〔一般演題〕

圧量曲線の図形的解析による人工呼吸器の特性について

小野寺　文　雄*　窪　田　達　也*　清　水　禮　壽*

はじめに

人工呼吸器を通して自発呼吸する際，患者は弁機構を含む人工呼吸器回路および自分自身の肺，気道に対して仕事を行い換気を維持する[1]。このうち患者が人工呼吸器回路に対してなす呼吸仕事量は，気道内圧と換気量による圧量曲線（pressure-volume curve, PV カーブ）の面積で表わされる。

人工呼吸器を自発呼吸モードで使用するときは，各人工呼吸器においてその構造および制御の方法が異なるため，換気量の変化に伴う圧変化は各人工呼吸器に特有なもので，PV カーブの図形上には人工呼吸器の種々の特性が表現されているものと思われる。従来，PV カーブは主に呼吸仕事量を求めるために用いられ，PV カーブの図形自体の解析について論じられたことは少ない。

本実験では人工呼吸器を ZEEP, CPAP, 定常流の各自発呼吸モードに設定し，モデル肺に同一換気条件下で自発呼吸させ，呼吸仕事量の測定と PV カーブの図形的解析を行い各種人工呼吸器の特性について検討した。その際，ディマンド感度の設定値，PEEP の設定値，そして定常流の流量の影響についても検討した。

方　法

実験装備は図1に示した。自発呼吸の可能なモデル肺（五十嵐医科製人工呼吸練習器 T-3）を用い，人工呼吸器を通して自発呼吸をさせた。

流量（Flow）と気道内圧（Paw）を呼吸モニター OMR-7101（日本光電製）にて測定し，データレコーダ（SONY 製 DFR-3915）に記録した。シグナルプロセッサー 7T17（日本電気三栄製）にてデータを 20 msec のサンプル時で処理し，Paw と換気量による一呼吸の PV カーブを描記し，その面積である呼吸仕事量（$WORK=\int_{t_0}^{t_1}(P_B-Paw)\cdot Flow\,dt$, to 吸気の初め　t_1 呼気の終り　P_B 大気圧）を算出した。

モデル肺はヒトと同様に胸腔内陰圧によって肺を拡げ換気を行う方式であり，気道付加抵抗の大小が換気量に影響を与える。常に呼吸モニターの表示で一回換気量 500 ml，呼吸数 15 回/分となるようにモデル肺を調整した。

