解　説

呼吸運動解析の医学的重要性

田 中 一 正[1 †]
[1] 昭和大学 富士吉田教育部

要旨　Chest wall を形作るものは体幹そのものであり，重力に抗して勝ち取った立位姿勢と身体運動がヒトの呼吸効率ならびに酸素取り込み効率に最適になるにはどうしたらよいのであろうか．呼吸運動解析は，肺気量・換気量曲線・胸部腹部の呼吸パターン・呼吸数・鼻呼吸・気道音・動脈血酸素飽和・周囲径計測・圧センサ・X線検査・胸部 CT・dynamic MRI・光学式 3 次元動作解析装置・ビデオ映像・加速度計状態・質問紙票等々多種多様な方法で検討されている．これらの文献を模索しながら，呼吸運動は精神と運動と身体要素が複雑に絡み合っている生命論的パラダイムすなわち機能の和としてとらえることが必要であることを考えてみたい．

キーワード：呼吸運動　呼吸運動解析，Chest wall，姿勢とバランス，COPD，身体活動計測

1. はじめに

我々の呼吸はいつも一定であるのか？

突然であるが，人工呼吸器による呼吸を想像してみた．人工呼吸器は従量式と従圧式の 2 種に大別できる．いずれにしても一定の換気量を肺に押し込み，なされた呼吸である．この典型的な呼吸は，機械論的数式によってなされたものであり，規定された条件下でも人は生きることができる．しかし，普段の我々の呼吸はどうであろうか．

換気量や呼吸回数はいつも一定なのか？

あくびをしたり，ため息をついたり，大きな呼吸もあれば小さな呼吸，深い呼吸があれば浅い呼吸，早い呼吸があればゆっくりとした呼吸があり，チェーンストークス呼吸のように徐々に一回換気量が増加し，その後徐々に減少し無呼吸となるサイクルを周期的に繰り返す病的呼吸まである．

もちろん運動時の呼吸は大きく違うが，安静に呼吸をしていると言っても，試験の最中の呼吸と恋人と話をしている時の呼吸，テレビをボーっとみているときの呼吸とそれぞれに違った呼吸をしている．

2. ストレスと呼吸

人がストレスにさらされた時の，ストレス刺激に対する呼吸パターンの変化に関する研究では，呼吸数の増加と分時換気量の増加があげられる．またネガティブな感情が喚起された状態では胸部優位の呼吸パターンに，ポジティブな感情が喚起された状態では腹部優位の呼吸パターンになるという報告がある[1-3]．

高瀬は，ストレス状態における呼吸運動について検討し，呼気後のポーズ時間が心理状態を反映している結果を表し，刺激の強度が強いほど呼気後ポーズ時間の減少量が大きく，リラックス状態では，増大することを示している[4]．

これらの知見の多くは，換気量曲線や胸部腹部の呼吸運動から得られたものであるが，実に呼吸と言っても一定しないもので，精神の有り様にも影響されているものである．

3. 睡眠時無呼吸

そういえばもっと怖い問題もある．呼吸の営みは生体を構成しているすべての細胞生命を維持するうえで欠くことのできない酸素と二酸化炭素の交換をし，身体の pH を保っている機能である．これが突然に止まってしまう問題な病気である．睡眠時無呼吸である．なぜ呼吸は止められるのか？人の呼吸において大命題であるが，眠っている間われわれは意識の外にあると思っている時間に，呼吸が止まってしまう．睡眠時無呼吸は止めたくて止めているわけではない．

多くの無呼吸の原因は上気道閉塞によるものである．覚醒時には舌下神経の支配をうけた上気道は開大しているが，睡眠時にはこの活動が低下するために上気道は狭くなり，いわゆるいびき呼吸となる．また呼吸中枢の機能低下がある場合はこの神経支配が低下し上気道筋の緊張が著しく低下閉塞し，無呼吸状態となる．こうなれば低酸素血症や高二酸化炭素血症を引き起こし心血管系障害や多臓器不全を引き起こす結果となる．

