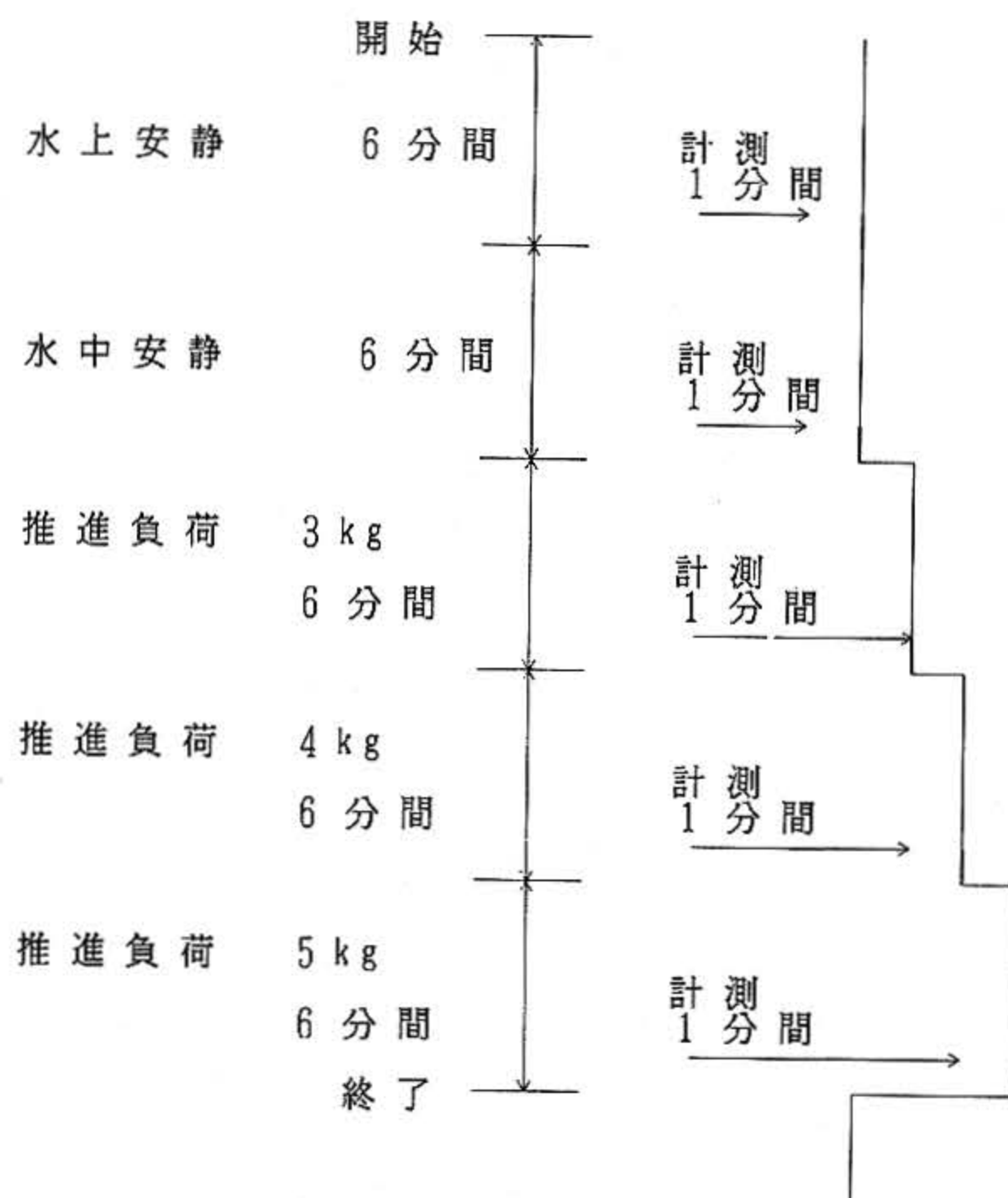


図4 実験手順
Fig. 4 Test Procedures

2.6 その他

被験者は4名の健康な男子で年齢はそれぞれ34、22、21、21才であり、潜水に関する教育訓練を十分に受けている。

着用した潜水服は厚さ5mmのネオプレン製ウェットスーツで、使用したフィン日本アクアラング製ポピュラーラピッドフィンである。ウェットスーツは周囲の圧力により縮小しダイバーの水中重量に変化を来すのでそのつどダイバー用ウェイトの調整を行い、浮力と重力を釣り合わせた。

