

□原 著□

Inverse Ratio Ventilation と PEEP における 肺気道ダイナミックスの比較検討

美 馬 正 彦* 大 屋 宗 和* 田 口 仁 士*

呼吸不全などの患者で、人工呼吸器を用いた間歇的陽圧換気 (IPPV, volume limited, time cycled) が、吸気対呼気時間比 (I : E) を 1 : 2 で行われている際に、血液の酸素化能が低下してくると、それを改善するためには、呼気終末陽圧 (PEEP) を使用することが一般的に行われてきたが、近頃になって、I : E を逆転してたとえば、2 : 1 や、4 : 1 にすると (IRV), PEEP が成功した場合と同じように血液の酸素化が改善されると言う報告がみられるようになった。そして、PEEP に比べてむしろ IRV の方が、その目的のために優れていると主張される場合には、その理由として、① PEEP より CO_2 の排出がよい、② 最高吸入圧がより低く保たれる、などの点があげられている。しかし、この 2 つの換気法による血液酸素化効果が比較された場合に、患者の肺気道ダイナミックス値、そして、PEEP あるいは IRV に対応して、人工呼吸器がどれだけ換気の仕事のスピード (パワー, power) の変動を示すかを同時に検討した報告は見あたらない。著者達は、同一の分時換気量、同一の換気回数のもとで、I : E = 1 : 1.9 で PEEP 4 cmH₂O を併用した場合と、PEEP 0 cmH₂O (ZEEP) で、I : E = 2.3 : 1 にした場合について、動脈血ガス分析値と、換気力学に関する肺気道ダイナミックスのパラメーター、とくに、パワーについて、家兎を用いて検討した。

方 法

体重 2.5～3.0 kg までの健康家兎 (雄、雌を含む) 9 匹を用いて、ネムブタールにて麻酔したのち気管切開を行った後、パンクロニウムにて筋弛

緩を行ってから、Servo B. 900 人工呼吸器に接続し、間歇的陽圧を用いた調節換気を行った。換気回数は、毎分 40 回、分時換気量は、体重 $\times 0.7 \text{ l}/\text{min}$ 、 FIO_2 は、0.21 (室内気) とした。コントロール (I) として、I : E = 1 : 1.9, ZEEP で 15 分間換気を行ったのち、動脈血ガス分析を行った。ついで、I : E = 2.3 : 1 (IRV) にして 20 分間換気を行ってから動脈血ガス分析を行った。ついで I : E = 1 : 1.9 に戻して 15 分間換気し (コントロール・II)，動脈血ガス分析を行ってから、PEEP 4 cmH₂O を併用して 20 分間換気を行い、その後、動脈血ガス分析を行った。この間に、吸入気道圧 (P), ガス流速 (\dot{V}), 流速積分による換気量 (V), パワー ($P \times \dot{V} = Pw$), 同じくパワーの mean, のそれぞれのアナログ波型をポリグラフ (日本光電) に記録した (図 1)。

各波型からのパラメーターの計算の基礎となる計測は、ノギスを用いて 1/10 mm まで求め、連続した 5 回の換気についての平均値を算出した。P の波型からは、最高吸入気道圧 (P_{max}), 吸気終末圧 (Pei), そして P_{max} 点での弾性成分圧 (Pc) を求めた (cmH₂O)。この Pc は、現在の電子工学をもってしても直接にとらえることは不可能なので、後述するコンプライアンスで Vc を割ることによって求めた。 \dot{V} からは、最高流量 (\dot{V}_{max}) を求めた (l/sec)。

V は、吸気終末点 (Pei と同じ時点) での一回換気量 (V_T) と、 P_{max} の時点での換気量 (Vc) を求めた (ml)。パワーは、吸気最高パワー (iPw), 呼気最高パワー (ePw), 吸気平均パワー ($i\bar{P}w$), そして呼気平均パワー ($e\bar{P}w$) を求めた (kilopondmeter/sec, kpm/sec)。コンプライアンス (C) は、 V_T/Pei として求めた (ml/cmH₂O)。

