□原　著□

従量式人工呼吸器の設定換気量が，肺の血液酸素化能に及ぼす影響（理論肺による考察）

美　馬　正　彦*

序　文

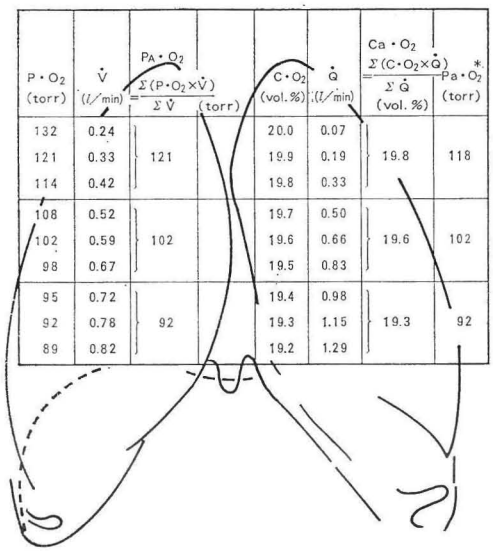
日常の臨床で，低酸素血症のある患者に従量式人工呼吸器を用いて調節換気を行うと，炭酸ガスの排出はもちろんのこと，動脈血酸素分圧についても，同じ吸入酸素濃度（以下 $Fi\cdot_{O_2}$ と記す）でのテントやマスクによる吸入の場合よりもさらに改善をみることがあるのは，しばしば経験するところである。そのような肺における血液の酸素化能が改善されるメカニズムについては，主として人工呼吸器に設定された，安静自発呼吸時に比べてより大きい換気量による換気血流比の改善，すなわち，換気血流比の小さかった肺胞が高い値を持つようになるからであると説明されていることが多いが，人工呼吸器の設定換気量を増やして行った際に，肺と胸郭が受ける影響を照合しながら，その間の肺における血液の酸素化能の変動のありさまを，従来までに呼吸生理学で認定された数式を用いた計算結果によって比較，検討を行っている研究は少ない。そのような目的を果たすために，著者は理論肺モデルを設定し，これに対して従量式人工呼吸器を用いて換気を行ったと言う条件で，主として次のような点について検討を行った。(1) 従量式人工呼吸器を用いることによって，自発呼吸下でのテントやマスクによる同じ濃度での酸素吸入の場合よりも高い動脈血酸素分圧（以下，$Pa\cdot_{O_2}$ と記す）を得るためには，最低，どれくらいの換気量が必要か。(2) 換気量だけによって得られる酸素化の効果は，どの程度まで期待できるか。(3) 人工呼吸器によって作られる新しい換気血流比のもとで，混合肺胞気酸素分圧（以下，$P_A\cdot_{O_2}$ と記す）と $Pa\cdot_{O_2}$ の関係を，肺胞・動脈血酸素分圧較差（以下，A-a $D\cdot_{O_2}$ と記す）を指標として検討を行う。なお，吸入気体は空気（$Fi\cdot_{O_2}=0.21$）とし，筋弛緩剤を併用して，胸郭コンプライアンス（以下，Ccw と記す）と肺コンプライアンス（以下，C_L と記す）の比は1：1で，調節換気（controlled ventilation）を行うものとする。体位は背臥位であるものとする。

方　法

理論肺の換気量と血流量は，West[1] が，9つのコンパートメントに分けた立位の人の肺で，安静時の機能的残気量（functional residual capacity，以下，FRC と記す）から吸気終末（endinspiration，以下，Ei と記す）までの間に測定した値を正常値とした（図1）。9つのコンパートメントを，上部3つ，中部3つ，下部3つのそれぞれの領域に分けることにした。これにより上部の換気量は，$(0.24+0.33+0.42)=0.99\,l/min$，血流量は，$(0.07+0.19+0.33)=0.59\,l/min$，したがってこの上部を代表する換気血流比は1.68となった。中部の換気量は，$(0.52+0.59+0.67)=1.78\,l/min$，血流量は $(0.50+0.66+0.83)=1.99\,l/min$，換気血流比は，0.89となった。下部の換気量は，$(0.72+0.78+0.82)=2.32\,l/min$，血流量は，$(0.98+1.15+1.29)=3.42\,l/min$ 換気血流比は0.68となった。上部の $P_A\cdot_{O_2}$ を求めるために，各コンパートメント O_2 分圧（$P\cdot_{O_2}$）と換気量の積を計算して，$(132\times0.24)+(121\times0.33)+(114\times0.42)=119.5$ を求め，これを上部の換気量の総量0.99（前出）で割って $P_{A_{O_2}}=121$ torr を得た[1]。中部，下部についてもそれぞれ同様の計算を行って，102 torr，92 torr を得た。Pa_{O_2} を求

* 関西医科大学麻酔科

めるために，各コンパートメントの血液の O_2 含量（$C\cdot_{O_2}$）と血流の積を計算した。上部では，(20.0×0.07)＋(19.9×0.19)＋(19.8×0.33)＝11.71 ml/dl。これを上部の血流の総量 0.59 で割って $Ca\cdot_{O_2}$＝19.85 を得たあと，West[1] が $Ca\cdot_{O_2}$ 量を併記した O_2-CO_2 ダイアグラムを用いて Pa_{O_2} に転換し，Pa_{O_2}＝118 torr を得た[1]。同様にして，中部の Pa_{O_2}＝102 torr，下部の Pa_{O_2}＝92 torr を得た。



$P\cdot O_2$ (torr)	$\dot{V}$ (l/min)	$P_A\cdot O_2 = \frac{\Sigma(P\cdot O_2\times\dot{V})}{\Sigma\dot{V}}$ (torr)	$C\cdot O_2$ (vol.%)	$\dot{Q}$ (l/min)	$Ca\cdot O_2 = \frac{\Sigma(C\cdot O_2\times\dot{Q})}{\Sigma\dot{Q}}$ (vol.%)	$Pa\cdot O_2$* (torr)
132	0.24	121	20.0	0.07	19.8	118
121	0.33		19.9	0.19		
114	0.42		19.8	0.33		
108	0.52	102	19.7	0.50	19.6	102
102	0.59		19.6	0.66		
98	0.67		19.5	0.83		
95	0.72	92	19.4	0.98	19.3	92
92	0.78		19.3	1.15		
89	0.82		19.2	1.29		

