

J. Mayol と日本人海士の閉息潜水時における生理反応

水嶋康男^{*1} 関 邦博^{*1} 中山英明^{*2}

深度 101 m の驚異的な閉息潜水の記録をもつフランスの J. Mayol (55才) と、日本の現役の職業ダイバーである海士 (あま, 男 50 才および女 48 才) において、水中 (深度 10 m と 3 m) と大気圧下での呼吸機能を計測し、比較検討した。最大閉息潜水時間は、日本の海士の 2 分 9 秒に対し、Mayol は 4 分 9 秒を記録した。この間の心拍数は、Mayol に顕著な徐脈 (f_H 34 b.p.m) がみられた。大気圧下での CO_2 に対する感受性では、日本の海士はその感受性が低く、Mayol は、むしろ一般人と同じ水準であった。また、肺活量も日本の海士の方が、Mayol や同年代の一般人より多かった。一般の日本人と大差のない身体的特徴を有する Mayol の長時間の閉息潜水が、何故可能であるかは、本研究の計測項目のみでは明らかではない。今後、そのメカニズムが解明され、長時間の閉息潜水が可能となれば水中での人間の行動範囲が大きく飛躍することが期待されるであろう。

Physiological Responses during Apnoeic (breath hold) Diving in Jaques Mayol and Japanese Professional Divers, "Ama," (male and female)

Yasuo Mizushima^{*3}, Kunihiro Seki^{*3}, Hideaki Nakayama^{*4}

The purpose of this study is to compare the respiratory functions among three divers. One is Jaques Mayol, a famous apnoeic (breath-hold) diver of France, and another two divers are male and female professionals called "Ama" in Japan. The maximum underwater apnoeic time of Mayol was 4 min and 9 sec, while that of the male Ama was 2 min and 9 sec and, female Ama was 1 min and 1 sec. Remarkable bradycardia appeared in Mayol during breath-hold diving. It was revealed from $P_{0.1}$ recording that the sensitivity to CO_2 of the male Ama was lower than that of Mayol, whose sensitivity was similar to that of ordinary Japanese adult. The vital capacity showed similar patterns. The exact mechanism of the extraordinary long breath-holding time of Mayol is still unknown. However, if the mechanism could be identified in future studies and if longer breath-hold diving in the ordinary divers could be realized with special training, man would be able to have a wide behavioral range under water.

^{*1} 潜水技術部

^{*2} 産業医科大学

^{*3} Manned Undersea Science and Technology Department

^{*4} School of Medicine, University of Occupational and Environmental Health

1. ま え が き

閉息潜水（素潜り）の歴史は古く、日本の海女においては縄文式時代から潜水して貝類等の採取を行い、海中からの恩恵を受けていたことが知られている。そしてこの閉息潜水による漁法は、現在もわが国の漁民が用いている。しかしながら、一方では、自給器、他給器等の新しい潜水技術の開発がなされており、新しい潜水方法である潜水器を用いた潜水では確かに深く長く潜ることはできる反面、恐しい潜水障害を引き起こす危険性を秘めている。これにはいろいろあるが、耳および副鼻腔の圧外傷や肺過圧傷害（Air embolism）呼吸ガスによる酸素あるいは高酸素、 CO_2 による中毒、窒素あるいは不活性ガスによる麻酔作用その他さまざまなタイプの潜水障害がある。しかしながら閉息潜水では潜水障害を引き起こす危険性は比較的少ない。

閉息潜水では、通常、息こらえ時間は最大3分前後であり、到達可能な深度は、40mである。しかし人間はある訓練をしたり、純酸素呼吸をすることによって13分間もの息こらえ時間を延長することができる。フランスの J. Mayol は、1981年に深度 101m の深度までの閉息潜水に成功した。

この閉息潜水は、生体内へより多くの酸素を溶存させ、しかも CO_2 の感受性を低減させることによって息こらえ時間の延長が可能である。また、哺乳動物の多くが水中環境に潜入すると、心拍数は減少することは既に古くから知られており、中山（1965¹⁾）は、日本の海女の研究において、潜水中海女は迷走神経の刺激を受けるために心拍数が減少するということを多くの実験によって見出している。しかし人間は、「海に戻った私たち人類の仲間、イルカやクジラのように今よりもっと自由に長く水中にすることができる」と J. Mayol はいう。この閉息潜水は、イルカやアザラシ同様に深い潜水を行っても長時間にわたっての減圧時間は不要となる。しかも、この技術が進歩することによって、息こらえ時間も長くなり、潜水深度も増大することができる。その結果、潜水コストが安く、安全性の高い潜水方法の開発ができる。そこで、J. Mayol の実践的哲学に対して、われわれはかねてからその閉息潜水の生理的適応について研究心を燃やしており、今回、J. Mayol

の来日の機会に彼自身の水中での生理反応（心拍数、呼吸機能）について計測する機会を得た。その結果、新しい知見を得たので報告する。

2. 方 法

1) J. Mayol と日本の海士のプロフィール

1981年イタリアのエルバ島沖で前人未踏の深度 101m の閉息潜水の記録を持つフランス人 J. Mayol（55才）の生理的反応（心拍数、呼吸機能）と比較する意味から、対象として日本において古くからの閉息潜水の漁法を用いた漁ろうで生計を立てている現役の海士で年令的にも J. Mayol に近い男性海士（50才）と女性海女（48才）の、水中と大気圧下での生理計測（心拍数、呼吸機能）を行い、比較検討を行った。

被験者の身体的特徴は次のとおりである。

J. Mayol：年令 55才、身長 176cm、体重 68kg、

奄美の海士：年令 50才（男性）、身長 172cm、体重 67kg であった。肺活量は、J. Mayol が 3.92ℓ で奄美の海士は 5.26ℓ であった。これから見ると年令は近く、身長、体重もほとんど同じで変らない値である。肺活量は、J. Mayolの方が奄美の海士より 1.34ℓ 少なく、これは一般の人と変らない値である。また舩倉の海女（48才）も参考として比較を行った。

