

□ 短 報 □

低コンプライアンス，頻呼吸モデル肺における サーボ 300 の PSV 吸気立ち上がり時間の換気力学的影響

小 林 康 夫* 氏 家 良 人** 岩 崎 寛* 並 木 昭 義*

ABSTRACT

Effects of Inspiratory Rise Time of Pressure Support Ventilation on Respiratory Dynamics in the ARDS-imitated Model Lung

Yasuo KOBAYASHI, Yoshihito UJIKE, Hiroshi IWASAKI and Akiyoshi NAMIKI

Department of Anesthesiology, Sapporo Medical University School of Medicine

Pressure support ventilation (PSV) has been often used in the management of various respiratory failure. The most suitable inspiratory rise time (IRT) (the period from the beginning of inspiration until reaching preset support pressure) is presently unidentified for all diseases including ARDS. We examined the effects of IRT on respiratory dynamics during PSV in a mechanical model lung adjusted to simulate ARDS. Total compliance, tidal volume (V_T), respiratory rate and respiratory time fraction of the model lung were adjusted in 50 ml/cmH₂O, 190 ml, 49/min and 0.3, respectively. Respiratory parameters [V_T , peak inspiratory pressure (PIP), PEEP, peak inspiratory flow rate (PIFR), work of breathing of patient (WOBp) and pressure-time product (PTP)] during PSV 20 cmH₂O with Servo 300 (Siemens Elema) were measured with CP 100 pulmonary monitor (Bicore). IRT was set to fixed percentages (0, 5 and 10%) of breath cycle time (4, 2, 1.3, 0.7 and 0.4 sec). The reduction in IRT produced significant increases in V_T and PIFR and decreases in WOBp and PTP. PEEP and PIP remained constantly high throughout the range of breath cycle times, but were noticeably lower at the shortest cycle of 0.4 sec. In conclusion, it may be beneficial to set IRT as short as possible when using PSV in a patient with ARDS.

ARDS 患者の多くは浅く速い呼吸を呈し，吸気努力が強く，呼吸仕事量が著しく増加している。pressure support ventilation (PSV) は自発呼吸を温存でき，同調性がよく，サポート圧に応じて呼吸仕事量を肩代わりできるため，ARDS 症例に対してよく使用される換気モードである。しかし，人工呼吸器の機種によって，PSV の吸

気立ち上がり速度や呼気への転換の機構などが異なり，そのため PSV という換気モードは同じであってもその性能に差が生じる。人工呼吸器サーボ 300 (Siemens Elema, Sweden) では PSV の吸気立ち上がり時間 (inspiratory rise time: IRT) を任意に設定することができ，吸気流速を調節することができる。

今回われわれは，ARDS を想定した低肺コンプライアンス，頻呼吸状態を成人モデル肺を用い

* 札幌医科大学医学部麻酔学教室

** 札幌医科大学医学部麻酔学教室 (現：宮崎医科大学救急部)

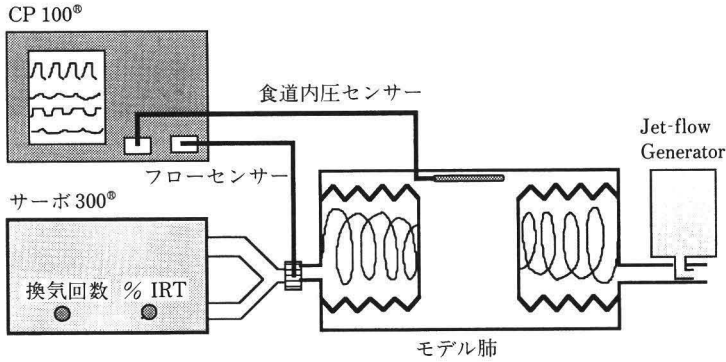


図1 モデル肺，CP 100，サーボ 300 の接続図

モデル肺は double bellows in box type を用いた。CP 100 の食道内圧センサーをモデル肺の内腔に挿入し，フローセンサーをサーボ 300 とモデル肺の間に取り付けた。PSV の吸気立ち上がり時間は換気回数 (CMV) ダイアルで 1 呼吸サイクルを決め，そのうちの何%かを %IRT ダイアル (0~10%) で表示する。

