

□原 著□

## Differential Ventilation における肺気道ダイナミクス値と その臨床的意義の検討

美 馬 正 彦\*    奥 田 平 治\*  
田 崎 大 喜\*    中 谷      敬\*\*

換気血流比の不均衡は、hypoxemia のもっとも重要な原因の 1 つである。正常人でも立位などでは、垂直方向にかなりの換気血流比のちらばりがみられるが、この垂直方向での換気と血流のマッチングをよくして、hypoxemia を改善するために、1982 年頃より、Hedenstierna や Norlander によって、人工呼吸器を用いた新しい換気法が提唱され始めた<sup>1)</sup>。しかし、そのような換気法（左右肺分離換気 differential ventilation）で hypoxemia を改善するためには、次のような条件が満たされなければならない<sup>2)</sup>。① ツインルーメンチューブが挿管されていること。② 患者が側臥位であること。③ 吸入ガス源が 2 つあることである。著者達は、左側臥位、右開胸で食道切除、胃管造設を受ける患者に、2 台の人工呼吸器を用いて左右肺を独立に換気し、dependent lung（左肺）に重点的換気を行うことによって、満足のいく肺の血液酸素化能を示す末梢動脈血酸素分圧を得ているが、その理由について、左右別々に測定した肺気道ダイナミクス値をもとにして、シングルルーメンチューブで 1 台の人工呼吸器を用いて換気を行った場合との比較も含めて検討を行った結果を報告する。肺気道ダイナミクスの測定は、現在市販されている近代化された人工呼吸器に備えつけられたコンピューターによって測定された値を、連続的にプリントアウトすることによった。この種の人工呼吸器装備のコンピューターによる肺気道ダイナミクスの測定法には、後述するようないくつかの問題点もあるのであるが、とにかく臨床の現場で、せっかく与えられたこの手段

を、注意深く利用して適切な判断を下すことができるように習熟することも必要であろう。著者達のこれまでの経験でも、その根底にある問題点を理解していれば、とくにツインルーメンチューブを用いた 2 台の人工呼吸器による differential ventilation では、肺の血液酸素化能だけでなく、ツインルーメンチューブの適切なポジショニングを追試する上でも、有益な手段となり得ることを経験している。

さらに、これまでとりあげられて論じられることの少なかった、ツインルーメンチューブ自体の抵抗値を測定して、これにより左右の主気管支以下のレジスタンスを別個に算定した値も紹介する。

### 方 法

被検者は、年齢 44 歳から 71 歳まで、体重 40 kg から 56 kg までの、女性 3 名、男性 7 名の計 10 名であった。前投薬は、手術室入室 30 分前に、アタラックス P (1.0~1.5 mg/kg, 皮下注)、硫酸アトロピン 0.5 mg (皮下注) を行った。麻酔導入は、フルニトラゼパム 1 mg を静注、ついで、チトゾール 100~150 mg, ミオブロック 4~5 mg を静注し、女性には、Portex #6 (左型)、男性には Rüschi (Carlens) #37 (左型) の挿管を行い、tracheal port に、エングストローム・エリカ人工呼吸器を、bronchial port には、同じくエングストローム、ER. 300 を接続した。換気量は、総量を体重 (kg) × (8~10) ml を目安とし、後述する左肺（側臥位にした時に dependent lung となる）と右肺（側臥位にした時に non dependent lung となる）のコンプライアンスの違いに従って、左