* 関西医科大学麻酔学教室

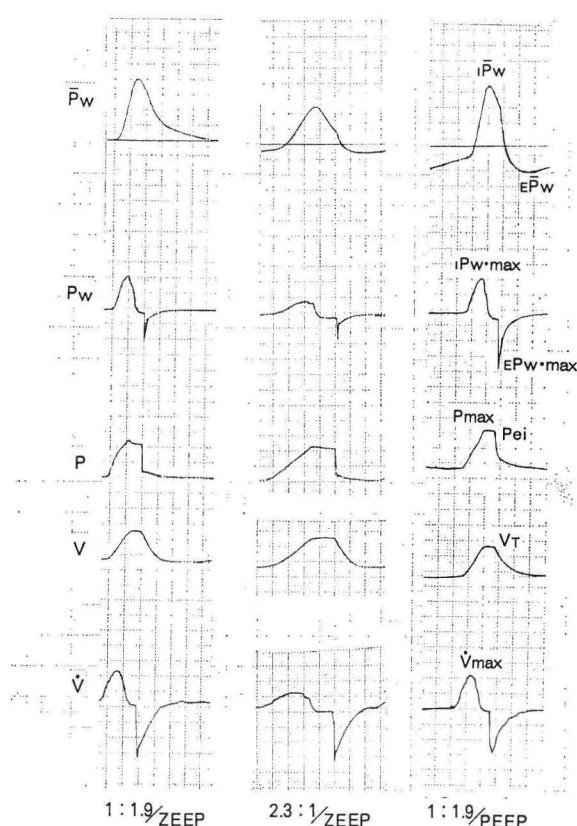


図 1

したがって、これは total thoracic compliance である。レジスタンス (R) は、まず $P_{\max} - P_{\text{c}} / \dot{V}_{\max}$ として計算し、これを、reference flow = 0.1 l/sec で補正した (cmH₂O/l/sec)。換気の仕事 (work, W) は、 $P_{\text{ei}} \times (V_{\text{t}}/1000)$ として算出した (kilopond, kpm)。

結果

換気の仕事 (W) は、コントロール (I) では、 0.599 ± 0.047 (S.E.) kpm, IRV では、 0.577 ± 0.042 で IRV で 4% の減少を示したが有意ではなかった。

コントロール (II) では、 0.630 ± 0.055 , PEEP では、 0.607 ± 0.037 で、PEEP で 4% の減少を示したが有意ではなかった (表 1)。

吸気最高パワーと呼気最高パワーの比 (iPw/ePw) は、コントロール (I) では、 1.09 ± 0.09 (S.E.), IRV では、 0.55 ± 0.06 で、IRV で有意の 5% の減少を示した (表 1)。

表 1 WORK (=MEAN±S.E. kpm)

Control (I)	IRV	Difference · I/CI (%)
0.599 ± 0.047	0.577 ± 0.042	-4*
Control (II)	PEEP	Difference · P/C II (%)
0.630 ± 0.055	0.607 ± 0.037	-4*

* not significant (n=9)

表 2 iPw/ePw (=MEAN±S.E. %)

Control (I)	IRV	Difference · I/C (%)
1.09 ± 0.09	0.55 ± 0.06	-50*
IRV	PEEP	Difference · P/I (%)
0.55 ± 0.06	0.78 ± 0.08	+42%*

* P < 0.01 (n=9)

表 3 iPw (=MEAN±S.E. kpm/sec)

Control (I)	IRV	Difference · I/C (%)
0.020 ± 0.003	0.013 ± 0.002	-35*
IRV	PEEP	Difference · P/I (%)
0.013 ± 0.002	0.022 ± 0.005	+69**

* P < 0.01 ** P < 0.05 (n=9)

表 4 ePw (=MEAN±S.E. kpm/sec)

IRV	PEEP	Difference · P/I (%)
0.004 ± 0.001	0.007 ± 0.001	+75*

* P < 0.01 (n=9)

50% の減少を示した (P < 0.01)。PEEP では、 0.78 ± 0.08 で、これは、IRV に比べると、有意の 42% の増大を示した (P < 0.01) (表 2)。

吸気平均パワー (iPw) は、コントロール (I) で 0.020 ± 0.003 (S.E.) kpm/sec, IRV では 0.013 ± 0.002 で、IRV で有意の 35% の減少を示した (P < 0.01)。PEEP では 0.022 ± 0.005 で、これは IRV に比べると、有意の 69% 増大を示した (P < 0.05) (表 3)。