て作製し，これにサーボ 300 による PSV を行い，吸気立ち上がり時間の変化が換気力学的，とくに吸気仕事量に対してどのような影響を及ぼすかを，呼吸モニター CP 100 (Bicore, USA) を用いて検討した。

方 法

モデル肺は図1のような double bellows in box タイプを用いた¹⁾。このモデル肺は胸郭を想定した気密なプラスチック製の直方体内に，横隔膜の役目を果たす bellows と肺として機能する bellows を配し，それぞれの bellows につながったバネのバネ係数を調節することにより肺および胸郭コンプライアンスを変化させることができる。今回は ARDS 患者の呼吸状態を想定し，総コンプライアンスを 20 ml/cmH₂O，胸郭コンプライアンスを 50 ml/cmH₂O とし，一回換気量 190 ml，呼吸回数 49 回，T_I/T_{TOT} (respiratory time fraction)=0.3 に設定した。CP 100 のフロートランスデューサーをモデル肺に接続し，食道内カテーテルをモデル肺の胸腔内に留置した。測定項目は吸気一回換気量 (V_{T1})，最大吸気圧 (PIP)，PEEP，最大吸気流量 (PIFR)，pressure-time product (PTP)，患者の呼吸仕事量 (WOB_p) とした。PSV モードでの PTP は

図2に示すように，流量，気道内圧，食道内圧の同時モニタリングにより食道内圧の時間積分から計算され，WOB_p は図3のように食道内圧と気道内圧の時間積分で算出される²⁾。上記の設定条件でモデル肺を作動させ，コントロールとして各項目を測定した。次にサーボ 300 を bias flow 2 l/min，感度 1 l/min のフロートリガー，サポート圧 20 cmH₂O，PEEP 5 cmH₂O の PSV モードに設定して接続した。サーボ 300 では PSV モードにおける IRT，すなわち吸気ガス供給開始から気道内圧が設定サポート圧に達するまでの時間を，1呼吸サイクルに対する割合として 0 から 10% までの%表示 (%IRT) で設定する³⁾。1呼吸サイクルは CMV ダイアルで換気回数を設定して決定する。したがって，IRT は設定換気回数と %IRT ダイアルの二者で決定されることになる。今回は設定換気回数を 15，30，45，90，150 回としたときに (1呼吸サイクルはそれぞれ 4，2，1.3，0.7，0.4 秒) それぞれ %IRT を 10，5，0% と変化させ，各項目を測定した。