\* 関西医科大学麻酔学教室

\*\* 日本光電株式会社

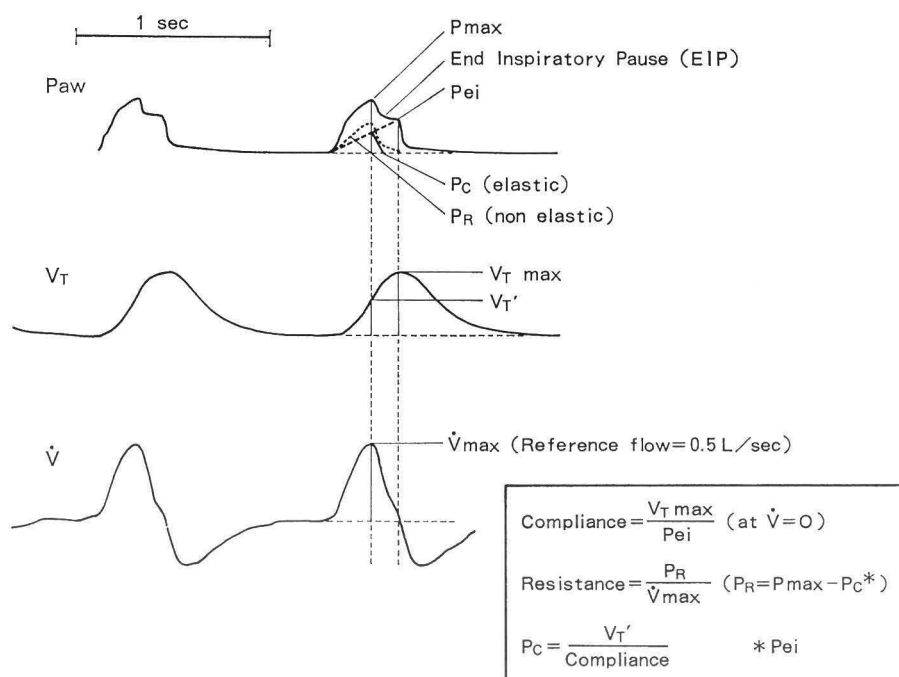


図 2

肺には、右肺より 25~30% 多い換気量を設定した。換気回数は、いずれの側も 毎分 10~14 回とし、とくに両側を同期させることはしなかった。また、側臥位にしてからは、左肺に 5 cmH<sub>2</sub>O の PEEP を付加した。左肺には、笑気 80%、酸素 20% のガスを送り、右肺には、室内気を混入して、30~40% の酸素を含むガスを送った。両者を合わせての平均の  $FI_{O_2}$  は、 $0.35 \pm 0.04$  (S.D) であった。エリカは、肺気道ダイナミクスを測定するコンピューターを備えているので、これを用いて、コンプライアンス（肺、胸廓を含んだもの。以下、単にコンプライアンスと呼ぶ）と、レジスタンス（チューブ自身および、左右主気管支以下の気道のそれを含んでいる。以下、単にレジスタンスと呼ぶ）を測定した。いずれの測定値も、10 秒ごとにプリントアウトを行い、10 回の換気分についての平均値を求めた。測定時には、可及的に換気量（一回）を 500 ml、換気回数を毎分 20 回とし、同じ条件で、左、右肺の測定も行った。エリカによる左肺測定の期間は、ER. 300 によって右肺の換気を行った。また、測定の時期には、背臥位、側臥位ともに、手術操作は開始されていなかった。

表 1

	Flow (L/S)	Pressure (cmH <sub>2</sub> O)	Resistance (cmH <sub>2</sub> O/L/S)
Portex (# 6.0, I) tracheal port	0.3	3.5	11.6
	0.5	8.5	17.0
	1.0	31	31
bronchial port	0.3	3.9	13.1
	0.5	9.4	18.8
	1.0	35	35
Rüsch (# 37, I) tracheal port	0.3	3.2	10.8
	0.5	6.4	12.8
	1.0	23	23
bronchial port	0.3	2.4	8.1
	0.5	5.9	11.8
	1.0	22	22

(中谷)

エリカのコンピューターによる肺気道ダイナミクス値の測定はアナログ解析によるもので図のごとくである。先にも少しふれたし、後にもっとくわしく述べるが、このアナログ解析による計算法では、著者達の知る限りでは、Servo. C でも Bear. 5 でも、共通して抱えている問題点がある。とく

表 2 レジスタンス, total (T) と airway (a), (cmH<sub>2</sub>O/L/sec)

	T	a	T	a
Supine	NON DEP. (R)	15.6±0.4 (S.E)	1.6±0.6 (S.E)	1.00
	difference	NS	NS	ratio
	DEP. (L)	16.3±0.6 (S.E)	2.4±0.8 (S.E)	1.04
Lateral	NON DEP. (R)	16.1±0.4 (S.E)	2.0±0.6 (S.E)	1.00
	difference	NS	NS	ratio
	DEP. (L)	16.6±0.6 (S.E)	2.7±0.6 (S.E)	1.03

(n=10)

にエリカでは、測定用の流量センサーが吸気側にのみついているので、そのままではこの図のような、呼気相の流速 ( $\dot{V}$ ) 波形は得られない (呼気相レジスタンスを測定できない)。この図の  $\dot{V}$  は、エリカからの出力を、もう一度、日本光電製のニューモタコを通した時に得られるものである。