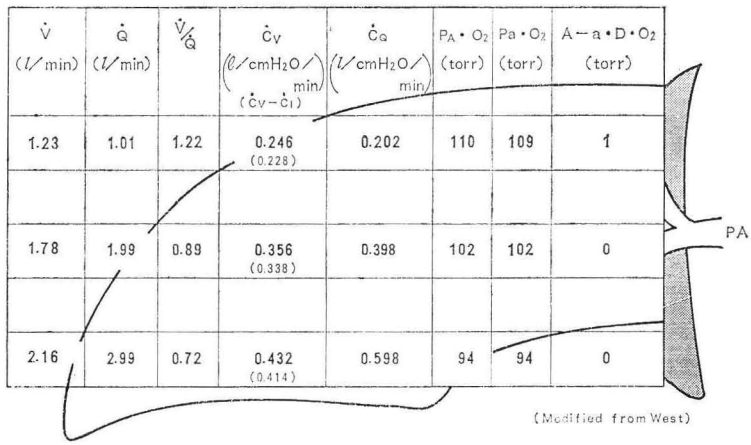
* converted into $Pa\cdot O_2$ by referring to the O_2-CO_2 diagram.
(Modified from West)

図 1　West[1] のデータから，PA_{O_2} と Pa_{O_2} の計算に必要なものをとりあげて整理し，同時に計算式を表示したもの。

立位の時の肺の高さは 30 cm[2] であるものとし，これを背臥位にした際の新しい肺の高さは，肺動脈（pulmonary artery, 以下，PA と記す）を中心に 21 cm とした。背臥位にした際の新しい換気血流比は，後述する計算法によったが，上部，中部，下部でそれぞれ，1.22, 0.89, 0.72 であった（**図 2**）。

立位から背臥位へ変わった際の肺内重力分布の変動によって生じる胸腔内圧（intrapleural pressure, 以下，IPL と記す）の新しい値を知るために，Sykes ら[3]の発表した立位での IPL の分布値をもとにして，肺の高さが 30 cm から 21 cm に変わったものとして比例計算で求めた。その結果，FRC において，上部では −8 cm，中部では −4 cm，下部では −3 cm となった。また，FRC から Ei（これは chestwall resting level でもある）までの IPL の差を 5 cm[3] とし，これを胸腔内圧差（transpulmonary pressure, 以下，TPP と記す）と呼ぶことにした[3]。これにより，Ei における IPL は，上部，中部，下部で，それぞれ，−13 cmH_2O，−9 cmH_2O，−8 cmH_2O となった。

立位から背臥位への変化によって，高さが 21 cm になった肺の，上部，中部，下部の幅をそれぞれ 7 cm とすると，中部の中央（Pa の入口部）から上部中央まで，および下部中央までの距離は



$\dot{V}$ (l/min)	$\dot{Q}$ (l/min)	$\dot{V}/\dot{Q}$	$\dot{C}_V$ (l/cmH₂O/min) ($\dot{C}_V-\dot{C}_I$)	$\dot{C}_Q$ (l/cmH₂O/min)	$P_A\cdot O_2$ (torr)	$Pa\cdot O_2$ (torr)	$A-a\cdot D\cdot O_2$ (torr)
1.23	1.01	1.22	0.246 (0.228)	0.202	110	109	1
1.78	1.99	0.89	0.356 (0.338)	0.398	102	102	0
2.16	2.99	0.72	0.432 (0.414)	0.598	94	94	0

(Modified from West)

図 2　背臥位にして換気を行う際の計算に必要な換気圧 1 cmH_2O あたりの換気量（$\dot{C}_V$）と，同じく血流量（$\dot{C}_Q$）を，$A-a\cdot D\cdot_{O_2}$ とともに示したもの。

それぞれ 7 cm となる。立位ではそれぞれ 10 cm であったから，両者の差をもとにして PA 入口部からの距離の函数，つまり重力の函数として計算を行うと，背臥位での安静自発呼吸時の上部の換気量（以下 $\dot{V}$ と記す）は 1.23 l/min となる。同様にして血流（以下 $\dot{Q}$ と記す）についても計算を行うと，1.01 l/min，したがって換気血流比（以下 $\dot{V}/\dot{Q}$ と記す）は，1.22 となった。同じく下部についてみると，$\dot{V}$=2.16 l/min $\dot{Q}$=2.99 l/min，$\dot{V}/\dot{Q}$=0.72 となった。中部については，これを PA の重力平衡ポイントと考えることにし，背臥位の時と同じく，$\dot{V}$=1.78 l/min，$\dot{Q}$=1.99 l/min，$\dot{V}/\dot{Q}$=0.89 とした（図2）。

Ccw と C_L は，加速型流量波型を備えた従量式人工呼吸器で，吸気から呼気への流速変換点で測定した静的（static）コンプライアンスとし，両者を合わせたものを，単にコンプライアンス（以下，C と記す）と呼ぶことにした。$\dot{V}$ を TPP で割ったものを $\dot{C}v$ であらわすと，上，中，下部でそれぞれ，0.246，0.356，0.432 l/cmH_2O/min となった。人工呼吸器に設定する分時換気量を $\dot{V}v$（l/min），その際に要する換気圧を Pv（cmH_2O）として表わすと，$\dot{V}v=Cv\times Pv$ の関係が成立し，もとの FRC から Ei までの安静自発呼吸時の分時換気量にあたるものは，$\dot{V}v=\dot{C}v\times Pv=\dot{C}v\times TPP=\dot{C}v\times 5\,(cmH_2O)=\dot{V}$ として得られる（∵ TPP=5 cmH_2O[3]，今の場合は，Pv=TPP である）。この安静自発呼吸時の分時換気量を越える $\dot{V}v$ については，$\dot{V}v=\dot{C}v\times Pv=\dot{C}v\times(TPP+\Delta TPP)$ として求めることができる。圧（pressure），量（volume），とコンプライアンス（compliance）の間には，量＝圧×コンプライアンスの関係があり，したがって $\Delta TPP=1\ cmH_2O$ について $\dot{C}v$ 1 単位，つまり，FRC から Ei までの換気量の 20% ずつの $\Delta\dot{V}v$ が得られることになる。同じ理由で，Pv は，$Pv=TPP+k\cdot\Delta TPP$ として得られることになるが，最終的な $\dot{V}v$ の決定には，次に述べる $\dot{C}_I$ を考慮に加えねばならない。

