

図 8 I/E 比を 1/2 から 1/1 に変えたときの 30 分後の CI, SVI, LVSWI, RVSWI の変化 (mean±SE)

of inspiratory to expiratory ratio in its management by ventilator. Am J Dis Child

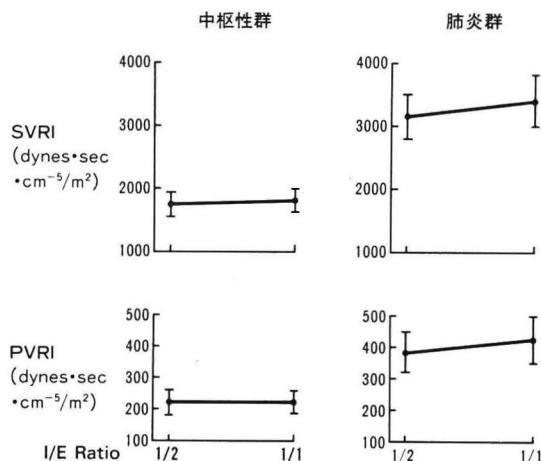


図 9 I/E 比を 1/2 から 1/1 に変えたときの 30 分後の SVRI, PVRI の変化 (mean±SE)

134 : 373~376, 1980

- 7) Tyler DC, Cheney FW : Comparison of positive endexpiratory pressure and inspiratory positive pressure plateau in ventilation of rabbits with experimental pulmonary edema. Anesth & Analg 58 : 288~292, 1979
- 8) Pontoppidan H (諏訪邦夫訳) : ARDS の病因と治療. 日本アップジョン株式会社, 東京, 1983
- 9) Fuleihan SF, Wilson RS, Pontoppidan H : Effect of mechanical ventilation with end-inspiratory pause on blood-gas exchange. Anesth & Analg 55 : 122~130, 1976

## 左右肺別換気での呼気 CO<sub>2</sub> 曲線

岡田 和夫\* 遠藤 英康\* 永井 博典\*  
矢作 幸雄\* 大滝 和彦\*\* 解良 富夫\*\*\*

### はじめに

呼気 CO<sub>2</sub> 濃度曲線は、肺胞換気の良い否の指標として広く使用されている。この CO<sub>2</sub> 濃度曲線は、そこを流れる肺血流量の大小、さらには末梢

で産生される CO<sub>2</sub> 量の大小も影響してくる。

この肺胞での換気状態を知るのに、単にピークの呼気 CO<sub>2</sub> 濃度を知るだけでなく、呼気 CO<sub>2</sub> 濃度曲線をみるのも有意義である。肺でのガス交換を把握するのに、呼気 CO<sub>2</sub> 濃度曲線の波形が何らかの意味を持っているのではないかと考えた。

今回は開胸手術患者で左右肺別換気を行って、体位変動、開胸の影響が CO<sub>2</sub> 曲線にどのように

\* 帝京大学医学部麻酔学教室

\*\* 帝京大学医学部第 1 外科学教室

\*\*\* 帝京大学医学部 ME 部

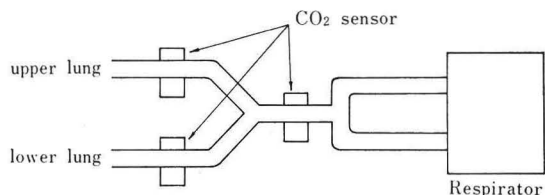


図 1

影響するかを検討し、この変動の機序について考案した。

## 方 法

帝京大学病院中央手術部で、開胸手術をうけた患者8名について行った。年齢は30歳から70歳までの間にあり、肺癌が主であった。チオバルビツレートで麻酔導入後、サクシニルコリンを投与して十分の筋弛緩をえた後に、Portex社製のdouble-lumen tube (Twin-tube®) で気管内挿管を行った。左右肺の呼吸音を片肺ずつ（対側肺チューブをクランプして）聴取して、気管内チューブの位置を確実に確認した後で固定した。気管内チューブは麻酔器に接続して、レスピレータによる人工呼吸を主にした。自発呼吸はそのまま残して、仰臥位から側臥位にしたときのCO<sub>2</sub>パターンも記録した。

