

粘性抵抗負荷時における換気力学的研究

京都大学結核研究所外科学部（主任 教授 長石忠三）

土肥 佳郎* 金 泰希* 山本 四郎*
安田隆三郎* 佐川弥之助*

（受付 昭和42年1月25日）

I 緒 言

プールの一端に立って、威勢よく飛び込む時、下手をすると水面で胸を打つことがある。打った瞬間の水は、まるでコンクリートか板のように感ずる。「かたい」ことあたかも固体の如くである。今度は浅瀬を駆けくらべでもしたとする。駆けようとしても脚は水中をうまく進んでくれない。まるで水飴の中を歩く如くである。

この2つを較べると、相手が同じ水であるにもかかわらず、一方では堅い板のように、他方では水飴のように感ぜられ、同じ水でも場合により色々の性質をあらわしてくる。堅い板はさしづめ弾性を、水飴は粘っこさと関係しているであろう。つまり同じ水が、時には弾性を、時には粘性をあらわす。

このようにして、あらゆる物体は、弾性や粘性をあらわすのであるが、それは、つまりあらゆる物体が弾性と粘性を兼ね併せ持っているということである。そこで、これをひっくるめて粘弾性体 (Viscoelasticity) という。

そして、これらの関係とその適用を研究する、粘弾性の理論は、1929年 E.C. Bingham によりレオロジーと名づけられて以来、特に高分子化学の研究分野において大いなる発展をとげてきた¹⁾。

ところで、あらゆる高分子物質と同様に、肺も粘性と弾性を兼ねそなえた一つの粘弾性体であり、肺の機能を研究するにあたって、物性論としての粘弾性の理論が問題となるのは当然の

ことである。

近年、物性論としてのレオロジーは、肺の幾多の機能のうち、換気機能の研究にも適用され²⁾、肺の換気力学として発展し、換気機能の理論的ならびに臨床的評価に大きな役割を果たしている。このことに疑をはさむものはない。

呼吸運動に際して、肺は二つの仕事をなすと考えられる。これは呼吸仕事と呼ばれ、レオロジーの立場からこれを弾性仕事と粘性仕事に分けることができる。実際上は、呼吸運動に際して、生理的または病的に存在するところの弾性抵抗および粘性抵抗にうち勝つためになされる仕事、それぞれ弾性仕事、粘性仕事と定義される³⁾。

ところで、肺疾患患者において、将来予測される、換気機能におよぼす弾性抵抗および粘性抵抗の影響が、いかなる形で出現するかを知っておくことは、あらたに加った呼吸抵抗を発見し、それに対処するにあたって必要なことである。

そして、このような呼吸抵抗負荷時の換気力学的研究としては、E. J. M. Campbell⁴⁾らの、弾性抵抗負荷時の呼吸仕事量の変化をみることに、負荷された弾性抵抗に対する知覚の域値に関する報告がある。

*Yoshiro DOHI, Taiki KIM, Shiro YAMAMOTO, Ryuzaburo YASUDA and Yanosuke SAGAWA, Department of Surgery (Chairman Prof. Chuzo NAGAISHI), Tuberculosis Research Institute, Kyoto University,

ここに著者らは粘性抵抗の負荷が呼吸仕事量のうち粘性仕事量におよぼす影響をみるとともに、このような抵抗負荷時、呼吸のタイプにいかなる変化をきたすかを検討し、若干の知見を得たので、ここに報告する。

II 検査対象および検査方法

1. 検査対象および検査項目

任意に選んだ肺結核患者8名につき、以下に述べる方法および装置により、次にあげる各項目につき測定した。

- 1 回換気量 (L)
- 分時換気量 (L)
- 1 回換気粘性仕事量 (kg cm)
- 分時換気粘性仕事量 (kg cm)
- 換気 1 L 当り粘性仕事量 (kg cm/L)

2. 検査方法及び装置

被検者に坐位をとらせ、鼻孔より食道内圧測定用バルーンを挿入し、これを食道内圧計に連結するとともに、ベネデクトロス型呼吸計を用いて、食道内圧曲線と換気曲線とを同時に記録した。

