

●原 著

高圧ヘリオックス環境下のフロー測定システムの評価 ——ガス組成、環境圧、ガス回路形状に依存するフライシュ 型ニューモタコメータの特性——

富澤 儀一* 橋本 昭夫** 西 功* 永野 昭則*
小此木 国明** 鈴木 信哉** 大岩 弘典**

本研究は高圧ヘリオックス環境下でのフライシュ型ニューモタコメータによるフロー測定システムの評価に関するものである。本システムの評価では、各種の環境条件下において、校正リングによる本システムへのフロー入力に対する出力差圧を測定・記録し、重みづけ平均法によってフローコンダクタンスを求め、吟味した。

測定はヘリオックス環境下の31ATA、減圧時の18、12ATAおよび、1ATA(空気)において行なわれた。さらに加圧空気環境下1、2、4、6、8、10ATAおよび、大気圧下でのヘリウム・空気混合ガスにおいてヘリウム濃度をパラメータとして測定した。それらの測定・解析の結果は次の様である。

- (1) ヘリウム濃度、環境圧の増大によって、フローコンダクタンスは低下する。
- (2) ニューモタコメータに連結された整流パイプによる入力気流の整流効果は環境圧の増大とともに大となる。したがってガス回路の形状の選定に注意し、それを含めた校正が必要となる。
- (3) 31ATAヘリオックス環境下での気流量測定において用いたニューモタコメータのラミナー層内で乱流($Re > 2310$)が起こることはなかった。
- (4) 実際のガス回路による Breath by Breath 気量測定において、フローコンダクタンスの平均を用いて測定した結果は、フローコンダクタンスと差圧の関係を忠実に適用した測定と比べると、それらの誤差率は高々2%であった。

キーワード：フライシュ型ニューモタコメータ、フローコンダクタンス、高圧ヘリオックス環境

Characteristics of flow measuring system with Fleisch pneumotachometer under hyperbaric and heliox environment.

G. Tomizawa*, A. Hashimoto**, I. Nishi*, A. Nagano*, K. Okonogi**, N. Suzuki**, H. Oiwa**
*Faculty of Science and technology, Science University of Tokyo, **JMSDF Undersea Medical Center

The purpose of this study was to clarify the validity of Fleisch pneumotachometer under hyperbaric air and heliox environment. The validity was estimated by examining flow conductance FC

at various atmosphere environment. FC is defined by flow rate over pressure deference. The tests were conducted in hyperbaric air up to 10ATA and in heliox environment up to 31ATA, in addition to normobaric heliox condition.

I was found that FC decreased with increase in helium concentration and ambient pressure. The turbulent flow caused by fringing effect of pneumotachometer conducting tube became eminent at increased ambient pressure, and it was proved to be effectively diminished by connecting the properly designed tailing tube. Under 31ATA heliox environment, the maximum flow rate that would not caused turbulent flow inside the lamina tube would be as high as 7.6(l/s).

For the practical measurement of breathing gas volume, three methods were examined. The first

*東京理科大学理工学部

**海上自衛隊潜水医学実験隊

was a simple application of mean FC. The second was a partial application of $F_c-\Delta p$ dependence by neglecting extreme higher flow rate region, and the third was an exact full application of the dependence over whole flow region. The differences of the former two from the other were estimated to be at most 2% and 1%.

The pneumotachometer for respiratory use proved to be available in hyperbaric heliox environment up to 31ATA.

Keywords : _____

Fleisch pneumotachometer
flow conductance
hyperbaric heliox environment

はじめに

深海潜水作業のための飽和潜水技術の開発に伴って、高気圧環境下での呼吸、循環動態の測定・解析が重要な課題となっている。呼吸気フローの測定は呼吸気ガス組成、呼吸気温度の連続測定とともに重要な基礎的測定量である¹⁾²⁾。

フライシュ型ニューモタコメータ (Fleisch pneumotachometer) によるフローメータは小型で、気流抵抗が小さく、応答性、安定性に優れており、早い呼吸気流量の連続測定を要する肺機能測定、換気及びガス交換の呼吸ごとの測定等、臨床、運動生理の分野で広く用いられている。

フライシュ型ニューモタコメータの特性については、温度³⁾⁴⁾、ガス組成⁴⁾⁵⁾、入力側形状の及ぼす影響⁶⁾、フローコンダクタンス⁵⁾⁷⁾等の報告がある。YEH 等⁵⁾⁷⁾はフローメータの特性を表わす新たな因子としてフローコンダクタンスを測定・解析した。混合ガスを用いた測定において、フロー・コンダクタンスは気流によって生じる差圧の全領域にわたってかならずしも一定ではなく、またガス組成変化に依存するものであることを報告している。

本研究においては、高圧ヘリオックス環境下での気圧、混合ガス組成の違いに対するフライシュ型ニューモタコメータの適切な校正および補正を行なうことを目的とし、フロー測定システムの吟味・検討を行なった。

本研究はまた、海上自衛隊潜水医学実験隊の深海潜水シミュレーション施設内での高圧ヘリオッ

クス環境下における生理計測法開発研究の一環として行なわれたものである。測定は 300m 深度相当の有人飽和潜水実験に際して、31ATA、減圧時の 18, 12, および 1ATA 環境下において行なわれた。

本論文においては、高圧ヘリオックス環境下のフロー測定システムの特性測定法と測定結果を示し、呼吸気流量の高い精度の測定を実現する観点から考察する。

測定法

1. 高圧ヘリオックス環境下のフロー特性

(1) フロー測定システム

深海潜水シミュレーションタンク内におけるフロー測定システムを図 1 に示す。ニューモタコメータと差圧測定用トランスジューサはタンク内に、増幅器は外部に設置した。トランスジューサ出力はタンクの電気系貫通部を経て増幅器に入力される。この増幅器の出力がニューモタコメータの差圧 Δp として測定される。トランスジューサ・増幅器は最大差圧 $\pm 20\text{mmH}_2\text{O}$ に対して、出力電圧は $\pm 10\text{V}$ に設定されている。

ニューモタコメータは内径 37mm、差圧取出口間の距離は 24mm である。ラミナはアルミの薄板を正三角形の波状に型どり、それを螺旋状に巻いて作られている。差圧計は可変磁束型の G.N. センサ製 (TF-38) を用いた。

ニューモタコメータに接続されたガス回路は図 1 に示すように一方向性バルブ (one way valve) である。マウスピース口に 2l のシリンジを付けて往復運動をすると、吸入時には環境ガスがシリンジに流入し、排出時にはシリンジ内のガスがニューモタコメータに流入する。したがって、フローメータ出力 Δp は排出側のみで観測される。