CO<sub>2</sub>記録はDatex社製CO<sub>2</sub>分析装置によった。

図1に気管内チューブの接続と、CO<sub>2</sub>分析装置のセンサーの装着の位置を示す。麻酔維持はGOF麻酔で行い、笑気によるCO<sub>2</sub>濃度測定への影響はあらかじめ調整しておいた。左右肺別々での換気量および全肺での換気量をWrightのレスピロメータで測定した。必要に応じて、血液ガス測定をAVL-940型血液ガス分析装置で行った。

## 結 果

代表的な症例につき報告する。

〔症例1〕 70歳、男性、右肺癌

図2は麻酔導入をして側臥位でレスピレータで調節呼吸を行っているときのCO<sub>2</sub>波形であるが、上、下肺とともにプラトーがはっきりみえる。図3は同じくレスピレータで調節呼吸を行って側臥

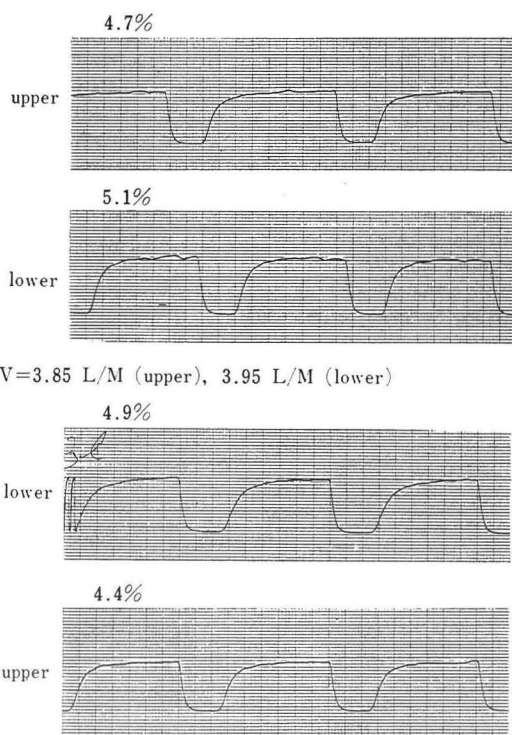


図 2 症例1。側臥位、閉胸

位にしたときの波形の変化で、開胸による影響をみている。開胸により上肺のCO<sub>2</sub>は、プラトーが次第に傾斜している。End-tidal CO<sub>2</sub>は5%でも開胸直後はプラトーがあるのに、開胸の時間経過につれてプラトーの平坦部の傾斜が急峻になってきた。そして上肺、下肺のCO<sub>2</sub>濃度は下2段で比較できるが下肺4.8%、上肺4.2%でしかも上肺CO<sub>2</sub>のプラトーの勾配が急峻になっている。

図4は下肺、上肺、全肺と記録したものである。下肺4.8%、上肺4.3%、全肺4.2%で、下肺から呼出されたガスが、全肺として測定した場合に稀釈された像となった。

〔症例2〕 57歳、男性、左肺癌

図5は開胸操作中で、比較的開胸して時間が経過していないときである。全換気量として一回換気量が500~550mlを示しているが、全肺3.8%、上肺3.5%、下肺4.7%で全肺CO<sub>2</sub>は開胸上肺CO<sub>2</sub>濃度に近い。時間がやや経過した開胸時のCO<sub>2</sub>濃度曲線を図6に示すが、心拍動の影響によりプラトーが変動するが、下肺野では一呼

