

◎原 著◎

ガス組成がフローアナライザ PF-300 の換気量測定に与える影響

大竹純平¹⁾・宮地哲也¹⁾・磨田 裕²⁾

キーワード：換気量測定、差圧式流量計、ハーゲン・ポアズイユの法則、層流、ガス粘度

要 旨

フローアナライザ PF-300 には差圧式流量計が使用されており、生じる差圧はガスの粘度や密度の影響を受ける。我々はガス組成が PF-300 の換気量測定およびガス補正機能に与える影響について調べた。測定方法は、酸素、酸素圧縮空気混合気、酸素亜酸化窒素混合気、酸素ヘリウム混合気を作成し、スーパーシリンジを用いて 300mL、500mL、800mL の一回換気量を生成した。それぞれ 10 呼吸の平均を算出した結果、酸素圧縮空気群では誤差は 1% 以下となった。ガスタイプを Air/O₂ Auto とした場合、酸素亜酸化窒素混合気では 10 ~ 11% 程低く、酸素ヘリウム混合気では 9 ~ 11% 高く測定された。いずれも適切なガスタイプを選択した場合の誤差は 4% 以下であった。換気量測定においてガス補正機能が使用できない場合、使用するガスによって大きな誤差を生じる可能性を把握しておく必要がある。

I. 緒 言

麻酔器・人工呼吸器の保守点検は臨床工学技士の主要業務の一つである。これらの点検には気道内圧、流量、換気量などの測定が必要である。フローアナライザ PF-300TM (imtmedical、Buchs、スイス、以下 PF-300) は、このような保守管理での換気量測定などに広く用いられ¹⁾、また、麻酔器、人工呼吸器を用いた各種の研究^{2,3)}にも用いられている。しかし、この装置の測定精度などについての報告はない。

PF-300 の流量・換気量測定には差圧式のフローセンサが用いられている。このフローセンサはメッシュ状金属製のスクリーンを抵抗体としたリリー型流量計⁴⁾である。差圧型フローセンサは抵抗体の前後に発生する圧力差と気体の流量が比例するという原理に基づいている。抵抗体によって発生する差圧はそこを

通過する流量だけでなく、ガスの粘度（粘性係数）、密度の影響を受ける⁵⁾。そのため測定に用いるガスの組成によって流量や換気量の測定値が異なると考えられる。

PF-300 ではガスの種類、組成を選択してこれを本体に入力認識させることで、適正な測定値を得られるように補正する機構を備えている。そこで我々は各種の混合気体を用いて既知換気量測定の精度検討と、このガス補正機構を使用した場合と補正機構を使用しない場合の測定値への影響などについて検討した。

II. 方 法

実験系の概要を Fig. 1 に示す。各組成のガスを調製するため、麻酔器（アバンスケアステーション、GE ヘルスケア、Madison、アメリカ）を用いた。麻酔器にはシリコン製の呼吸回路、スパイラルホース 60cm (Drägerwerk AG & Co、Lübeck、ドイツ) と Y 管を組み合わせ、3L 麻酔用バッグ（シリコン麻酔用バッグ、アコマ医科工業、東京）を接続した。麻酔器は

1) 帝京大学医学部附属溝口病院 ME 部

2) 埼玉医科大学国際医療センター 麻酔科・集中治療科

[受付日：2015年4月22日 採択日：2015年9月14日]