人工呼吸器には，主にその回路（患者チュービングやリザーバーバッグ）によるコンプライアンス（以下，C_I と記す）が存在し，その値は，0.004 l/cmH_2O[4] と言われている。これは，その人工呼吸器を用いて換気を行った際には，換気のために使われる圧の 1 cmH_2O ごとに，4 ml のガスが回路内に圧縮され，その分は人工呼吸器の回路外の気道には送りこまれないことを意味している。この C_I 自身には，時間の因子は含まれないが，毎分の換気回数（以下，f と記す）を設定すると，$C_I\times f=\dot{C}_I$（l/cmH_2O/min）として時間因子が組み入れられる。West[1] による測定値は，肺野全体を9つのコンパートメントに分割して得られたものであることと，本研究に設定した換気回数 f=14/min であることから，$\dot{C}_I=(0.004/3)\times 14=0.186\fallingdotseq 0.19\ l/cmH_2O$/min となる。この $\dot{C}_I$ を考慮に入れると，新しい $\dot{V}v=Pv\times(\dot{C}v-\dot{C}_I)$ となる。血流については，自発換気量が FRC から Ei に相当する量だけ増えた時に伴われる血流量（以下，$\dot{Q}v$ と記す）を TPP で割ったもの，$\dot{Q}v$/TPP を $\dot{C}_Q$ として表わすと，$\dot{Q}v=\dot{C}_Q\times TPP$ となる。ただし，Pv が TPP を越えるような $\dot{V}v$ を設定しても，$\dot{Q}v$ はそれ以上増えないものとする。$\dot{C}_Q$ は，上，中，下部でそれぞれ，0.202，0.398，0.598 l/cmH_2O/min であった。人工呼吸器に設定する最少の換気量を，FRC から Ei までの換気量（$\dot{V}$）とすると，$\dot{Q}v$ は後述する大きな換気量設定の場合を除いて，肺の各部では定数と考えてよいことにする（図2）。

換気血流比は，0.89 を中心に 1.22 までを 33 分割し，同じく 0.72 までを 17 分割して，それぞれ，各2本の近似直線を作り，換気血流比の函数として，P_{AO_2}，$Pa\cdot_{O_2}$ を求めた。

結　果

(1) 前出の IPL 値をもとにして，安静自発呼吸時の理論肺モデルを構成してみると，図3 のようになる。FRC において，上，中，下の各部で，気道圧（airway pressure，以下 AP と記す）は，それぞれ大気圧を平衡であると考えて 0 cmH_2O とした。IPL は，すでに述べたように，上から順にそれぞれ，−8，−4，−3 cmH_2O である。十分な筋弛緩剤を使用していると言う設定で，Ccw：C_L=1：1 であるから，IPL に対する肺の retractive force（以下，RF と記す）は，それぞれ 8，4，3 cmH_2O となる。AP=0 cmH_2O であるから，肺か

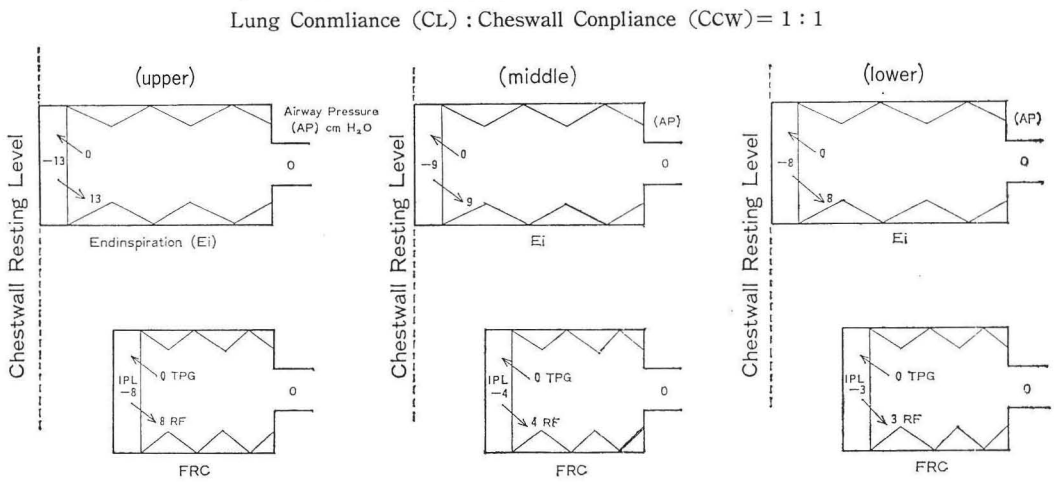


図 3　安静自発呼吸時の理論肺モデル。AP・気道圧，IPL・胸腔内圧，RF・肺の retractive force，TPG・胸腔内圧と RF の較差，を示したもの。

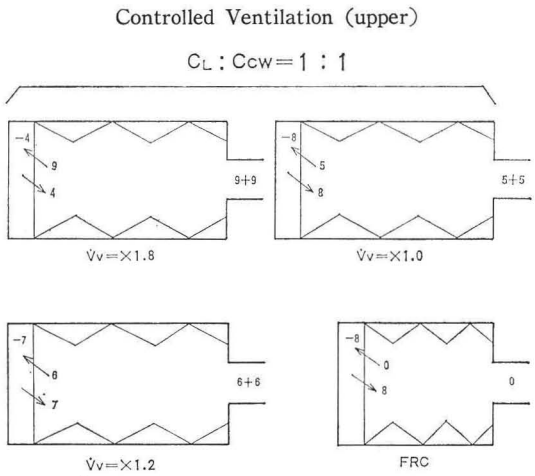


図 4　上部に，人工呼吸器を用いて，$\dot{V}v=\times1.0$ から×1.8 まで換気を行った際の，気道圧，胸腔内圧，retractive force，胸腔内圧と retractive force の較差，の変動を示したもの。

