

特集

体外式陽陰圧式人工呼吸

適応と展望

小谷 透

I. 陰圧式換気法の歴史

1776年にCullenが発表した気管挿管とペローズを使用した蘇生法が、1827年の気胸の報告以後、実質的に禁止されるようになり、替わって陰圧式人工呼吸器が開発された。DrinkerとShawにより有名な「鉄の肺」と言われる陰圧式人工呼吸器が開発されたのは、1928年である。患者は首だけを出した状態で体全体が鉄製の気密タンクに入り、タンク内の陰圧で胸郭を広げて換気を補助した(図1)。1952年の世界的なポリオ大流行に際し大活躍したが、患者ケアの困難さと価格や重量(>300kg)、スペースの問題があった。さらに気管切開による陽圧換気が開発され死亡率が劇的に低下したことから、陰圧式人工呼吸器は徐々に使用頻度が減少した。



図1 ポリオ大流行時のタンク式陰圧式人工呼吸の様子 (1950年代)

(ドレーゲルメディカル提供)

その後、胸郭のみを覆うシェル方式が開発され、持ち運びのよさや着脱の簡便さから臨床使用が再び始まった。Hayekは腋窩から臍下までを覆うシェルを用い、高性能のオシレータポンプで弁を操作し減圧タンク(陰圧源)とシェルの接続をコントロールする体外式人工呼吸器を開発した。これが、現在市販されている陽陰圧体外式人工呼吸器(体外式陽陰圧式人工呼吸器)の原点である。

II. 体外式陰圧換気に関する研究

陰圧換気は胸郭外に陰圧を作り、胸郭が広がることで胸腔内圧を低下させ、肺胞内外圧較差を得る。陽圧換気は気道内にガスを送り込み陽圧にすることで圧較差を作り出す。11cmH₂OのPEEPと機能的残気量が同じになる陰圧レベルは18.4(12～30)cmH₂Oであった¹⁾。他の報告でも、同等の肺胞内外圧較差を発生させるために必要な陰圧の絶対値は陽圧換気よりも大きい。持続陰圧ではPEEPに比べ心係数が高値で、動脈血酸素含量やP/F比には差がなかった。陽圧から陰圧への変更では平均気道内圧が5cmH₂O低下し、陰圧はPEEPに比べ尿管機能維持に優れていた。また、IMVとの併用として持続陰圧とPEEPを比較した研究でも、両者の間には肺コンプライアンス、レジスタンス、呼気終末肺気量、血液ガス、循環動態のいずれにおいても有意差を認めなかった²⁾。

シェル方式の陰圧式人工呼吸は体外式高頻度振動源として臨床使用された報告が多い。肺洗浄モデルや健康動物で良好なガス交換を得たが、振動数依存性はな

かった³⁾。成人ボランティアに対する短時間の体外式高頻度振動は、低振動数(30~60回/分)がCO₂排出に効果的で^{4, 5)}呼吸数減少も見られた⁵⁾。呼吸不全患者でIPPVと比較したところ、酸素化上昇は16%、CO₂低下は6%改善した⁴⁾。Segawaら⁶⁾は高位頸髄腫瘍術後四肢麻痺で横隔膜のみの呼吸を行っていた人工呼吸患者に振動数120回/分を併用し5日後に離脱できた経験を紹介し、高頻度振動による喀痰排出の向上を指摘した。しかし、喀痰排出量は理学療法や気道内への振動法と比較して差はないとの報告もある⁷⁾。人工呼吸を行っていないCOPD患者に60~140回/分、+26/-10cmH₂Oの設定で体外式振動を加えたところ、1.8~2.4mmHgの呼気CO₂濃度の低下と2~3%の酸素飽和度の改善が見られた⁸⁾。

NPPVが気道を介し圧を伝播するのに対し、体外陰圧式換気では胸郭全体に圧変化が分散することから、肺内でのより均一な圧分布が生じると考えられる。Grassoら⁹⁾は肺洗浄ウサギモデルを用い、陽圧、陰圧それぞれの方法で一回換気量12mL/kgのいわゆる侵襲的な人工呼吸を2.5時間行った。陰圧換気ではPaO₂の改善と動脈血-呼気終末CO₂分圧差の減少が得られ、換気終了後の病理では肺障害所見が少なかった。マイクロファイアという極小サイズのビーズを血管内投与して肺内血流分布を調べたところ、2つの換気法に差は認めなかったが、肺内ガス分布をCTにより動的に評価したところ、呼気終末の肺容量は陰圧換気のほうが大きく、この結果、酸素化の改善が良好であった。また、正常なガス分布(いいかえれば無気肺が少ない状態)がより多くの肺領域で得られたのも、吸気時も呼気終末時でも陰圧換気時であった。