この記録は、安静呼吸時、階段昇降試験直後、3分後、10分後と、メトロノームを用いて換気数を10, 20, 30および40に規定したそれぞれの場合についておこなった。

また、第1図に示すように、呼吸計内部に、できるだけ死腔の変化をきたさぬように考案した粘性抵抗をつけた場合についても、同様の記録をおこなった。

一般に粘性仕事量は、換気量を縦軸にとり、食道内圧（胸腔内圧は食道内圧にほぼ等しいとされるので食道内圧をもって代用される^{5,6)}）を横軸にとって、呼吸1サイクル中の各時点における換気量と食道内圧（安静呼吸位を原点として測定した相対値でよい）をプロットして描いた、いわゆる圧量図の面積で表わされる。圧量図の描き方に、XY 軸型ブラウン管オツシログラフを用いる方法と、単なる作図法とがある。著者らは後者によって得られた圧量図の面積をプランニメーターにより測定して、1回換気粘性仕事量を求めた。

また、1回換気量は換気曲線より求めた。

さらに、分時換気粘性仕事量および分時換気量は、1回換気粘性仕事量および1回換気量にそれぞれ換気数を乗じて求めた。

換気 1L 当り粘性仕事量は、1回換気粘性仕事量を1回換気量により除して求めた。

（註）圧量図の面積の単位は $L \cdot \text{cmH}_2\text{O}$ である。

ここに、 $1L = 1000 \text{ cm}^3$, $1 \text{ cmH}_2\text{O} = 1 \text{ g/cm}^2$ であるから、

$$1L \cdot \text{cmH}_2\text{O} = 1000 \text{ cm}^3 \cdot \text{g/cm}^2 = 1 \text{ Kgcm}$$