呼気平均パワー (ePw) は、IRV で 0.004 ± 0.001 (S.E.) kpm/sec, PEEP では 0.007 ± 0.001 で、PEEP で有意の 75% の増大を示した (P < 0.01) (表 4)。

最高吸気道圧 (P_{\max}) は、コントロール (I) では 12.6 ± 0.5 (S.E.) cmH₂O, IRV では 12.0 ± 0.4 で、IRV で有意の 5% の減少を示した (P <

表 5 P_{max} (=MEAN±S.E. cmH₂O)

Control (I)	IRV	Difference · I/C (%)
12.6±0.5	12.0±0.4	-5*
IRV	PEEP	Difference · P/I (%)
12.0±0.4	15.6±0.7	+30**

* P<0.05 ** P<0.01 (n=9)

表 6 COMPLIANCE (=MEAN±S.E. ml/cmH₂O)

Control (I)	IRV	Difference · I/C (%)
4.6±0.1	4.5±0.2	-2*
IRV	PEEP	Difference · P/I (%)
4.5±0.2	4.2±0.3	-7*

* not significant (n=9)

表 7 RESISTANCE (=MEAN±S.E. cmH₂O/l/sec)

Control (I)	IRV	Difference · I/C (%)
8.0±1.2	13.3±1.2	+66*
IRV	PEEP	Difference · P/I (%)
13.3±1.2	14.7±0.7	+10**

* P<0.05 ** not significant (n=9)

0.05)。PEEP では 15.6±0.7 で, IRV に比べて, 有意の 30% の増大を示した (P<0.01) (表 5)。

コンプライアンス (C) は, コントロール (I) では 4.6±0.1 (S.E.) ml/cmH₂O, コントロール (II) では 4.6±0.2 で, 両者の間に有意の差はなかった。IRV では 4.5±0.2 で, コントロール (I) に対して 2% の減少を示したが, 有意ではなかった。PEEP では 4.2±0.3 で, IRV に比べて 7% の減少を示したが, 有意ではなかった (表 6)。

レジスタンス (R) は, コントロール (I) では 8.0±1.2 (S.E.) cmH₂O/l/sec, コントロール (II) では, 9.9±2.2 で, 両者の間に有意の差はなかった。IRV では 13.3±1.2 で, コントロール (I) に対して, 有意の 66% の増大を示した (P<0.05)。PEEP では 14.7±0.7 で, IRV に対して有意の変化を示さなかった (表 7)。

動脈血酸素分圧 (PaO₂) は, コントロール (I) で 88.9±6.7 (S.E.) mmHg, IRV で 94.8±6.7 で, IRV では有意の 6% の増大がみられた (P<0.05)。PEEP では, 103.5±4.2 で, IRV に対して 9% の増大がみられたが, 有意ではなかった (表

表 8 PaO₂ (=MEAN±S.E. mmHg)

Control (I)	IRV	Difference · I/C (%)
88.9±6.7	94.8±6.7	+6*
IRV	PEEP	Difference · P/I (%)
94.8±6.7	103.5±4.2	+9**

* P<0.05 ** not significant (n=9)

表 9 PaCO₂ (=MEAN±S.E. mmHg)

Control (I)	IRV	Difference · I/C (%)
37.5±0.8	36.3±1.0	-3*
IRV	PEEP	Difference · P/I (%)
36.3±1.0	36.5±1.1	+1*

* not significant (n=9)

8)。

動脈血炭酸ガス分圧 (PaCO₂) は, コントロール (I) では 37.5±0.8 (S.E.) mmHg, IRV では 36.3±1.0 で, IRV で 3% の減少がみられたが, 有意ではなかった。PEEP では, 36.5±1.1 で, IRV に対して 1% の増大を示したが, 有意ではなかった (表 9)。