2) J. Mayol と舩倉の海女における計測

1) 方法

1982年8月24日から4日間、能登半島の沖合いに浮かぶ、海女の島として有名な舩倉島の沖合、水深 10m で実験を行った。

J. Mayol と舩倉の海女による 55秒間の水中閉息潜水をおのおの 5回と最大閉息潜水を 2回行った。この間の心拍数の変化を比較した。心電計は、日本光電社製の ECG-6201を使用した。心電図の電極は胸部誘導方式により連続記録を行った。電極から心電計まではケーブル（20m）を介して計測を行った。水温は 20℃ であった。またいずれの被験者も、ウェットスーツ（5mm）を着用した。

電極は、AG-AGCL（銀-塩化銀）電極（皮膚表面電極）を使用した。電極上をサージカルテープ（スリーエム社製）で覆ったことにより、水に浸されることなく心電図記録ができた。電極コードは、絹より線

で柔軟性のあるものを三つ編みにして使用した。

電極を装着した海女の状態を写真1に示す。

J. Mayol と比較した海女は、潜水経歴も長く、現在も潜水漁ろうを行い活躍している。なお、心、肺疾患を臨床的には認めなかった。

ボートから深水10mまで、通常の海女の仕事の時と同様の速さで潜水を行わせた。潜水時間は、命綱により合図し、心電計のケーブルはその命綱にそわせ50cm間隔をビニールテープで固定した。

安静時計測は、船上で3分間坐位で測定した。その後、水面で潜水前1分間の測定を行い、続いて水中55秒間の閉息潜水を行った。この間の心拍数は連続して計測した。心拍数が潜水前値に回復した時点で次の潜水を行わせた。これを5回くり返し行った。

J. Mayol は潜水前約20分間ヨガ法による呼吸調整を行った。その様子を写真2に示す。両者とも同じ方法で測定し水中の閉息潜水を55秒間5回と最大閉息潜水を2回の計測を行った。

3) J. Mayol と奄美の海士における計測

イ) 方法

1982年8月7日、多摩丘陵病院の呼吸機能検査室で、J. Mayol と奄美の海士のCO₂の感受性と呼吸機能について測定を行った。また1982年8月4日、海洋科学技術センターの水深3mのプールにおいて、J. Mayol と奄美の海士の55秒間おのおの5回にわたる閉息潜水と最大閉息潜水2回を実施し、その間の心拍数の比較を行った。心電図の計測方法は舩倉島沖で用いた方法によって行った。プールの水温は、25℃であったが、いずれの被験者も、ウェットスーツの下着(3mm)を使用した。その時の測定風景として、J. Mayolの閉息潜水前の様子を写真3に示す。また、奄美の海士が水深3mに潜水している様子を写真4に示す。この時はプールの底に座ってもらい、身体が浮かないようウェイトによって調整をした。手前にのびているケーブルが電極を装着した心電図のものである。

3. 結 果

1) 閉息潜水(55秒間)における心拍数の変化

J. Mayol の心拍数は最高値毎分94bpm、最低値毎分34bpm、減少率64%であった。舩倉の海

女が最高値毎分116bpm、最低値97bpm、減少率16%であった。また、奄美の海士は最高値111bpm、最低値57bpm、減少率49%であった。J. Mayol は潜水してから20秒後には毎分34bpmに落ちるといった極度の徐脈が認められた。海洋科学技術センターで実施したプールの深度3mでも図1に示すように同様な潜水徐脈が見られた。

2) 最大閉息潜水(水中最大)における心拍数の変化

最大閉息潜水実験で、J. Mayol は、自己のもつ記録、最高4分57秒には及ばないにしても、4分9秒もの長時間の閉息潜水を行った。反面、日本の海士は、舩倉の海女が1分1秒、奄美の海士が2分9秒であった。J. Mayol は、日本人海士の2倍もの時間の閉息潜水を行ったのである。

この時の心拍数は、図2に示すように、J. Mayol が最高値毎分88bpm、最低値毎分37bpm、減少率58%、舩倉の海女の最高値毎分125bpm、最低値毎分98bpm、減少率22%、奄美の海士は最高値毎分107bpm、最低値毎分47bpm、減少率54%となった。

3) CO₂の感受性

CO₂の感受性の測定は、P_{0.1}(吸気ガスを0.1秒間停止し、この間の吸入圧力値を測定する方法)により測定を行った。CO₂分圧増大に対する吸入圧の増大は、奄美の海士が低いのに対して、J. Mayol は、一般人と比較しても大きな変化はみられなかった。(この時は、年令的に近く、時々潜水を行う被験者として共同研究者中山英明(51才)の値を取った)また、換気量とCO₂分圧においてもP_{0.1}と同様な結果を得た。このようなことから、J. Mayol はCO₂に対する感受性においても一般人と何ら変わることはなかった(図3)。

4. 考 察

1) 心電図記録方法

運動負荷中の心電図記録の場合には、筋肉の運動に伴う筋電図の影響や電極のズレを受けにくい部分からの誘導を必要とし、しかも、多種の同時誘導が困難である。ここでは胸部からの双極誘導方式を採用した。電極は銀・塩化銀電極を胸部に接着させ、その上をサージカルテープにより電極周囲の防水を行った。潜水中も陸上で計測する