この睡眠時無呼吸の検出検査の多くは，睡眠を観察検査する脳波測定や眼球運動測定と胸腹の呼吸バンドにより拘束した形での呼吸運動測定など，各種センサ類を装着した状態で，鼻呼吸・気道音・動脈血酸素飽和状態を終夜連続して測定するため，患者にとって拘束感が強く，患者が入眠困難に陥ったり，無意識にセンサを外したり，拘束感から検査を自己中断したりする場合もある．このような案件から，無拘束型多点感圧シートセンサを用いて呼吸運動解

2012 年 3 月 28 日受付
† 〒 403-0005 山梨県富士吉田市上吉田 4562
昭和大学富士吉田教育部
田中 一正
Tel：0555-22-4403　Fax：0555-23-7365
E-mail：tnkaaa@med.showa-u.ac.jp

析を行い，経皮的動脈血酸素飽和度測定を併用することで，睡眠時無呼吸検査としての有用性を示した研究報告があり，実用化されている[5]．

4. 呼吸運動

4.1 Chest wall

日常の生活の中で呼吸（換気）運動はどのように行われているのであろうか．

確かに呼吸運動は主に，横隔膜の上下移動および肋間筋の収縮による肋骨の拡張・収縮によって行われる．では胸郭の動きだけで良いのであろうか．換気の行われる肺を取り囲む胸郭の環境はどのようになっているのであろうか．

呼吸のポンプである Chest wall は rib cage（胸郭）と腹部の 2 つのコンパートメントからなり，この 2 つは横隔膜でわけられる．胸郭は構成する肋骨や脊柱などの骨群とそれに関わる筋群からなり，さらに胸郭の入り口にあたる鎖骨，それを支える頸部筋群からなる．脊柱は腹部にも続き，横隔膜下でさらにこれらが関連する腹部臓器，腹筋群や骨盤や骨盤底筋群に支えられ，これらの一連の変化が肺の気量変化を引き起こしている．

図 1 に Chest wall の模式図を示す．

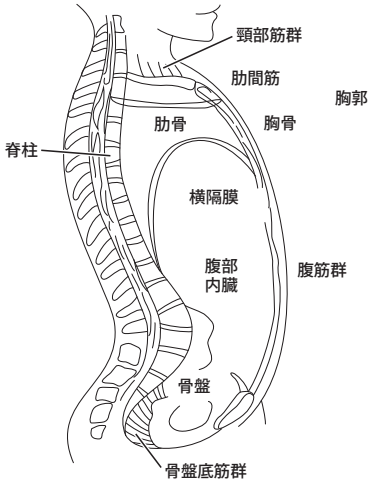


図 1　chest wall

Life Support and Anesthesia 増刊　呼吸のバイオロジー　メディカルサイエンスインターナショナル　20，2004　参照

胸郭と腹部の 2 つのコンパートメントを分け，呼吸運動の中心的役割の横隔膜の動きの観察は，CT を用いた検討[6]や 90 年代に登場した dynamic MRI によって横隔膜運動の非侵襲的評価が可能となった．

人は安静時換気量の 2/3 ～ 3/4 を横隔膜運動により行っている．この横隔膜や呼吸のパターンが大きな指標となる治療がある．肺腫瘍に対する放射線療法である．

4.2 放射線治療

肺癌の放射線治療の最大の特色は，" がんへのピンポイント攻撃 " と表現されるように，狙ったがん標的に放射線を集中する三次元ピンポイント照射等の開発により効果をあげてきている．

肺自体には自動性はなく，Chest wall の動きにより呼吸は受動的になされている．

肺内構造の移動は横隔膜付近で大きく，肺尖部で小さい．また，上肺野では頭尾方向の動きは小さいものの前後方向の動きが比較的大きい[7]．横隔膜付近の呼吸性移動は呼吸の深さにもよるが，dynamic MRI を用いて計測した冨田らの報告[8]では，安静時には腹側で 14 mm 中央部で 20 mm 背側で 27 mm，最大深呼吸時では腹側で 41 mm，背側で 74 mm と報告している．

