

□講座□

小児・新生児人工呼吸器の限界と展望

—モデル肺を用いた実験による考察—

高橋利通* 島田康弘*

はじめに

最近、小児・新生児への部分的換気補助の応用が注目されはじめ、それに対応した新しい人工呼吸器も多く登場した¹⁾²⁾。とりわけ新生児領域では、従来 pressure cycle の人工呼吸器しか存在しなかったため患者の呼吸筋の負荷を次第に増加させるといった段階的ウィーニングは不可能であったが、現在では可能になりつつある。しかしこれらの人工呼吸器の基本性能についての検証は未だ十分になされていないとはいえない³⁾。小児・新生児の部分的換気補助、すなわちプレッシャーサポート換気 (PSV) や同期型間欠的強制換気 (SIMV) における問題点は次の3つが挙げられる。① トリガ、② 吸気流速パターン、③ 吸気のターミネーションである。これらについて順次、2つのベローズをスプリングで作動するようにしたモデル肺を用いた実験⁴⁾で明らかにした。

1. 実験装置

われわれは自発呼吸をシミュレートできる1コンパートメントのモデル肺を製作した。図1にその概略を示す。1 l の気密性のあるプラスチックの容器に2個のベローズを配しそれぞれをスプリングで固定した。一方は肺、もう一方は胸郭・横隔膜と見立てた。横隔膜側のベローズに Venturi 効果で吸気時の陰圧を形成し自発呼吸をシミュレートした。呼吸はスプリングの復元力によって受動的に行われる。抵抗成分は気管内チューブにより形成される。気管内チューブは内径 2.5, 3.0, 3.5 mm のものを使用した。スプリングで規定される肺コンプライアンスは 5 ml/cmH₂O、横隔膜・胸郭コンプライアンスは 8 ml/cmH₂O

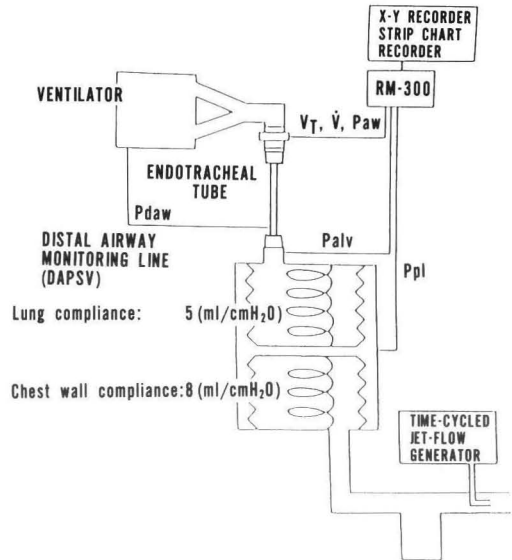


図1 モデル肺の概略図

V_T ；一回換気量、 \dot{V} ；吸気流速、 Paw ；回路内圧、 $Pdaw$ ；気管内チューブ先端圧、 $Palv$ ；肺胞内圧、 Ppl ；胸腔内圧

Oである。測定したパラメータは気道流速 (\dot{V})、一回換気量 (V_T)、気道内圧 (Paw)、気管内チューブ先端圧 ($Pdaw$)、胸腔内圧 (Ppl) である。 \dot{V} と V_T は熱線流量計 (ATD 105, ミナト医科) で測定し、 Paw , $Pdaw$, Ppl は圧トランスデューサで計測し、両方のデータをコンピュータ (RM-300, ミナト医科) に取り込み、多チャネル記録器 (Omnirecorder, 日本電気三栄) で記録し、吸気仕事量 (WOB) を $Ppl-V_T$ カーブから計算し解析した。

2. トリガの問題

a. 機種・回路間差、トリガ方式および PEEP の影響

Baby Log, Servo 300, VIP Bird⁵⁾ の3つの小

* 名古屋大学医学部麻酔学講座 (〒467 名古屋市昭和区鶴舞町 65)

