

□原著□

## 予測制御を取り入れたダイヤモンドバルブ 人工呼吸器の開発

中川 聡\* 小幡 一夫\* 阪井 裕一\*  
近藤 陽一\* 宮坂 勝之\* 蜂巣 登男\*\*

### ABSTRACT

Development of a Demand-valve Ventilator with Prediction Logic

Satoshi NAKAGAWA, Kazuo OBATA, Hirokazu SAKAI,  
Youichi KONDO, Katsuyuki MIYASAKA and Norio HACHISU\*

*Department of Anesthesia and ICU, National Children's Hospital ;*

*\*Technical Development Department, Medirand, Inc*

Pressure support ventilation (PSV) is advantageous in pediatric patients who have to maintain spontaneous respiration through highly resistive endotracheal tubes. However, PSV is difficult to perform in infants and children with ventilators currently available on the market, due to rapid respiratory rate, small respiratory signal and uncuffed airway. A prototype ventilator (E-200) was developed to overcome these problems by introducing fast response servo-controlled valve (with 10 msec resolution) and software based on prediction and learning logic.

Pressure-volume curves with E-200 were compared to those of two other ventilators in simulated spontaneous respiration. And pressure and flow pattern in combination of PSV and synchronized intermittent mandatory ventilation (SIMV) with E-200 was compared to that of the reference ventilator. In result, easy spontaneous respiration can be expected with our ventilator, although expiratory effort should be lessened by improvement of exhalation valve. In PSV, easy expiration is expected with E-200.

PSV can be applied to pediatric patients of all age groups with our ventilator.

### はじめに

小児患者の人工呼吸管理の際には、カフなし気管内チューブ周囲よりのリークが避けられないこと、患者の換気量に比べ呼吸回路容量が大きいこと、患者の呼吸努力が小さいこと、呼吸数が多く吸気時間が短いことなど、患者の呼吸努力検知を

要するダイヤモンドバルブ方式には不利な点が多く、もっぱら連続流+リザーバーバッグ方式の人工呼吸器が使用されてきた<sup>1)</sup>。しかし、小児患者では細い気管内チューブを介して呼吸しなければならず、呼吸抵抗の及ぼす影響が成人以上に大きい。従って、技術的な問題が解決されれば、患者の自発呼吸を補助する pressure support ventilation (PSV) が行えるダイヤモンドバルブ方式が患者に有利である可能性が示唆されてきた<sup>2)</sup>。

\* 国立小児病院麻酔科

\*\* メディランド開発部

メディランド社が新しく試作した人工呼吸器 (E-200) は、これまでのダイヤモンドバルブ方式の持つ欠点を改良し、成人患者のみならず、呼吸促進の強い小児や気管内チューブからのリークの多い症例での PSV を可能にするために、バイアスフローの応用やフィードフォワード理論により実質的応答時間の短縮を図っている。

この試作器を臨床に使用する機会を得、その特性について、特に自発呼吸に対する機能を、他の人工呼吸器と比較検討したので報告する。

### 装 置

今回検討した試作人工呼吸器 (E-200) は、機能面では、従来の人工呼吸器と比較して以下の特徴を備えている。

1. Assist/Control 以外の換気様式で常に PSV が可能である。

2. デイモンドバルブ方式の欠点を補うためバイアスフローを取り入れた。このバイアスフローは呼気の最初の段階で完全に停止され、呼気抵抗の低下が図られる。バイアスフローはダイヤモンドバルブを介する人工呼吸器の呼気相に流れるガス流で、このバイアスフローにより、吸気の初めの段階での呼吸努力の軽減が図られると同時に以後の流量制御が速やかに行える。

3. デイモンドバルブとして速応性 (10 msec 単位制御) の比較制御弁を使用した。この制御は、患者の口許の圧および呼吸器からの送気流量を速やかにフィードバック、フィードフォワードすることにより行う。