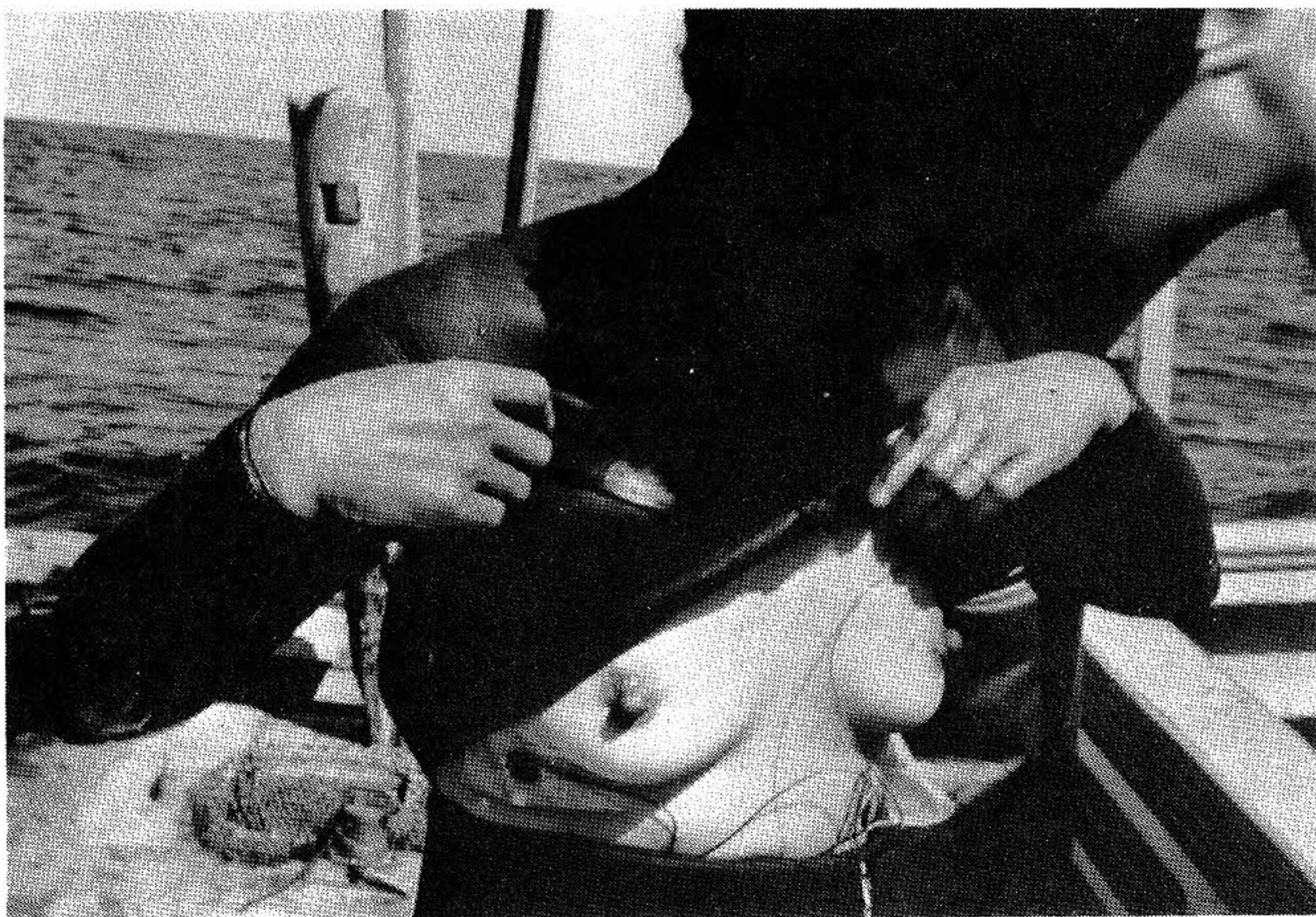


写真1 心電図用電極の装着（舢倉の海女）

ECG electrodes fixed on the breast of Ama in Hekura

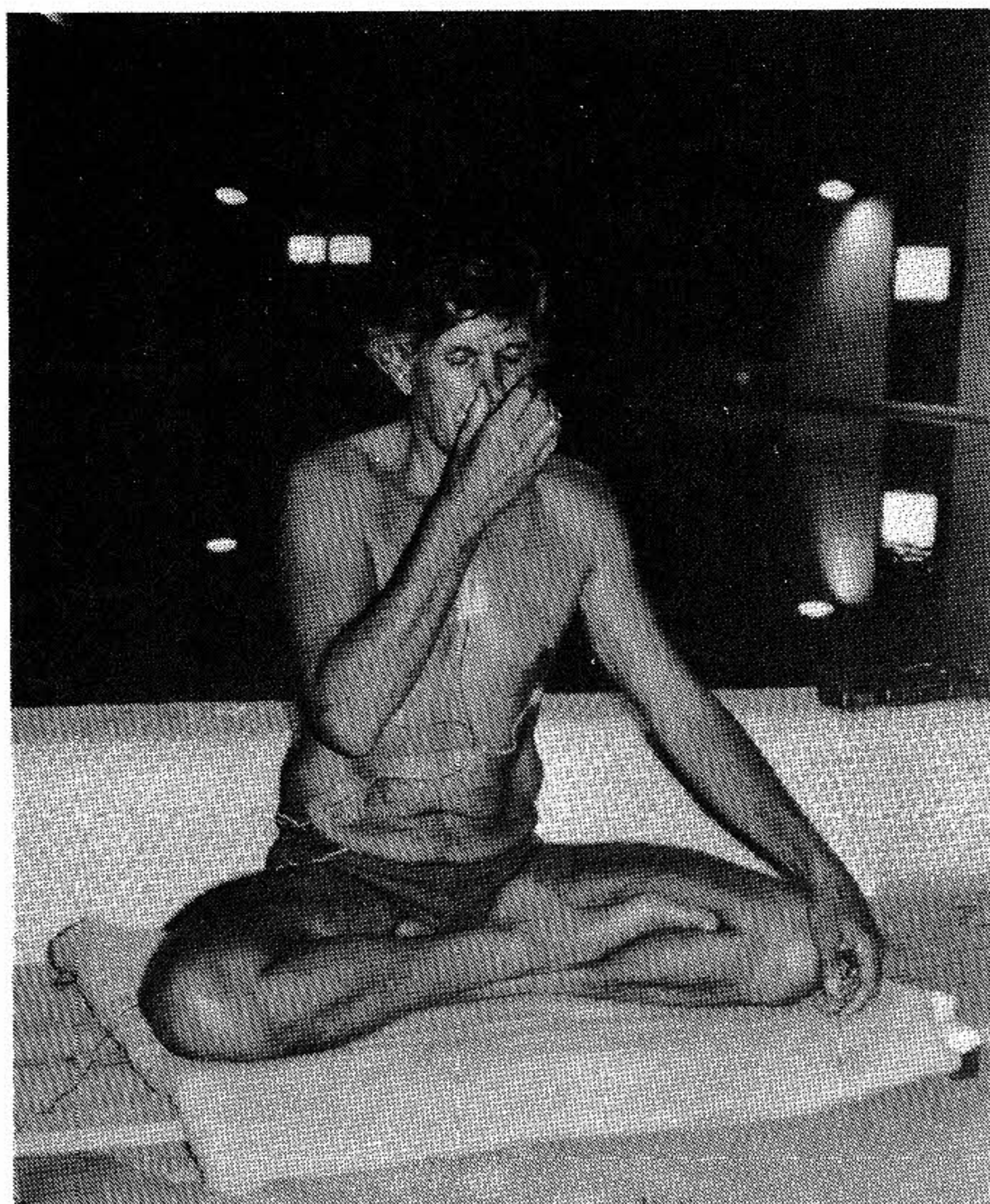


写真2 潜水のヨガ法によるジャック

マイヨールの呼吸調整

Respiratory regulation in Yoga