となり、「仕事=力×距り」の概念にあてはまる。

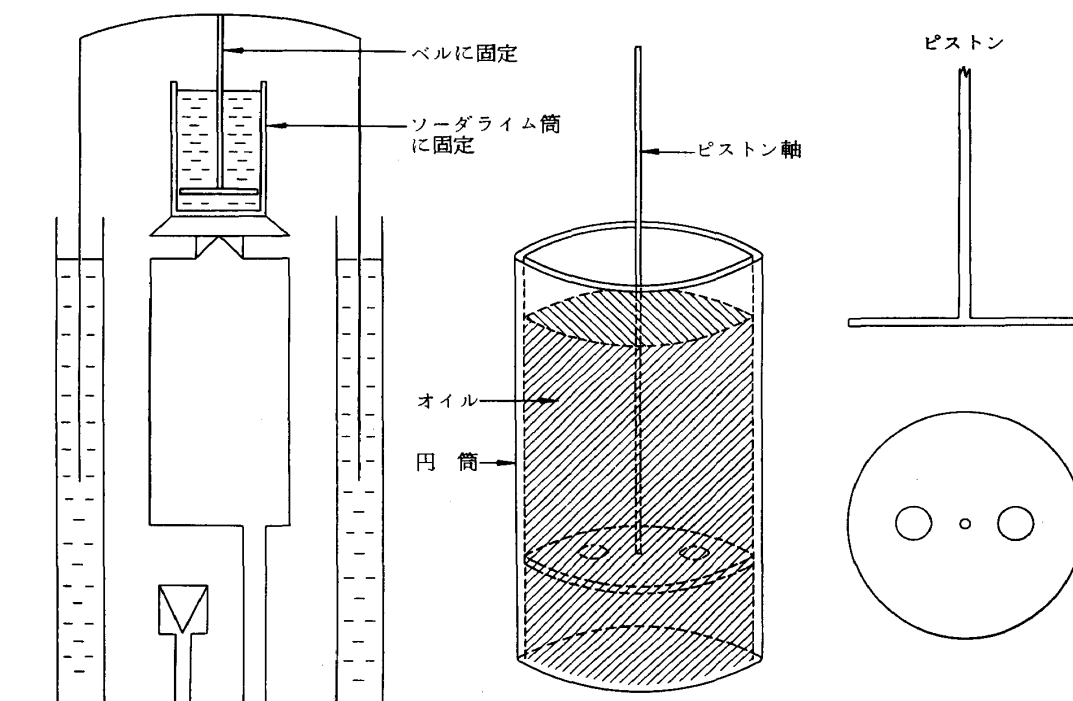


図 1 ベネデクトロス型呼吸計内部にとりつけた粘性抵抗

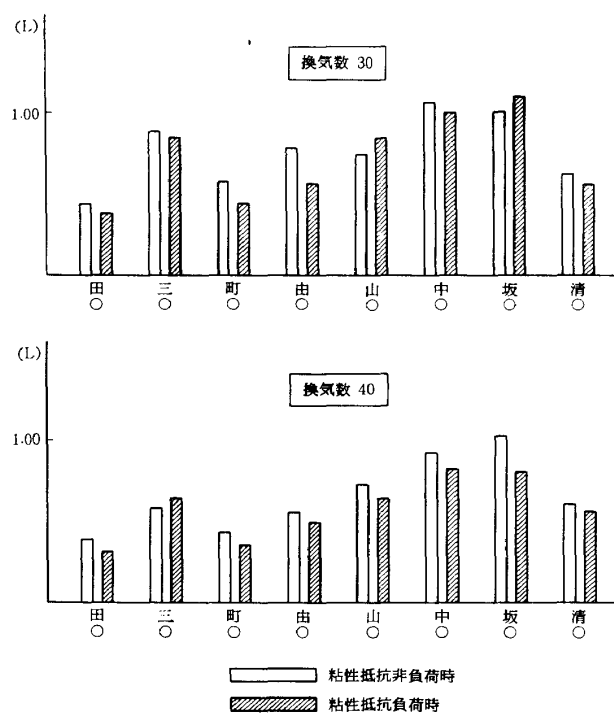


図 2 換気数30および40の時の粘性抵抗の有無による1回換気量の変動

Ⅲ 検 査 成 績

まず、粘性抵抗の有無による各値の変化について検討した。

第2図は、1回換気量について粘性抵抗非負荷時と負荷時を比較したものである。換気数30の時は8例中6例において、また換気数40の時は8例中7例において、粘性抵抗負荷により換気量は減少している。

第1表は、1回換気粘性仕事量について、粘性抵抗非負荷時と負荷時とを比較したものである。換気量が著明に減少した例を除くと、粘性抵抗負荷により粘性仕事量の増大をきたしている。

換気 1L 当り粘性仕事は、換気エネルギー価の相対値と考えられるが、これについて粘性抵抗非負荷時と負荷時とを比較すると、第2表に示すように、粘性抵抗負荷により換気エネルギー価の上昇をきたす傾向が認められる。

表 1 粘性抵抗の有無による1回換気粘性仕事量 (Kgcm) の変動

氏 名	換 気 数 10		換 気 数 20		換 気 数 30		換 気 数 40	
	非負荷時	負 荷 時	非負荷時	負 荷 時	非負荷時	負 荷 時	非負荷時	負 荷 時
田 ○	0.3	0.7	0.3	0.6	0.9	0.7	0.7	0.9
三 ○	2.3	2.0	2.5	3.3	3.9	5.0	5.2	5.0
町 ○	1.2	1.7	1.7	2.2	1.7	2.0	1.1	1.5
由 ○	2.3	7.0	2.8	4.4	2.9	4.4	2.2	3.3
山 ○	5.5	7.4	7.4	7.4	4.6	6.8	4.6	5.2
中 ○	11.6	12.9	9.3	14.6	8.4	11.6	8.1	11.9
坂 ○	9.1	7.8	8.5	11.6	7.7	12.2	9.1	8.0
清 ○	9.0	11.3	7.3	12.0	5.9	8.0	5.9	9.0