差圧 Δp の測定・記録はマイクロコンピュータ YEWMAC 300 (68000CPU, 16BIT の A/D コンバータ, 20MB 固定ディスク) を用いてサンプル周期 10ms の間隔で行なわれた。記録データはノイズレベルを考慮して、下位 3 ビットを右シフトして 12 ビットのデジタル値として処理した。取り込みデータのモニタにはアナライジングレコーダ (YEW 3655) を用いた。

(2) フロー特性の測定

① フロー入力に対する差圧 Δp の記録

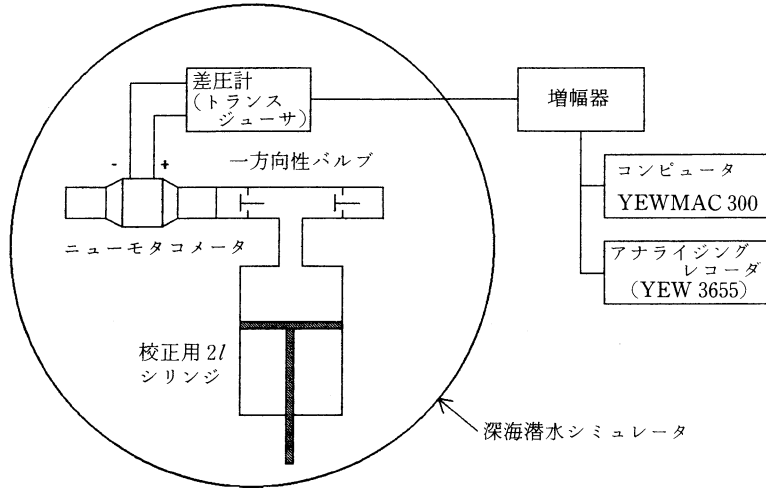


図1 深海潜水シミュレータにおけるフロー測定システムの構成図

表1 環境パラメータ

パラメータ 深度	CO ₂ (%)	Ar (%)	O ₂ (%)	N ₂ (%)	He (%)	T (°C)	R.H. (%)	ρ (Kg・m ⁻³)
300m	0.0016	0.42	1.45	3.53	94.59	30.8	76.2	6.759
170m	0.0028	0.10	2.45	3.00	94.45	30.5	69.5	4.067
110m	0.0042	0.16	3.60	3.02	93.22	29.5	70.0	2.882
0m	0.03	0.98	20.93	78.02	0.00	24.0	53.0	1.200

T : 環境温度, R.H.: 相対湿度

ρ : 環境ガス密度 (CO₂, Ar は除く, 25°C)

表1に示す環境圧, ガス組成, 温度および, 湿度の環境ガスにおいてシリンジを手動で100ストローク往復運動させて, 差圧 Δp をマイクロコンピュータに記録した。シリンジの往復運動の速さはアナライジングレコーダでモニタしながら, Δp 出力電圧が, その最大値がフルスケール 10V 付近, およびフルスケールの1/2以下の種々の出力レベルで行なった。

② フローコンダクタンス

測定された差圧 Δp は(1)式によって流量に変換される。

$$\dot{V} = Fc \cdot \Delta p \dots\dots\dots(1)$$

ここで, Fc は Δp を流量 \dot{V} [l/s] に変換するフローコンダクタンス (Flow conductance: FC) である。差圧 Δp の分解能は12ビットであり, Δp は 0-4095の範囲のデジタル値で表わされる。このデ

ジタル値で表わした差圧の単位を ADU とする。

容積は流量・時間曲線の積分値,

$$V = \sum (Fc \cdot \Delta p) \cdot \Delta t$$

として求められる。シリンジの i 番目のストロークにおける平均のフローコンダクタンス Fc (i : 平均) は,

$$Fc (i : 平均) = (V / \Delta t) / \sum \Delta p$$

となる。本測定においては V=2l (シリンジ容積), Δt=0.01s (サンプリング周期) である。次にストローク毎の1-4095 ADU に対する Δp のスペクトル S(i, j) を求める。ここで S(i, j) の添字 i はストローク番号, j は ADU を表わす。

Δp のそれぞれの ADU における平均の FC は重みづけ平均法⁷⁾である(2)式によって求める。この平均値を一次近似 <FC (j)> と呼ぶ。

$$\langle Fc (j) \rangle = \sum \{ Fc (i : 平均) \cdot S (i, j) \} / \sum S (i, j)$$

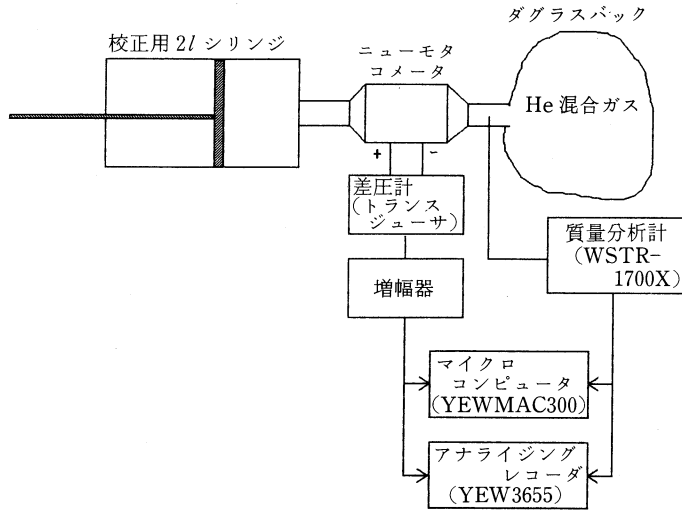


図2 大気圧下のヘリウム濃度変化に対する Fc の測定法

.....(2)
 さらに $\langle Fc(j) \rangle$ の精度を改善するために(3)式に示す修正ファクター e を導入する。

$$V = \sum \{ \Delta p \cdot \langle Fc(j) \rangle \} \cdot e(i) \cdot \Delta t \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 $e(i)$ は i 番目のストロークに対する修正ファクターである。重みづけ平均法を用いると $\langle Fc(j) \rangle$ の修正ファクター $e(j)$ は、 $e(j) = \sum \{ e(i) \cdot S(i, j) \} / \sum S(i, j)$ となる。したがって、FCの修正された平均の $\langle Fc(j) \rangle$ は(4)式によって求められる。

$$Fc(j) = e(j) \cdot \langle Fc(j) \rangle \dots\dots\dots(4)$$

2. FCの変動要因に対する様態測定

FCの変動要因として環境圧、測定ガス成分、入力側ガス回路の形状の変化を取り上げ、これらの要因がFCに与える効果を測定する。

(1) ヘリウム濃度依存性

ヘリウム濃度に対するFCの変化を測定する。図2に示すガス閉鎖回路にヘリウム混合ガスを注入して、シリンジによるフロー入力に対するフローメータの差圧 Δp を記録・解析した。測定中のヘリウム濃度をモニターするためにニューモタコメータのシリンジ側にガスサンプリングプローブ(サンプリング量40ml/min)を挿入して質量分析計(WESTRON社, WSTR-1700X)によってヘリウムガスの濃度を測定した。測定環境は大気圧下、