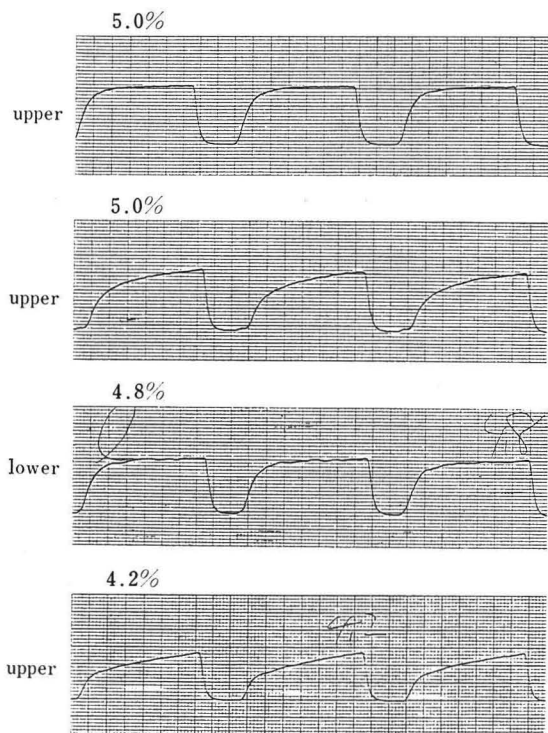


図 3 症例 1。側臥位，開胸

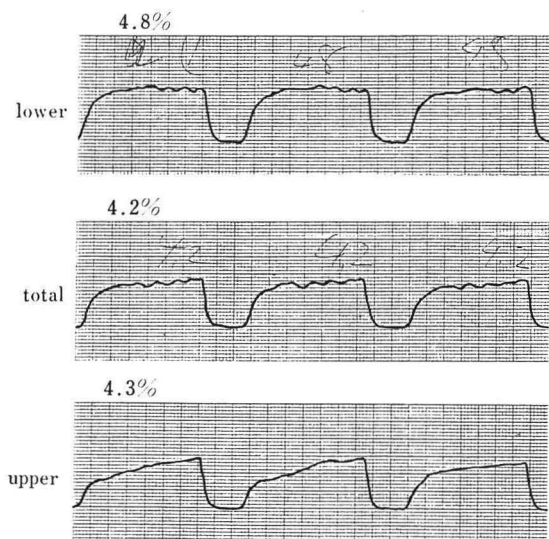


図 4 症例 1。側臥位，開胸

吸ごとにピーク  $\text{CO}_2$  濃度および波形の不規則化が目立つ。

図 7 はこの時間の経過したときの  $\text{CO}_2$  濃度を示すが，上肺 3.9%，下肺 4.9% である。興味あ

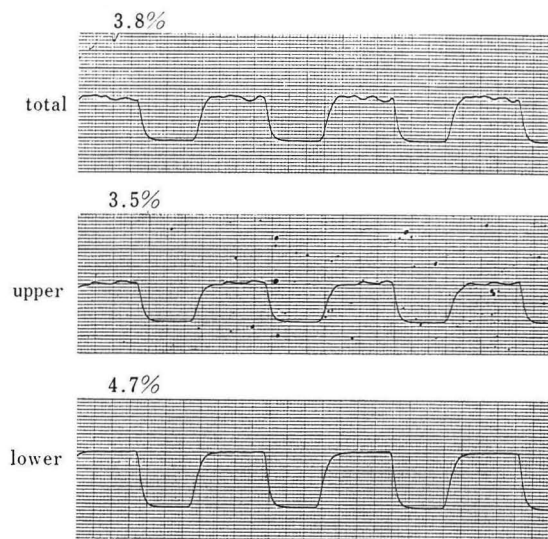


図 5 症例 2。側臥位，開胸，一回換気量 500~550 ml

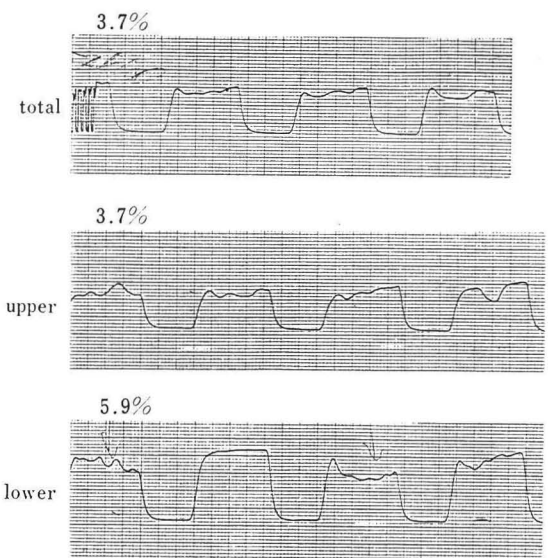


図 6 症例 2。側臥位，開胸，一回換気量 300 ml

るのは，上肺の  $\text{CO}_2$  曲線ではプラトー形成がみられるが，下肺では二相性の  $\text{CO}_2$  波形がみられた。

これは“ラクダの背”と表現される特異なパターンである。

図 8 は開胸のままで調節呼吸を続けていて  $\text{CO}_2$  の記録を，ゆっくり行つたときの図である。波形が平坦でなく“ぎざぎざ”ができてくるのが，波形ののこぎり状の記録からうかがえる。ここで

上肺の換気をクランプしたら、波形が次第に平坦化してぎざぎざが消えてきた。このときの  $\text{CO}_2$  濃度が 3.7% となったが、300 ml で両側肺を換気をしていたときの 3.2% から片肺を 300 ml で換気したほうが、かえって呼気  $\text{CO}_2$  濃度が増加していた。