次に、ツインルーメンチューブのレジスタンスの測定は、次のようである。当然のことながら、圧力と流速とが比例関係にはないことが考えられるので、流速を 0.3, 0.5, 1.0 (L/sec) とした時の圧力を測定して、各流量に対する抵抗値を求めた。ここで、0.5 (L/sec) と言うのは、人におけるレジスタンス値を判定する際の reference flow となる大切な値である。測定は、ツインルーメンチューブのそれぞれの Port に定流量発生器を接続し、上記の 3 種の流速について、差圧トランスデューサーから得た圧より、抵抗値を得た (表 1)。この内、0.5 (L/sec) による値は、エリカが測定した値についても、reference flow として、補正計算されているので、両者の差を求めることに問題はないし、その得られた差は、ツインルーメンチューブより先端、つまり、おおよそ、左右の主気管支以下のレジスタンスと考えて差し支えない (結果、参照)。

## 結 果

(1) 上記の換気方針によって得られた血液ガス分析値についてみると、Supine では、 $PaO_2=140\pm 11$  (S.D) torr,  $Paco_2=31\pm 5$  torr,  $FI_{O_2}=$

表 3 コンプライアンス (ml/cmH<sub>2</sub>O)

Supine	NON DEP. (R)	38.3±1.3 (S.E)	1.00
	difference	P<0.01	ratio
	DEP. (L)	32.7±1.3 (S.E)	0.85
Lateral	NON DEP. (R)	34.5±1.6 (S.E)	1.00
	difference	P<0.01	ratio
	DEP. (L)	26.1±1.3 (S.E)	0.76

(n=10)

0.35±0.04 であった。ついで、Lateral (左下) にすると  $PaO_2=131\pm 16$  (S.D) torr,  $Paco_2=28\pm 6$ ,  $FI_{O_2}=0.34\pm 0.03$ , (いずれも n=10) であった。

(2) レジスタンスについてみると、表 2 のごとくである。ここで total (T) は、チューブのレジスタンスを含めた値であり、airway (a) は、その T の値から、表 1 に従って、Portex の場合は、tracheal duct では 17.0 cmH<sub>2</sub>O/L/s を、bronchial duct では、18.8 cmH<sub>2</sub>O/L/s を差し引いたものである。同様に Rüsch (Carlens) の場合は、T から tracheal duct では 12.8 cmH<sub>2</sub>O/L/s を、bronchial duct では 11.8 cmH<sub>2</sub>O/L/s を差し引いて a を求めている。これらは、おおよその、左右主気管支以下の抵抗を示していると考えてよいだろう。見かけでは、Supine, Lateral とともに、dependent 側でレジスタンスが上昇しているが、有意ではなかった。

(3) コンプライアンスは、Supine で左側の方

表 4 タイムコンスタント (sec)

Supine	NON DEP. (R)	0.60±0.02 (S.E)	1.00
	difference P<0.05		ratio
	DEP. (L)	0.53±0.03 (S.E)	0.88
Lateral	NON DEP. (R)	0.55±0.03 (S.E)	1.00
	difference P<0.01		ratio
	DEP. (L)	0.43±0.03 (S.E)	0.78

(n=10)

が、右側より約 15% 低い値を示した。Lateral にすると、この傾向はさらに著明になり、24% の低値を示した。この結果の持つ意味は大切であるが、後でくわしく述べることにする（著者達の臨床上で設定で、左側肺の方へ、右側肺より大きい換気量を設定していることは先述した。）（表 3）。

(4) タイムコンスタントは、Supine では約 12%，Lateral では 22%，いずれも左肺の方が小さかった（表 4）。タイムコンスタントは、コンプライアンスとレジスタンスを掛け合わせて得られるものであるが、ここで用いたレジスタンスは、先の表 2 での T の値である。いずれにせよ、このタイムコンスタントの値は、ふだん著者達がシングルルーメンチューブで換気している時に経験する値より、はるかに大きいものである（著者達の臨床上の設定で、換気回数をゆっくりとっていることは先述した）。

## 考 察

1) Bindslev<sup>4)</sup> によると、Supine から Lateral にすると、non dependent lung (r) のコンプライアンスは大きくなるとされている。その要因を肺内に求めるとすれば、体位変換によって non dependent lung から、血流が重力に従って、dependent lung の方へ移動するためと考えられるが、著者達の研究の被検者のように食道切除を受ける場合は、手術操作を容易にするために、右肩を強く前方に押し出す体の位置が好まれる。このために、右肺のコンプライアンスが低下したものと考えてよいだろう。つまり、必ずしも肺内因子に限らず、むしろ肺外からの力の方が、簡単にコンプライアンスを低下させることは、他の場合でもし

