呼吸機能検査の理解と臨床応用

要 旨

呼吸機能検査は、呼吸器症状の原因を検討し、呼吸器疾患の管理をするために必須の検査である。スパイロメトリーによって、肺活量（vital capacity : VC）と1秒量（forced expiratory volume in one second : FEV₁）/努力肺活量（forced vital capacity : FVC）を測定し、閉塞性、拘束性ならびに混合性換気障害を判定する。フローボリューム曲線も病態の把握に有効である。呼吸器疾患の重症度判定や進行のモニターには、VCやFEV₁の絶対値及び予測値に対する%を参照する。より詳細な検査としては、肺気量分画や肺拡散能の測定がある。

〔日内会誌 109 : 2496～2501, 2020〕

Key words 肺活量（VC）、1秒量（FEV₁）、1秒率、肺気量分画、肺拡散能

湯澤 基

山口 泰弘

はじめに

呼吸機能検査は、代表的な生理検査の1つでありながら、省略されがちな検査でもある。確かに、急性心筋梗塞や不整脈での心電図検査のように、直ちに患者の命を左右する検査ではない。しかし、慢性閉塞性肺疾患（chronic obstructive pulmonary disease : COPD）の診断確定には、呼吸機能検査が必須である。咳や痰あるいは頻回の感冒症状等、気道症状の訴えが多いときに、去痰薬や感冒薬を出すだけでなく、少し立ち止まって、COPDや喘息等背景にある呼吸器疾患を検討しなければならない。そのようなときに、画像検査に呼吸機能検査を組み合わせることで、呼吸器症状の理解が格段に深まることが期待される。

1. スパイロメトリー

1) スパイロメトリーの概要

スパイロメトリーは、呼吸による空気の流れを時間軸で記録し、肺活量（vital capacity : VC）や1秒量（forced expiratory volume in one second : FEV₁）を測定する検査である。呼吸機能検査のなかで最も基本的な検査であるが、その解釈が意外に知られていなかったり誤解されていたりする。

スパイロメトリーの手技には2種類あり、緩徐な換気で測定した場合のSVC（slow VC）手技と、努力換気で測定した場合のFVC（forced VC、努力肺活量）手技に分けられる¹⁾。SVC手技では、VCのほか、予備呼気量（expiratory reserve volume : ERV）と予備吸気量（inspiratory reserve

自治医科大学附属さいたま医療センター呼吸器内科

Clinical Examinations: Mutual Understandings and Adequate Usage Suitable for a New Era. Topics : VI. Clinical interpretation and application of pulmonary function tests.

Motoi Yuzawa and Yasuhiro Yamaguchi : Department of Pulmonary Medicine, Jichi Medical University Saitama Medical Center, Japan.

図1 slow VC手技での肺気量分画の模式図
TV：一回換気量

volume：IRV）も測定できる（図1）。FVC手技では、最大吸気位から最大呼気努力によって一気に息を呼出させる。この手技によって、FEV₁、FVC、FEV₁/FVCやフローボリューム曲線が得られる。

2) スパイロメトリー実施の注意点

スパイロメトリーは、比較的低リスクの検査であるが、患者にできる限りの息を吐くことを強いる検査である。そのため、呼吸循環動態の不安定なケースや胸腔、腹腔、口腔内、眼あるいは頭蓋内に陽圧をかけられないケースでは慎重を要する。例えば、不安定狭心症や心筋梗塞急性期が前者の例であるし、気胸や胸部手術直後が後者の例である。また、スパイロメトリーは、本人が努力しなければ適切な測定値が得られない。十分な検査協力が得られるかも含めて、検査適応の判断や結果の解釈をしなければならない。

2. 肺活量と1秒量、1秒率

1) 肺活量

VCは、最大吸気位と最大呼気位間の肺気量に相当し（図1）、最大呼気位から吸入できる最大の肺気量を吸気肺活量（inspiratory VC：IVC）、最大吸気位から呼気できる最大の肺気量を呼気肺活量（expiratory VC：EVC）と呼ぶ¹⁾。IVCとEVCは同時に測定し、大きい方をVCとして採用するのが一般的である。VCの予測値は、年齢と共に低下し、その他、性別や身長の影響を受ける。