室温25.5℃、相対湿度58%であった。

ヘリウムと空気の混合ガスは、ヘリウム濃度70,60,50,40,30,20,10,0% (空気)について測定した。閉鎖ガス回路内のヘリウム濃度はヘリウムガスによる流い出しを繰り返したが、70%が最大濃度であった。

(2) 圧力依存性

ヘリウムガスを含まない空気流量測定において、加圧に対するFCの変化の様態を測定した。高圧タンク内において、ニューモタコメータへのフロー入力は正弦波ポンプ(シリンダ容積2l、回転数30回/分)を用いて行なった。正弦波ポンプとニューモタコメータは長さ12cmの同径のパイプで接続し、排出側は開放にした。(図3)

1ATA、タンク内温度26.5℃、空気環境ガスにおいて、100ストロークの正弦波状のフロー入力に対する差圧 Δp を記録した。引続いてタンク内の温度を一定に保ち、空気加圧による2, 4, 6, 8, 10ATAの高圧空気環境において100ストロークに対する差圧を測定・記録した。

(3) 入力側ガス回路形状依存性

ガス回路の形状に対するFCの依存性について測定した。ニューモタコメータの正弦波ポンプ接続口の反対側に同径の10cmのパイプ(整流パイプ)を連結して(1)と同様の測定を行なった。

(4) 高圧ヘリオックス環境下における Breath

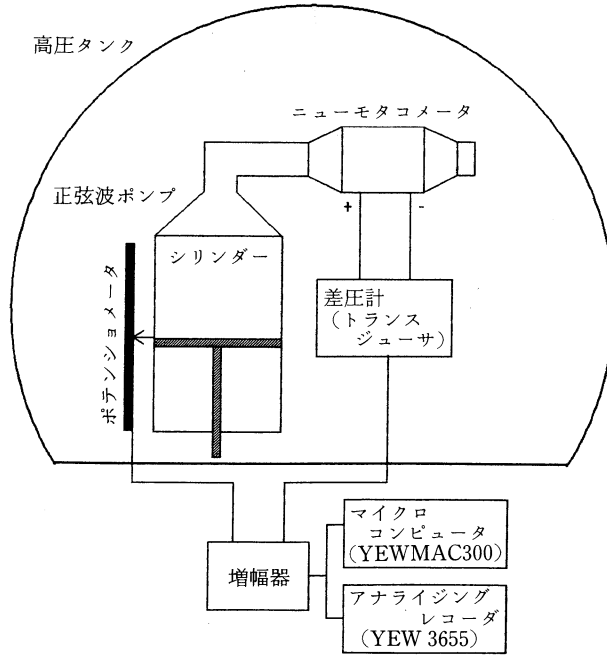


図3 空気加圧環境下の Fc の測定法

by breath 呼吸気流量測定

深海潜水シミュレーションタンク内 (図1) の一方向性バルブに接続されているシリンジをマウスピースに替え, 31ATA 環境圧, 表1に示す環境ガス組成において, 安静時の呼吸気流量のパターンを測定した。ここで呼吸気流量 \dot{V} [l/s] は, 31ATA における Fc- Δp 関係を用いて測定した。

一呼吸毎の正確な呼気排出量は Fc- Δp の関係を忠実に用いて, (5)式によって求められる。

$$V_{T(Fc-\Delta p)} = \Sigma (Fc \cdot \Delta p) \cdot \Delta t \dots\dots\dots(5)$$

(5)式の Fc に代わって平均値 \overline{Fc} (1), 及びガス回路を取り除いて測定した FC の平均値 \overline{Fc} (2)を用いて一呼吸毎の呼気排出量 $V_T(1)$, $V_T(2)$ を求めた。

結 果

1. 高圧ヘリオックス環境下のフロー特性

記録された差圧 Δp を(1)~(4)式のアゴリズムによってコンピュータ処理 (NEC MS140)を行ない, Fc を算出した。図4は環境圧をパラメータとした Fc- Δp 関係である。縦軸は FC, 横軸は差圧を示し, それぞれの単位は [l/s/ADU] および

ADU である。31, 18, 12, 1ATA の環境圧に対して, Fc の様態は差圧 Δp の全領域にわたって必ずしも一定値を示すものではなかったが, 異なる環境圧に対して曲線が重なり合ったり, 入れ替わることはなかった。

環境圧に対する, Fc の平均のフローコンダクタンス \overline{Fc} 及び, その逆数として求められる平均フロー抵抗 $\overline{F_R}$ のグラフ曲線を図5 (a), (b)に示した。

2. FC のヘリウム濃度依存性 ((1)の測定結果)

Fc- Δp の関係をそれぞれ F_{He} をパラメータとして図6に示した。それぞれの F_{He} に対して全ての Δp 領域ではほぼ一定値が得られた。また, F_{He} の低下に伴って FC は増大した。

すべての F_{He} 測定において, F_{He} の変化はシリンジの100ストローク中, 1%以下であった。

F_{He} のそれぞれのレベルに対する FC の平均値 \overline{Fc} とフロー抵抗の平均 $\overline{F_R}$ (\overline{Fc} の逆数) を求め, $F_{He}=0$ を基準とした \overline{Fc} , $\overline{F_R}$ の変化率回帰曲線を図7 (a), (b)に示す。