ばしば経験することである。一方、dependent lung での著明なコンプライアンスの低下についても non dependent lung から移動してきた血流に加えて、縦隔内臓器の重さが圧迫を加えていることにもよると考えられる。（West<sup>5)</sup> は、9つのコンパートメントに分けた立位の人の肺で、上部 3 コンパートメントの換気量は、たとえば下部 3 コンパートメントのそれに比べると少ないと報じている。これを単純に、FRC からの一回換気量を達成するのに必要な、各 zone 共通の transpulmonary pressure で割ると、立位であるので、血流の少ない上部 3 コンパートメントでの単位圧あたりの換気量が、下部 3 コンパートメントのそれより小さくなってしまって、Bindslev<sup>4)</sup> の報告した non dependent lung と dependent lung のコンプライアンスの関係とは逆になってしまうが、ここで注意せねばならないのは、West<sup>5)</sup> の示したモデルでは、3つに分けたそれぞれの zone での換気に応答可能なスペースの量が示されているのであり、仮りに、等量に設定して、同じ換気量、同じ換気回数で換気を行ったとすると、血流も少なく、臓器による圧迫も少ない上部のコンプライアンスの方が、下部のそれより大きい筈である。）著者達の研究による Lateral にした際の、dependent lung のコンプライアンスの低下は、Bindslev<sup>4)</sup> の報告ともよく一致している。この場合、シングルルーメンチューブを用いて一台の人工呼吸器で換気を行っていると、換気は、コンプライアンスの大きい non dependent lung の方へ優先的に分配され、死腔効果しか得られないことになりかねないが、ツインルーメンチューブを用いて 2 台の人工呼吸器を使用している場合は、選択的に dependent lung のみの換気量を増やすことにより、換気血流比を改善できることになる。測定法についてみると人工呼吸器に備えられたコンピューターによるコンプライアンスの計算式には、分母に  $P_{ei}$ (図) が用いられている。図からもわかるように、十分な吸気時間、あるいは吸気終末プラトーをとってあれば、この吸気から呼気への変換点において、その換気量での弾性部分より由来する圧  $P_c$  は、吸気終末圧  $P_{ei}$  と一致すると考えて差し支えないだろう (dynamic compli-

ance)。したがって食道内圧の代わりに  $P_{ei}$  を用いることは、その条件下ではあまり問題にならないのだが、別な問題は、1台の人工呼吸器を用いて換気していると、たとえ、ツインルーメンチューブを用いていても、このプラトローの時期に、コンプライアンスの小さい dependent lung から、コンプライアンスの大きい non dependent lung に向かって、換気の再分布が起こることがわかったことである<sup>4)</sup>。ツインルーメンチューブだけでなく、わざわざ2台の人工呼吸器を使用する、もう一つの意義である。ところで、コンプライアンスが低下していることがわかった dependent lung に対して、2台の内の1台の人工呼吸器で、選択的に、換気量を増やしてやると同時に、やはり選択的に PEEP をかけてやる問題はどうか。まず、換気量の増量について考えてみよう。衆知のように、仮りに換気量を増やしたところで、それに伴って肺泡周辺の血流が増加しないと、有効な血液の酸素運搬量の増加は期待できないわけである。著者達の考えでは、少なくとも平素の一回換気量を達成する transpulmonary pressure (たとえば  $5\text{ cmH}_2\text{O}$ ) にあたる換気圧までは、血流が増えないことには、人工呼吸器の陽圧が加えられた時から、すでに  $\text{PaO}_2$  が低下してしまうことになる。この換気に伴う血流の増加の程度には、肋膜腔圧が多分に影響すると考えられるが、Lateral にすると dependent lung をとりまく肋膜腔圧は、臓器などの圧迫によって、たとえば、立位の際の肺下部などにくらべても、less negative になると考えられ、換気に伴う血流増加の幅は、より狭くなっている可能性がある<sup>7)</sup>。それを考えると、たとえば PEEP を併用した場合、その圧がもっと肋膜腔圧を圧迫して less negative にするだろうから、少なくとも併用のメリットについては首をかしげざるを得ない。しかし、dependent lung のみへの PEEP(selective peep) は、心拍出量を低下させることなく血液の酸素化を改善すると言う報告はある<sup>8)</sup>。併用するにしろ、しないにせよ、もし血液の酸素化に改善がみられたならば、普通、臨床では筋弛緩剤を併用していることが多いので、その効果により、肺コンプライアンスと胸廓コンプライアンスが1:1となり、