2) 努力肺活量

最大努力呼吸で測定したときのVCに相当する値をFVCと呼ぶ¹⁾。健康者であれば、FVCは緩徐な換気で測定したVCとほぼ同じ値で、 $[(VC - FVC)/VC] \times 100$ は5%以下である。しかし、例えばCOPDでは、力一杯の呼気努力で末梢気道が虚脱し、air trappingが起こるため、FVCが小さくなり、FVCとVCの差が大きくなることが多い。

3) 1秒量と1秒率

FEV₁は、最大努力呼気の際に呼出開始から最初の1秒間に呼出される量を指す。呼出の際、気流の抵抗が大きくなるにつれてFEV₁が低下する¹⁾。1秒率には、FEV₁/VC（Tiffeneauの1秒率）とFEV₁/FVC（Gaenslerの1秒率）があるが、通常、FEV₁/FVCが用いられる。1秒率<70%で閉塞性換気障害と判定する。

誤解されやすいポイントとして、1秒率は閉塞性換気障害の診断に用いるものであり、COPDの重症度判定には、%FEV₁（FEV₁の実測値を予測値で割った%）を用いる（表1）。この2つを混同しないように注意する。同様に、個人の経年変化を追跡するときや手術の可否等を判断するときにも、FEV₁の絶対量や%FEV₁を評価する。

表1 日本呼吸器学会におけるCOPDの病期分類
(文献2より引用)

	病期	定義
I 期	軽度の気流閉塞	%FEV ₁ ≥ 80%
II 期	中等度の気流閉塞	50% ≤ %FEV ₁ < 80%
III 期	高度の気流閉塞	30% ≤ %FEV ₁ < 50%
IV 期	きわめて高度の気流閉塞	%FEV ₁ < 30%

気管支拡張薬吸入後のFEV₁/FVC 70%未満が必須条件。

図2 呼吸機能障害パターン

4) 換気障害の判定と原因病態

スパイロメトリーの結果をもとに、図2のように呼吸機能障害パターンが診断される。閉塞性換気障害を起こす病態には、上気道の気流閉塞（咽頭・喉頭腫瘍等）や下気道の気流閉塞（気管支喘息増悪期やCOPD等）がある。また、拘束性換気障害を起こす病態には、肺の弾性低下（間質性肺炎やサルコイドーシス等）や肺容量の減少（肺腫瘍や肺切除後等）、胸郭・胸膜の異常（側弯症や悪性胸膜中皮腫等）、呼吸筋力低下等がある。

なお、混合性換気障害の解釈には注意を要する。COPDを中心に、気流閉塞が進行した状態になると残気量（residual volume：RV）が増加してVCが減少し（後述）、混合性換気障害のパターンを呈する。“混合性”とは言うが、実際に起

表2 特発性肺線維症、気腫合併肺線維症、肺気腫における呼吸機能検査所見の特徴（文献2より引用、一部改変）

	特発性肺線維症	気腫合併肺線維症	肺気腫
FEV ₁	↓	↓ or N	↓
FVC	↓	↓ or N	↓
FEV ₁ /FVC	↑	↓ or ↑ or N	↓
TLC	↓	↓ or ↑ or N	↑
FRC	↓	↓ or ↑ or N	↑
RV	↓	↓ or ↑ or N	↑
DLCO	↓	↓↓	↓

FEV₁: 1秒量, FVC: 努力肺活量,
TLC: 全肺気量, FRC: 機能的残気量, RV: 残気量,
DLCO: 肺拡散能, N: 正常

こっていることは、閉塞性換気障害の進行である。

一方、間質性肺炎のような拘束性換気障害を呈する肺疾患では、分母のFVCが低値になり、1秒率は80%台や90%台の高値を呈することが多い。これらの疾患の患者の1秒率が70%程度のときには、拘束性肺疾患に気流閉塞の病態を合併している可能性があり、気管支拡張薬の投与が有効であることもある。その代表的な例が気腫合併肺線維症にみられる呼吸機能検査所見である（表2）²⁾。2つの病態が合併することで、1秒率のみでの病態の判定は困難になる。スパイロメトリーは、症状や画像所見もあわせて解釈する必要がある。

3. フローボリューム曲線

FVC手技の際に気流量（flow）と肺気量（volume）の関係を描いたものをフローボリューム曲線（F-V曲線）と呼び、図3のように病態毎のパターン認識が可能である¹⁾。閉塞性換気障害でも、F-V曲線が上気道閉塞パターンになっている場合には、咽喉頭や気管に異常があるかもしれない。また、1秒率がわずかに70%以上であっても、F-V曲線が下に凸の場合、末梢気道閉塞があると推察される。

