高圧環境下の換気動態に関する研究

大岩 弘典*

ON THE VENTILATORY DYNAMICS UNDER
HIGH ATMOSPHERIC PRESSURES

Hiromichi OHIWA†

The maximum voluntary ventilation (MVV) has been measured up till now as the only index of the ventilatory dynamics under high atmospheric pressures, as the MVV is known to decrease with the increase of the density in accordance with the formula: $MVV = 1/\sqrt{\text{density}}$ (S. Miles). As referred in several reports, the said formula has been confirmed as valid to the MVV observed under hyperbaric environment. However, there still remain some problems to be solved in the measurement of the MVV itself, such as the breathing mechanics involved. It is uncertain that the MVV reflects clearly the ventilatory dynamics under high pressures.

This paper shows some experimental studies to determine the best indicator which faithfully expresses the ventilatory dynamics under the hyperbaric environment.

The pressure-flow relationship of the air flow in a simulated breathing by a sine wave pump, satisfied under various ambient pressures is expressed by the Rohrer's equation: $P = K_1 \dot{V} - K_2 \dot{V}^2$ (P : driving pressure, $\dot{V}$: air flow, and K_1 & K_2 : parameters concerning the physical properties of the gas mixture), being a nonlinear relation. It was obvious that the parameter K_2 , concerned with the gas density, increased proportionally to the increase of the depth. The K_2 value tended to increase with the increase of the turbulence in ventilation. The viscous resistance (viscance) value $\Delta P/\dot{V}$ followed straight lines in respect to the increase of atmospheric pressure and the gradient became larger with the increase of the air flow. Viscance value nearly doubled at 4 Ata compared with those at 1 Ata. MVV in 14 subjects, having approximately the same ventilatory functions, decreased with the increase

of the ambient pressure. The observed MVV under high pressures showed decreases by 40.3% and 53.4% at 4 and 6 Ata respectively against the MVV value at 1 Ata, and %MVV were 61.8% and 50.3% respectively, while their observed %MVV at 1 Ata were 105%. This means that the ventilatory dynamics capacity become in almost half of the 1 Ata values.

The measured FEV_{1.0} or one minute value of "vital capacity through effort" under increasing ambient pressures did not coincide with the predicted values. And the decrease of the rate of FMF 25-75% or intermediate flow-rate through maximum effort at 1 to 6 Ata was very significant, i.e. 46.5% and 59.6% at 4 and 6 Ata respectively.

As a result of this study, the following formula was obtained: $Y = 2.0689X^{-0.4452}$ (Y : measured F MF, X : ambient pressure). The FMF values thus obtained could well represent the pressure-flow relationship of the air flow in the simulated breathing under various ambient pressures. Accordingly, the FMF value reflects the ventilatory dynamics faithfully under hyperbaric environments. This fact depends on the "effort independent" during the measurement, because hyperbaric effects on the ventilation are only reflected in the increase of viscous resistance of the air-way.

On the contrary, the MVV under hyperbaric environments is influenced by many factors, such as efficiency fluctuations of the respiratory muscles, elastance and inertance during one cycle of ventilation. consequently, at MVV measurement, certain errors may be introduced to the measured values. Therefore, mean decrease rate of the MVV does not agree with the calculated value from the Miles' formula, being smaller than those obtained by other authors, and FEV_{1.0} values obtained at hyperbaric environments do not also reflect the hyperbaric effect.

*東京医科歯科大学医学部衛生学教室 (主任: 北 博正教授)

昭和44年6月3日受付, 普通掲載

†Department of Hygiene (Chief: Prof. H. Kita), Tokyo Medical and Dental University School of Medicine

Received for Publication June 3, 1969.