見用人工呼吸器のトリガ時間の比較を行った。Baby Log はフロートリガ (FT) のみであるが他の機種は圧トリガ (PT) も兼ね揃えている。Servo 300 については純正の呼吸器回路のほかコンプライアンスの低い固い呼吸器回路 (Tygon tube) を使用した。また Baby Log 以外では PEEP を付加したトリガ速度を比較した。人工呼吸器の換気方法は Baby Log を除いてプレッシャーサポート (PS) 10 cmH₂O (PS₁₀) とした。Baby Log では SIMV とした。気管内チューブは内径 2.5, 3.0, 3.5 mm を使用した。実験には先に説明したモデル肺を使用した。人工呼吸器の感度設定はおおのこの機種により差があるが、トリガ不全に陥らない最大の感度で設定した。また呼吸回数が早いと auto-PEEP を生じるがこの因子も排除するため呼吸時間は十分に長くとした。すなわち呼吸回数を 10 回/分とし吸呼気比 (I : E) を 1 : 10 とした。図 2 に Baby Log, Servo 300, VIP Bird の 3 つの小児用人工呼吸器のトリガ時間の比較を示す。棒グラフの前半の 3 つは PEEP₀ のとき、後半 3 つは PEEP_s のときである。また気管内チューブサイズは内径 2.5, 3.0, 3.5 mm の順に並べてある。結果は PT と FT の比較では明らかに FT のほうがトリガ速度が速かった。FT については機種の間はほと

んどなかった。純正回路を使った Servo 300 はややトリガ速度が遅いが回路を低コンプライアンスのものに変更すると早くなった。他の機種が口元にフローセンサがついているのに対し、Servo 300 は人工呼吸器側にフローセンサが取り付けられているためこのような結果となったと思われる。PEEP については Servo 300 と VIP Bird についてしか実験を行っていないが、PEEP をかけた方がトリガ速度が早くなる傾向がみられた。

表 1 リークが存在する場合と PEEP を負荷した場合のトリガ時間の変化 (PS 10 cmH₂O, flow trigger)

	Servo 300		VIP Bird
	純正回路	Tygon tube	Bird
LEAK (-) PEEP (-)	90	57.5	80
LEAK (-) PEEP (+)	95	50	75
LEAK (+) PEEP (-)	87.5	60	80
LEAK (+) PEEP (+)	不可能	不可能	60

(単位：msec)