4. ガス流量送気制御には学習機能や予測制御理論を取り入れ、気道内圧と送気流量の関係を各年齢層や様々な病態の患者の実際の呼吸パターンに近づけた。

### 方 法

能動モデル肺を用い、E-200 を用いた場合の自発呼吸仕事量を連続流+リザーバーバッグ方式の人工呼吸器 (ニューポート E-100)、およびダイヤモンドバルブ方式の人工呼吸器 (ピューリタンベネット 7200 a) と比較した。小児および成人患者の自発呼吸モデルとして、ピストン式ハーバー

ド・タイプの動物用人工呼吸器 (サイン波形)、および五十嵐社製人工呼吸練習機を用いた。一回換気量は、成人モデルとして 500 ml (人工呼吸練習機)、小児モデルとして 50 ml (ハーバード・タイプ人工呼吸器) の 2 種類に設定し、呼吸回数はいずれも 30 回/分に設定した。呼吸回路はそれぞれ指定の回路を使用した。加湿器は 3 機種ともに Fisher & Paykel 社製のものを回路に接続し、加湿による水滴の回路内抵抗への影響を除外するために水は入れずに実験を行った。対象の人工呼吸器に接続した後、 $FI_{O_2}$  0.6, PEEP 5 cm  $H_2O$  の条件下で自発呼吸のシミュレーションを行った。なお、E-200 では、バイアスフローを 5 l 流し、自発呼吸のトリガーの感度を  $-0.5$  cm $H_2O$  とした。

E-100 では、4 l のリザーバーバッグをつけ、定常流として 15 l/分の連続流を加えて使用した。7200 a では flow-by モードを用い、一回換気量が 500 ml のときは base flow を 15 l/分、flow sense を 2 l/分とし、一回換気量が 50 ml のときは base flow を 5 l/分、flow sense を 1 l/分とした。呼吸回路の口許の圧は SENSYM 社 pressure sensor LX 06001 D にて測定し、流量はミナト医科製熱線流量計にて測定した。

SIMV と PSV モードにおいて、E-200 および 7200 a での圧およびフローパターンの比較も行った。E-200 では、バイアスフローは流さず、自発呼吸のトリガーの感度は  $-0.5$  cm $H_2O$  とした。7200 a では、自発呼吸のトリガー感度を  $-1$  cm $H_2O$  と設定した。

### 結 果

一回換気量が 500 ml、呼吸回数が 1 分間に 30 回、PEEP 5 cm $H_2O$  の時の成人のシミュレーションでの圧容量曲線を図 1 に示す。横軸が圧、縦軸が容量であるが、いずれも時計回りの圧容量曲線になっている。E-200 は、E-100 に比べ吸気の仕事量は軽減されているが、呼気の仕事量には余り大きな差はみられない。7200 a では flow-by モードを用いているが、このモードでは吸気の初めにかなりの陰圧になり、吸気後半より陽圧になるのが特徴である。

