

Spirometry, Flow-volume curve, Diffusion capacity of the lung

呼吸機能検査ガイドライン

—スパイロメトリー、フローボリューム曲線、肺拡散能力—

編集 日本呼吸器学会肺生理専門委員会



日本呼吸器学会
The Japanese Respiratory Society

メディカルレビュー社

スパイロメトリーとフローボリューム曲線 (4) 測定方法の実際

呼吸機能検査は被験者の努力に依存するため、被験者の十分な理解と協力が不可欠である。少ない回数で最良の測定ができるよう、測定前の準備とともに、測定技術や結果を判断する知識の修得が必要である。

1. 測定上の注意

①測定体位と姿勢

検査は座位または立位で行う。標準的な体位を決めておき、異なる体位で行った場合は報告書に記載する。立位で行う場合には安全性を考慮し、すぐに座ることができるよう後ろに椅子を用意しておく。

②マウスピース

円柱状のディスプレイマウスピースか、つば付のシリコン製マウスピースを使用する。高齢者や顔面に麻痺のある被験者など漏れが生じやすい場合は後者を用いる。

③検査の間隔

被験者の理解度や性格に合わせて検査を誘導する。被験者の状態をよく観察し、疲労しないよう検査と検査の間に適宜休憩を入れながら進めていく。

2. 測定準備

以下の手順で測定準備を行う（表1）。

表1 呼吸機能検査の進め方

- ・機器の較正と精度確認を行う
- ・被験者の状態を確認する
- ・被験者に検査の目的を説明して呼吸のしかたを指導する
- ・検査を実施し報告書を作成する
- ・機器の清掃をする

①機器の動作を確認する

検査室は快適な温度に保ち（注1）、検査を開始する前に機器のウォーミングアップ、較正と精度確認を行っておく（1-(3)機器の精度管理とメンテナンス p.8参照）。

②被験者の状態を確認する

検査依頼内容を確認する。被験者を検査室に呼び入れるとき、患者の顔色、歩き方、呼吸の状態などを観察する。前回測定値があれば参考にする。

③目的を説明して呼吸のしかたを指導する

検者は被験者に検査の目的や重要性をわかりやすく説明して理解させたのち、測定時の呼吸方法を指導する。努力肺活量測定では、検者自身が実際に紙などを使って努力呼出を行って見せる。特に初めて検査を受ける被験者では1～2度練習してから測定するのもよい。

注1：17℃未満の低温環境下で測定を行うと一部の被験者では気流制限がみられることがある。

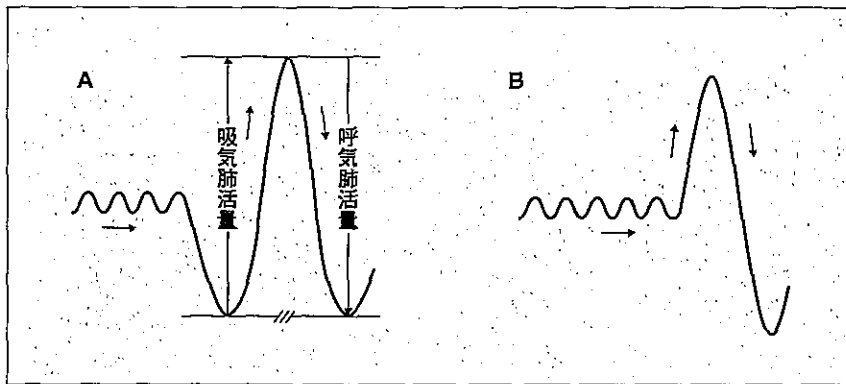


図1 肺活量の測定法

A: 吸気・呼気肺活量測定。この方法を標準法として行う。
 B: 呼気肺活量。標準法で適切な測定ができない場合に行う。閉塞性換気障害があると空気とらえこみ現象のため吸気肺活量>呼気肺活量となるため望ましくない。

④姿勢を整えマウスピースを装着させる

きつい着衣(襟、ネクタイなど)は緩めさせ、背筋を伸ばし肩に力が入らないようリラックスした姿勢をとってもらう。

マウスピースをくわえさせ、ノーズクリップをつける。マウスピースからの空気漏れがないことを確認した後それぞれの検査を開始する。

3. 肺活量・努力肺活量検査

①肺活量検査の測定手順

肺活量検査は安静呼吸から最大呼気、最大吸気、最大呼気を行い、吸気肺活量の後呼気肺活量を測定する方法が標準である(図1-A)。ただし、標準法では適切な肺活量測定が得られない被験者(小児など)には、安静呼吸から最大吸気、最大呼気を行う呼気肺活量(図1-B)をもって肺活量とする(注2)。測定装置は時間-気量曲線(スパイログラム)の最大吸気位と最大呼気位の差を肺活量として計測している。したがって標準法では吸気肺活量と呼気肺活量のうち大きい方を肺活量とすることができる。

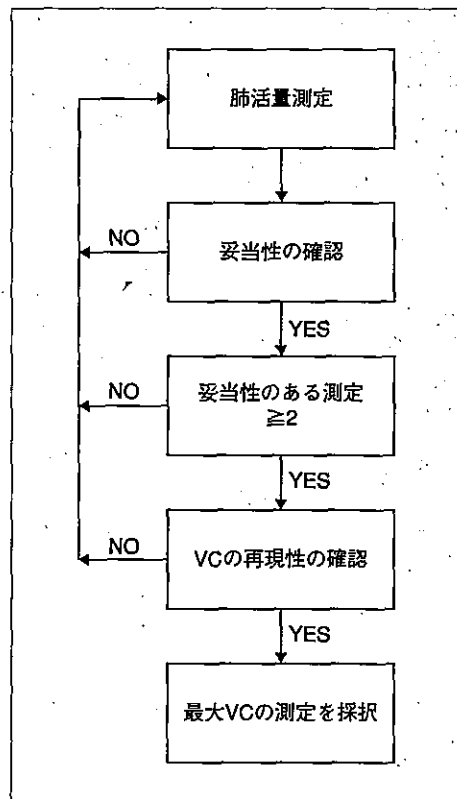


図2 肺活量測定のプロフローチャート

注2: 一般に健常者では吸気肺活量と呼気肺活量に差異はない。閉塞性換気障害患者では空気とらえこみ現象のため吸気肺活量>呼気肺活量となるため、呼気肺活量のみを測定する後者の方法は望ましくない。

表2 肺活量測定の妥当性・再現性と採択基準

基準	
妥当性	スパイログラムで以下を確認する ①安静呼気位が安定している* ②最大呼気位と最大吸気位のプラトー**が確認できる ③吸気肺活量 \approx 呼気肺活量***
再現性	2つの妥当な測定結果において、最大の肺活量と2番目の肺活量の差が200mL以下である
採択	最大の肺活量を示した測定結果を採択する

*：安定とは安静呼気位の帰線が水平で最大吸気位と最大呼気位の呼気側3分の1から2分の1ぐらいにあることをいう。
 **：プラトーとは時間-気量曲線（スパイログラム）が2秒以上上下なく水平な場合をいう。
 ***：閉塞性換気障害では空気とらえこみ現象のため吸気肺活量 $>$ 呼気肺活量となる場合がある。

肺活量測定は図2の手順で行う。

・測定方法

時間-気量曲線（スパイログラム）をモニターしながら測定する。少なくとも3回以上安静呼吸をさせ、安定した呼気位を確認した後、そのまま一定のスピードで最大呼気位（残気量位）まで呼出させる。最大呼出のプラトー（モニター上で2秒以上気量に変化がなく曲線が水平状態になる（注3））に達したら、最大吸気位（全肺気量位）まで吸入させる。最大吸気のプラトーに達したら、再び最大呼出させプラトーを確認し、吸気させて測定終了とする。

・妥当性の確認

測定後、モニター上のスパイログラムで、①安静呼気位が安定し肺活量の呼気側3分の1から2分の1あたりに位置していること、②最大呼気位と最大吸気位のプラトーが確認できること、③呼気肺活量が吸気肺活量とほぼ同じであることを確認できれば妥当な結果と判断する（注4）。