I はじめに

高圧環境で働く潜水夫や潜函夫が過換気により疲れを感じる現象については、高圧下での換気予備能力の減少によるものとされてきた¹⁰⁾。高圧環境の身体におよぼす影響を考慮する場合、環境圧（全圧）の生理学的影響の他に、環境ガス（呼吸媒体）分圧の支配する役割を考慮することが重要である。全圧の増加の生理学的な一つの効果は、呼吸仕事量の増加にある⁵⁾。

呼吸仕事量の増大は、高圧下作業の場合における、深度および作業強度にある限界を要求することになるであろうし、SCUBA 潜水呼吸装置のような外部仕事量の増大をきたす装置をつけた場合、さらにその限度が低下することになるであろう^{4,13)}。

呼吸仕事量の増大は、呼吸媒体の密度の増加により、同一換気に対する駆動圧の増加にあるとされ、その説明として、大気圧下の呼吸系における機械的仕事についての Rohrer の式が適用される⁷⁾。この式は一般に駆動圧 P_{alveolar} は、層流 P_{lamminar} および乱流 $P_{\text{turbulent}}$ を反映する圧力の和として示され、 $P_{\text{alv}} = P_{\text{lamminar}} + P_{\text{turbulent}}$ で表わされる。

高圧環境が人の換気予備能におよぼす影響を測定する場合、動的換気能の指標をもって、論じられてきた^{11,13)}。そこでは、主として最大換気量および努力性肺活量：一秒量に与える影響が考慮されてきた。

本邦でも潜函従事者を対象とした呼吸数、換気量および代謝についての報告があるが実際に高圧下で測定されたもので、換気指標の低下を系統的に報告したものはない。

従来、最大換気量の測定値が、高圧環境における、換気動態を表わす指標として用いられてきたが、この指標の測定にさいして考えられる種々の換気力学的要因のため¹⁵⁾実際に当該環境圧で認められる、主として、気道抵抗の増加に由来する換気面での効果を忠実に反映するのに難があることが考えられる。そこで著者は高圧環境が換気動態に与える影響を評価するための指標を検討す

Fig. 1 Schematic diagram of experimental arrangement

るために以下の実験をおこなったものである。

II 実験方法及び対象

1. 人工肺 (sine-wave pump) による予備実験

人工肺(正弦波加圧ポンプ)を用いて、Fig 1 に示すとき、ブロックダイアグラムのもとで、1 回換気量 (V_T) 1116 ml, 呼吸数(RR), 16, 25および33の換気をおこなわしめ、1~6 絶対気圧 (Ata) 下における、空気呼吸時の流速($\dot{V}$)—圧(Δp) 特性を求めた。 $\dot{V}$ および Δp は呼吸流速計 (日本光電 M-EPI) により差動トランス方式による気流およびストレインゲージ方式による圧トランスジューサーで得られたものである。

2. 正常肺機能保持者における実験

正常肺機能をもった健康男子で肺機能予測値の偏差の少ない14名を被験者として用いた。

被験者の基礎的データおよび肺機能検査成績を Tab. 2 および Tab. 3 に示す。

1~6 Ata のもとで 9 l—Benedict-Roth 型 spirometer を用い、最大換気量 (MVV), 努力性肺活量 (一秒量): FEV 1.0 および努力性呼出曲線より FMF 25-75% を測定した。

用いた spirometer の 1 Ata における空気に対する粘性抵抗は、0.43 cmH₂O/l/sec である。MVV の測定は、呼吸数60/分による方法であり、spirometry は標準

Tab. 1 Physical properties of the air

Temperature	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°
Density (ρ) * ¹	1.379	1.298	1.272	1.250	1.228	1.208	1.118
Viscosity (η) * ²	1.743	1.768	1.794	1.819	1.844	1.868	1.895
Kinematic Viscosity (ν) * ³	1.322	1.366	1.410	1.456	1.501	1.547	1.593

*¹ $\times 10^{-1}$ g/cm³

*² $\times 10^{-6}$ g/cm sec.

*³ $\times 10^{-5}$ cm²/sec.

Tab. 3 Measured of base-line ventilatory dynamics conducted at 1 atm. abs. with 9 liter Benedict-Roth spirometer.

	Mean*	± S D
predicted vital capacity (liter)	4.18	0.9
measured vital capacity (liter)	4.49	0.45
percentage vital capacity (%)	106.6	9.2
predicted MVV ₆₀ (1/min.)	125.3	5.2
measured MVV ₆₀ (1/min.)	129.4	13.8
percentage MVV (%)	105.2	11.6
percentage FMF _{25-75%} (1/sec.)	4.98	0.82
measured FEV _{1.0} (%)	85.6	8.2

* N=14

MVV: maximum voluntary ventilation

FEV: intermediate flow-rate through maximum effort

Tab. 2 Vital statistics of subjects* in this study.