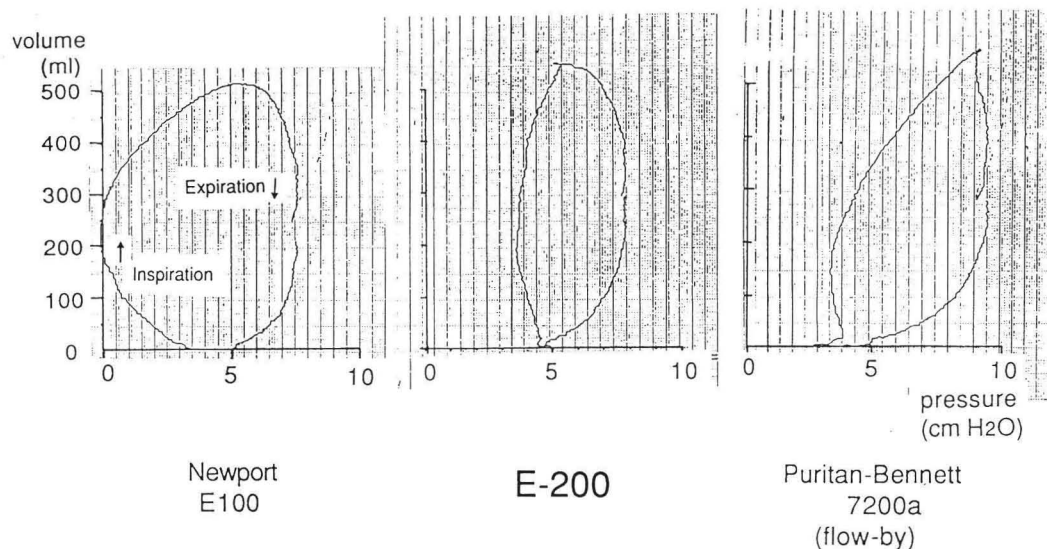


図 1 一回換気量が 500 ml のときの圧容量曲線

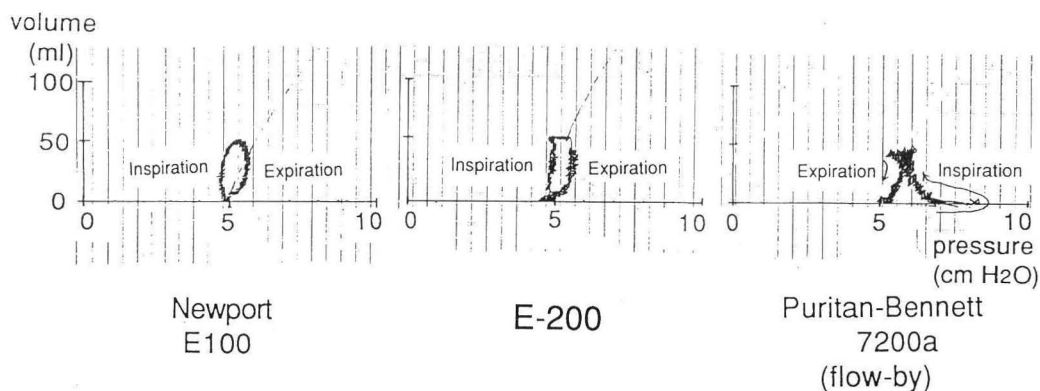


図 2 一回換気量が 50 ml のときの圧容量曲線

一回換気量が 50 ml，呼吸回数が 1 分間に 30 回の小児のシミュレーションでの圧容量曲線を図 2 に示した。E-100 と E-200 では時計回りの曲線を描き，基本的なパターンに大きな差異はない。しかし，7200 a で flow-by モードを用いた場合，小さな一回換気量では吸気時にフローが比較的大量に流れすぎ，あたかも PSV のように反時計回りの圧容量曲線になり，安定した機能が得にくかった。今回検討した E-200 は，一回換気量の多少にかかわらず満足しうる結果を得た。

7200 a および E-200 におけるモデル肺を用いた SIMV と PSV での圧とフローのパターンの比

較を図 3 に示した。上段が E-200，下段が 7200 a である。各段の 2 本の曲線のうち，上の曲線は口許の圧を，下の曲線はフローを示し，フローは上向きが吸気，下向きが呼気である。自発呼吸のモデルの回数は 30 回/分であるが，人工呼吸器の SIMV 設定は 8 回/分である。自発呼吸の一回換気量はいずれの人工呼吸器に装着した場合でも同一とした。図 3 に示されている 5 呼吸のうち，両端が SIMV による陽圧換気で，中央の 3 呼吸が PSV による自発呼吸補助である。PSV において，E-200 は，7200 a に比べ呼気の圧の低下が速やかであり，呼気抵抗がより低い特徴を持ってい