ら胸腔へ向かう圧差，transpulmonary pressure gradient（以下，TPG と記す）は，いずれも 0 cmH_2O である。この理論肺に，FRC から Ei (chestwall resting-level)[3] まで，安静自発呼吸が行われる場合は，各部の IPL に TPP が加わって，それぞれ，−13，−9，−8 cmH_2O となり，吸気終了時の RF は，それぞれ，13，9，8 cmH_2O，AP はいずれも 0 cmH_2O（自発吸気努力による吸い込みであるので），したがって TPG は，いずれも 0 cmH_2O となる。この場合，上部では $\dot{V}=1.23$ l/min，$\dot{Q}=1.01$ l/min，$\dot{V}/\dot{Q}=1.22$，$P_{A\cdot O_2}=110$ torr，$P_{a\cdot O_2}=109$ torr，$A\text{-}a\cdot D\cdot_{O_2}=1$ torr となった。中部では，$\dot{V}=1.78$ l/min，$\dot{Q}=1.99$ l/min，$\dot{V}/\dot{Q}=0.89$，$P_{A\cdot O_2}=102$ torr，$P_{a\cdot O_2}=102$ torr，$A\text{-}a\cdot D\cdot_{O_2}=0$ torr，下部では，$\dot{V}=2.16$ l/min，$\dot{Q}=2.99$ l/min，$\dot{V}/\dot{Q}=0.72$，$P_{A\cdot O_2}=94$ torr，$P_{a\cdot O_2}=94$ torr，$A\text{-}a\cdot D\cdot_{O_2}=0$ torr であった（**図 7**）。

(2)　この理論肺に，従量式人工呼吸器を使って FRC から Ei までの換気量を設定した場合，（これを，$\dot{V}v=\times1.0$ であらわすことにする）の上部について考えてみることにする（**図 4**）。換気開始前は筋弛緩剤によって呼吸は停止しているので，FRC の状態であると考えて，AP＝0 cmH_2O，IPL＝−8 cmH_2O，RF＝8 cmH_2O，TPG＝0 cmH_2O である。$\dot{V}v=\times1.0$ を吸入させるのに必要な TPP は 5 cmH_2O であるが，$C_{CW}:C_L=1:1$ であるので，肺に対する Pv と同じ大きさのもう一つの力が胸郭に対して必要となり，換気終了時（吸気相の終り）には，AP＝10 cmH_2O となる。この時，TPG＝5 cmH_2O である。したがって，IPL は自発呼吸時 Ei の −13 cmH_2O にこの TPG を加えて，−8 cmH_2O となる。Pv＝5 cmH_2O である。これらを用いて前出の式に従って計算を行うと，$\dot{V}v=1.14$ l/min，$\dot{Q}v=1.01$ l/min$(=\dot{Q})$，$\dot{V}v/\dot{Q}v=1.13$ $P_{A\cdot O_2}=108$ torr，$P_{a\cdot O_2}=107$ torr，$A\text{-}a\cdot D\cdot_{O_2}=1$

torr，となった。この $Pa\cdot_{O_2}$ は自発呼吸時に比べて2%マイナスとなった。FRCからEiまでの換気量の1.2倍の $\dot{V}v$（これを，$\dot{V}v=\times1.2$ であらわす）を設定した場合についてみると，これに必要なPvは，1.2倍になるはずである。なぜなら，コンプライアンス＝量/圧の関係があり，コンプライアンスが一定であるとすれば，TPP×1.2＝6 cm H_2O となるはずである。したがって，TPG＝6 cmH_2O，IPL＝{(−13)＋6}＝7 cmH_2O，AP＝6＋6＝12 cmH_2O となる。このPvによって，$\dot{V}v=1.37$ l/min，$\dot{Q}v=1.01$ l/min，$\dot{V}v/\dot{Q}v=1.36$，$P_A\cdot_{O_2}=113$ torr，$Pa\cdot_{O_2}=111$ torr，$A\text{-}a\cdot D\cdot_{O_2}=2$ torr，$Pa\cdot_{O_2}$ は，自発呼吸時に比べてプラス2%となった。人工呼吸器の設定換気量を増やせば，いくらでも肺をふくらますことができるわけではないが，IPLがマイナス値で残っている間は，ふくらみがつづくと考えてよいことにする。一方，血流 $\dot{Q}v$ についても，FRCからEiまでの換気に伴った量は，その部のIPLがマイナス値で残されている $\dot{V}v$ の範囲内では，そのままに留めることにする。（ちなみに $\dot{V}v=\times1.6$ で，下部ではIPL＝0となっている…後出）。$\dot{V}v=\times1.8$ にすると，$\dot{V}v$ は $Pv\times(\dot{C}v-\dot{C}I)$ に加えて上部と中部のCの比によって決められた量（0.167 l/min）が，下部から再分布されてくる（下部での計算参照）。したがって，$\dot{V}v=(9\times0.228)+0.167=2.22$ l/min，$\dot{Q}v=1.01$，$\dot{V}v/\dot{Q}v=2.20$，$P_A\cdot_{O_2}=133$ torr，$Pa\cdot_{O_2}=128$ torr（自発呼吸時にくらべて，プラス17%），$A\text{-}a\cdot D\cdot_{O_2}=5$ torr となった。この時，中部でIPL＝0 cmH_2O，APは，上部，中部，下部ともに，9＋9＝18 cmH_2O である。この場合，下部での $\dot{Q}v$ については，別の考慮がはらわれなければならない（下部での計算参照）（**図7**）。