図3 フローボリューム曲線のパターン (文献1より引用)

PEFR: peak expiratory flow rate

$\dot{V}_{50}$: 50%肺気量位での呼気流量

$\dot{V}_{25}$: 25%肺気量位での呼気流量

4. 肺気量分画の測定

1) 肺気量分画とは

肺気量分画とは、図1で示す肺気量のことで、スパイロメトリーでは、1回換気量とERV、IRVを測定できる。1回換気量とIRVの和は最大吸気量 (inspiratory capacity: IC) と呼ばれ、呼吸困難感によく相関するとされている。頑張っても十分量を吸えないときに呼吸困難を感じるということである。

RVや機能的残気量 (functional residual capacity: FRC)、全肺気量 (total lung capacity: TLC) の測定には、ガス希釈法かbody box法が必要である。

2) 肺気量分画が異常となる疾患

COPDでは肺の弾性収縮力が低下し、FRCが増大する。逆に間質性肺炎では弾性収縮力が増加し、FRCは減少する。重症のCOPDや気管支喘息

発作では末梢気道が虚脱してair trappingが起こり、RVは増大する。表2のように、VCが低下しているときに、TLCが低下しているのかRVが増加しているのかを確認すれば、VC低下の原因がより明確になる。

その他、神経筋疾患等による呼吸筋の筋力低下では、TLCは減少、RVは増加の方向に変化する。肥満も重症になってくるとVC自体が低下してくる。肥満の進行によってRVはほぼ変わらないのに対し、FRCやERVが低下する¹⁾。

5. 肺拡散能

肺拡散能は、肺胞気から肺毛細血管内への酸素取り込み能力の指標となる。実際には、代用として、一酸化炭素 (carbon monoxide: CO) の拡散能 (carbon monoxide diffusing capacity: DLCO) を測定する。成績は、DLCOと、その値を肺容量 (alveolar volume: VA) で割ったDLCO/VAで示される。DLCOに影響を与える因子とし

て、①肺泡毛細管膜の障害、②ガス交換面積、③肺毛細管血液量、④血液中のHb (hemoglobin) 濃度が挙げられる³⁾。

間質性肺炎や肺サルコイドーシス等においては、肺泡毛細管膜の障害によりDLCOが低下する。これらの疾患において、DLCOは重症度に応じて減少するため、DLCO測定が診断や経過観察に有用である。また、気腫性変化の強いCOPDでは、肺の過膨張のためDLCOが低下し、DLCO/VAはさらに著明に低下する。喘息単独では、DLCOの低下は認められないため、COPDと喘息の鑑別の参考所見にもなる。もっとも、肺気腫と喘息の合併例も多いため、DLCO低下が喘息合併を否定するわけではない。さらに、肺塞栓症やその他の原因による肺動脈の狭窄や閉塞があると、肺毛細管血液量の減少によりDLCOが低下するため、DLCOは肺塞栓症の診断や治療効果判定に有用とされている。なお、貧血があると、COの結合するヘモグロビンが減少するため、DLCOは低下する。Hbが1 g/dl低下する毎にDLCOは5～7%低下するとされ、補正して評価する必要がある³⁾。

6. その他の呼吸機能検査

1) ピークフローメーター

ピークフロー (peak expiratory flow : PEF) メーターは、最大の呼气流速を測定するための簡便な携帯機器である。PEFの低下や日内変動の増大は、喘息のコントロール不良のサインとなる。自覚症状が出る前にこれらの変化が現れるため、発作を事前に把握し、適切な処置をとることができる⁴⁾。

ピークフローメーターにはさまざまな種類が存在し、その測定範囲 (l/分) が異なり、測定値自体も変わってしまうため、各患者はできるだけ同じ機器を用いるのが良い。測定の体位等でも測定値が変化することがあり、できる限り

深く息を吸い込んでマウスピースを口から空気が漏れないようにくわえることが大事である。測定も時間を決めるようにし、特に喘息が不安定になりやすい起床時と就寝前の1日2回測定することが望ましい。測定した結果は喘息日記に記録し、担当医に提出する。こうすることにより、喘息の診断や悪化の管理だけでなく、病識を高めることにもつながり、医師・患者間のコミュニケーションも良好になる⁴⁾。