3. FC の圧力依存性 ((2)の測定結果)

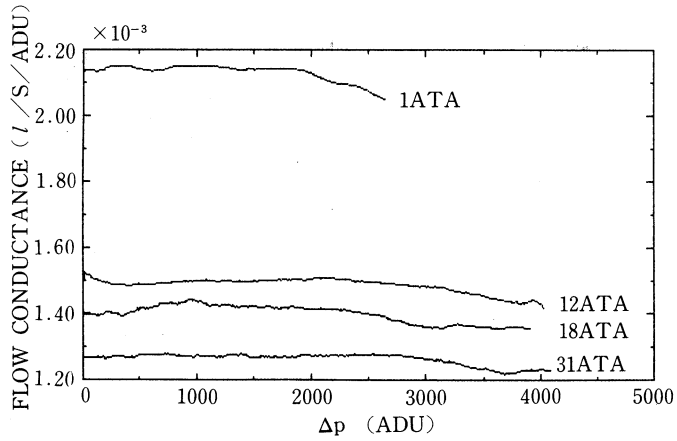


図4 31ATA, 減圧時の18, 12ATA および1ATA における F_c - Δp 関係

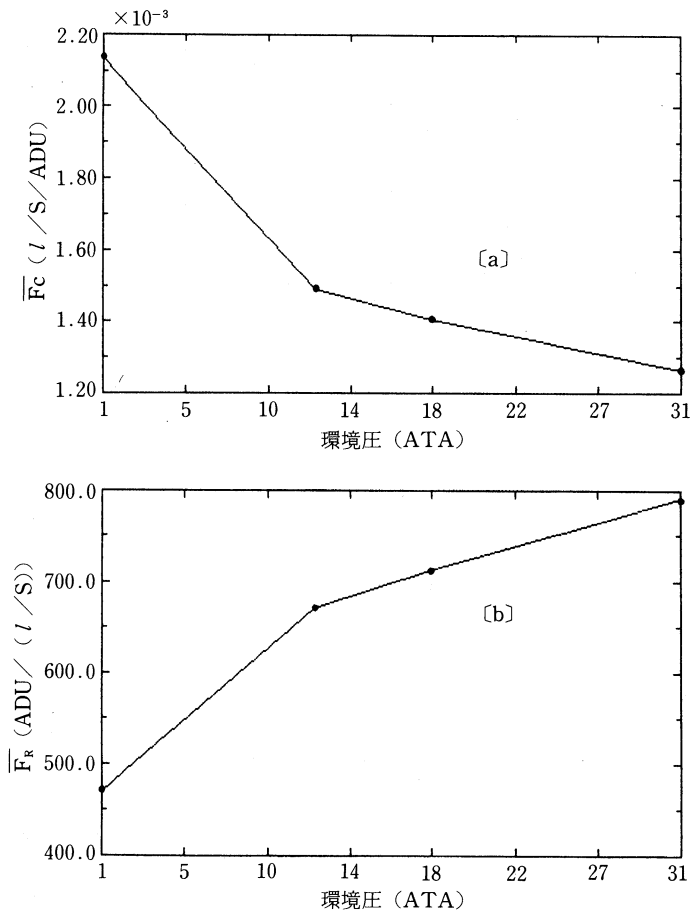


図5 環境圧に対する(a) $\overline{F_c}$, (b) $\overline{F_R}$ の変化

各環境圧をパラメータとする F_c - Δp の関係を図8(a), (b)に示す。

さらに、各環境圧に対して、 $\overline{F_c}$, および $\overline{F_R}$ を算

出して、環境圧に対するそれらの変化率の回帰曲線を図9(a), (b)に示した。

4. 入力側ガス回路形状依存性(3)の測定結果)