実験時の水温はいずれも $26 \pm 1^{\circ}\text{C}$ の範囲でコントロールした。

3. 結果と考察

3.1 推進成功率

推進成功率の結果を表1に示す。推進負荷が7kg以上になると推進成功率は激減し、50%から30%の範囲に下がることが浅い深度での実験で知られているが⁴⁾今回の実験結果ではそれは見られず殆ど完全に負荷を相殺できている。このことより、5kg以下の中程度までの推進力であれば圧力の増加に関わらず少なくとも6分間はほぼ完璧に発生できることがわかった。

単位：%

被験者	推進負荷	1 A T A	31 A T A
A	3 kg	100	100, 100
	4 kg	100	100, 100
	5 kg	100	100, 100
B	3 kg	99	99, 100
	4 kg	98	99, 100
	5 kg	100	100, 100
C	3 kg	100	100, 100
	4 kg	100	100, 100
	5 kg	100	100, 100
D	3 kg	100	100, 100
	4 kg	100	99, 99
	5 kg	100	100, 100

注：1 A T Aでは1回、31 A T Aでは2回の計測を行った。

表1 推進成功率

Table .1 Performance rate

3.2 心拍数

結果を図5に示す。大気圧下のものより31ATA下のものが多少低めに出ているが、それぞれの回帰直線間に有意な差はない。高圧徐脈の発現かとも思われたが、酸素消費量と心拍数の相関関係からは環境圧力の相違による有意差は出なかった。いずれにしてもそれぞれの負荷において10拍程度のものであり、中程度の負荷の範囲では圧力の相違による心拍数の変化はさほど無いものと思われた。

3.3 酸素消費量

図6は酸素消費量の結果を示すが、これも心拍数と同様、圧力の相違による差は見られなかった。

3.4 分時換気量

図7は分時換気量を示すが、これも1ATAと31ATAでは有意な差は見られなかった。また、潜水呼吸器内に装着したサーミスタにより呼吸数を計測したが、その結果を図8に示す。これはそれぞれの圧力下で統計的な有意差はないものの回帰直線間に高さの差が窺われる。これは高密度ガス呼吸時に呼吸抵抗が増加し、その結果として呼吸数を少なめにしようとする自律的な働きがあったのではないかと考えられた⁵⁾。そこで分時換気量を呼吸数で割って一回換気量を求めた(図9)。この結果大気圧下では負荷の増大と共に一回換気量は増加してゆくが、31ATA下の運動時では負荷との相関関係は消失していることがわかる。この原

因としてはやはり呼吸ガスの高密度化が考えられるが、潜水呼吸器の性能も考慮しなくてはならない。すなわち、今回使用した潜水呼吸器は深度が比較的浅い100 m内外で一搬に使用されているものであり、高密度ガスの供給には不適切であった可能性もある^{6) 7) 8) 9)}。潜水呼吸器自体の容量不足で十分な量のガスが送気されないと、ダイバーは分時換気量をかせぐために一回の呼吸で多くのガスを呼吸したとも考えられる。今回の結果からはいずれが主たる原因かは判明しないが、深々度用の潜水呼吸器を使用したとしても、呼吸のパターンがガス密度の変化で影響を受けることは十分に考えられる。