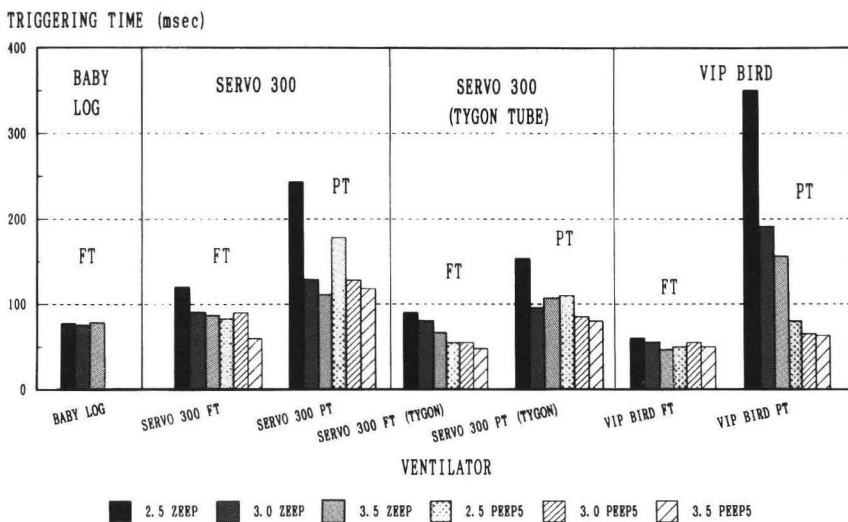


図 2 Baby Log, Servo 300, VIP Bird の 3 つの小児用人工呼吸器のトリガ時間の比較

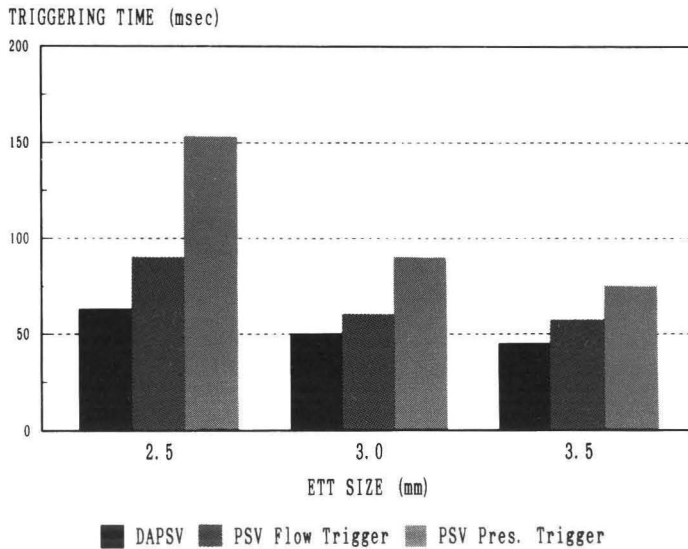


図3 distal airway pressure support ventilation (DAPSV) と Servo 300 の Flow Trigger および Pressure Trigger の PSV のトリガ時間

b. PEEPとリークの影響

一般に小児に人工呼吸器を使用する場合には PEEP を付加したり、気管内チューブ周囲からのリークが存在する場合も多いと思われる。3.0 mm の気管内チューブを用いて、auto-PEEP のかからない状況で一回換気量を 50 ml にして Servo 300 と VIP Bird で換気モードを FT の PS₁₀ にし、リークが存在する場合、PEEP が付加された場合、その両方が存在する場合の吸気トリガ時間について実験を行った。Servo 300 については先ほどの実験と同様にコンプライアンスの低い Tygon tube を用いた場合を追加した。結果を表1に示す。Servo 300 で Tygon tube を用いた場合のトリガ時間が最も速かった。リークや PEEP によってトリガ時間はほとんど変化しなかった。通常トリガには不利となる PEEP やリークの影響がないのは、これらの人工呼吸器には十分にリークや PEEP に照準を絞った代償機構が組み込まれている結果であろう。しかし Servo 300 の場合でリークと PEEP の両方を付加した場合、PSV が auto-cycling のためできなくなってしまった。この2種の間の大きな相違点は、VIP Bird は口元のフローセンサによるトリ

ガであり、Servo 300 は人工呼吸器内のフローセンサによるトリガであるという点であるが、この実験結果からはトリガには口元のセンサの方が有利といえる。

c. 気管内チューブ先端圧トリガ方式について⁶⁾

気管内チューブには直径約 0.5 mm の側管が通っておりチューブの先端に開口している。これに人工呼吸器の圧モニタラインをつなぐことで気管内チューブ先端圧トリガの PSV (distal airway PSV : DAPSV) を行った。図3には Servo 300 を改造して気管内チューブの先端の圧をトリガできるようにした換気方式である distal airway pressure support ventilation (DAPSV) と Servo 300 の FT および PT の PSV のトリガ時間を比較した実験結果を示す。どの気管内チューブのサイズでも DAPSV は最もトリガ時間は短かった。気管内チューブのサイズが細くなるに従ってどのトリガ方式でもトリガ時間は長くなったが、PT の PSV では 3.5 mm から 2.5 mm になるとトリガ時間は 2 倍になるのに対し DAPSV は 40% 増しにとどまった。したがって、細い気管内チューブほど圧のトリガ部位による差が大き

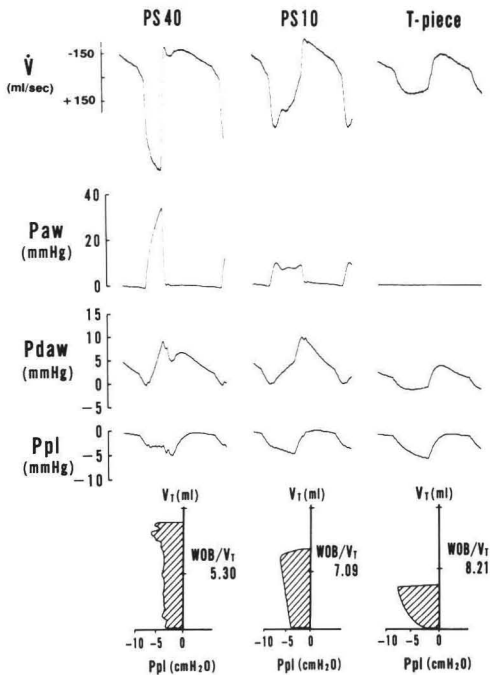


図 4 気管内チューブ先端圧を一致させた場合の PS₄₀ と PS₁₀ の比較
 下段は P-V カーブを示している。WOB/V_T は一回換気量あたりの吸気仕事量を示す。