表 2 粘性抵抗の有無による換気 1L 当り粘性仕事量 (Kgcm/L) の変動

氏 名	換 気 数 10		換 気 数 20		換 気 数 30		換 気 数 40	
	非負荷時	負 荷 時	非負荷時	負 荷 時	非負荷時	負 荷 時	非負荷時	負 荷 時
田 ○	0.5	1.1	0.6	1.1	2.0	1.6	1.8	2.9
三 ○	2.2	2.0	3.8	4.7	4.4	5.9	8.9	8.1
町 ○	1.5	2.0	3.4	3.8	2.9	4.5	3.6	4.2
由 ○	1.9	4.5	3.7	5.5	3.7	7.9	3.9	6.6
山 ○	4.7	5.5	7.4	7.4	6.8	8.1	6.4	8.1
中 ○	8.8	9.8	8.3	13.8	7.9	11.6	8.8	14.5
坂 ○	5.4	7.4	8.4	8.5	8.5	8.7	7.6	10.0
清 ○	7.5	10.9	8.2	14.5	9.3	13.2	9.8	17.1

つぎに、換気数を増加させていった場合の各値の変化をみると、第3および4図に示すように、換気数の増加に伴い、1回換気量は減少するにもかかわらず分時換気量は著明に増大している。

第5図は、分時換気粘性仕事量と換気数との関係をみたもので、換気1L 当り粘性仕事量は、1例を除いて換気数10の時最も低い値をとり、換気数20になると増大を示し、換気数20から40の間では、増大するもの、減少するものな