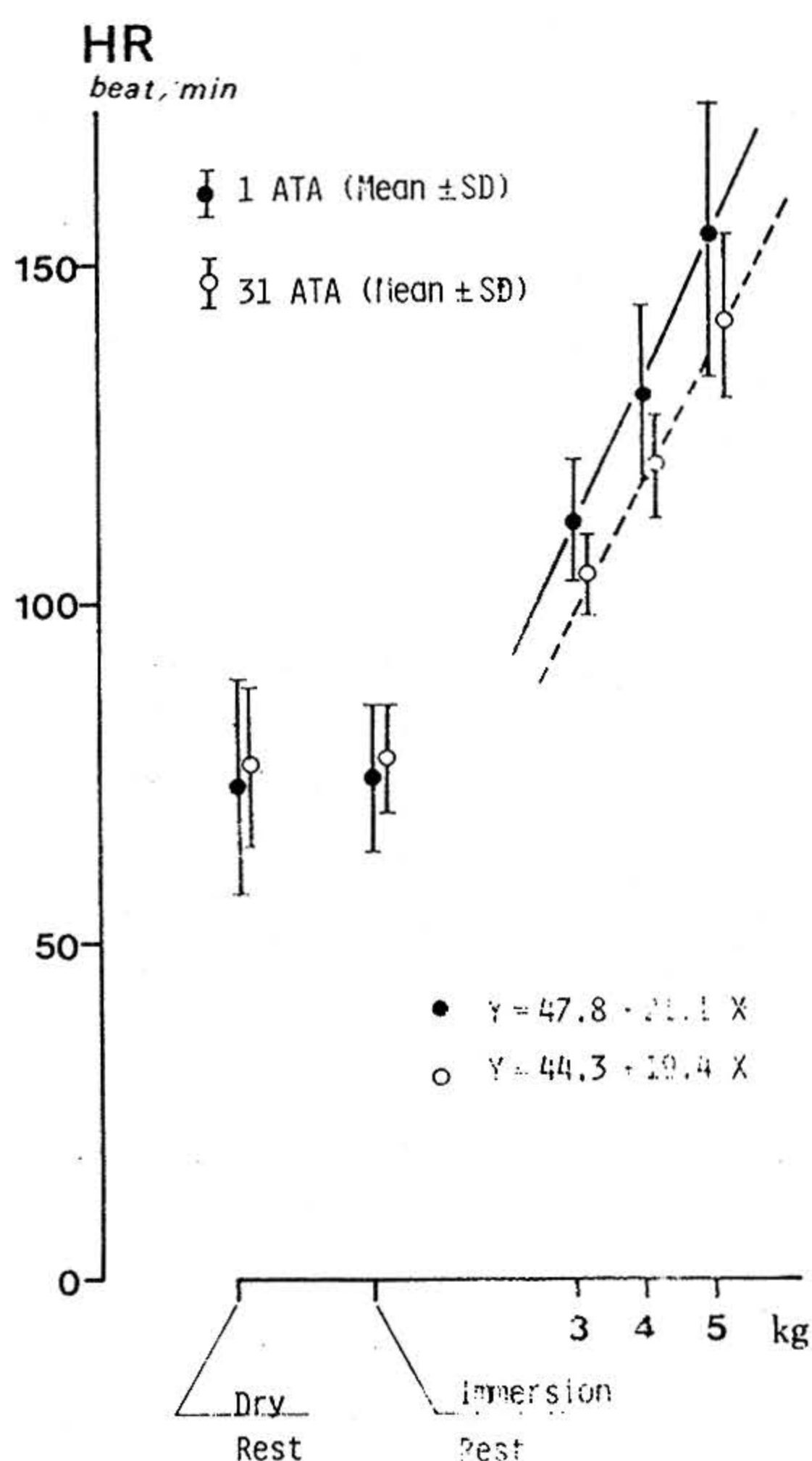


図5 心拍数
Fig.5 Heart rate

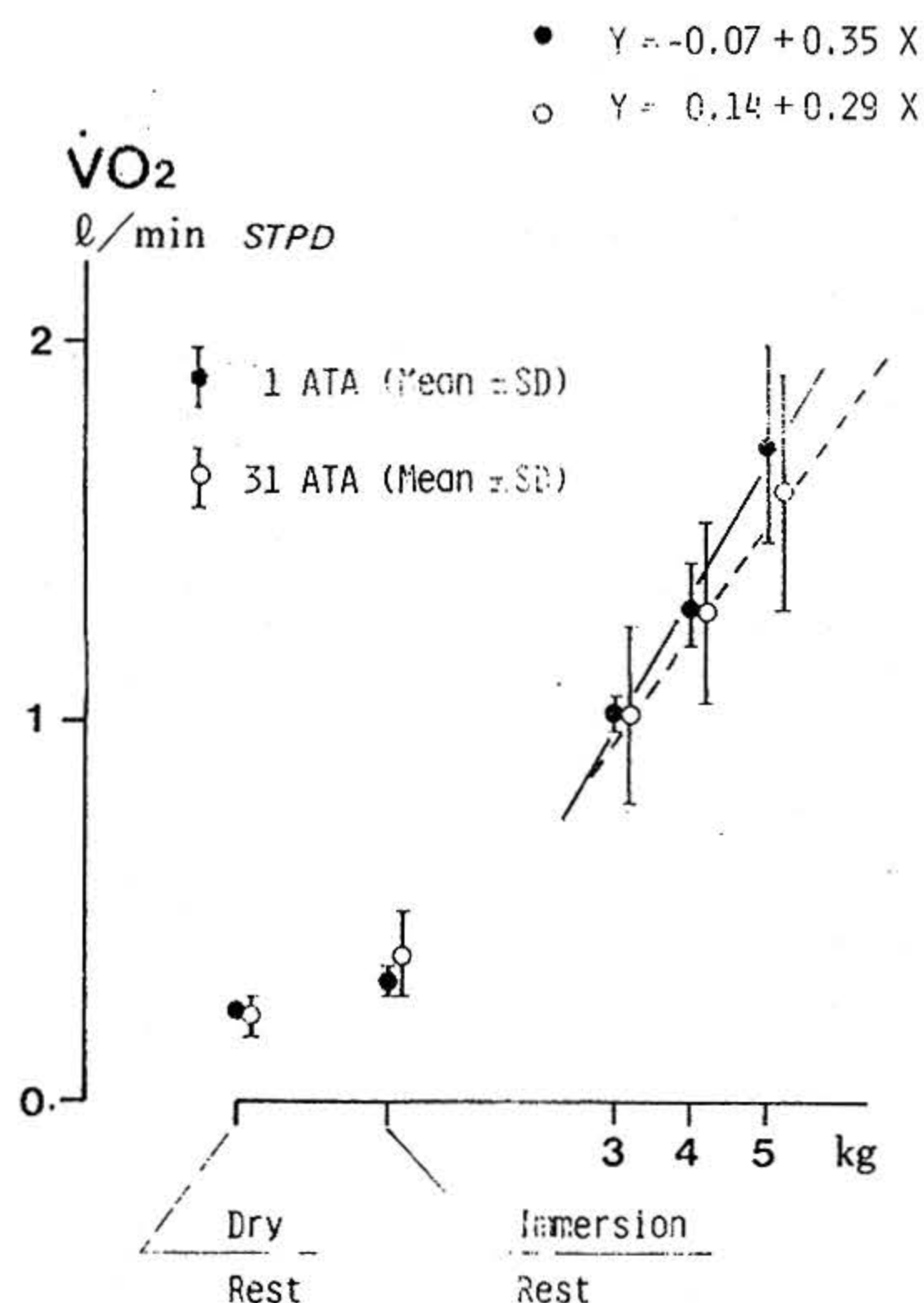


図6 酸素消費量
Fig.6 Oxygen uptake

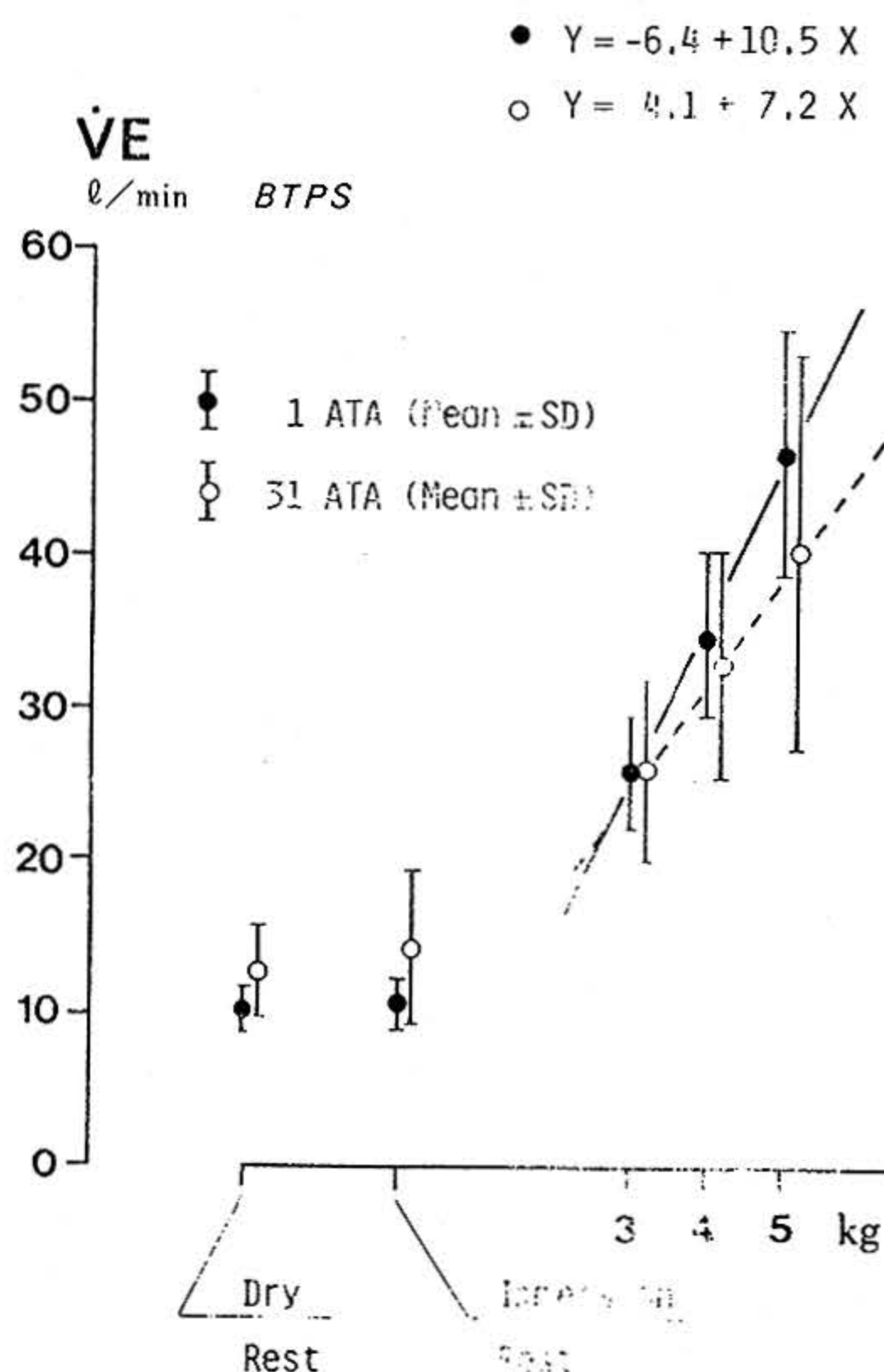


図7 分時換気量
Fig.7 Respiratory minute volume

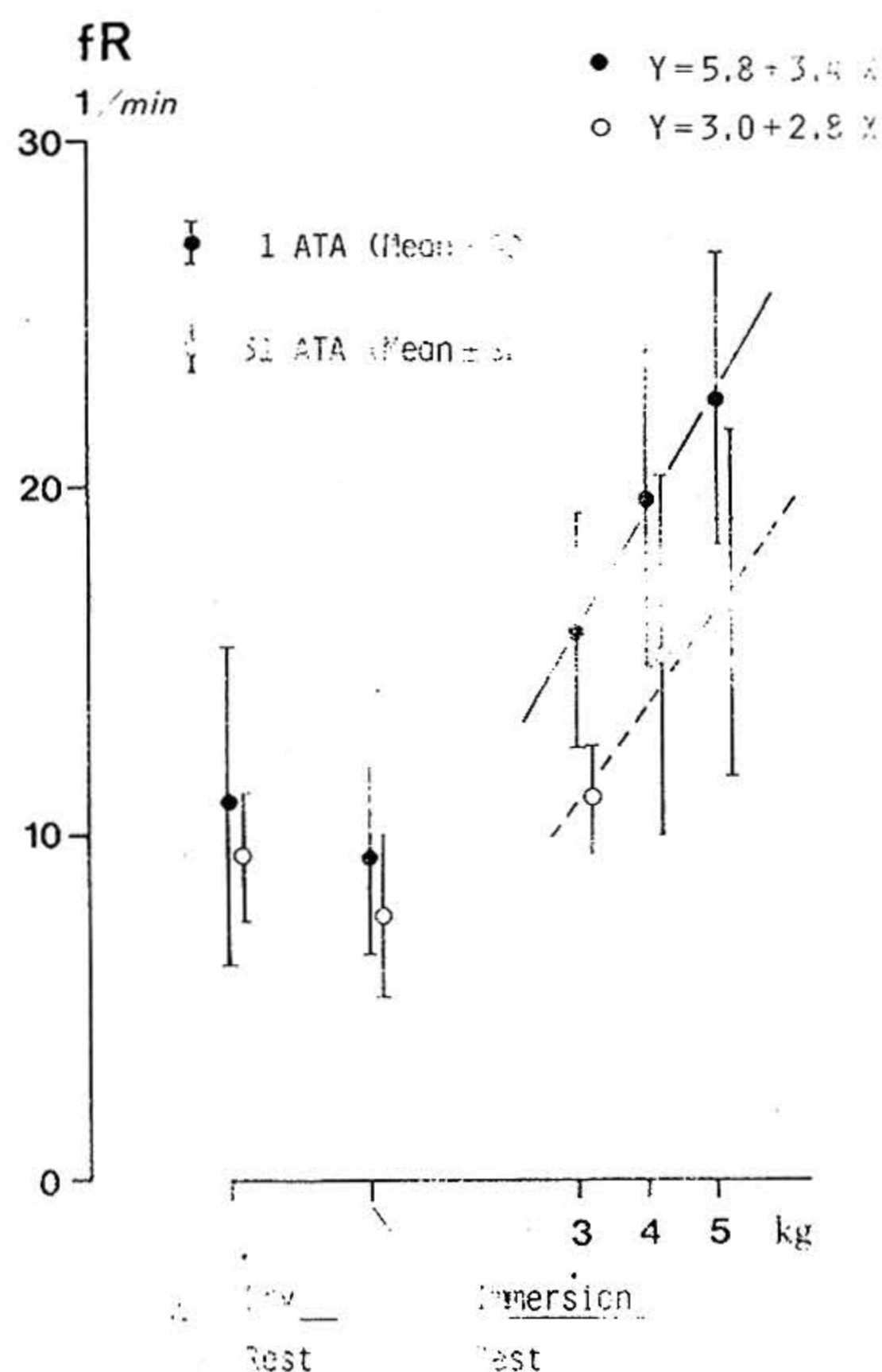


図8 呼吸数
Fig.8 Respiratory frequency

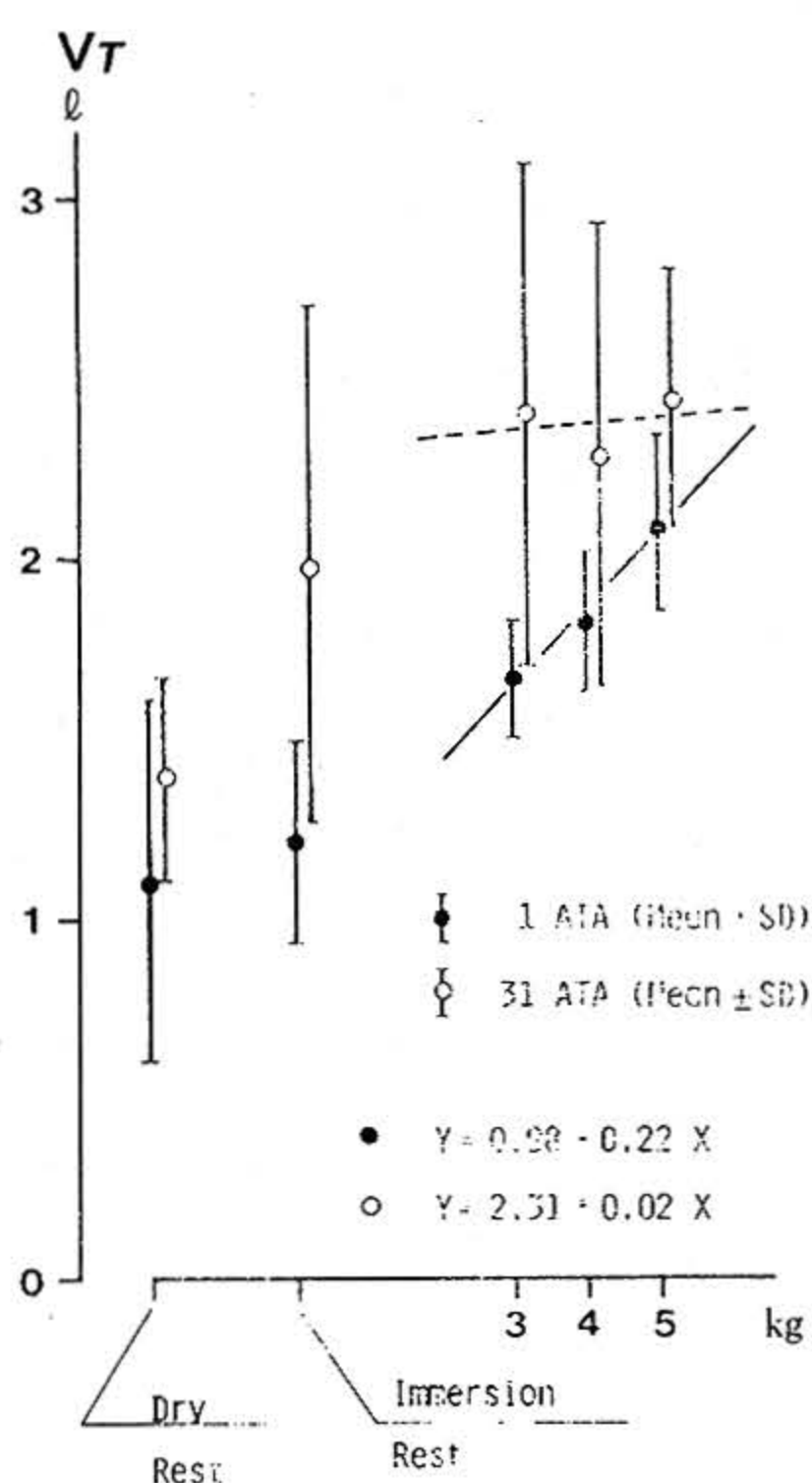


図9 一回換気量