これは両肺 300 ml の一回換気量では、肺胞が十分に膨張した状態で換気されていなかったのが、片肺に 300 ml 加わることで肺胞低換気が改善されたということが示され、さらに換気と  $\text{CO}_2$  産生の相互関係が、unstable な状態であったことが示唆されたことになる。

図 9 は手術が終了して閉胸して仰臥位にしたときの所見である。ここでは上肺、下肺、全肺の  $\text{CO}_2$  濃度およびそのパターンがほとんど変わらなくなっていて、側臥位、開胸での  $\text{CO}_2$  濃度およびパターンの左右差は、この患者での側臥位、開胸という機能的な因子により、 $\text{CO}_2$  濃度とそのパターンに左右差が生じたと考えてよからう。

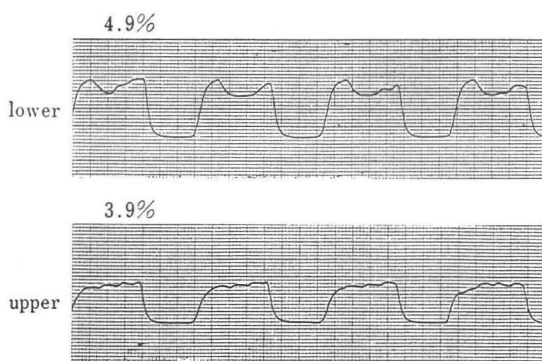


図 7 症例 2。側臥位、開胸、一回換気量 500~550 ml

〔症例 3〕 32 歳、男性、左肺癌 (図 10)

上肺は 4.6%、下肺は 8.1%、全肺で 7.5% で下肺の  $\text{CO}_2$  濃度が、上肺の低い  $\text{CO}_2$  で稀釈された像である。波形はプラトー部分が勾配を生じているが、その傾斜は左、右個々の肺および全肺でほとんど同じであった。

## 考 案

呼気  $\text{CO}_2$  濃度をモニターして  $\text{PaCO}_2$  の代りにできれば頻回な採血、血液ガス測定が省略できる。しかも刻々の動脈血ガス分析は採血して、血液ガス分析装置を使用するかぎり不可能である。