測定結果が妥当でなければ、よくない点を被験者にわかるように十分説明し、もう1度検査を行う（表2）。

・再現性の確認と結果の採択

妥当な2回の測定結果が得られ、最大の肺活量と2番目に多い肺活量の差が200mL以内であれば再現性があると判断する。肺活量が最大値を示したスパイログラムを採択して検査終了とする。差が200mL以上の場合は検査を繰り返す。最大4回まで実施しても再現性が得られない場合は妥当な測定結果のうち肺活量が最大のものを採択し、検査終了とする。その場合は理由を報告書に記載する。

②努力肺活量検査の測定手順

努力肺活量検査では、1回の検査で努力呼気曲線とフローボリューム曲線を同時に測定できる。測定時はフローボリューム曲線をモニターしながら検査を実施する。努力肺活量測定は図3の手順で行う。

注3：「気量に変化がない」とは、モニター上の最小検出可能気量以下であることを意味し、最小検出可能気量は0.030L以下を前提としている。カーブ表示だけで対応できない場合は、メッセージや音の表示で確認できればよい。

注4：閉塞性換気障害では吸気肺活量 $>$ 呼気肺活量となる場合がある。

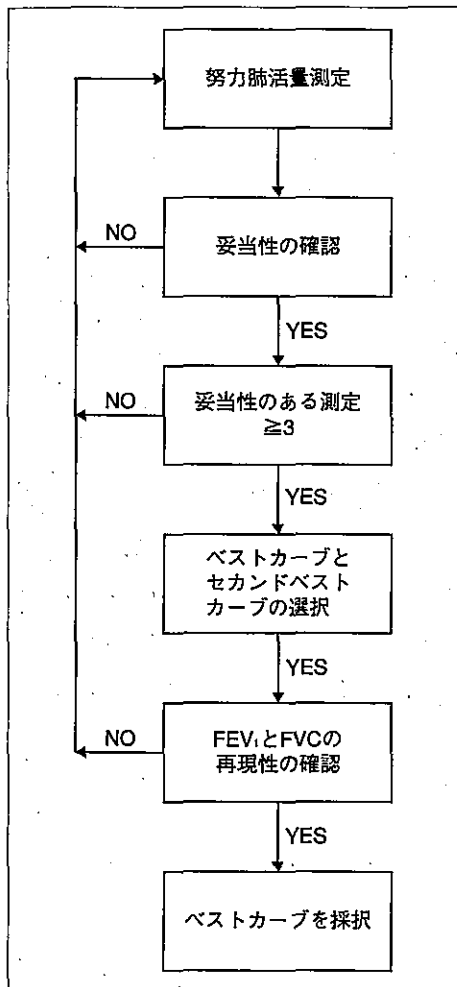


図3 努力肺活量測定のプロチャート

・測定方法

安静呼吸が安定した後、安静呼気位から最大吸気位まで吸気させたら、最大限の力で一気に努力呼気をさせて最大呼気位まで呼出させる。最低6秒以上呼気努力を続けるよう声をかけ、最低2秒以上呼気量が変化しないことを確認して測定終了とする（注5）。閉塞性換気障害患者で呼気排出がわずかずつ持続している場合は15秒を越えたら検査終了とする。呼気努力時は被験者の状態に十分注意を払う。

・妥当性の確認

測定終了後、以下の3つを満たせば妥当性があると判断する。

①フローボリューム曲線のパターンが良好であること

最大吸気ができているか、呼気開始が良好であったか、呼気早期にピークが得られているか、最大呼気努力が得られているか、全体に咳や声出しなどのアーチファクトがないかを確認する（表3）。

努力不足によるピークの欠如、呼気早期の咳嗽、声門閉鎖による呼気中断などがフローボリューム曲線で検出できる場合は妥当な測定とはいえない（図4）。

②呼気開始が良好であること

外挿気量（extrapolated volume）（図5）がFVCの5%または150mLのいずれか大きい方より小さいことを確認する。

③十分な呼気ができていること

時間—気量曲線において2秒以上のプラトーが確認できること。閉塞性換気障害を有する被験者などでプラトーにならない場合は十分な呼気時間（15秒以上、あるいは6秒以上で被験者が呼気を持続できなくなるまで）があることを確認する。

肺活量測定を実施している場合はAir-trapping Index（ATI）（1-(5)結果の解釈 p.22参照）も参考にする。閉塞性パターンがなくATIが5%を越える場合は十分な呼気ができていない可能性がある。

測定結果が妥当でなければ、よくない点を被験者にわかるように十分説明し、検査を繰り返す。

・再現性の確認と結果の採択

妥当な測定結果が3つ得られたらフローボリューム曲線のパターンを比較する。最大努力をした結果

注5：先に肺活量測定を行っている場合、VCを呼出量の目安として声がけをする。

表3 努力肺活量測定の妥当性・再現性と採択基準

	基準
妥当性	<p>①フローボリューム曲線のパターンで、検査全般に十分な努力が得られており（最大吸気、すばやい呼気開始、ピーク、呼気の持続）、アーチファクト（呼気早期の咳、声出しなど）がないこと</p> <p>②呼気開始が良好であること</p> <ul style="list-style-type: none"> ・外挿気量がFVCの5%あるいは150mLのうちいずれか大きい方の値より少ないこと <p>③十分な呼気ができていること</p> <ul style="list-style-type: none"> ・時間一気量曲線が2秒以上プラトー*に達している あるいは ・プラトーにならない場合は十分な呼気時間（15秒以上、あるいは6秒以上で被験者が呼気を持続できなくなるまで）であること
再現性	<p>3回以上の妥当な測定結果のうち、最良のフローボリューム曲線（ベストカーブ）と次によいフローボリューム曲線（セカンドベストカーブ）のFEV₁の差とFVCの差がそれぞれ200mL以内であること</p>
採択	<p>最良のフローボリューム曲線（ピークが高く、ピークに到達するまでの呼気量が少なく、最大努力の得られているもの）をベストカーブとし、その測定結果を採択する。ベストカーブ選択にあたり、FEV₁+FVCの和が大きいことも参考にする。</p>

*：プラトーとは時間一気量曲線（スパイログラム）が2秒以上上下なく水平な場合をいう。

ではほぼ同じ曲線パターンとなる。そのうち、ピーク到達までの呼気量が少なく、ピークが高く、呼気努力の最も良好な曲線をベストカーブとし、次に良好な曲線をセカンドベストカーブとする。ベストカーブの決定にあたってはFEV₁とFVCの和がより大きいことも参考にする。さらに、ベストカーブのFEV₁とセカンドベストカーブのFEV₁の差が200mL以内であること、かつ、両者のFVCの差が200mL以内であれば再現性があると判断し、ベストカーブの測定結果を採択して検査終了とする。

閉塞性換気障害があると、最大努力をしたときより少し弱い呼気をしたときの方がFEV₁が大きくなることがある。このようなときは、ピーク到達までの呼気量がより少なく、ピークがより高いフローボリューム曲線をベストカーブとしその結果を採択する（図4-B）。

再現性が悪い場合、採択の判断が難しい場合は検査を繰り返す。最大8回まで検査を行う。

③検査の流れ

検査はVC測定を先に行い、次にFVC測定を行う。FVCがVCよりも5%を越えて大きい場合はVC測定の努力不足が考えられるため再検査する。

④再現性が得られない場合の結果の採択

・2回の良好な結果に再現性がない

一般に、呼吸機能検査の測定結果のばらつきは健常者では小さいが閉塞性肺疾患患者では大きい。また、気管支喘息などでは努力呼気により気道れん縮が起こり、測定を繰り返すごとに閉塞が強くなることがある。すなわち妥当な測定は得られても再現性が確認できないことがある。その場合は再現性にこ

