

呼吸モニタリングシステムの開発

岡本 峰雄*¹ 山口 仁士*¹
出村 憲二*² 毛利 元彦*³

潜水作業時の疲労の原因となる負荷のうち、重要かつ解決を要する問題は、呼吸器に起因するものと考えている。そこで、ヒトが呼吸器を用いて呼吸することによる負荷の定量的な把握、呼吸状態の変化による呼吸器による負荷の定量的な把握、呼吸器による負荷を生じているハード上の諸問題の解明、そして呼吸器の負荷軽減策等について系統的かつ総合的な研究を行う必要がある。そこで、呼吸器に起因する疲労を定量的に計測する装置の開発、さらには呼吸器の性能を種々の条件下で評価できる試験装置の開発により、呼吸器に係わる諸問題の解明に取り組むこととした。第一段階として、高圧状態で呼吸するダイバーの「呼吸ガス循環サイクル」の動態と基本的な生体情報をリアルタイムで計測監視し、事後に詳細な解析を行うことができる呼吸モニタリング装置を開発した。本稿では、装置の概念、構成と計測内容、試験段階で得られた予備的なデータについて報告する。

キーワード：呼吸，潜水器，P-Vカーブ，呼吸ガス，呼吸抵抗

Development of an Underwater Respiratory Monitoring System

Mineo OKAMOTO*⁴ Hitoshi YAMAGUCHI*⁴
Kenji DEMURA*⁵ Motohiko MOHRI*⁴

Accompanying the rise of a diver's physiological load, the oxygen uptake, respiratory minute volume and tidal volume rise almost simultaneously. The performance of an underwater breathing apparatus (UBA), therefore, may be the major restraining factor of underwater activity, and moreover it may be fair to say that the underwater performance would be limited by the UBA employed.

Otherwise, in accordance with the rise of diving depth, greater gas density also causes the diver to have respiratory problems. The bigger volume, weight and less maneuverability of the UBA also cause an underwater initial load.

Thus, a diver equipped with an UBA has to do the work for the UBA first to ensure his

-
- * 1 海域開発・利用研究部第4研究グループ
 - * 2 日本酸素株式会社
 - * 3 海域開発・利用研究部第5研究グループ
 - * 4 Coastal Research Department
 - * 5 Nippon Sanso Co.

breathing, and next can do the work of mission. This means the less load by an UBA would be directly connected to greater performance and safety underwater.

From the standpoint of designing and evaluating an UBA, however, there are few reliable and reasonable physiological data. Consequently, the existing UBA have different performances for each.

NPD's guideline is the latest and the most progressive, comprehensive basis for the evaluation of UBA. But it also contains unclear quantification.

Considering the above, JAMSTEC has developed an "Underwater Respiratory Monitoring System" to measure the degree of respiratory load caused by an UBA as the first step of underwater environmental control. This system has real-time measuring, displaying and recording functions for the diver's respiration with an UBA under hyperbaric dry and wet environments. A batch detailed analysis with accurate calibration is also possible.

In this paper, system components, measuring items and the data acquired through the manned hyperbaric simulation test are presented.

Key Words : Breathing apparatus, Respiratory monitoring, P-V Loop, Breathing resistance

1 はじめに

高圧環境下での人間は、その圧力に応じ、大気圧空気環境とは異なる密度や組成のガスを呼吸することになる。空気潜水の場合、水深10mで約2気圧、30mで約4気圧の空気を呼吸するが、それに応じて呼吸ガス密度も、大気圧空気の約2倍、4倍となる。このため大気圧下では無意識に行っている呼吸も、潜水シミュレータでドライ状態で圧力を上昇させた場合に経験できるように、深度増加に伴って次第に意図的な努力を要するものとなってくる。これは空気の密度や粘性が増加するために、ヒトの気道を通すための流体抵抗が増すことによる。

さらに海中で呼吸を行う場合、例えば、海中でスクーバを装備して海中活動を行う状態においては、前述の呼吸抵抗の増加に加え、潜水呼吸器を用いることによる呼吸抵抗の増加、機械的な換気流量の制限からくる作業負荷の増大、その他各種の負荷がかかることになる。

潜水作業は陸上の作業に比較すると疲労が激しいが、その原因として、皮膚からの体熱損失が大きいこと、潜水衣の拘束により活動の自由が制限されること、重くかさ張る潜水呼吸装置を装備して揺れる海面上の船に乗り降りすることが困難であること、さらに呼吸器を用いて呼吸することによる負荷が大きい等があげられる。

筆者らは、これら潜水時に疲労の原因となる負荷のうち、基本的に重要かつ解決を要する問題は、呼吸器に起因するものであると考えている。この問題を解決するためには、ヒトが呼吸器を用いて呼吸することによる負荷の定量的な把握、呼吸状態の変化による呼吸器による負

荷の定量的な把握、そして呼吸器による負荷を生じているハード上の諸問題の解明、そして呼吸器の負荷軽減策等について系統的かつ総合的な研究を行う必要がある。そこで、潜水呼吸器に起因する疲労を定量的に計測する装置の開発、さらには潜水呼吸器の性能を種々の条件下で評価できる試験装置の開発により、上記の諸問題の解明に取り組むこととした。そして第一段階として、高圧状態で呼吸するダイバーの「呼吸ガス循環サイクル」の動態と基本的な生体情報をリアルタイムで計測監視し、事後に詳細な解析を行うことができる呼吸モニタリング装置を開発した。

本稿では、呼吸モニタリング装置の概念、構成と計測内容、そして試験段階で得られた予備的なデータについて報告する。

2 呼吸の基本概念と呼吸器の評価

人間が水中（もしくは高圧ドライ環境）に入るには、素潜りやスクーバダイビングのように人体（ダイバー）が環境の圧力を受けて潜水する方式と、潜水艇や潜水艦のように耐圧殻に入って大気圧のまま潜水する方式との2種類がある。本稿で扱うのは、前者の、環境圧力を受ける潜水（以下、潜水とよぶ）を行う際の呼吸に関連した分野である。

(1) 潜水呼吸装置と呼吸

潜水時の呼吸は、深度面では水面（大気圧）から水深700m以上までに及び、呼吸ガスは深度に応じて酸素、

空気、窒素・酸素、ヘリウム・酸素、ヘリウム・水素・酸素へと変化する。

潜水呼吸装置（ドライ環境用呼吸装置を含む）は、Fig. 1に示したように、ガス源、ヒトの呼吸部である呼吸空間そしてガス排気部その他を含むシステムであり、使用深度と目的に応じ、簡便な空気式スクーバから大型の船上精製式閉鎖回路型潜水呼吸装置まで多くの種類がある。この図に沿って呼吸装置の各部の働きと技術的な問題点とをまとめると次のようである。

① ガス源

ダイバーは呼吸時に環境と同一圧力のガスを呼吸する。このため潜水深度の増大とともに同一容積、圧力のガスボトルで呼吸可能な時間は減少する。呼吸ガス源をダイバーが携帯する自給気式潜水器（スクーバ）の場合、大深度かつ長時間の作業を行うためには、 $200\text{kgf}/\text{cm}^2\text{G}$ の充填が可能な大型ボンベ（ 14ℓ ）2本組を用いる等の大型化で対処するが、ダイバーが運搬可能な容積と重量には限界があり、また作業性にも影響する。

このため、軟式ヘルメットを用いた浅い所での長時間潜水やヘリウム・酸素を用いた大深度潜水では、呼吸ガスを海上の船から直接またはダイビングベル経由でダイバーに送る他給気方式が主流となる。

② ガス圧力の深度対応補正

高圧ガスを、ダイバーの呼吸空間の前段で、環境圧力より $1\sim 20\text{kgf}/\text{cm}^2\text{G}$ 高めに調整するための減圧装置である。呼吸器によって設定圧力は異なり、ドライ環境用の呼吸マスク（OBS, BIBS）では環境圧 $+1\text{kgf}/\text{cm}^2\text{G}$ 、空気式スクーバのレギュレータでは $+8\sim 10\text{kgf}/\text{cm}^2\text{G}$ 、深海潜水用ハードハットのレギュレータ（GSOL, Ultraflow 500）では $+12$

$\sim 20\text{kgf}/\text{cm}^2\text{G}$ 等種々であり、しかもそれをダイバーの深度変化に追従させることが必要である。

③ 吸気流量調整

ダイバーが吸う直前のガス流量を制御する部分である。深度対応補正されたガスをさらに環境圧まで減圧してダイバーの口元に供給する。ダイバーの給気差圧（ $-1\text{cm}\sim -15\text{cmH}_2\text{O}$ ）を検知して必要なガスを供給するデマンド方式と、常時多めのガスを流すフリーフロー方式とがある。ヘルメット以外ではデマンド方式が用いられるが、小さな呼吸差圧を検知して十分なガスを供給するメカニズムが最大の技術課題である。

④ 呼吸空間

ダイバーは、通常の呼吸のように自由空間でガスを呼吸するのは異なり、狭い空間内で呼吸を行う。その容積は、大きな軟式ヘルメットでも約 10ℓ 程度、全面マスクやハードハット等では数 ℓ 以下と狭い。フリーフロー方式の軟式ヘルメットでは、海上から低圧コンプレッサーで十分な量の空気を容易に供給できるため、十分な内部換気ができ、呼吸は陸上同様に容易である。デマンド方式ではレギュレータ付きのマウスピースを口にくわえる方式と、全面マスクやハードハットの内部に取り付けた口鼻マスクを被って呼吸する方式（レギュレータのマウスピースに相当する部分に口鼻をカバーする覆いを付けたもの、Photo 1）とが用いられる。デマンド方式は潜水呼吸ガスの消費量の低減とガスの流れに伴う騒音の低下の両面で有利であるが、マウスピース方式では呼吸を口で行う必要があり、また口鼻マスクでは吸気が新たに供給されるガスのみでなく、マスク以外の空間に蓄積された呼気（高濃度の CO_2 を含む）

