

困難である。

呼吸困難の調査は通常聴取によって調査を行う。呼吸困難の分類にはいくつかの方法があるがよく用いられるのは Hugh-Jones の分類である。この分類を基礎として次のように区分する。

- 第Ⅰ度： 同年齢の健康者と同様に仕事ができ、歩行、登山あるいは階段の昇降も健康者と同様に可能である。
- 第Ⅱ度： 同年齢の健康者と同様に歩くことに支障ないが、坂や階段は同様に昇れない者
- 第Ⅲ度： 平地でも健康者なみに歩くことができないが、自己のペースでなら 1 Km 以上歩ける者
- 第Ⅳ度： 50 m 以上歩くのに一休みしなければ歩けない者
- 第Ⅴ度： 話したり、着物を脱ぐのにも息切れがして、そのため屋外にでられない者

呼吸困難は、じん肺の肺機能障害を判断するうえで重要であり、被検者から正確に聴き取る必要がある。聴取に当たっては、問診票を用いると比較的的確な判断が可能である。問診票は、検査の場面で問診票に記載された方法により直接被検者から聴き取ってもよいし、あらかじめ被検者に記入させて、検査の場面で再確認を行ってもよい。

判定は問診票の記載に基づいて次のように行う。

- 第Ⅰ度——“息切れを感じない”，又は、①に“できる”
- 第Ⅱ度——①に“できない”，②に“歩ける”
- 第Ⅲ度——②に“歩けない”，③に“歩ける”，又は、③に“歩けない”，④に“歩ける”
- 第Ⅳ度——④に“歩けない”，⑤に“できる”
- 第Ⅴ度——⑤に“できない”

ロ. せきとたん

気道の慢性炎症性変化に伴う症状を把握するためには、せきとたんの症状についての的確に調査する必要がある。慢性的なせき、たんの症状を把握するための調査方法として現在最もよく用いられている方法は、BMRC (British Medical Research Council) の呼吸器症状についての問診票を用いた方法である。この方法では、せき又はたんの有症者を「1年のうち3か月以上毎日のようにせき又はたんがあり、2冬以上にわたるもの」としている。じん肺における気道の慢性炎症性変化のは握のためには、上記の定義を勘案して「1年のうち3か月以上毎日のようにせきとたんがある」ことを最低限は握する必要がある。

症状のは握に当たっては、呼吸器症状の調査の際に通常用いられているような問診票をもとに行う必要がある。問診票への記載は、原則として検査の場面で被検者に質問をしてその結果

を記入する。あらかじめ被検者に問診票を渡して記入させた場合でも、検査の場面では必ずチェックする必要がある。

このような方法でせき及びたんの症状があつて、かつ、たんの量が多く膿性である場合には「続発性気管支炎」のり患を疑う必要がある。

ハ. 心悸亢進

肺機能の低下に伴って特に体動時に心悸亢進を訴えることがあるが、心悸亢進をしばしば呼吸困難と誤って表現することがあるため、両者を区別して聴取する必要がある。

ニ. その他の症状

その他の心呼吸器系の自覚症状についても、検査の場面で聴取を行う。胸痛、熱感、脱力感、盗汗等の訴えがある場合には合併症のり患を疑う必要がある。

ホ. 喫煙歴の調査

喫煙は特に呼吸器症状との関連が注目されているが、その影響の的確な評価については必ずしも明確にされていない。しかし、じん肺有所見者の健康保持のために行う保健指導等の場面では、喫煙歴の情報は重要であり、問診票を用いて調査を行う。

(4) 他覚所見の検査

主に、視診と聴診により他覚所見の検査を行う。

イ. 視 診

じん肺の進展に伴って動脈血中の酸素分圧が低下してくる。毛細血管の還元ヘモグロビン量が増加すると口唇等にチアノーゼが出現するほか、ばち状指が出現することもある。

ロ. 聴 診

じん肺の進展に伴って呼吸音の減弱等の呼吸音の異常、水泡音や捻髪音等の副雑音が聴取されることがある。

石綿肺では、その早期から両肺底部に捻髪音が聴取されることが特徴であり、石綿ばく露労働者については特に注意を払う必要がある。

【付】 問 診 票

氏名	(男・女)	生年月日	記入 昭和 年 月 日 明治 年 月 日()才 大正 昭和
1. 次の病氣にかかったり、かかっているといわれたことがありますか？ (はい、いいえのいずれかの□にVの印をつけて下さい。)			
		はい	いいえ

- | | | |
|--------------|--------------------------|--------------------------|
| ① 肺結核 | ☐ | ☐ |
| ② 胸膜炎 (ろく膜炎) | ☐ | ☐ |
| ③ 慢性的気管支炎 | ☐ | ☐ |
| ④ 気管支拡張症 | ☐ | ☐ |
| ⑤ 気管支喘息 | ☐ | ☐ |
| ⑥ 肺気腫 | ☐ | ☐ |
| ⑦ 心臓の病氣 | ☐ | ☐ |
| ⑧ その他の胸部の病氣 | ☐ | ☐ |

2. 「呼吸困難 (息切れ)」について次の質問の「感じる」、「感じない」のいずれかの□にV印をつけて、「感じる」と答えた人は次の質問に移って下さい。

階段をのぼったり、ゆるやかな坂をのぼる時に息切れを感じますか？

感じる ☐ 感じない ☐

→ その程度はどの程度ですか？ 矢印に従って答えて下さい。
(「ここで終り」になる人は次の質問に進まなくて結構です。)

① 息切れを感じないで同年齢の健康な人と同じように仕事をしたり、坂や階段をのぼれますか？

できる ☐ できない ☐

(ここで終り)

② 同年齢の健康な人と同じように息切れを感じないで平らなところを歩くことができますか？

歩ける ☐ 歩けない ☐

(ここで終り)

③ 平らなところを自分のペースでなら1キロメートル以上休まずに続けて歩くことができますか？

歩ける ☐ 歩けない ☐

(ここで終り)

④ 息切れのために途中で休まないで平らなところを50m以上歩けますか？

歩ける ☐ 歩けない ☐

(ここで終り)

⑤ 話をしたり、着物を脱ぐのにも息切れがし、息切れのために外出することができませんか？

できる ☐ できない ☐

3. 「せき」についての次の質問のはい、いいえのいずれかの□にV印をつけて下さい。(「はい」の場合には矢印に従って次の質問に移って下さい。)

① 冬に、朝起きると、いつも、すぐせきがでますか？

はい ☐ いいえ ☐

② そのようなせきは週5日以上でますか？

☐ ☐

③ 冬に昼間や夜、よくせきがでますか？

☐ ☐

④ そのようなせきは1日7回以上、週5日以上でますか？

☐ ☐

⑤ このようなせきは、年に3か月以上続けて毎日のようにでますか？

☐ ☐

4. 「たん」についての次の質問のはい、いいえのいずれかの□にV印をつけて下さい。(「はい」の場合には矢印に従って次の質問に移って下さい。)

	はい	いいえ
① 冬に、朝起きると、いつも、すぐたんがでますか？	☐	☐
② そのようなたんは週5日以上でますか？	☐	☐
③ 冬に昼間や夜、よくたんがでますか？	☐	☐
④ そのようなたんは1日2回以上、週5日以上でますか？	☐	☐
⑤ このようなたんは、年に3か月以上続けて、毎日のようにでますか？	☐	☐
5. どうきについての次の質問のはい、いいえのいずれかの□にV印をつけて下さい。	はい	いいえ
最近歩いたりするとどうきがしますか？	☐	☐
6. 喫煙についての次の質問の①と③についてははい、いいえのいずれかの□に印Vをつけて下さい。(「はい」の場合には矢印に従って次の質問に移って下さい。)	はい	いいえ
① 今までにたばこを吸ったことがありますか？	☐	☐
② 現在たばこを吸っていますか？	☐	☐
③ 何才の頃から吸いはじめましたか？	() 才頃から	
④ 1日何本くらい吸いますか？		
10本未満	☐	
10本～19本	☐	
20本以上	☐	

5. 肺機能検査

(1) 肺機能検査の体系

じん肺の所見があると認められた者 (エックス線写真像で一側肺野の1/3を超える大陰影があると認められた者を除く。)のじん肺管理区分の決定に当たっては、じん肺による肺機能障害が著しいか否かを判断する必要がある。そのため、じん肺法においては、じん肺にかかっているか又はその疑いのある者で胸部エックス線撮影検査と胸部臨床検査により合併症に罹患している疑いのない者及び合併症に関する検査で療養を要する合併症に罹患していないと診断された者を対象に肺機能検査を行うこととされている。

肺機能検査は、1次検査と2次検査に分けて行う。

1次検査では、スパイロメトリーによる検査とフロー・ボリューム曲線の検査を行い、スパイロメトリーによる検査よりパーセント肺活量 (%VC) 及び1秒率 (FEV_{1.0}%) を求め、フロー・ボリューム曲線の検査より最大呼出位から努力肺活量の25%の肺気量における最大呼出速度 (V₂₅) を求める。

2次検査では、動脈血ガスを測定する検査を行い、動脈血酸素分圧 (PaO₂) 及び動脈血炭酸ガス分圧 (PaCO₂) を測定し、これらの結果から肺胞気・動脈血酸素分圧較差 (AaDO₂) を求める。

は、絆創膏で唇とマウスピースを固定するとよい。

- ② 被検者の呼吸の状態が平静にもどったら、活栓をまわしてスパイロメーターの回路に連結し、ベルの中のガスを呼吸させる。同時にスイッチを低速度目盛 1 (32mm/分) に入れて、記録紙を回転させる。
- ③ 数回の安静換気を行わせて、基準位が安定したことを確かめる。
- ④ 安静換気について、特に深い吸気を行うことなく安静吸気の終りに続いて、ゆっくり最大呼出を行わせる。呼出が終了したら安静呼吸に戻らせる。この場合の最大呼出は急激に行うことなく、ゆっくり行わせる。
- ⑤ スパイログラム上で、呼気位がもとの基準位に戻ったのを確認したら、ゆっくりと吸気を行わせる。最大吸気位に達したと思われたら、再びゆっくりとできるだけ頑張って呼出させる。十分に呼出したら、再び安静呼吸に戻し基準位を記録した後、被検者からマウスピースをははずす。

最大呼気位及び最大吸気位に達すると、スパイログラムはほぼ水平にギザギザを描き、横ばいの状態となる。これは被検者が適切に行ったか否かの目安になる。なお、測定開始時と終了時の基準位とはほぼ一致する。大きな差、ずれがあるときは空気もれがあると考えられる。マウスピースのくわえ方に注意するとともに、スパイロメーターの回路の点検を行う必要がある。

- ⑥ 次に回路内の空気を入れかえた後、再び被検者にマウスピースをくわえさせ、努力呼出曲線の検査を行う。すなわち、数回安静呼吸をした後、できるだけ頑張って最大吸気位に達したら、カイモグラフの回転を高速 (速度目盛 60, 32mm/秒) に切り替えるときもにできるだけ速く、かつ、できるだけ一気に呼出を行わせる。呼出が完全に終わったことを確認してスイッチを切り、ノズクリップをとり、マウスピースから口をははずす。この最大努力下に呼出させたガス量が、努力肺活量 (FVC) で、呼出開始からの 1 秒間の呼出ガス量が 1 秒量 (FEV_{1.0}) である。(図 9 参照)

スパイログラムによって得られる肺気量諸値は、図

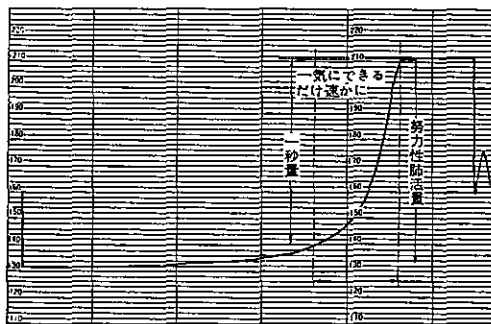


図 9 努力肺活量と1秒量

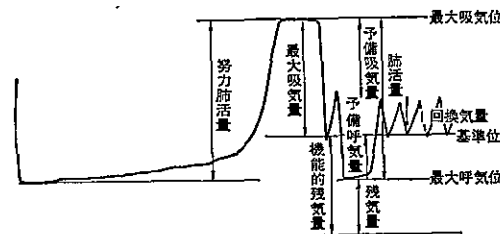


図 10 肺気量分画

10 の残気量、機能的残気量を除いた値である。

スパイログラムから得られた実測値 (高さ: mm) にベルファクターを乗じて得られたガス量は大気圧、室温、水蒸気飽和状態 (ATPS: ambient temperature and pressure, saturated with water vapor) であ

り、これを 37°C、大気圧、水蒸気飽和状態 (BTPS: body temperature and ambient pressure, saturated with water vapor) に換算する。換算に当たっては表 1 の係数を用いれば便利である。

表 1 ATPS から BTPS への換算のための表

A	B	C	A	B	C
°C	P _{H₂O}	BTPS Factor	°C	P _{H₂O}	BTPS Factor
6	7.0	1.174	22	19.8	1.091
7	7.5	1.168	23	21.1	1.085
8	8.0	1.164	24	22.4	1.080
9	8.6	1.159	25	23.8	1.075
10	9.2	1.153	26	25.2	1.068
11	9.8	1.146	27	26.7	1.063
12	10.5	1.143	28	28.3	1.057
13	11.2	1.138	29	30.0	1.051
14	12.0	1.133	30	31.8	1.045
15	12.8	1.128	31	33.7	1.039
16	13.6	1.123	32	35.7	1.032
17	14.5	1.118	33	37.7	1.026
18	15.5	1.113	34	39.9	1.020
19	16.5	1.107	35	42.2	1.014
20	17.5	1.102	36	44.6	1.007
21	18.7	1.096	37	47.0	1.000

b. 電子式スパイロメーターを用いたスパイロメトリー

電子式スパイロメーターには、フライシェ型のもので熱線型のものがある。検査法は次のとおりである。

- ① 電子式スパイロメーターを電源につなぎ、スイッチを ON にして検出部である気速計が温まるのを待つ。気速計が温まらないうちに呼気を気速計に吹き込むと、水滴が付着して正しい測定ができなくなる。