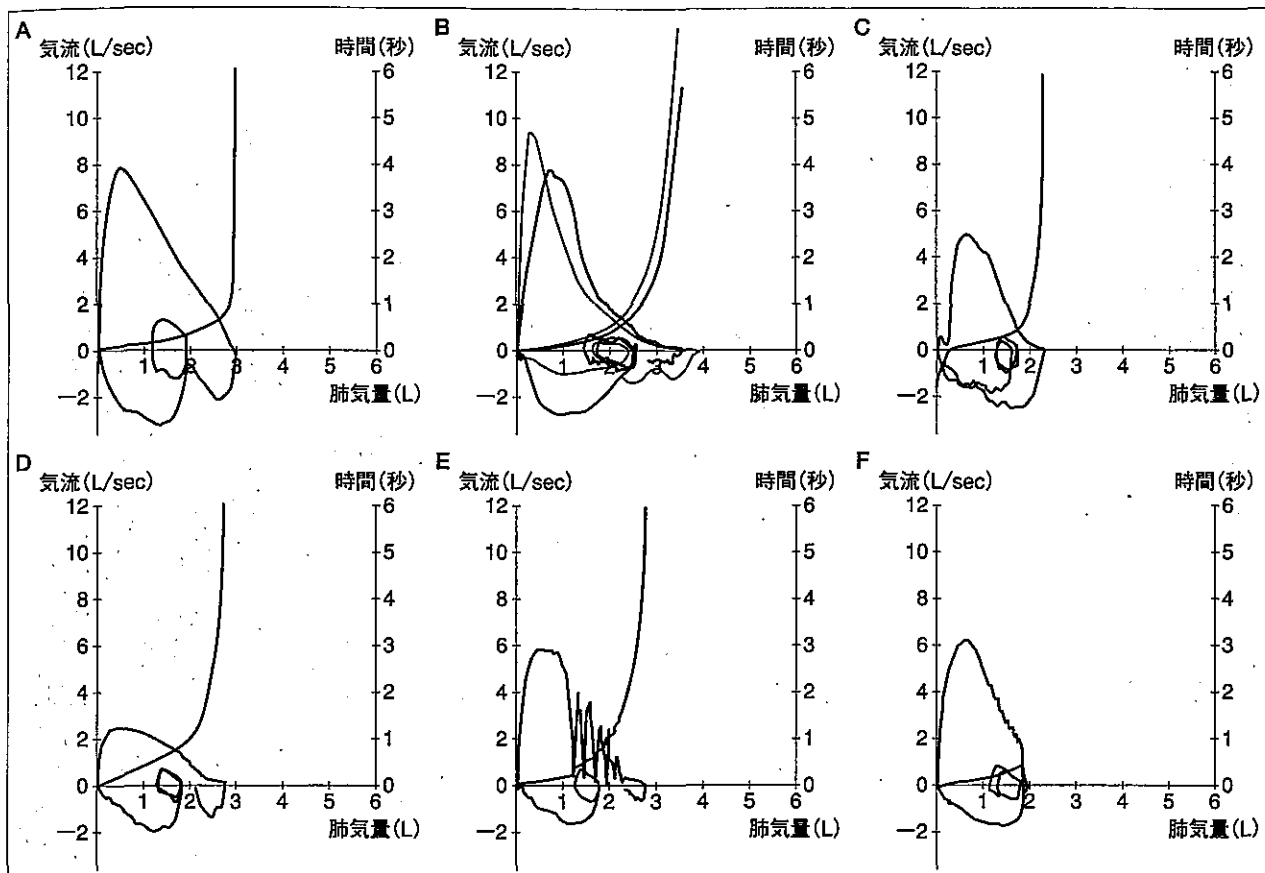


図4 良好なフローボリューム曲線と不良な曲線の例

- A: 良好例。
- B: 呼気開始不良。
- 黒線: 不良例、ピークが低くピークまでの呼気量が多い。外挿気量は200mLでFVCの5.7%、呼気時間は5.8秒と短くプラトーに達していない (FEV₁ 2.64L、FEV₁/FVC 75%)。色線: 同じ被験者の良好例、外挿気量は80mLでFVCの2.1% (FEV₁ 2.47L、FEV₁/FVC 65%)。不良例の方がFEV₁は多いが妥当な測定とはいえない。呼気努力不十分で閉塞性換気障害が見落とされている。
- C: 呼気開始不良。少し呼気してから最大呼気している。
- D: 呼気が弱くピークがない。
- E: 呼気早期に咳。
- F: 呼気途中の声門閉鎖。

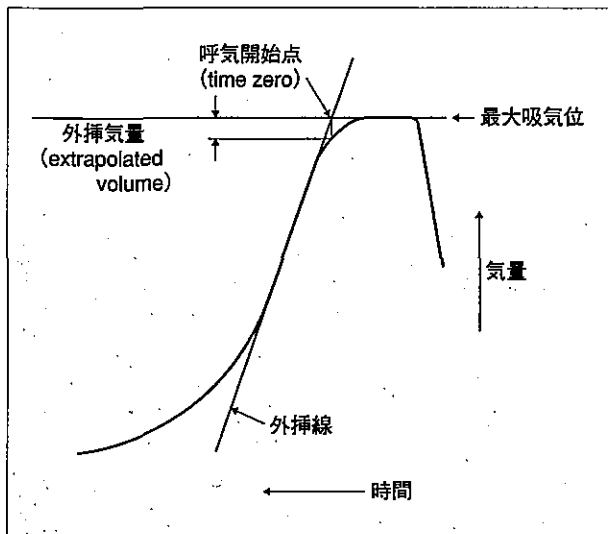


図5 外挿気量

努力呼気曲線の最大の傾き部分の直線を延長し、最大吸気位と交わる点を努力肺活量の呼気開始点 (time zero) とする。呼気開始点における呼気量を外挿気量 (extrapolated volume) という。外挿気量がFVCの5%あるいは150mLのどちらか大きい方以上の場合は、呼気開始が不良と判断する。

だわらず、最大肺活量、ベストカーブを採用し、採択理由を報告書に記載する。

・ 1 回しか良好な結果が得られない

患者の状態から十分な検査回数が実施できない、あるいは要領の悪さから 1 回しか妥当な結果が得られない場合は、その 1 回の結果を採択しその理由を報告書に記載する。

なお、患者の理解があり疲労がなければ検査回数の上限を越えてもよい。

4. 気道可逆性検査

気管支拡張薬の吸入前後にFEV₁を測定し、その改善の割合を計算することによって気道可逆性の程度を判定する。この検査は気管支喘息など気流制限がある被験者が対象であり、気管支拡張作用のある薬剤を中止して検査するため、強制呼気を繰り返すと気道がれん縮して測定結果が漸減していくことが多い。これを避けるため、測定前に呼気のしかたを十分に指導して測定回数を最小限にするように努め

る。

①被験者への注意事項

気道可逆性に影響する薬剤はあらかじめ検査前に中止するよう指導する。薬剤により作用持続時間が異なるため、薬剤ごとに具体的な中止時期を説明する(表4)。検査当日は指示どおり薬剤を中止してきたか否かを確認する。

②気道可逆性検査に使用する薬剤

一般に短時間作用型のβ₂刺激薬を用いる。1回常用量をスプレー併用の定量噴霧吸入器(MDI: metered dose inhaler)あるいは加圧式ネブライザーを用いて吸入させる。抗コリン薬を吸入する場合もある(表5)。

③測定手順

①努力肺活量測定(吸入前)を実施する

努力肺活量測定を行い妥当性のある測定からベストカーブを採択する(3の②努力肺活量検査の測定

表4 気道可逆性検査前に中止する薬剤

	薬剤	休薬期間
β ₂ -刺激薬	吸入β ₂ -刺激薬(短時間作用型)	8時間
	吸入β ₂ -刺激薬(長時間作用型)	24時間
	内服β-刺激薬	24時間
	β-刺激薬(貼付型)	24時間
抗コリン薬	吸入抗コリン薬(短時間作用型)	8時間(12時間が望ましい)
	吸入抗コリン薬(長時間作用型)	36時間以上(48時間が望ましい)
キサンチン製剤	テオフィリン製剤(1日2回投与の薬剤)	24時間
	テオフィリン製剤(1日1回投与の薬剤)	48時間
ステロイド	吸入ステロイド薬	12時間
	ステロイド(内服、注射)	24時間
抗アレルギー薬	抗ロイコトリエン薬	48時間
	抗ヒスタミン薬	24時間
	抗アレルギー薬(1日2回投与の薬剤)	24時間
	抗アレルギー薬(1日1回投与の薬剤)	48時間
	吸入クロモグリク酸ナトリウム	12時間