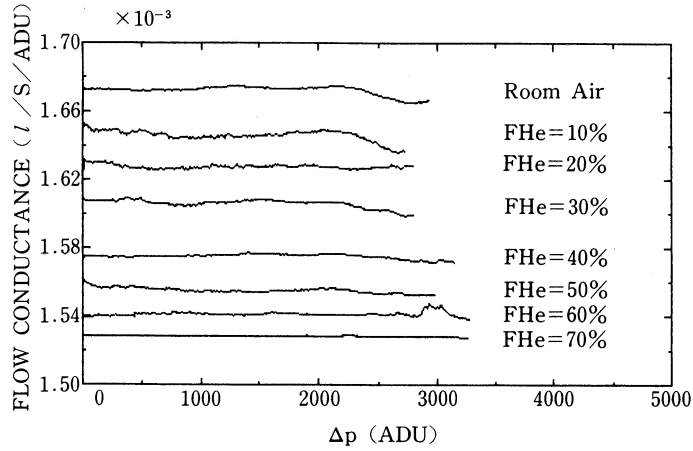


図6 大気圧下のヘリウム濃度に対する F_c - Δp 関係

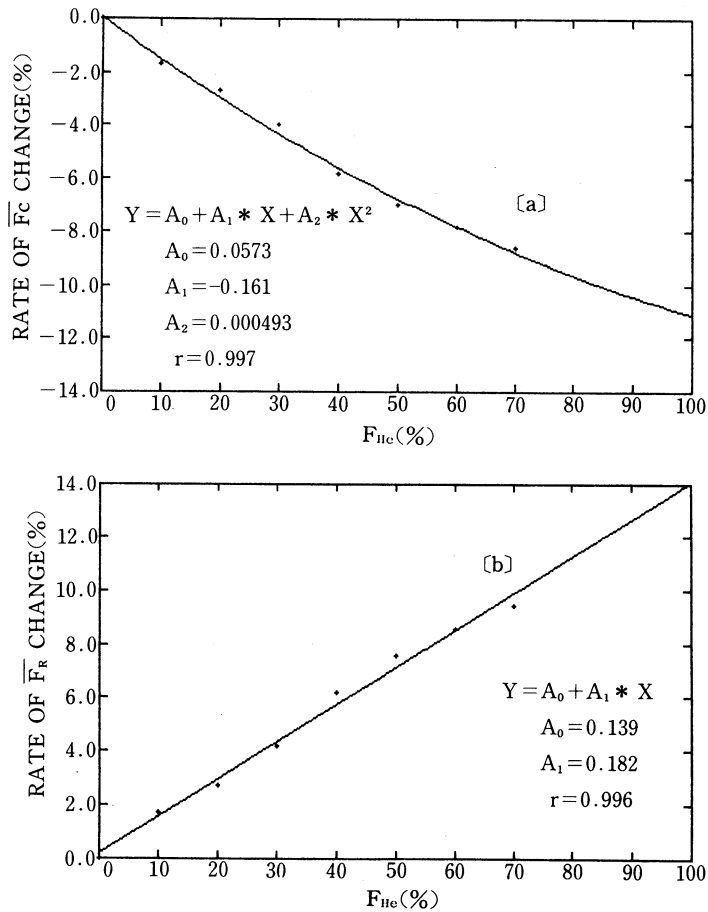


図7 大気圧下のヘリウム濃度に対する (a) $\overline{F_c}$, (b) $\overline{F_r}$ の回帰曲線

図10(a), (b)は正弦波ポンプの排出, および吸入時の F_c - Δp の関係を表す。パイプの付加によって排出時の F_c は図8(a)と比較するとほと

んど影響されなかったが, 吸入時にはそれぞれの圧力環境下で図8(b)と比較して著しい F_c の低下が認められた。

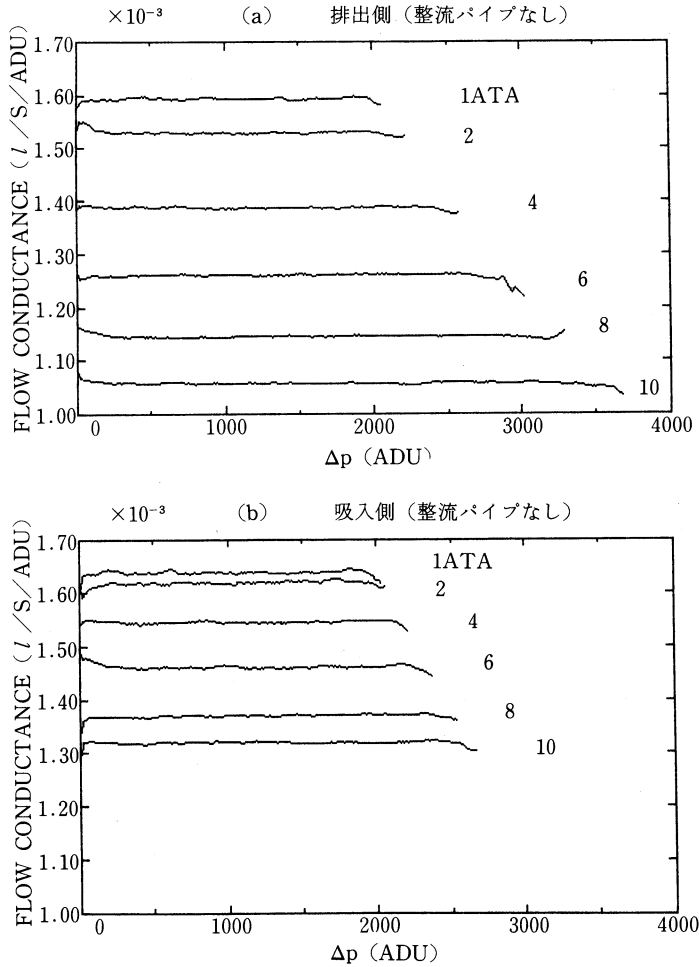


図8 空気加圧に対する F_c - Δp 関係

5. 高圧ヘリオックス環境下における Breath by breath 呼吸気流量測定 ((4)の測定結果)

図11に呼吸気流量の Breath by Breath 連続測定パターンを示す。表2は、① F_c に代えて平均値 $\overline{F_c}(1)$ を用いて測定した呼気排出量 $V_T(1)$ 、② ガス回路を取り除いた状態で測定した F_c の平均値 $\overline{F_c}(2)$ を用いた呼気排出量 $V_T(2)$ 、及び(5)式の算出値を対比して示したものである。

表2における誤差率は(5)式による $V_{T(Fc-\Delta p)}$ の測定値を基準として算出した。

ガス回路を付けて測定した F_c の平均値 $\overline{F_c}(1)$ を用いて算出した $V_T(1)$ は F_c - Δp 関係による

$V_{T(Fc-\Delta p)}$ と比較すると、誤差率は一例を除けば2%以内であり、すべてマイナス側に偏っていた。

考 察

1. 高圧ヘリオックス環境下のフロー特性

(1) 環境パラメータに対する F_c の様態

図5(a)における $\overline{F_c}$ の変化は31ATAから12ATAに減圧したとき17.7%の増大、フロー抵抗は15.3%の減少であった。この間環境圧以外、他の環境条件(表1)に大きな変化はなく、ヘリウム濃度は94.6%から93.2%の変動にすぎない。この $\overline{F_c}$ の増大、 $\overline{F_R}$ の減少は減圧による圧力効果が寄与しているものと思われる。

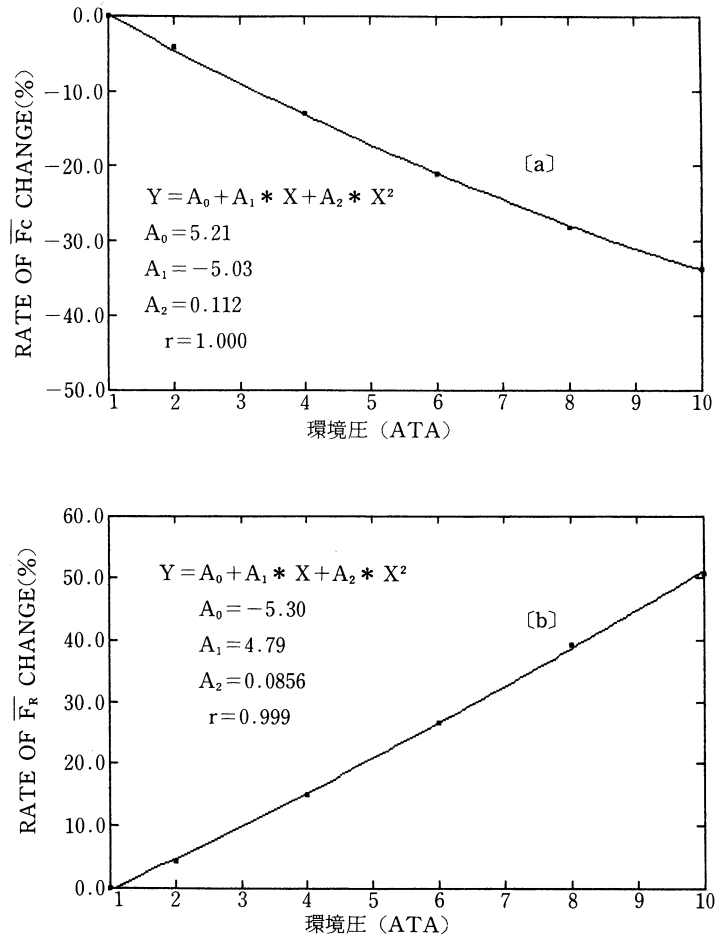


図9 空気加圧に対する(a) $\overline{F_c}$, (b) $\overline{F_R}$ の回帰曲線

1ATAの環境下における $\overline{F_c}$ の増大は、12ATAのものと比較すると43.1%の増加率となった。この増加要因としては減圧の要因に加え、表1に示すように F_{He} の減少によるガス組成変化の要因が関与しているものと思われる。