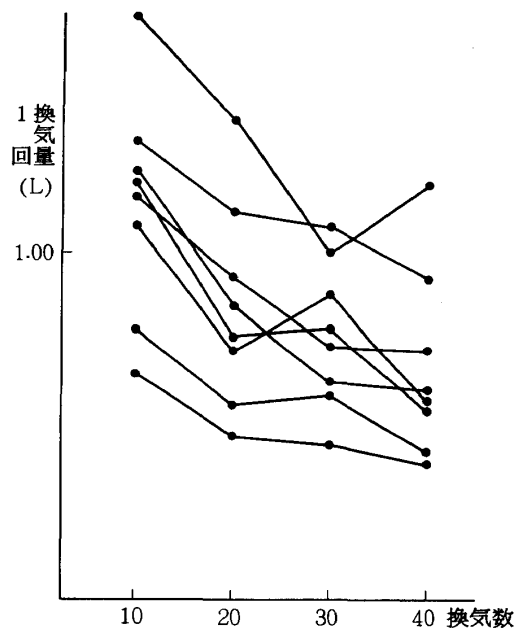


図 3 換気数の増加にともなう1回換気量の変動

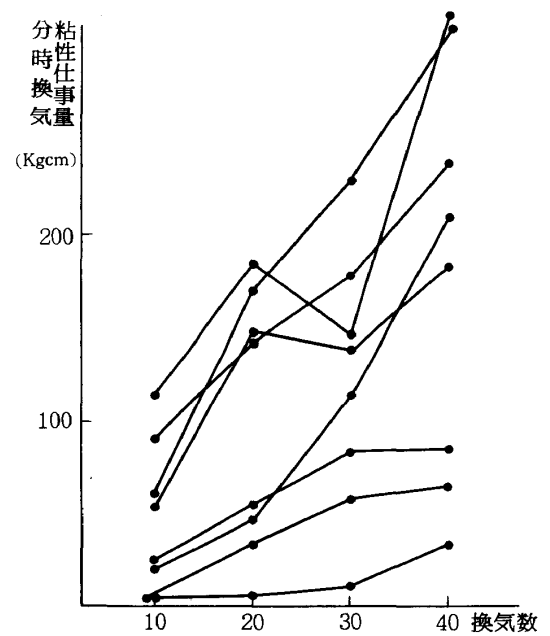


図 5 換気数の増加にともなう分時換気粘性仕事量の変動

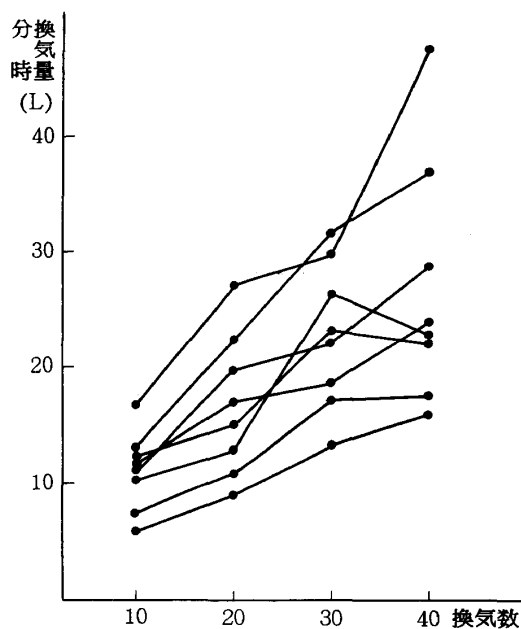


図 4 換気数の増加にともなう分時換気量の変動

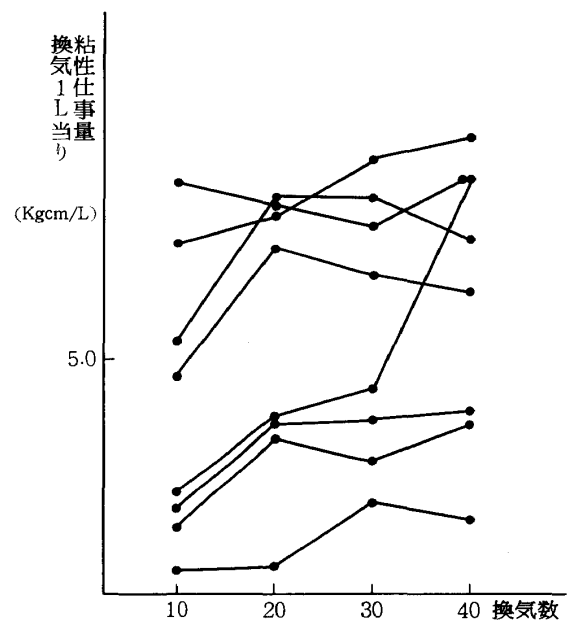


図 6 換気数の増加にともなう換気1L 当り粘性仕事量の変動

ど、各個人により種々の傾向を示している。

さらに、安静呼吸時および階段昇降試験後の各値の変化をみると、この運動負荷が、換気数には目立った変化をきたさぬ程度のものであったにもかかわらず、第7、8、9および10図に示すように、1回換気量、分時換気量、分時換気粘性仕事量および換気1L当り粘性仕事量等はすべて運動負荷により著明に増大し、3分な

いし10分後には、安静時またはそれ以下にまで減少している。

IV 総括ならびに考按

我々が道を歩く時、その歩巾と1分間の歩数を無意識のうちに決めて歩いていることがある。そしてこの歩き方は、個人によって異なるし、同一人においても種々の条件が歩き方を規

図7 運動負荷の1回換気量におよぼす影響

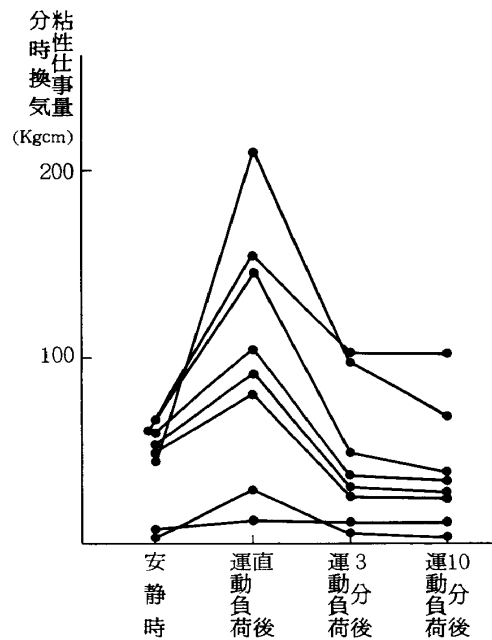
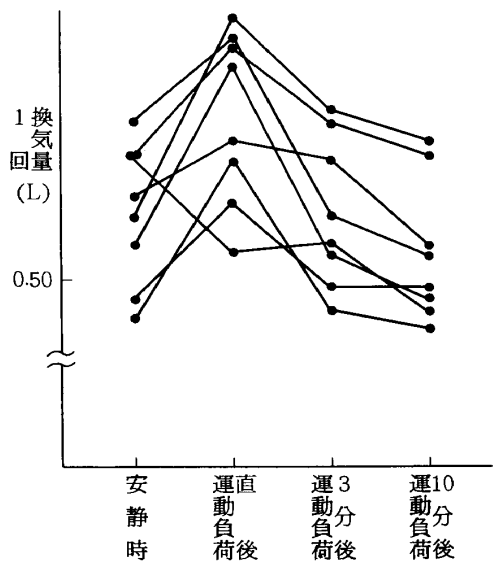