使用した人工呼吸器は最近の機種とし，Bear 5

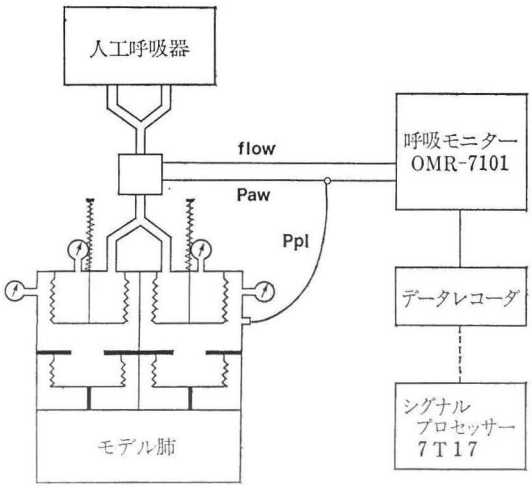

図 1　実験装備

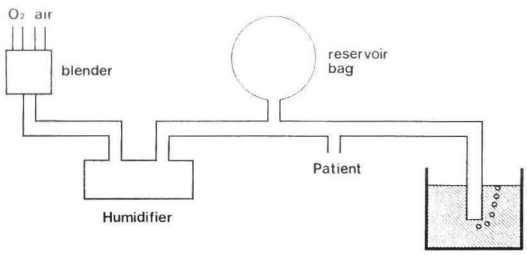

図 2　自作の閾値方式の CPAP 装置

* 自治医科大学集中治療部・麻酔科

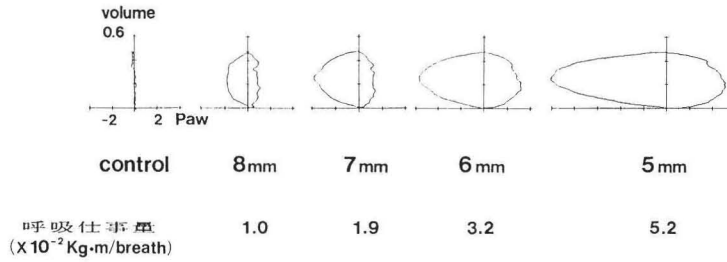

図 3　気管チューブ付加時の PV カーブ

(Bear medical 社製), CPU 1 (ATM 社製), CV 3000 (IMI 社製), ERICA (Engström 社製), EV-A (Drägel 社製), 7200 a (Bennet 社製), SERVO 900 C (Siemens 社製) を用いた。比較の意味で SERVO 900 B (Siemens 社製), NEWPORT(NMI 社製), 自作の閾値方式 (threshold resister) の CPAP 装置 (図 2) を用いた。人工呼吸器をディマンドバルブタイプと定常流タイプとに分けると, NEWPORT は後者に属し, それ以外の機種は前者に属するが, Bear 5 と CV 3000 は定常流も併用可能である。

また, 内径 8, 7, 6, 5 mm の気管チューブ (Portex 社製) を気道に付加し, 弁が介在しないときの PV カーブの図形を調べた。呼吸モニターのセンサーのみを付加した場合を control とした。

以下の自発呼吸モードにおいて, 各人工呼吸器の特性を調べた。

1) ZEEP モード

CPAP モードで ZEEP に設定したものである。一呼吸全体の PV カーブの図形, および吸気弁, 呼気弁の作動状況など呼吸の各相における人工呼吸器の特性を調べた。また人工呼吸器を通して自発呼吸するとき, 弁が開くディマンド感度の設定値により呼吸仕事量が異なるので[2)3)], 感度を −0.5, −1, −2, −3 cmH_2O に設定しその影響をみた。ただし, CPU 1, CV 3000, ERICA, EV-A はディマンド感度を固定している機種で, その固定感度で実験を行った。それぞれ −1 cmH_2O, −1 cmH_2O, 0.1 L/sec (フロートリガー), −0.2 mbar であった。

2) CPAP モード

CPAP モードで PEEP 5, 10 cmH_2O に設定し, PEEP の影響をみた。本モードではディマンド感度を −1 cmH_2O とした。ただし, ERICA では 0.1 L/sec, EV-A では −0.2 mbar の固定感度で実験を行った。

3) 定常流モード

定常流が可能な機種は Bear 5, CV 3000, NEWPORT であり, 閾値方式の CPAP 装置 (5 cmH_2O) を加え, これらに定常流として 10, 30, 40 L/min の流量を流したときの PV カーブへの影響を調べた。

結　果

図 3 に気管チューブ装着時の PV カーブを示した。気管チューブでは弁がなく換気量と気道内圧とはともに連続的に変化するため, PV カーブは楕円形に近い図形となった。気管チューブの内径が細くなるのに従い圧の変動が大きく, PV カーブは横に長い楕円形となった。吸気量と呼気量が等しいのに吸気 (PV カーブの左側) が呼気 (PV カーブの右側) より圧差が大きいのは, 吸気流速と呼気流速が異なり吸気流速がより大きいためであり, これはヒトでの呼吸波形と近似している。

1) ZEEP モード (図 4)

図 4 に各人工呼吸器の PV カーブについて感度別に配置した。まず一呼吸全体の PV カーブの図形をみると, Bear 5 の感度 −0.5 cmH_2O, EV-A, 7200 a の感度 −0.5 cmH_2O では, ディマンドバルブタイプの人工呼吸器でありながら気管チューブでの如く弁を感じさせない図形となった。CPU 1, CV 3000 も同様の楕円形となったが, その図形は大きく気管チューブ 6〜7 mm に相当する呼吸仕事量であった。