- ② 気速計の校正を行う。
- ③ 被検者に、検査の目的、要領を十分に説明して理解させる。
- ④ スパイロメーターに性別、年齢、身長、室温等の情報を入力する。
- ⑤ 被検者を立位又は坐位とし、正しい、安定した姿勢をとらせる。
- ⑥ 検出部を被検者に正しく保持させ、マウスピースを口にくわえさせる。これとともに、ノーズクリップで鼻からの呼吸をとめる。
- ⑦ この時、一時呼吸をとめさせる。
- ⑧ 手早く準備をすませたら、被検者に深吸気させる。最大吸気位でスパイロメーターのトリガーが働いたことを確認する。
- ⑨ できるだけ速かに、かつ、できるだけ大量の呼出を一気に行わせる（努力呼出）。
- ⑩ 最大呼気位まで呼出を終了したことが確かめられたら、被検者に軽く吸気を行わせる。この吸気でスパイロメーターのトリガーが作動する。
- ⑪ ブラウン管又は X-Y レコーダーの表示を見て、正しい努力呼出が行われたか否かをチェックする。
- ⑫ 必要な指標の値を読み取る。
- ⑬ 少なくとも2回この操作を行う。もし、この2回の検査成績が異なるときには、更に1回検査を追加する。
- ⑭ 電子式スパイロメーターでは、準備が整ってから呼出に入るまでに時間がかかると誤差が大きくなる。この場合には、リセット・スイッチを押すか、又は操作をはじめからやり直す。
- ⑮ 電子式スパイロメーターの表示した数値は BTPS に換算されているので、特に換算を行う必要はない。

(ロ) パーセント肺活量及び1秒率の算出

a. パーセント肺活量 (%VC) の算出

このようにして得られた肺活量と身長及び年齢から算出された肺活量基準値との比をとり、パーセント肺活量を算出する。肺活量基準値の算出に当たっては Baldwin らによる式を用いる。なお、Baldwin らの式では肺活量は ml の単位で得られる。しかし、肺活量は l の単位で表すことが便利なので計算式は次のように表現できる。この場合の身長は m の単位で表す。

$$\text{男性: } (2.763 - 0.0112 \times \text{年齢}) \times \text{身長 (m)}$$

$$\text{女性: } (2.178 - 0.0101 \times \text{年齢}) \times \text{身長 (m)}$$

Baldwin らの式は、背臥位の健康者について求められたものである。健康診断における

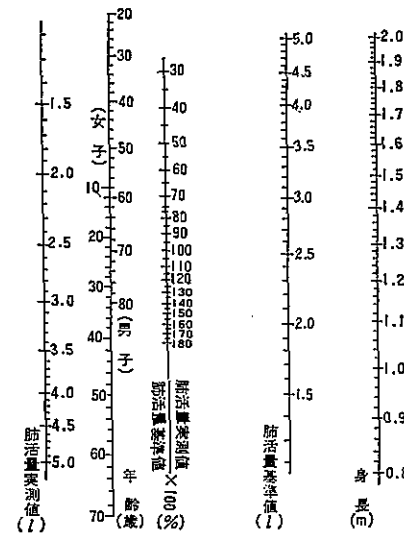


図 11 肺活量基準値とパーセント肺活量を求めるノモグラム

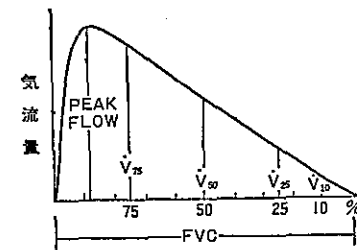


図 12 フロー・ボリューム曲線

端で最大吸気位に、右端は努力呼出終了時の呼気位に相当する。この2点間の距離は努力肺活量である。この図形から最大吸気位から呼出を行う際の任意の肺活量における呼気流速を求めることができる。(図 12 参照)

フロー・ボリューム曲線の高さは、呼出の際にみられる最大の気流速、すなわち Peak flow を表し、図形からその Peak flow に到達したときの肺気量も知ることができる。フロー・ボリューム曲線のはじめの部分は、被検者の肺・胸郭系の換気力学的特性に加えて、被検者の呼出努力の程度によってきまる (Effort dependent) が、曲線の終りに近い部分の形状は、被検者の努力

肺活量の測定は、通常、立位で行われるため、Baldwin らの式で計算して得られる値は、健康予測値として用いるのではなく、1つの尺度として利用するにすぎないので、被検者の検査時の体位が異なるが便宜的にこれを利用する。

$$\text{パーセント肺活量} = \frac{\text{肺活量}}{\text{肺活量基準値}} \times 100(\%)$$

なお、算出に当たっては、図 11 に示すノモグラムを用いるとよい。

b. 1秒率 (FEV_{1.0}%) の算出

通常、1秒率は Gaensler によるものを用いる。1秒率を算出するためには、スパイログラムより努力肺活量と1秒率を求め、これより算出する。

$$1 \text{ 秒率} = \frac{1 \text{ 秒量}}{\text{努力肺活量}} \times 100(\%)$$

ロ. フロー・ボリューム曲線の検査

スパイログラムは、縦軸に肺気量を、横軸に時間をとって表現されるものであるが、フロー・ボリューム (Flow-volume) 曲線は縦軸に気流速を、横軸に呼出気量をとって表現された図形である。普通フロー・ボリューム曲線というときは、呼気時のものであり、吸気時のものは、吸気フロー・ボリューム (Inspiratory flow-volume) 曲線と呼ぶ。横軸上の原点は曲線の左

の程度に影響されことなく (Effort independent), 肺・胸郭系の換気力学的特性によって決定される。

フロー・ボリューム曲線を求めるには最大吸気位から努力呼出を行う間の時々刻々の肺気量とそれに対応する呼気 (又は吸気) 気流速度とを同時に測定する。この曲線の横軸上に表示される“気量 Volume”は本来“肺内気量”であるべきであるが、曲線の起点と終点は最大吸気位と努力呼出の終り (吸気フロー・ボリューム曲線の場合は最大呼気位と努力吸入の終り) であるから、それは必ずしも残気量を含めた肺内気量の絶対値でなくともよい。日常の検査では、呼出 (又は吸入) された気量をこれにあてて。しかし、努力呼出の際には胸腔内圧が上昇し、肺内ガスが圧縮されるので呼気量と肺内気量の変化とは必ずしも一致しない。気道閉塞が強いほど肺内ガス圧縮は著明となる。フロー・ボリューム曲線を求めるには、体プレチスモグラフを用いて肺内気量を測定する方法もあるが、臨床検査では気速計で呼気 (又は吸気) 気流速度を求めて、それを積分するか、スパイロメーター (ふいご型, WEDGE 型, box 型) を用いて求めた気量を採用することが普通に行われている。この場合の呼気量 (又は吸気量) は肺気量の変化分とは正確に等しくはなく、実用的に両者の差は無視できるとの立場にたっている。スパイロメーターを用いてフロー・ボリューム曲線を求めるため努力呼出を行うには、スパイロメーターの機械的インピーダンスが曲線の形状に影響を及ぼすので、あらかじめその性能を吟味する必要がある。気速計を用いて測定をする場合には気速計の周波数特性に注意しなければならない。20 Hz 位までの変化に忠実に反応する Fleisch 型気速計、あるいはこの目的のために作製された熱線流量計は十分利用できる。曲線をオシロスコープ、特にストレージ型オシロスコープに表示し、これを写真撮影する方法が望ましい。気流速度を A-D 変換して記憶素子に記憶させ、それを加算して呼出気量を求め、ブラウン管にフロー・ボリューム曲線を表示し、また評価のためのパラメーターを算出する方法もとられるようになった。曲線を X-Y レコーダーで描記する方法は便利ではあるが、X-Y レコーダーの周波数特性の制約をうけて曲線に変形をきたすことがある。この変形は呼出初期の立上り部分に著しいが、曲線の評価を呼出の終りの部分に限定して行うのであれば、検出部と表示部の周波数特性にさほど神経質にならずとも実用上大きな支障はない。

[フロー・ボリューム・メーターの校正]

フロー・ボリューム曲線を調べるためのフロー・ボリューム・メーターのほとんどは電子式のスパイロメーターそのもの又はその応用型である。気流速度の測定にはいろいろな種類の検出器が用いられているが、いずれのものであっても、検査実施の際に患者の気道内分泌物がとび出して検出器にひっかかってその精度をくわらせることがある。したがって、検出器は使用のたびに清掃にしなければならない。検出器は水洗できるものが望ましいが、なかには構造上の理由で水洗できないものもある。最低 1 日 1 回は水洗を行う必要があるが、可能なら検査のたびに目で見

て検出器に喀痰が付着していないことを確かめる。検出器 (気速計) は予備を少なくとも 1 台用意しておいて必要に応じて取替えることが望ましい。

なお、検出器の校正のためにプラスチック製の容量一定のピストン式の簡単な装置が市販されている。これを検出器に接続して一定量の空気を検出器に送り、メーターの読みを送った空気既知量と比較する。この操作を異なる送気速度で数回試みればフロー・ボリューム・メーターの日常の校正の目的を達することができる。この校正は、頻回に検査を行うときには少なくとも 1 日 1 回、及び、検査中にメーターの読みに不審を生じたときには適宜校正を行う。この簡便な校正では不十分な場合にはメーカーに修理・点検を依頼する。メーターの読みと送気量との相違が僅かである限りは補正係数で読みを補正してもよいが、両者の相違が著しい場合にはメーカーによる修理を行う必要がある。

上述したようなピストン型校正器が手許にない場合には、ベネディクト・ロス型レスピロメーターを代りに用いることができる。

(イ) 検査法

検査は、スパイロメトリーに準じて行う。最大吸気位から、被検者に最大限の速やかな努力性呼出を行わせる。少なくとも適当な間隔において 3 回検査を反復する。

(ロ) $\dot{V}_{25}$ (努力肺活量の 25% における最大呼出速度) の算出

努力肺活量の 25% における呼出速度 (l/秒) を読みとる。

なお、気管や喉頭の狭窄がなく Peak flow がカットされたような型を示す場合は、呼出努力が十分でない場合であり、このような曲線は採用するべきではない。

(3) 2 次検査の内容と方法

2 次検査は、(1) で述べたように、1 次検査で“要 2 次検査”と判断された者等に対して行う。

イ. 肺泡気・動脈血酸素分圧較差 (AaD_{O_2}) 測定の意義

呼吸機能障害の総合的評価の指標として動脈血ガスは重要な意義を有する。ことに末梢気道・肺泡領域を中心とする、いわゆる肺の末梢領域における障害を検知する手段としてその役割は重い。近年、血液ガス分圧測定の技術が進歩したので測定そのものの実用性も十分高まったといえる。しかしながら、動脈血の酸素又は炭酸ガス分圧が肺におけるガス交換障害のみならず、循環障害あるいは組織レベルにおけるガス代謝障害を含めて、生体におけるガス運搬障害を経過的に反映することは当然であり、またその評価に当たって、酸素分圧と炭酸ガス分圧とを別個に評価することは、妥当性を欠くきらいがあり、何らかの検討の必要性が考えられてきた。

動脈血酸素分圧の異常低下は、すなわち、いわゆる低酸素動脈血症であり、それ自体の生理学的意義は大きい。しかしながら、動脈血酸素分圧の異常低下を認めたからといって直ちに肺にお

けるガス交換障害が原因であるとはいえない。また、動脈血酸素分圧が正常範囲内にあっても、肺胞換気の状態によっては肺泡レベルにおける交換障害が存在しないとは断定できない。したがって、肺におけるガス交換障害の評価を肺泡気・動脈血酸素分圧較差 (AaD_{O_2}) について検討することが望ましい。 AaD_{O_2} は肺におけるガス交換障害の総括的評価の指標であって敏感にその異常を反映することが知られている。

ロ. 検査法

肺泡気・動脈血酸素分圧較差を算出するためには、動脈血の酸素及び炭酸ガス分圧を測定する必要がある。酸素分圧及び炭酸ガス分圧の測定は動脈より採血した動脈血を用いて行うが、上腕又は股動脈採血の前段階で耳朶血を採血し、これを用いて酸素分圧を測定し、測定結果が 80 TORR 以上であれば、上腕又は股動脈からの採血を省略して、「著しい肺機能障害がない」と判定してよい。また、2 次検査を 1 次検査との別の日に行う場合には、必要に応じて 2 次検査に先立って 1 次検査もあわせて行う。(なお、TORR はトリチェリ (torricelli) の略である。トリチェリは真空の分野で用いられ、水銀柱 1mm にほぼ等しい。したがって 1 TORR = 1 mmHg と取り扱って差し支えない。)

検査方法の基本は次に述べるとおりである。

(イ) 採血の方法

a. 動脈血採血

(a) 動脈の穿刺部位

普通上腕動脈から採血するが、穿刺困難な場合は大腿動脈を穿刺する。また橈骨動脈から採血してもよい。上腕動脈を穿刺するときは、硬い腱膜のところは避け、正中神経に刺入しないように気を付ける。大腿動脈では内側に太い静脈が走っているから、誤って静脈血を採血しないように注意する。

(b) 必要な器具と薬品

5 ml 又は 10 ml ルアロック注射器 硬めの腕枕 生ゴム片
バイアル入りのヘパリン (1,000 単位/ml) アルコール綿 水銀

(c) 採血の手順

- ① 呼吸の状態によって検査成績が変わるから、常に静かな呼吸をするように指示する。できるだけ採血に先立って 20 分間静臥させる。
- ② ヘパリンを約 0.2 ml 注射器にとる。(なお、使用するヘパリンの量は、注射器の内面をうるおし、かつ、その死腔をうるめる量である。ヘパリンに溶解している O_2 及び CO_2 は、血液に含まれている O_2 及び CO_2 に比べれば著しく少ないため、その絶対量はあまり問題にならない。)