図9 運動負荷の分時換気粘性仕事量におよぼす影響

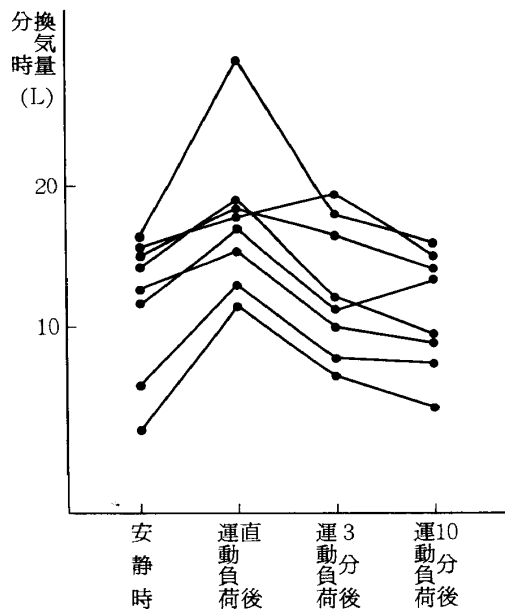


図8 運動負荷の分時換気量におよぼす影響

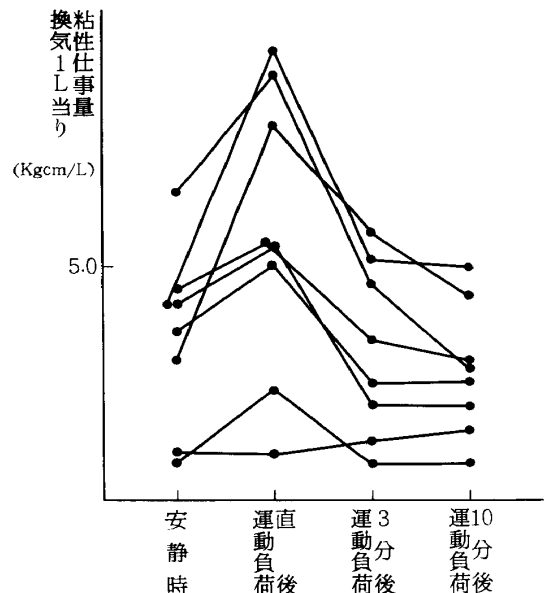


図10 運動負荷の換気1L当り粘性仕事量におよぼす影響

制する。

呼吸運動も人の歩き方と同様に、条件が同一ならば、その「深さ」と「早さ」とはおのずと決ってくるであろう。呼吸の「深さ」と「早さ」とは呼吸のタイプにほかならないが、この呼吸のタイプが、ある条件のもとに如何なる変化をきたすかを検討することが著者らの目的である。

ところで、個人において呼吸のタイプなどといったものが果して存在するであろうか。ある条件のもとに、無意識のうちに何故そのような呼吸のタイプを選ぶのであろうか。

これに対する一つの答えを与えているものに、R. V. Christie⁹⁾らの報告がある。

すなわち、R. V. Christie らは、健康者の呼吸仕事量に関する研究において、運動時および安静時ともに、一定の肺胞換気を維持する上に最小の仕事量を示すような、いはば「至適換気数」が存在することを指摘した。つまり、個人は呼吸仕事量の観点から最も経済的な呼吸深度および換気数をもって呼吸するものであることを実証している。

著者らは、まずこのように保たれた呼吸のタイプが、粘性抵抗負荷によってどのように変化するかについて検討した。

我々が用いた粘性抵抗は、いうまでもなく気道に出現する種々の粘性抵抗とは異質のものであるが、気流速度に影響を与え、同一被検者において一定の気流速度を保つためには、より大なる胸腔内圧を要するという点で、気道内に現われる粘性抵抗と同じ効果をもたらすものである。