次に呼吸の各相について述べる。

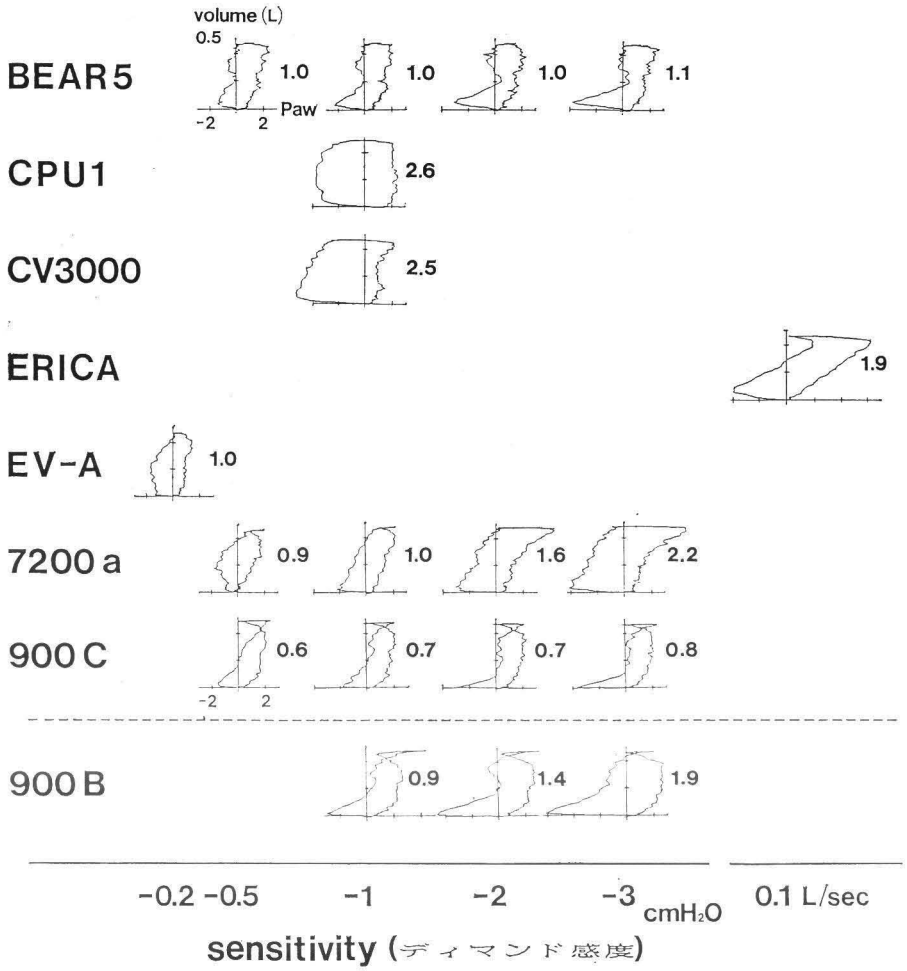

図 4　ZEEP モードにおける PV カーブ（数字は呼吸仕事量（$\times 10^{-2}$ kg・m/breath））

ディマンドバルブタイプの人工呼吸器で吸気弁が開くまでの間は，圧変化があっても換気量の変化がほとんど伴わないため（isometric force）PV カーブはX軸近傍にあり，弁を開いたあと急に立ちあがる歪んだ図形となった。この isometric force 時の陰圧の程度は感度の設定値以上に大きく，特に SERVO 900 B で大きくなった。これは，感度に達してから弁が開くまでの応答時間が長いとその間にモデル肺が吸気努力を続け陰圧の程度がさらに大きくなるためである。よって，この部分の PV カーブは吸気弁の制御性能を示すことが分った。

弁が開くまでの間の呼吸困難感を少なくするため，その間にパイロットガス等の若干のガスが吸える機種があり（Bear 5, CPU 1, ERICA），PV カーブではその間に換気量の変化のあることが分った。

吸気弁が開いた後の吸気流量はコンピュータによって制御される機種が多いが，その中で気道内圧をもっともゼロに近づけていたのは Bear 5 であった。ERICA, SERVO 900 C では吸気半ばから陽圧になっていたことから需要を超えた吸気ガスの供給があり，これは吸気の補助を意味するものである。逆に CPU 1, CV 3000 では陰圧の程度が大きく吸気ガスの供給が少ないものであった。よって，この吸気中の PV カーブはガス供給の制御性能を示すことが分った。