	Mean	± S D
Age (yrs)	24.0	2.7
Height (cm)	169.0	3.8
Weight (kg)	59.1	5.6
Body surface area (sq. m)	1.68	0.1

* N=14

の方法によった。¹⁵⁾

被験者を高圧環境に馴れさせるため、家験開始前約3週間に数回の高圧暴露を行なったが、いずれの被験者も、高圧暴露に対し、異常な症状を認めなかった。測定時の環境は、高圧室内にセットされた水冷クーラーにより、1気圧の圧変化に対し、温度偏差±3°以内、湿度20%以内にコントロールされ、圧平衡誤差は±5 mmHg以内に保たれた。

III 結 果

1. 人工肺における予備実験

呼吸流速計の気流トランスジューサーは高圧下でその特性が変わるものと考えられてきた¹²⁾。差圧計スリット部における空気の流れは、poiseuilleの法則から、流量;

$$Q = \frac{\pi r^4}{8 \eta l} \cdot \Delta p$$
(r: 管径 l: 管の長さ η : 粘性 Δp : 圧)である故、 $\Delta p = Q \frac{8 \eta l}{\pi r^4}$ で示される。そのため、呼吸流速計の差圧計の入力は空気の粘性のみにより変化し、高圧環境下で生じる密度の増加による影響は除かれるものと考えられる。そこで、環境圧の急激な変化で生

ずる温湿度変化について検討した。Tab.1は、空気の密度、粘性、および動粘性の温度変化を示す。気体粘性係数は温度とともに若干増加をするが、粘性の増加による影響は無視出来るが受圧膜の物理的性質の変化による影響は大きく、無視できない。すなわち、環境温湿度の変化が、差圧計の受圧膜(膜の材料として myler を使用)のインピダンスに影響するので、この受圧膜にアルミニウム蒸着膜を被覆したところ、Fig.2に示すがごとき、気圧、温湿度の変化に影響を受けない特性を得ることができた。

Fig.3は空気呼吸時の $\Delta p-\dot{v}$ (pressure-flow)関係を示す。この関係から空気呼吸時では、高圧下における $\Delta p-\dot{v}$ 関係は、非直線形を示し、この関係はまた、大気

Fig. 2 Characteristics of pneumotachograph under high pressure (Temperature: °C—Relative Humidity: %).

Fig. 3 Pressure flow characteristics under high pressures.

Fig. 4 Air flow resistance (viscance value) under high pressures. V_T : ventilatory
y: viscance value, x: abs. atm. pressures.

圧下における呼吸系の $\Delta p - \dot{V}$ 関係を表す Rohrer の式 $\Delta p = k_1 \dot{V} + k_2 \dot{V}^2$ を満足させる結果を示した。高圧下では、この式の 2 次成分の増加、就中、呼吸ガス密度に由来する定数 k_2 (Bernoulli) の増加に原因することが明らかとなった。この関係から viscous resistance (viscance) value は、Fig. 4 に示すごとく 1 次式で表され、いずれの式の勾配も、 $\dot{V}$ の大きいほど急峻を示し、その値は 4 Ata でいずれも約 2 倍の値を示した。

2. 正常肺機能保持者における実験

Fig. 5 は高圧下で測定された空気呼吸時の被験者 14 名の MVV の実測値の平均値および減少率の平均値を示す。MVV の減少は 1 Ata の値に比較し、4 Ata で 40.8% および 6 Ata で 53.4% 減少である。この被験者群の %MVV は、Fig. 6 に示すごとく、4 および 6 Ata で、それぞれ 61.8% および 53.4% を示すが、被験者群

Fig. 5 Mean percentage decrease of measured % MVV with increasing hyperbaric pressures

Fig. 6 Mean percentage decrease of measured % MVV with increasing hyperbaric pressures

の %MVV は大気圧下で 105% を示すので、この結果から人の換気予備能は 6 Ata で 1/2 になることが示された。高圧環境下における MVV の減少を理論的に計算した Miles の式: $MVV \propto 1/\sqrt{\text{density}}$ は 4 Ata で MVV が 1/2 になることを示すが、これら被験者群で得られた実測値は計算値より軽度の減少を示した。この減少曲線も上記の Miles の理論曲線とは、 χ^2 検定で一致しない結果となったが、曲線の形状は相似した。

Fig. 7 は被験者群の % FEV_{1.0} の高圧下における減少率の平均と、FEV_{1.0} の実測値を 1 から 6 Ata において示したものである。

MVV の高圧下における減少と比較して、FEV_{1.0} の

Fig. 7 Mean FEV_{1.0} with increasing hyperbaric pressure.