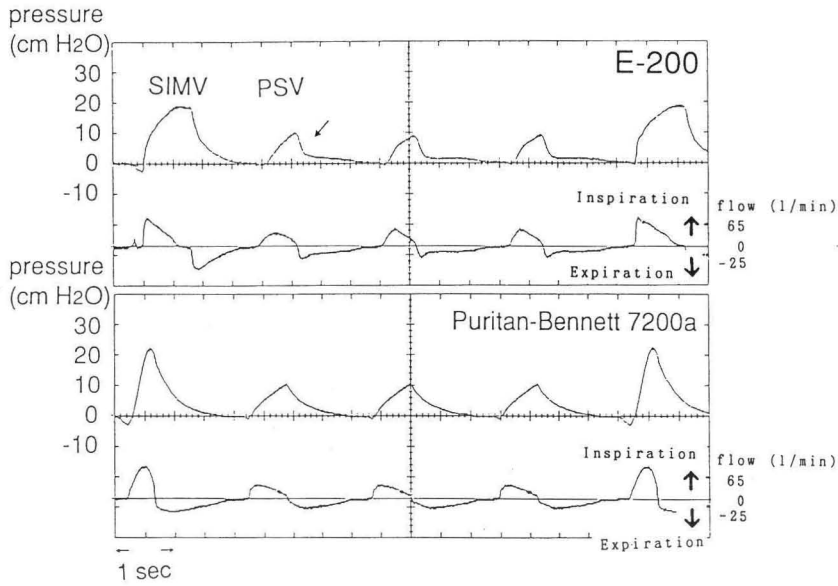


図3 SIMV+PSVにおける気道内圧とフローの変化  
 矢印は、PSV施行中の呼気において、試作器の方が気道内圧の低下が早いことを示す。試作器では、PSV中の呼気における吐きやすさが期待できる。

る。

### 考 察

今回検討した試作器 (E-200) では、患者に装着してからの気道内圧変化と送気流量の変化を学習し、それをフィードフォワードすることにより、患者の呼吸仕事を軽減する波形が得られるように回路抵抗や時間遅れを計算に入れた予測制御を行っている。そして、実際の制御にはPD制御 (Pは比例、Dは微分の略) を取り入れ、患者の口許の圧は 10 msec ごとにフィードバックされ、この信号によりダイヤモンドバルブを制御し、送り出すガス流が調整される。この制御により、吸気では患者の要求にマッチした流量パターンが得られ、吸気の終わり近くに呼気への移行を予測しフローを低下させ、患者の呼気開始時には吐出を停止し呼気抵抗を著しく軽減する方式がとられた。

しかし、今回の検討 (図1, 2) では、吸気に関しては呼吸仕事量も軽減され満足のいく結果となったが、呼気抵抗は期待したほどの軽減が得られなかった。この原因は、呼気弁を含めた回路構造そのものにあると考えられ、更に検討改良が必

要と考えられる。

なお、本実験で圧容量曲線を描く際に、胸腔内圧を用いず気道内圧のみを用いた。本実験の圧容量曲線は、CPAPにおける自発呼吸のシミュレーションにて描いたもので、人工呼吸器の性能の比較という点では、気道内圧による圧容量曲線のみでも十分と考えたためである。しかし、気道内圧の測定のみでは、患者の呼吸仕事量の算出や、内因性の PEEP などの問題については検討できず、今後、小児における PSV の効果を評価する際には胸腔内圧の測定も行いたいと考えている。

図4はE-200の予測制御の一端を再現させた実験例である。曲線は口許の圧変化である。モデル肺に1分間に19回程度の呼吸をさせた後、一回換気量は変えずに急激に呼吸回数を38回/分とし、一定時間内の流量を急速に増加させた。当然のことながら、その瞬間、人工呼吸器は予期し得ぬ呼吸パターンの変化に対応しきれず、患者の口許の圧は吸気時に過度の陰圧になるが、次の呼吸サイクルより吸気時の流量立ち上がりを前回より増加させることによって徐々に吸気時の気道内圧