(2) FCの測定精度

測定された F_c の精度を吟味するために、2lのシリンジによるフロー入力に対して再度 Δp を測定して、測定された F_c を用いて $\Sigma(F_c \cdot \Delta p) \cdot \Delta t$ の算出値と、入力流量2lとの誤差率、および確率誤差を計算した。その結果、表3に示すように誤差率は高々2%、確率誤差は 3.42×10^{-3} であった。

一定の環境パラメータのもとで測定されたFCは高い再現性を持つことが確かめられた。

2. 変動要因に対するFCの様態

FCの変動要因として環境圧、測定ガス成分、入力側ガス回路の形状の変化を取り上げ、これらの要因がFCに与える効果を考察する。

(1) FCのヘリウム濃度依存性

図7の曲線から見られるように、 F_{He} の増大に伴い $\overline{F_c}$ の変化率は低下した。 $\overline{F_R}$ の変化率は F_{He} の増加にしたがってほぼ直線的に増加した。 $F_{He}=0\%$ から $F_{He}=70\%$ の変化に伴う $\overline{F_R}$ の増加率は9.4%であった。この回帰曲線を外挿すると $F_{He}=100\%$ では14%の増加率となる。これは空気に対するヘリウムガスの粘性係数の増加率7.39%の寄与をはるかに超えるものである。

この測定における、FCの測定精度を確かめるために、すべてのパラメータ F_{He} について測定値 $\Sigma(F_c \cdot \Delta p) \cdot \Delta t$ の確率誤差、およびシリンジ入

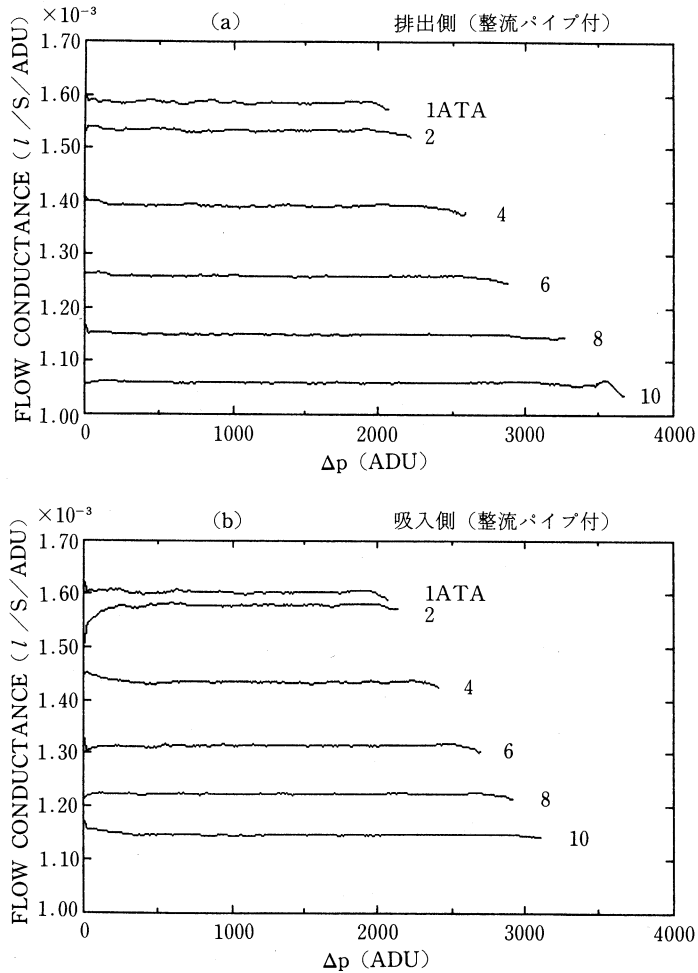


図10 空気加圧下で、吸入側に整流パイプを連結したときの F_c - Δp 関係

力容積 (2l) に対する誤差率を求めた。その結果、確率誤差は 6.53×10^{-4} 、誤差率は1%を超えるものはなかった。このことは一定のヘリウム濃度環境下において、ニューモタコメータによる安定した気量測定が可能であることを示している。

(2) F_c の圧力依存性

図8の F_c は一定の環境圧に対しては差圧 Δp の全領域に対してはほぼ一定であった。この F_c は環境圧の増大に伴って減少した。

深海潜水シミュレータでの手動シリンジによる測定結果と比較すると、 Δp の全域における F_c の変動は小さくなった。この改善はフロー入力完全に近い正弦波であること、またガス回路が開放

系で単純であることなどに起因するものと考えられる。

図9から $\overline{F_c}$ の変化率は加圧に伴って2次曲線的に減少して、10ATAでは33.9%減少率を示した。

(3) 入力側ガス回路の形状による F_c の依存性

(3)の測定において、整流パイプの付加によって排出時の F_c (図10(a))は図8(a)と比較するとほとんど影響はみられなかったが、吸入時にはそれぞれの圧力環境下で図8(b)と比較して著しい F_c の低下が認められた。この結果から、ニューモタコメータのフロー入力側のガス回路の形状変化が F_c に大きな変化をもたらすことが明らかになっ

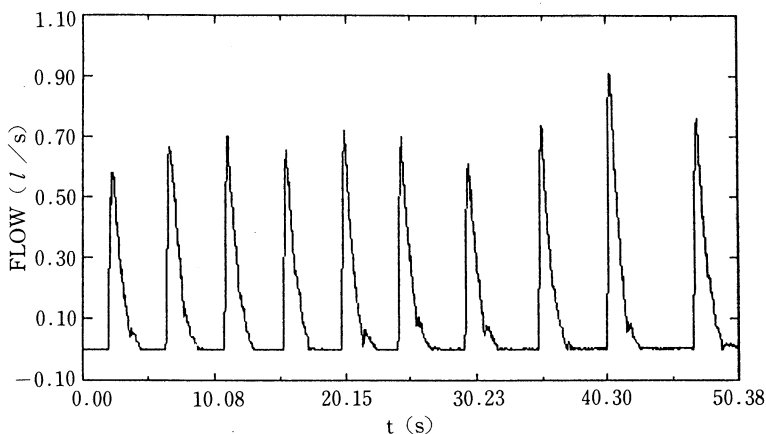


図11 31ATA ヘリオックス環境下における安静時の呼気流量パターン

表2 ガス回路の有無, FCの求め方の違いによる一回呼吸量の比較

Breath No.	$V_{T(FC-\Delta P)}$ (mℓ)	$V_T(1)$ (mℓ)	誤差率 ER1(%)	$V_T(2)$ (mℓ)	誤差率 ER2(%)
1	555.9	550.4	-0.986	643.8	15.8
2	621.1	610.4	-1.71	723.8	16.5
3	568.6	560.3	-1.47	657.6	15.6
4	531.7	530.1	-0.296	614.7	15.6
5	588.6	550.1	-6.55	641.1	8.92
6	574.7	568.5	-1.08	668.3	16.3
7	534.0	529.9	-0.768	616.4	15.4
8	599.7	596.3	-0.573	703.2	17.2
9	765.2	751.9	-1.74	913.1	19.3
10	659.0	658.1	-0.142	783.7	18.9