(3) 中部についてみると（**図5**），$\dot{V}v=\times1.0$ では，IPL＝{(−9)＋5}＝−4 cmH_2O，RF＝4 cm H_2O，TPG＝5 cmH_2O，AP＝5＋5＝10 cmH_2O，Pv＝5 cmH_2O となる。これらの値をもとに(2)と同様にして計算を行ってみると，$\dot{V}v=1.69$ l/min，$\dot{Q}v=1.99$ l/min，$\dot{V}v/\dot{Q}v=0.85$，$P_A\cdot_{O_2}=100$ torr，$Pa\cdot_{O_2}=100$ torr（自発呼吸時に比して，マイナス2%），$A\text{-}a\cdot D\cdot_{O_2}=0$ torr となった。$\dot{V}v=\times1.6$ では，IPL＝−1 cmH_2O，RF＝1 cmH_2O，TPG＝8 cmH_2O，AP＝16 cmH_2O，Pa＝8 cmH_2O である。同様にして，$\dot{V}v=2.70$ l/min，$\dot{Q}v=1.99$ l/min，$\dot{V}v/\dot{Q}v=1.34$，$P_A\cdot_{O_2}=113$ torr，$Pa\cdot_{O_2}=111$ torr（自発呼吸時に比して，プラス9%），$A\text{-}a\cdot D\cdot_{O_2}=2$ torr となった。先述したように，この $\dot{V}v=\times1.6$ で下部のIPL＝0 cmH_2O となり，下部では，肺のふくらみが限界に達していると考えられる（**図6**）。ここで，中部の $\dot{V}v=\times1.8$ にした場合，

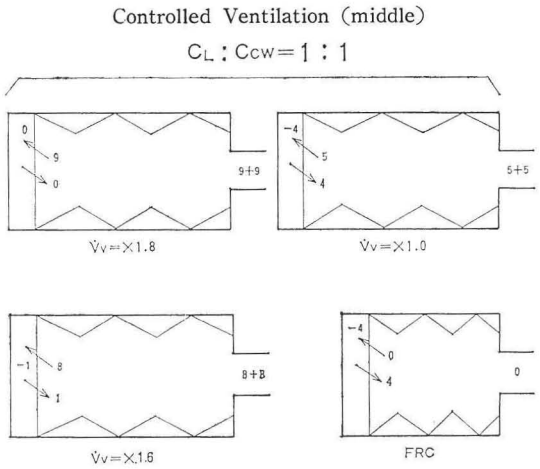


図5　中部に，人工呼吸器を用いて，$\dot{V}v=\times1.0$ から ×1.8 まで換気を行った際の，気道圧，胸腔内圧，retractive force，胸腔内圧と retractive force の較差，の変動を示したもの。

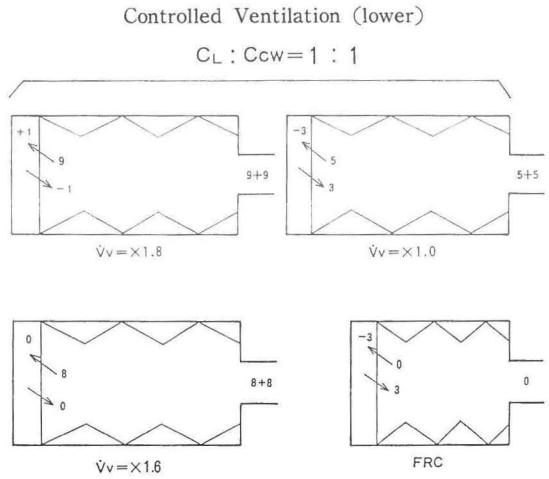


図6　下部に人工呼吸器を用いて，$\dot{V}v=\times1.0$ から ×1.8 まで換気を行った際の，気道圧，胸腔内圧，retractive force，胸腔内圧と retractive force の較差，の変動を示したもの。

この部の $\dot{V}v$ には，これまでとは別の考慮をせねばならない。IPL＝0 cmH_2O，RF＝0 cmH_2O，TPG＝9 cmH_2O，AP＝18 cmH_2O，Pv＝9 cmH_2O であるが，この部の $\dot{V}v=Pv\cdot(\dot{C}v-\dot{C}I)$ に，下部からの，上部と中部の C の比によって再分布されてきた 0.247 l/min を加えて，3.29 l/min とせねばならない（下部での計算参照）。つまり，この時下部では，IPL＝＋1 cmH_2O, RF＝－1 cmH_2Oとなって，肺の retractive force が，これまでと逆の方向に働くことになる（図6）。これは，人工呼吸器による Pv が，肺を気道に向けて押している 1 cmH_2O の圧を含むことを示している。$\dot{Q}v$ もまたこの RF の影響を免れず，すなわち，肺内のなるべく重力値の近いところへ再分布されることになるだろう。なぜなら，わずか 1 cmH_2O の圧によって血流が右心圧にうちかって kick back されたり，行方不明になるとは考えにくいからである。$\dot{Q}v$ について，この条件をいちばんよく充たしてくれるのは，中部であろう。それは，この時，中部の IPL＝0 cmH_2O であり，しかも，中部の中心位置は PA と同じレベル（高さ）に設定しているからである。このような条件下に，下部から中部に移動する $\dot{Q}v$ を考えると，下部の RF＝－1 cmH_2O（これを仮りに，ΔRF と呼ぶことにする）であるから，$|\Delta RF|\times\dot{C}Q$（下部）の量が，換気に伴って中部へ移動（再分布）することになる。したがって，$\dot{V}v=\times1.8$ の際の，中部の換気に伴う血流量 $\dot{Q}v$ は，$\dot{Q}v$（本来の中部の，換気に伴う血流量）＋｛$|\Delta RF|\times\dot{C}Q$・下部｝＝1.99＋(0.598×1)＝2.59 l/min となる。これにより，$\dot{V}v/\dot{Q}v=1.27$, $P_{AO_2}=111$ torr, $Pa_{O_2}=110$ torr（自発呼吸時に比して，プラス 8%），A-a・D・o_2＝1 torr となった（図7）。