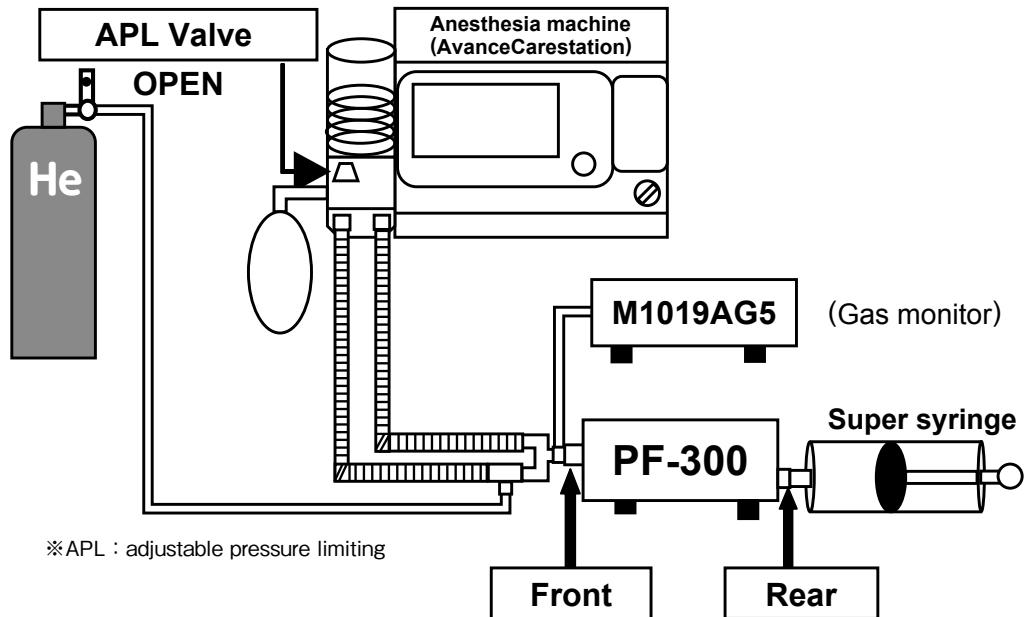


Fig.1 Circuit diagram for experimental study (See the details in the text)

各種ガスの調製・混合および供給装置として用い、人工呼吸器は使用しなかった。研究に使用したガスは、中央配管の酸素、圧縮空気、亜酸化窒素とともに、麻酔器の流量計、酸素濃度調節装置を用いて混合気を作成した。ヘリウムについては、超高純度ヘリウムボンベ (Iwatani, KK-He-7000-69-U, 99.99998%) に面積式流量計 (RK-1350V, KOFLOC, 京都) を接続して、麻酔器の呼吸回路内に流入させてヘリウム酸素混合気を得た。実際の測定に使用したガスは、酸素、酸素圧縮空気混合気、圧縮空気、酸素亜酸化窒素混合気、酸素ヘリウム混合気の5種であり、各混合気においては、その酸素濃度を約50%とした。呼吸回路内ガスの酸素および亜酸化窒素濃度を麻酔ガスマニタ (IntelliVue M1019A G5 Philips, Boeblingen, ドイツ) で測定した。

PF-300 は対象とするフローレンジによって高フロー (-300 ~ +300L/分) と低フロー (-20 ~ +20L/分) の2つのフロー測定ポートをもっている。今回は成人の換気量を想定して、高フローポートを使用した。すなわち PF-300 (S/N BA101675) の本体前面接続口に麻酔器呼吸回路のYピースを接続し、本体裏面接続口にはスーパーシリンジ (2L 換気量較正器、ミナト医科学、東京) を接続した。

麻酔器の流量計および、酸素2.2L/分・圧縮空気3.8L/分、酸素3.0L/分・亜酸化窒素3.0L/分の合計6L/分で設定、またヘリウムは外付けの流量計と麻酔器の

酸素流量計でヘリウム2.0L/分・酸素2.0L/分の合計4L/分でそれぞれ酸素濃度50%になるように調節した。スーパーシリンジのピストンを往復させながらガスを回路内に充填、および搅拌した。麻酔器の adjustable pressure limiting (APL) バルブは開放し、余剰ガスは APL バルブから排出されるようにした。回路内のガス濃度が一定になって安定するのを待って、吸気時間3秒、呼気時間3秒でスーパーシリンジのピストンを用手的に往復させ、一定換気量300mL、500mL、800mLを発生させた。連続10呼吸の換気量を測定し、換気量は PF-300 の呼気一回換気量表示値 (Vte) を記録した。実験中の室温は空調装置を24°Cに設定し、ガス温度と湿度の測定は PF-300 で行った。なお、PF-300 の換気量などは ATPD で表示した。スーパーシリンジの誤差は公称±0.8%であり、スーパーシリンジのもつ温度補正定数による誤差も ATPDにおいては1%未満であったため温度の影響は無視した。