- ③ 注射器内部によくヘパリンをゆきわたらせる。
- ④ 死腔をヘパリンで満たして、注射器内部の気泡を完全に駆除し、更に採血するときに気泡が入らぬようにする。
- ⑤ 腕枕を被検者の肘関節の下に入れ、前腕をやや外転させる。(図 13 参照)

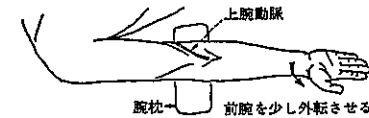


図 13 採血時の腕の位置

- ⑥ 穿刺部位を清潔にする。石鹸水であらかじめ洗っておく方がよい。消毒はアルコール綿により、穿刺する皮膚をよく拭く。
- ⑦ 針の刺入を行う前に、まず指先で肘関節部の上腕動脈の脈拍を触れて、動脈の存在位置とその走行をよく調べる。次に動脈の真上から刺入角度約 30° で皮膚を穿刺し、血管の走行に沿って針先をすすめ、針先が拍動の最もよく触れる点にくるようにする (大腿動脈では垂直に刺入する)。皮膚穿刺の刺激のため被検者の換気量が増加していることが多いから、ここで再び呼吸を静かにさせ、数呼吸待ってさらに針をすすめ動脈を穿刺する。穿刺に成功すれば、血液は拍動性に注射器内に上がってくる。通常の検査のためには 3 ml を採血すればよい。(図 14 参照)

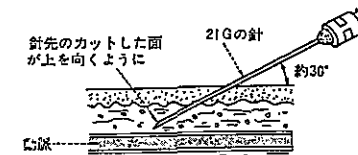


図 14 動脈穿刺

- ⑧ 採血後、針を抜き取ったら皮下出血を防止するため、直ちに動脈穿刺部位より心臓に近い部位を指でしっかりと 5 分間圧迫する。(図 15 参照)

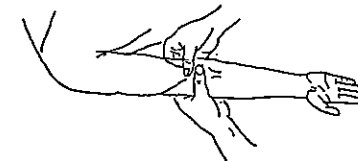


図 15 圧迫

- ⑨ 採血に用いた注射器に時計皿に入れた水銀を1滴吸込み、すぐに針先にゴム片をつけて針孔を塞ぐ。注射筒を両手のひらにはさんで、これをころがすように動かし、ヘパリンを血液全体に行き渡らせる。(図16参照)

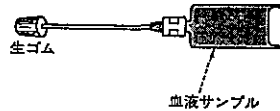


図16 針先をふさぐ

- ⑩ 血液サンプルは、採血後できるだけ速に分析を終了する。採血終了から分析までに時間をおくと、血液サンプルの酸素分圧、炭酸ガス分圧、pHが変化するので補正を行わなければならない。補正を行う場合でも、経過時間が長くなると誤差が大きくなるので、極力、採血後、短時間に分析を終了すべきである。

b. ガラス毛细管採血

採血に当たって被検者に十分に安静を保たせることは動脈血採血の場合と同様である。

耳朶を切開して、内腔をヘパリンに浸したガラス毛细管を用いて耳朶血を採血する(図17参照)

あらかじめ耳朶を加温し、摩擦して十分充血させ、うえて耳朶を十分深く切開して自然に流出してくる血液は、前毛细管血液とみなされるので、動脈血として測定に供しうる。

採血部位を切開したら、最初の血液の1滴は拭き去り、続いて流出する血液をガラス毛细管に採取する。採血後毛细管の一端をパテで塞ぎ、他側から鉄片を挿入しその側もパテで塞ぐ。毛细管の外側に磁石をあてて中の鉄片を動かし、採血直後にヘパリン

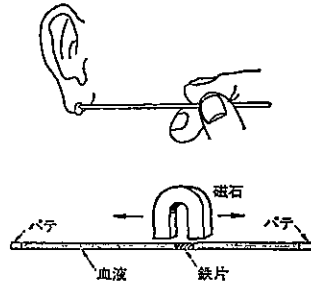


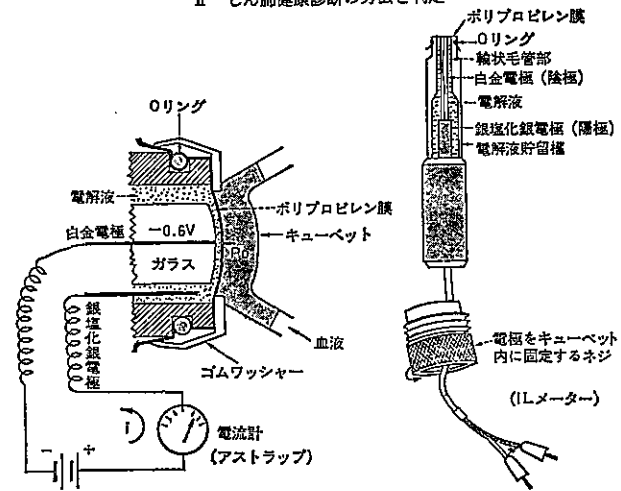
図17 ガラス毛细管への採血

と血液を混和する(図17参照)。測定直前に血漿と血球を混和するのはもちろんである。採取した血液サンプルは、空気と接触すると酸素分圧が突際より高い値に出てくることがあるため、手早く採血を終了しなければならない。

ガラス毛细管による採血法は、採血量が少なくてすむ。

(ロ) 酸素分圧及び炭酸ガス分圧の測定

原則として、血液ガス分析は採血後直ちに実施すべきである。室温の下で血液の O_2 分圧は分単位でも急速に低下することを銘記すべきである。



(a) 先端構造

(b) 電極の全貌

図18 クラーク電極

動脈血の酸素及び炭酸ガス分圧の測定方法には、正確に速く測定でき、検体量が少なくて済む等の理由により電極法が勧められる。ここでは、IL社のILメーターとラジオメーター社のアストラップ装置を例に測定法の実験を示す。

a. 酸素分圧測定の実験

(a) P_{O_2} 電極の整備

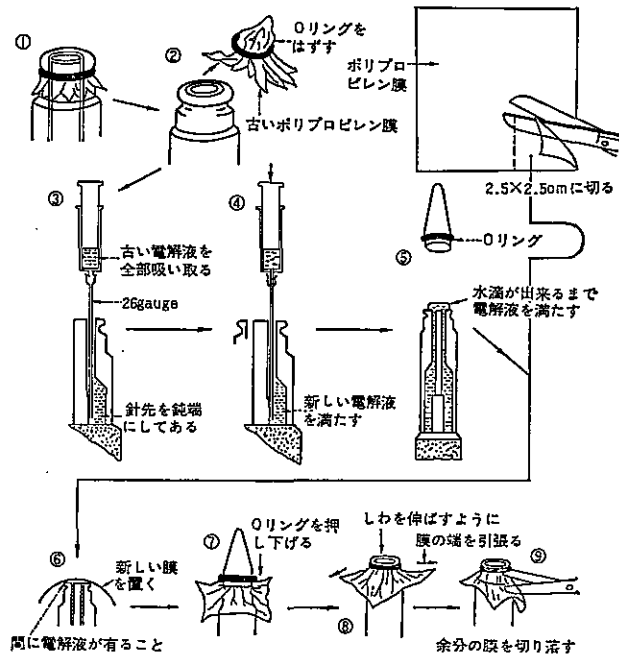
キューベット内に電極を固定しているネジをゆるめて P_{O_2} 電極をとり出し、次のようにして電極の整備をする。(図18参照)

[ILメーターの P_{O_2} 電極の場合]

電解液とポリプロピレン膜の交換は、図に従って行う。(図19参照)

膜の交換がすんだら電極の先端をよく観察する。もし気泡があったら、指で軽く膜面を押えて輪状毛管部の方へこれを追い出す。さらに、電極の先端部を下に向けて振りながら、毛管部の気泡を電解液貯留槽へ移動させる。

電極をキューベット内に挿入する際には、事前に電極の外表面とキューベットの内面をガーゼで拭き、乾いた状態にしておく必要がある。キューベット内の電極は、固定ネジによって締められる。締めすぎると、白金電極先端の電解液と輪状毛管部の電解液との交通が途絶し、逆にゆるすぎると、試料室の気密性が得られず、いずれも、不安定で測定不能の原因となる。適当なネジ締めにするには、ネジを締めながら、急に抵抗を感じ始めたところから約半回転

図 19 P_{O_2} 電極の整備 (IL メーター)

さらに締めればよい。試料排出口又は注入口の一方を塞いでおいて、他方から注射器で空気を軽く押し込み、空気もれをテストしながら、電極固定ネジを締めていき、空気もれがなくなる所まで締めれば、最も確実である。

電極を固定したら試料室に生理食塩水などの伝導性液体を注入する。切換えスイッチを P_{O_2} 測定位置にし、電源スイッチを“MEMB CHK” (メンブランチェック) に切り換える。電極が正常に働いている場合、メーターの針は $P_{O_2} 0$ を指す。針が振り切れるときは、ポリプロピレン膜に穴があいているか、キューベットの内部が濡れている場合である。“MEMB CHK” で異常の時は、試料室の生理食塩水を蒸留水で洗った後に、空気を注入して試料室を空にしてから、電極をキューベットから取り出し、キューベット内面と電極の外表面などをガーゼでよく拭きとる。このような処置によって“MEMB CHK” が正常になることもあるが、なお異常があるときは、再び膜を交換し正常になるようにする。“MEMB CHK” が正常であったら、試料室に蒸留水を満たしておく。膜を交換したばかりの電極は、不安定であるから一晩放置した方がよい。

膜の定期的交換は通常1か月毎に行うが、“MEMB CHK” が不良となれば直ちに行う。

【アストラップの P_{O_2} 電極の場合】

基本的には、IL メーターの P_{O_2} 電極と同じである。内部電極はジャケットからはずせるようになっている。

ポリプロピレン膜の交換は、図 20 に示す順序に従って行い、同時に電解液も交換する。ただし、アストラップでは簡単なメンブランチェックの装置は付属していない。膜が不良のときは、 P_{O_2} ゼロ溶液を注入したときには、指針が目盛の 0 から大きくずれるか、液体サンプルを入れたときに、指針が不安定で左右に振れるか、あるいは、メーターの感度が異常に高くなる。この場合は膜を交換する。

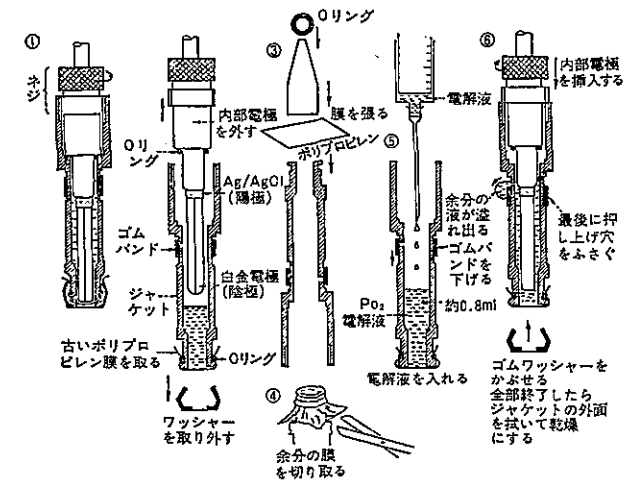
(b) P_{O_2} 電極の校正

P_{O_2} 電極の校正は、被検血液の一部をガス平衡装置トノメーターによって、既知の P_{O_2} の混合ガスで平衡させたものによって行う。これが最も正確な方法である。臨床検査としては、それほどまでの正確さは要求されないの、既知 P_{O_2} の混合ガスか、または既知 P_{O_2} の混合ガスと平衡に達している水溶液で校正する。

IL メーターとアストラップとの校正法を以下に述べる。装置によって校正法が決められているのではなく、いずれの方法を用いてもよい。

【IL メーターの P_{O_2} 電極の校正】

IL メーターでは、 P_{O_2} 電極のゼロ点調整に、 O_2 を含まない約 10% CO_2 混合 N_2 ガス

図 20 P_{O_2} 電極の整備 (アストラップ)

(P_{O_2} , 電極の校正にも用いる)を用いる。もちろん, O_2 を含まない N_2 , He などを用いてもよい。高い方の P_{O_2} 点の校正には, 室内空気 (20.93% O_2) 又は N_2 に 5% CO_2 と 12% O_2 をまぜた混合ガスを用いる。

P_{O_2} 電極校正の手順は, 次のようにして行う。

- ① 切換えスイッチを“160 P_{O_2} ”にセットする。
- ② 校正ガスの流量調節がしやすいように, 試料室を通して出てくるガスをビーカーに入れた少量の水の中に導き, 生ずる気泡を観察する。まず O_2 ゼロのガスを試料室に流入させる。静かに小流量からはじめ, 気泡がポコポコと一つずつ数えられる程度に調節する。この流量で5~10秒間流したら, ガスの注入を一時止める。
- ③ 約20秒の間隔で O_2 ゼロガスの注入を繰り返し, メーターの針が安定して動かなくなるまで続ける。毎回のガス注入は, 温度平衡の点から少量とし, 数回気泡が出る程度にする。
- ④ “ P_{O_2} , ZERO”調節ツマミを回して, メーター指針が P_{O_2} 0mmHg を指すように調節する。
- ⑤ 更に O_2 ゼロガスを少量流し, 指針が0mmHgからずれていないことを確かめたら, “ P_{O_2} , ZERO”ツマミをロックして動かないようにする。
- ⑥ 次いで, 12% O_2 混合ガスあるいは空気を, O_2 ゼロガスの場合と全く同じ流量, 間隔で注入し, メーター指針が安定するまで続ける。
- ⑦ “ P_{O_2} , BALANCE”ツマミを回して, 指針を校正ガスの O_2 分圧に合わせる。