(4)　下部についてみると（図6），$\dot{V}v=\times1.0$ では，IPL＝－3 cmH_2O，RF＝3 cmH_2O，TPG＝5 cmH_2O，AP＝10 cmH_2O, Pv＝5 cmH_2O である。これまでと同様にして，$\dot{V}v=2.07$ l/min，$\dot{Q}v=2.99$ l/min, $\dot{V}v/\dot{Q}v=0.69$, $P_{A\cdot O_2}=92$ torr, $Pa_{\cdot O_2}=92$ torr（自発呼吸時に比して，マイナス 2%），A-a・D・o_2＝0 torr であった。$\dot{V}v=\times1.2$ では，$\dot{V}v=2.48$ l/min，$\dot{Q}v=2.99$ l/min, $\dot{V}v/\dot{Q}v=0.83$, $P_{A\cdot O_2}=99$ torr, $Pa_{\cdot O_2}=99$ torr（自発呼吸時に比して，プラス 5%），A-a・D・o_2＝0 torr となった。$\dot{V}v=\times1.4$ では $\dot{V}v=2.90$ l/min, $\dot{Q}v=2.99$ l/min, $\dot{V}v/\dot{Q}v=0.97$, $P_{A\cdot O_2}=104$ torr, $Pa_{\cdot O_2}=104$ torr（自発呼吸時に比して，プラス 11%），A-a・D・o_2＝0 torr であった。$\dot{V}v=\times1.6$ では，$P_{A\cdot O_2}=107$ torr, $Pa_{\cdot O_2}=106$ torr（自発呼吸時に比して，プラス 13%），A-a・D・o_2＝1 torr となった。しかし，先述したように，IPL＝0 cmH_2O となって，下部では肺のふくらみが限界に達したことを示すと考えられる。さらに，$\dot{V}v=\times1.8$ にすると，IPL＝1 cmH_2O とマイナスからプラスに転じ，RF＝－1 cmH_2O, TPG＝9 cmH_2O, Pv＝9 cmH_2O, AP＝18 cmH_2O となるが，この RF＝－1 cmH_2O（ΔRF，先述）によって，下部での Pv は新しい値（仮に P′v と呼ぶことにする）をとることになる。すなわち，Pv＋ΔRF＝9＋(－1)＝8 cmH_2O＝P′v となる。ここでの $\dot{V}v$ と $\dot{Q}v$ の計算には，この P′v を用いることになるが，Pv－P′v＝1 cmH_2O によって，本来は下部に送入されなければならないはずの $\dot{V}v$ の一部（Pv－P′v)×Cv（下部）が，中部と上部に分配されることになる。上部への分配量は，両者（上部と中部）の $\dot{C}v$の比によって，｛$\dot{C}v$ 下部/($\dot{C}v$ 上部＋$\dot{C}v$ 中部)｝×$\dot{C}v$ 上部＝｛0.414/(0.228＋0.338)｝×0.228＝0.1667≒0.167 l/min として求められる。同様にして，中部については 0.247 l/min が得られる。これらの量を，上部，中部の $\dot{V}v$ にそれぞれ加えた上で，$\dot{V}v=\times1.8$ の時の上部，中部の $P_{A\cdot O_2}$, $Pa_{\cdot O_2}$, A-a・D・o_2 を計算したことは，(2)，(3)で述べた。この ΔRF によって $\dot{Q}v$ も影響を受けるのは同様で，その一部は，中心部が PA と同じ高さであり，RF＝0 cmH_2O が残っている中部に分配されることになるだろう。なぜなら，先述したように，PA の圧は ΔRF にくらべるとはるかに大きいからである。その量は，$\dot{C}Q$（下部)×$|\Delta RF|$＝0.598 l/min として求められる。中部の $\dot{V}v=\times1.8$ のところで，この量を中部固有の $\dot{Q}v$ に加えて計算を行ったことは，(3)で示した。結局，この場合，下部では，

$\dot{V}v=(9-1)\times0.414=3.31$ l/min

$\dot{Q}v=(5-1)\times0.598=2.39$ l/min

となり，$\dot{V}v/\dot{Q}v=1.38$, $P_{A\cdot O_2}=114$ torr, $Pa_{\cdot O_2}=112$ torr（自発呼吸時に比して，プラス 19%），

		$PA\cdot O_2$ (torr)	$Pa\cdot O_2$ (torr)	$A\text{-}a\cdot D\cdot O_2$ (torr)	$\Delta Pa\cdot O_2$ ($\dot{V}v$/control) (%)
Spontaneous Breathing (FRC→Ei)	upper	110	109	1	control
	middle	102	102	0	
	lower	94	94	0	
VENTILATOR					
$\dot{V}v$= ×1.0	upper	108	107	1	− 2
	middle	100	100	0	− 2
	lower	92	92	0	− 2
×1.2	upper	113	111	2	+ 2
	middle	104	104	0	+ 2
	lower	99	99	0	+ 5
×1.4	upper	119	116	3	+ 6
	middle	109	108	1	+ 6
	lower	104	104	0	+11
×1.6	upper	124	120	4	+10
	middle	113	111	2	+ 9
	lower	107	106	1	+13
×1.8	upper	133	128	5	+17
	middle	111	110	1	+ 8
	lower	114	112	2	+19

図 7 段階的に増加させた設定換気量（$\dot{V}v$）における，各部（上，中，下）での $PA\cdot O_2$，$Pa\cdot O_2$，とその安静自発呼吸時の Pa_{O_2} との比（$\dot{V}v$/control）（%）と $A\text{-}a\cdot D\cdot O_2$ を示したもの。

$A\text{-}a\cdot D\cdot O_2$=2 torr となった。これまでの結果を図7に示す。

考　察

この研究によると，人に人工呼吸を接続して，$Pa\cdot O_2$ が安静自発呼吸時よりも高くなるのは，設定換気量を安静自発呼吸時の1.2倍以上にしてからであるが，それ以下の量での $Pa\cdot O_2$ のマイナス値は，人工呼吸器に存在する CI によるものである。日常の臨床でも，われわれは経験的に人工呼吸器に設定する換気量は，たとえば，Radford のノモグラムなどから得られるよりも多目にしないと，同じ $Fi\cdot O_2$ でのテントやマスクよりも高い $Pa\cdot O_2$ が得られにくいことを知っている。これは，CI によって人工呼吸器から肺胞へ到達する換気量が減ると，一方で $\dot{Q}v$ は $\dot{Q}$ と同じであるから，$\dot{V}v/\dot{Q}v$ は小さくなり，換気血流比の函数としての $PA\cdot O_2$, $Pa\cdot O_2$ はともに小さくなるからである。しかし，人工呼吸器を接続して換気血流比を大きくすることにより $Pa\cdot O_2$ の改善をめざす場合には，別の注意も必要である。たとえば失血などによって肺循環血液量が減少している場合，これを晶質液によって補正した場合には，その補液にはヘモグロビンが含まれていないから，動脈血酸素含量の式からわかるように，これでは $Pa\cdot O_2$ の回復を望むことはできない。必ず，失血液と，最低同量のヘモグロビンを含んだ血液でないと意味がないであろう。