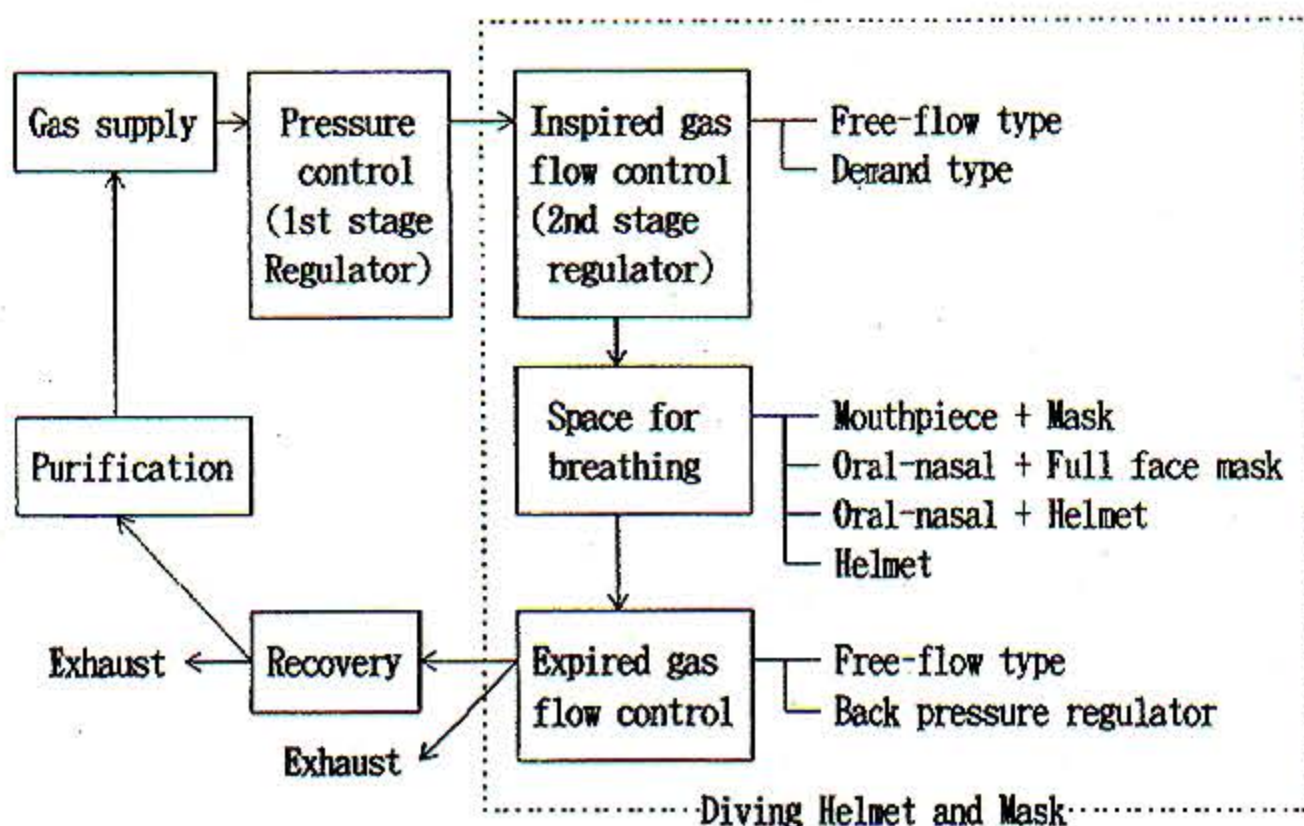


図1 潜水呼吸装置の構成要素
Fig. 1 Components of a breathing equipment



写真1 ハードハット内の口鼻マスク
Photo 1 Oral nasal in a SUPERLITE 17B helmet

の再呼吸を行うことが問題となる。

⑤ 排気流量調整

ダイバーの呼気を呼吸空間から除去する部分である。呼吸ガスを再利用しない場合、呼気は差圧（+数cm \sim 15cmH₂O）を利用して、排気弁を通じて外部に放出される。呼気ガスを回収精製して再利用する場合、排気は排圧制御装置により、排気ホースを経由して船上に導かれる。この際、呼吸空間と排気ホースの間に大きな差圧が生じないように、排圧調整弁を用いて精巧な制御が行われるが、この部分の排気抵抗軽減と安全装置が技術的な問題である。

⑥ 回収精製部

精製装置でCO₂除去とO₂添加による濃度調整が行われた後、ブースターポンプで昇圧してガスボトルに蓄えられる。

以上のように、潜水呼吸装置の全体システムは複雑な構成からなっており、それぞれの部位で十分な安全性と信頼性を保持し、さらにダイバーの呼吸負荷を軽減させるよう配慮している。

この呼吸装置の中でとりわけ重要なのは、ダイバーに直接関わる呼吸空間部とそこへのガスの出入りに関する

装置を装備した呼吸器（スクーバのレギュレータ、全面マスク、ハードハット、ヘルメット等）である。

呼吸器は海中及び特殊環境下での呼吸のために必要不可欠のものである。しかしその性能についての考えかたは種類に応じて異なる。例えば、プロダイバーの用いるハードハット型呼吸器（SUPERLITE 17B, GSOL SF350 SLS 付。Photo 2）では、重作業時の大きく荒い呼吸に対しても低い吸気抵抗で十分なガスを供給する能力が必要で、また呼気も低い排気抵抗で容易に排出される必要がある。しかしSDC/DDC用の非常呼吸器（DUI, Photo 3）の場合、使用目的は環境制御が不能になった場合の生命維持のためであり、安静に近い状態で軽い呼吸にしか用いられない。

呼吸器の狭い空間の中で、環境と同じもしくは僅かに高い圧力のガスを、ダイバーが吸入そして呼出することに呼吸器の性能の全てが集約されている。さらに、呼吸器は小型軽量、低騒音、なおかつ視界が良好であること等の多くの制約がある。また呼吸器が用いられる環境の状態は、圧力、ガス組成、海中または高圧ドライ環境、温度条件、その他様々に変化する。



写真2 ハードハット型呼吸器

Photo 2 Popular diving helmet for commercial use (SUPERLITE 17B, GSOL SF350 SLS 付)

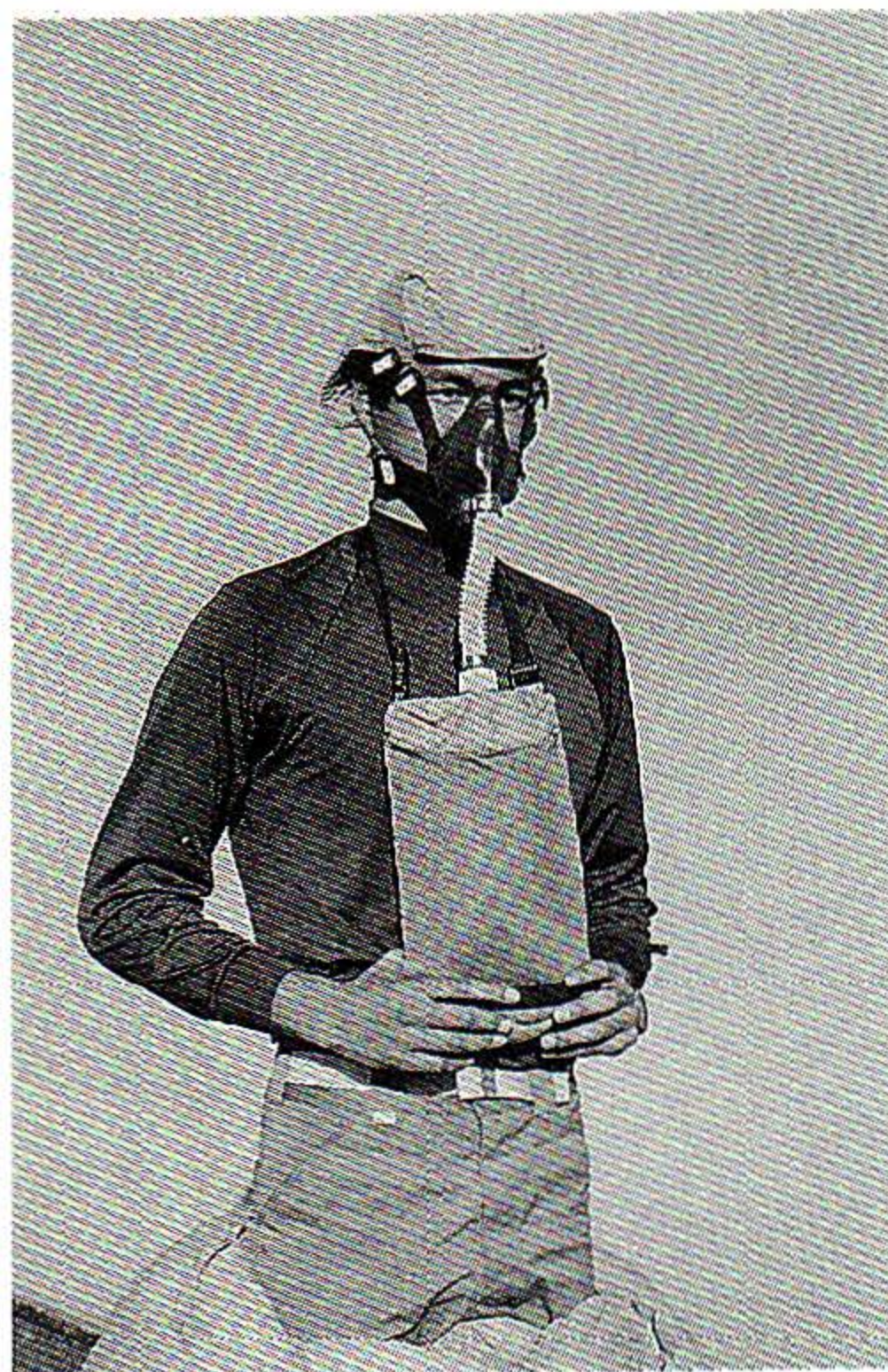


写真3 SDC/DDC用の非常呼吸器

Photo 3 Emergency breathing system for SDC/DDC

(2) 呼吸器の無人性能評価法

呼吸器は、用途によって要求性能は異なるが、ダイバーの側からみると呼吸負荷が極力少ないことが必要である。そこですべての呼吸器について、同一の評価基準を用い、呼吸シミュレータ（人工肺）を用いた無人試験とダイバーによる有人試験とによりその性能を的確に評価することが必要である。

呼吸器に要求する性能やその性能を評価する方法については種々の考えがあったが¹⁻⁵⁾、近年、それらの成果を集大成する形ではば最終的な評価基準⁶⁾が作成された。評価項目は次のようである。(a) 性能、(b) 試験法案、(c)

エルゴノミックス、(d) 騒音（交話装置とも関連して）、(e) 材質、(f) 信頼性、(g) 保守及び衛生管理、(h) 安全検査、(i) 吸排気装置の総合評価、(j) 有人試験、(k) 品質保証、(l) 呼吸ガスの酸素濃度。またこうした評価試験を行うためのテストセンターの試験装置についても細かな規定がある。

ここで、呼吸器の無人作動評価試験を行うには、呼吸シミュレータ（人工肺）を用い、深度別に様々な呼吸数・呼吸量で呼吸器を作動させて各種の計測を行う。評価試験の項目と基準値について主なものを Table 1 に示した。