2) 呼気中一酸化窒素濃度 (FeNO)

気道に好酸球が浸潤すると、Th2タイプの炎症性サイトカインの働きにより、気道上皮がNO (nitric oxide) を放出する。そのため、呼気中一酸化窒素濃度 (fractional exhaled nitric oxide : FeNO) 測定は喘息の診断に有用である。目安として、FeNOが22 ppbを超える場合は気管支喘息を疑い、35 ppbを超える場合は気管支喘息の可能性が高まる。しかし、交絡因子も存在し、アトピーや鼻炎がある場合には高値になりやすく、喫煙者の場合には低値になるため、考慮する必要がある⁵⁾。

7. 日常診療でのスパイロメトリーの応用 —気管狭窄例—

図4は、労作時息切れを主訴に受診した68歳女性のスパイロメトリーの所見である。Brinkman指数920の喫煙歴もあり、COPDが疑われて紹介された。4カ月前に気管切開閉鎖後である。屋内の家事やわずかな階段でもゼーゼーして息切れが強い。1秒率<70%により閉塞性換気障害と判定されるが、FEV₁は予測値の81.6%で軽度の気流閉塞に相当し、症状に比して呼吸機能検査所見の異常が軽い印象である。胸部X線撮影にて肺野に異常なく、喘息等も鑑別に挙がるが、FeNO 14ppbで上昇はなかった。その他、慢性肺血栓塞栓症も鑑別に挙がるが、Dダイマーの上昇もなかった。本例のF-V曲線をみると、上

1. 肺気量	測定値	%予測値
VC 肺活量	2.21 l	98.7%
IC 最大吸気量	1.56 l	
IRV 予備吸気量	0.83 l	
ERV 予備呼気量	0.65 l	75.6%
TV 一回換気量	0.73 l	
2. 換気能力	測定値	%予測値
FVC 努力性肺活量	2.16 l	96.4%
FEV ₁ 一秒量	1.33 l	81.6%
FEV ₁ % (G) 一秒率 (Gaensler)	61.6%	
PEF ピークフロー	1.95 l/秒	36.8%

図4 労作時息切れの68歳女性の呼吸機能検査所見
スパイロメトリーの所見から中枢気道の狭窄が疑われた症例である。
TV: tidal volume

気道閉塞パターンの特徴を有する。胸部CT (computed tomography) や気管支鏡にて気管切開後の気管の軟化と狭窄、甲状腺腫がみられ、息切れの原因と考えられた。気管狭窄のF-V曲線は上気道閉塞のパターンになる。

まとめ

呼吸機能検査は、異常値を放置されやすい検査でもある。手術前のスクリーニングで、スパイロメトリーの異常があっても、手術リスクの評価に使用されてしまされがちである。スパイロメトリーの異常は、COPDを中心とする慢性呼

吸器疾患を発見する重要な手掛かりである。閉塞性換気障害の例では、表1のように、FEV₁が予測値の80%未満であれば、中等度以上の気流閉塞であり、患者自身が自覚症状を訴えていなくても、気管支拡張薬を提案すべきである。気管支拡張薬を吸入することではじめて自分の呼吸器症状が病気であったことに気付くことも多い。呼吸機能検査を軽視して、患者の息切れが改善する機会を逸しないようにしたい。

著者のCOI (conflicts of interest) 開示: 本論文発表内容に関連して特に申告なし

文献

- 1) 日本呼吸器学会肺生理専門委員会編: 臨床呼吸機能検査. 第8版, メディカルレビュー社, 東京, 2016.
- 2) 日本呼吸器学会COPDガイドライン第5版作成委員会編: COPD (慢性閉塞性肺疾患) 診断と治療のためのガイドライン. 第5版, メディカルレビュー社, 東京, 2018, 2, 43.
- 3) 日本呼吸器学会肺生理専門委員会: 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—. メディカルレビュー社, 東京, 2004, 48-49.
- 4) 日本アレルギー学会: アレルギー総合ガイドライン2016. 協和企画, 東京, 2016, 139.
- 5) 呼気一酸化窒素 (NO) 測定ハンドブック作成委員会, 日本呼吸器学会肺生理専門委員会編: 呼気一酸化窒素 (NO) 測定ハンドブック. メディカルレビュー社, 東京, 2018, 38.