呼気弁を開けるのに ERICA では 6 cmH_2O と

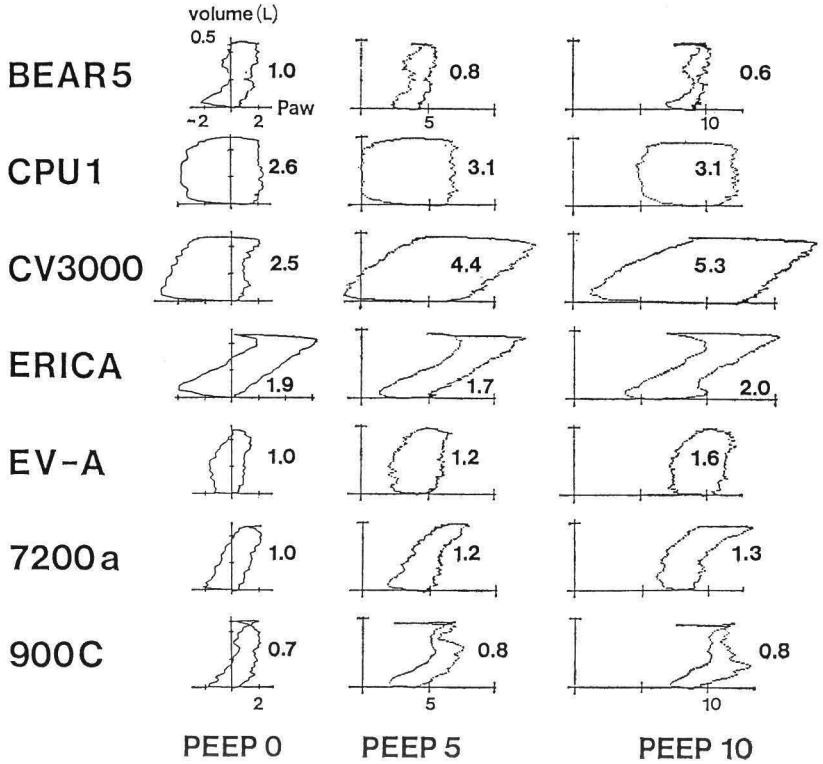

図 5　CPAP モードにおける PV カーブ（数字は呼吸仕事量（$\times 10^{-2}$ kg・m/breath））

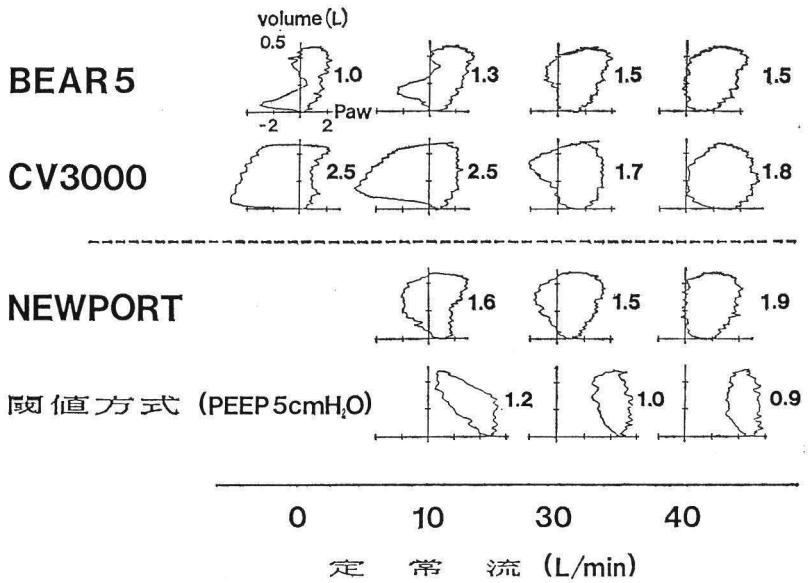

図 6　定常流モードにおける PV カーブ（数字は呼吸仕事量（$\times 10^{-2}$ kg・m/breath））

最も大きな圧を必要とした。また各人工呼吸器において呼気中のPVカーブの図形が異なり呼気弁を通すガス量を調節していることが分った。このように呼気弁を開けるときおよび呼気中のPVカーブは呼気弁の制御性能を示すことが分った。