麻酔中に肺胞死腔の増大など、肺機能の異常が

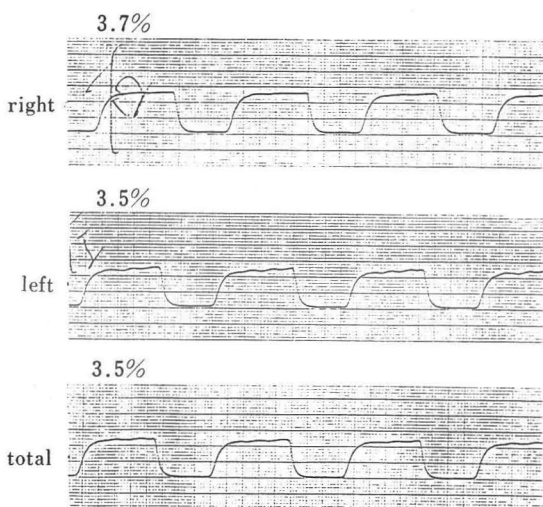


図 9 症例 2。閉胸、仰臥位、一回換気量 650~700 ml

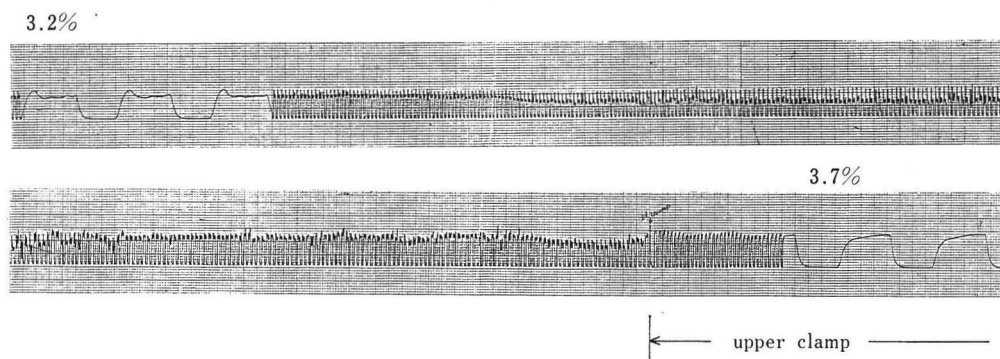


図 8 症例 2。側臥位、開胸、一回換気量 300 ml

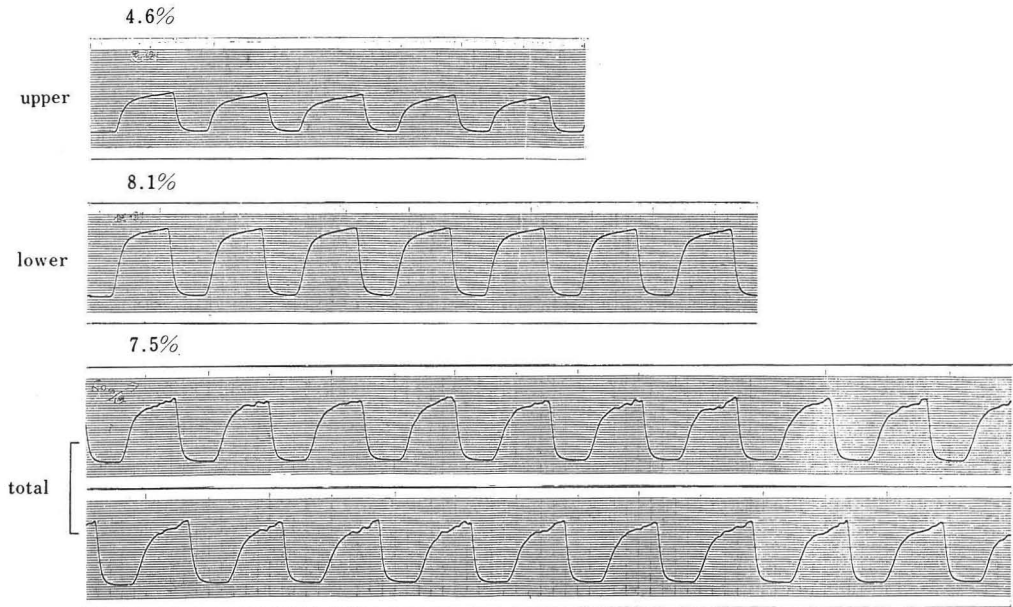


図 10 症例 3。側臥位，開胸，一回換気量 600 ml

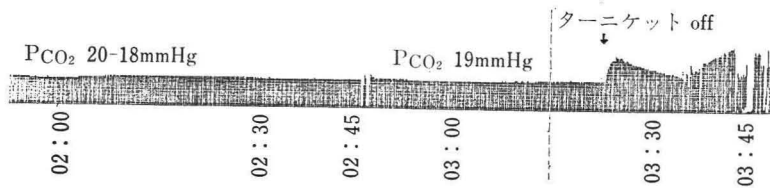


図 11  $\dot{V}CO_2$  上昇による呼気  $CO_2$  の上昇

生じないのなら，麻酔導入時に求められ全動脈血ガス測定値と，呼気  $CO_2$  濃度曲線から求めた呼気終末  $CO_2$  分圧とを比較してから，それ以後は呼気  $CO_2$  曲線からの， $P_{ACO_2}$  で換気の良否が判断できよう<sup>1)</sup>。

呼気  $CO_2$  濃度は，①末梢での  $CO_2$  産生量，②末梢から肺まで運搬される  $CO_2$  量の増減（体循環と肺循環の動態），③肺でのガス交換の動態，により決まってくる。たとえば図 11 はターニケットを開放したときの呼気  $CO_2$  濃度曲線で，ごく一過性に  $CO_2$  濃度が増加している。この間人工呼吸で換気は一定であり， $\dot{V}CO_2$  が末梢から肺に一過性に多く放出されたためである。