低下が著明でない。その結果 FEV_{1.0} の減少率は 4 Ata で18.0%, 6 Ata で31.0%の減少を示した。

Fig. 8 は FMF_{25-75%} の高圧下における減少を示したもので、2, 4 および 6 Ata で、それぞれ、23.7%, 46.5%および59.6%と顕著な減少を示した。高圧下における各被験者群の間で、MVV に比較して、FMF では各人の実測値の再現性が良い結果を示した。この被験者群の FMF の減少曲線は、 $Y=2.0689X^{-0.4452}$ の式で表わされた。この高圧環境下における FMF の減少は、simulate breathing で得られた $\Delta p-\dot{v}$ 関係で示される。同一駆動圧のもとでの気流速の減少から計算された、減少曲線に一致する成績を示した。高圧下における

Fig. 8 Mean PMF_{25-75%} with increasing hyperbaric pressure.

MVV の減少を予測する Miles の式にも χ^2 検定で一致を示した。

Fig. 4 は、この実験に用いた、被験者群の動的換気能の観察された指標の平均値および減少率の平均値を一括して示したものである。

Tab. 4 Results of measurement of ventilatory dynamics at pressures of 1 to 6 atm. abs., breathing air.

atm. abs.	percentage decrease MVV ₆₀		measured percentage MVV ₆₀		percent FEV _{1.0}		FMF _{25-75%}	
	Mean %	± SD	Mean %	± SD	Mean %	± SD	Mean 1/sec.	± SD
1 N=14	—	—	105.2	11.6	85.6	8.2	4.98	0.82
2	16.2	8.5	87.3	5.3	80.6	7.7	3.78	0.55
3	30.5	7.9	72.3	3.9	73.7	7.4	3.26	0.56
4 N=10	40.8	9.3	61.8	5.8	66.7	9.0	2.76	0.52
5	45.7	5.3	58.4	3.9	62.4	8.0	2.56	0.90
6 N= 6	53.4	3.6	50.3	4.3	56.8	7.1	2.16	0.73

IV 考 察

換気仕事 (力×変位) は、 p なる圧力により、 v_{cc} だけ肺内ガス量の移動がある故に $w = \int_0^v p \cdot dv$ で表現することができる¹⁵⁾。この機械的仕事に要する力 (Δp) は、変位 (気流) の速度 $dv/dt = \dot{v}$ にもとづくものとされ、 $p = k_1 \dot{v} + k_2 \dot{v}^2$ で表される⁷⁾。そこでは、 k_1 は流れの層流に対する定数 (Poiseulli) でガスの粘性に起因し、 $\frac{8\eta l}{\pi r^4}$

(l ; 管の長さ, η ; 粘性, r ; 管径) で表され、 k_2 は流れの乱流に起因するガスの密度に由来する定数 (Bernoulli) で、 $\rho \cdot R \cdot a \cdot l$ (ρ ; 密度, $R \cdot a \cdot l$: 管の形態に関する幾何学的定数) で表わされる。

流れが乱流に傾くか、否かについては、Reynold 数 R が適用され⁵⁾ ($R = \frac{\pi v \rho}{7} \cdot v$, v : 流速) 管径と流速が一定の場合には、その流れの乱流傾向は、粘性に対する密度の比、動粘性 (kinematic viscosity) による。実験的

には、R の critical value は約 2000 とされ、この値をこえると乱流に傾くといわれる⁷⁾。そこで真の抵抗は、密度に比例し、粘性に反比例するものとなり、動粘性の増加した場合には、乱流の増大により抵抗が増すとも考えられる。

人工肺における実験成績のごとく、高圧下空気呼吸時の viscance value: $\Delta p/\dot{V}$ は 1 次式で表され、4 Ata で約 2 倍の値を示した。さらにその勾配は、気流速の大きいほど大であり、得られた $\Delta p-\dot{V}$ 特性は Rohrer の式を満足させる結果を得た。viscance value の増加は、式の 2 次成分の増加であり、就中、呼吸ガス密度に左右される定数 k_2 の増加によるための乱流傾向の増大に由来するものである。