Fig.9 Tidal volume

4. まとめ

今回の実験では、大気圧下の浅い水中で空気を呼吸して遊泳した場合と深度300m相当深度にてHe-O₂を呼吸した場合のダイバーの遊泳能力等について測定したが、推進力にして5 kg 以下の中程度の負荷の範囲であれば高圧下でも十分に相殺でき、深海での遊泳が可能ながわかった。

また、心拍数、酸素消費量、分時換気量も圧力の変化による相違はさほどなく、深々度での作業に対する運動生理的応答は浅い深度での実験でほぼ正確に把握できることがわかった。

しかしながら、深々度における高密度ガス呼吸による呼吸パターンの変化が出現することも示唆され、潜水呼吸器の性能も併せて今後検討してゆかねばならない。

5. おわりに

本研究はニューシートピア計画の内、300m有人潜水シミュレーション実験にて行われたものであることを付記すると共に、関係者各位の御助力、特に4名のテストダイバーの献身的努力に感謝いたします。

参考文献

- 1) Christianson, R. A., G. Weltman, and G. H. Egstrom, 1985.
Thrust force in underwater swimming. Human Factors, 7(6): 561-568.
- 2) Dwyer, J. V., and E. H. Lanphier, 1954.
Oxygen consumption in underwater swimming. J. Appl. Physiol, 7: 31-37.
- 3) Lanphier E. H., J. W. Dwyer, and A. J. Walkowski, 1955.
A trapeze swim-ergometer, NEDU, Formal Report 1-55: 1-15.
- 4) 山口仁士, ダイバーのフィンキックによる常用推進力について, 1986.
海洋科学技術センター試験研究報告, No. 17: 123-129.
- 5) Lanphier, E. H., 1968.
Restriction of Ventilation at Depth,

The Physiology and Medicine of
Diving and Compressed Air Work,
76-84.

6) Middleton, J. R., 1979.

Evaluation of Diving System Inter-
national Superlite 17B, NEDU
Report 9-79.

7) Schwartz, H. J., 1983.

Manned Testing of Superlite 17B,
NEDU Report 4-83.

8) Schwartz, H. J., 1986.

Manned Testing of the Superlite
17B, with the Oronasal One Way
Valve Removed,
NEDU Report 1-86.

9) Tarmey, C. J., 1986.

Unmanned Evaluation of Various
Umbilical Supplied Open Circuit
Demand UBA for PTC Diving,
NEDU Report 11-86.

(原稿受理 1987 年 12 月 5 日)