体の中で血流は左心，動脈，末梢，静脈，右心，肺循環，左心とシリーズに流れているが，肺循環では左右肺が別々に平行に流れる特徴がある。正常時には，左右が平行に流れても両者

間で差がないが，肺循環が低圧系のために，重力の影響の他に左右肺での肺胞の加圧の度合の差，それによる血流の分布の変化により，左右肺またはさらに一側肺内でもコンパートメントごとの血流量に差が生じることが考えられる<sup>3)</sup>。

換気が上側肺と下側肺に自発呼吸と人工呼吸とで，分布が異なることは注目されたが<sup>4)~6)</sup>， $CO_2$  濃度からの検討はみられない。この換気はさほどわれわれの症例で差がなかった。これに対して，肺循環の低圧の影響は体位により下肺野の血流増加，上肺野の血流低下となって及んでくる。仰臥位でもこれはみられるが，側臥位になると上肺と下肺の重力差はさらに著明になって，上側肺の血流が下側肺にと血流がシフトすることになる。図 12 のように West<sup>2)7)</sup> のいう zone 1 の範囲が上肺の大部分を占めるようになる。図 12 は Nordström<sup>7)</sup> の論文よりの引用だが，仰臥位では

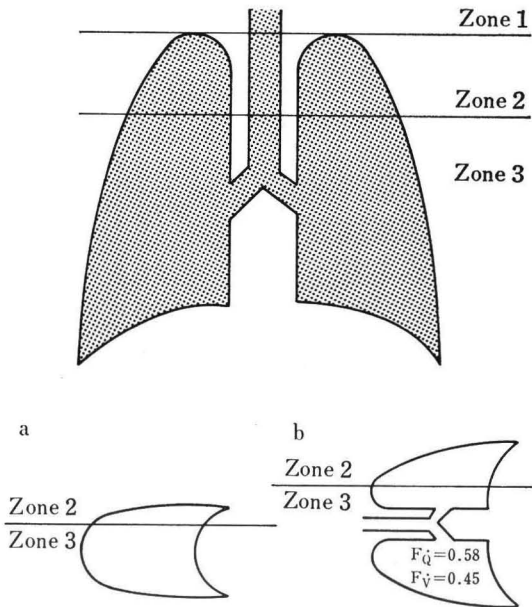


図 12 上：立位での zone 1~3 の分布

- a : 仰臥位での zone (1 はなく 2, 3 のみ)  
 b : 側臥位での zone (上側肺は 2 と 3, 下側肺は 3 のみ)