以上の予備実験における結果はつぎのことを推察させる。すなわち、同一駆動圧および管径を示す呼吸系にあっては、時々刻々、変化する呼吸の速度を函数とする、一呼吸週期の積分に相当する量、呼吸量は、約 4 Ata の環境圧において、約 1/2 に減少するに違いない。

Cotes, J. E. (3) は、環境圧の変化した場合の MVV を測定し、密度の低下した低圧環境下 10,000 ft. (523 mmHg), 17,000 ft. (398 mmHg), および 27,000 ft. (257 mmHg) での MVV が、海面に比して、それぞれ、12, 24 および 36% の増加を示したのに反し、密度の増加した高圧環境下、2 Ata (1,420 mmHg), 3 Ata (2,340 mmHg) および 4 Ata (3,040 mmHg) でそれぞれ MVV が、28, 40 および 49% の減少を示した。これを気圧の変化を対数軸にとると、MVV の変化は、12 Ata で 0 を示す直線で示された。しかし呼吸筋によってなされる呼吸の仕事のためには、それ以上の深度でも十分に酸素供給に应ぜられるということは、疑いもないことであり、減少の程度が大きいところ、圧の高いところで下がりすぎるので、12 Ata で 0 となり得ないはずである。

Miles, S.¹¹⁾ は高圧下での MVV の減少曲線を求め、その結果から、MVV の減少の理論式として、 $p=1/2mV^2$ (p : 駆動圧, v : 流速, m : V で決まる量) なる運動方程式を用い、MVV の如き空気の流れでは、 p は最大努力を示すので、MVV (V) が一定と考え、 $V \propto 1/\sqrt{m}$ と置き変えることができる。さらに空気の量は密度 (D) に比例するので、 $V \propto 1/\sqrt{D}$ とすることができるとし、乱流効果をおこす密度の増加が重要な因子と考えられようとのべている。Wood, と Workman ら¹⁴⁾ は、高圧下での MVV を追試してこの式に測定値が一致することを認めている。

Fig. 6 に示すように、高圧下における % MVV は、4 Ata で 61.8%, 6 Ata で 50.8% に減少しているが、この被験者群の 1 Ata における、% MVV が 105% であるので、人の換気予備能が 6 Ata で 1/2 に減少することを意味するものである。すなわち、Miles の言う理論値が、4 Ata で 1/2 を示すのに対し、減少が軽度にとどまっている。この値はこれまでに高圧下の MVV の成績を報告した諸家の値より、減少が軽度にとどまった。

MVV の測定には、吸気相での力学的因子が関与し、これには基準位の変化に伴う吸気筋の効率が関与する。¹⁵⁾ 本質的に、MVV の測定時のごとく肺容量および呼吸の pause が刻々変化する場合には、換気を反復するための呼気と吸気の切り替え (change) における慣性のため力学的効率の低下も考慮される。この肺そのものが有する、いわゆる、慣性抵抗はほとんど無視できる (0.01 cm H₂O/l/sec) と考えられているが¹⁵⁾、Mead, J.⁸⁾ によると高圧下では肺の慣性抵抗が圧の増加に比例すると述べている。MVV の測定に際しては、肺・胸廓等、とくに胸壁および横隔膜を介して伝わる腹壁、腹腔内容の慣性ならびに測定装置の慣性が問題となる。さらに最大努力の換気効率の維持と筋の疲労の問題は、高圧下で換気仕事量の増大した場合には、無視できないものとなる¹⁵⁾。

Bartlett, ら¹⁾ は、MVV の測定時に吸気抵抗が呼気抵抗付加時より大きく影響することを認め、外部抵抗が小さい場合、MVV が最大値を示す際の呼吸数は 120/分 にあり、最大抵抗付加時のそれは 40/分であったと報告している。このように MVV の測定値は複雑な生理学的因子を反映するが、さらに高圧下での MVV 測定に際して、肺・胸廓系の弾性収縮力が優勢な影響を与えることは考慮されるであろう。