無人試験は分時換気量 (RMV : Respiratory Minute

表1 NPDによる呼吸器の無人評価基準⁶⁾

Table 1 Summary of guideline for evaluation of breathing apparatus by NPD⁶⁾

Respiratory pressure(ΔP) ± 1.5 kPa (Limit)		
± 2.5 kPa (Maximum)		
Test depth		
With air or corresponding breathing gas	0, 10, 30, 60msw	
With heliox or corresponding breathing gas	0, 50, 100, 200, 300, 400msw	
Respiratory minute volume (RMV) 15.0, 22.5, 40.0, 62.5, 75.0, 90 (ℓ /min)		
(0°C, 101.3kPa, Dry gas)		
Tidal volume		
	RMV (ℓ /min)	Tidal Volume (ℓ) Breathing Rate (/min)
	15.0	1.0 15
	22.5	1.5 15
	40.0	2.0 20
	62.5	2.5 25
	75.0	3.0 25
	90.0	3.0 30
Work of breathing (W) $W (J) = k + (f \cdot RMV)$		
Less than 180msw.	$k=0.5 J/\ell$, $f=0.02$, $RMV = 15-75 \ell/\min$	
Exceeding 180msw.	$k=0.5 J/\ell$, $f=0.04$, $RMV = 15-75 \ell/\min$	
Maximun limit	Less than $5 J/\ell$, $RMV = 75-90 \ell/\min$	
Testing of CO ₂ absorber		
	RMV (ℓ /min)	CO ₂ injection (ℓ /min)
	15.0	0.6
	22.5	0.9
	40.0	1.6
	62.5	2.5
	75.0	3.0
	90.0	3.6
Maximun carbon dioxide content of inspired gas		less than 1 kPa limit 2 kPa

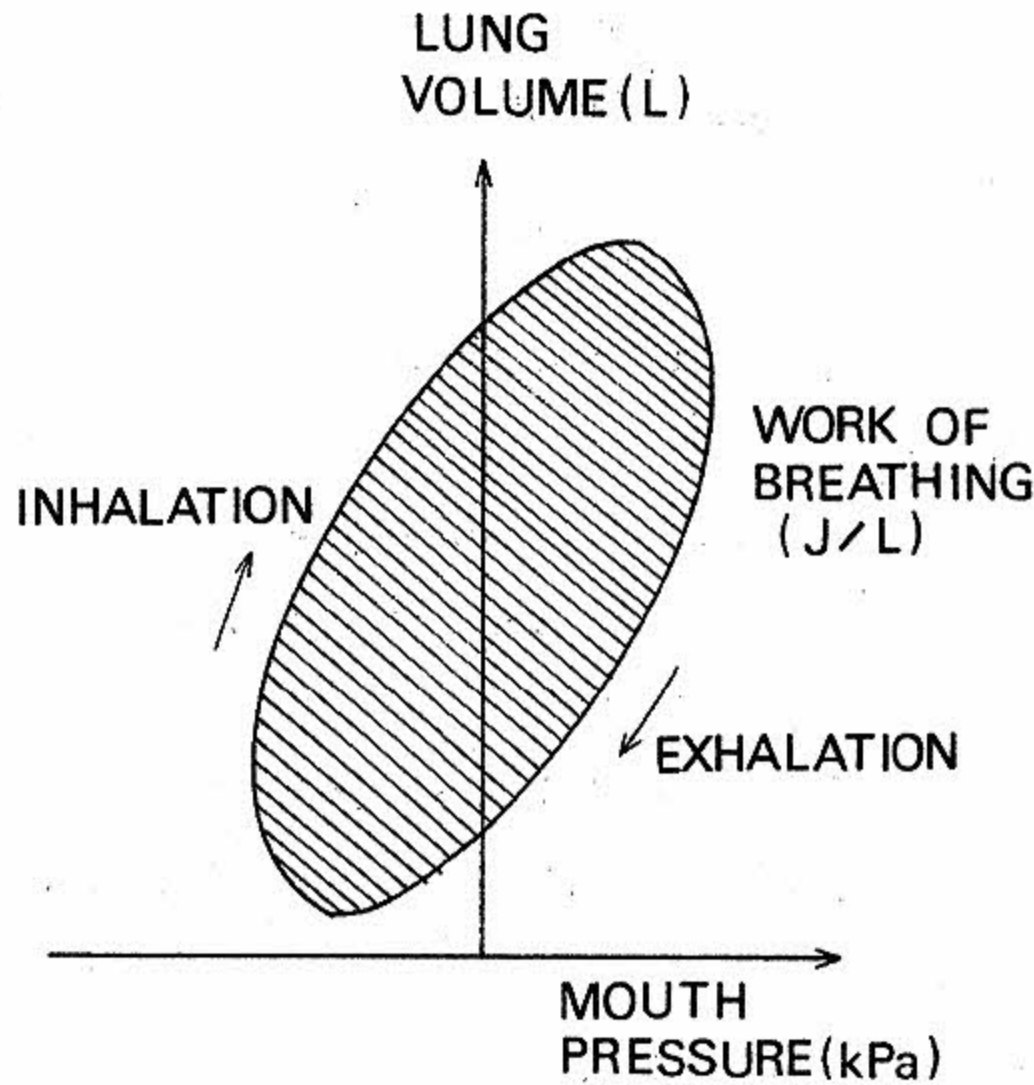


図2 呼吸仕事量の定義 (P-Vループ)
Fig. 2 Definition of work of breathing measured from Pressure-volume-loop

Volume, 単位 l/min) について $15l$ (一回呼出量 $1l$, 呼吸数 $15回/min$) から $90l$ (一回呼出量 $3l$, 呼吸数 $30回/min$) までを行う。この際、呼吸抵抗の最大値は $\pm 1.5kPa$ 以下 ($\pm 15cm \cdot H_2O$)、限界値が $\pm 2.5kPa$ ($\pm 25cm \cdot H_2O$) 以下となっている。また一回の呼吸での P-Vループから求めた呼吸仕事量 (W: Work of breathing, 単位 $Joule/l$, Fig. 2) について、分時換気量 $75-90.0l/min$ において最大値が $5J/l$ 以下とし、それより軽い $15-75l/min$ の間については、 $180m$ を境に 2 種の上限值を定めている。また半閉式や閉式の呼吸器や呼吸装置のように CO_2 の吸収装置を有するものについては、 $4kPa$ の炭酸ガス分圧のガスで試験するよう規定している。

(3) 潜水呼吸器の有人評価

呼吸器の有人試験での評価について特別な規定は無く、必要に応じて各種の手法で行われている。最も簡便な方法はダイバーに対してのアンケートであり⁹⁾、内容は、呼吸器の装着感、操作性、呼吸抵抗の適切性等である。

また潜水シミュレータのドライチェンバーやウェットチェンバーでは、潜水作業中のダイバーについて呼吸動態と心拍数のモニタリングが行われ、呼吸器の有人評価の基礎データとなっている⁹⁾。呼吸動態については、インピーダンスメータから求めた肺容積の変化に基づく呼吸量、口腔での呼吸差圧、吸気と呼気の酸素及び炭酸ガス濃度が計測される。しかしこの方法でも、ダイバーに定量化された負荷を与えることが難しいため、呼吸器の

評価については相対的な指標を示すのみである。この計測における技術的な問題点は肺容積の計測であり、インピーダンス方式では原理的に 1~2 割の誤差を生じるため、データの信頼性は低い。

実海域においては、ダイバーが呼吸器を装備した状態での計測自体が困難なため、限られた内容の計測しかできず、無人試験のような精緻なデータを得ることはできない。またプールや潜水シミュレータにおける潜水であればダイバーの呼吸動態の計測が比較的容易であるが、その際の主たる研究課題は、深度変化によるダイバーの作業能力の変化等の生理学分野であり、その一環として呼吸代謝の計測が行われるのが一般的である。この場合の計測目的は呼吸器の性能に着目したのではなく、ダイバーの生理学的な状況監視が主体となり、リアルタイムでの計測はあまり重視されない。

(4) 呼吸器に関連した試験評価法のまとめ

呼吸器の評価の方法については、前項までに述べたように、①呼吸シミュレータを用いて種々の深度、ガス組成、呼吸条件において呼吸器の限界性能まで計測する方法、②ダイバーの使用感から呼吸器の性能を評価する方法、の 2 種類のあることがわかる。一方、③潜水時のダイバーの安全監視等の面から呼吸動態等のモニタリングを行うという立場もある。

こうした従来からの呼吸器の評価に関わる技術的な手法についてまとめると、呼吸器の無人評価は可能であるが、ダイバーが呼吸している状態でその性能を評価するのは困難であることがわかる。従って、今後の課題としては、有人・無人状態で呼吸器とそれを使用しているダイバーの生体情報を的確に計測し、その結果から、呼吸器で呼吸していること自体によるダイバーの疲労についても考慮しながら呼吸器の評価を総合的に行うことが重要と考える。

3 呼吸モニタリング装置の開発

呼吸器使用によるダイバーの疲労に関する研究の第一段階として、平成 4~5 年度の 2 年間にわたって呼吸モニタリング装置を開発した。

呼吸モニタリング装置は、プールまたは潜水シミュレータで潜水しているダイバーの呼吸動態・身体の状態および周囲環境について監視と計測を行うものである。ダイバーが呼吸器を装備して呼吸している時には、呼気流量及び吸気流量、呼吸抵抗、呼吸代謝及び呼吸のためにダイバーの要した仕事量、心拍数及び体温、環境温湿度等

をリアルタイムで計測・表示することでダイバーの疲労状態の判断に役立てることができる。また2分単位（最大約5分）で全データをハードディスクに保存し、後日、各センサーの校正値での修正や諸分析機器のタイムラグ補正等の処理をして詳細な解析を行うことができる。

(1) 呼吸モニタリング装置の構成

潜水シミュレータに呼吸モニタリング装置を装備した状態でのシステム全体のブロック図を Fig. 3 に示した。また監視及び解析項目を Table 2, 構成機器の概要を Table 3 に示した。

装置はチェンバー内機器 (Photo 4), チェンバー外機器 (Photo 5), 及びその間を結ぶ信号・電源線とガスサンプリング管とに大別される。チェンバー内機器は、ダイバーに取り付けるもの、呼吸器に取り付けるもの、環境条件の計測に用いるもの、及びそれらの信号中継ボッ