校正ガスの P_{O_2} は,

$$P_{O_2}(\text{mmHg}) = (P_B - 47) \times \frac{\text{ガスの濃度}(\%) }{100}$$

P_B 大気圧
47 37°C のときのガス体中の飽和水蒸気圧

により算出する。

この場合“ P_{O_2} , BALANCE”ツマミをいっぱい回しても, メーターの針が合わせようとしている目盛までこない場合は, メーター裏面の“ P_{O_2} , RANGE”切換えスイッチを操作して, 針が合うようにする。

- ⑧ 校正ガスをもう一度注入して, 校正を再確認する。

〔アストラップの P_{O_2} 電極の校正〕

アストラップでは, 電極の校正に水溶液を用いる。ゼロ点調整には,

$$\begin{aligned} &0.01 \text{ モル 硫酸液} \quad 5\text{ml} \\ &\text{硫酸ソーダ} \quad 100\text{mg (目分量でよい)} \end{aligned}$$

の割合に加えた溶液を用いる。溶液を作るには, 針をつけた注射器の外筒に(内筒を抜き取った)硫酸ソーダを入れ, 硝酸液を注入したら内筒を挿入して注射筒内で溶解して作る。作った溶液は1日は使用し得る。

電極の感度を調整するには, 付属している恒温槽中の循環水を用いる。その P_{O_2} は空気中の P_{O_2} に等しいのであるが, 循環水が空気中の P_{O_2} と平衡に達するためには, 水温が 37°C になってから30分以上経っている必要がある。

実際の手順を簡単に述べる。

- ① 試料室に O_2 ゼロ溶液(室温でよい)を満たし, 針が安定するのを待って, ゼロ点調節ネジを回して目盛の0に合わせる。
- ② 試料室をゆっくりと蒸留水で2~3回よく洗浄する。
- ③ 恒温槽に注射器の針先を入れ, 循環水を注射器内に数回出し入れした後これを採取し, P_{O_2} 電極の試料室に注入する。指針が上がって安定したら, 感度調整ツマミを回して, P_{O_2} 目盛を空気中の P_{O_2} に合わせる。
- ④ 電極が確実に校正されたら, 室内空気を試料室に注入し, その時のメーターの目盛を読み, これを“gas reading”として記録しておく。

血液の P_{O_2} を実測する前には, 毎回室内空気を試料室に注入し, 5mmHg 以内のずれならば, メーターの針を元の“gas reading”にもどしてから実測に移る。測定終了後にも同様のチェックを行う。いずれの場合も5mmHg以上指針がずれているときには, 恒温槽の水で電極を校正し直す必要がある。

このように, P_{O_2} 電極は, 二点校正を行う必要があるが, 0点はほとんどずれることがないので, 毎日1回校正すればよい。しかし, P_{O_2} の感度調節(高 P_{O_2} の校正)は測定毎に頻回に行う必要がある。

(c) 血液 P_{O_2} の実測

ルアロック注射器に採取した血液の P_{O_2} は, 次の手順で測定する。

- ① 試料注入口に付けてあるルアロックアダプターに, 血液の入った注射器をはめ, 血液をゆっくり注入して, 試料室のサンプル出口につないだビニールチューブに血液が見え始めるまで行う。この際, 試料室内に気泡があってはいけない。
- ② メーターの指針は, しだいに上昇し約1分30秒で安定し, 約15秒間持続するから, その間に目盛を読みとる。試料注入から指針が安定する(フラットに達する)までの時間は, 電極の条件, 特に膜の厚さに関係するので一定ではない。

アストラップでは, メーターの読みがそのまま血液の P_{O_2} を表すが, IL メーターでは, 電極の校正をガスで行っているために次式により補正する。

$$(\text{メーターの読み}) \times 1.02 = P_{O_2}$$

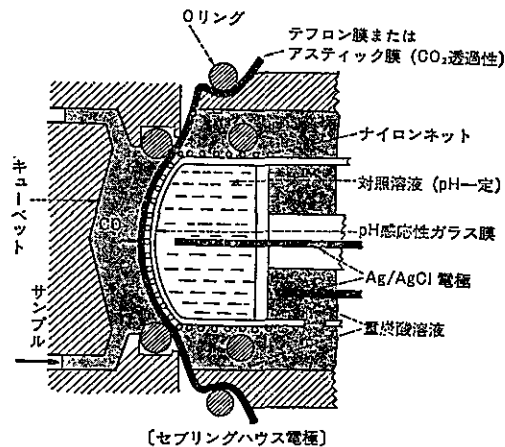
上式の係数 1.02 は経験的に得られた値である。装置や手技の違いによって値が異なる可能性があるため、各検査室において実験的に求める方がよい。そのためには、まず、 O_2 を含むガス（たとえば P_{O_2} が 149 mmHg だったとする）で電極を正確に校正する。次に、同じガスと完全に平衡に達した 37°C の水（例えばアストラップの恒温槽内の循環水）の P_{O_2} を測定する。この水に対するメーターの読みが 146 mmHg だったとすれば、係数は、 $149/146=1.02$ として求められる。

- ③ 測定が終わったら、試料室をまず生理食塩水で十分に洗浄した後に蒸留水で洗浄する。
- ④ 電極校正の項で述べた方法により電極の感度をチェックし、ずれを修正する。蒸留水を注入して試料室を満たし、 P_{O_2} 膜を乾燥させないようにする。

b. 炭酸ガス分圧の測定の実際

[IL メーターの場合]

実際の P_{CO_2} 電極は、図 21 に示すような構造をしている。 CO_2 透過膜としては、テフロン又は IL アスティック膜が用いられている。膜とガラス電極の間には、常に一定量の $NaHCO_3$ 溶液 (10^{-2} モル) が薄い層をなして介在するように、4 重にしたナイロンメッシュを入れてある。この電解液中には、電極の動作が安定するように、 10^{-2} モルの $NaCl$ と少



P_{CO_2} 電極

図 21 P_{CO_2} 電極

量の $AgCl$ が加えてある。ガラス電極の先端内部には、1/10 規定の HCl 水溶液が封入してある。これによって、 H^+ イオン濃度は常に一定に保たれているが、 $NaHCO_3$ 溶液側の H^+ 濃度は、サンプルから膜を通して透過してくる CO_2 によって変動する。この両液の H^+ 濃度差にガラス薄膜は感応して起電力を生じる。この起電力を増幅してメーターの針の振れとしてとり出す。

この P_{CO_2} 電極は、 CO_2 の 1~100% の範囲において直線性が認められている。

(a) P_{CO_2} 電極の整備

P_{CO_2} 電極は、固定しているネジをゆるめてキューベットから取り出す。図 22 に示す手順によって、電極の膜の交換、電解液の交換を行う。終了したら気泡の有無をしらべ、気泡があれば内部のガラス電極を抜いて気泡を除く。最後に、電極の外表面を拭いて乾燥状態にし、更にキューベット内面もよく拭いてから、電極をキューベットに装着する。電極の固定ネジを締める強さは、 P_{O_2} 電極の場合と同じく気密にせねばならないが、決して強すぎないようにする。切換えスイッチを P_{CO_2} 測定位置にし、 P_{O_2} 電極と同じ方法でメンブランチェックを行い、電極の整備を終わる。

(b) P_{CO_2} 電極の校正

P_{CO_2} 電極の校正は、 CO_2 を含む混合ガスを試料室に注入して二点校正を行う。

二点校正には、濃度の異なる 2 種の CO_2 混合ガスを用いる。一般には、5% CO_2 + 12% O_2 + N_2 のものと 10% CO_2 + N_2 の 2 種類の混合ガスが用いられる。これらのガスの CO_2 の混合比率は正確である必要はない。例えば、5% CO_2 の代わりに 4.5% であってもよい。しかし、混合ガス中の CO_2 濃度は、 $\pm 0.03\%$ の精度で、正確な値がわかっているものでなくてはならない。

[メーターの slope 校正]

P_{CO_2} 電極の二点校正は、slope 校正という方法で行う。その利点は、大気圧が変化しても 2 種の混合ガスの P_{CO_2} を求める必要がないことである。

メーターの slope 感度勾配を校正するには、まず CO_2 ratio を次のごとく計算する。

$$CO_2 \text{ ratio} = \frac{\text{高濃度ガスの } CO_2(\%) }{\text{低濃度ガスの } CO_2(\%) } \times 10$$

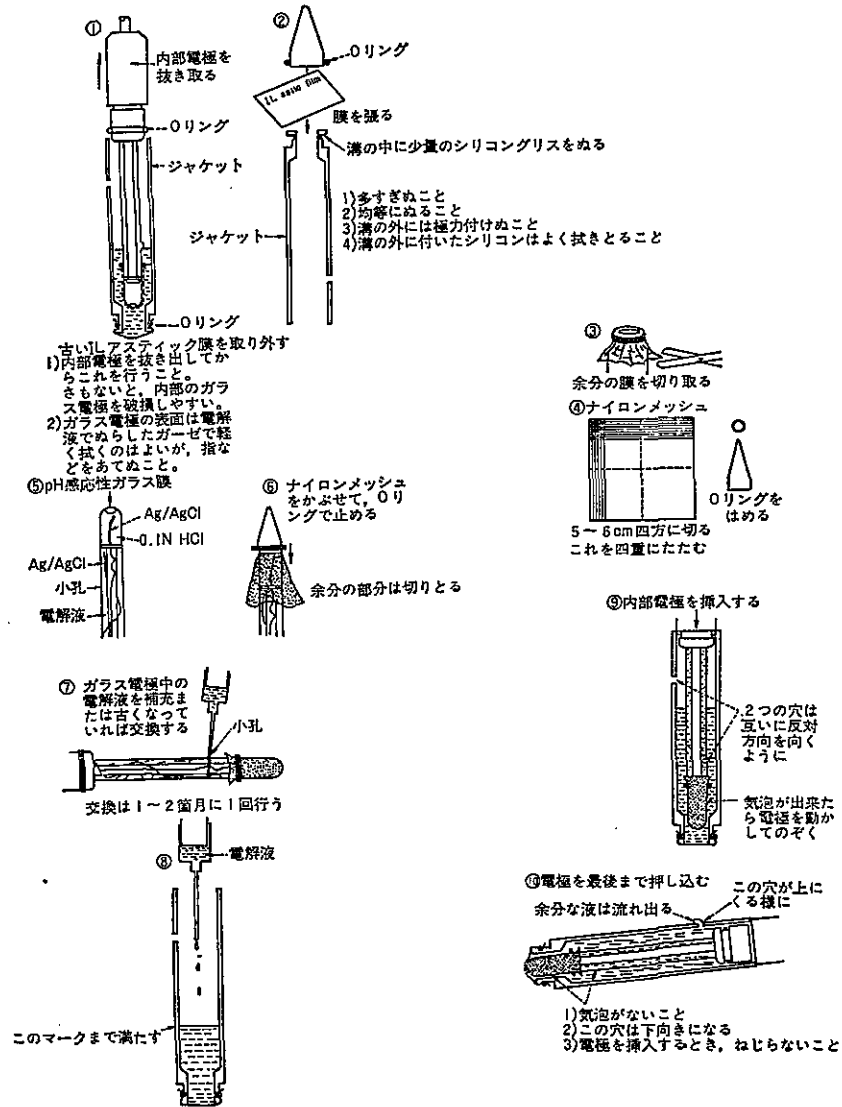
例えば、4.98% CO_2 と 9.96% CO_2 の 2 種類の混合ガスを校正に用いる場合なら、

$$CO_2 \text{ ratio} = \frac{9.96}{4.98} \times 10 = 20.0$$

である。

校正は次の手順で行う。

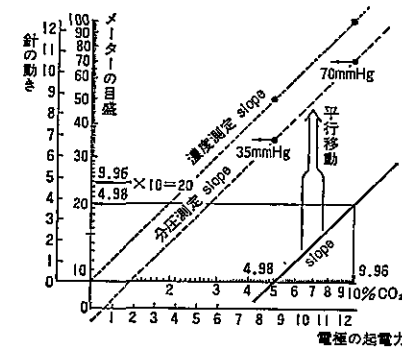
- ① 切換えスイッチを P_{CO_2} に入れる。

図 22 P_{CO_2} 電極の整備

- ② ガス湿潤器を通した低濃度 CO_2 ガスを試料室へ送る。ガスの流量は、1秒間に気泡1個の速さに調節し、これ以上流量を増さないようにしながら送気続ける。
- ③ " P_{CO_2} BALANCE" ツマミを回して、メーターの針を目盛の最低点 10.0 に合わせる。
- ④ 次に高濃度 CO_2 ガスを、湿潤器を通さずに直接試料室に送る。この場合、ガスは乾燥状態にあるから、ガス流量は低濃度 CO_2 を流したときよりさらに少なくなるように調節する。
- ⑤ メーター裏面の " P_{CO_2} SLOPE" ツマミを回して、指針を CO_2 ratio の目盛に合わせる。上述の例ならば、20.0 に合わせる。
- ⑥ 低濃度 CO_2 を再び送り、メーターの針が 10.0 にもどることを確認する。もしこれがずれているならば、slope 校正を繰り返す。

以上で、電極の slope 校正が終わる。

このようにして slope 校正をした電極は、 CO_2 ガスに対して図 23 の太線のごとく感応

図 23 P_{CO_2} 電極の校正

する。横軸は CO_2 ガスの濃度 (対数目盛)、縦軸はメーターの目盛である。

[P_{CO_2} を測定するための校正]