統計処理は条件変更後に状態が安定したところで，連続した 10 呼吸分のデータを用いて行い，t 検定により P<0.05 を有意差ありとした。

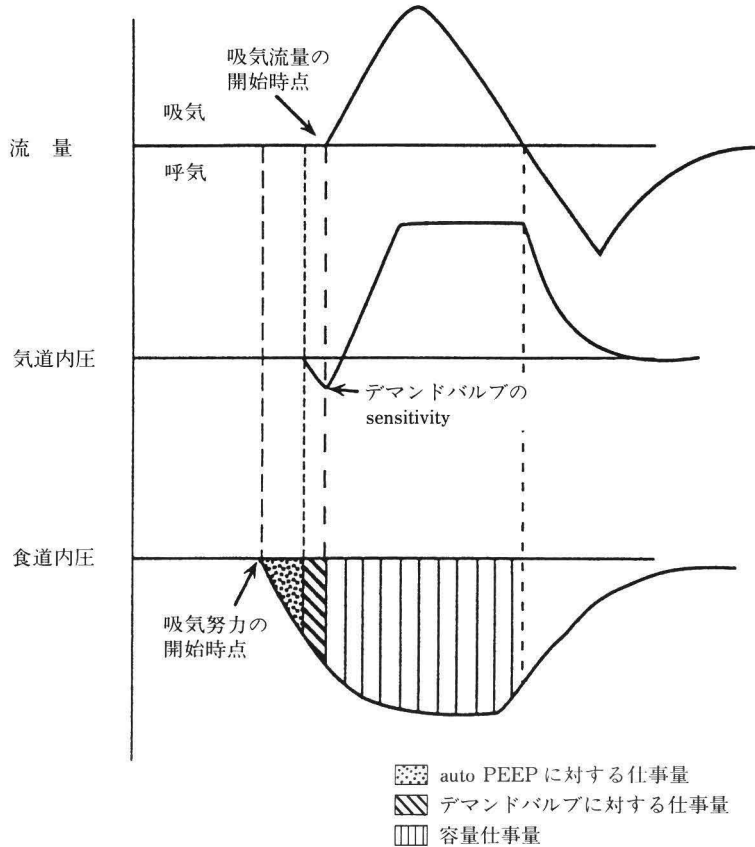


図 2 PTP の測定法

PTP には容量仕事量のほかに auto PEEP, デマンドバルブに対する仕事量が含まれる。

(石川 清, 勝屋弘忠: 機械的換気下の呼吸機能モニター. 集中治療 5: 147-159, 1993 より引用)

結果 (表)

(1) PSV 20 cmH₂O を負荷することで V_{T1} はすべての条件でコントロールより増加した。また、すべての換気回数設定で%IRT を小さくするに従い V_{T1} は不変, または増加したが、増加の程度は設定換気回数が大きくなるに従い減少した。

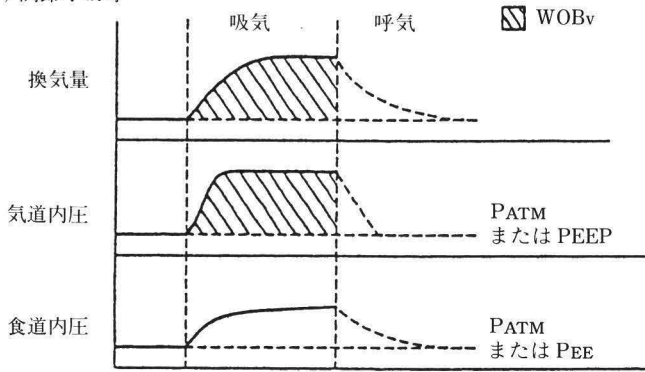
(2) PIP は換気回数 15 回の%IRT 10% で 31 cmH₂O, 換気回数 150 回のいずれの%IRT でも 30 cmH₂O とやや低値を示したほかは、34~36 cmH₂O と高値を示した。換気回数 15 回と 30 回では%IRT を小さくすると若干 PIP は増加した

が、その他の設定換気回数では%IRT 増減による有意な変化を認めなかった。

(3) PEEP は設定 PEEP が 5 cmH₂O であったにもかかわらず、いずれの換気回数でもはるかに高値 (12.6~16 cmH₂O) を示した。換気回数 15 回では%IRT 10% で最低値を示したが、換気回数 30, 45, 90, 150 回では%IRT 0% が最低値を示した。換気回数 150 回では%IRT 10, 5, 0% のときに PEEP はそれぞれ 13.5, 13.0, 12.6 cmH₂O となり、他の換気回数より有意に低値を示した。換気回数 15 回以外では、%IRT を小さくするに従い PEEP は低下する傾向があった。