一般的には自由呼吸下では頭尾・前後・左右のそれぞれの方向に，5 ～ 20 mm・8 ～ 15 mm・5 ～ 10 mm 程度の呼吸性移動があると報告されている[9]．時に , 患者の横隔膜の動きは全体で一貫した動きとならずに部分的に他と異なる動きを示すことがある．

このような呼吸性の揺らぎの中で照射野を一定にし，照射するためには呼吸性移動を加味した立体的身体空間の解析が行われる必要がある．照射には呼吸位相をモニタリングしながら停止する方法が用いられることが多い．道具を用いない完全な自己判断でも，十分な理解と練習によれば 2 ～ 3 mm 以内の呼吸停止位置の再現性は得られるが[10]，信頼性は低い．そこでさらに呼吸換気量自体，体壁の上下運動，圧センサ，腹壁周囲長などを用いて呼吸位相の検出を行い，呼吸運動に対する照射方法の研究がなされ，患者の X 線被ばく量との関係からも治療実施時の呼吸状態を同一にする対策別治療計画法が考案されている[11]．

5. 姿勢と身体の動き

5.1 姿勢と呼吸運動障害

がん放射線治療では無理に体をねじったり曲げたりの動作はしないが，日常生活動作では曲げたり，ねじったりは当たり前の労作である．

横隔膜は下部胸郭を拡張させる作用を持つ．胸椎後弯位になると肋骨が下垂し，横隔膜肋骨部の下降となり呼吸時の横隔膜の可動性は低下する．このような身体的形態異常は横隔膜の形状にも変化をきたし，吸気時の横隔膜ドーム下方移動が障害され，下位肋骨の挙上運動を障害し，呼吸運動が障害される．

ねじれや体幹姿勢障害についてはいくつもの呼吸運動障害との関連が検討されている．

脊柱後弯が胸郭運動に与える影響を仲保らは[12]，複数の計測カメラでとらえたマーカ映像を 3 次元座標に変換することが可能な光学式 3 次元動作解析装置を用いて検討している．また，草刈りらは[13]，円背姿勢では拘束性換気障害とともに，円背姿勢のために股関節ならびに膝関節が屈曲し，常に体幹や下肢筋群の過剰収縮が起こる状態となり，心肺機能に障害を与えている結果を示している．野添らは[14]，体幹前傾姿勢が呼吸運動に与える影響を肺気量検査，呼吸数，胸郭周囲径の変化から検討している．

胸郭変形を伴う場合もあるが，胸郭変形とまでいかなくとも，高齢者や慢性呼吸器疾患患者では加齢的変化や胸郭の過緊張によって下部体幹の不安定さから，胸郭可動域の運動制限が見られる．ここでは，エアスタビライザーを用いて下部体幹の姿勢制御訓練を行った結果を示す．

図 2 では姿勢訓練前後での呼吸困難感の変化を，中心点を 0 点として，左右をそれぞれきわめて苦しいときわめて楽を 10 cm とした尺度 BAS（bilateral analog scale）でみたものであるが，健常者とともに慢性呼吸器疾患患者においてもより楽になる方向へのシフトが見て取れる．図 3 はこれら対象者の呼吸パターンの変化であるが，より大きな換気量となり呼吸回数が低下し，より楽な呼吸パターへと変化し，骨盤位を中心に胸郭運動を行わせることにより，その呼吸が大きく安定していることがわかる．