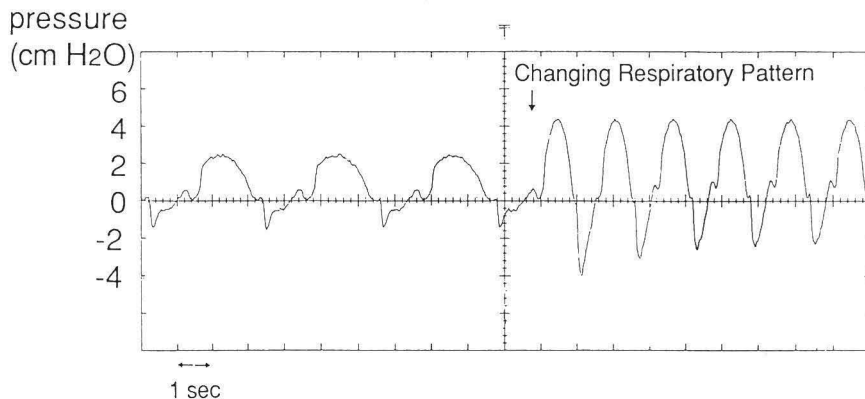


図 4 予測制御の例

矢印は、呼吸のパターンを変えたことを示す。呼吸パターンの変化の直後は、気道内圧は過度の陰圧に傾くが、次の呼吸のサイクルより呼吸器からの吸気流量立ち上がりを増加させることにより、吸気時の陰圧の程度が一呼吸ごとに改善されている。

低下を調整してゆく様子がわかる。このような予測制御は、実際には固定された抵抗や時間遅れの克服にも利用され、これにより、連続流＋リザーバーバッグ方式の人工呼吸器による管理が主流である小児の領域でもダイヤモンドバルブ方式の人工呼吸器による管理が可能になると考えられる。

現在、成人の呼吸管理の分野では PSV の行えるダイヤモンドバルブ方式の人工呼吸器が主に使用されている<sup>3)</sup>。小児でも PSV の恩恵は期待されつつも、技術的な問題で臨床応用することができなかつた<sup>2)</sup>。これまで市場に出ていたダイヤモンドバルブ方式の人工呼吸器は主に成人用であり、小児での使用には様々な面で限界があった。小児の PSV についても限られた研究があるのみである<sup>4)</sup>。この試作器により、小児でもダイヤモンドバルブ方式を用いた PSV などの恩恵を受けられる可能性がもたらされた。

### 結 論

メディランド社が開発した学習機能、予測制御を取り入れたダイヤモンドバルブ人工呼吸器の特性について報告した。この試作器を他のダイヤモンドバルブ方式の人工呼吸器および連続流＋リザーバーバッグ方式の人工呼吸器と比較検討し、自発呼吸において一回換気量の多少にかかわらず呼吸

仕事量の少ない換気ができると考えられた。今後の課題として、多呼吸時の呼気の仕事量の軽減があげられる。気管内チューブ周囲よりのリークが多い症例や呼吸回数の多い小児でも PSV などのダイヤモンドバルブ方式の恩恵が期待できる。

なお、本論文の要旨は第 12 回人工呼吸研究会（福島）にて発表した。

(1991.9.11 受)

### 文 献

- 1) 阪井裕一, 宮坂勝之, 三川 宏: 小児における IMV の問題点. 人工呼吸 1: 77-82, 1984
- 2) 宮坂勝之, 峰巢登男: 小児用 IMV 人工呼吸器の有する問題点の考察. 人工呼吸 6: 57-64, 1989
- 3) 武澤 純: プレッシャーサポート換気. 人工呼吸 6: 9-16, 1989
- 4) Martin LD, Rafferty JF, Wetzel RC, et al: Inspiratory work and response times of modified pediatric volume ventilator during synchronized intermittent mandatory ventilation and pressure support ventilation. Anesthesiology 71: 977-981, 1989