$$V_{T(FC-\Delta P)} = \sum (F_c \cdot \Delta p) \cdot \Delta t$$

$$V_T(1) = \sum (\overline{F_c}(1) \cdot \Delta p) \cdot \Delta t$$

$$V_T(2) = \sum (\overline{F_c}(2) \cdot \Delta p) \cdot \Delta t$$

$$\text{誤差率 ER1} = \{V_T(1) - V_{T(FC-\Delta P)}\} / V_{T(FC-\Delta P)} \times 100\%$$

$$\text{誤差率 ER2} = \{V_T(2) - V_{T(FC-\Delta P)}\} / V_{T(FC-\Delta P)} \times 100\%$$

$\overline{F_c}(1)$: ガス回路を付けて測定した FC の平均値

$\overline{F_c}(2)$: ガス回路を取り除いて測定した FC の平均値

た。この結果は FUNICANE⁶⁾等の報告とも一致する。

図12の(a)~(d)で示された折れ線図はそれぞれの環境圧に対してパイプの付加による $\overline{F_c}$ の変化を表す。排出時の $\overline{F_c}$ はグラフ(c), (d)に見られるようにパイプの付加によってほとんど変動は認められなかったが、吸入時の $\overline{F_c}$ は(b)のように

環境圧が増大するにしたがって、排気時の $\overline{F_c}$ に、より近づく傾向を示した。

深海潜水シミュレーションタンク内においても同様の実験を試みた。ガス回路を除きシリンジロをニューモタコメータに直結して31ATA, 1ATAで $\overline{F_c}$ を測定し、ガス回路付きの結果と比較した。このガス回路を付けたとき、 $\overline{F_c}$ の減少率

表3 Fcの精度をみるために、 $\Sigma (Fc \cdot \Delta p) \cdot \Delta t$ と入力流量2lとの比較

ストローク NO.	3lATA		18ATA		12ATA		1ATA	
	計算値 (l)	誤差率 (%)	計算値 (l)	誤差率 (%)	計算値 (l)	誤差率 (%)	計算値 (l)	誤差率 (%)
1	1.989	0.553	1.961	1.969	2.025	1.258	2.031	1.533
2	1.998	0.086	1.964	1.825	2.018	0.916	2.032	1.599
3	2.002	0.122	1.965	1.767	2.008	0.376	2.023	1.126
4	2.009	0.468	1.996	0.210	1.998	0.081	2.030	1.489
5	1.989	0.537	1.972	1.401	2.006	0.306	2.039	1.930
6	2.001	0.070	1.995	0.228	2.018	0.638	2.019	0.944
7	1.990	0.515	2.007	0.354	2.005	0.247	1.996	0.200
8	1.971	1.447	1.981	0.940	2.006	0.288	2.010	0.513
9	1.972	1.402	1.990	0.503	2.015	0.756	2.001	0.047
10	1.996	1.689	1.970	1.491	1.996	0.220	2.015	0.731
平均	1.992		1.980		2.010		2.020	
確率 誤差	2.65× 10 ⁻³		3.42× 10 ⁻³		1.98× 10 ⁻³		3.01× 10 ⁻³	

計算値 = $\Sigma (Fc \cdot \Delta p) \cdot \Delta t$
 誤差率 = $(\Sigma (Fc \cdot \Delta p) \cdot \Delta t - 2.00) / 2.00 \times 100(\%)$

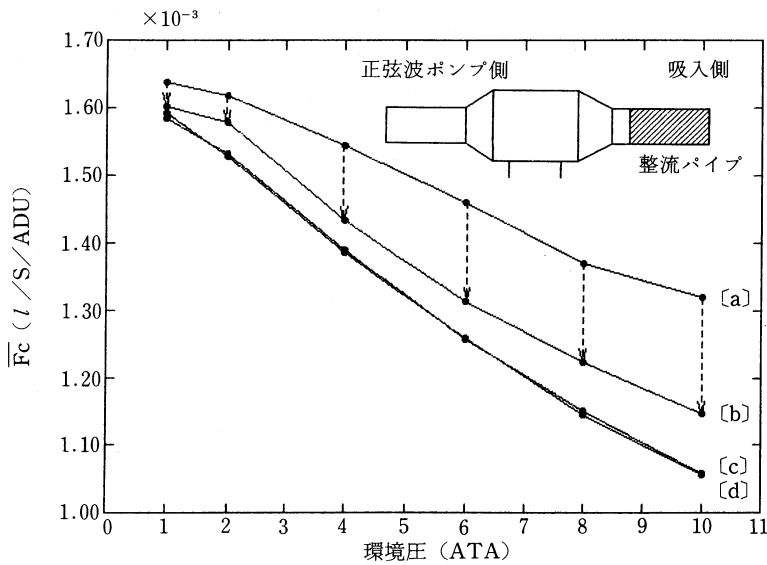


図12 空気加圧下における、整流パイプの付加による Fc の変化
 正弦波ポンプの吸入時：(a)整流パイプなし、(b)整流パイプあり
 正弦波ポンプの排出時側：(c)整流パイプなし、(b)整流パイプあり

は直結の場合に比し 3lATA で17.9%、1ATA で 6.6%の低下率であった。

この測定結果は、フロー測定システムの校正に

においては実際のガス回路を付けた状態で行なうべきであり、また加圧が大きくなるほどガス回路の形状変化に注意する必要があることを示唆するも

のである。

(4) 高圧ヘリオックス環境下における Breath by breath 呼吸気流量測定

表2に示した3つの異なるフローコンダクタンスに対応する呼吸排出量の差異はガス回路に依存するシステムの誤差と考えられる。これを補正すれば差異は1%以内になる。ガス回路を取り除いてシリンジをニューモタコメータに直結して測定したFCの平均値 \overline{Fc} (2)による $V_T(2)$ は $V_{T(FC-\Delta P)}$ と比べて、誤差率が19%を越えるものがあった。