PF-300 は使用するガス組成に応じて、換気量を補正するガスタイプ選択機能を有しており、これにより補正值を得ることができる。今回の実験では、ガスタイプの選択を酸素空気混合気では「Air/O₂ Auto」に設定し、また酸素亜酸化窒素混合気では「N₂O/O₂ Auto」と「Air/O₂ Auto」の2種類の設定、そしてヘリウム酸素混合気では「He/O₂ Auto」と「Air/O₂ Auto」の2種類の設定での比較も行った。Auto とは

PF-300 内蔵の酸素センサで酸素濃度を測定し、その時の酸素濃度および残りのガスを設定ガスの窒素、亜酸化窒素、またはヘリウムと認識させて、その組成ガスの補正定数を用いて測定値の補正を行う機構である。結果のデータは平均±標準偏差で表した。

III. 結 果

実験時の回路内ガス温度はPF-300測定値で $24 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、湿度 6% 以下であった。

各測定条件における PF-300 の測定値を Table 1 に示す。各種の混合気、および基準とした換気量(300mL、500mL、800mL)に対する表示値の平均±標準偏差を示した。カッコ内はその平均値の基準値に対する百分率を示す。酸素空気混合気の場合は「ガスタイプ」選択は全て「Air/O₂ Auto」になっており、測定値は 1% 以内の精度になっていた。酸素亜酸化窒素混合気および酸素ヘリウム混合気の場合は、「ガスタイプ」選択「Air/O₂ Auto」では 9 ~ 11% の誤差が認められた。しかしガスタイプの選択を、それぞれのガス組成に設定すると精度は 4% 以内に改善された。

IV. 考 察

PF-300 は人工呼吸器、麻酔器などの保守点検、研究などにおいて、本邦でも多くの施設で使われているが、その精度に関する検討は内外を通して報告がない。

本装置の換気量は流量を積分して求めており、そのフローセンサはリリー (Lilly) タイプ⁴⁾ のものが使われている。これは差圧フローセンサの一つで、ガス流路抵抗体の両端に発生する差圧が、流量の大きさに応じて増減するという原理に基づいている。差圧フローセンサには抵抗体の形状などにより層流型と乱流型

とがある。層流型として細管を束ねた形のフライシュー型ニューモタコグラフ⁶⁾ が有名である。これは低流量の領域ではレイノルズ数が小さく、流量と発生する差圧は正比例すると考えられている。従来から呼吸系流量の標準的測定装置として精密肺機能測定および研究などに使用されている⁷⁾。リリータイプはシルバーマンニューモタコメーターとも呼ばれ、抵抗体としては金属属性の網目状の構造物 (スクリーン) を用いている。この方式もフライシュー型と同様に、流量が小さい範囲では発生する差圧は流量に正比例すると考えられている⁷⁾。そのため一般には層流型フローセンサとして分類され、その測定精度はフライシュー型と同程度である⁸⁾。

層流型フローセンサは発生する差圧 ΔP 、流量 Q 、管半径 r 、長さ l 、ガス粘度 η の間にはハーゲン・ポアズイユの法則にしたがって以下のような関係がある。

$$\Delta P = Q \left(\frac{8\eta l}{\pi r^4} \right) \quad (1)$$

ここで l 、 r は構造体で決定される定数なので、発生する差圧は流量のほか、ガスの粘度にも比例することが示されている。測定対象のガスが異なれば、粘度が変わる。そうすれば (1) 式の差圧 ΔP が直接流量に換算されて出力・表示されるので、流量・換気量測定値はガスの種類によって影響を受けることが容易にわかる。

管内を流れる流体では、流速 (velocity) が大きくなれば層流ではなく乱流になる。乱流での厳密な解析は不可能であり、発生する圧力低下は近似的には流量のおよそ 1.75 乗、そして流体密度の 3/4 乗に比例す