$\dot{V}v$=×1.8 にすると，下部から中部，上部へ $\dot{V}v$ の移動が起こり，下部から中部への $\dot{Q}v$ の移動が起こる。側臥位などで肺内の垂直方向への重力分布が変わると，血流にも再分布が生じることは，沼田ら[5] が述べている。通常のシングルルーメン気管内チューブで換気を行っている本研究の設定では，AP=18 cmH_2O そのものは変わらないが，その中で占める TPG=9 cmH_2O によって生じた

逆方向への $\Delta RF=1\ cmH_2O$（図6）が，まだ IPL がマイナス値で残っている中部，および上部へ $\dot{V}v$ を再分布する力になることは先述した。$\dot{Q}v$ も ΔRF の影響を受けるが，$\dot{V}v$ は重力変化に伴う IPL の分布からより影響をうけ，$\dot{Q}v$ は重力分布そのもの（距離）の影響をより受けると考えられる。その結果，中部では，$\dot{V}v$ の再分布量よりも $\dot{Q}v$ のそれの方が大きいので，$\dot{V}v/\dot{Q}v$ は，$\dot{V}v=\times1.6$ の時よりも小さくなり，したがって $P_{A\cdot O_2}$ も $Pa_{\cdot O_2}$ も下がるが，反面 $\dot{V}v/\dot{Q}v$ は，自発呼吸時の中部の $\dot{V}/\dot{Q}=0.89$ の方向へ引きよせられて，$A\text{-}a\cdot D\cdot o_2$ としては，$\dot{V}v=\times1.6$ の時より小さくなる結果がみられた（図7）。

上部についてみるとよくわかることであるが（図7），$\dot{V}v$ が大きくなって $P_{A\cdot O_2}$ が上昇すると，それにつれて $A\text{-}a\cdot D\cdot o_2$ も大きくなる。これは，この West[1] のデータをもとにした理論肺モデルでは，$\dot{V}v/\dot{Q}v$ が，中部の自発呼吸時の $\dot{V}/\dot{Q}=0.89$ より大きいところでは，同じ量だけの $\dot{V}v/\dot{Q}v$ の変化に対する $P_{A\cdot O_2}$ の上昇の割合が，$Pa_{\cdot O_2}$ のそれより大きく，反面，0.89 より低いところではその近くに集中していて，$P_{A\cdot O_2}$ の低下の割合は $Pa_{\cdot O_2}$ のそれに近似しているからである。人に人工呼吸器を接続すると，肺コンプライアンスの低下などが起こらなくても（本研究では一定と言う設定である），大きな設定換気量による換気血流比の変化だけによっても，$A\text{-}a\cdot D\cdot o_2$ が拡大することは注目されてよいであろう（これについては，後に再述する）。日常の臨床でも，人工呼吸器で換気中に $A\text{-}a\cdot D\cdot o_2$ の大きかった患者をウィーニングしても，かならずしも無機肺を生じていたり，肺コンプライアンスが低下したりしているわけではないのは，よく経験するところである。$A\text{-}a\cdot D\cdot o_2$ の幅が，全体として狭いのは，$Fi_{\cdot O_2}=0.2$ の設定だからである。また，これ以上の大きな $\dot{V}v$ の設定では，$\dot{Q}v$ の胸腔内への移動[6]も考慮に入れなければならなくなるであろう。換気量の増加だけによって $Pa_{\cdot O_2}$ の上昇を期待できる上限は，臨床での印象とも合わせて考えると，このあたり（$\dot{V}v=\times1.8$）であろうか。$Fi_{\cdot O_2}$ を上げることなく，換気量を増やすことによってのみで $Pa_{\cdot O_2}$ の改善をみることができるのは，ツインルーメンチューブを挿管して，2台の人工呼吸器を使用した左右肺分離換気中の dependent lung である[7]。

IPL の分布については，Sykes[3] の立位での値をもとに，臥位でのそれらを肺の高さの変化に伴う比例計算によって試算して求めたが，もともとの Sykes の値の，肺の高さ（30 cm）[2] に対する比率を計算してみると，約 $0.4\ cmH_2O/cm$ であり，これは，Agostoni ら[8]の発表した値とも一致していた。横隔膜が弛緩すると（ただし，筋弛緩剤を使用せずに voluntary tense の状態），もっとこの匂配は大きくなると言う報告[9] もあり，筋弛緩剤使用を設定した本研究の理論肺（背臥位）では，$0.7\ cmH_2O/cm$ であった。

麻酔下や，人工呼吸器を用いて換気を行うと，FRC が減少すると言う報告は多くなされてきたが，人工呼吸器を用いた換気そのものでは，血液の肺内プーリングは起こらず，そのための FRC の減少は生じないことが，最近報告された[6]。FRC 減少の起こる原因は，これもよく言われてきたことであるが，肺コンプライアンスの低下[10][11]がその原因として考えられるべきだと，著者も考えるが，本研究に使用した FRC から Ei までの換気量と血流量の値は，West[1] が覚醒時の人で発表したデータであるので，麻酔剤は使用していない設定である。しかし，麻酔剤としてバルビツレート以外や，吸入麻酔剤では，FRC は減少しないと言う報告[12][13]もある。本実験の設定では，$\dot{V}v=\times1.0$ から，$\times1.8$ まで，C_L は一定である。ただし，$\dot{V}v=\times1.8$ では，下部の IPL の値がプラスに転じ，それに伴って下部そのものの C_L は低下するが，ΔRF によってその分の換気は上部と中部に再分配され，結局，肺全体としての C_L は，$\dot{V}v=\times1.8$ でも変わらないし，したがって，$AP=18\ cmH_2O$ も変わらない。