クスからなり、内部コネクタでチェンバー外と結ばれる。ダイバーの生体情報として皮膚温度3点、直腸温度1点及び心拍数(3点式)を計測する。呼吸関連情報としては、呼吸器の吸気側と排気側にはそれぞれ流量計測ユニットを接続する。これには耐圧容器に封入したラミネーター型流量計と差圧トランスデューサ、また呼気・吸気温度測定用の温度センサーが取り付けられている。また呼吸器には、口鼻マスクの内部に、差圧計測用とガスサンプリング用の2本のチューブを取り付ける。周囲環境の計測用として、環境温度、チェンバー壁音度、輻射温度、湿度を計測する。

チェンバー外機器は、チェンバー外コネクタを介して接続される。各種計測センサーのアンプ類や計測器本体、また外部に導かれたガスの分析装置から構成される。またすべての計測値は監視用コンピュータと解析用コンピュータに入力される。

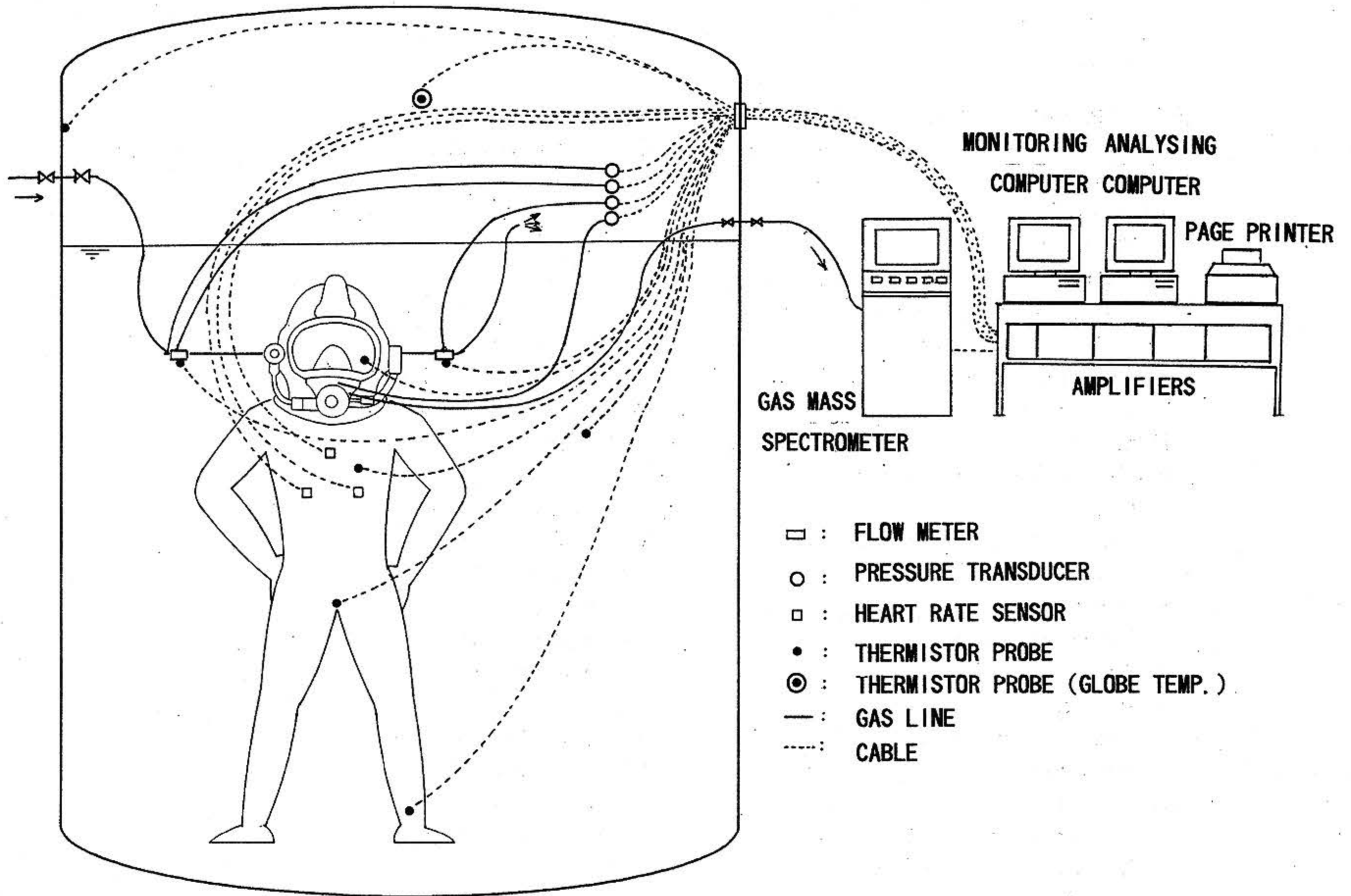


図3 呼吸モニタリング装置ブロック図

Fig. 3 Block diagram of respiratory monitoring system attached diving simulator

表2 呼吸モニタリング装置による監視及び解析項目

Table 2 Respiratory Monitoring System - Monitoring and analyse items

Parameters measured and monitored on CRT

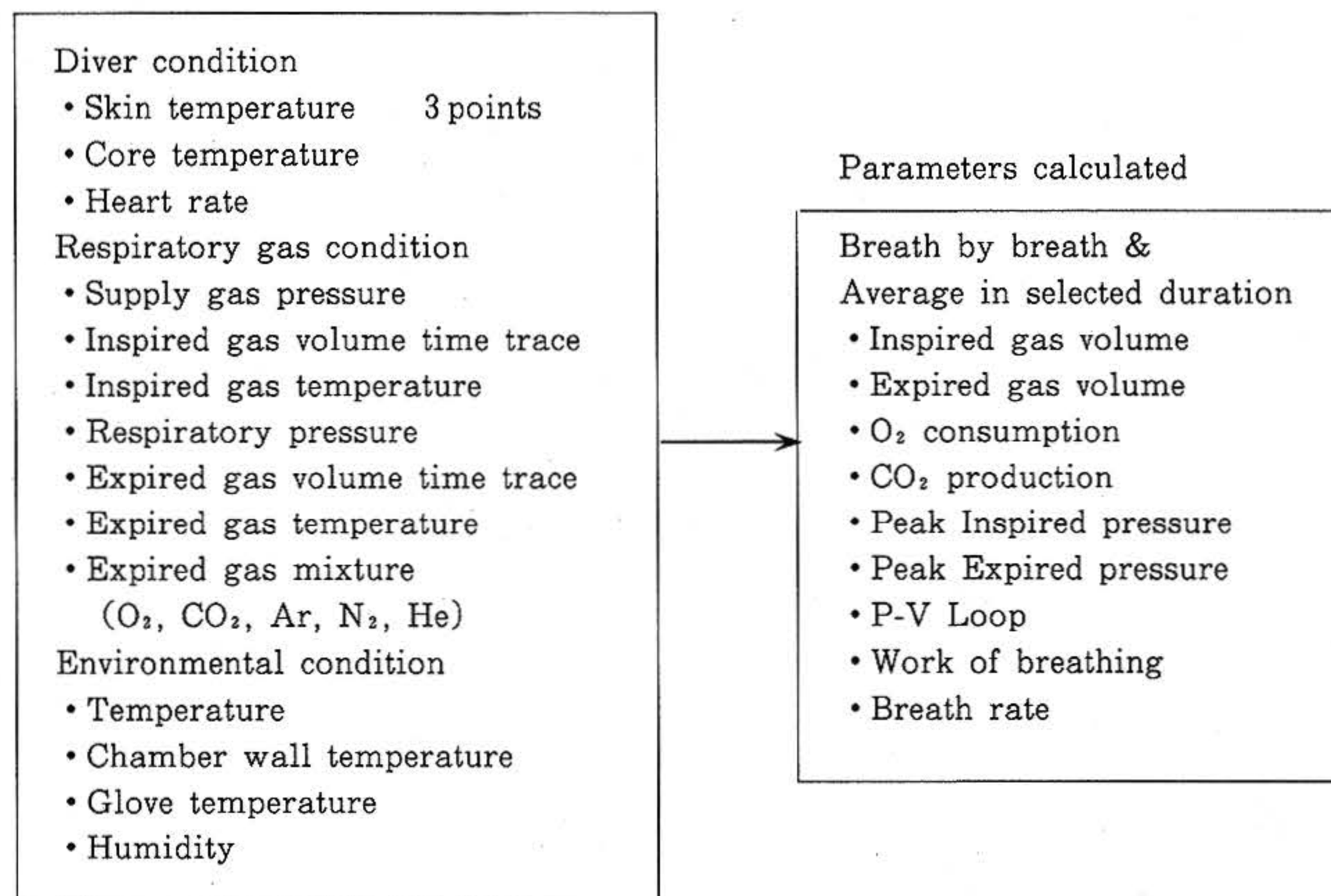


表3 呼吸モニタリング装置の構成機器

Table 3 Monitoring and recording equipment of respiratory monitoring system

Temperature	
Thermistor	
Skin, Environment, Chamber wall	Technol seven SZL-64
Inspired & Expired gas, Glove	Technol seven PAX-16
Core	Technol seven SZL-67
Amplifier	Technol seven E642-3ZZ1-G
A/D board	Technol seven X642-1
Humidity	VAISALA HMD-20YB
Inspired & Expired gas volume	
Flow meter	Dynascience laminar flow meter 529
Differential pressure transducer	Validyne DP15-20
Amplifier	Validyne MS1001
Supply gas pressure	
Pressure transducer	Validyne DP14-54
Amplifier	Validyne MS1001
Heart rate	
Heart rate meter	Nihon kouden AT-601G
Amplifier	Nihon kouden AC-601G
Gas concentration	
Gas mass spectrometer	Westron WSMR-1400
Respiratory gas monitor	Nichiden-Sanei 1H26
Computer	
Monitoring	NEC PC9801BX/U6
Analyze	NEC PC9801BX/U6
Printer	NEC PCPR1000/4