換気中の肋膜腔圧の保全が別の形で行われているのかもしれない。

2) レジスタンスの測定で問題になるのは、その計算式の分子である。実際  $P_c$  は、作図によってしか求めることはできない。リアルタイムでのその直接の検知は、現在までのところ不可能である<sup>3)</sup>。人工呼吸器のコンピューターでは、 $P_{ei}$  をもって代用しているのだが、実際には作図によって、どのようにして  $P_c$  を求めるかと言うと、吸気終末で算定したコンプライアンスの、コンプライアンス=量/圧の関係を利用して、 $\dot{V}_{\max}$  点で測った換気量  $V_{T'}$  をコンプライアンスで割ると  $P_c$  が得られる。これは弾性部分に由来する圧成分であるから、トータルの圧成分である  $P_{\max}$  から  $P_c$  をひいてやると、非弾性部分に由来する圧、 $P_r$  が残ることになる。図からわかるように、この  $P_c$  の代わりに  $P_{ei}$  を用いた人工呼吸器のコンピューターの計算では、レジスタンスの値が  $P_c$  を用いた場合よりも小さくなることがわかるだろう。さらに、肺コンプライアンスが低下して  $P_{ei}$  が上昇してきたり、換気回数が増えてくると、 $P_{\max}$  と  $P_{ei}$  の落差がどんどん縮まり、極端になると分子=0、つまりレジスタンス=0の表示が出るから注意が必要である。また Portex では tracheal duct の末梢開口部から bronchial duct の末梢先端までの距離が  $6.5\text{ cm}$  あり、Rüsch では  $5.5\text{ cm}$  と約  $1.0\text{ cm}$  短くなっている。また、Carina hook の付け根から bronchial duct の先端までの距離も、Rüsch では  $3.5\text{ cm}$  だが、Portex では  $4.5\text{ cm}$  と長い。これらの事実は、日常の臨床で、Portex の方が Rüsch よりもポジショニングトラブルが多いと言われていることと、かなりの関係があるだろうと思われる。

3) タイムコンスタントは、Supine, Lateral どちらの体位でも、左右肺とも、自発呼吸時(両側肺によるものであるが)にくらべて、はるかに大きい。理論的には、仮りに今タイムコンスタントを  $0.6\text{ 秒}$  とした場合、吸気時間対呼気時間比が  $1:2$  であると、吸気相は  $1.8\text{ 秒}$ 、呼気相は  $3.6\text{ 秒}$ 、したがって1回の換気のサイクルに要する時間は  $5.4\text{ 秒}$  となり、1分間の換気回数は約  $11\text{ 回}$  となる。臨床的にも、この程度のゆっくりした換気回

数が適当なのかもしれない。しかし、こうして、左右の肺のタイムコンスタントに、はっきり違いがある場合は、2台の人工呼吸器の換気回数の同数性、換気相の同期性の必要を論じる際に、これまでと違った別の視点が提示されていると言えるかもしれない。レジスタンス (R) には、圧 (P) と流速 ( $\dot{V}$ ) との間に  $P=R \times \dot{V}$  の関係があり、今 time cycled で volume limited ventilation を行っているとする、R が上昇した場合、換気圧としての P が大きくなっていく。一方、コンプライアンス (C) も、圧 (P) と量 (V) との間に  $C=V/P$  の関係があるから、C が小さくなると、同じように換気圧 P は大きくなり、いずれの場合にも人工呼吸器の圧力計には、同じような換気圧の上昇としてあらわれてくるから、もし人工呼吸器が肺気道ダイナミクス測定用のコンピューターを備えていれば、その高い圧を構成する中味、つまりは、タイムコンスタントを知ることができるわけで、換気の扱い方について貴重な情報を提供してくれることになるだろう。

#### 文 献

- 1) Hedenstierna G, Santesson J, Bindslev L, et al : Regional differences in lung function during anaesthesia and intensive care. Acta Anaesth Scand 26 : 429, 1982
- 2) Baehrendtz S, Hedenstierna G : Differential ventilation and selective positive end-expiratory pressure : Effects on patient with acute bilateral lung disease. Anesthesiology 61 : 511, 1984
- 3) Personal communication with Norlander O.
- 4) Bindslev L, Santesson J, Hedenstierna G : Distribution of inspired gas to each lung in anesthetized human subjects. Acta Anaesth Scand 25 : 297, 1981
- 5) West JB : Ventilation/blood flow and gas exchange. Blackwell Scientific Publication, 1980, p 57
- 6) 沼田克雄 : 左右別人工肺換気の生理. ICU と CCU 8 : 1047, 1984
- 7) 美馬正彦 : 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). 人工呼吸 4 : 15, 1987
- 8) Baehrendtz S, Bindslev L, Hedenstierna G, et al : Selective peep in acute bilateral lung disease. Effect on patient in the lateral posture. Acta Anaesth Scand 27 : 311, 1983