重要なことは，人工呼吸器で人に換気を行うと，換気血流比の大きい部分での $A\text{-}a\cdot D\cdot o_2$ が拡大して，それが人工呼吸器使用時に，全体としての見かけの $A\text{-}a\cdot D\cdot o_2$ の拡大となってあらわれることである。その理由は，次のように説明されるだろう。人の肺の換気血流比の小さい部分（lower）から大きい部分（upper）への，換気と血流，それぞ

れの変化についてみると，換気も血流も，いずれもその絶対量は減少してゆくのだが，その減少する割合が血流量の方がはるかに大きく[1]，それが原因で換気血流比の逆転となってあらわれている。この研究での $Fi\cdot_{O_2}=0.2$ であるが，それでも $\dot{V}v=\times1.0$ で，上部（upper）の $Pa\cdot_{O_2}$ はすでに 107 torr に達している。動脈血酸素含量の函数である $Pa\cdot_{O_2}$[1] にとってはこれより高い $Fi\cdot_{O_2}$ となってもヘモグロビンの酸素解離曲線の性状から言っても，この部での $Pa\cdot_{O_2}$ の上昇は頭打ちであり，より高濃度の酸素吸入で $A\text{-}a\cdot D\cdot_{O_2}$ はもっと大きくなるだろう。対称的に，下部（lower）では，まだ（$\dot{V}v=\times1.0$）$Pa\cdot_{O_2}=92$ torr（図7）であり，この部分へより高濃度の酸素が到達すると，その血流量の大きさによって，上部（upper）のような，$A\text{-}a\cdot D\cdot_{O_2}$ の拡大なしに $Pa\cdot_{O_2}$ の上昇する可能性を残していることがわかる。仮りに100%の酸素を吸入させた場合，$A\text{-}a\cdot D\cdot_{O_2}$ がどの位の幅にとどまるかは，肺の血流量の大きな部分での換気血流比が，吸入以前にくらべてどの程度大きくなったかの程度によってきまるだろう。したがって，人工呼吸器を用いて人に換気を行っている際の $A\text{-}a\cdot D\cdot_{O_2}$ の値については，古典的シャント式（classic shunt equation）を展開して得られる $Fi\cdot_{O_2}=1.0$ の条件下での最終式の分子項の示す意義だけでなく，別の違った検討がなされなければならない。すなわち，もし肺内シャントの存在が論じられるのであれば，$A\text{-}a\cdot D\cdot_{O_2}$ の開大だけでなく，同時に肺コンプライアンスの低下も合わせて検討されるべきであろう。

略語（Abbreviation）

C：compliance＝CCW＋CL（l/cmH_2O）
CCW：chestwall compliance（〃）
CL：lung compliance（〃）
CI：internal compliance of ventilator, volume limited, time cycled type（〃）
CI：CI×f（*l*/cmH_2O/min）
f：frequency of ventilation/min
$\dot{V}$：ventilation during spontaneous breathing from FRC to Ei（*l*/min）
$\dot{Q}$：blood flow during spontaneous breathing from FRC to Ei（*l*/min）
$\dot{C}v$：$\dot{V}$/TPP（*l*/cmH_2O/min）
$\dot{C}Q$：$\dot{Q}$/TPP（〃）
$\dot{V}v$：preset minute volume on ventilator ＝Pv×（$\dot{C}v-\dot{C}I$）（*l*/min）
$\dot{Q}v$：blood flow during controlled ventilation ＝$\dot{C}Q$×TPP
Pv：insufflation pressure of ventilator for $\dot{V}v=\dot{V}v/C$（cmH_2O）
AP：airway pressure（〃）
IPL：intrapleural pressure（〃）
TPP：transpulmonary pressure from FRC to Ei（〃）
TPG：transpulmonary pressure gradient（〃）
RF：retractive force of the lung（〃）
FRC：functional residual capacity（*l*）
Ei：Endinspiration
PA：pulmonary artery
$PA\cdot_{O_2}$：mixed alveolar partial oxygen pressure（torr）
$Pa._{O_2}$：arterial partial oxygen pressure（〃）
$C\cdot_{O_2}$：oxygen content of regional lung blood flow
$A\text{-}a\cdot D\cdot_{O_2}$：alveolar-arterial partial oxygen pressure difference（torr）
$Fi._{O_2}$：oxygen fraction of inspired gas

文　献

1) West JB：Ventilation/blood flow and gas exchange.（Third edition）Blackwell Scientific Publication. 1977, p 57
2) West JB, Dollery CT, Naimark A：Distribution of blood flow in isolated lung：relation to vascular and alveolar pressure. J Appl Physiol 19：713, 1964
3) Sykes MK, Mcnicol MW, Campbell EJM：Respiratory Failure.（Second edition）Blackwell Scientific Publication. 1976, 12
4) Spearman CB, Sheldon RL, Egan DF：Egan's fundamentals of Respiratory Therapy.（Fourth edition）The C.V. Mosby Company. 1982, 520
5) 沼田克雄：左右別人工肺換気の生理. ICU と CCU. 8：1047, 1984
6) Hedenstierna G, Strandberg Å, Brismar B, et al：Functional residual capacity, Thoracoabdominal dimensions, and central blood volume

during general anesthesia with muscle paralysis and mechanical ventilation. Anesthesiology 62：247, 1985

7) 美馬正彦：左右肺分離換気時の O_2 とりこみ—臨床と理論肺による解析—. 日本臨床麻酔学会誌 6：136, 1986

8) Agostoni E, Miserochi G：Vertical gradient of transpulmonary pressure with active and artificial lung expansion. J Appl Physiol 29：705, 1970

9) Roussos CS, Yoshinosuke F, Macklem PT, et al：Influence of diaphragmatic contraction on ventilation distribution in horizontal man. J Appl Physiol 40：417, 1976

10) Rehder K, Sessler AD, Marsh HM：General anesthesia and the lung. Am Rev Respir Dis 112：541, 1975

11) Don H：The mechanical properties of the respiratory system during anesthesia. Int Anesthesiol Clin 15：113, 1977

12) Colgan FJ, Whang TB：Anesthesia and atelectasis. Anesthesiology 29：917, 1968

13) Rehder K, Mallow JE, Fibuch EE, et al：Effects of isoflurane anesthesia and muscle paralysis on respiratory mechanics in normal man. Anesthesiology 41：477, 1974