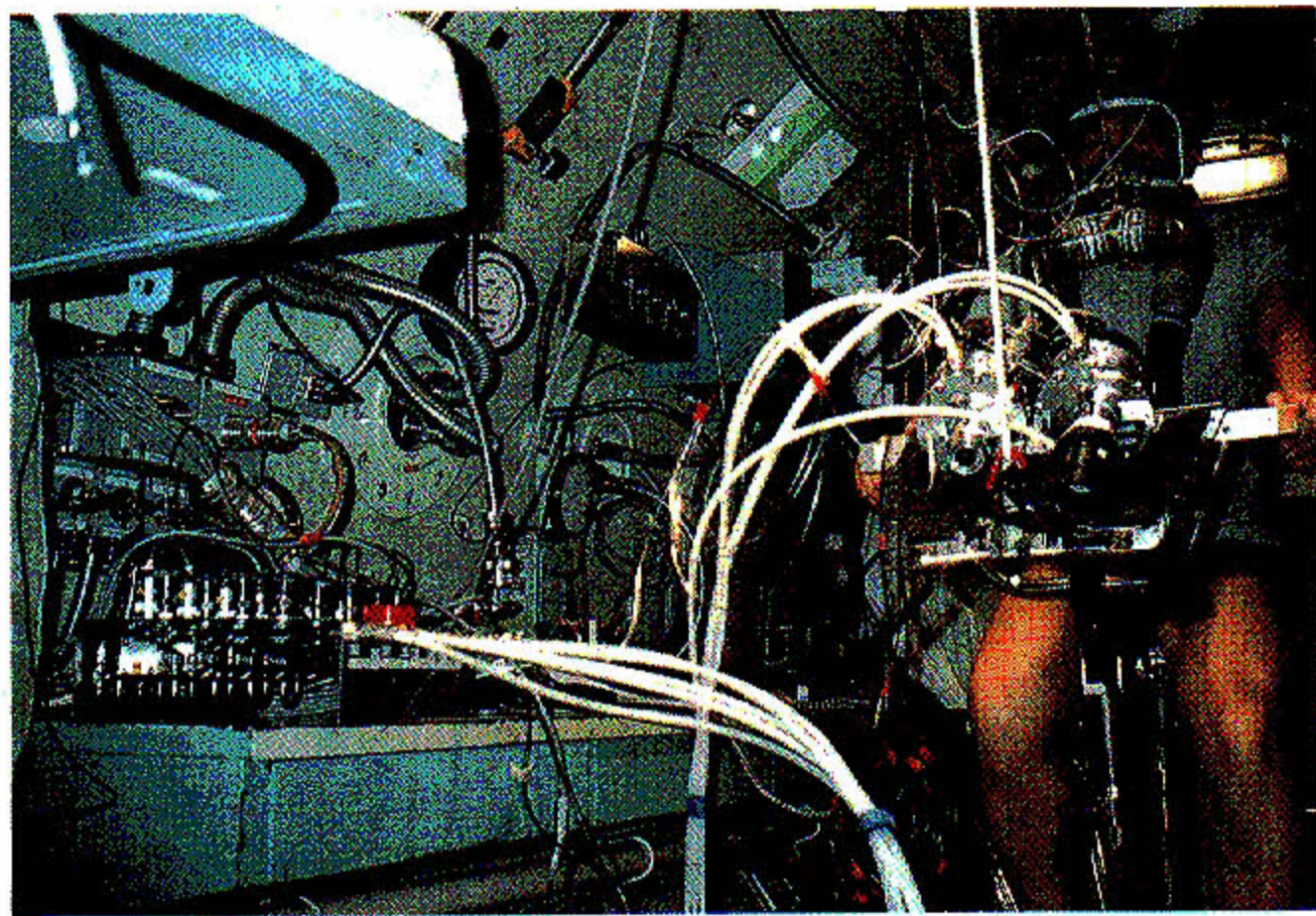


写真4 潜水シミュレータ内でのドライ計測状況
左：圧力センサー箱，右下：呼吸気流量計測装置

Photo 4 Respiratory monitoring system inside dry chamber of diving simulator Left: Pressure transducers, Right: Flow meters for inspired & expired gas



写真5 呼吸モニタリング装置のチェンバー外機器
左：高圧状態の呼吸ガス分析用質量分析計
右上：監視用及び解析用コンピュータ
右下：心拍計，圧力変換器，大気圧用呼吸ガス分析計，
温湿度用アンプ

Photo 5 Respiratory monitoring system outside diving simulator
Left: Gass mass spectrometer for hyperbaric condition,
Right-upper: Monitoring and analyzing computers
Right-down: Heart rate monitor, Amplifier for pressure transducer,
Respiratory gas monitor for one atmosphere, Heart rate meter,
Amplifier for temperature and humidity.

(2) 呼吸モニタリング装置の運用

呼吸モニタリング装置は、ダイバーの監視と、事後の呼吸動態の解析という2種の機能を有している。データの取得と解析の流れを Fig. 4 に示し、以下にその概要を述べる。

① キャリブレーション

計測前に通常行うキャリブレーションは3種類である。チェンバー外部では標準ガスを用いてのガス分析計の校正を行い、内部では、アクリル製ピストンを用いての呼吸流量計の校正 (Photo 6)、水柱マノメータを用いての差圧計の校正 (Photo 7)を行う。

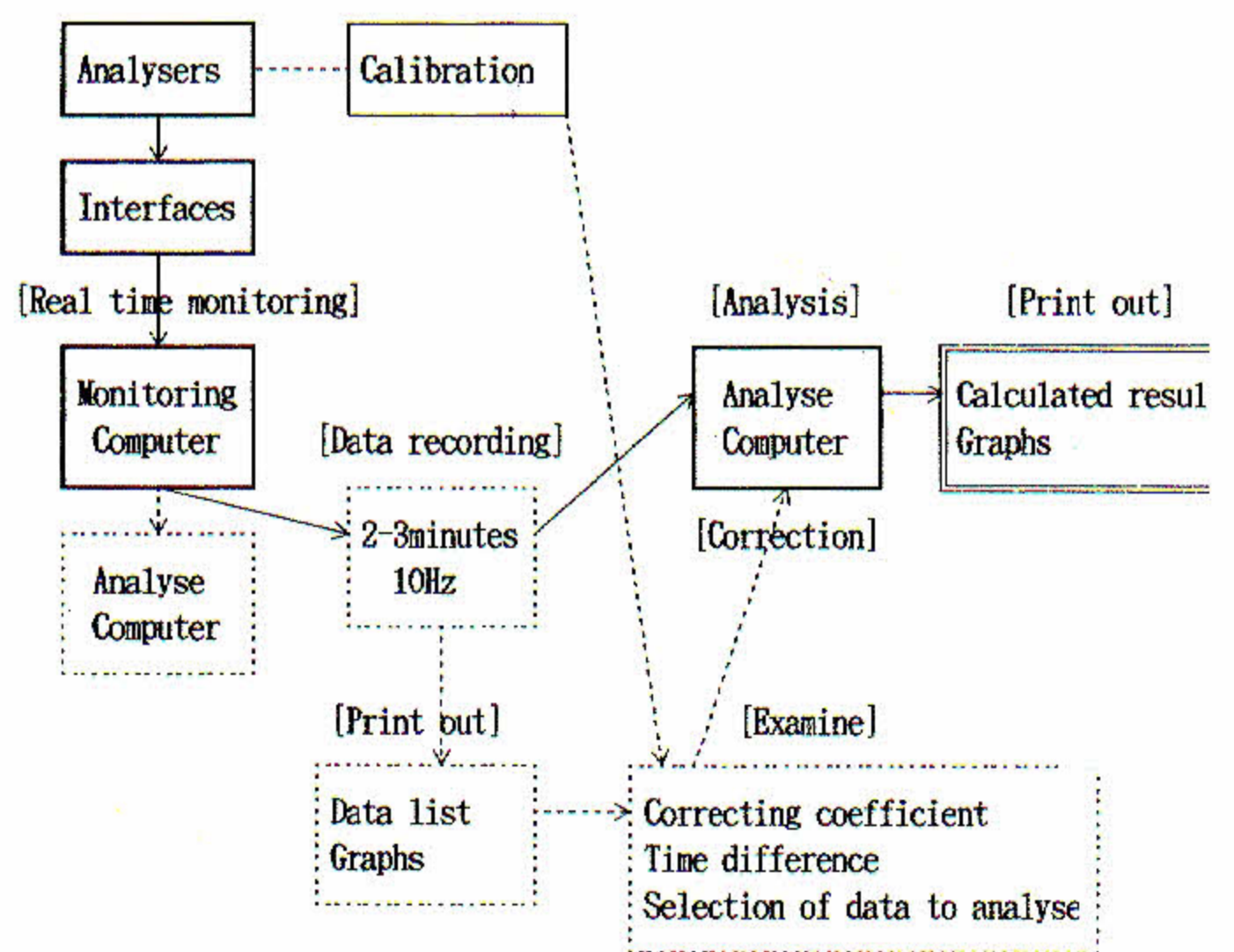


図4 呼吸モニタリング装置・呼吸関連情報のデータ処理フロー
Fig. 4 Data processing diagram of respiratory gas condition

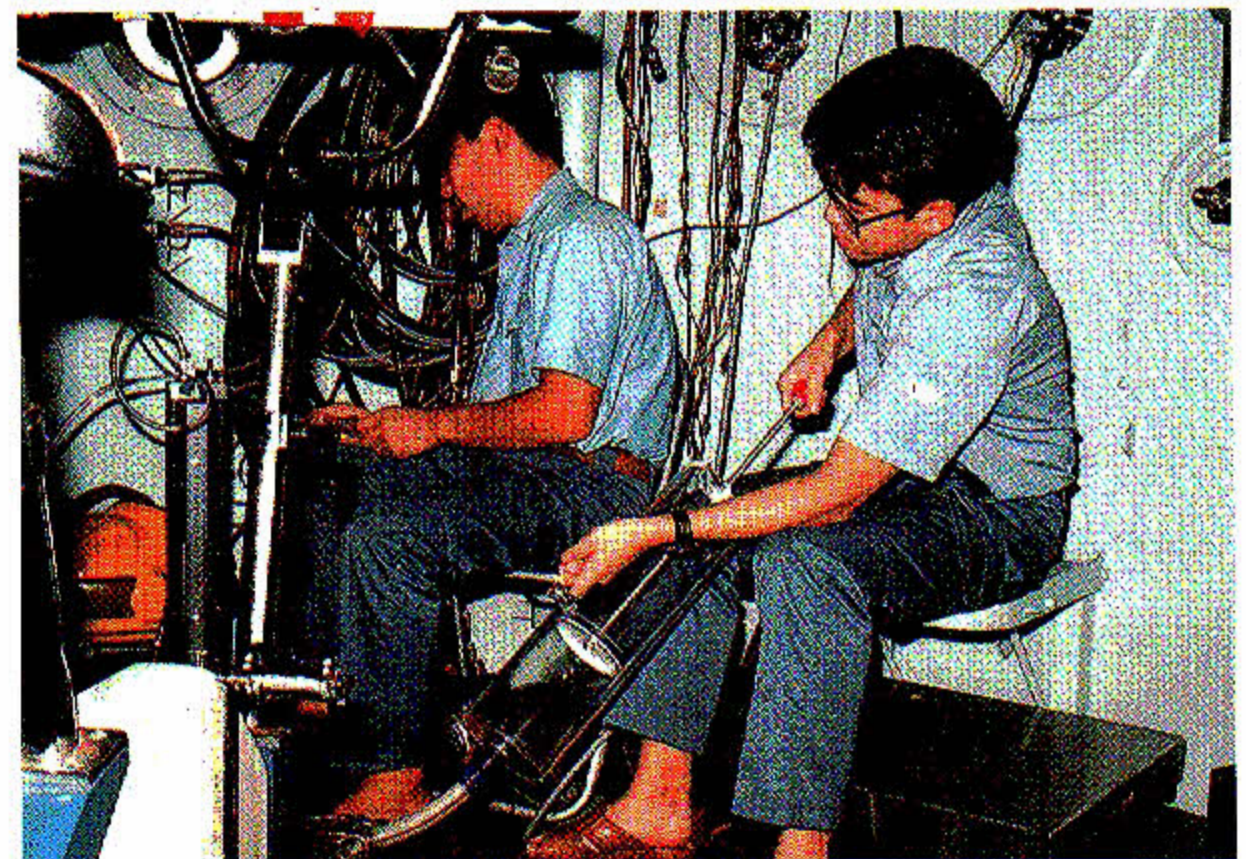


写真6 ピストンを用いた呼吸気流量計の校正
Photo 6 Calibration of flow meters for inspired & expired gas