表5 気道可逆性検査に使用する代表的な吸入気管支拡張薬

気管支拡張薬	吸入方法	投与例 (成人)	吸入後の検査
短時間作用型β ₂ -刺激薬	スプレーサー併用MDI*で吸入	硫酸サルブタモール 2吸入 (200μg) 塩酸プロカテロール 2吸入 (20μg)	15~30分後
吸入用短時間作用型β ₂ -刺激薬	加圧式ネブライザーで吸入	硫酸サルブタモール0.3~0.5mL (1.5~2.5mg)	
短時間作用型抗コリン薬	スプレーサー併用MDIで吸入	臭化オキシトロピウム 2吸入 (200μg) 臭化フルトロピウム 2吸入 (60μg) 臭化イプラトロピウム 2吸入 (40μg)	30~60分後

*: MDI: metered dose inhaler 定量噴霧吸入器

手順 p.14参照)。

②気管支拡張薬を吸入させる

気管支拡張薬を吸入させる。吸入終了時をゼロとしタイマーで時間を計測する。

③努力肺活量測定 (吸入後) を実施する

β₂-刺激薬吸入後15~30分後 (抗コリン薬吸入後30~60分後) に努力肺活量測定を行い、妥当性のある測定からベストカーブを採択する。

④改善率と改善量を計算する

吸入前後のFEV₁を用いて以下の式で改善率と改善量を計算する。

$$\text{改善率} = \frac{\text{吸入後のFEV}_1 - \text{吸入前のFEV}_1}{\text{吸入前のFEV}_1} \times 100 (\%)$$

$$\text{改善量} = \text{吸入後のFEV}_1 - \text{吸入前のFEV}_1 (\text{mL})$$

推奨文献

- 1) American Thoracic Society: Standardization of spirometry-1994update. *Am J Resp Crit Care Med* 1995; 152: 1107-1136
- 2) American Thoracic Society: Standardization of spirometry-1987 update. *Am Rev Resp Dis* 1987; 136: 1285-1298
- 3) Quanjer PH, Tammeling GJ, Cotes JE, et al: Lung volumes and forced ventilatory flows: Report working party standardization of lung function tests European community for steel and coal. Official statement of the European Respiratory Society. *Eur Respir J* 1993; 16 Suppl: 5-40
- 4) 肺機能セミナー: 臨床呼吸機能検査 1998年改訂版. 1998
- 5) Hughes JMB, Pride NB: Lung function tests: Physiological principles and clinical applications. WB Saunders, UK, 1999
(日本語訳)
福地義之助(監): 肺機能検査; 呼吸生理から臨床応用まで. メディカル・サイエンス・インターナショナル, 東京, 2001
- 6) 吸入試験標準化研究会および「吸入試験標準化に関する研究」班: 気管支喘息および過敏性肺臓炎における吸入試験の標準法. *アレルギー* 1982; 31: 1074-1076
- 7) NHLBI/WHO Workshop Report; Global Initiative for Chronic Obstructive Lung Disease (GOLD), Update 2003
- 8) NHLBI/WHO Workshop Report; Global Initiative for Asthma (GINA), 2002

スパイロメトリーとフローボリューム曲線

(5) 結果の解釈

1. スパイロメトリー

① 正常/異常の判定

肺活量は正常予測値の80%、1秒率は性別、年齢、身長に関係なく70%を正常限界とする。肺活量が正常予測値の80%未満である場合は拘束性換気障害、1秒率が70%未満の場合は閉塞性換気障害と判定し、両方が認められた場合は混合性換気障害と判定する(図1)。

なお、予測1秒量に対する1秒量の比率(%)は慢性閉塞性肺疾患(COPD)の重症度判定に、予測肺活量に対する1秒量の比率(%) (予測肺活量1秒率)は身体障害者障害程度等級表による呼吸機能障害の程度判定に使われている。

日本呼吸器学会肺生理専門委員会が2001年に報告した日本人の正常予測式(18歳以上)を表1に示す。

表1

	VC(L)	$=0.045 \times \text{身長(cm)} - 0.023 \times \text{年齢} - 2.258$
男性	FVC(L)	$=0.042 \times \text{身長(cm)} - 0.024 \times \text{年齢} - 1.785$
	FEV ₁ (L)	$=0.036 \times \text{身長(cm)} - 0.028 \times \text{年齢} - 1.178$
女性	VC(L)	$=0.032 \times \text{身長(cm)} - 0.018 \times \text{年齢} - 1.178$
	FVC(L)	$=0.031 \times \text{身長(cm)} - 0.019 \times \text{年齢} - 1.105$
	FEV ₁ (L)	$=0.022 \times \text{身長(cm)} - 0.022 \times \text{年齢} - 0.005$

この予測式は18歳から95歳までの健常者を対象に立位あるいは座位で求めたものである。わが国において肺活量の正常予測値はBaldwinらの式がこれまで広く使われてきた。しかし、測定体位が仰臥位であること、対象に80歳以上の高齢者が含まれていな

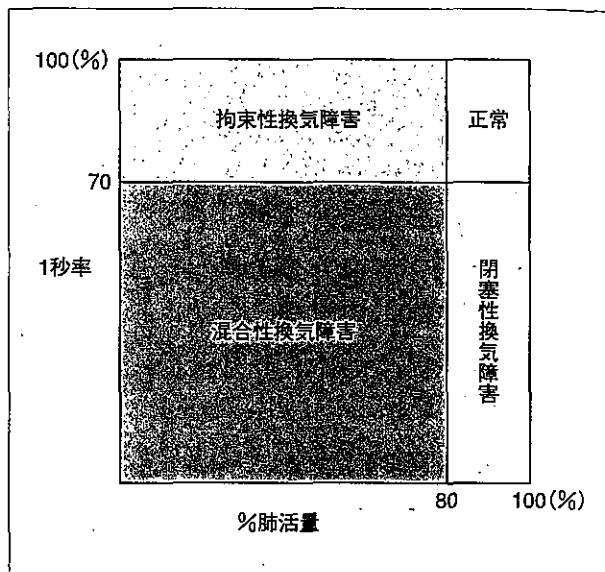


図1 換気障害の分類

%肺活量(正常予測値に対する%)をX軸に、1秒率をY軸にとり、%肺活量が80%未満、1秒率が70%未満を異常として換気障害を4つに分類する。

閉塞性換気障害を呈する代表的疾患であるCOPDでは、初期は閉塞性換気障害を呈するが、気流制限が高度に進行した状態では、1秒率だけでなく肺活量も減少し、混合性換気障害になる。これは閉塞性肺疾患と拘束性肺疾患が混在していることを意味しない。病態の進行に伴い残気量が全肺気量の増加以上に増えるため、両者の差である肺活量が減少することによる。拘束性肺疾患では肺活量の減少だけでなく、全肺気量も減少する。拘束性換気障害=拘束性肺疾患、閉塞性換気障害=閉塞性肺疾患などと1対1に対応して解釈してはいけない。

いなどの欠点があり、その予測値は上記予測式のそれより10~15%低い。したがって、表1に示した日本人の正常予測式を用いるべきである。

② 肺活量に影響を及ぼす因子

・生理的因子

予測式からも明らかのように性、身長、年齢の影響を受ける。また、高度の肥満者では肺活量が減少する。これは主に予備呼気量(安静呼気位から最大

呼気位までの気量)が減少することによる。

また、肺気量分画は体位の影響を受ける。仰臥位の肺活量は立位あるいは座位のそれに比べて7~8%低い(図2)。そのため、肺活量の実測値を比較する場合は測定体位に注意する。

・病的因子

肺活量は最大吸気位の気量(全肺気量)と最大呼気位の気量(残気量)の差である。したがって、肺活量が減少しているときは、①全肺気量と残気量の両方が減少している、②全肺気量が正常でも残気量が増加している、③全肺気量の増加以上に残気量が増加している場合がある。

1) 全肺気量に影響を及ぼす病的因子

・肺内の異常

全肺気量の減少は、肺弾性力の増大(肺線維症)、肺コンプライアンスの低下(肺水腫)、肺容量の減少(片肺摘出術後)などで起こる。限局性の無気肺は残存肺が代償性に拡張するので肺気量への影響は少ない。全肺気量の増加は肺弾性力の減少(COPD特に気腫優位型)により起こる。