zone 2 は上肺にわずかだが、側臥位では上側肺のかなりの部分を占める。換気量が左右同じでも、血流の大小により同じ呼気  $\text{CO}_2$  濃度を示さなくなる。今回の成績でも、これが明らかで仰臥位では左右呼気  $\text{CO}_2$  濃度はほとんど差がなかったのが、側臥位にすると、下側になった肺の呼気  $\text{CO}_2$  濃度が上肺の呼気  $\text{CO}_2$  濃度よりも高くなる。この重力による影響が、側臥位にしてからの時間的経過につれてどのように変わるかは、換気の分布とからませて興味ある点である。呼気  $\text{CO}_2$  濃度は仰臥位レベルと比較して、上肺は低下、下肺は上昇という所見で、換気量は人工呼吸では全体量は同じで、左右肺（上下肺）でも差がないことから、肺血流の低下が上肺で起っている所見を、最もよく反映している<sup>1)</sup>。

呼気  $\text{CO}_2$  濃度パターンの分析は、肺気腫、慢性閉塞性肺疾患、喘息などの病的肺でのガス分布、換気一血流比の不均衡をチェックするためが主であった。このときの所見では肺胞  $\text{CO}_2$  のプラトーが形成されず、右上りの勾配がみられるのが主であり、今回の成績のような 2 相性の、“ら

くだの背”のような所見は報告されていない。体位によっては心拍動による呼吸の流れが気道系に加わって、これが  $\text{CO}_2$  曲線に拍動状に上乗せすることは知られているが、この拍動とは異なり、ゆっくりした変動でしかも呼気開始相と呼気終末相とでピークになるという、呼気により規制された因子である。これは Kalander<sup>8)</sup> が全肺で側臥位についてはじめて示したが、今回は左右別に記録して、非開胸側でこの像が著明であり、開胸側には少なかったことは興味ある所見である。開胸側は右上りの急峻な勾配がみられ、これは肺操作などがなくてもみられた。

このプラトー形成が、“ラクダの背”様の 2 相性変化を示すことと、右上りの急峻な勾配の直線となり、平坦部がみられないという異なった 2 パターンに変化して消失することは、興味ある所見である。なにゆえこのように 2 パターンに変化するのか。この発生機序はどうか。肺内ガス分布、換気一血流比の不均衡ということなら、これまで肺気腫、閉塞性肺疾患でみられたように右上りの勾配を持った直線になるはずである。ガス呼出のための気道抵抗、コンプライアンスが各コンパートメントで異なり、これがために呼出にあたっての時定数の差となって、呼気開始直後に主に呼出される部分、終末近くで呼出される部分、と分かれてきたのかもしれない。呼気流量は呼気開始直後に大部分は流れて、その後は指数函数的に減少して、呼気終末では  $\text{CO}_2$  濃度は高いが、流量はほとんどないのが、換気動態からみた  $\text{CO}_2$  濃度曲線の像である。呼気の終末近くになって、心拍動による呼気  $\text{CO}_2$  濃度の変動が大きくひびくのは、この流量が低下した時点での心拍動による気道内ガス移動が、相対的に大きく関与したためであろう。

換気良好部が呼出され、ついで不良部が呼出されるという順で呼出されるパターンを“sequential cause”と呼んでいるが、この場合は右上りの急峻な勾配が生じる。これに対して、肺内の換気分布が不均等でも換気的良好な部と、良好でない部（肺胞死腔）からの排出が同時に進行するときには、プラトー形成がみられ、換気分布の異常が  $\text{CO}_2$  曲線からはチェックできない。Nunn<sup>9)</sup>



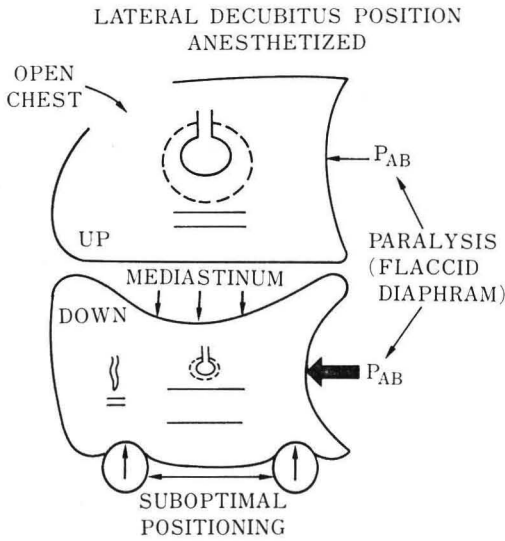


図 13

は側臥位での人工呼吸で特に開胸時には、このような換気パターンがみられるとしたが、今回の成績では開胸時の  $\text{CO}_2$  曲線で勾配があることが示された。これは開胸側が単独の片肺だけで  $\text{CO}_2$  曲線をみたためなのか、今後さらに検討を行いたい。