上述の方法で slope 校正をした電極で P_{CO_2} を測定するときには次の方法で一点校正を行う。

まず低濃度 CO_2 の P_{CO_2} を計算する。例えば、大気圧が 750 mmHg で CO_2 が 4.98% ならば、

$$P_{CO_2} = (750 - 47) \times \frac{4.98}{100} = 35.0 \text{ mmHg}$$

となる。

低濃度 CO_2 を試料室に流し、" P_{CO_2} BALANCE" ツマミを回して、指針をそのガスの P_{CO_2} の目盛に合わせる。ここでは 35.0 に合わせればよい。その結果、メーターの CO_2 に対する slope は、平行移動して破線 (図 23) に移るので、未知の P_{CO_2} の試料を注入した時の指針の読みは直接試料の P_{CO_2} となる。

この場合、校正に低濃度 CO_2 を用いる理由は、その値が血液の P_{CO_2} に近く、slope 校正に多少の誤差があっても測定誤差は比較的小さくなるからである。したがって、試料の P_{CO_2} が高い場合には、高濃度 CO_2 で校正の方がよい。

メーターの目盛には、血液の P_{CO_2} 測定に便利のように 10~100 を目盛ってある。もしこ

の目盛で 20~200 mmHg の範囲を測定したいときは、適切な濃度の CO_2 ガスを流し、校正ガスの実際の P_{CO_2} の値の 1/2 に指針を合わせておき、未知 P_{CO_2} の試料に対するメーターの読みを 2 倍すれば求める P_{CO_2} が得られる。

[CO_2 濃度 (%) を測定するための校正]

これはガス中の CO_2 濃度を測定する場合に行われる一点校正である。

方法は P_{CO_2} の校正と全く同様にすればよい。例えば、4.98% CO_2 を校正ガスとして試料室に流し、指針を 49.8 に合わせる。未知の濃度のガスを通したとき、目盛の読みが 56.5 であったとすれば、試料ガスの CO_2 濃度は読みを 1/10 にして 5.65% ということになる (測定精度からすれば 5.7% と読むのが正しい)。

(c) P_{CO_2} の測定

血液サンプルについてその P_{CO_2} を測定する手順は、 P_{O_2} 電極の場合とほとんど同じであるので省略する。 P_{CO_2} 電極の応答時間 (response time) は、 P_{O_2} 電極より長く 2 分 30 秒前後である。

[アストラップの場合]

- ① まず血液の pH を実測する (詳細は [付] 参照)。
- ② アストラップ装置に付属している小型トノメーターに血液を入れ、3~4% $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ と 7~8% $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ の混合ガスで平衡させる。このトノメーターは、2 種のガスによって同時に平衡させるようになっており、それぞれ 2 つずつ試料室があるので、1 回の操作で 2 回チェックすることができる (図 24)。もちろん、ガスの正確な CO_2 濃度がわかっているなければならない。また、試料室に入れる前の血液は、血漿と血球を十分に混和しなくてはならない。血液の混合は、両掌に注射器をはさんで転がすようにすればよい。
- ③ トノメーターを約 5 分間振盪しガス平衡に達したら、pH 電極で血液の pH を測定する。一方、平衡に用いた CO_2 ガスの濃度と大気圧から P_{CO_2} を算出する。

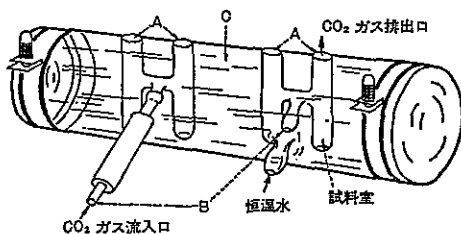


図 24 アストラップのトノメーター

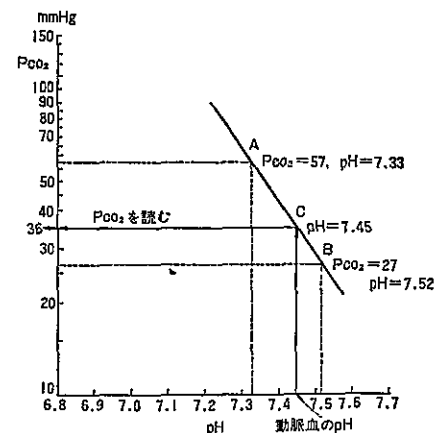


図 25 血液の CO_2 滴定曲線から P_{CO_2} を求める方法 (アストラップ法)

- ④ 得られた 2 組の pH, P_{CO_2} の値を図 25 のごとく座標上にとり (A, B) 両者を直線で結ぶ。
- ⑤ はじめに求めた血液の pH とこの直線との交点 (C) を求め、これと対応する P_{CO_2} の値を読んで血液の P_{CO_2} を求める。

この方法では、血液の S_{O_2} が 90% 以下の場合には、補正が必要であるが詳細は省略する。

[付] pH 測定の実際

④ 電極の校正

(i) 二点校正

2 種類の標準緩衝液 (pH=6.84, pH=7.384) を用いて電極を校正し、電極のスロープをセットする。電極の安定が良ければ、1 週間に 1 回程度行えばよい。実際の校正は次のように行う。

- ① 電極内に生理食塩水と空気を少量ずつ交互に吸引して電極を洗う。あまり長く吸引すると、電極が冷えて誤差を生じる。
- ② 空気を吸引して電極を空にしたら、pH=6.84 の緩衝液を電極内に満たす。毛細管内に気泡があると、誤差の原因になるので注意を要する。
- ③ 電極の先端を KCl 溶液槽に入れ、カメル電極とブリッジする。
- ④ 切換えスイッチを pH に入れる。
- ⑤ メーターの針が振れるから、これを pH 6.84 の目盛にくるように、“pH BALANCE” ツマミで合わせる。
- ⑥ 次に空気と生理食塩水とで洗浄し、pH=7.384 の緩衝液について同様の操作を行う。この場合メーターの針の修正には、“pH SLOPE” ツマミを用いる。

上記の操作を繰り返して、針の振れが正確に合うようにする。

(ii) 一点校正

測定前後には、毎回 pH 7.384 の緩衝液を用いて電極を校正する必要がある。実施法は二点校正と同様であるが、指針のズレを修正するには、“pH SLOPE” ツマミではなく、“pH BALANCE” ツマミによって行う。

㊦ pH の実測

一点校正に続いて、空気と生理食塩水とで電極を手早く洗った後、次の手順で血液 pH を測定する。

- ① 試料導入前に電極内に空気を通して空にする。
- ② 電極内に検体を満たす。
- ③ KCl 溶液槽に電極の先端をつけると、針の振れはきわめて早く安定するので、その pH 値を読みとる。pH 電極の応答時間 (response time) は 1~5 秒である。
- ④ 終了したら、まず生理食塩水を流して電極を洗い、ついで空気と生理食塩水で繰り返し洗浄する。
- ⑤ 最後に生理食塩水 (又は蒸留水) を電極に満たしておき、次の測定まで電極が乾燥しないように注意する必要がある。

㊧ 測定に当たっての注意

ガラス電極により正確に pH を測定するためには、次のような点に注意する。

- ① ガラス電極が温度平衡に達していること。すなわち、冷たい試料を吸引した場合、電極の洗浄が長すぎる場合の影響に留意しておく必要がある。
- ② 結合溶液に用いる飽和 KCl 溶液及びカロメル電極内の飽和 KCl 溶液の底部には、常に KCl の結晶が認められるようにしておくこと。
- ③ 校正用の標準緩衝液の pH が正確であること。びん入りの緩衝液は、新しいものでも pH が変化しているものがある。ラジオメーター社のアンプル入り緩衝液は、その点ほとんど不安がない。びん入りのものは常に冷蔵し、また液を透かして見て浮遊物が認められるものは不良である。

(ハ) 測定値の補正

採血終了から各々の値を読み取るまでの経過時間に基づいて測定値の補正を行う。このためには補正用ノモグラムが利用できるが、各自の施設でそれぞれの実情に応じて作成した計算式又はノモグラムを用いる方がよい。補正をするにしても試料の保存時間は極力短時間にとどめる努力をすべきである。やむを得ず未補正の成績を記載するときは、必ず《未補正》と明記し、併せて採血終了から分析終了までの経過時間を記載するものとする。

補正のための Kelman と Nunn によるノモグラムは図 26 及び図 27 に示しており、図 26 は 37°C に保温した場合であり、図 27 は室温に放置した場合である。

このノモグラムの使用法は次のとおりである。

a. P_{CO_2} の補正

A の経過時間 (分) に対応する B の P_{CO_2} の数値を読み取り、実測値からその数値を減ずる。

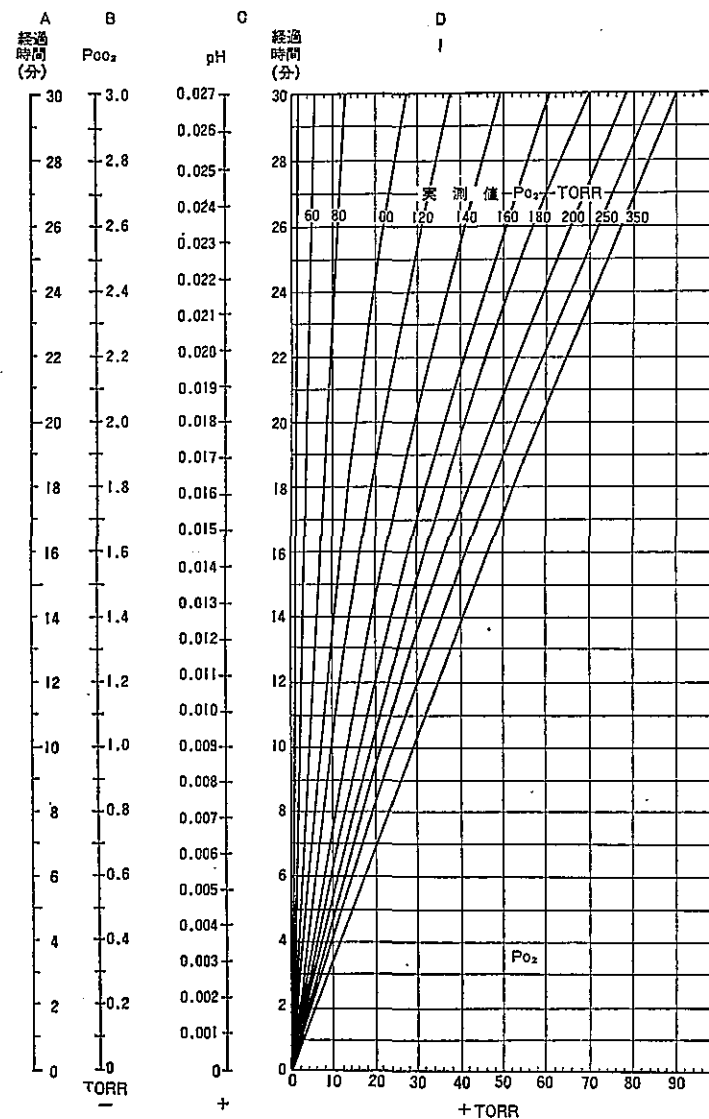


図 26 37°C に保温した場合の P_{O_2} , P_{CO_2} , pH の補正のためのノモグラム

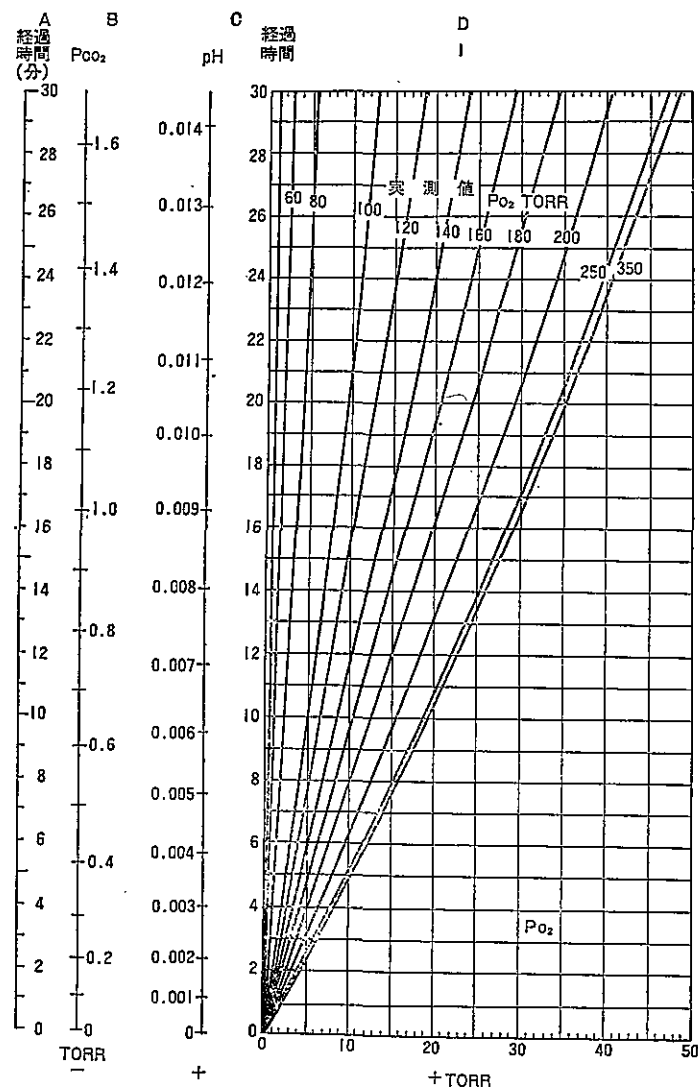


図 27 室温に放置した場合の P_{O_2} , P_{CO_2} , pH の補正のためのノモグラム

b. pH の補正

A の経過時間 (分) に対応する C の pH の数値を読み取り、実測値にその数値を加える。

c. P_{O_2} の補正

D のノモグラムの左の経過時間と P_{O_2} 実測値から下段の数値を読み取り、実測値にその数値を加える。

(二) 肺泡気・動脈血酸素分圧較差の算出

肺泡気・動脈血酸素分圧較差 (AaD_{O_2}) を求めるためには、まず、肺泡気酸素分圧 (PA_{O_2}) を肺泡式を用いて算出する。このためには、動脈血炭酸ガス分圧 (Pa_{CO_2})、吸入気酸素分圧 (PI_{O_2})、吸入気酸素濃度 (FI_{O_2})、ガス交換率 (R) を知らなければならない。これらの値を用いれば、次式により PA_{O_2} が算出できる。

$$PA_{O_2} = PI_{O_2} - \frac{Pa_{CO_2}}{R} + \frac{1-R}{R} Pa_{CO_2} \cdot FI_{O_2}$$