次に感度の影響をみると，Bear 5, SERVO 900 Cでは感度を低くするにつれ吸気弁を開くまでの陰圧のみが大きくなったが，他の呼吸の相では同一の図形であった。しかし7200 aでは呼吸全相にわたり感度の影響が及んでいることが分った。

2) CPAPモード（図5）

PEEPを付加してもCV 3000以外はPVカーブの図形に大きな変化はなかった。CV 3000での10 cmH_2O PEEPはZEEPに比べて約2倍の呼吸仕事量になることが分った。

3) 定常流モード（図6）

定常流のガスのみを呼吸するNEWPORTと閾値方式では勿論弁がないほぼ楕円形のPVカーブの図形となったが，Bear 5, CV 3000では流量により異なる態度をとった。すなわち10 L/分の定常流では吸気ガスが不足し吸気途中からディマンドバルブを通したガスを吸っており，40 L/分の定常流ではほぼ楕円形となり定常流のガスのみを吸っていることが分った。

閾値方式では流量の増加とともに圧変化が少なくなり，他の人工呼吸器と比べてもっとも呼吸仕事量が少なくなった。

考　察

現在使用されている人工呼吸器の調節呼吸モードでは，各人工呼吸器に機構上およびモニター上の差はあっても，臨床使用をする上で大きな差は認められない。一方，人工呼吸器を自発呼吸モードで使用するときは，各人工呼吸器においてその構造および制御の方法が異なり種々の特性を持つため患者に与える影響が大きいと思われる。しかし，その特性を容易に判断することができなかった。

本研究ではモデル肺を駆動させPVカーブの図形から各種人工呼吸器の特性を解析したが，その結果PVカーブには多くの情報が含まれていることが分った。弁が介在しない場合のPVカーブはほぼ楕円形になり，弁が介在する場合のPVカーブは歪んだ図形になること，また呼吸の各相におけるPVカーブの図形から，吸気弁と呼気弁の制御性能，人工呼吸器によるガス供給の制御性能，ディマンド感度設定値の影響，PEEP設定値の影響，定常流の流量の影響等の種々の人工呼吸器の特性が視覚的に理解できることが分った。

PVカーブの面積である呼吸仕事量と患者の実際になす呼吸努力との関連を考えると，弁のない気管チューブを通して自発呼吸をする際には呼吸仕事量の大きさは呼吸努力そのものを反映するものと思われる。このことは定常流モードで自発呼吸をする際も同一である。しかし弁のある人工呼吸器ではisometric forceの部分を含むので，呼吸仕事量から判断すると呼吸努力を過小評価する可能性がある。たとえば，本実験では6 mmの気管チューブ付加時の呼吸仕事量は0.032, SERVO 900 B（ディマンド感度 −3 cmH_2O）付加時は0.019 kg·m/breathであったが，健康人にこれらを付加して自発呼吸をさせると逆に後者の方により呼吸困難感を訴える者が多いことからも理解される[1]。しかし，この呼吸仕事量には定量できないisometric force時の患者の呼吸努力もPVカーブには歪んだ図形として定性的に示されていることが分った[4]。一呼吸全体のPVカーブが楕円形であれば，呼吸仕事量が同程度であっても歪んだ図形に比べて楽に呼吸ができるものといえる。

ディマンドバルブタイプの人工呼吸器において，感度を高くすると楕円形でかつ小さい図形が得られることが望ましい。それは弁を開くまでの陰圧の程度と感度の設定値と差が少ないこと，吸気弁を開いた後の気道内圧はゼロに近いこと，呼気弁開放時，また呼気中において大きな陽圧を必要としないことを意味する。またPVカーブはPEEP設定値に影響されないことが望ましい。

本実験ではモデル肺を同一換気条件に設定したが，それは各人工呼吸器に対して公平にかつ再現性をもって比較するためである。PVカーブの面積である呼吸仕事量は換気量と呼吸数に影響され[5]，負荷の小さい人工呼吸器であっても患者が大きな換気をすれば呼吸仕事量が大きくなり，その結果負荷が大きい人工呼吸器という誤った判断