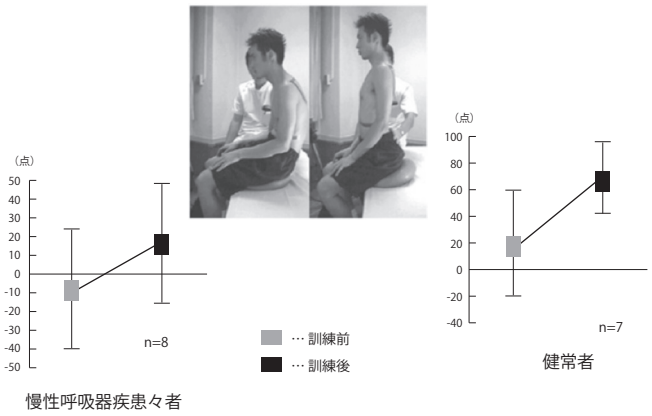


図 2　エアスタビライザーを用いた姿勢制御訓練前後の呼吸困難感の変化

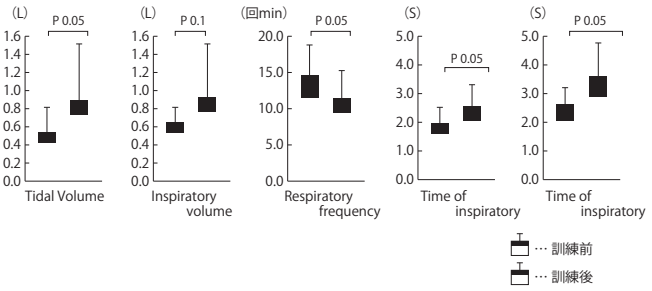


図 3　呼吸訓練後の呼吸パターン変化

慢性呼吸器疾患患者では様々な日常生活動作において息切れを生じ，四肢・体幹・体側を変化しただけでも呼吸困難を感じ，運動・労作が制限されることを多く経験する．

たとえば，在宅酸素療法の患者外出時には，携帯酸素ボンベを使用しての行動が行われるが，多くはボンベケースを手引きで使用する場合が多い．この手引き姿勢での携帯酸素ボンベ運搬と 4 輪車のついた手押し式携帯酸素ボンベ運搬による 6 分間歩行（6MD）移動運動前後の呼吸困難感と心肺機能計測を比較すると，歩行距離は 2 輪で 228 m から 4 輪で 236 m へ延び，SPO2 の前後の低下は 2 輪で 9.6％→ 4 輪で 7.4％と減少し，呼吸数は 6MD 終了時で 2 輪で 31.7 回 / 分→ 4 輪で 29.7 回 / 分と減少し，脈拍数も 6MD 終了時で 2 輪で 118.8/ 分→ 4 輪では 103.8/ 分と有意に減少していた．検討対象者は，慢性呼吸器疾患患者 7 名（平均年齢 75 歳、男 4 名女 3 名）の結果である．

呼吸困難感を VAS で測定し，6 分間歩行後の変化は 2 輪で VAS7.7 cm → 4 輪で VAS4.3 cm と 4 輪車で移動した方が呼吸困難感の変化が少ないことがわかった．

対象者のアンケートでは 4 輪の手押し車式のキャリアカートのほうが楽であるとの表現が多く，呼吸不全による呼吸筋疲弊や胸郭障害を持つ慢性呼吸器疾患患者では 4 輪の手押し式の体幹を支える構造のキャリアカートは活動補助に有用であると考えられた．