これらの値を知るためには、恒常状態において被検者の呼気と動脈血とを同時に採取して分析する。しかし、ガス交換率を 0.83 と仮定することにより、近似的には呼気分析を省略し計算をすることができる。空気呼吸時には $PI_{O_2} \approx 150$ TORR, $\frac{1-R}{R} Pa_{CO_2} \cdot FI_{O_2}$ の項はほぼ 1~2 TORR である。そこで、 PA_{O_2} は次式を用いて計算することができ、これには Pa_{CO_2} の値がわかればよい。

$$PA_{O_2} = 150 - \frac{Pa_{CO_2}}{0.83}$$

従って、次式によって AaD_{O_2} を求めることができる。

$$AaD_{O_2} = PA_{O_2} - Pa_{O_2} = 150 - \frac{Pa_{CO_2}}{0.83} - Pa_{O_2}$$

このような方法で得られる AaD_{O_2} は、動脈血ガス分析の成績のみから計算することができる便利さがあるが、動脈血採血は、必ず恒常状態の下で行わなければならない。また、 Pa_{CO_2} 、 Pa_{O_2} は高い精度でなければならない。耳朶血の分析で得られた値はこの目的には適当でない。

(なお、検査方法の記述、図等については、長野準他著「肺機能検査入門」(金原出版、1974) より、長野先生の承諾を得て転用させていただいた)

〔血液ガス分析装置の較正〕

毎日使用する前及び電極の膜を張り換えた後には、 O_2 及び CO_2 について既知分圧の較正ガスを用いて二点較正を行う。較正を行う場合には予めボンベにつめた O_2 、 CO_2 、 N_2 からなる成分既知の 2 種類の混合ガスを用いるが、その成分に関しては通常それぞれの機器のメーカーが指定している。較正を行う場合、厳密に言えば、この成分既知の混合ガスで平衡させたトノメーター

血を用いるが、日常の検査に当たってはこれほどまでにする必要はない。

校正は次のように行う。

校正用混合ガスを電極に流し込むに当たっては、

- ① 精密減圧弁を用いてゆっくりガスを流す。決して急に大量に流してはならない。
- ② 電極に達する前に十分加湿しておく。
- ③ 電極液がガスと十分に平衡に達する時間流す。

に注意する。

2点校正によって校正曲線の傾斜とズレをチェックする。

なお、多数の検体の分析を行うときには、特に頻回に検体の O_2 及び CO_2 の分圧値に近い点で一点校正を行うことが望ましい。この一点校正でメーターの指示値が著しくズレている場合、及びこの指示値の変動が著しい場合には、二点校正を行って確認するか、又は、電極の膜の張り換えを行ったうえで改めて二点校正を行う。

pH メーターの校正は、市販されている標準液を使用して行い、原則として二点校正とする。

(4) 検査結果の判定

肺機能検査の結果の判定に当たっては、肺機能検査によって得られた数値を次に述べる判定のための基準値に機械的にあてはめて判定することなく、エックス線写真像、既往歴及び過去の健康診断の結果、自覚症状及び臨床所見等を含めて総合的に判断する必要がある。特に、過去の健康診断の記録等から、著しい肺機能障害が持続する状態が疑われる者についての判定に当たっては、従前から行われてきた諸検査の結果を十分参考として、総合的な判定を行う必要がある。

なお、次のような判定を行った場合には、特に法定の検査以外の検査結果も含めて、その医学的事由をできるだけ詳細に「じん肺健康診断結果証明書」の「医師意見」の欄に記入する。

- ① 次に述べる基準として示されている要件に該当しない場合であっても、医師が総合的な評価に基づいて著しい肺機能障害の有無の判定を行った場合
- ② 既往歴の調査、過去の健康診断の記録等から「著しい肺機能障害がある」状態が持続しているおそれがあると認められ、次に述べる基準として示されている要件に該当しないが2次検査以外の肺機能検査の結果等を総合して「著しい肺機能の障害がある」と判定した場合

イ. 1次検査の結果の判定

(イ) 「著しい肺機能障害がある」と判定する基準

次のいずれかに該当する場合には、一般的に、「著しい肺機能障害がある」と判定する。

- ① パーセント肺活量が60%未満の場合
- ② 1秒率が表2(男性)又は表3(女性)に掲げる限界値の表の左欄の値未満の場合

表2 1秒率の限界値(%)
(男性)

年齢 (歳)	著しい肺機能障害 があるものと判定 する限界値	2次検査を要 する限界値
21	62.39	76.77
22	62.01	76.39
23	61.64	76.02
24	61.27	75.65
25	60.90	75.28
26	60.52	74.90
27	60.15	74.53
28	59.78	74.16
29	59.40	73.78
30	59.03	73.41

31	58.66	73.04
32	58.28	72.66
33	57.91	72.29
34	57.54	71.92
35	57.17	71.55
36	56.79	71.17
37	56.42	70.80
38	56.05	70.43
39	55.67	70.05
40	55.30	69.68

41	54.93	69.31
42	54.55	68.93
43	54.18	68.56
44	53.81	68.19
45	53.44	67.82
46	53.06	67.44
47	52.69	67.07
48	52.32	66.70
49	51.94	66.32
50	51.57	65.95

51	51.20	65.58
52	50.82	65.20
53	50.45	64.83
54	50.08	64.46
55	49.71	64.09
56	49.33	63.71
57	48.96	63.34
58	48.59	62.97
59	48.21	62.59
60	47.84	62.22

61	47.47	61.85
62	47.09	61.47
63	46.72	61.10
64	46.35	60.73
65	45.98	60.36
66	45.60	59.98
67	45.23	59.61
68	44.86	59.24
69	44.48	58.86
70	44.11	58.49

71	43.74	58.12
72	43.36	57.74
73	42.99	57.37
74	42.62	57.00
75	42.25	56.63
76	41.87	56.25
77	41.50	55.88
78	41.13	55.51
79	40.75	55.13
80	40.38	54.76

表3 1秒率の限界値(%)
(女性)

年齢 (歳)	著しい肺機能障害 があるものと判定 する限界値	2次検査を要 する限界値
21	70.31	81.19
22	70.05	80.93
23	69.79	80.67
24	69.53	80.41
25	69.27	80.15
26	69.00	79.88
27	68.74	79.62
28	68.48	79.36
29	68.22	79.10
30	67.96	78.84

31	67.70	78.58
32	67.44	78.32
33	67.18	78.06
34	66.92	77.80
35	66.66	77.54
36	66.39	77.27
37	66.13	77.01
38	65.87	76.75
39	65.61	76.49
40	65.35	76.23

41	65.09	75.97
42	64.83	75.71
43	64.57	75.45
44	64.31	75.19
45	64.05	74.93
46	63.78	74.66
47	63.52	74.40
48	63.26	74.14
49	63.00	73.88
50	62.74	73.62

51	62.48	73.36
52	62.22	73.10
53	61.96	72.84
54	61.70	72.58
55	61.44	72.32
56	61.17	72.05
57	60.91	71.79
58	60.65	71.53
59	60.39	71.27
60	60.13	71.01

61	59.87	70.75
62	59.61	70.49
63	59.35	70.23
64	59.09	69.97
65	58.83	69.71
66	58.56	69.44
67	58.30	69.18
68	58.04	68.92
69	57.78	68.66
70	57.52	68.40

71	57.26	68.14
72	57.00	67.88
73	56.74	67.62
74	56.48	67.36
75	56.22	67.10
76	55.95	66.83
77	55.69	66.57
78	55.43	66.31
79	55.17	66.05
80	54.91	65.79

表4 $\dot{V}_{25}$ /身長
の限界値
($l/sec/m$) (男性)

年齢 (歳)	肺機能が正常 と判定する 限界値	2次検査を要 する限界値
21	0.95	1.26
22	0.94	1.25
23	0.92	1.24
24	0.91	1.23
25	0.90	1.22
26	0.89	1.21
27	0.88	1.20
28	0.87	1.19
29	0.86	1.18
30	0.85	1.17

31	0.84	1.16
32	0.83	1.15
33	0.82	1.14
34	0.81	1.13
35	0.80	1.12
36	0.79	1.11
37	0.78	1.10
38	0.77	1.08
39	0.76	1.07
40	0.75	1.06

41	0.74	1.05
42	0.73	1.04
43	0.72	1.03
44	0.71	1.02
45	0.70	1.01
46	0.69	1.00
47	0.68	0.99
48	0.66	0.98
49	0.65	0.97
50	0.64	0.96

51	0.63	0.95
52	0.62	0.94
53	0.61	0.93
54	0.60	0.92
55	0.59	0.91
56	0.58	0.90
57	0.57	0.89
58	0.56	0.88
59	0.55	0.87
60	0.54	0.86

61	0.53	0.85
62	0.52	0.84
63	0.51	0.82
64	0.50	0.81
65	0.49	0.80
66	0.48	0.79
67	0.47	0.78
68	0.46	0.77
69	0.45	0.76
70	0.44	0.75

71	0.43	0.74
72	0.42	0.73
73	0.40	0.72
74	0.39	0.71
75	0.38	0.70
76	0.37	0.69
77	0.36	0.68
78	0.35	0.67
79	0.34	0.66
80	0.33	0.65

表5 $\dot{V}_{25}$ /身長
の限界値
($l/sec/m$) (女性)

年齢 (歳)	肺機能が正常 と判定する 限界値	2次検査を要 する限界値
21	0.67	1.00
22	0.66	1.00
23	0.65	0.99
24	0.64	0.98
25	0.63	0.97
26	0.62	0.96
27	0.62	0.95
28	0.61	0.94
29	0.60	0.93
30	0.59	0.92

31	0.58	0.92
32	0.57	0.91
33	0.56	0.90
34	0.55	0.89
35	0.55	0.88
36	0.54	0.87
37	0.53	0.86
38	0.52	0.85
39	0.51	0.85
40	0.50	0.84

41	0.49	0.83
42	0.48	0.82
43	0.47	0.81
44	0.47	0.80
45	0.46	0.79
46	0.45	0.78
47	0.44	0.78
48	0.43	0.77
49	0.42	0.76
50	0.41	0.75

51	0.40	0.74
52	0.40	0.73
53	0.39	0.72
54	0.38	0.71
55	0.37	0.70
56	0.36	0.70
57	0.35	0.69
58	0.34	0.68
59	0.33	0.67
60	0.33	0.66

61	0.32	0.65
62	0.31	0.64
63	0.30	0.63
64	0.29	0.63
65	0.28	0.62
66	0.27	0.61
67	0.26	0.60
68	0.25	0.59
69	0.25	0.58
70	0.24	0.57

71	0.23	0.56
72	0.22	0.56
73	0.21	0.55
74	0.20	0.54
75	0.19	0.53
76	0.18	0.52
77	0.18	0.51
78	0.17	0.50
79	0.16	0.49
80	0.15	0.48

③ $\dot{V}_{25}$ を身長 (m) で除した値が表 4 (男性) 又は表 5 (女性) に掲げる限界値の表の左欄の値未満であり、かつ、呼吸困難の程度が第 III 度、第 IV 度又は第 V 度の場合

年齢 (歳)	限界値 (TORR)	年齢 (歳)	限界値 (TORR)
21	28.21	51	34.51
22	28.42	52	34.72
23	28.63	53	34.93
24	28.84	54	35.14
25	29.05	55	35.35
26	29.26	56	35.56
27	29.47	57	35.77
28	29.68	58	35.98
29	29.89	59	36.19
30	30.10	60	36.40
31	30.31	61	36.61
32	30.52	62	36.82
33	30.73	63	37.03
34	30.94	64	37.24
35	31.15	65	37.45
36	31.36	66	37.66
37	31.57	67	37.87
38	31.78	68	38.08
39	31.99	69	38.29
40	32.20	70	38.50
41	32.41	71	38.71
42	32.62	72	38.92
43	32.83	73	39.13
44	33.04	74	39.34
45	33.25	75	39.55
46	33.46	76	39.76
47	33.67	77	39.97
48	33.88	78	40.18
49	34.09	79	40.39
50	34.30	80	40.60

(ロ) 「2 次検査を要する」と判定する基準

1 次検査の結果等から「著しい肺機能障害がある」と判定されない者で、次のいずれかに該当し、かつ、呼吸困難の程度が第 III 度、第 IV 度又は第 V 度で、じん肺による著しい肺機能の障害がある疑いがあると認められる場合には 2 次検査を行う。

① パーセント肺活量が 60% 以上で 80% 未満の場合

② 1 秒率が表 2 (男性) 又は表 3 (女性) に掲げる限界値の表の右欄の値未満の場合

③ $\dot{V}_{25}$ を身長 (m) で除した値が表 4 (男性) 又は表 5 (女性) に掲げる限界値の表の右欄の値未満の場合

また、上記に該当しない場合であっても、呼吸困難の程度が第 III 度、第 IV 度又は第 V 度で、じん肺による著しい肺機能の障害がある疑いがあると認められる場合には 2 次検査を行う。