考 察

呼吸不全などの患者に人工呼吸器を用いて調節換気を行っている時, 従来からすすめられている I:E=1:2 で IMV, または PEEP を併用しているても血液の酸素化が低下してきた際に, I:E を逆転してやると, IMV, または PEEP がうまくいった時と同じような血液の酸素化の改善がみられると言う報告がある^{1,2)}。その場合は, I:E=4:1 が多いが, 本実験では, コントロールの I:E=1:1.9, IRV では 2.3:1 を用いていることについて, 少し説明が必要である。使用した人工呼吸器は Siemens-Elema 900 B Servo であるが, 衆知のようにこのシリーズの人工呼吸器は, B 型, C 型, D 型, のいずれも, 現在市販されている人工呼吸器としては, もっとも信頼度の高いエレクトロニクスによって装備されている。ただ, その吸気圧波型に inspiratory hold (I.H.) を作るために, inspiratory time (I.T, %) と pause time (P.T, %) の 2 つのダイヤルが, 固定数値で設定されている。解説書では, I:E=1:2 にするために, I.T.

と P.T. のダイヤルセットを 25 : 10 とすることをすすめているが, I.T. と P.T. を加えたものが正味の吸気時間になるようになっているから, この場合の正確な I:E は, $1:1.85 \div 1:1.9$ である。これを正味の吸気時間の中で P.T. が占める比率をこのままに保ちながら I.T. プラス P.T. を延長してゆこうとすると, この機種での選択肢は 50 : 20 に限られてしまって, この場合の I:E は 2.3 : 1 になるのである。I:E を変えていく場合に, この PT に対する配慮が大切であるとの実例を次に示す。1988 年, 10 月, 東京で行われた, 「急性呼吸不全と呼吸管理セミナー」の中に, モデル肺を用いて 900 C Servo 人工呼吸器による time cycled, volume limited の換気を行って, I:E を 1 : 1.9, 1.2 : 1, 2.6 : 1 (以下略) と変えて行った研究の発表があった。

これによると, 吸入圧の変化がそれぞれ順番に, 13.2 cmH₂O, 10.2, 13.7 のことであり, I:E=1.2 : 1 のところだけ直線性がなくなっていた。この I:E は, IT:PT の組み合わせでは 25 : 30, あるいは 50 : 5 でしかできないはずであるから, PT 比率の直線性に対する配慮がなされていなかったのでなければ, モデル肺ではこのようなことはおこり得ない。人工呼吸器が同じ吸気時間内により長い I.H を作るためには, より短い IT 内で同じだけの送気を達成してしまって吸気弁を閉じてしまい, その後の吸気相の終りまで呼気弁も閉じたままに保たねばならないから, IT の長い方がゆっくりと送気の仕事をすればいいことになる (仕事のスピード=パワー)。もう少し, この報告に検討を加えると, ちなみに IT+PT の両者共通 (55%) で, I:E=25 : 30 での IT 比は $25/55=0.45$, 50 : 5 では 0.90, コントロールの I:E=1 : 1.9 では, 多分 IT:PT=25 : 10 (すすめられている標準使用時の設定) であるだろうから, この時の IT 比は $25/35=0.71$ である。換気量は同じなのだから, 25 : 30 (IT=0.45) では, コントロール 1 : 1.9 (IT=0.71) より早い仕事のスピードが要求されるし, 50 : 5 (IT=0.90) では, よりゆっくりでよいはずである。この差が, 最大吸入圧の直線性を失わせる原因となったと考えられる。

われわれが IRV として設定では, I:E=2.3 : 1, IT:PT=50 : 20 としてあり, コントロールの I:E=1 : 1.9, IT:PT=25 : 10 に対して, IT, PT のいずれもが 2 倍の設定になっている。