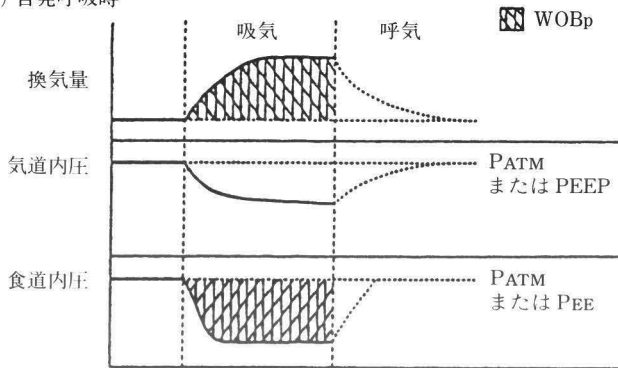
(4) PIFR は PSV を行うことにより、すべて

(I) 調節呼吸時



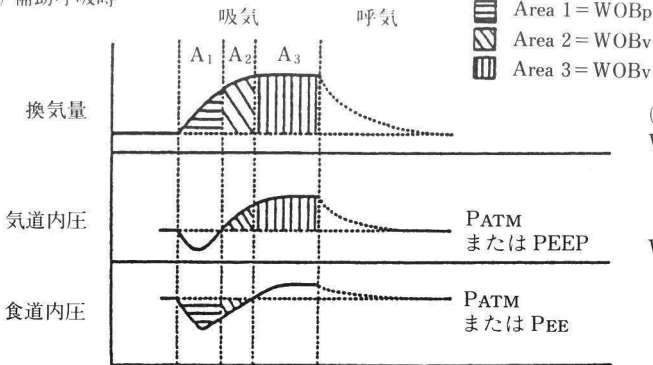
(I) 調節呼吸時
 $WOB_v = \int (PAW - PATM) Vdt$
 PAW：気道内圧 airway pressure
 PATM：大気圧 atmospheric pressure
 Vdt：換気量 tidal volume {流量の時間積分}

(II) 自発呼吸時



(II) 自発呼吸時
 $WOB_p = \int (PEE - PES) Vdt + WOB_{CW}$
 $WOB_{CW} = (Vt)^2 / 2 C_{CW}$ {胸郭の呼吸仕事量}
 PEE：呼気終末時食道内圧 end expiratory esophageal pressure
 PES：食道内圧 esophageal pressure
 C_{CW}：胸郭コンプライアンス chest wall compliance {200 ml/cmH₂Oと設定}

(III) 補助呼吸時



(III) 補助呼吸時
 $WOB_p = \int (PEE - PES) Vdt_1$ {Area 1} + $\int (PEE - PES) Vdt_2$ {Area 2} - $\int (PAW - PATM) Vdt_2$ {Area 2} + WOB_{CW}
 $WOB_v = \int (PAW - PATM) Vdt_2$ {Area 2} - $\int (PEE - PES) Vdt_2$ {Area 2} + $\int (PAW - PATM) Vdt_3$ {Area 3}

図3 各換気モードでの呼吸仕事量 WOB_v, WOB_p の測定方法および算出式

(石川 清, 勝屋弘忠：機械的換気下の呼吸機能モニター. 集中治療 5 : 147-159, 1993 より引用)

の条件でコントロールに比べ有意に増加した。換気回数 15 回から 90 回の %IRT 5% までは %IRT を小さくするに従い有意に PIFR は増加したが、それ以上 IRT を短くしても 2.00 から 2.03 l/sec で有意差がなかった。

換気回数 30 回の %IRT 10% ではコントロールより有意に増加したが、その他の条件ではコントロールより有意に減少した。また、すべての設定換気回数で %IRT を小さくするに従い PTP は有意に減少し、換気回数 150 回の %IRT 0% で最小値 69 cmH₂O・sec/min を示した。

(5) PTP は換気回数 15 回の %IRT 10, 5% と

表 各吸気立ち上がり時間における各パラメータの変化

設定換気回数	%IRT	V_{T1} (l)	PIP (cmH ₂ O)	PEEP (cmH ₂ O)	PIFR (l/sec)	PTP (cmH ₂ O•sec/min)	WOB _p (joules/l)
control		0.19±0.00	2±0	0±0	0.74±0.00	149±2	0.78±0.00
15 回	10%	0.34±0.00**	31±0**	14.0±0.0**	1.10±0.02**	174±3**	0.81±0.00**
	5%	0.38±0.00	34±0	15.0±0.0	1.52±0.03	154±5	0.71±0.02
	0%	0.41±0.00**	35±0**	14.7±0.5	1.80±0.02**	94±5**	0.52±0.02**
30 回	10%	0.38±0.00**	34±0**	15.0±0.0	1.49±0.02**	153±3**	0.71±0.02**
	5%	0.39±0.01	35±1	15.2±0.4	1.70±0.04	131±2	0.64±0.01
	0%	0.41±0.01**	34±1	14.0±0.5**	1.79±0.03**	87±6**	0.48±0.03**
45 回	10%	0.42±0.00**	36±1	16.0±0.0	1.77±0.03**	134±3**	0.68±0.02**
	5%	0.44±0.00	35±1	16.0±0.0	1.94±0.04	115±2	0.62±0.02
	0%	0.44±0.01	35±0	15.0±0.0**	1.98±0.03*	87±5**	0.50±0.01**
90 回	10%	0.43±0.01*	35±0	16.0±0.0*	1.92±0.04**	115±3	0.61±0.02**
	5%	0.44±0.00	35±0	15.6±0.5	2.00±0.02	99±5	0.56±0.02
	0%	0.45±0.01*	35±0	14.8±0.6**	2.00±0.04	86±5**	0.49±0.02**
150 回	10%	0.44±0.01	30±0	13.5±0.5*	2.01±0.04	88±6**	0.52±0.03**
	5%	0.44±0.00	30±0	12.9±0.3	2.02±0.04	81±5	0.48±0.03
	0%	0.44±0.00	30±0	12.6±0.5*	2.03±0.04	69±4**	0.42±0.03**