この心肺機能負荷に影響しているものは，図 4 に示す使用者の姿勢が大きな要因となっていると考えられる．

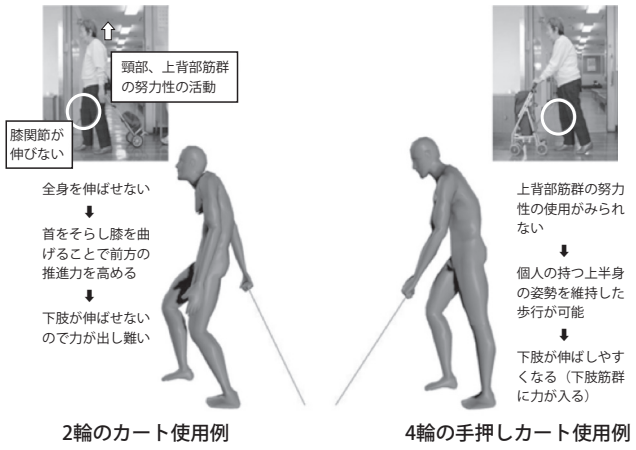


図 4　カート運搬作業姿勢の比較

このように体幹姿勢は呼吸動作を左右し，酸素化能とともに呼吸感覚にも影響している．

以上の動きから，Chest wall の動きは胸部腹部の連動した動きにともに干渉され，体幹のねじれや曲がり，屈曲，進展には腰部骨盤帯の機能が重要な役目を果たし，さらには，下肢の運動姿勢や力学的影響が，呼吸運動に影響を与えている [15] ことを示している．

地球上の生物は重力環境下において活動している．人は立位姿勢でこの重力に抵抗して静的動的姿勢を維持している．どのような姿勢・身体運動がヒトの呼吸効率ならびに酸素取り込み効率に最適なのであろうか．

5.2 呼吸リハビリテーション

呼吸リハビリテーションは，「呼吸器の病気によって生じた障害を持つ患者に対して，可能な限り機能を回復，維持させ，これにより患者自身が自立できることを継続的に支援していくための医療である」と定義されている．COPD 患者に対する呼吸リハビリテーションの効果は数多く報告されており，日本においても「呼吸リハビリテーションマニュアル－運動療法－」[16] や「呼吸リハビリテーションマ

ニュアル－患者教育の考え方と実践－」[17] など、エビデンスに基づいた診療ガイドラインが作成されている．

呼吸リハビリテーションの中核をなすものとして，運動療法が挙げられている．運動療法により，運動耐容能の向上のみならず，呼吸困難や疲労感の軽減が証明されている．

ならば，息切れをコントロールしながら身体を動かし，日常活動性を高めるしかない．

Garcia-Aymerich らは [18]，自己申告制の質問紙票を用いての大規模コホート研究で身体活動量が COPD の予後を推測させ，肺機能低下に大きなインパクトを与えるという報告をしている．但し，質問票では安価で実施しやすいが，身体活動量を測定するには患者の記憶に頼らざるを得ず，不正確であるかもしれない．

近時，COPD 患者の身体活動性評価として携帯型加速度計による身体活動計測 [19] が使用されている．

Pitta らは [20] 質問票による自己申告とビデオ映像と加速度計による患者行動の比較を行い，ビデオ映像と加速度計による身体活動程度は相関しているが，自己申告とビデオ観察にて計測された身体活動性には差異があり，患者は過大か過小評価をしているとしている．そして加速度計が最も歩行速度変化に対応している評価法として推奨している．

Watz らは加速度計を用いて身体活動計測を行い，身体活動減少は早期 COPD の特徴であり，COPD の病期ならびに生存率と相関する BODE インデックスとの比較検討を行い，身体活動性の低下には運動不足がそれに応じて低下することを示した [21]．さらに身体活動の低下は左心機能の低下や全身炎症所見に関与していると報告 [22] している．

呼吸運動療法として呼吸リハビリテーションを考え，今後は単に画一化された運動処方ではなく，これらをもとに，COPD 患者では個別の最小のエネルギー消費で最大の換気効率を得ることができるように包括的呼吸リハビリテーションプログラムを作成する必要がある．

呼吸運動から身体運動に至る動態測定解析についてみてきたが，我々の体ではどのような場合に呼吸運動が変化するのであろうか．

6. 呼吸運動性出力

飛田は [23] 呼吸運動が変化する刺激要因として以下の機序を示している．

表 1　呼吸運動性出力をます機序

呼吸運動性出力をます機序
1. 低酸素血症高二酸化炭素血症などによる末梢および中枢の化学受容器体からの求心性刺激の増加
2. C 線維や刺激受容体など迷走神経受容体興奮に伴う求心性刺激の増加
3. 呼吸筋への負荷が高まることによる呼吸筋内や腱内にある固有受容体の興奮による求心性刺激の増加
4. 情動などによる大脳辺縁系の興奮
5. 随意的な運動中枢の興奮