く、FT のトリガ時間はどの気管内チューブでも DAPSV と大差はなかった。

結局、気管内チューブ先端圧の方が回路内圧のトリガよりも認識が速く、FT は気管内チューブ先端圧トリガ方式と認識速度はわずかな差しかないと結論できる。

3. 吸気流速パターンの問題

PS レベルを上昇させるに従い一回換気量が増え、吸気仕事量も減少していくのは自明の理である。したがって、高い回路内圧を与え細い気管内チューブの抵抗に打ち勝つようにしなければ吸気仕事量の軽減は図れない。また、PS レベルを大きくしても、吸気サポート時間によっては、気管内チューブ先端圧は吸気終末には負荷した陽圧の 50% にも達していないことがある。しかし気管内チューブ先端圧をすばやく上昇させようとして吸気流速を速くすれば premature な termination で終わってしまう現象が生じる。

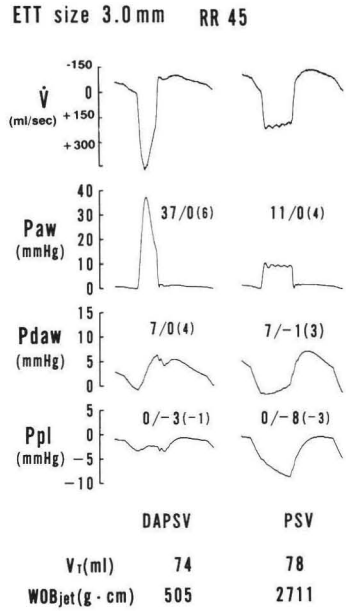


図 5 同一 V_T の場合の DAPSV と Flow Trigger の PSV の比較

最下段の数値 (WOBjet) は Venturi 効果を作り出す jet-flow generator の仕事量を示す。

このような premature termination を起こさないように PS レベルの吸気流速を調節し P_{daw} をモニタしながら回路内圧を上昇させて比較した (図 4)。ピークの P_{daw} は同一になるように調節した。PS₄₀ の場合、P_{daw} がピークに到達するのに 400 msec であったのが、PS₁₀ の場合は 720 msec と遅れた。また V_T あたりの WOB や Pressure Time Product も PS₄₀ の方が小さかった。したがって、気管内チューブ先端圧をできるかぎりすばやく上昇させるフローパターンが望ましいと結論できる。またこの際、人工呼吸器の回路に高い圧をかけても気管内チューブ先端圧は十分上昇しないため、気管内チューブ先端圧をモニタしていれば、安全に回路内圧を上昇させることが可能である。

4. 吸気のターミネーションの問題

気道抵抗の高い肺に PSV を応用した際、auto-PEEP による吸気トリガ遅れが大きな問題とな



図 6 気管内チューブサイズを 2.5, 3.0, 3.5 mm と変化させ呼吸回数は 30, 45, 60 回と変化させた際の、DAPSV と Flow Trigger の PSV の WOB の値の比較

ることは桑山らの研究⁷⁾ですでに報告されているが、小児に対する PSV の応用でも同じことが問題となる。auto-PEEP を軽減するような吸気の termination にしないと PSV は吸気仕事を軽減しないばかりか作動不能に陥ることもある。それでは換気回数の多い実際の患者には部分的補助換気の際、いかなる換気方法がよいのだろう。DAPSV と FT の PSV の比較の例を示す (図 5)。人工呼吸気管内チューブ先端圧としては Servo 300 を用いて pediatric mode で PEEP をかけずに行った。図 5 は気管内チューブサイズ 3.0 mm 呼吸回数 45 回の際の V , Paw , $Pdaw$, Ppl を示す。 V_T を同じになるように患者の自発呼吸のパワーであるところの jet の流量を変化させた。一番下の段に jet の作り出す圧と換気量から得られる P-V カーブをもとに計算した WOB の値を示す。ちなみにこの WOB の値は患者の呼吸筋のパワーのすべてである。一見してわかるように DAPSV では auto-PEEP の値が 3 cmH_2O と、PSV の 6 cmH_2O に比較して小さく、WOB も PSV の 1/5 以下となっている。