写真7 水柱マンメータを用いた差圧計の校正
Photo 7 Calibration of difference pressure transducers

② 監視モード

監視モードの画面は Fig. 5 に示した様に、4種に分割表示される。酸素・炭酸ガス濃度、呼気流量・吸気流量・口腔差圧、心拍数、の3種は2分間のスケールで経時的に表示される。それ以外のダイバーの温度や環境の温湿度等は刻々と表示される。この状態では表示のみでデータの保存はされないため、呼吸装置の安全監視やダイバーの疲労状態の監視に用いられる。なおこの時点で、④解析モードの画面も、周期校正や値の校正なしに表示されるため、概略の仕事量の値は知ることができる。

③ データ保存

データは、監視モードでモニタリングしながら、毎秒10回のサンプリング間隔で、約5分間を最大単位として、保存できる。

④ データ解析

データ解析にあたっては、保存したデータのデジタル出力値 (Table 4) に基づいて、別途に行った呼吸流量計と差圧計のキャリブレーション結果を加味し、呼吸流量の補正係数の検討、呼吸気流量・口腔差圧・呼吸ガス濃度 (酸素, 炭酸ガス) 間のタイムラグの検討を行う。

次に周期校正画面 (Fig. 6) で、タイムラグ調整を行い、解析範囲を指定する。続いて呼気流量, 吸気流量の補正係数と、解析範囲内の呼吸数を入力す

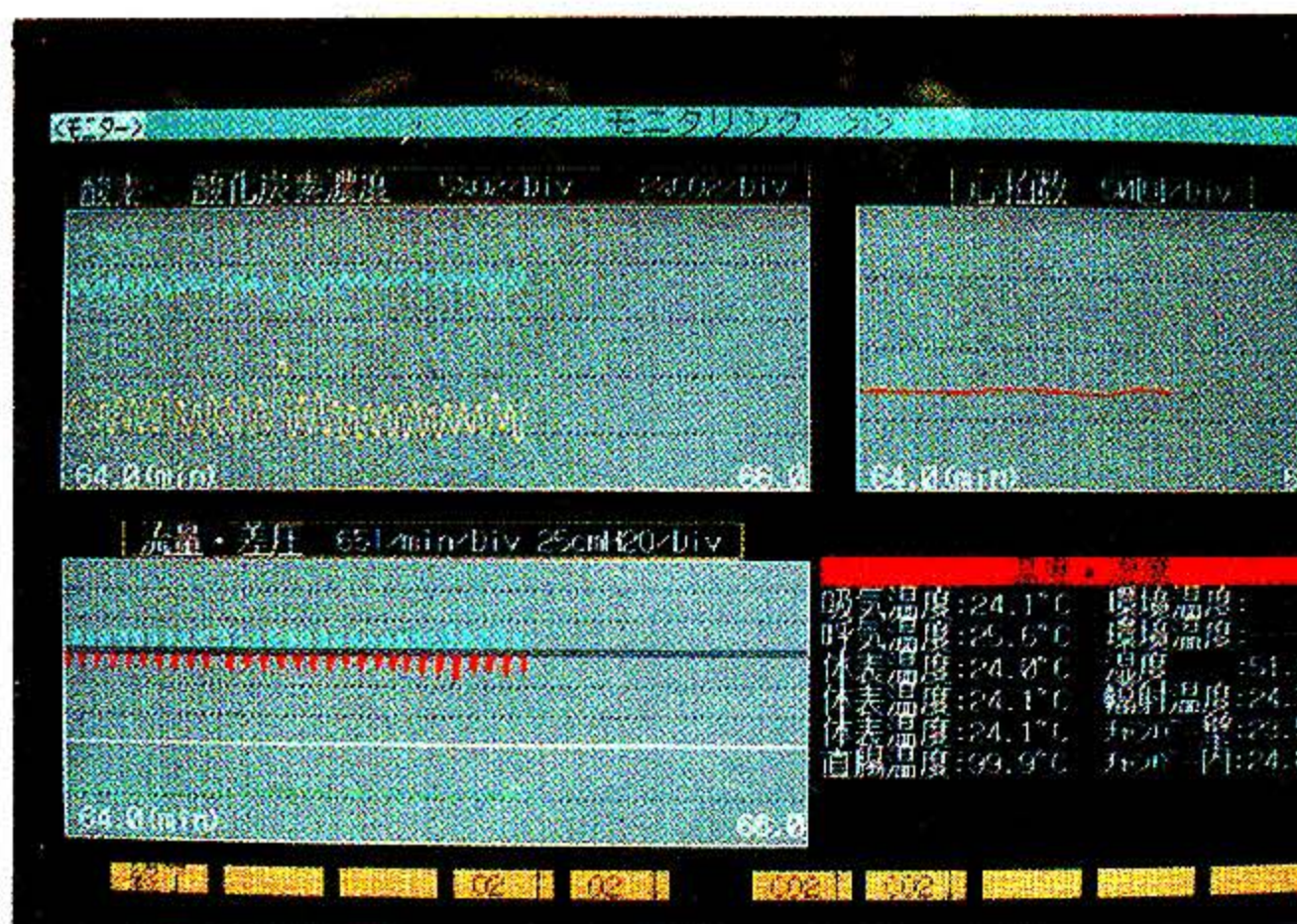


図5 監視モードの画面
Fig 5 Display of monitoring computer

表4 保存データのデジタル出力例
Table 4 Example of recorded data by 10 Hz.

<呼吸モニタリングシステム解析データ (流量補正前)>												
NO	供給 圧力 (kg/cm ²)	呼気 流量 (l/min)	吸気 流量 (l/min)	呼吸 差圧 (cmH ₂ O)	呼吸 濃度 (%)	O ₂ 濃度 (%)	N ₂ 濃度 (%)	Ar 濃度 (%)	He 濃度 (%)	体温 温度 (°C)	環境 温度 (°C)	湿度 (%)
826	* 8.46	6.96	* 17.54	* 4.98	* 1.82	* 11.66	0.00	0.00	0.00			
827	* 8.40	* 5.68	* 17.45	* 3.88	* 1.81	* 11.56	0.00	0.00	0.00			
828	* 8.19	* 13.64	* 18.45	* 4.01	* 1.83	* 11.56	0.00	0.00	0.00			
829	* 8.31	* 11.78	* 18.74	* 4.34	* 1.81	* 11.56	0.00	0.00	0.00			
830	* 8.43	* 5.58	* 18.16	* 4.44	* 1.81	* 11.56	0.00	0.00	0.00			
831	* 8.40	* 9.73	* 20.42	* 4.67	* 1.79	* 11.72	0.00	0.00	0.00			
832	* 8.39	* 8.06	* 18.16	* 3.88	* 1.80	* 11.54	0.00	0.00	0.00			
833	* 8.31	* 7.92	* 21.42	* 4.73	* 1.79	* 12.02	0.00	0.00	0.00			
834	* 8.40	* 9.16	* 17.97	* 5.06	* 1.75	* 11.62	0.00	0.00	0.00			
835	* 8.38	* 7.34	* 20.80	* 4.63	* 1.78	* 12.02	0.00	0.00	0.00			
836	* 8.05	* 5.72	* 19.89	* 4.98	* 1.66	* 11.71	0.00	0.00	0.00			
837	* 8.42	* 7.34	* 22.24	* 5.08	* 1.54	* 12.02	0.00	0.00	0.00			
838	* 8.39	* 10.40	* 16.44	* 5.07	* 1.47	* 12.13	0.00	0.00	0.00			
839	* 8.40	* 8.16	* 20.99	* 4.65	* 1.28	* 12.24	0.00	0.00	0.00			
840	* 8.32	* 7.49	* 19.03	* 4.99	* 1.08	* 12.46	0.00	0.00	0.00			

心拍 数 (分)	呼気 温度 (°C)	吸気 温度 (°C)	体表1 温度 (°C)	体表2 温度 (°C)	体表3 温度 (°C)	直腸 温度 (°C)	環境1 温度 (°C)	環境2 温度 (°C)	照射 温度 (°C)	チャン 内 温度 (°C)	チャン 壁 温度 (°C)	
80	25.57	25.23	25.45	25.42	25.39	99.99	0.00	0.00	25.77	25.71	25.71	7
82	25.57	25.23	25.45	25.42	25.39	99.99	0.00	0.00	25.77	25.71	25.71	7
81	25.57	25.23	25.45	25.42	25.39	99.99	0.00	0.00	25.77	25.71	25.71	7
81	25.57	25.23	25.45	25.42	25.39	99.99	0.00	0.00	25.77	25.71	25.71	7
80	25.57	25.23	25.45	25.42	25.39	99.99	0.00	0.00	25.77	25.71	25.71	7
82	25.57	25.23	25.45	25.42	25.39	99.99	0.00	0.00	25.77	25.71	25.71	7
83	25.57	25.23	25.45	25.42	25.39	99.99	0.00	0.00	25.77	25.71	25.71	7
82	25.56	25.18	25.45	25.42	25.39	99.99	0.00	0.00	25.77	25.71	25.71	7
81	25.56	25.18	25.45	25.42	25.39	99.99	0.00	0.00	25.77	25.71	25.71	7
82	25.56	25.18	25.45	25.42	25.39	99.99	0.00	0.00	25.77	25.71	25.71	7
84	25.56	25.18	25.45	25.42	25.39	99.99	0.00	0.00	25.77	25.71	25.71	7
83	25.56	25.18	25.45	25.42	25.39	99.99	0.00	0.00	25.77	25.71	25.71	7
83	25.56	25.18	25.45	25.42	25.39	99.99	0.00	0.00	25.77	25.71	25.71	7
83	25.56	25.18	25.45	25.42	25.39	99.99	0.00	0.00	25.77	25.71	25.71	7
82	25.56	25.18	25.45	25.42	25.39	99.99	0.00	0.00	25.77	25.71	25.71	7
85	25.56	25.18	25.45	25.42	25.39	99.99	0.00	0.00	25.77	25.71	25.71	7