ここで、誤差要因について考察する。気量測定誤差 ΔV は、測定系の機械的および電気的オフセットを ΔV_0 、Fcの誤差率を $k(=\Delta Fc/Fc)$ とすれば一般に、

$$\Delta V = \Delta V_0 \times kV$$

で表わされる。ただしVは単位時間の測定気量である。

いま、 ΔV_0 とkがわかれば、誤差 ΔV は系統的補正が可能である。校正時に2つの異なる容積をもつシリンジを用いて、それぞれの容積 V_1 、 V_2 に対する測定誤差 ΔV_1 、 ΔV_2 を測定することにより、この ΔV_0 とkは実際に測定可能である。この処理によって、測定の確度は測定精度の限界まで改善することが可能である。

次にニューモタコメータ内のガス流の状態を吟味する。図12における安静呼吸の最大流量 \dot{V} は0.9 [l/s]、これは気流速にして0.84 [m/s]にあたる。高圧ヘリオックス環境ガスに対するレイノルズ数は以下のように求められる。ニューモタコメータ内のラミナによる細管の断面の代表長は $D=0.000958\text{m}$ ($4 \times \text{断面積}/\text{周の長さ}$)⁸⁾、ヘリウムガスの粘性係数 η は気温27°Cにおける気圧0.1 MPa(約1ATA)、5MPaにおいて、それぞれ $\eta=19.76$ 、 19.79poise である。このように η は気圧にほとんど依存しないので27°Cにおけるヘリウムガスの粘性係数は19.8poiseをとる。密度 ρ は表1から $\rho=6.759$ [Kg/m³]である。したがってレイノルズ数Reは、

$$Re = (\dot{V} \cdot D) / \mu$$

$$= (0.837 \times 0.000958) / (4.16 \times 10^{-6}) = 274$$

となる。(動粘性係数 $\mu=19.8 \times 10^{-6}/6.76$)これは乱流条件 $Re > 2310$ に比し、十分小さい。このとき31ATAのニューモタコメータ内の気流の様態は一応層流領域と考えられる。

ちなみに、この形状のニューモタコメータにおいて37°C、31ATAにおける気流の乱流条件はヘリウムガスについては流量7.58 [l/s]、あるいは気流速7.06 [m/s]以上、大気圧空気下においては流量31.7 [l/s]、あるいは気流速29.4 [m/s]以上である。

しかしながら、ニューモタコメータの吸気側に整流パイプを連結するとFCが変化する。これは気流の出入口の端縁効果によるガス流の乱れに対してラミナが完全に層流化しきれないことを示唆するものである。

この観点から高気圧条件下でのニューモタコメータの使用にあたっては、この端縁効果に十分配慮すべきである。また校正についても実際の使用ガス回路条件下で行なうべきである。

ま と め

高圧ヘリオックス環境下におけるフロー測定システムの特性測定において次の結果を得た。

(1) ヘリウム濃度の増大はFCを低下させる。実験的に得られたFcの変化率とヘリウムの関係は、 $y = a_0 + a_1x + a_2x^2$ (y : Fcの変化率, x : F_{He} (%), $a_0=0.0573$, $a_1=-0.161$, $a_2=0.000493$)であった。

(2) 環境圧の増大によって、FCは低下した。実験的に得られたFcの増加率と環境圧の関係は、 $y = a_0 + ax_1 + a_2x^2$ (y : Fcの変化率, x : 環境圧(ATA), $a_0=5.21$, $a_1=-5.03$, $a_2=0.112$)であった。

(3) ニューモタコメータの感度に対する整流パイプの端縁効果による乱流の抑制は環境圧の増大とともにより大きなものとなる。

(4) 使用したニューモタコメータにおいて、31ATA、ヘリオックス環境下、安静呼吸時の最大呼吸気流量0.9 [l/s]におけるレイノルズ数は $Re=274$ であった。この場合、層流域の原理的限界は流量7.58 [l/s]である。しかしながら、実際に、この層流条件を得るためには端縁効果を考慮して、整流パイプの形状を適切に決定すべきである。

(5) 実際のガス回路によるBreath by breath気量測定において平均の \overline{Fc} を用いた測定値は $Fc-\Delta p$ 関係を忠実に適用した場合の測定値に対して、その誤差率は高々2%であった。またシステム誤差の系統的補正を得る校正法によればこの

誤差率は1%以下まで改善することができる。

謝 辞

本実験を行なうにあたり多大の支援を頂きました海上自衛隊潜水医学実験隊司令海将補資田清, 副長一等海佐米田憲弘の各氏, ならびに関係者各位に感謝いたします。

また, 測定システムの制作に協力頂きましたウエストロン(株)の渋谷寛人, 石井均, 鈴木康士, 測定・データ解析にご助力頂きました東京理科大学の加藤泰弘, 杉光克彦の各氏に感謝します。

【参 考 文 献】

- 1) 小此木国明, 小沢浩二, 中林和彦, 橋本昭夫, 甲斐有司, 大野文夫, 妹尾正夫, 鈴木卓, 大岩弘典: 潜水医学実験隊の新しい深海潜水シミュレータ. 日本高気圧環境医学会雑誌, 21(3), 121-129, 1986
- 2) 大岩弘典, 小此木国明, 橋本昭夫, 甲斐有司, 大野文夫, 妹尾正夫, 鈴木卓, 永野昭則, 富沢儀一, 渋谷寛人, 石井均, 西功: 高圧環境下の呼吸循環動態に関する研究—breath by breath呼吸気 pattern 及び換気・血流測定法に関する基礎的研究—. 日本高気圧環境医学会雑誌, 22(1), 61-69, 1987
- 3) Miller, M.R. and Pincock, A.C.: Linearity and temperature control of the Fleisch pneumotachograph. J. Appl. Physiol., 60(2):710-715, 1986
- 4) Turney, S.Z., and Blumenfeld, .: Heated Fleisch pneumotachometer: a calibration Procedure. J. Appl. Physiol. 34(1):117-121, 1973
- 5) Yeh, M.P., T. D. Gardener, R.M., and Yanowitz, F.G.: Effect of O₂, N₂, and CO₂ composition on nonlinearity of Fleisch pneumotachograph characteristics. J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise physiol. 56(5):1423-1425, 1984
- 6) Finucane, K.E., Egan, B.A. and Dawson, S.V.: Linearity and frequency response of pneumotachometer J. Appl. Physiol. 32(1): 1221-126, 1972
- 7) Yen, M.P., Gardner, R.M. Adams, T.D., and Yanowitz, F.G.: Computerized determination of pneumotachometer characteristics using a calibrated syringe. J. Appl. Physiol: Respirat. Environ. Exercise Physiol. 53(1): 280-285, 1982
- 8) 白倉昌明: 機械工学便覧改訂第6版(分冊8) 東京, 社団法人日本機械学会, 8-13, 1986