・肺外の異常

全肺気量の減少は、胸水、胸膜肥厚、心拡大などによる肺の拡張不全、脊椎側弯症・漏斗胸などの胸郭変形、腹部膨満、高度の肥満、横隔膜を含む呼吸筋筋力低下などで起こる。

2) 残気量に影響を及ぼす病的因子

・肺内の異常

残気量の増加は、肺弾性力の減少による気流制限(COPDの気腫優位型)、末梢気道の狭窄(COPD、閉塞性細気管支炎、びまん性汎細気管支炎)、気道れん縮(気管支喘息)により起こる。高度に進行したCOPDでは全肺気量は増加するが、残気量の増大

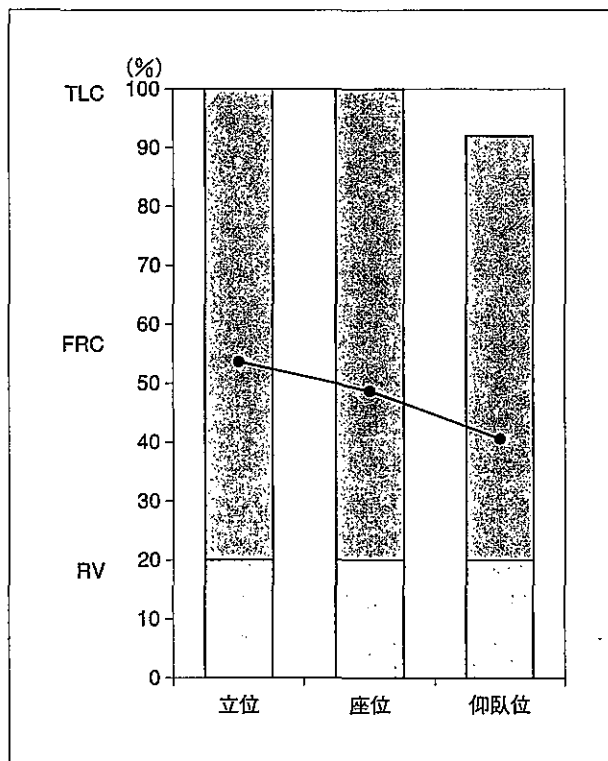


図2 体位による肺気量分画の変化
横軸は測定体位を、縦軸は%TLC、FRC、RVを示す(□=RV、▨=VC、●=FRC)。いずれの体位でも残気量(RV)はほとんど変化しないが、全肺気量(TLC)と機能的残気量(FRC)は仰臥位で減少する(FRCの方がより多く減少する)。これは内臓が横隔膜を頭側へ押し上げるためである。肺活量(VC)は立位に比べて仰臥位では7~8%減少する。(文献6より改変引用)

の方がより大きく、肺活量は減少する。肺弾性力が増加すると(肺線維症)、全肺気量、肺活量、残気量はいずれも減少する。

・肺外の異常

残気量の増加は、呼吸筋筋力低下(神経筋疾患)でみられる。

③ 1秒量と1秒率に影響を及ぼす因子

・生理的因子

1秒量は肺気量(肺活量)により規定されるため、肺活量同様に性、身長、年齢の影響を受ける。一方、1秒率は1秒量を努力肺活量(あるいは肺活量)で除すため、これらの影響は少ない。

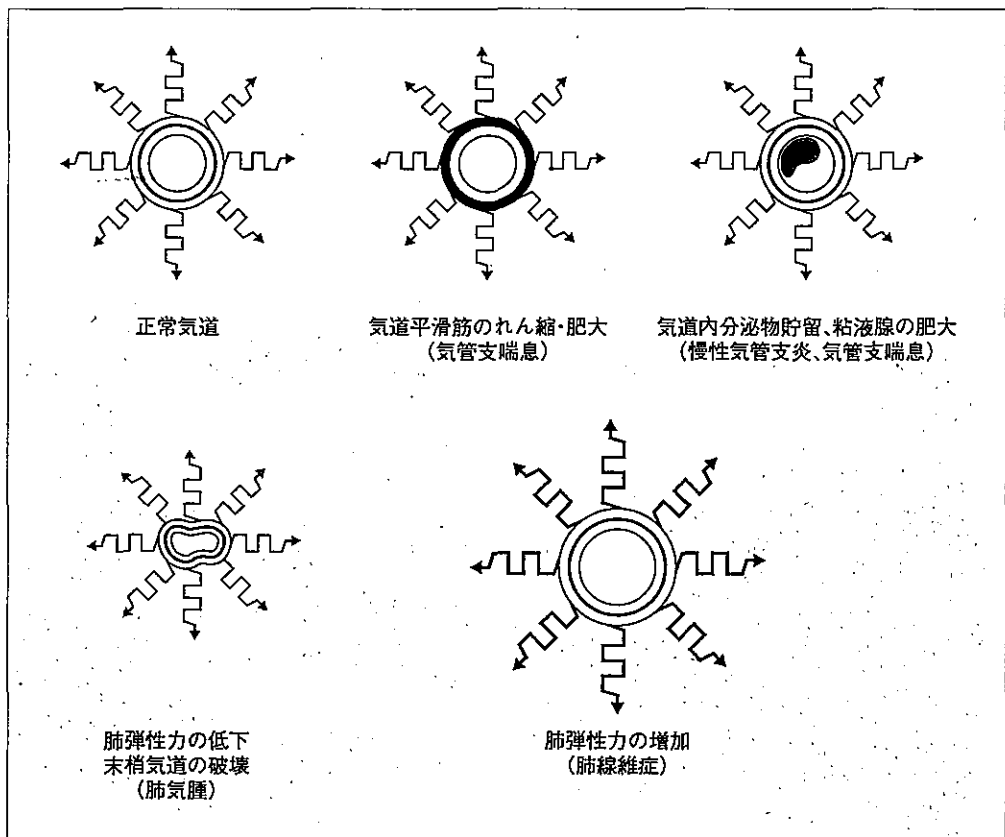


図3 気道径に影響を及ぼす因子

肺弾性力は、肺自体が内側へ縮まる方向に作用するが、気道に対しては引っ張る方向に作用する。高肺気量ほどその傾向は大きい。そのため、肺弾性力が低下した高度の肺気腫では高肺気量位で呼吸しないと気道は閉塞してしまう。→は肺弾性力とその方向を示す。

・病的因子

1秒量は肺気量と気道閉塞により規定される。一方、1秒率は肺気量の影響が除かれているので気流制限、すなわち閉塞性障害の程度を反映する。

1秒率の低下を引き起こす主要因は気道径の減少である。気道径の減少は、気管支平滑筋の肥大やれん縮(気管支喘息)、気道内の分泌物の増加(COPD、気管支喘息)、肺弾性力の低下(COPDの気腫優位型)により引き起こされる(図3)。肺弾性力は気道を外側に牽引する方向に作用しているため、肺弾性力が低下すると気道は虚脱しやすくなる。この現象は呼気に起こりやすい。高度に進行したCOPD(気腫優位型)では肺弾性力の減少とともに気道を支える肺胞壁の広範な破壊により気道閉塞が起こりやすくなる。

④Air-trapping Index (ATI)

健康者では肺活量と努力肺活量はほぼ等しいが、肺気腫や気管支喘息など気流制限があると呼気が不十分な状態で終了するため努力肺活量は肺活量に比べて減少する。この現象を空気のとらえこみ(air-trapping)現象といい、Air-trapping Indexで表記される。

$$\text{Air-trapping Index (\%)} = [(VC - FVC) / VC] \times 100$$

健康者では5%以下である。

空気のとらえこみ現象があると、1秒量、1秒率、最大換気量はいずれも低下する。

⑤気道可逆性の評価

気管支拡張薬吸入前後の1秒量の改善の程度は、絶対量の変化と改善率から判定する。

改善量 = 吸入後のFEV₁ - 吸入前のFEV₁ (mL)

$$\text{改善率} = \frac{\text{吸入後のFEV}_1 - \text{吸入前のFEV}_1}{\text{吸入前のFEV}_1} \times 100 (\%)$$

気管支拡張効果判定基準：

改善量 ≥ 200mL かつ 改善率 ≥ 12%

上記の基準を満たした場合、「気道可逆性あり」と判定する。なお、気道可逆性の有無やその程度からCOPDと気管支喘息を必ずしも鑑別することはできない。他の所見と併せ総合的に判断する。