method by Jaques Mayol
(with electrocardiograph pick-up
on his breast)

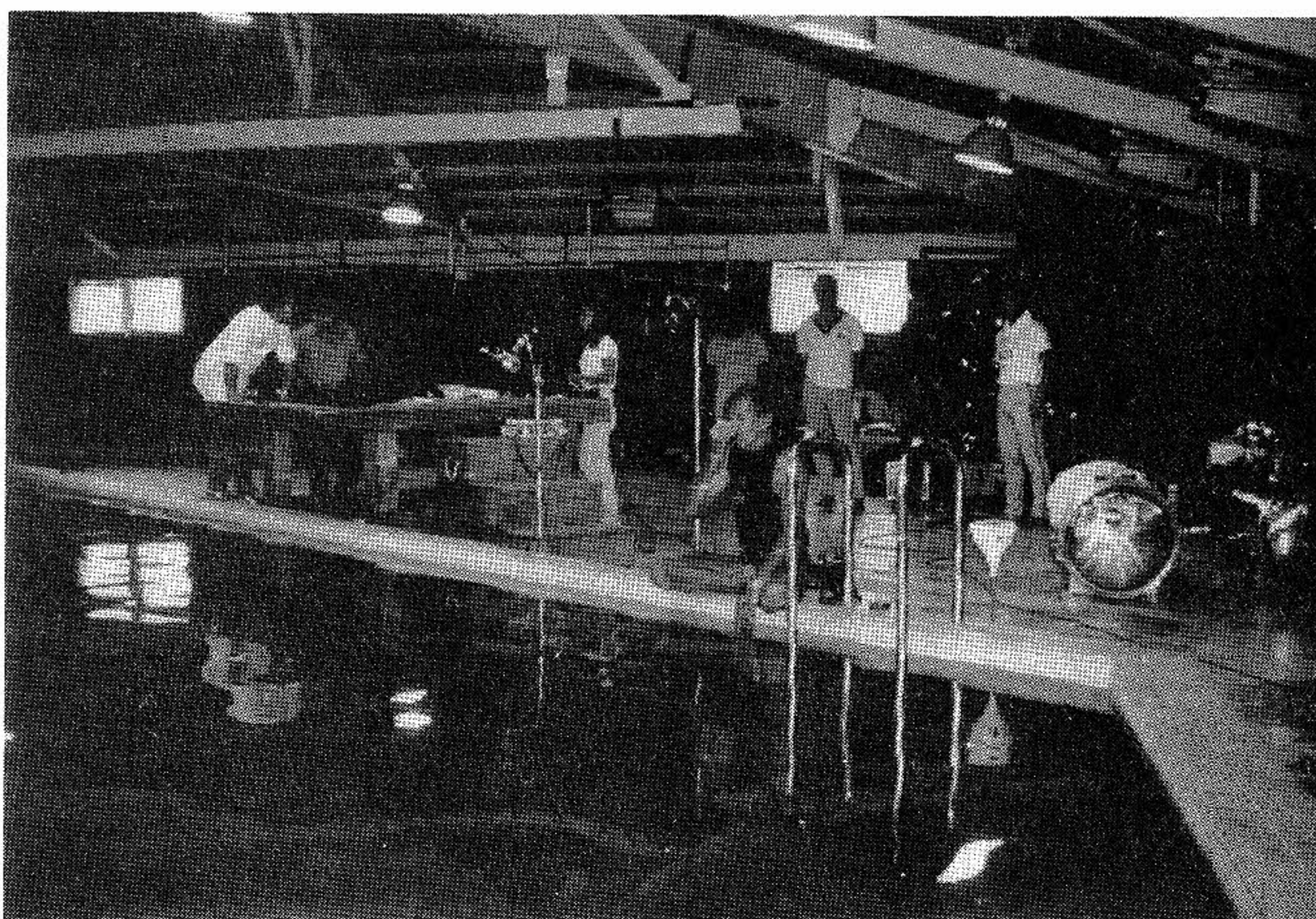


写真3 測定風景（閉息潜水直前のジャックマイヨール）
Jaques Mayol, immediately before setting about
breath-holding dive