ところで, 人工呼吸器の機能分析について, パワー (power) と言う概念を最初に導入したのは, Engström と Norlander³⁾ であった。物理学の基本量として, 質量を M, 長さを L, 時間を T で表わし, 換気力学に必要なパラメーターを表わしてみると次のようになる。すなわち, 仕事 (Work, W)=ML²T⁻² kilopondmeter (kpm), 圧 (Pressure, P)=ML⁻¹T⁻² cmH₂O, 量 (Volume, V)=L³ litre(l), 流量 (Flow, \dot{V})=L³T⁻¹ litre/sec(l/sec), パワー (Power, Pw)=ML²T⁻³ kilopondmeter/sec (kpm/sec) である。ここで $P \times V = (ML^{-1} T^{-2}) \times (L^3) = ML^2 T^{-2} = W$, $P \times \dot{V} = (ML^{-1} T^{-2}) \times (L^3 T^{-1}) = ML^2 T^{-3} = Pw$ の関係が成立し, Pw は W のスピードであることがわかる。また $W = k \cdot \int Pw \cdot dt$ の式も成立することがわかる ($k=0.01$)。人工呼吸器が, volume limited, time cycled で, 患者の肺気道ダイナミックスの変化に影響されずに機能を正確に維持するためには, このパワーのリザーブが十分でなければならない。fluid lung や肺水腫などでは, 0.85~1.5 kpm/sec のパワーが必要であると言われている⁴⁾。このパワーと言う概念は, いろんな成書にも登場していくようになってきた^{5)~7)}。

それぞれの結果について検討を行うと, まず W であるが, W が, IRV も, PEEP も, コントロールに対して有意の変化がなかったことは, 重要である。もし, W に変化があるのであれば, それに応じて Pw の変化がおこっても当然であるから, Pw の比較は簡単にはできないことになる。先述のように W は $Pei \times V_T$ として求めたし, C は V_T/Pei として求めたのであるから, C にも変化がなかったことと合わせて, 次のようなことが言えるだろう。

$$W = Pei \times V_T = K \quad \dots \dots (1)$$

$$C = V_T/Pei = k \quad \dots \dots (2) \quad \text{とすると,}$$

(2)より

$$V_T = k \cdot Pei \quad \dots \dots (3)$$

(1)と(3)より

$$(Pei)^2 = K/k$$

ここで, $Pei > 0$, $K > 0$, $k > 0$ であるから

$$\therefore Pei = \sqrt{K/k} = \text{一定}$$

(1)より

$$\therefore VT = \text{一定}$$

と言う結果が得られる。つまり, ここで人工呼吸器は, IRV 使用中も PEEP 併用中も, 正しく定量換気を行っていることが証明されたことになる。

iPw/ePw が, IRV でコントロールに比べて有意に減少したのは $i\bar{P}w$ が, IRV でコントロールに比べて有意に減少しているのとあわせて考えることができる。つまり, 吸気時間が延長した分だけ, パワー (仕事のスピード) は, 吸気相において slow down していることになるのだが, これを言うには, 先述した W が一定であることが必要である。PEEP で, IRV より iPw/ePw も $i\bar{P}w$ も増大しているのは, PEEP 時の $I:E$ が $1:1.9$ であることにもよるが, 次に述べる仕事の平均スピード比と, 合わせて考えると興味がある。いずれにせよ, PEEP では, 人工呼吸器が, より大きいパワーを要求されることを示している。

今, IRV について $e\bar{P}w/i\bar{P}w$ を計算してみると 0.30 で, 同じく PEEP についてみると 0.32 である。つまり, IRV と PEEP では, 呼出時の仕事の平均スピード比はあまり変わらない結果となっている。これは, P_{max} が PEEP の方が IRV より 30% も大きいことを考えると, 一見奇異であるが, これは, $e\bar{P}w$ は人工呼吸器のパワーよりも, むしろ患者側の換気に対する受動的な変化を示しているからだろう。

レジスタンスは, PEEP と IRV で有意の変化を認めなかった。この点について注目しないといけないのは, IRV では \dot{V}_{max} の著明な低下がみられるのに対して, PEEP では, アナログ波形そのものからだけではわかりにくいが, P_c が上昇していないことである (図 1)。レジスタンスの計算式からわかるように, PEEP による \dot{V}_{max} の上昇は, レジスタンス値を低下させる方向に働くのだが, コンプライアンスに変化がないものだから, PEEP によって上昇したトータルの圧成分の内で, P_c をひいた部分は, すべて非弹性抵抗についてやされていることになる。一方, IRV での

\dot{V}_{max} の低下は, レジスタンス値を上昇させる方向に働くのだが, PEEP の場合と同じ理由で, P_c が変わっていないのに P_{max} が低下しているから, トータルの圧成分のほとんどが弾性抵抗についてやされていることになる (図 1)。言われるところの, PEEP による FRC の増加も, 終末細管支部分の拡張でもそうなのだが, 筋弛緩剤を投与した調節換気では, それらはいずれにしても機能的には残気量であるが, 本実験では, $Paco_2$ については各群間で差は生じなかった。