実際、最大換気時の仕事に占める弾性仕事は大なるものであり²⁾、この事実は上記の MVV 測定時の呼吸筋の効率や、慣性因子と会って、実際当該圧の下での換気予備能の減少を忠実に反映するとは言い難いものとなる。

FEV_{1.0} の減少が軽度にとどまったのみならず、大気圧に比較して、4 Ata で 18.0%, 6 Ata で 31.0% の減少にとどまり、% FEV_{1.0} の値がそれぞれ、68% および 58% を示した。この原因については、従来、FEV_{1.0} が、気道抵抗を反映するものとして、理解されてきたが、Mead⁹⁾ によると、FEV_{1.0} の値は被験者の努力ということ为前提としており、生体側からは、気流速を起すための肺胞内圧 (肺弾性収縮力および胸腔内圧によ

て規定される)に依存するものであって、気道抵抗の上昇のみでは、肺胞内圧の上昇により代償され、流速は減少しないので、FEV_{1.0}の低下は認められないとした。

この事実⁹⁾は、肺弾性収縮力の低下および末梢気道系の抵抗の増加する慣性肺気腫のごとき疾患群と異なり、高圧下での最大努力性呼吸の測定では、その抵抗の増加が末梢気道の抵抗の増加のみにあり、主として肺胞内圧の上昇にあると予想されるものでは、呼出の早期の部を用いるがために、その低下が顕著でないという結果を生じたものといえよう。

これに反し、FMF 25-75%の実測値の減少は著明であり、環境圧、実測値の両対数図表上に直線で示される減少を示し、simulated breathingで示される $\Delta p \cdot \dot{v}$ の関係を肯定する結果を得た。この理由として、FMFがspirometryの呼出の比較的後期の部を用いるがために、気道抵抗のみによって左右され、これが、“effort independent”⁹⁾によるためであり、その再現性もMVVに比較して良いという結果を得たものであろう。

結局、高圧環境では、すべての動的換気能の指標を低下させる。すなわち、閉塞的なパターンを招来する。この説明には、換気動態の指標として、FMFの測定が他より、忠実に、高圧の効果を反映するものと考えられた。高圧環境の呼吸系に与える影響は2次的にもたらされる乱流効果に起因するものと考えられ、Rohrerの式が表わされる。そこでは抵抗の真の効果は、Reynold数で示される動的粘性(kinematic viscosity)をいうものであろう。

V ま と め

高圧環境下の呼吸においては従来、MVVが換気動態の指標として用いられてきているが、MVVの場合には、呼吸に関与する力学的因子の影響が加わってくるので、得られた値の再現性が乏しいことがいわれてきており、とりわけ、高圧下では、この傾向がさらに強まると考えられる。

そこで著者は、高圧下呼吸の場合、最も適した、換気動態指標を決定するための研究を行ないつぎの成績を得た。

(1) 高圧環境 (1-6 Ata) 下

simulate breathingによるair-flow characteristicsにおける駆動圧(Δp)一流速($\dot{v}$)の関係は、Rohrerの式 $p=k_1\dot{v}+k_2\dot{v}^2$ を満足させる結果を示し、環境圧の増加は、上式の2次成分、すなわち、呼吸ガスの密度に関係する定数 k_2 の増加によるものである。これは、呼吸

時の乱流傾向の増大を意味し、viscance value: $\Delta p/\dot{v}$ は各環境圧において、1次式で示され、その勾配は気流速の大きいほど、急峻を示し、この式の値は4 Ataでいずれも約2倍を示した。

(2) 高圧環境下の正常人の最大換気量

MVVの減少曲線は、Milesによる理論式; $MVV \propto 1/\sqrt{\text{density}}$ に一致せず、すでに報告された諸家の測定値より減少が軽度にとどまり、4 Ataで40.8%であり、6 Ataで53.4%はであった。この減少率は% MVVで、それぞれ、61.8%および50.3%であり、この被験者群の1 Ataにおける% MVVが105%であるので、6 Ataで人の換気予備能が1/2になをことを示す。

(3) 努力性肺活量(一秒量)(FEV_{1.0})の高圧環境下における減少は予想される減少を示さず、4および6 Ataでそれぞれ18.0%および31.0%である。