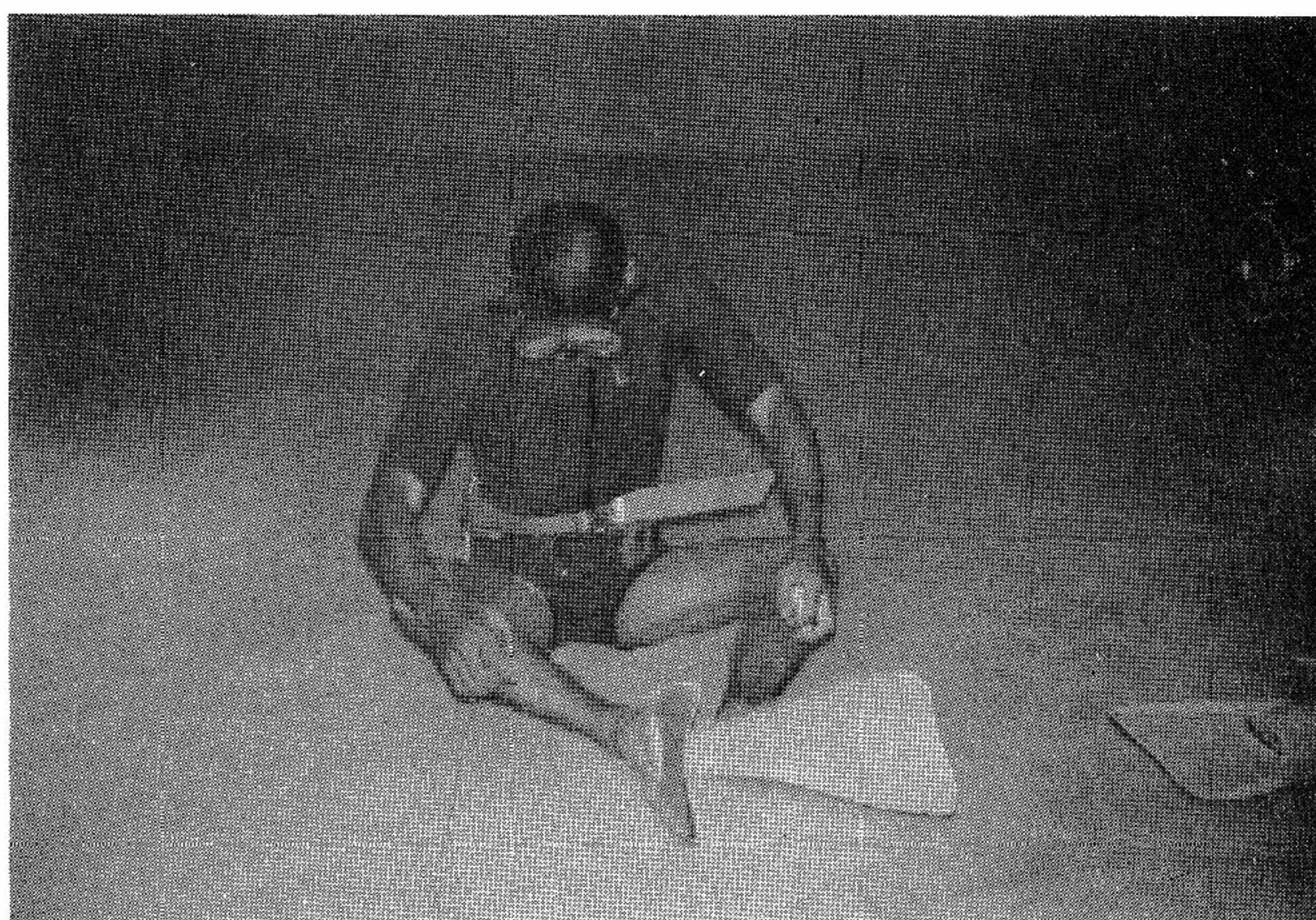


写真4 潜水中の状況（プールで閉息潜水中の奄美の海士）
Japanese Ama in breath-holding dive at the
depth of three meters