がなされる可能性がある。その意味で不規則な呼吸をするヒトを用いて人工呼吸器の特性を検索するよりも，自発呼吸の可能なモデル肺を用いて同一換気条件に設定して検索した方が優れていると考える。しかし，人工呼吸器を付加し換気量，呼吸数，呼吸仕事量などの生体の反応をみるには勿論ヒトでの検索[1)6)]が必要なことである。その他，PV カーブには加味されない IMV に同調するときの応答時間など[7)]の時間の因子の検索についても同一換気条件にて比較されるべき項目と考える。

Katz[8)] は CPAP モードでモデル肺を駆動し，吸気の仕事量をモデル肺のなす仕事量と人工呼吸器のなす仕事量に分け各種人工呼吸器を比較したが，SERVO 900 B が high gas flow system よりもモデル肺のなす仕事量が少なく前者が良いと結論した。呼吸仕事量のみならず弁開放時の PV カーブの解析を行う必要があると思われる。また人工呼吸器の自発呼吸モードでは能動的呼気が行われることが多いので，吸気のみならず本実験の如く呼気を含めて解析される必要があると考える。Christopher[9)] は人工呼吸器の比較に気道内圧の圧変化から解析を加えているが，人工呼吸器を評価する上で大事なことは気道内圧の変化に対して Flow の追従があるかどうかであり，その点両者を同時に比較できる VP カーブの方がすぐれた指標と思われる。

以上，PV カーブには種々の人工呼吸器の特性が表現されていることから人工呼吸器の説明書の仕様に加えられるべき項目と考える。

要　旨

モデル肺を同一換気条件で駆動させ，気道内圧と換気量による圧量曲線（PV カーブ）から各種人工呼吸器の特性を調べた。

PV カーブには，以下の人工呼吸器の特性が含まれていることが分った。

1．一呼吸全体の PV カーブの図形と大きさから楽に呼吸ができるかどうか

2．吸気弁を開くまでの陰圧とディマンド感度設定圧との差から吸気弁の制御性能

3．吸気中の PV カーブから人工呼吸器によるガス供給の制御性能

4．呼気の PV カーブから呼気弁の制御性能

5．ディマンド感度設定値の影響

6．PEEP 設定値の影響

7．定常流の流量設定値の影響

おわりに

本稿は，第8回人工呼吸研究会（1986，大阪）において発表した“最近の人工呼吸器の IMV，CPAP および Pressure Support モードにおける PV カーブ上での比較”の一部分を掲載した．

文　献

1) 小野寺文雄，窪田達也，清水禮壽：IMV モードにおける呼吸仕事量と人工呼吸器の負荷について．呼吸と循環 35（5）：569-576，1687

2) 小野寺文雄，窪田達也，清水禮壽：Demand valve type ventilator の trigger level の設定と呼吸仕事量について．人工呼吸 1：17-19，1984

3) Marini JJ, Capps JS & Culver BH：The inspiratory work of breathing during assisted mechanical ventilation. Chest 87：612-618, 1985

4) 岡崎　薫，沼田克雄：各種人工呼吸器の CPAP mode と呼吸困難感．人工呼吸 1：68-73，1984

5) Yamashiro SM, Daubenspeck JA, Lauritsen T N, et al：Total work rate of breathing optimization in CO_2 inhalation and exercise. J Appl Physiol 38：702-709, 1975

6) Viale JP, Annat G, Bertrand O, et al.：Additional inspiratory work in intubated patients breathing with continuous positive airway pressure systems. Anesthesiology 63：536-539, 1985

7) 窪田達也，小野寺文雄：成人用人工呼吸器の最近の進歩．ICU と CCU 10：631-642，1986

8) Katz JA, Kraemer RW & Gjerde GE：Inspiratory work and airway pressure with continuous positive airway pressure delivery ststems. Chest 88：519-526, 1985

9) Christopher KL, Neff TA, Bouman JL, et al.：Demand and continuous flow intermittent mandatory ventilation systems. Chest 87：625-630, 1985