図 13 は Benumof<sup>10)</sup> が開胸時での下側肺と上側肺での肺血流の状態、肺の膨張度、換気の状態を示したシエーマである。開胸により肺加圧で上側肺が膨らみやすく、下側肺は横隔膜が弛緩して臓器が横隔膜を下から圧迫して、肺容量 (FRC) が低下した状態である。下肺は上肺よりも同じ圧で加圧したときには膨らみにくい、血流は上肺が少なく下肺に多いことが明らかである。

これらの異常は  $\text{PaO}_2$  に大きくひびくが、 $\text{PaCO}_2$  にも影響してくることが本論文で明らかになった。 $\text{CO}_2$  パターンの分析も  $\text{PaCO}_2$  の変動の追跡とともに大切で、これをより正常化させる努力も換気—血流の改善を旨とするためにも大切な点であろう。今後  $\text{PaCO}_2$  値と、呼気  $\text{CO}_2$  濃度、終末呼気  $\text{CO}_2$  濃度との比較なども症例を重ねて行いたい。

#### まとめ

呼気  $\text{CO}_2$  濃度曲線を Datex 社製 Normocap により測定した。これを肺癌患者での開胸手術

で、左右肺別々に double-lumen tube を使用して呼気濃度を測定、比較した。この左右肺での  $\text{CO}_2$  濃度が体位 (側臥位)、開胸により変動することを観察し、上側肺では  $\text{CO}_2$  濃度が低く下側肺で高かった。これは、換気量は左右肺で差がないのに、肺循環が低圧系であり、上肺から下肺までの距離が側臥位では、仰臥位よりも大となり、重力の影響により下肺の血流が上肺に比べ大となったためと考えられた。

呼気  $\text{CO}_2$  濃度のパターンも仰臥位から側臥位にすると、“らくだの背”のような2相性の波形がみられた。他方開胸側では開胸の影響により、プラトー部が勾配を持ち右上りになった波形パターンを示した。この両パターンの発生の機序について考察した。

#### 文 献

- 1) Nunn JF : Applied Respiratory Physiology. London, Butterworth, 1978
- 2) West JB : Ventilation/Blood Flow and Gas Exchange. 2nd ed. Oxford, Blackwell, 1970
- 3) Wulffe KE, Aulin I : The regional lung function in the lateral decubitus position during anesthesia and operation. Acta Anesth Scand 16 : 195, 1972
- 4) Hedenstierna G, et al : Regional differences in lung function during anesthesia and intensive care; Clinical implications. Acta Anesth Scand 26 : 429, 1982
- 5) Millic EJ, et al : Regional distribution of inspired gas in the lung. J Appl Physiol 21 : 749, 1966
- 6) Rehder K, et al : Regional intrapulmonary gas distribution in awake and anesthetized-paralyzed man. J Appl Physiol 42 : 391, 1977
- 7) Nordström L : Pulmonary arterial pressure and gas exchange during thoracotomy, Applied Physiology in Clinical Respiratory Care. Hague, Martinus Nijhoff Pub, 1982
- 8) Smalhout B, Kalenda Z : An atlas of capnography, Vol. 1. Holland Zeist, 1975
- 9) Nunn JF : The distribution of inspired gas during thoracic surgery. Ann R Coll Surg 28 : 223, 1971
- 10) Benumof JL : Physiology of the open chest and one-lung ventilation, Thoracic Anesthesia. Edited by Kaplan JA. New York, Churchill, 1983