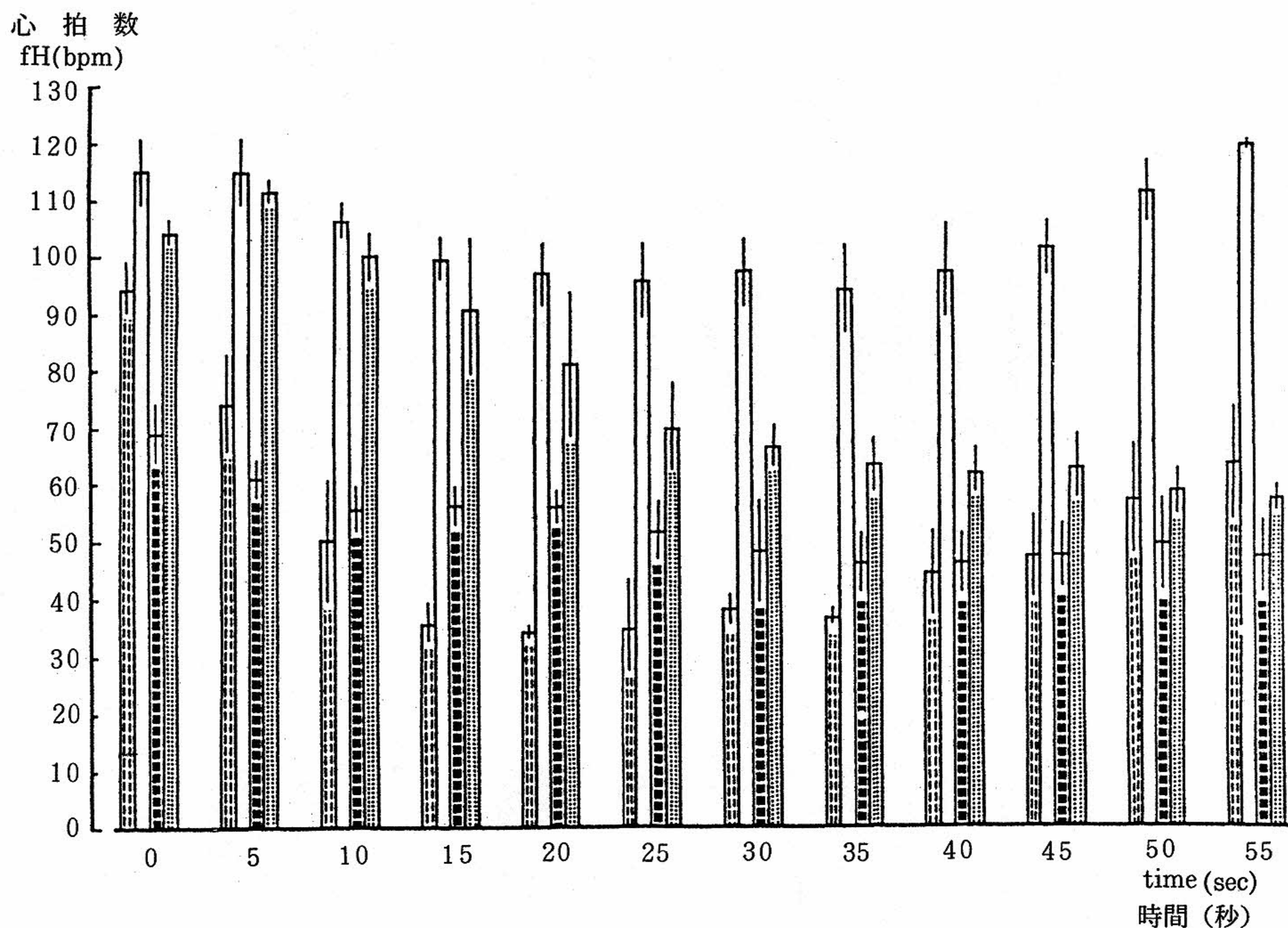
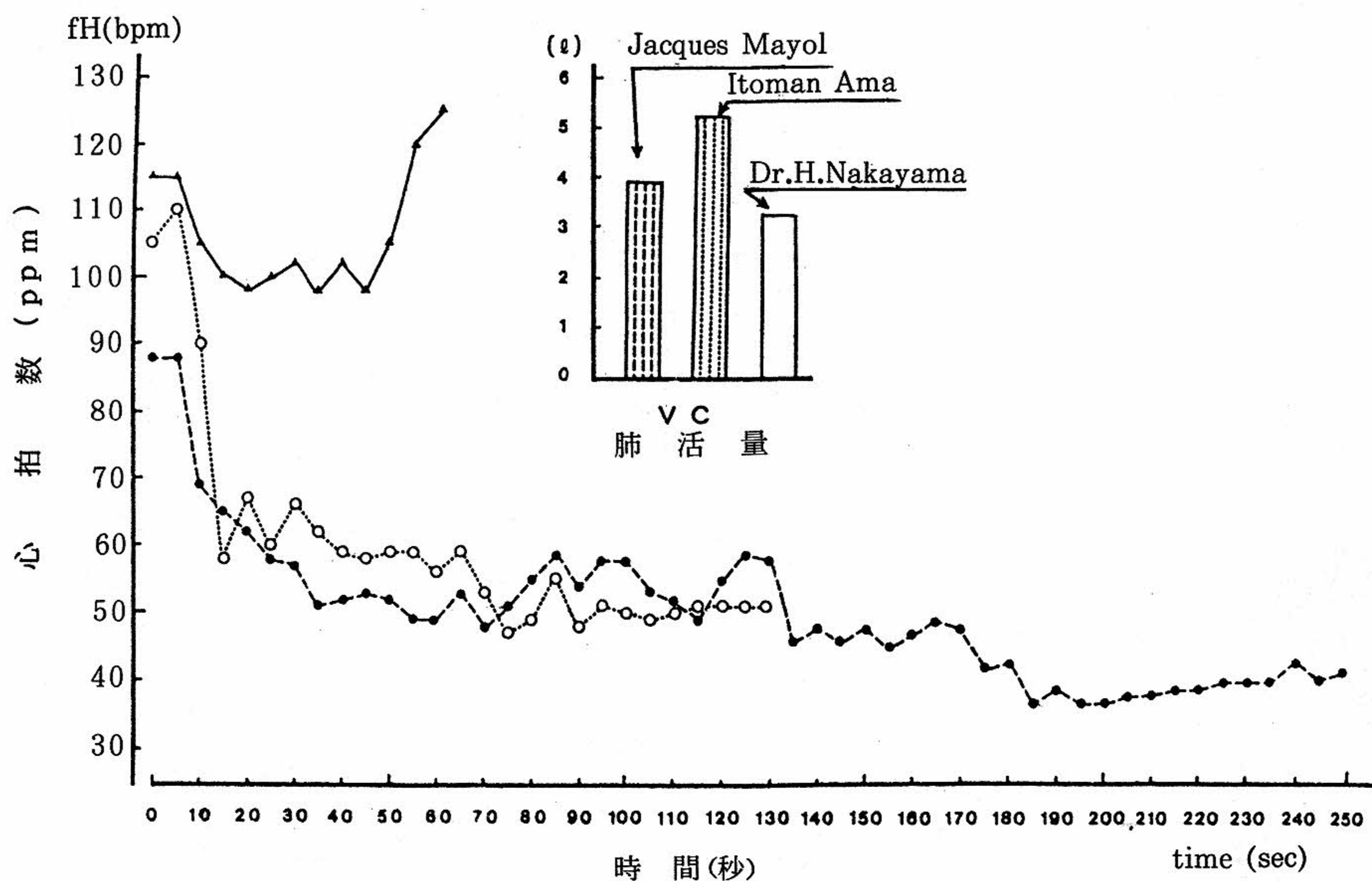


図1 閉息潜水 (55秒間) における心拍数の変化
Modification of heart frequency during breath-holding dive for 55 seconds



○-----○

ジャック・マイヨール (男) 年令
Jacques Mayol (M) (age 55)

心 拍 数 fH(max)	心 拍 数 fH(min)	閉 息 時 間 breath-hold time
88	37	4 min 9 sec

○-----○

奄美の海士 (男) 年令
Itoman Ama (M) (age 50)