ロ. 2 次検査の結果の判定

肺泡気・動脈血酸素分圧較差の値が表 6 の限界値を超える場合には、諸検査の結果とあわせて一般的には「著しい肺機能障害がある」と判定する。

なお、「じん肺健康診断結果証明書」の肺機能検査の判定の欄に記載に当たっては、1 次検査、2 次検査及びその他の諸調査・検査の結果等を総合的に医師が判断して「じん肺による肺機能の障害がない」と判定した場合には F (－)、「じん肺による肺機能の障害がある」と判定した場合には F (＋)、「じん肺による著しい肺機能の障害がある」と判定した場合には F (⊕) と記載する。

(5) その他の検査

1 次及び 2 次検査によって、一般的には肺機能障害が著しいか否かを判断することはできないが、ケースによっては、これらの情報で必ずしも判断し得ない場合がある。このような場合には、医師の判断に基づいて次に掲げる検査のうち必要と認められる検査を行い、これらの結果を含めて総合的な判断を行う必要がある。

このような検査としては次のものがある。

- ① 肺気量測定
- ② 呼吸抵抗測定
- ③ 肺コンプライアンス測定
- ④ 一酸化炭素拡散能力測定
- ⑤ クロージング・ボリューム測定
- ⑥ 負荷試験 (運動又は薬物)

以下各検査の概要等について概説する。

イ. 肺気量測定

スパイログラムの項で説明したごとく、スパイログラムにより次の肺気量諸値を求めることができる。

予備吸気量 (inspiratory resting volume, IRV)

1 回換気量 (tidal volume, TV)

予備呼気量 (expiratory reserve volume, ERV)

最大吸気量 (inspiratory capacity, IC) = IRV + TV

肺活量 (vital capacity, VC) = IC + ERV

その他の肺気量には、機能的残気量 (functional residual capacity, FRC)、残気量 (residual volume, RV)、全肺気量 (total lung capacity, TLC) があるが、これらの肺気量を得るためには機能的残気量を測定すればよい。以下、機能的残気量の測定方法について述べる。

機能的残気量の測定方法として用いられるのは、大別すると次のごとくになる。

- ① ガス希釈法 (gas dilution method)
 - 開放回路法
 - 閉鎖回路法
- ② 物理的方法 (pneumatometric method)
 - 減圧法
 - 体プレチスモグラフ法

⑨ X線学的方法 (radiologic method)

現在一般に用いられているのは、He を指示ガスとした閉鎖回路法 (恒量式、変量式) と体プレテスモグラフ法である。

(イ) 閉鎖回路法の測定原理

既知濃度の指示ガスを含んだ既知容量のバッグと肺とを連絡し、反覆して呼吸させ、両者の空間内のガスを十分に混合させて、肺内気量による指示ガス濃度の変化より肺に存在する気量を知ろうとするものである。

指示ガスとしては肺で吸収されないものを用いると、混合前後のガス量は変化しないから次の式が成立する。

$$\text{指示ガス量} = V_B \cdot F_X = (V_B + V_L) \cdot F_Y$$

V_B : 混合ガスの容積

V_L : 機能的残気量

F_X : 混合前の指示ガス濃度

F_Y : 混合後の指示ガス濃度

V_B , F_X , F_Y をあらかじめ知ることができるので V_L を求めることができる。

実際の測定では装置の死腔などが関係するので複雑となる。

この方法に変量式と恒量式とがあるが、肺での酸素摂取による回路内のガス量の減少を一定流量の O_2 で補うようにしたのが恒量式で、その装置のないものが変量式となっているものである。装置の構成からみると変量式に酸素補充装置のついたものが恒量式といえる。

a. 変量式閉鎖回路法

装置の組合せは図 28 に示すごとくである。注意としては回路の死腔を減らすために、サッド・バルブを除いて、太いゴム管をつけ管の上端まで水を満たす。その代りとして J-バルブを付ける。

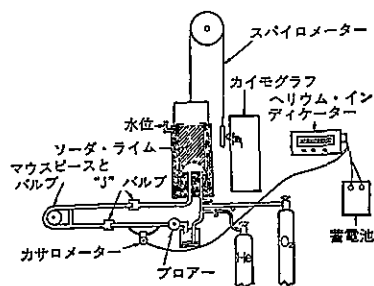


図 28 ヘリウム変量式閉鎖回路法の装置

吸気側の J-バルブの前にブローワーを付けて回路内のガス混合を容易にすると同時に、吸気のさいの抵抗減弱を図る。回路の途中にカサロメーターをつけ、He 濃度を測定できるようにする。

(a) 測定方法 (図 29)

- ① 被検者を 15~20 分間休息させておく。
- ② 約 1000 ml のヘリウムを回路に入れ、カイモグラフのドラムを回してヘリウム線をひく。
- ③ ブローワーを回して回路内のヘリウムを十分に混和してヘリウム濃度を読む。(F₁)
- ④ 被検者が 7~10 分間呼吸するのに十分な酸素を加えて、回路を混和した後にヘリウム濃度を読む。(F₂)
- ⑤ 被検者の呼気の終わりに回路を開き、同時にストップウォッチを押して 20 秒ごとにヘリウム濃度を読み(F₃)、スピロの基線がヘリウム線と交叉したときに回路を閉じる。
- ⑥ 回路内のヘリウム濃度が一定になってから最終のヘリウム濃度を読む。(F₄)

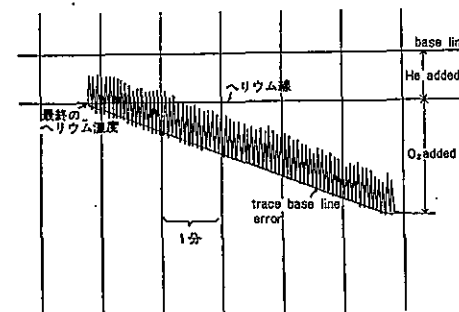


図 29 変量式閉鎖回路法のスピロ

(b) 機能的残気量の算出

測定中のヘリウム量は一定であるから次の式が求められる。

$$V_{He} = (FRC' + V_D + V_{He}) \times F_4$$

V_D : 回路の死腔

F_4 : 最終のヘリウム濃度

V_{He} : 測定の初めに回路に入れたヘリウムの量

$$\therefore FRC' = \frac{V_{He}}{F_4} - (V_D + V_{He})$$

$$V_D = \frac{V_{He}}{F_1} - V_{He}$$

$$\therefore FRC' = \frac{V_{He}}{F_4} - \frac{V_{He}}{F_1}$$

算出されたこの値から, trace error を補正し, さらにマウスピースなどの測定具の死腔を引いたものが求められる機能的残気量となる。

$$FRC = FRC' - [\text{trace error} + \text{測定具の死腔}]$$

b. 恒量式閉鎖回路法

変量式のものに酸素を追加して回路内気量を一定にするための装置が必要である。これまでにゴタルト社製のプルモテストとプルモアナライザーの組合せが普及している。

(a) 測定方法 (図 30)

測定回路内にヘリウム (V_{He}) と空気 (V_{air}) とを加えてブローワーを回して十分に混和させた後にヘリウム濃度を読み (F_1), そのときのガス量を知る (V_1)。

被検者と回路を連結し, スパイログラムの基準線が水平になるように酸素を加える。ヘリウム濃度を測定しながら回路内のヘリウム濃度が一定になるのをみながら, さらに 2~3 分間測定をつづけて回路を閉じて, 最終のヘリウム濃度を読む (F_2)。そのときのガス量を知る (V_2)。

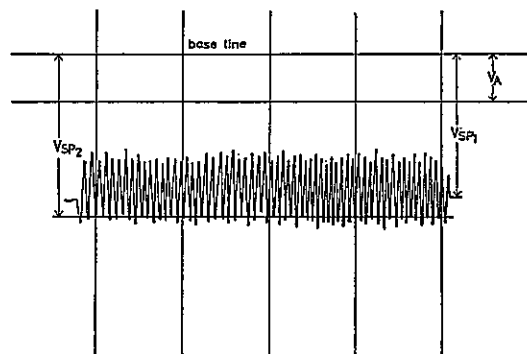


図 30 恒量式閉鎖回路法のスパイロ

$$V_D = \frac{V_{He}}{He_1} - (V_A + V_{He})$$

$$FRC = \frac{He_1 - He_2}{He_2} (V_D + V_{spi}) + (V_{spi} - V_{sp2})$$

V_{He} : 加えたヘリウム量 V_A : 加えた空気量 V_D : スパイロメーターの回路の死腔量

He_1 : ヘリウムがスパイロメーターの回路に完全に分布したときのヘリウム濃度

He_2 : ヘリウムが肺-スパイロメーターの回路全体に平等に分布したときのヘリウム濃度

V_{spi} : 患者を連結する前のスパイロメーターのベル内の混合ガスの容量

V_{sp2} : 測定を終了したときのスパイロメーターのベル内の混合ガスの容量

(b) 機能的残気量の算出

$$V_{He} = (V_D + V_{He} + V_{air}) \times F_1$$

$$V_D = \frac{V_{He}}{F_1} - (V_{He} + V_{air})$$

$$V_{He} = (FRC' + V_D + V_{He} + V_{air}) \times F_2$$

$$FRC' = \frac{V_{He}}{F_2} - (V_D + V_{He} + V_{air})$$

(ロ) 体プレテスモグラフ法 (後述)

(ハ) 肺気量諸値の正常範囲

肺気量諸値のうち, 一般に肺機能障害の評価に用いられる指標は残気率 (残気量/全肺気量) であり, 仰臥位の場合の残気率の予測値については, Baldwin らのものがよく使われており, 次のとおりである。

年 齢	16~34歳	35~49歳	50~69歳
残気率(男性, 女性)	20.0%	23.4%	30.8%

ロ. 呼吸抵抗測定

(イ) オッシレーション法

a. オッシレーション法について

呼吸インピーダンスの測定は, いわゆる呼吸抵抗の特性をとらえる方法としてすぐれており, 肺, 胸郭系の共振点でのインピーダンスは, 呼吸抵抗そのものを表す。オッシレーション法 (Forced oscillation technique) による呼吸インピーダンス測定の原法は, DuBois らによって開発された。今日わが国で広く利用されている方法は, その基本原理こそ原法と同じであるが, 具体的方法としては原法とはかなり異なるものである。

被検者の安静換気の気流に上乗せした形でよいが, 又はピストンでつくり出した既知周波数の発振 Sine 波を加える。この時被検者の口腔部で, 発振周波数に等しい圧波及び気流波が得られる。被検者の口にくわえたニューモタコグラフ及び圧測定器から検出された気流速, 並びに口腔内圧から被検者の安静換気に相当する値を差し引いたそれぞれの変化分, すなわち $\Delta \dot{V}$ 及び ΔP からその周波数における肺・胸郭系の呼吸インピーダンス Z を求めることができる。

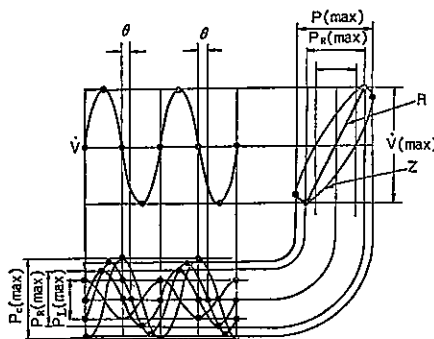
$$Z = \frac{\Delta P}{\Delta \dot{V}}$$

この呼吸インピーダンスは, 肺・胸郭系の粘性抵抗 R_R (抵抗 $= \frac{\Delta P_{res}}{\dot{V}}$, 弾性抵抗 X_C (容

量リアクタンス $= \frac{4PC}{V}$ 及び慣性抵抗 XL (誘導リアクタンス $= \frac{4PL}{V}$) の各成分を要素として含んでいる。もしも入力 Sine 波の共振周波数が肺・胸郭系の共振周波数に等しければ、弾性抵抗と慣性抵抗とは相殺されて、呼吸インピーダンスは肺・胸郭系の粘性抵抗を表す。(ブラウン管オシログラフに表示した図形において、X-Y 軸上のインピーダンスのリサージュは、X 軸上に P , Y 軸上に $\dot{V}$ をとるので、その勾配 $\frac{\dot{V}}{P}$ は粘性抵抗の逆数を表す)。このようにして得られた圧・気速図形から、呼吸器の抵抗特性としてのインピーダンスを種々の共振周波数においてとらえることができ、かつ、肺・胸郭系の共振点ではとくに呼吸抵抗としてとらえることができる。

b. 検査手技

DuBois らの方法では "Trans-thoracic pressure" の Sine 波形をつくるために体プレサ



粘性・弾性・慣性が直列にあるときの圧と気流速との関係、 θ は合成インピーダンスの位相差、 $P(\max)$ と $\dot{V}(\max)$ との比が合成インピーダンス Z であり、 $P_R(\max)$ と $\dot{V}(\max)$ との比が粘性抵抗である。

図 31 オシレーション法で呼吸インピーダンスを求める原理図

モグラフを用いており、この方法は呼吸インピーダンスの厳密な測定のために、その後、今日においても採用されている。現在わが国で普及しているいわゆるオシレーション法は、口腔に Sine 波入力をあたえる方式をとっている。ラウドスピーカーを発振源とし周波数を変えられるもの、ふいごを発振源とし周波数を変えられるもの、ふいごを発振源とし 3 Hz に固定したものがある。前二はオシロスコープ上に圧・気速図形を表示し、後者は直読式である。

測定に当たっては、被検者を坐位とし、なるべく楽な姿勢をとらせる。ノーズクリップをかけた上でマウスピースをくわえさせ、口

で呼吸させる。マウスピースの口を舌でふさぐことのないよう注意することが必要である。

1, 2 回深呼吸をさせた上でリラックスさせ、安静換気になった時点で測定を行う。圧・気速図形の読取りは、口腔内圧と気流速とそれぞれの Peak to peak とする (図 31)。