(4) 努力性呼出曲線のうちFMF 25-75%の値は高圧環境下で顕著な減少を示し、4および6 Ataでそれぞれ、46.5%および59.6%の減少を示した。また各被験者とも良い再現性を示し、近似する肺機能検査予測値を有する被験者群において、MVVに比較して、測定値の偏差の少ない結果を示した。

(5) このFMFの実測値は $Y=2.0689X^{-0.4452}$ (Y; FMF実測値, X; 環境圧)で示される減少を示し、simulate breathingにおける $\Delta p \cdot \dot{v}$ 関係から計算された減少曲線に一致する成績を示した。この成績はまた、MilesのMVVの減少を予想した理論式にも一致を示した。

(6) FMFの測定が、高圧環境の換気予備能に対し、より忠実に効果する根拠は、高圧環境が人の呼吸に非弾性抵抗の増加、就中、気道における粘性抵抗の増加をもたらすため、FMFの測定において、Mead, J.のいう“effort independent”を来たすことにある。

(7) 反面、MVVの測定時には、呼吸状態に依存する弾性・慣性および呼吸筋の効率が複雑に反映するため、測定値に誤差を生じやすく、そのため予測値より減少が軽度にとどまったものとする。他方、FEV_{1.0}の測定は高圧環境で生じるような閉塞性パターンの障害では、その環境圧が、比較的到低い場合には、その効果を表わし得ないものと考えられる。

(8) 以上の成績から、高圧下の動的換気能の指標として、spirometryのFMF 25-75%の値をもって代表することが、最も適した方法と考えた。

北博正教授のご校閲を感謝致します。

文 献

- 1) Bartlett, Jr. R.G. and Specht, H. : Maximum breathing capacity with various expiratory and inspiratory resistance (single and combined) at various breathing rates, *J. appl. physiol.*, 11(1) : 79—83, 1957.
- 2) Campbell, E.J.M. : The work breathing and the efficiency of the respiratory muscles, In *Respiratory muscles and the mechanics of breathing*, Lloyd-Luke London, 1958.
- 3) Cotes J.E. : Ventilatory capacity at altitude. *Proc. roy. soc. M.* 143 : 32.
- 4) Ledingham, I.A., McDowall, D.G., Jacobson, I. and Norman, J.N., : Oxygen administration and measurement in conscious healthy volunteers : Observations on patients with respiratory disease, In *Hyperbaric oxygenation*, Livingstone, Edinburgh and London, 1965.
- 5) Marshall, R., Lanphier, E.H. and DuBois, A.B. : Resistance to breathing in normal subjects during simulated dives, *J. appl. physiol.*, 9 : 5—10 1956.
- 6) 松藤 元, 松永知義, 正木利世, 高気圧作業の衛生学的研究, 厚生科学叢書11刊, 創元社, 東京, 1949.
- 7) Mead, J. : Resistance to breathing at increased ambient pressures, *Proceedings of the underwater physiology symposium*. Washington, D.C., NAS-NRC Publ., 112—120, 1953.
- 8) Mead, J. : Measurement of inertia of the lungs at increased ambient pressure, *J. appl. physiol.*, 9 : 208—212, 1956.
- 9) Mead, J., Bouhuys, A. Schwaber, J. and Motoyama, E. : Factors influencing maximum expiratory flow-volume relationships, *Federation proc.* 235, 1964.
- 10) Miles, S. : The effect of increase in barometric pressure on maximum breathing capacity, *Medical research council, Royal naval personnel research committee, Rept. R.N.P.*, 58/922, U.P.S., 174, 1/58, 1958.
- 11) Miles, S. : The problem of density, In *underwater medicine*, 90, Staples Press, 1962.
- 12) Severinghaus, J.W. : Anesthesia and related drug effects, In *Fundamentals of hyperbaric medicine*, Chapter 9 : 116, 1966, NAS & NRC., Washington.
- 13) U.S. Navy Bureau of Medicine and Surgery. : In *Submarine medical practice*, chapter 15, 227—242, 1956, U.S. Government printing Office.
- 14) Wood A.B. : Ventilatory dynamics under hyperbaric state. *Proceedings of 2nd symposium on underwater physiology*. 1181, 1963. NAS. and NRC Washington D.C.
- 15) 横山哲朗 : 生理学大系 II, 医学書院, 東京, 1968.