心 拍 数 fH(max)	心 拍 数 fH(min)	閉 息 時 間 breath-hold time
107	47	2 min 9 sec

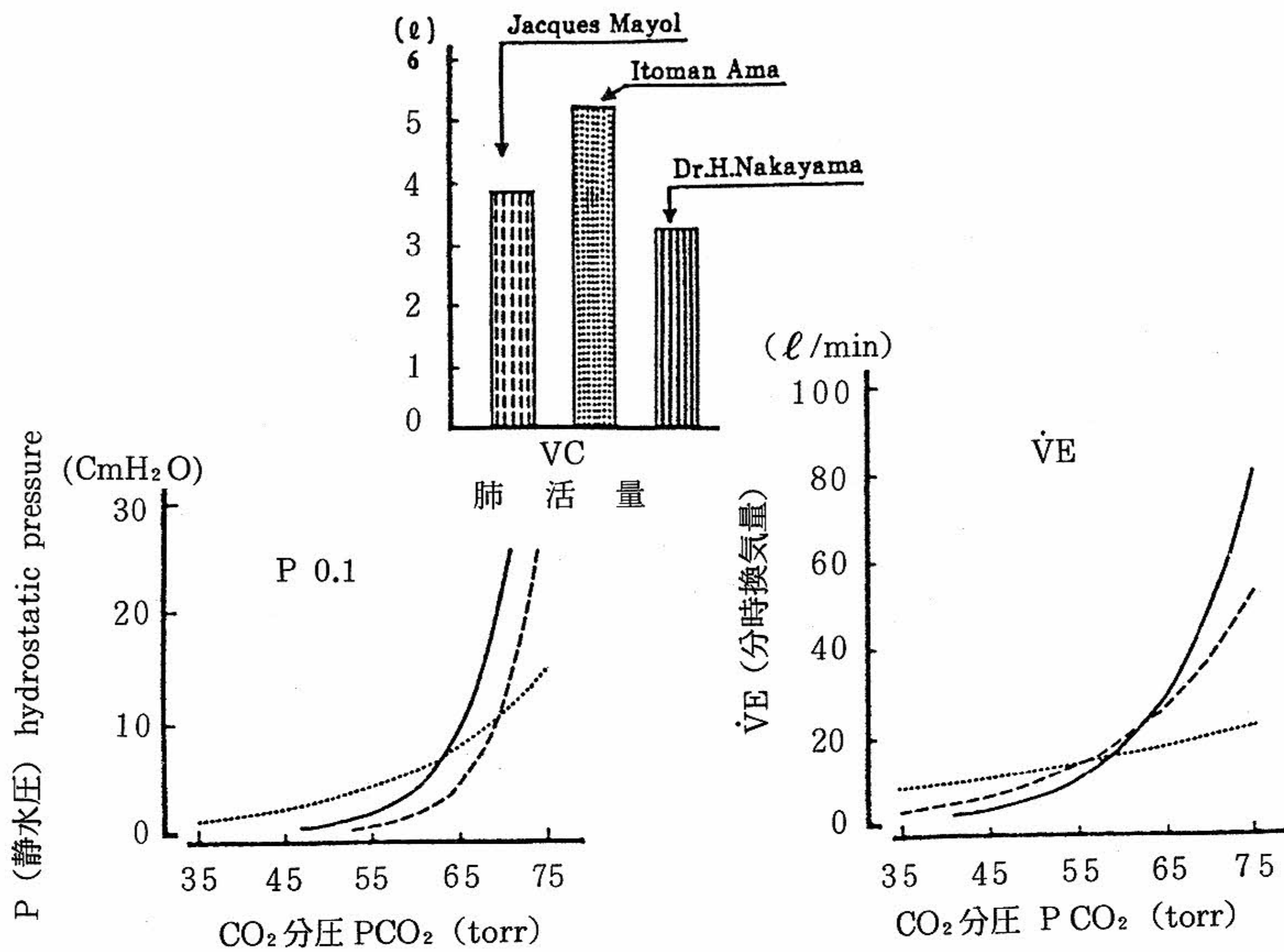
▲-----▲

舩倉の海女 (女) 年令
Hekura Ama (F) (age 48)

心 拍 数 fH(max)	心 拍 数 fH(min)	閉 息 時 間 breath-hold time
125	98	1 min 1 sec

図2 最大閉息潜水（水中最大）における心拍数の変化

Time course of modification in heart frequency during maximum breath-holding dive in three divers (lines) and their vital capacities at the surface (histographes)



被験者	性別	年齢
ジャック・マイヨール	男	(age 55)
Jacques Mayol	(M)	
奄美大島の海士	男	(age 50)
Itoman Ama	(M)	
中山英明	男	(age 51)
Dr.H.Nakayama	(M)	

図3 CO₂ の感受性試験

CO₂ sensitivity, vital capacity and ventilation volume/min of Mayol, Japanese Ama and ordinary Japanese (diving doctor)

と同様な心電図の波形を得ることができた。また、海水中あるいは淡水中においても、電極装着後約3時間の計測をすることができた。これは、サージカルテープのすぐれた防水性による所が大であり、体内からの発汗に対してもサージカルテープが離脱することなく計測に支障はきたさなかった。計測中、有線方式を採用したことにより、ダイバーの行動に支障をきたしたが、反面、計測上、水面や水中での心電図の記録が連続してできたことが大きな成果といえる。今後は、無線方式でダイバーが自由に水中で活動している時の心電図が計測できるよう、計測機器の開発が必要である。本実験で用いた心電計の計測方法は、正常に作動し、再現性も確認した。以上の結果から、本実験で得られた成果は、十分信頼できるものと思われる。

2) 閉息潜水における心拍数の変化

閉息潜水をした場合に徐脈がおこることは、すべての研究者が認めているところであり、J. Mayol や海士の場合も例外ではない。呼吸停止の際に、心拍数が減少することは、carotid sinus reflexあるいはdiving reflex (oxygen conserving reflex) ないし crib death (新生児が枕の中で首を回して死亡すること) など一連の反射によるものとされているが、潜水中の徐脈とその程度が異なることは、中山¹⁾が海女の潜水中の心電図変化に関する研究において明らかにしており、その成績は、Olsen²⁾ S, Irving³⁾, Craig⁴⁾, Hong⁵⁾らと同様であった。本実験結果からも彼らの実験結果を裏づける所見が得られた。