%IRT を小さく，または設定換気回数を大きくするに従い， V_{T1} ，PIFR は増加し，PTP，WOB_p は減少する。
 **：P<0.01 vs RT 5%，*：P<0.05 vs RT 5%

(6) WOB_p は換気回数 15 回の 10% でコントロールよりも有意に増加したが，その他はコントロールよりも有意に減少し，すべての設定換気回数で%IRT を小さくするに従って有意に減少した。最小値は換気回数 150 回の%IRT 0% のときに 0.42 Joules/l を示した。また，%IRT が 10，5% のときは設定換気回数が多いほど WOB_p は有意に減少した。

考 察

ARDS では肺のコンプライアンスは低く，浅く速い呼吸を呈するが，PSV は PIP を低く保ち，速い呼吸にも同調性がよいとされる⁴⁾。しかし，PSV の IRT の長短によっては同調性を損なったり，呼吸仕事量を増加させることが考えられる。すなわち，IRT が長すぎると吸気流量は少なくなり，気道閉塞感をもたらしたり，ARDS 患者の非常に速い吸気に追従できずに気道内圧が陰圧となって呼吸仕事量が増大したりする。逆に，IRT が短すぎると最大吸気流量は非常に大

きくなり，圧迫感を与えたり，吸気相初期の気道内圧のオーバーシュートや，人工呼吸器の種類によってはその後の急激な流量低下による吸気途中での呼気への移行を来したりし，同調不良の原因となる^{4)~6)}。

今回設定したモデル肺の呼吸数は 49 回/分で， $T_i/T_{TOT}=0.3$ であるから，計算上吸気時間は 0.37 秒になる。本実験の最長の IRT は設定換気回数 15 回の%IRT 10% (60/15×0.1=0.4 秒) であり，モデル肺の吸気時間を上回っていた。この条件では不同調は認めなかったが，WOB_p，PTP はコントロールよりも増大した。また，換気回数 15 回の%IRT 5%，換気回数 30 回の%IRT 10% では IRT が 0.2 秒であり，モデル肺の吸気時間より短い，コントロールに比べ WOB_p は若干減少したにすぎず，PTP は増加した。このように IRT が吸気時間より短ければよいというわけではなく，やはり吸気流量が大切であることが分かる。一方 IRT が最短であると思われる換気回数 150 回の%IRT 0% では，気道内