2. フローボリューム曲線

フローボリューム曲線を測定するときは、被験者が最大努力呼気をすることが大前提であり、最大努力呼気がなされていればフローボリューム曲線の再現性は高い。努力呼気時の気流量を決める主な因子は、肺気量、肺弾性力、気道抵抗、呼吸筋筋力である。COPDの気腫優位型（肺弾性力の減少）、気管支喘息やびまん性汎細気管支炎（気道抵抗の増加）、神経筋疾患（呼吸筋筋力低下）などでは、それぞれの疾患に特徴的なフローボリューム曲線を呈する。

①正常/異常の判定

フローボリューム曲線から得られる測定項目のなかでPEF、 \dot{V}_{50} 、 \dot{V}_{25} およびその比（ $\dot{V}_{50}/\dot{V}_{25}$ ）以外の項目の臨床的意義は少ない。

これらの項目の正常予測値はばらつきが大きく、数値から単純に異常と判定することは困難である。それは、年齢、性、体重、身長、そして肺活量を一

致させても気道径に個人差があるためと考えられている。そのため $\dot{V}_{50}/\dot{V}_{25}$ を求め4以上を異常と判断することが多い。いずれにせよ、それぞれ単独の測定項目として判断するのではなく、フローボリューム曲線パターンから総合的に異常と正常を判断する。

PEFは気管支喘息患者の治療管理上の指標として汎用されているが、この場合フローボリューム曲線から得られるPEFではなくピークフローメータにより測定されることが多い。両者のPEF値は表現単位も異なり、測定精度も同一ではないことに注意が必要である（1-(1)用語の定義 p.4参照）。

②各指標の生理学的意味

PEFの低下は呼吸筋筋力の低下、肺気量の減少、中枢気道（主に気管・葉気管支付近）の内径の減少（抵抗の増加）などを反映する。一方、気道閉塞疾患では閉塞部位が中枢や末梢にかかわらずPEFは低下する。1秒率が70%以上であっても、フローボリューム曲線の下行脚が下に凸パターンを示すときは、閉塞性換気障害を示唆する。その場合、 $\dot{V}_{50}/\dot{V}_{25}$ の増加（4以上）を末梢気道気流制限の早期診断の指標として用いることもある。

推奨文献

- 1) J B West (著), 堀江孝至 (訳): 呼吸の生理と病態生理. メディカル・サイエンス・インターナショナル, 東京, 2002
- 2) J B West (著), 笛木隆三, 富岡眞一 (訳): 呼吸の生理 (第3版). 医学書院, 東京, 1997
- 3) JMB Hughes, NB Pride (著), 福地義之助 (監訳): 肺機能検査. メディカル・サイエンス・インターナショナル, 東京, 2001
- 4) 日本呼吸器学会肺生理専門委員会報告: 日本人のスパイログラムと動脈血液ガス分圧基準値. 日本呼吸器学会雑誌2001; 39 (巻末)
- 5) 瀧島 任, 中村雅夫, 千代谷慶三: 呼吸機能検査の測定方法 (第2版). 真興交易医書出版部, 東京, 1991
- 6) Mead J: Statics of the respiratory system. Handbook of Physiology "Respiration I". Am Physiol Soc 1964; 368
- 7) 厚生省免疫アレルギー研究班: ピークフロー日本人標準値. 喘息予防・管理ガイドライン. 協和企画通信, 東京, pp.140-143, 1998

異常値を呈する疾患の鑑別

1. はじめに

呼吸機能検査は、肺の機能的な面での異常を知る唯一の検査である。呼吸機能検査により、①機能異常の有無の判定、②機能異常の部位の診断（気道、肺実質、肺循環、中枢あるいは末梢気道など）、③異常の定量的な評価や時間的変化をみることができる。これらを評価することにより、まず疾患の鑑別診断に機能面から役立て、疾患の重症度の判定を行い、呼吸不全の有無を判断し、さらに経過観察と治療効果の判定を行うことができる。また、そのほかにも疫学的調査への利用なども挙げられる。

しかしながら、呼吸機能検査は機能評価を行うものであり、解剖学的、細菌学的、病理学的な評価はできず、画像検査や気管支鏡検査などの他の臨床検査に取って代わるような万能のものではない。たとえば、VCの低下があり拘束性の障害が証明されても、それが特発性肺線維症によるものかサルコイドーシスによるものかはわからない。そのためには、画像診断や組織診断が必要である。

このような目的で考えると、日常の臨床に有用な呼吸機能検査とは、どのような施設でも簡単に短時間で正常肺と異常肺を区別でき、しかも検査に特別な熟練を要さず、比較的安価なものでなければならない。このような条件に最も合う検査は、スパイロメトリーである。ここでは、スパイロメトリーを中心に呼吸機能検査の評価について述べる。

2. スパイロメトリー

図1にスパイロメトリーの評価の手順を示す。スパイロメトリーでは、換気機能異常の有無をまず判定するが、スクリーニングとしては、%VCとFEV₁/FVCを評価し、%VCが80%未満なら拘束性換気障害、FEV₁/FVCが70%未満なら閉塞性換気障害、両者があれば混合性換気障害と判定する。

この段階で大切なのは検査が適切に行われているかどうかのチェックである。そのためには、フローボリューム曲線の形より、呼出早期のFVCが100~70%程度の肺気量位にきちんとピークフローが出ているか、その後も呼出を順調に行っているか、途中でやめずに最後まで呼出しているかなどを検証する必要がある。

①閉塞性換気障害

閉塞性換気障害は気道の狭窄による通過障害であり、FEV₁、FEV₁/FVCの低下が特徴である。標準値に対するFEV₁の割合(%FEV₁)も重要な指標である。しかし、%FEV₁で評価すると、拘束性換気障害でVCの低下がある症例も%FEV₁の低下として含まれるため、閉塞性換気障害の有無はまずFEV₁/FVCで判断する。次にその程度を評価するときには%FEV₁を用いる。COPDの国際的ガイドラインであるGOLDでも、重症度分類には%FEV₁が用いられている。