健康診断に本法を応用する場合の共振周波数は 3 Hz 及び又は共振周波数とする。オシロスコープに表示した図形から呼吸インピーダンスを読み取るには、ある程度熟練を要する。呼吸の安定しない対象では、読取りが難しい。共振点を求めるに当たって、圧・気速図形が扁平となり、完全に一本の線とならない場合がしばしばある。このような場合は、厳密

な意味での共振周波数における呼吸抵抗は得られない。また 3 Hz では圧・気速図形が楕円形であり十分扁平でないの、前述したように、圧・気流速の Peak to peak の幅を読み取る原則に注意して測定を行う。圧・気速図形の読取りが困難なときは、ストーレージ型のオシロスコープを用いるとよい。

周波数を 3 Hz に固定したスクリーニング用の呼吸抵抗計では、共振周波数での呼吸抵抗の測定はできないが、直読式であるから、指針が安定したところで値を読み取ればよく、とくに熟練した技術を要しない。

c. 呼吸インピーダンスの評価

Brody らは、18~85 歳の健康男子 57 名と 18~79 歳の健康女子 44 名中の 66 名について、坐位、安静換気時に周波数 10 Hz の DuBois らの装置に準じたもので測定を行って次のような値を得た。

全対象 (66 名、平均年齢 41.9 歳)

$$3.46 \pm 1.65 \text{ cmH}_2\text{O/l/sec (range 0.6~9.6, SEE=0.20)}$$

男子健康例 (36 名、平均年齢 40.8 歳)

$$3.24 \pm 1.91 \text{ cmH}_2\text{O/l/sec (range 0.6~9.6, SEE=0.32)}$$

女子健康例 (30 名、平均年齢 43.3 歳)

$$3.72 \pm 1.12 \text{ cmH}_2\text{O/l/sec (range 1.19~5.9, SEE=0.21)}$$

松田らは、1,356 例の日本人健康例につき下記の如き値を得た。これは、共振点で読み取った呼吸抵抗値である (表 7)。

立川は、健康者 20 例について厳密に測定を行い、3 Hz 呼吸インピーダンスとして、 $2.38 \pm 0.51 \text{ cm H}_2\text{O/l/sec}$ を得た。さらにその対象から厳しい基準に従って 12 例を選び、3 Hz 呼吸インピーダンスを求め、 $2.23 \pm 0.45 \text{ cm H}_2\text{O/l/sec}$ を得た。

表 7 日本人の健康例の呼吸抵抗値 (松田ら)

年 齢	男	女
20~29	2.03 ± 0.44	2.94 ± 0.63
30~39	2.33 ± 0.53	3.18 ± 0.71
40~49	2.50 ± 0.29	3.23 ± 0.48
50~59	2.81 ± 0.54	3.30 ± 0.53
60~	3.06 ± 0.71	3.81 ± 0.39

(単位: $\text{cmH}_2\text{O/l/sec}$)

横山らは、ルーチンの検診のために 3 Hz 呼吸抵抗計を用い、男子健康者 199 例、女子健康者 183 例につき 3 Hz 呼吸インピーダンスを測定し、その平均値を表す回帰式と危険率 5% の棄却限界を表す実験式とを得た。

平均値を表す回帰式

(男子) $7.20 - 0.002 \times [\text{年齢}] - 0.028 \times [\text{身長}]$

(女子) $6.03 - 0.003 \times [\text{年齢}] - 0.019 \times [\text{身長}]$

危険率 5% の棄却限界を表す実験式

(男子) $8.26 - 0.006 \times [\text{年齢}] - 0.033 \times [\text{身長}]$

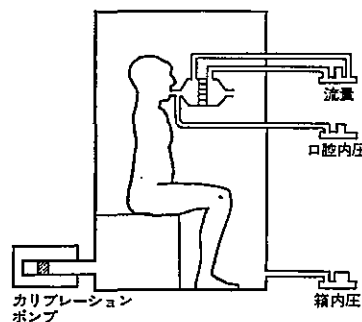
(女子) $7.97 - 0.002 \times [\text{年齢}] - 0.031 \times [\text{身長}]$

身長: 単位 cm, 145 cm 以上に適用

以上のように、健康者の呼吸インピーダンスは報告者によって周波数が異なっている。しかし 3~9 Hz の周波数範囲内では、健康者の呼吸インピーダンスには有意の差異がないとされている。したがって、現在統一されている周波数 3 Hz における呼吸インピーダンスの正常値を検討する場合に、上記の諸報告は有用な参考となろう。いうまでもなく、肺・胸郭系の換気力学的特性の不均等を伴う疾患例では、発振周波数が共振周波数を離れるに伴って呼吸インピーダンスが著しく増加するので、異なる発振周波数の下で求めた疾患例の呼吸インピーダンスを相互に比較することはできない。異常例を選び出すという単純に診断的スクリーニングの目的からすれば、条件の許す限り発振周波数の低いところで測定を行うのが有利である。

(ロ) 体プレテスモグラフィ

a. 標準方式



体プレテスモグラフには Pressure plethysmograph, Volume plethysmograph がある。前者は、肺胞内圧の変化を箱内の圧変化として測定し、後者は肺胞内圧の変化を箱内変化としてとらえる。図 32 は Pressure plethysmograph の標準的な装置を示したものである。いずれの場合にも、被検者に浅く速い呼吸 (Panting) を行わせ、箱内圧変化、又は容量と気流速度を測定する。この 2 つの値の比から気道抵抗を算出する。オシロスコープの X, Y 軸上にこの 2 つの値を描かせれば、その傾斜から気道

図 32 体プレテスモグラフィ

抵抗を読み取ることができる。

b. 正常範囲

健康人の気道抵抗の平均値と標準偏差は次のとおりである (表 8)。

また、気道抵抗又はその逆数のコンダクタンスは年齢とほとんど関係がない。

表 8 健康人の気道抵抗の平均値と標準偏差

1. Panting

	男 子	女 子	男 女 共
DuBois et al	1.43±0.47	1.82±0.42	1.50±0.49
Marshall & DuBois	0.91±0.17	1.39±0.18	0.99±0.23
Briscoe & DuBois	1.11±0.57	1.41±0.51	1.23±0.55
Nadel & Comroe	1.18±0.29	1.09±0.25	1.14±0.27
Jaeger & Otis	1.69±0.46	2.05±0.26	1.73±0.43
Schmidt & Cohns	1.68±0.81		

2. 安静呼吸

Jaeger & Otis	1.22±0.39	1.43±0.41	1.26±0.39
---------------	-----------	-----------	-----------

男子 $C=0.28$ ($V=0.73$)

女子 $C=0.29$ ($V=0.27$)

又は、 $C=0.24$ V, $R=4.2/V$

ただし、C:コンダクタンス, R:気道抵抗 (cmH₂O/l/sec), V:肺気量 (l) である。

ハ. 肺コンプライアンス測定

肺の弾性の変化を表現するために、静止下で測定する静コンプライアンス (static compliance) と動的状態下で測定する動コンプライアンス (dynamic compliance) の 2 つの方法がある。

肺コンプライアンスを求めるためには、換気量、口腔・食道内圧差の結果が必要である。

(イ) 気量の測定

a. ロで測定する方法

気流速計の電気的出力を積分回路を通して電気的に積分する方法が一般的である。市販の気速計は積分回路を備えている。しかし、よほど安定した気速計でないと、気速計の出力のわずかなドリフトがすべて積分されるから、スパイログラムの基線が一方に著しくずれやすく、場合により数秒間の測定にさえ困ることがある。そのため適当な low cut filter が用いられるが、filter を通して換気量を記録すると静的な測定ができないばかりでなく、filter の時定数が不適当であるといろいろと位相を変化させるから細心の注意が必要となる。

この点、レスピロメーターポテンショメーターを取り付けて記録する方法は、ドリフトが少ないので安心して使用できる。しかし本法は閉鎖回路になるので長時間にわたる測定には向かないし、レスピロメーターの周波数特性が悪いと速い変化に追従しえない欠点がある。

b. 胸郭の動きから測定する方法

容積変化型体プレテスモグラフ (volume displacement plethysmograph) を用いると被検者が呼吸する換気量を胸郭の動きを通してレスピロメーターに導くことができる。

ただ本装置は、前述のレスピロメーターのみによる測定法よりも周波数特性がきわめて悪いので、速い変化には追従し得ないのが欠点である。また、気道抵抗が高いと肺胞気の圧縮によって、口での流速と胸郭での流速にはかなりの差を生ずる。

(ロ) 圧力の測定

気管支と肺全体の粘性抵抗を求めるには、口腔内圧と胸膜表面圧との圧差を測定する必要がある。普通、電気圧差計 (differential electromanometer) が用いられる。その感度は水柱 1 cm の圧力が正確に測定できるもので、1~100 cmH₂O の圧力範囲で直線性があり、しかも少なくとも DC~20 Hz の周波数において忠実に作動できるものを用いるべきである。

a. 口腔内圧の測定

口腔内圧 (P_{ao}) を測定するには、マウスピースに側管をつけ、側圧で測定する。このさい注意すべきことは Bernoulli 効果である。円管内を流体が流れる場合、霧吹きや水流ポンプにみられるように、管内には管のその点から先の粘性抵抗分の圧力のみならず、流れの方向とは無関係に陰圧を生じる。これを Bernoulli 効果、あるいは Venturi 効果と呼んでいる。空気が流れる場合の陰圧度は次式によって求められる。

$$P = -\frac{\rho v^2}{2g} = -\frac{0.56 \dot{V}^2}{A^3} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 g : 重力の加速度、 ρ : ガスの密度、 v : 線速度、 $\dot{V}$: 流量速度 (l/sec)、 A : 円管の断面積 (cm²)、0.56: 空気の場合の係数 ($\frac{\rho}{2g}$)

したがって、実際の口腔内圧を求めるには、側管から得られる側圧に Bernoulli 効果による圧降下分だけの圧力を加えねばならない。一般に内径 3 cm 以上ある管を用いると問題がないが、それより狭い場合には気流速度が早くなると圧が低くなる。

b. 胸膜面での圧力測定

胸膜面での圧力 (P_l) を直接測定することはむずかしいので、食道内圧を測定することによって代用する。食道内圧は胸腔内圧をよく反映するが、まったく等しくはなく、また、測定方法を誤ると著しく異なった値を示すので、食道内圧の測定には以下に示す細心の注意が必要である。

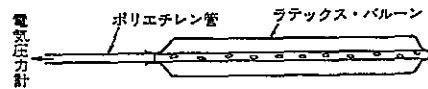


図 33 食道内圧測定用カテーテル
(規格については本文参照のこと)

(a) 圧測定用カテーテル

最も基準となるカテーテルは図 33 のごとく、内径 0.14 cm、外径 0.19 cm、長さ 100 cm のポリエチレン管で、先端から 10 cm の間に多数の穴をあけ、その部を長さ 10 cm、周囲 3.5 cm、厚さ 0.06 mm 程度のラテックス薄膜による袋で覆い、気密にしたものである。

(b) 食道内におけるカテーテルの位置

食道内圧は、重力の影響を受け、食道内でのバルーンの位置によってかなり異なる。立位では、1 cm 下位になると 0.20~0.25 cmH₂O 圧が増すといわれている。また静圧のみならず、動的測定時にも著しい差を生じやすいので、食道内圧測定に当たってはこの点特に注意しなければならない。

理想的な位置としては、胃噴門と気管支分岐部までの約 15 cm の範囲で、これより下では胃内圧、上では気管支内圧や動きの影響、いわゆる tracheal artefact が出現して食道内圧は著しく変形する。鼻口からカテーテルの先端が 45 cm 入った場所が多くは被検者でおよそこの部に相当するが、個人差もあるので、以下に示す方法で正しい位置にあるかどうか確かめた方がよい。

最も基本となる手技は、バルーン内に 1 ml の空気を入れたカテーテルを鼻口からまず 60 cm 挿入し、空気圧力計につなぎ、バルーン全体が胃内にあることを吸気時に陽圧になることによって確かめる。

次いで、呼吸による圧変化が逆転し、吸気時に陰圧方向に変化するまでカテーテルを徐々に引きぬく。この際注意しなければならないことは、バルーンの一部、上方約 1 cm が胸腔内食道まで引き上げられた時にこの逆転が出現すること、従って、この位置からカテーテルをさらに 10 cm 引き上げると、バルーンの先端は噴門上 1 cm 以上のところにあることになる。

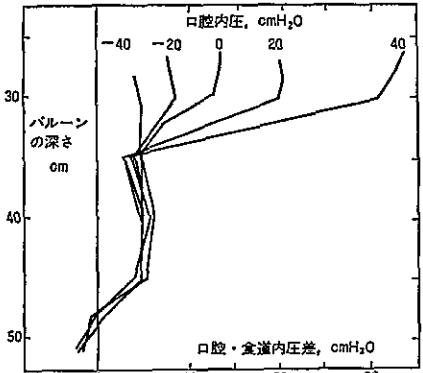


図 34 tracheal artefact (Milic-Emili ら, 1964)
口腔内圧、従って気管支内圧を ± 40 cmH₂O 変化させた際にみられる口腔・食道内圧差の変動とバルーンの深さとの関係

次に、tracheal artefact が出現するか否かを調べる口腔内圧測定用の側管のある部より先で気道を閉じ、口腔内圧 (= 気管支内圧) を ± 40 cmH₂O 程度変化させた際の口腔内圧・食道内圧差 (transpulmonary pressure) を測定する。バルーン内空気量は 0.2 ml とする。この際喉頭を閉じないように注意する。もし食道内圧が正しく胸腔内圧を反映しているとすれば、気流が存在しないため、transpulmonary pressure は肺気量変化のみによって変化するから、 ± 40 cmH₂O の圧変化による肺胞気の圧縮伸展を考えなければ、肺気量は一定であり、気管支内圧変化によっても変動がみられないはずである。しかし、バルーンが気管支内圧の影響を