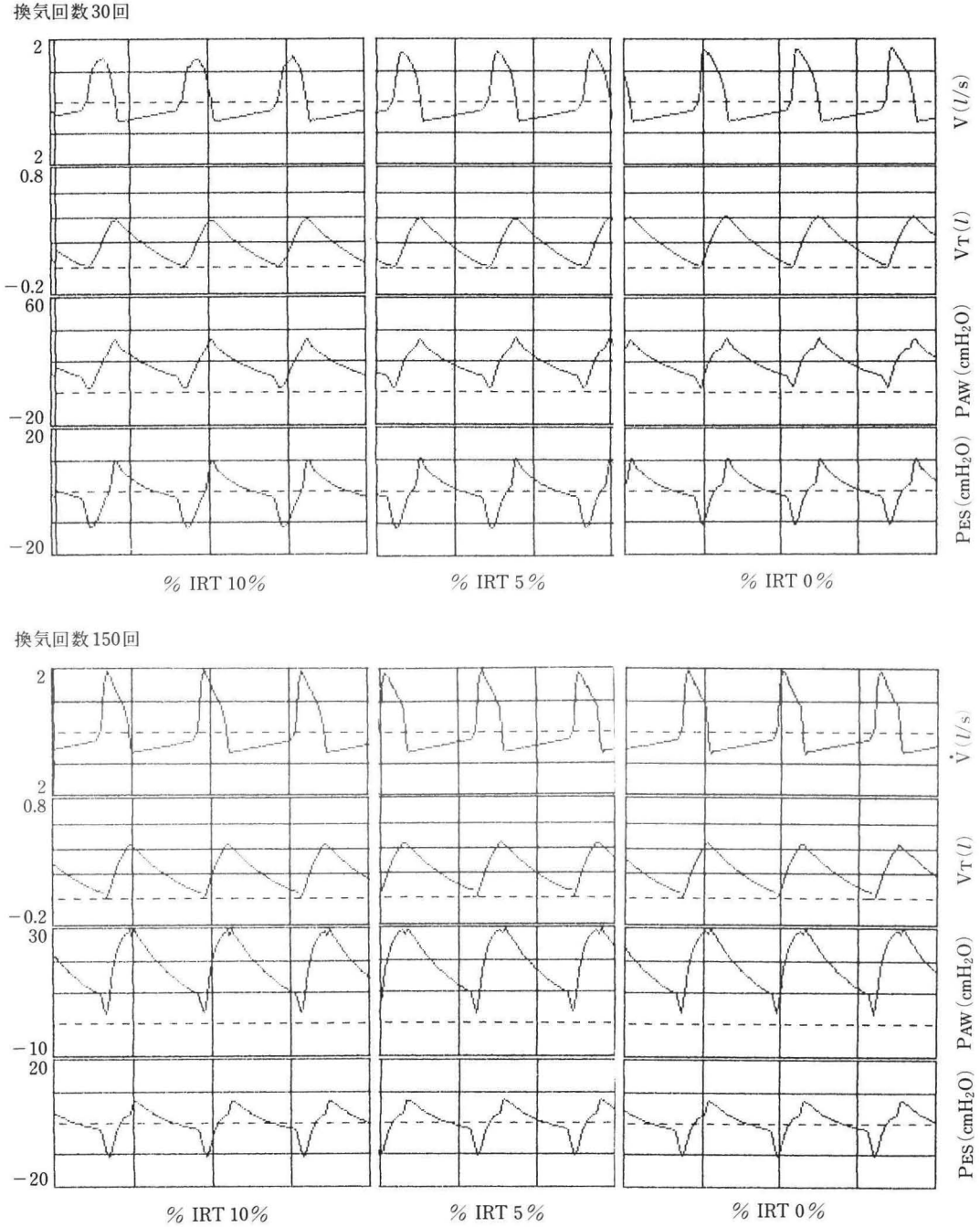


図4 流量，換気量，気道内圧，食道内圧の同時記録曲線

上段が換気回数30回，下段が換気回数150回で，それぞれ%IRTを左より10%，5%，0%に設定した場合の各曲線の変化。換気回数30回では%IRTを小さくするに従って流量が増加し，PIPは吸気末期にノッチのように形成されている。換気回数150回では%IRTを変えても流量の変化は乏しいが，気道内圧にはノッチがなく換気回数30回より低くなっている。（上段と下段で気道内圧の目盛りが異なることに注意）

圧のオーバーシュートや、吸気途中で呼気への移行といった現象は認められず、WOBp, PTPは最小値を示した。

今回、PEEPが設定値5 cmH₂Oに対して12.6～16.0 cmH₂Oと増大したのは、短い呼気時間と呼気回路や呼気弁の抵抗のためにYピース部分での気道内圧の上昇が引き起こされたことや、auto PEEPの関与が考えられた。呼吸数49回/分の頻呼吸に対してPSVを行うと一回換気量が増大するが、呼気時間が短いために呼出しきれなくなり、呼気途中で吸気に移行してエアートラッピングが起り、auto PEEPが発生する。流量曲線上は呼気流量が基線に戻る前に急速に立ち上がって吸気が始まっており(図4)、呼気時間が足りないことを物語っている。吸気努力開始時と吸気流量開始時の食道内圧の変化分がauto PEEPに相当し²⁾、本実験では10 cmH₂O前後になっていた。