Table 1 Expiratory tidal volume readings of PF-300

(O ₂ concentration) Gas type	O ₂ (100%) Air/O ₂ Auto	O ₂ /Air (50%) Air/O ₂ Auto	Air (21%) Air/O ₂ Auto	O ₂ /N ₂ O (50%) Air/O ₂ Auto	O ₂ /N ₂ O (50%) N ₂ O/O ₂ Auto	O ₂ /He (50%) Air/O ₂ Auto	O ₂ /He (50%) He/O ₂ Auto
V _T : 300mL	297 ± 2 (99%)	302 ± 1 (101%)	299 ± 1 (100%)	266 ± 2 (89%)	310 ± 1 (103%)	328 ± 3 (109%)	306 ± 1 (102%)
V _T : 500mL	496 ± 1 (99%)	497 ± 1 (99%)	500 ± 1 (100%)	452 ± 1 (90%)	518 ± 1 (104%)	557 ± 1 (111%)	518 ± 1 (104%)
V _T : 800mL	798 ± 1 (100%)	799 ± 1 (100%)	789 ± 2 (99%)	720 ± 1 (90%)	815 ± 1 (102%)	887 ± 1 (111%)	830 ± 2 (104%)

Data are mean ± SD (mL). The numbers in bracket are the ratios to corresponding value of settings.
Columns that are filled with gray are set to improper gastype (O₂/N₂O, O₂/He with Air/O₂ Auto setting).

ることが知られている⁵⁾。そのため PF-300 ではフローセンサで測定される差圧 (ΔP) と流量 (Q) との関係について、下記のような演算式を用いていると公表されている⁸⁾。

$$\Delta P = C_1 \cdot \eta \cdot Q + C_2 \cdot \rho \cdot Q^2 \quad (2)$$

ここで、 η はガス粘度、 ρ はガス密度、 C_1 と C_2 は装置固有定数とされている。

一般に低流量の領域では層流のみと考えられ、これは (2) 式では第 1 項が主要の部分になる。高流量では乱流成分が出現するので、この場合は第 2 項の要素が必要になる。PF-300 の高フローポートでは、流量測定範囲は $-300 \sim +300$ L/分、吸気・呼気換気量は最大 10L (測定精度 $\pm 2\%$) と公表されている⁸⁾。今回の研究では一回換気量として $300 \sim 800$ mL に設定したので、分時換気量としては $3 \sim 8$ L/分であった。この場合の発生した最大流量としては分時換気量の約 3 倍すなわち $9 \sim 24$ L/分程度であるので、PF-300 の最大測定値の $1/10$ 以下であった。そこで、この程度の流量では主に層流として計測されているものと考えられた。したがってハーゲン・ポアズイユの法則で示されるように、差圧出力はガスの粘度に比例するであろうと推測された。Table 2 に今回用いた各種混合気のガス粘度とガス密度を示す⁹⁾。酸素亜酸化窒素混合気のガス粘度は酸素空気混合気よりも小さい。これはガastypeを酸素空気混合気の設定のまま測定すると、過小評価することになる。実際、測定値は $10 \sim 11\%$ 少ない。一方、酸素ヘリウム混合気のガス粘度は酸素空気混合気よりも大きい。したがってこの場合は過大評価する。実際、測定値は $9 \sim 11\%$ 大きかった。PF-300 ではガス組成の変更に応じて、「ガastype」を選択することにより、ガスの物性による測定誤差を