飛田渉　呼吸調節異常とその病態生理　呼吸のバイオロジーより

これらにより呼吸運動が変わることにより，Chest wall の活動が変化し，Chest wall にある呼吸筋が胸腔内圧を変化させて肺気量の変化をもたらす．常に何らかの刺激が加わった状態での中で，延髄における統合された呼吸調節系が働いて我々の呼吸は一定に保たれている．

7. おわりに

話のはじまりに機械論的呼吸である人工呼吸器による呼吸を想像した．

人工呼吸器の世界でも，患者の吸気時間はいつも一定とは限らないので，自発呼吸との同調性と換気効率を妥協させる方法として AutoFlow，PRVC(Pressure Regulated Volume Control) が開発され有効性が示された [24]．いわゆる揺らぎをもつ人工換気モードである．

呼吸は，全体の調和が図られ，身体として有機的に，繋がりあうことで生命力が出てくる生命論的パラダイムとしてとらえることができる．呼吸運動は精神と運動と身体要素が複雑に絡み合っている生命論的パラダイムすなわち機能の和としてとらえ研究することが求められている．

参考文献

1) Boiten, F., Frijda, N. H., and Wientjes, J. C. : Emotions and respiratory patterns: Review and critical analysis, International Journal of Psychophysiology, 17, 103-128, (1994).
2) Grossman, P. : Respiration, stress and cardiovascular function, Psychophysiology, 20, 284-300 (1983).
3) Boiten, F. A. : Component analysis of task-related respiratory patterns, International Journal of Psychophysiology, 15, 91-104, (1993).
4) 高瀬弘樹：人文科学論集，人間情報学科編 (45)，81-94，（2011）.
5) Agatsuma, T., Fujimoto, K., Komatsu, Y., Urushihata, K., Honda, T., Tsukahara, T. and Nomiyama, T. : A novel device (SD　101)with high accuracy for screening sleep apnoea-hypopnoea syndrome, Respirology, 14: 1143-1150, (2009).
6) Krayer, S., Rehder, K., Vettermann, J., Didier, E.P. and Ritman, E.L.：Position and motion of the human diaphragm during anesthesia-paralysis, Anesthesiology, 70(6), 891-898, (1989).
7) Shimizu, S., Shirato, H., Ogura, S., Akita-Dosaka, H., Kitamura, K., Nishioka, T., Kagei, K., Nishimura, M. and Miyasaka, K. : Detection of lung tumor movement in realtime tumor-tracking radiotherapy, Int J Radiat Oncol Biol Phys, 51, 304-310, (2001).
8) 冨田和秀，阪井康友，門間正彦，大瀬寛高，居村茂幸：Dynamic MRI を用いた正常な横隔膜運動の動的解析，理学療法科学，19(3)，237-243，(2004).
9) Seppenwoolde, Y., Shirato, H., Kitamura, K., Shimizu, S., van Herk, M., Lebesque, J.V. and Miyasaka, K.: Precise and real-time measurement of 3D tumor motion in lung due to