今回の低肺コンプライアンス、頻呼吸モデルでは%IRTを小さくするか、または設定換気回数を多くしてIRTを短くすることにより、V_{T1}は増加し、WOBp, PTPは減少した。PIPは換気回数15回の%IRT 5%以下のIRTではほぼ一定で、換気回数150回の値が他の換気回数の値よりも減少した。計算上ではモデル肺の吸気時間は0.37秒であり、換気回数15回の%IRT 10%以外はすべて吸気時間内にサポート圧に達しようが、実際にはどの条件でも気道内圧曲線はプラトーを形成せず鋸歯状になっていた(図4)。また、PIPは吸気初期ではなく吸気末期にノッチのように形成されており、呼気開始時に吸気気流が呼気抵抗となっていることが考えられ、この換気回数150回におけるPIPの低下は、吸気流量が最大となったために早くサポート圧に達し、モデル肺の呼気開始時に吸気気流との衝突が緩和されたためと思われる。同様に、PEEPも換気回数150回のときにその他の設定換気回数より有意に低下しており、瞬時にサポート圧に達するために呼気時間が延長して呼気排出が容易になったためであると考えられる。この気道内圧の低下が換気回数設定150回において、WOBpやPTPを大きく減じた原因であると推測される。

サーボ300の%IRTダイヤルには0%から10%までの目盛りがある。0%というのは換気回数を何回に設定してもIRTは最小で変化しないと思われるがちである。しかし、今回の実験では、%IRTを0%にして換気回数を上げていくと、換気回数一定のまま%IRTを下げて吸気流速を増加させていくように各パラメータは変動した。すなわち、同じ0%でも1呼吸サイクルを短くしたほうがIRTは短くなると思われる。また、設定換気回数15回の%IRT 5%と換気回数30回の%IRT 10%のように計算上IRTが等しくなる場合は、換気力学的にも同等の測定値を示しており、吸気立ち上がりの性質に違いはないと思われる。IRTは%IRTダイヤルのみで設定させると思われるがちであるが、実際は換気回数(CMVダイヤル)の設定により大きくIRTは変化することを銘記しなければならない。今回の実験では、患者の呼吸数に換気回数を設定することはとくに有意な利点を見い出せなかった。

以上の結果から、頻呼吸に陥っている成人のARDS患者をPSVで管理する場合には、IRTを極力小さくすることが呼吸仕事量、呼吸筋努力の軽減につながり、得策と考えられる。しかし、今回はあくまでもモデル肺での実験であり、実際の臨床では呼吸パターンの違いや気道抵抗は無視できないため、症例ごとに気道内圧や呼吸仕事量をモニターしながら至適な吸気立ち上がり時間を決定することが最善である。

参考文献

- 1) 氏家良人：CPAPモードにおける最新の人工呼吸器の吸気相の機能とその特徴。人工呼吸 12：20-31, 1995
- 2) 石川 清, 勝屋弘忠：機械的換気下の呼吸機能モニター。集中治療 5：147-159, 1993
- 3) 盛 直久, 鈴樹正大：Servo 300の吸気立ち上がり時間が小児Pressure Support換気におよぼす影響。ICUとCCU 18：289-295, 1994
- 4) 時岡宏明, 平川方久：ARDSに対するpressure support ventilationの適応と限界。ICUとCCU 17：1063-1072, 1993
- 5) 大塚将秀, 磨田 裕, 山口 修ほか：Servo Ventilator 300の機能と基本性能の検討。人工

- 呼吸 10：142-151, 1993
- 6) 折井 亮, 松下美佐子, 繁田正毅ほか：ARDS
において pressure support ventilation (PSV)
- の同調性に限界を示した1症例. 麻酔 44：
1254-1257, 1995
-