補正する機能を持っている。ガス組成によってガス粘度などは異なり Table 2 のように酸素空気混合気では酸素濃度 21% から 100% において、ガスの粘度は 10% 程度の違いがある。Snepvangers ら⁷⁾ のデータでも酸素濃度によって低濃度領域で -5% 、高濃度領域で $+5\%$ 程度の違いが示されている。しかし、PF-300 での測定値の違いは 1% の差になっていた。PF-300 における「Air」は合成空気を想定しており、本実験では圧縮空気を使用している。大気および酸素濃度 21% の合成空気の密度は 20°C でそれぞれ 1.21 と 1.20 [kg/m³]、粘度は 17.9 と 18.1 [10⁶ Pa•s] であるが、本実験では 0.9% 含まれるアルゴンのガastype 補正への影響は少なく、適切な補正が行われているものと考えられた。実験中の呼吸回路内ガス温度は 24°C 、相対湿度は 6.0% 以下であり、混合気体中の水蒸気が占める割合は 0.18% 程度となる。PF-300 では水蒸気の影響は考慮されていないが、本実験では影響は非常に小さいものとして無視した。本実験で用いたガスでは、最小の粘度は酸素亜酸化窒素混合気で、最大は酸素ヘリウム混合気であった。Fig.1 において、ガス組成の補正をしない場合、それぞれ過小評価または過大評価をしている。しかし、PF-300 のガastype 選択を適正に設定すると、測定値は補正され、誤差は 4% 程度まで減少した。これは装置内部でガス粘度を含む定数を変えて計算しているものと考えられる。

(2) 式での第 2 項はガス密度の因子を含む。今回の研究で用いたガスの違いをガス密度から比較すると、酸素ヘリウム混合気が最小であった (Table 2)。しかし測定値としてはすでに記載したようにこのガスが最大になっており、ガス密度の影響も否定できないが、本実験ではガス粘度の影響が大きく現れたと考えられる。

Snepvangers ら⁷⁾ はリリー型フローセンサの研究

Table 2 Viscosity and density of experimental gases

Gases (O ₂ Conc.)	Viscosity η (1atm, 20°C, [10 ⁶ Pa•s])	Density ρ (1atm, 20°C, [kg/m ³])
O ₂ (100%)	20.29	1.330
O ₂ /N ₂ (50%)	18.88	1.248
O ₂ /N ₂ (21%)	18.06	1.200
O ₂ /N ₂ O (50%)	15.80	1.580
O ₂ /He (50%)	21.41	0.748

Data adopted from reference 10

で、酸素濃度、実測流量などを用いて真値を求める回帰式を提示している。これによると流量真値は測定流量の2次式で回帰され、流量の2乗項の係数は1乗項の係数に比較すると1.2%程度である。この係数の大きさから推測すると、(2)式を用いているPF-300でも、流量の2乗の項、すなわちガス密度に関与する部分は小さいものと推測され、我々の結果とも一致する。今回の研究の流量、換気量測定の設定条件では、おもに層流型フローセンサとして機能していたものと推測された。

PF-300ではセボフルラン、デスフルランなどの麻酔ガスを用いた場合、ソフトウェアによる補正機構はなく、専用麻酔ガス測定ユニット(OR-703、imtmedical)を用いてガastypeを認識・自動補正させる必要がある。そうしないと、いずれのガスを用いても酸素空気混合気と認識してしまうので測定誤差は大きくなることが予想される。なお、このような専用麻酔ガス測定ユニットが使用できない場合、または、ガス補正機能に該当しないガスを使用する場合は、使用するガスの粘度を求めて^{9, 10)}、その値を用いれば計算による補正が可能と考えられる。ただし、混合気粘度の算出は、混合気密度の計算のように単純平均ではなく、非常に複雑な計算が必要になる¹¹⁾。

V. 結論

PF-300はガス組成を適切に選択して計測すると、換気量測定精度はO₂、N₂群では1%以内、O₂/N₂O混合気およびO₂/He混合気では4%以内であった。本装置の流量、換気量の測定においては、ガス組成による影響を受けるので、補正機構の適切な設定が必要である。このような特性を持っている測定器なので、ガス補正機能を用いない場合や補正ができないガスを使用する場合は、誤差が大きくなることを理解しておくことが必要である。

[本論文の要旨は第24回日本臨床工学技士会学術総会（仙台）で報告した]