Pao_2 では, PEEP は IRV に対して有意の変化を示さなかったが, コントロール (I) とコントロール (II), つまり IRV のあと 2 度目のコントロール (I : E = 1 : 1.9, ZEEP) では, コントロール (II) が 7% の上昇を示し ($P < 0.05$), IRV による血液酸素化の改善を示唆しているので, さらに PEEP によるそれ以上の改善は無理だったのかもしれない。

結 語

血液の酸素化能の改善が望まれる場合に, IRV か PEEP のいずれをえらぶかの選択をせまられた場合, PEEP を併用する人工呼吸器は高いパワーを保持することが必要となるので, パワーの余力が十分ある人工呼吸器が必要である。具体的には, 同じ換気量, 換気回数を設定したままで, working pressure (Servo), あるいは flow rate (Erica) などを上昇させることのできる機能を持った人工呼吸器が使用できることが望ましい。しかし, その場合でも IRV を低い PEEP と併用することによって, 低いパワーで血液の酸素化が改善される可能性もある。他方, たとえば, 麻酔器やそれに類したもの, あるいは constant power generator の人工呼吸器⁸⁾ しか用意できない時には, PEEP より低いパワーしか必要としない IRV がファーストチョイスとなるだろう。

文 献

- 1) Cole AGH, Weller SF, Sykes MK : Inverse ratio ventilation compared with PEEP in adult respiratory failure. Intensive Care Med 10 : 227-232, 1984

- 2) Gurevitch MJ, Dyke JV, Young ES, Jackson K : Improved oxygenation and lower peak airway pressure in severe adult respiratory distress syndrome. *Chest* 2 : 211-213, 1986
- 3) Engström CG, Norlander OP : A new method for analysis of respiratory work by measurements of the actual power as a function of gas flow, pressure and time. *Acta Anaesthesiol Scand* 6 : 49-55, 1962
- 4) Norlander OP : Functional analysis of force and power of mechanical ventilators. *Acta Anaesthesiol Scand* 8 : 57-77, 1964
- 5) Rolly G, Renders-Versichern L : Pneumotachography. Measurement in Anaesthesia. Edited by Feldman SA. Leigh JM, Spierdijk J. Leiden, Leiden University Press, 1974, pp. 88-99
- 6) Bouhuys A : Breathing, New York, London, Grune & Stratton, 1974, pp. 145-173
- 7) Nunn JF : Applied Respiratory Physiology. London-Boston, Butter Worths, 1977, pp 178-212
- 8) 美馬正彦 : Ventilator をその Power から見た機能分析. 麻酔 22 : 289-297, 1973

ABSTRACT

Airway Dynamics of Inverse Ratio Ventilation Compared with PEEP In Rabbits

Masahiko MIMA, Munekazu OHYA
and Hitoshi TAGUCHI

*Department of Anesthesiology,
Kansai Medical University*

Changes in airway dynamics of an inspiratory : expiratory (I : E) ratio of 2.3 : 1 (IRV) and a ratio of 1 : 1.9 with positive end-expiratory pressure (PEEP) of 4 cmH₂O were studied with reference to speed of work (Power) in rabbits. Mechanical ventilation was provided by a 900 B Servo ventilator (FIO₂=0.21). Gas flow measured by pneumotachographs and integrated to obtain tidal volume, airway pressure, and power through computerized pressure-flow multiplier were recorded. Maximum inspiratory power/maximum expiratory power was significantly higher by 42% with PEEP than IRV while there was no significant change in work. Mean inspiratory power were 0.013 ± 0.002 (S.E.) kpm/sec and 0.022 ± 0.005 with IRV and PEEP respectively. Mean expiratory powers were 0.004 ± 0.001 (S.E.) kpm/sec and 0.007 ± 0.001 with IRV and PEEP respectively. There was no significant change in arterial PO₂ between the groups. It is considered that ventilator is required to preserve greater power both in inspiratory and expiratory phase with PEEP than IRV, and, therefore, comparison of effects for oxygenation by IRV and PEEP should include tactful determination of function of ventilator in use.