呼吸停止中の胸腔内圧と潜水中のそれとは異なるのが当然であるが、Valsalva法を行っている時に循環動態に変化を与えている胸腔内圧とは意味が異なる。海女の場合は、体外圧が異なるので、胸腔内圧と体外圧との差が重要な因子になると思われるが、胸腔内圧と心拍数の関係を見たCraig⁴⁾の実験でも、この点は不明である。また、加压室内で呼吸を停止させて加压し、圧力的に潜水をシミュレートした実験では徐脈は起らない。中山(1965)¹⁾はこのメカニズムについて次のように考察している。海女の実験からすなわち、圧力の問題は胸腔内圧にしても、体外の圧にしても、海女の潜水中の徐脈には重要な因子ではない。Asphyxiaが潜水中の徐脈に関係していないのである

うことは、多くの点から考えられる。まず、潜水直前に急速に徐脈が起こるが、この時に全身的に著明なasphyxiaが起こっているとは信じられない。また、陸上における呼吸停止時にも徐脈は起こらないし、潜水の終りに近いほど徐脈になるわけでもない。徐脈発現のためには、顔を水につけること、呼吸を停止することという、二つの条件が必要であり、いずれか一方では、潜水中にみられる著明な徐脈は発現しない。海女が潜水中におかれている状態は、迷走神経刺激状態であり、この影響が最も大きく心電図に表われるのである。J. Mayolの心拍数には、舢倉の海女、奄美の海士に比較して顕著な徐脈($f_H=34$ bpm)がみられ、従来の知見よりもさらに徐脈の程度が高進した。このことは、潜水哺乳動物の徐脈と非常によく似た生理的な機序を持つものと推察される。今後さらに、より深く研究を進め、この生理的機序についての解明を行いたい。

3) CO₂の感受性

海女には、休漁期においてもCO₂の感受性が一般の人より低いという慢性適応が固定したベースとしてあり、その上に、作業期には、比較的速やかに成立して速やかに消失する、感受性低下という短期の亜急性の適応が加わると小林⁶⁾(1975)が示している。

閉息潜水のときの息苦しさが主にCO₂の増加によるものならば、深度101mに閉息潜水したJ. Mayolや閉息潜水を職業としている海士においては、CO₂に対する感受性が低くなっているのではないかと推察される。日本の海士においては、従来の知見と同様なCO₂感受性検査(P_{0.1}あるいは換気量)の所見によれば、CO₂に対して明らかに感受性は低下していることが示された。反面、J. Mayolにおいては、一般の日本人と同様な検査所見が得られた。J. Mayolの閉息潜水中のCO₂感受性は、どのような機序を取っているのか本実験では明らかにならなかった。今後この面についてもさらに検討を加えて行きたい。

5. まとめ

深度101mという閉息潜水(素潜り)世界一の前人未踏の記録を達成したJ. Mayolと日本の第一線で活躍している海士の生理計測を実施し、次

のような結果を得た。

(1) 実海域での、有線による水中心電図の計測技術を確立できた。

(2) 閉息潜水中、潜水哺乳類（イルカ、アシカ、アザラシ等）にみられると同様な潜水徐脈が出現した。

(3) J. Mayol は、日本の海士と比較して最大閉息潜水時間がほぼ2倍の長い記録を作った。

(4) J. Mayol の CO_2 の感受性や肺機能は、一般人と比較して大きな変化はみられなかった。反面、日本の海士は、 CO_2 の感受性は低かった。

(5) J. Mayol は、潜水前にヨガ法による呼吸調整を行うという特徴を示した。

以上の実験結果から、J. Mayol の生理的な検査所見からは日本の海士と比較してどうして長く、深い閉息潜水ができるのか、この生理的機序の疑問について解明することができなかった。この解明は、J. Mayol を被験者としてさらに多面的な研究を進めることによって、徐々に明らかになって行くものと思われる。特に実験中われわれの興味をひいたことは、潜水前に必ずヨガによる呼吸調整を20～30分間行い、その後に閉息潜水を行うということである。このヨガについては、現時点で閉息潜水とヨガの間にどのような関連性があるのか不明である。われわれとしても興味ある研究課題でもあり、その中で特に、ヨガによる精神統一が大きく閉息潜水に関与するのか、あるいはヨガの呼吸法が大きく関与するのか、今後の研究に待ちたい。J. Mayol の開拓した深度101mという閉息潜水の技術に対して、一般の人々が利用するための科学的な研究の第一歩が踏み出されたこ

とは、特筆してよい。さらにこれらの生理的メカニズムが判明することによって、われわれも近い将来、J. Mayol と同様に深度101mという閉息潜水を手中にすることができ、水中活動に新たな展開が期待されることになるだろう。

文 献

- 1) 中山英明, 1966, “潜水中の海女の心電図変化に関する研究”, 日本内科学会雑誌 55 (7), 20-30
- 2) Olsen, C. R., et al, 1962, “Some Effects of Breath Holding and Apneic Underwater Diving on Cardiac Rhythm in Man”, Jour. Appl. Physiol. 17 (3), 461-466
- 3) Irving, L., 1963, “Bradycardia in Human Divers”, Jour. Appl. Physiol. 18 (3), 439-491
- 4) Craig, A. B. Jr., 1963, “Heart Rate Responses to Apneic Underwater Diving and to Breath Holding in Man”, Jour. Appl. Physiol., 18 (5), 854-862
- 5) 小林庄一, “人と潜水”, (1975), 38-58, 共立出版
- 6) ベリー, P. “潜水学”, 関 邦博訳, (1982), 153-158, マリン企画
- 7) Linnarsson, D. and C. M. Hesser, “Effect of Hyperbaric Nitrogen on Central Respiratory Response to CO_2 ”, (Underwater Physiology VI), (1978), 139-144 FASEB