〈謝辞〉

稿を終えるにあたり、帝京大学医学部名誉教授大村昭人先生のご校閲に深謝いたします。

本稿の全ての著者には規定されたCOIはない。

参考文献

- 1) 塩見 基：フローアナライザPF-300の使用経験について。人工呼吸。2008；25：62。
- 2) 丹野修宏、大木良藏、磨田 裕：多用途手術室のための4.8メートル麻酔用呼吸回路の特性。クリニカルエンジニアリング。2011；22：351-3。
- 3) Miyaji T, Fukakura Y, Usuda Y, et al : Effects of the gas composition on the delivered tidal volume of the Avance Carestation. J Anesth. 2015；15：2018-8s.
- 4) Basano L, Ottonello P : 81. Ventilation Measurement. In : Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook : Electromagnetic, Optical, Radiation, Chemical, and Biomedical Measurement. 2nd edn. Webster JG, Eren H (Eds). London, CRC Press, 2014, pp81-1-81-15.
- 5) White FM : 6. Viscous flow in ducts. In : Fluid Mechanics. 7th edn. White FM (Eds). New York, McGraw-Hill, 2011, pp347-454.
- 6) Mottram C : 11. Pulmonary Function Testing Equipment. In : Ruppel's Manual of Pulmonary Function Testing. 10th edn. Mottram C (Edn). Maryland Heights, Mosby, 2012, pp353-404.
- 7) Snepvangers Y, e Winter P, Burger H, et al : Correction factors for oxygen and flow-rate effects on neonatal Fleisch and Lilly pneumotachometers. Pediatr Crit Care Med. 2003；4 : 227-32.
- 8) Fleisch A : Der pneumotachograph : ein apparat zur eschwindigkeitsregistrierung der atemluft. Pflügers Arch. 1925；209 : 713-22.
- 9) Katz I, Caillibotte G, Martin AR, et al : Property value estimation for inhaled therapeutic binary gas mixtures : He, Xe, N₂O, and N₂ with O₂. Med Gas Res. 2011；1 : 28.
- 10) Habre W, Asztalos T, Sly PD, et al : Viscosity and density of common anaesthetic gases : implications for flow measurements. Br J Anaesth. 2001；87 : 602-7.
- 11) Turner MJ, MacLeod IM, Rothberg AD : Effects of temperature and composition on the viscosity of respiratory gases. J Appl Physiol. 1989；67 : 472-7.

Effect of gas composition on the volume measurement performance of FlowAnalyzer PF-300

Junpei OTAKE¹⁾, Tetsuya MIYAJI¹⁾, Yutaka USUDA²⁾

¹⁾ Department of Medical Engineering, Mizonokuchi Hospital, Teikyo University School of Medicine

²⁾ Department of Anesthesiology and intensive care medicine, Saitama Medical University, International Medical Center

Corresponding author : Junpei OTAKE

Department of Medical Engineering, Mizonokuchi Hospital, Teikyo

University School of Medicine

3-8-3, Mizoguchi, Takatsu-ku, Kawasaki, Kanagawa, 213-8507, Japan

Key words : volume measurement, differential pressure flowmeter, hagen-poiseuille's law, laminar flow, gas viscosity

Abstract

Background : FlowAnalyzer PF-300TM (imtmmedical, Buchs, Switzerland) is used for measurement and calibration of flow or volume from ventilators and anesthesia machines. However, no studies have reported the accuracy of flow or volume measurement with PF-300.

The flow sensor of PF-300 is a differential pressure type pneumotachometer. The differential pressure created by the screen resistance is affected by the viscosity and density of gases.

We studied the accuracy of volume measurement and the effect of gas composition on the function of PF-300.

Method : Oxygen, oxygen-air mixture, and oxygen-nitrous oxide mixture were generated using an anesthesia machine, whereas helium-oxygen mixture was generated using a helium gas cylinder and anesthesia machine. We reciprocated the piston of a super syringe to manually create tidal volumes of 300mL, 500mL, 800mL.

The tidal volumes measured using PF-300 were recorded and averaged for 10 breaths for the each gas mixture and ventilation volume.

Results : The errors in volume measurements were less than 1% with O₂, O₂-air and air. The volume readings of PF-300 were 11% lower with O₂-N₂O and 11% higher with He-O₂, when we selected the gas type Air/O₂ Auto setting. When appropriate gas type was selected, errors were less than 4% with each gas mixture.

Conclusion : When using gases for which no gas-specific correction is available, the user should be aware that device readings may show large errors.

Received April 22, 2015

Accepted September 14, 2015