breathing and heartbeat, measured during radiotherapy, Int J Radiat Oncol Biol Phys, 53, 822-834, (2002).
10) Onishi, H., Kuriyama, K., Komiyama, T., Tanaka, S., Ueki, J., Sano, N., Araki, T., Ikenaga, S., Tateda, Y. and Aikawa, Y.: CT evaluation of patient deep inspiration self-breath-holding : how precisely can patients reproduce the tumor position in the absence of respiratory monitoring devices? Med Phys, 30, 1183-1187, (2003).
11) 大西　洋 : Ⅴ．呼吸性移動対策　放射線治療計画ガイドライン 2008, 21-26, 放射線治療計画ガイドライン 2008 年版　http://www.kkr-smc.com/rad/guideline/2008
12) 仲保 徹，山本澄子 : 体幹側屈位が胸壁運動に及ぼす影響，理学療法科学，25(5)，803-810 , (2010).
13) 草苅 佳子，佐々木 誠 : 円背姿勢が呼吸循環反応ならびに運動耐容能に 及ぼす影響，理学療法科学，18 (4)，187-191，(2003).
14) 野添匡史，間瀬教史，杉浦みどり，岡前暁生，山本健太，立栄智恵，真渕　敏，傳　秋光：体幹前傾姿勢が肺気量位と呼吸運動に与える影響，理学療法学 34(6)，254-259，(2007).
15) 柿崎藤康，福井　勉 : 呼吸運動療法　呼吸運動療法の理論と技術，114-139，メジカルビュー社，(2003).
16) 日本呼吸管理学会呼吸リハビリテーションガイドライン作成委員会 / 日本呼吸器学会ガイドライン施行管理委員会 / 日本理学療法士協会呼吸リハビリテーションガイドライン作成委員会（編）：呼吸リハビリテーションマニュアル：運動療法，日本呼吸管理学会，日本呼吸器学会，日本理学療法士協会，(2003).
17) 日本呼吸器学会呼吸リハビリテーションガイドライン作成委員会，日本呼吸器学会ガイドライン施行管理委員会，日本理学療法士協会呼吸リハビリテーションガイドライン作成委員会，日本呼吸管理学会／日本呼吸器学会／日本理学療法士協会：呼吸リハビリテーションマニュアルー患者教育の考え方と実践—，照林社，(2007).
18) Garcia-Aymerich, J., Lange, P., Benet, M., Schnohr, P. and Antó, JM.:Regular Physical Activity Modifies Smoking-related Lung Function Decline and Reduces Risk of Chronic Obstructive Pulmonary Disease: A Population-based Cohort Study , Am. J. Respir. Crit. Care Med., 175, 458-463, (2007).
19) 佐藤拓，北村菜月，川越厚良，坂田俊一，清川憲孝，菅原慶勇，高橋仁美，佐竹將宏，塩谷隆信：3 軸加速度計による身体活動時間測定の妥当性，バイオメカニズム学会誌，35(3)，197-200，(2011).
20) Pitta F., Troosters T, Spruit M.A., Decramer M. and Gosselink R.: Activity monitoring for assessment of physical activities in daily life in patients with chronic obstructive pulmonary disease, Arch Phys Med Rehabil , 86, 1979-1985, (2005).
21) Watz, H., Waschki, B., Meyer, T. and Magnussen, H.: Physical activity in patients with COPD, Eur Respir J , 33, 262–272, (2009).
22) Watz, H., Waschki, B., Boehme, C., Claussen, M., Meyer, T. and Magnussen, H.: Extrapulmonary Effects of Chronic Obstructive Pulmonary Disease on Physical Activity A Cross-sectional Study, Am J Respir Crit Care Med , 177, 743–751, (2008).
23) 飛田渉 : 呼吸調節異常とその病態生理，Life Support and Anesthesia 増刊　呼吸のバイオロジー，58-63，メディカルサイエンスインターナショナル , (2004).
24) Arold, S.P., Mora, R., Lutchen, K.R., Ingenito, E.P. and Suki, B.: Variable Tidal Volume Ventilation Improves Lung Mechanics and Gas Exchange in a Rodent Model of Acute Lung Injury, Am J Respir Crit Care Med , 165, 366–371, (2002).



田中 一正（たなか かずまさ）

1979 年昭和大学医学部卒業．1988 年医学博士．1989 年昭和大学藤が丘病院呼吸器内科講師．1997 年昭和大学附属豊洲病院内科助教授．2005 年昭和大学保健医療学部臨床医学内科教授．2006 年昭和大学富士吉田教育部教授現在に至る．臨床呼吸器病学特に気管支喘息・慢性閉塞性肺疾患のケアと呼吸リハビリテーション．日本内科学会，日本呼吸器学会，日本呼吸ケアリハビリテーション学会．