さて、このような粘性抵抗を負荷した場合に、負荷していない場合にくらべて、1回換気量、同時に分時換気量が小となったことは、粘性抵抗負荷により、呼吸が浅くなり同時に低換気となることを示すものである。また、この時の1回換気粘性仕事量および分時換気粘性仕事量が大であったことは、粘性仕事量の観点から換気のために大なるエネルギーが必要となることを示すものである。

換気 1L 当り 粘性仕事量 というのは、1L の

空気を出し入れするのに要するエネルギーであり、粘性抵抗負荷時にこの値が高値をとったことは、抵抗がある場合は効率の低い呼吸をするようになることを示すものである。さらに、深くゆっくりした呼吸から浅く早い呼吸に進むにつれて、分時換気量および分時換気粘性仕事量が増大することは、このような時には過換気となるとともに、換気に要するエネルギーが増大することを示している。

また、換気数が10から20に増えた時は、粘性仕事量効率が低くなるが、換気数20, 30および40の間では、換気数と仕事量効率とは相関性を示さず、効率の高い換気数は各個人によって異なる。

つぎに、換気数に大きな変化をおよぼさぬ程度の運動負荷が加っても、分時換気量、分時換気粘性仕事量および換気 1L 当り粘性仕事量の著明な上昇をきたすということは、このような時でも、過換気状態をきたすとともに換気に要するエネルギーが増大し、かつ粘性仕事量効率の低い呼吸に移行することを示すものである。

V 結 語

我々は、粘性抵抗負荷により呼吸のタイプに如何なる変化が起るか、その時、粘性仕事量および粘性仕事量効率がどのような値をとるかについて検討するとともに、呼吸のタイプを変えた場合に、事実上、粘性仕事量および粘性仕事量効率がどのように変化するかについて観察した。

そして、呼吸のタイプにわずかな変化をきたすのみでも、実際には粘性仕事量が増大し、かつ効率の低い呼吸をする場合があることを知った。

一般に、肺の弾性仕事は容積の函数、粘性仕事は気流速度の函数であるとされているが^{7,9)}、我々が測定した粘性仕事量が、肺の容積の函数と考えられるところの1回換気量ないし分時換気量に左右されているという事実は如何に解すべきであろうか。

因に、粘性仕事量の算定に用いる圧量図とは、レオロジーでいう粘弾性体の荷重——伸展

曲線が描くヒステレシスループ(履歴の輪)にはかならない。¹⁰⁾なお、最後に今日、高分子物質について詳細に分析されたヒステレシスループの成因にまでさかのぼって、換気力学における圧量図の意義を再検討することが残された課題のひとつであることをつけくわえたい。

(稿を終るに臨み、御校閲を賜った長石忠三教授に深謝の意を表します。)

文 献

- 1) 井本立也：概説レオロジー(上)(下)，現代化学シリーズ16.1963
- 2) 中村隆：肺機能とその臨床。Rheology の立場から，日内会誌，47：1095，1958
- 3) Attinger E.O. Atmung und Atmungsarbeit, Dtsch. med. Ulschr. Nr. 3, 20. 112, 1961
- 4) Campbell E.J.M., et al : The ability of men to detect added elastic loads to breathing, Clin. Sci. 20, 223, 1961
- 5) Fry D. L., et al : The measurement of intraesophageal pressure and its relationship to thorathic pressure, J. Lab. Clin. Med., 40 : 664 1952
- 6) Cherniack, R. M. et al : A comparison of esophageal and intrapleural pressure in man, J. Appl. Physiol. 8 : 203, 1955
- 7) Du Bois, A.B. et al : Oscillation mechanics of lung and chest in man, J, Appl. Physiol., 8 : 587, 1956
- 8) Christie, R.V., et al : The work of breathing in normal subjects, J. Appl. Physiol. 127, 1953
- 9) Fenn, W.O. : mechanics of respiration, Am J. med., 10 : 77, 1951
- 10) Mead, J. et al : Surface tension as a factor in pulmonary hysteresis, J. Appl. Physiol. 10 : 191, 1957