図 6 は気管内チューブサイズを 2.5, 3.0, 3.5 mm と変化させ呼吸回数は 30, 45, 60 回と変化させた際の、DAPSV と FT の PSV の WOB の

値を比較したものである。2.5 mm で 30 回の呼吸回数の場合を除いてすべて DAPSV の WOB が小さかった。とりわけ呼吸回数が増えるとこの差は顕著になる。呼吸回数が遅く auto-PEEP が小さい場合は現在の FT の PSV ではほとんど問題ないと思われる。DAPSV の価値は呼吸回数が早く auto-PEEP が問題となる症例で見いだされるであろう。この理由は DAPSV が呼吸回数の遅い場合も早い場合も premature に吸気が終了するため、吸気時間の短い早い呼吸回数の症例では理想的となるのに呼吸回数が遅いと吸気努力の途中で圧サポートを終了してしまうためである。現在のところ改造型の人工呼吸器で実験を行ったため Servo 300 の termination criteria である初期流速の 5% で終了してしまうが、これをもっと小さな値に変更できれば遅い呼吸回数の場合にも実用性が出るだろう。しかしながら理想的な吸気の termination についての課題は数々の問題を含んでおり、さらなる研究が望まれる。結局、現在のところ考えられる新生児への理想的な部分的補助換気は、トリガ方式はフロートリガで行い、気管内チューブ先端圧をモニタしながら先端圧が十分上昇するような回路内圧を負荷し、先端圧からの feedback を介して吸気を終了させる換気方法

だろう。

まとめ

a. トリガ方式

圧トリガ方式では気管内チューブ先端圧の方が回路内圧のトリガよりも認識が速い。フロートリガ方式は気管内チューブ先端圧トリガ方式と同程度の認識速度である。

b. 吸気流速パターン

人工呼吸器の回路に高い圧をかけても気管内チューブ先端圧は十分上昇しないため、高い気道抵抗に打ち勝つような高い回路内圧が必要である。逆に気管内チューブ先端圧をモニタしていれば、安全に回路内圧を上昇させることが可能である。

したがって、気管内チューブ先端圧をできるかぎりすばやく上昇させるフローパターンが望ましい。

c. 吸気のターミネーション

高い気道抵抗の患者は十分な呼出時間が必要である。これが不十分になると auto-PEEP が高くなり次の呼吸のトリガ不能となる。しかし患者の吸気時間内にサポートは本来中止すべきではないので、そのタイミングについてはさらに検討を要する。

参考文献

- 1) Mehta A, Callan K, Wright BM, et al : Patient triggered ventilation in the newborn. *Lancet* ii : 17-19, 1986
- 2) Greenough A and Pool J : Neonatal patient triggered ventilation. *Arch Dis Child* 63 : 394-397, 1988
- 3) Mitchell A, Greenough A and Hird M : Limitation of patient triggered ventilation in neonates. *Arch Dis Child* 64 : 924-929, 1989
- 4) Takahashi T, Takezawa J, Kimura T, et al : Comparison of inspiratory work of breathing in T-piece breathing, PSV, and pleural pressure support ventilation. *Chest* 100 : 1030-1034, 1991
- 5) Servant GM, Nicks JJ, Donn SM, et al : Feasibility of applying flow-synchronized ventilation to very low birthweight infants. *Respir Care* 37 : 249-253, 1992
- 6) 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
- 7) 桑山直人, 高橋利通, 木村智政ほか : 気道抵抗の高い肺でのプレッシャーサポート換気と auto-PEEP の関係. *人工呼吸* 9 : 32-37, 1991