次に、閉塞部位が上気道か下気道（肺内気道）かを鑑別するが、呼吸機能上はフローボリューム曲線

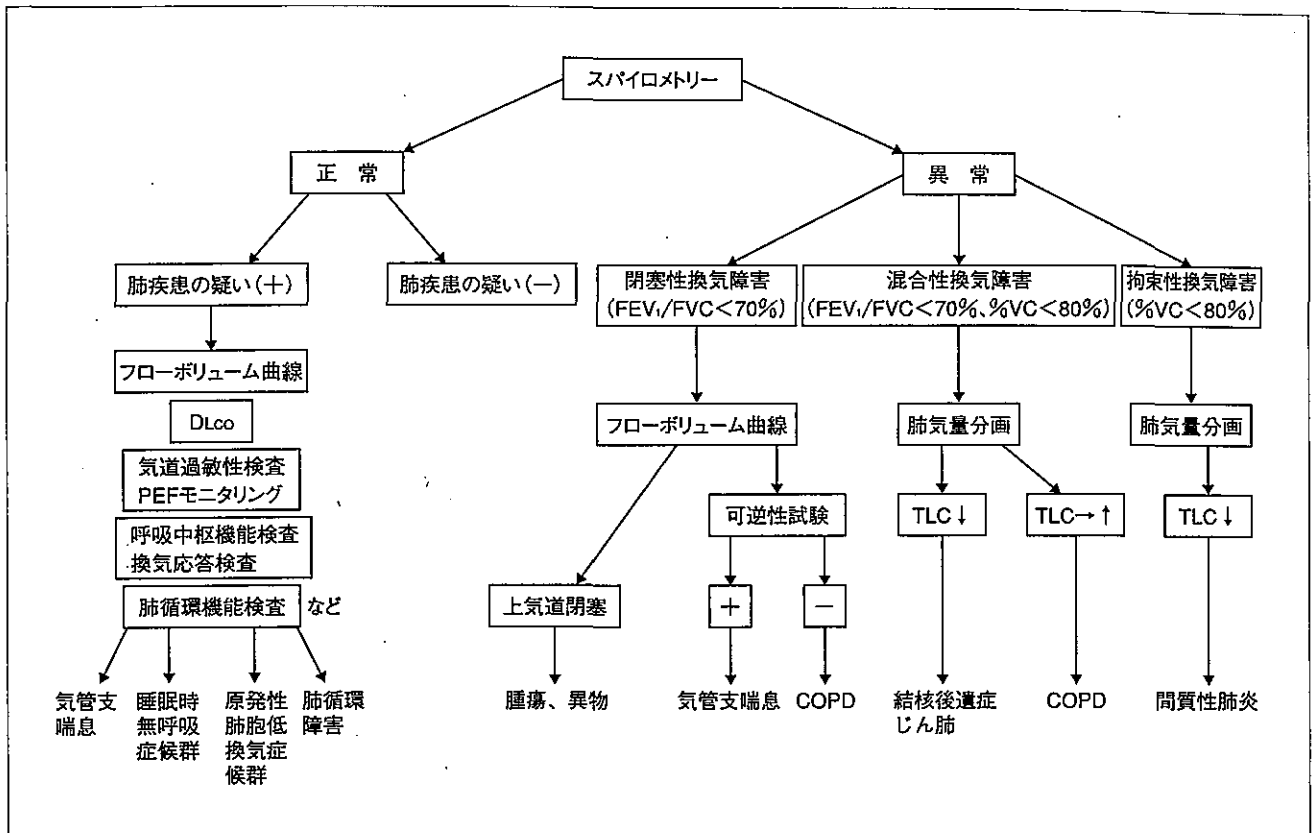


図1 スパイロメトリーから異常を解釈する手順(代表的呼吸器疾患を示す)

のパターンから判断する。典型的な上気道閉塞では、いわゆる台形型を示すが、疑わしいときは積極的に内視鏡、画像検査を併用すべきであろう。代表的なものとしては、腫瘍、異物などがある。

肺内気道の閉塞性障害の早期には、フローボリューム曲線の \dot{V}_{50} 、 \dot{V}_{25} などが低下し、進行してくるとスパイロメトリーでは FEV_1 、 FEV_1/FVC 、フローボリューム曲線ではPEFからすべての肺気量位でのフローの低下が認められるようになる。代表的な疾患としては、気管支喘息、COPDなどが挙げられる。閉塞性障害と判定したら、次にそれが可逆性かどうかの評価が必要であり気管支拡張薬吸入前後での FEV_1 の比較を行う。吸入前後の FEV_1 より次式によって FEV_1 の改善率を%で表す。

$$\text{改善率} = \frac{\text{吸入後の} FEV_1 - \text{吸入前の} FEV_1}{\text{吸入前の} FEV_1} \times 100 (\%)$$

改善率が12%以上かつ改善量が200mL以上であれば、可逆性ありと判定する。一般的には、可逆性があれば気管支喘息を示唆するが、COPDにおいて可逆性を示す例もあるため、可逆性の有無だけでは必ずしも気管支喘息とCOPDの鑑別にはならない。一般的に気管支拡張薬吸入後の FEV_1/FVC が70%未満であればCOPDである可能性がある。しかし、重症喘息例などでは、 β_2 -刺激薬だけでは不十分で、ステロイド薬などを併用し、数日以上かかり気道狭窄が徐々に改善する症例もある。このような症例においては、ときにPEFモニタリングによる日内変動の確認が可逆性の評価に役立つことがある。つまり、

表1 スパイロメトリーに異常を来す代表的な疾患

障害のパターン	病態	代表的疾患
閉塞性換気障害	上気道	口腔内腫瘍、咽頭・喉頭腫瘍、喉頭(蓋)炎
	気道閉塞 下気道	気管支喘息、COPD、びまん性汎細気管支炎、再発性多発軟骨炎、気管異物、気管腫瘍、肺リンパ脈管筋腫症、閉塞性細気管支炎(特発性、続発性)、肺水腫
拘束性換気障害	支持組織の脆弱性	COPD
	肺の弾性の低下	特発性肺線維症、間質性肺炎、放射線肺臓炎、過敏性肺臓炎、肺好酸球性肉芽腫症、じん肺症、サルコイドーシス、肺胞蛋白症、肺泡微石症、肺アミロイドーシス
	肺容量の減少	肺葉切除後、肺腫瘍
	胸郭、胸膜病変	胸膜炎、胸膜肥厚、胸膜中皮腫、気胸、血胸
	呼吸運動、呼吸筋力の障害	重症筋無力症、神経筋疾患、肥満による低換気症候群
	高度の胸郭の変形	後側弯症、横隔神経麻痺
	浮腫	肺水腫
その他	肥満	

臨床診断における総合的な可逆性の判定は、1回の気管支拡張薬吸入によるFEV₁の変化をみることのみで決定されるのではない。

可逆性のない閉塞性障害がある場合は、COPDである可能性が高いが、閉塞性細気管支炎やびまん性汎細気管支炎なども鑑別に挙がる。COPD(気腫優位型)はフローボリューム曲線のパターンからも認識できる。また、過膨張を反映して肺気量分画でのTLC、FRC、RV、RV/TLCの増加がみられる。さらに、気腫優位型ではDLco、DLco/VAの低下、静肺コンプライアンスの上昇などの異常がみられる。しかし、気道病変優位型のCOPDと閉塞性細気管支炎やびまん性汎細気管支炎との鑑別は呼吸機能検査だけからは難しく、臨床所見や画像所見を参考にし、総合的に診断する。

以上の閉塞性換気障害を呈する代表的な疾患を表1に挙げる。

②拘束性換気障害

拘束性換気障害は肺の容積が縮小する異常であり、

肺活量の減少が特徴(%VC<80%)である。VCの減少のほか、各肺気量分画の減少、肺拡散能(DLco)の低下、静肺コンプライアンスの低下などを伴う。代表的な疾患としては、表1に示したようなものがあるが、起こり方としては肺線維症などの肺が硬くなる病気、脊椎の後側弯などの胸郭の運動制限、神経筋疾患などの呼吸筋力の低下などが挙げられる。

肺の弾性低下に伴う拘束性換気障害ではFEV₁/FVCや \dot{V}_{50} はむしろ増加する傾向がある。

③混合性換気障害

混合性換気障害には以下の3つの場合がある。

- ①疾患自体が閉塞性要素と拘束性要素を併せもつ混合性のものである場合(じん肺、結核後遺症など)、
- ②閉塞性換気障害を来す疾患と拘束性換気障害を来す疾患が合併している場合(COPDと間質性肺炎、COPDと神経筋疾患など)、
- ③みかけ上、拘束性換気障害を呈する場合(COPD(気腫優位型)では閉塞性換気障害が高度になると、RVの増加のためにVCが減少し、スパイロメトリーだけの評価ではみ

かけ上混合性障害を呈することがある。このような症例では、肺気量分画の測定やフローボリューム曲線のパターンの評価をする必要がある。）

④正常の場合

スパイロメトリーが正常であっても、症状、身体所見、画像、動脈血ガスなどから肺・胸郭系の疾患が疑われることがある。このようなときは、スパイロメトリー、動脈血ガス分析のほかに図1左列に示したような呼吸機能の精査を行う。

(1)気管支喘息

寛解期は閉塞性換気障害を示さない症例もよくある。このようなときは、可逆性検査を行っても意味がないことが多い。気管支拡張薬吸入前の FEV_1 と改善率との間には逆相関があり、もともと気道狭窄がない症例では改善率は低いからである。このような症例では、可逆性よりも気道過敏性を測定した方がよい。気道過敏性はヒスタミンやアセチルコリンを吸入させ、 FEV_1 や呼吸抵抗 (Rrs) の変化で評価する。また、PEFをモニタリングし日内変動や日々変動より可逆性を評価することも有用である。

(2)末梢気道病変

スパイロメトリー上 FEV_1 の低下がなくとも、 \dot{V}_{25} ・ \dot{V}_{50} などのフローボリューム曲線の低肺気量位での気流低下がみられる場合には、末梢気道における気流制限が考えられる。

(3)原発性肺胞低換気症候群

スパイロメトリー、フローボリューム曲線で特に異常を認めず、低酸素血症のあるときは、呼吸中枢機能の異常の可能性も考えて、呼吸中枢機能検査や低酸素、高炭酸ガス負荷による換気応答を検査する。