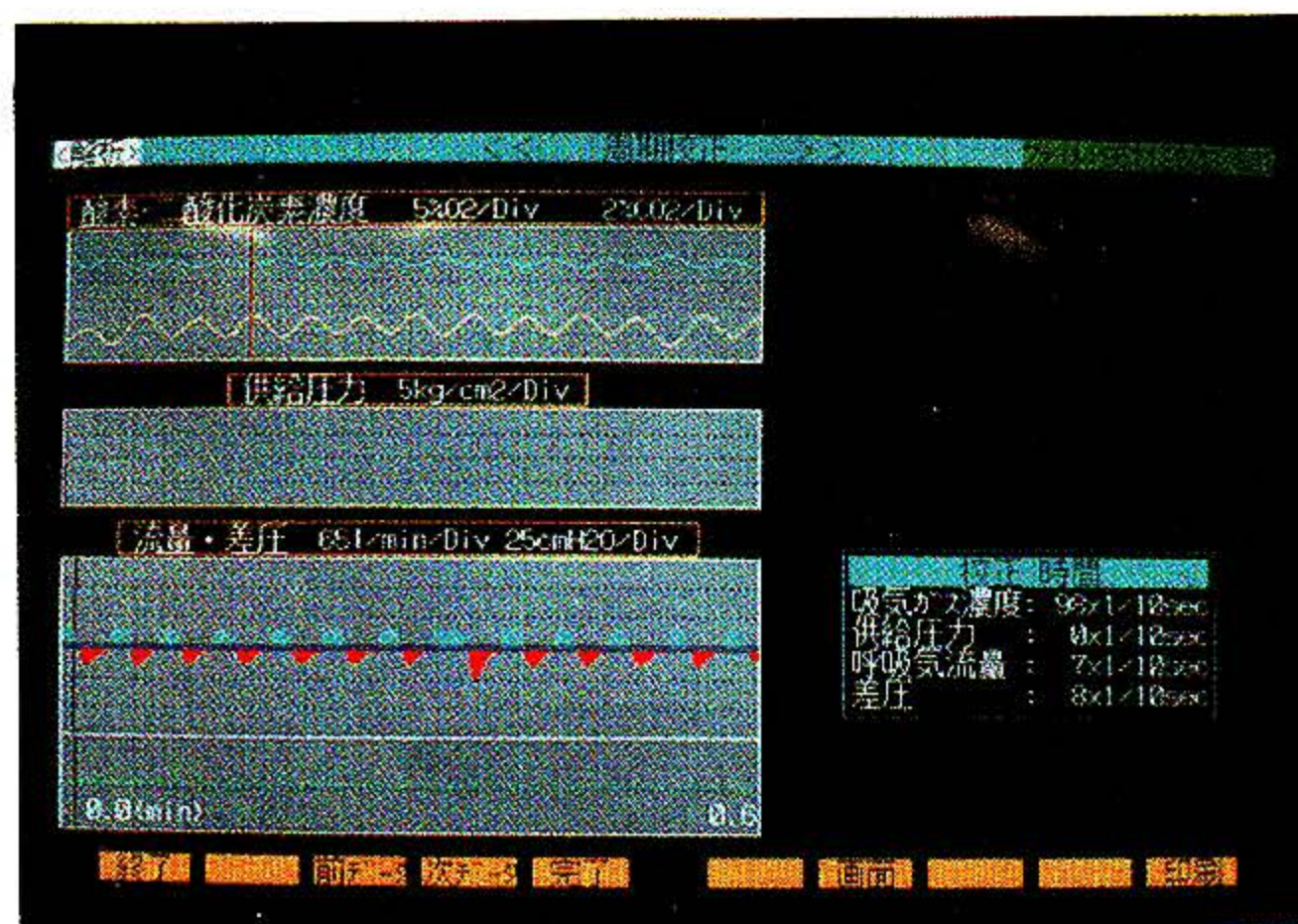


図6 周期校正画面
Fig. 6 Display for time difference adjustment for analysis

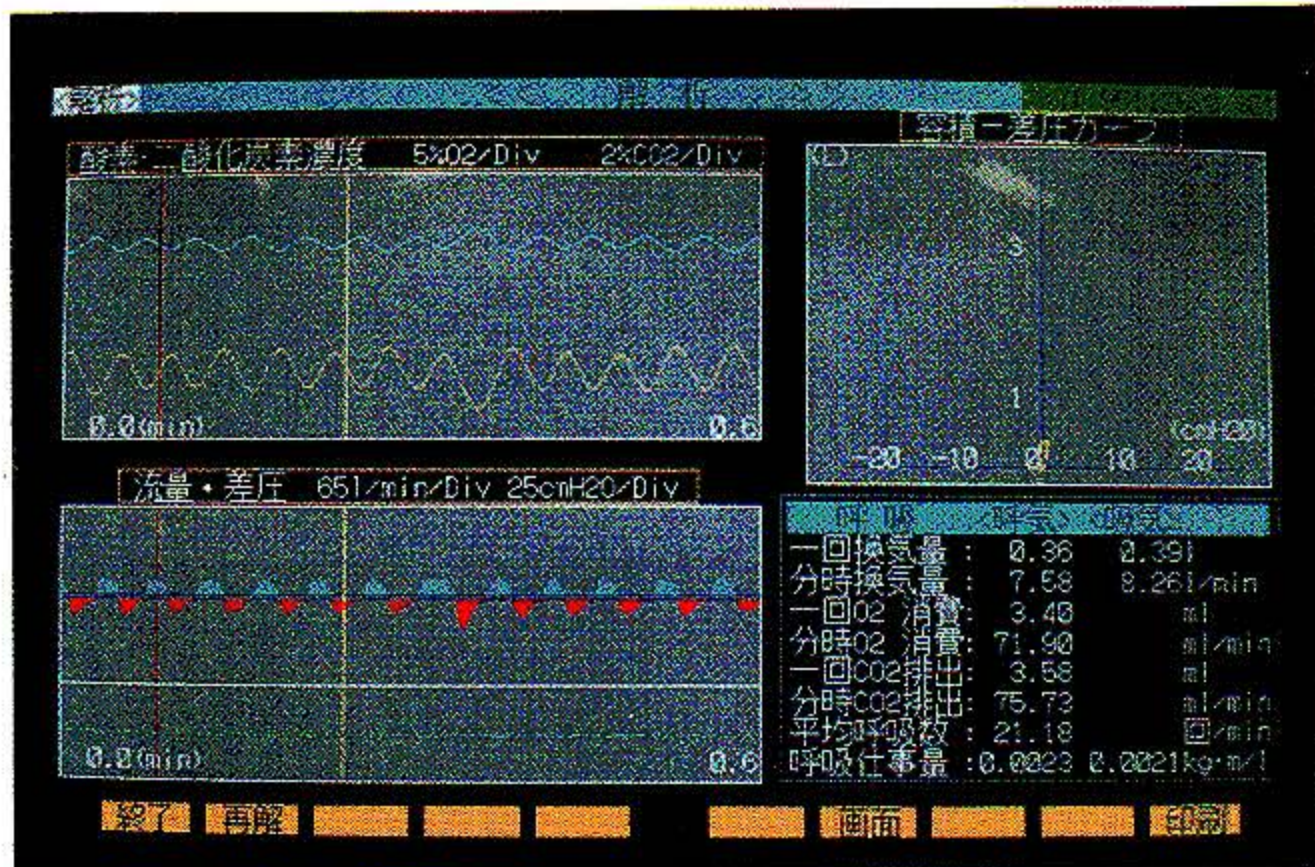


図7 解析結果の画面

Fig. 7 Result of analyse for three breath

る。その結果, Fig. 7 に示した解析画面として結果が表示される。ここでは酸素・炭酸ガス濃度, 呼吸流量・吸気流量・口腔差圧が36秒間にわたって表示されるとともに, P-Vループ(容積-差圧カーブ), 吸気及び呼気のそれぞれについての一回換気量・分時換気量・呼吸仕事量, 一回及び分時の酸素消費量, 一回及び分時の炭酸ガス消費量, 平均呼吸数が表示される。

このデータ解析により, 呼吸器によってダイバーがどれだけ負荷を受けているのか, 作業に応じて呼吸負荷がどう変化するか, 呼吸器の相違で負荷がどう変化するか, 呼吸ガス組成変化に応じて負荷がどう変化するか, 等について検討することができる。

(3) 呼吸モニタリング装置の予備性能試験

1994年の2~3月に行われた20m窒素・酸素飽和潜水シミュレーション実験, 11~12月に行われた180mヘリウム・酸素飽和潜水シミュレーション実験において, 大気圧及び高圧状態でのドライ環境下計測試験を行った。

被験者には自転車エルゴメータで一定の負荷を与え, 従来の一分間のガス採気法による呼吸量及び呼吸代謝量の測定と併せて呼吸モニタリング装置による計測を行った。計測・解析結果の例として, 180mのドライ環境下で, 安静状態で, AGAの全面マスク(photo 4)で用いているもの)での室内ガスの呼吸と SUPERLITE 17B(photo 2)を用いた時のデータについて, それぞれ3呼吸分の解析結果のプリントを Fig. 8, 9 に示した。AGAマスクはチャンバーの中のガスをそのまま呼吸し, SUPERLITE 17Bは, 環境圧よりも+8 kgf/cm²G高い圧力のガスをチャンバー外から送気し, デマンド

式レギュレータで吸気する方式である。この2種の呼吸器の結果から, その特徴を述べると次のようである。

AGAは, 毎分8回のゆっくりした呼吸で, 一回換気量も大きく呼吸抵抗はほとんどない。炭酸ガス濃度の変化は大きくかつシャープであり, 一呼吸ごとの変化が明確で, 呼吸に無理のない様子が示されている。それに対し, SUPERLITE 17Bは, 呼吸回数が毎分13回と多いが, 一回換気量はその分少なく, 呼吸抵抗がかなり大きい。また炭酸ガス濃度の変化は鈍い。呼吸仕事量で比較すると, SUPERLITE 17BはAGAの約10倍に近いことがわかる。