(4)肺血栓・塞栓症、肺循環障害

スパイロメトリー、フローボリューム曲線で特に異常を認めず、低酸素血症を呈する場合、肺循環障害を鑑別する必要がある。これらの症例では、特に労作時に症状を呈することが多く、運動負荷試験が有用である。また、DLcoのみの異常を呈するときは、肺血管障害や肺気腫、間質性病変の初期像を疑う根拠となる。

(5)睡眠時無呼吸症候群

病歴から睡眠時無呼吸症候群が疑われても、覚醒時の呼吸機能検査では合併症の評価しかできず、確定診断はできない。ポリソムノグラフィーを行う。

⑤フローボリューム曲線のパターン分析 (図2)

(1)正常パターン

正常非喫煙者の気流は残気量位まではほぼ直線的に減少する。

(2)COPD (気腫優位型) パターン

全肺気量位にわたって気流は著明に低下する。これは肺胞弾性収縮圧低下と末梢気道抵抗の増大による。

(3)気管支喘息パターン

気道平滑筋収縮、粘膜浮腫、粘液分泌亢進などにより気管支の断面積が縮小するため、気流は肺気量全域にわたって直線的に低下する。

(4)肺線維症パターン

気道障害を伴わない場合は気流の低下はなく、低肺気量位ではむしろ上昇する傾向にある。これは肺弾性収縮力が高まった結果生ずる現象で、病変が進むと FEV_1/FVC もむしろ上昇する傾向がある。拘束性障害のために努力肺活量は低下するので、上に尖った凸の形になる。

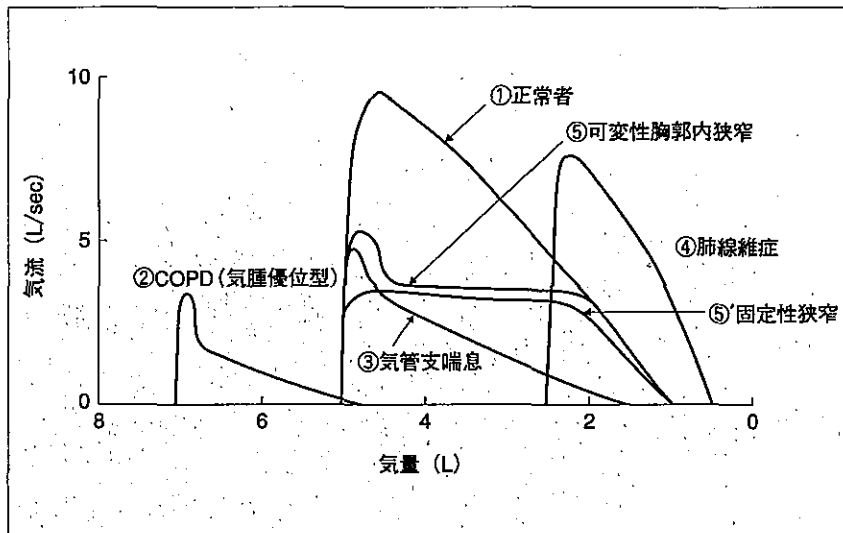


図2 フローボリューム曲線のパターン分析

(5) 上気道閉塞パターン

悪性腫瘍や炎症性癬痕などによる中枢気道狭窄で見られる。狭窄部位、程度、狭窄部位のつぶれやすさによりフローボリューム曲線の形はやや異なる。狭窄部位が胸郭内で柔らかい場合 (5) は、呼気前～前半部にプラトー形成を認め、その後正常となる。一方、狭窄の程度が強く狭窄部位が堅い場合 (5') は、気流は平坦化する。上気道狭窄を疑ったときには、吸気フローボリューム曲線も有用である。曲線のピークが消失し呼気と同様にプラトーを形成する。

3. DLco

DLcoの測定結果には肺胞膜の拡散機能のみならず、COと赤血球内のHbとの化学反応の関与、ガス交換にあずかる肺毛細血管量つまり有効な肺毛細血管床の機能なども反映されている。したがって、DLcoは以下の式のように、肺胞膜での拡散能力(DM)と血液側の拡散能力($D_B = \theta \cdot V_c$)に分けて表される。

$$1/DLco = 1/D_M + 1/(\theta \cdot V_c)$$

θ : 血漿から赤血球へのCOの移行速度

V_c : 肺毛細管血液量

DLcoが低下する代表的な疾患は表2に示したようなものである。

① 肺胞膜の障害

種々の原因による間質性肺炎(膠原病、ブレオマイシン肺臓炎や放射線肺臓炎など)や、特発性間質性肺炎(特発性肺線維症、非特異的間質性肺炎)、じん肺症、肺サルコイドーシス、粟粒結核症などでは、胞隔の肥厚によりDMが障害され、これらの重症度を反映してDLcoは低下する。したがって、DLcoはVC、肺コンプライアンスとともに診断や予後の判定に重要な検査とされている。

② ガス交換面積の減少

重症肺結核症、広範な無気肺、肺切除、肺水腫などの拘束性肺疾患のみならず、COPD(気腫優位型)などの閉塞性肺疾患でも拡散面積の減少によりDLcoは低下する。しかし、拘束性肺疾患ではVC、TLC

表2 DLcoの低下を来す代表的な疾患

1. 肺胞膜の障害
種々の原因による間質性肺炎 膠原病 ブレオマイシンなどの薬剤性肺臓炎 放射線肺臓炎 特発性間質性肺炎 じん肺症 肺サルコイドーシス 粟粒結核症
2. ガス交換面積の減少
拘束性肺疾患 重症肺結核症 広範な無気肺 肺切除 肺水腫 閉塞性肺疾患 COPD (気腫優位型)
3. 肺毛細管血液量の減少
肺血管障害 多発性肺血栓塞栓症 肺門部腫瘍による肺動脈の狭窄・閉塞
4. 血液のHb濃度の低下
貧血 CO中毒 喫煙

の減少を伴ってDLcoも低下するので、DLco/VAはほぼ正常か軽度低下にとどまる。これに対し、COPD (気腫優位型) ではVAは減少せずDLcoのみ低下するので、DLco/VAは明らかな減少を示す。

また、COPD (気腫優位型) では肺胞壁の破壊による肺毛細血管床の減少によりDLcoは低下するが、肺胞レベルの障害が少ない気管支喘息や慢性気管支炎では、DLcoは正常かまたは上昇する。

③肺毛細管血液量の減少

肺循環系の形態的・機能的障害によりVcが減少すると、DLcoも減少する。多発性肺血栓塞栓症、肺門部腫瘍による肺動脈の狭窄・閉塞、肺サルコイドーシスなどの種々の肺血管周囲の結節性病変ではDLcoが低下する。一方、軽症気管支喘息発作および僧帽弁狭窄症の初期では、軽度の肺うっ血状態を来すためDLcoはかえって上昇する。

④血液のHb濃度の低下

肺疾患以外でも貧血によるHb濃度の低下によってDLcoは低下する。また、CO中毒や喫煙後のCOHbの増加によっても、COのHbとの反応速度 (θ) が低下し、DLcoは低下する。一方、赤血球増多症ではDLcoは増加する。貧血の場合の補正式は、2-(5)結果の解釈 p.36参照。血液中のCOHb増加の場合の補正式は、2-(2)測定原理 p.29参照。

4. おわりに

呼吸機能検査の利用の実際について、スパイロメトリーを中心に述べた。スパイロメトリーは、日常の臨床においては最も重要であり、かつ多くの情報が得られるので十分に活用し、臨床症状があるにもかかわらず異常がみつからないときは、専門施設に紹介し精査を行うことが薦められる。

推奨文献

- 1) Comroe JH Jr, Nadel JA: Screening tests of pulmonary function. *N Engl J Med* 1970; 282: 1249-1253
- 2) Comroe JH Jr: Physiology of respiration. Year Book Medical Publisher Inc., Chicago, 1974
- 3) Gold WM: Pulmonary function testing. Nadel JA, Murray JF (eds): Textbook of respiratory medicine. WB Saunders Co., Philadelphia, 1994, pp. 798-900
- 4) 肺機能セミナー: 臨床呼吸機能検査 第5版. 1999