以上のように, 単なる安静状態であっても, AGAのようにレギュレータ無しに環境ガスを直接呼吸するものに対し, 吸気差圧を検知してデマンドレギュレータを作動させることで初めて吸気が可能となる SUPERLITE 17B型の潜水呼吸器では, 基本的に大きな負荷をダイバーに与えていることがわかる。

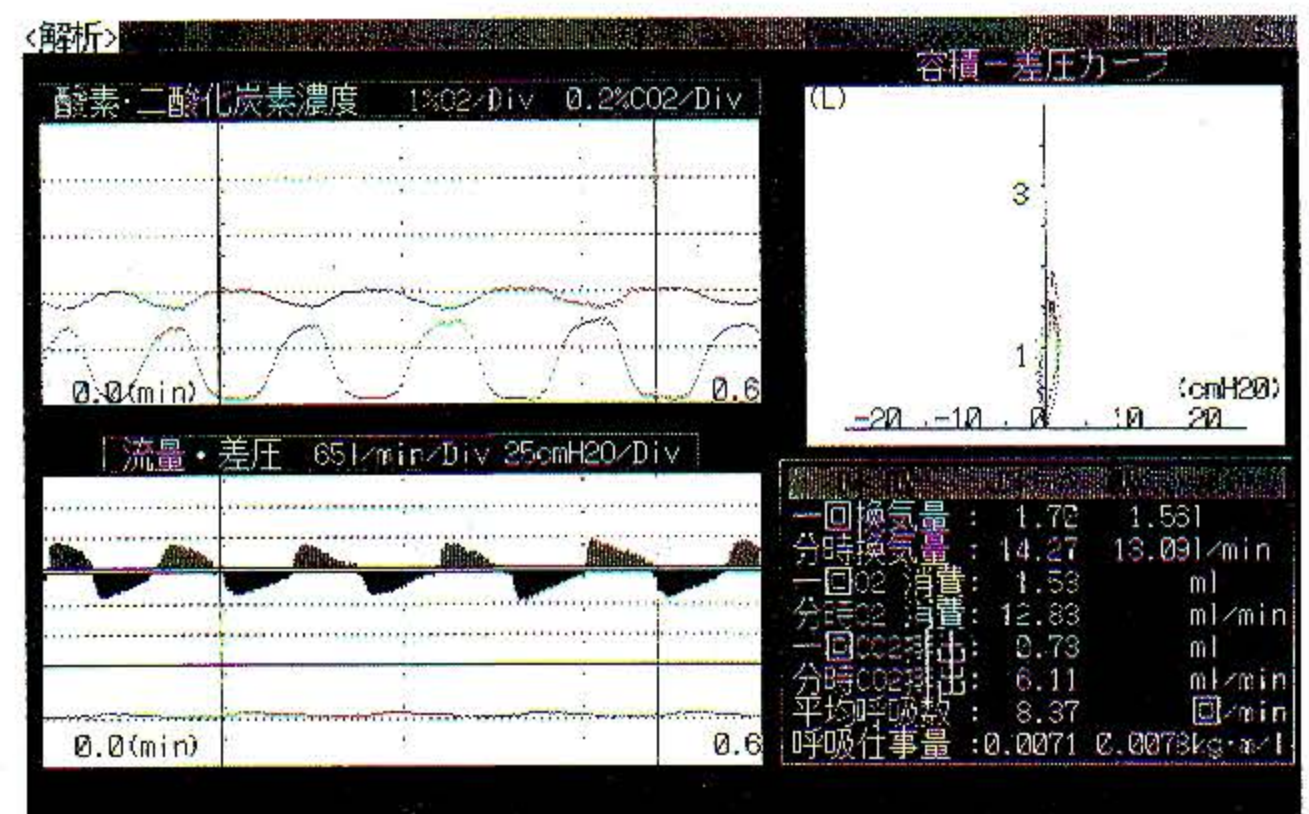


図8 180m深度におけるAGAマスク室内呼吸での安静時の呼吸負荷

Fig. 8 Calculated result using AGA full face mask breathing environmental gas at 180m rest condition

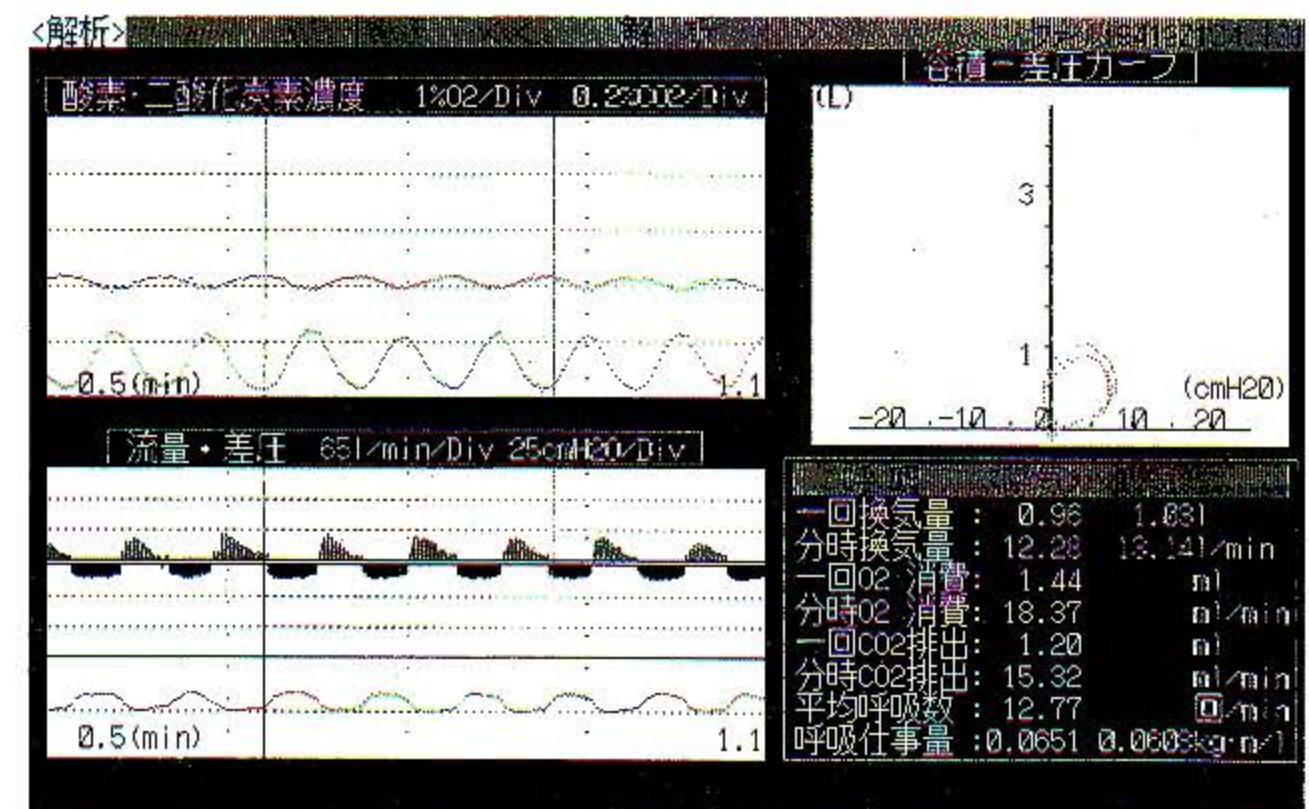


図9 180m深度におけるSUPERLITE 17Bでの安静時の呼吸負荷

Fig. 9 Calculated result using SUPERLITE 17B at 180m rest condition

4 まとめ

我々の開発した呼吸モニタリング装置は、呼吸流量を呼気と吸気を別々に計測して両者間での校正を可能にしたこと、吸気流量計を耐圧容器に封入してデマンドレギュレータ型のような環境よりも高い圧力のガスについても流量計測を可能にしたこと、解析段階で各種の校正が可能なこと、当初の計測値をそのまま記録する方式のため、さまざまな解析が可能である等の特徴がある。

初期の計測試験でも明確になったように、ダイバーにとっては、呼吸器を装備しているだけでも、通常の状態よりもはるかに大きな呼吸負荷がある。従来、呼吸器の性能についての課題は、ハードな海中作業にも耐えられるよう、最大換気量での作動時の限界性能の向上が主題であった。しかし海中作業は、身体の頑強なプロダイバーだけが行うものではなく、普段はあまり潜水や水泳を行わない研究者や技術者にとっても重要な計測・観察のための手段である。その際、プロダイバーであれば何ら負荷とも思わない軽作業時の呼吸負荷でさえ、そうした潜水の非鍛練者にとっては大きな問題である。

今後、有人状態での各種の計測を通じ、呼吸モニタリング装置を用い、呼吸器を装備したことのみによる負荷、軽作業時の負荷等について研究してゆく計画である。また呼吸器の限界性能に関しては、別途製作中の呼吸シミュレータ（人工肺）を用いた無人計測によって計測と技術開発が可能になると考えている。この両者の組み合わせにより、浅深度から大深度まで、呼吸器に起因するヒトの疲労の実態を解明することが可能になると考えられる。

謝 辞

本装置の開発にあたり、さまざまな貴重な示唆を賜ったNUTECのTholvald Mellingen 所長、Kare Segadal 氏、OBS社のNils T. Ottestad 氏、DIVEX社のDouglas

Austin 氏、その他多くのかたがたにお礼申し上げる。

参考文献

- 1) Grodski J.J.: External work of breathing of demand-air underwater breathing apparatus, OCEANS '1978, 115-121, 1978.
- 2) Evenson G. and J. K. Johansen: Divers breathing gear, certification notes, DIVETECH' 81, London, pp23, Nov., 1981.
- 3) Carnegie A. L.: An engineering view of the human breathing problem in relation to diving, DIVETECH'81, London, pp13, Nov., 1981.
- 4) Morrison J.B., Unmanned test procedure and physiological acceptance criteria, DIVETECH' 81, London, pp11, Nov., 1981.
- 5) Segadal K., D. M. Furevic and E. Myrseth: Breathing resistance-keeping the requirements realistic, DIVETECH'81, London, pp13, Nov., 1981.
- 6) NPD: Guideline for evaluation of breathing apparatus for use in manned underwater operations in the petroleum activities, pp13, Norway, 1991.
- 7) National Hyperbaric Center: IGROO '88 Final Dive Report, Underwater breathing apparatus and emergency bailout, April 1989, UK.
- 8) NUTEC: Respiratory monitoring. Training and monitoring manual OTS-Dive No. 3, pp18, 1986, Norway.

(原稿受理: 1996年1月11日)