非侵襲的陽圧換気法(NPPV)はうっ血性心不全治療のfirst lineとされており、陽圧換気のベクトルが心収縮のベクトルと一致するため、心機能が低下した心臓では低レベルのPEEPでも心ポンプ機能改善効果があると考えられている¹⁰⁾。この点からは陰圧換気は循環器系にマイ

ナスの要因になると予想された。しかし、実際には循環器系への影響として心係数の増加を示す報告が多い。重症うっ血性心不全症例に対する吸気時陰圧-26cmH₂O、呼気時陽圧+10cmH₂O、振動回数60回/分の体外式高頻度振動は、肺動脈楔入圧を変化させずに心係数と1回拍出量を増加させ、PaO₂の有意な増加をもたらした¹¹⁾。心エコーによる評価では左室拡張終期領域は自発呼吸時に比べ増加したが、肺動脈流速は変化しておらず、前負荷増加ではなく陰圧による単純な増大と考えられた¹²⁾。心機能が正常の肥満患者では60回/分、+25/-3cmH₂Oの陽陰圧による振動がCPAP単独よりも心拍出量を増加させた¹³⁾。また、冠動脈バイパス術直後の患者に4時間の体外式高頻度振動を行ったところ、心係数、1回拍出係数、右室1回仕事係数、右室拡張終期容量係数、混合静脈酸素飽和度は通常の陽圧換気に比べいずれも有意に増加した¹⁴⁾。

陰圧式人工呼吸では、特に睡眠時に上気道が閉塞する報告が続いた¹⁵⁾。陽陰圧体外式人工呼吸(biphasic cuirass ventilation:以下BCV)では、胸郭を覆うキュイラス(胴鎧)内圧が陰圧だけでなく陽圧にもなるよう弁を改良し(図2)、胸郭を圧迫して気道内陽圧を作ることで上気道閉塞の危険を解除し陰圧式の欠点を克服した(図3)。BCVの発売後、上気道閉塞の報告はないが、睡眠中の呼吸数を減少させたと報告されている¹⁶⁾。さらに、BCVでは胸郭を高頻度で振動させるバイブレーション機能と陽圧による胸郭圧迫を利用

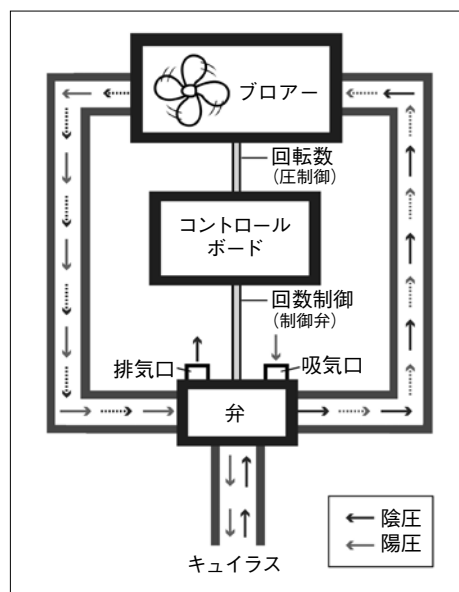


図2 陽陰圧体外式人工呼吸(BCV)の構造図



図3 BCVの全景

した cough (咳) 機能を結合させ、気道内分泌物の排出を補助する secretion clearance モードを開発した。

Ⅲ. 適応と展望

BCV の高頻度振動を用い長期人工呼吸患者への肺理学療法が行われている。有効性は確立されていないが、NPPV の代替策、陽圧換気法への補助換気策、持続陰圧を利用した肺気量増加策、呼吸リハビリテーションなど多くの挑戦的な研究が進行中である。

胸郭が薄く呼吸器コンプライアンスの大きな小児では体外式換気が容易であり、マスクよりも患者の協力が得やすいことから成人症例よりも広く利用されている。小児呼吸器感染症にともなう急性呼吸不全では、岡田らが外来での早期治療に用い注目される(本誌 p.23 参照)。呼吸不全に対し通常の酸素療法だけで対処すると、呼吸努力の増加により呼吸筋の疲労や呼吸仕事量増加すなわち心負荷の増加を招く可能性がある。NPPV 同様 BCV を早期から導入することで、呼吸不全の悪循環を断ち成績向上につながるかもしれない。先天性心疾患に対するフォンタン手術後では右心系の血流維持が重要であり、胸腔内圧を上昇させ静脈還流を減らす陽圧換気は敬遠される。Penny らは 1991 年 BCV をフォンタン手術後の呼吸管理に用い¹⁷⁾、その後フォロー四徴症でも導入し、心拍出量増加や混合静脈血酸素飽和度の上昇という成果をあげている^{18, 19)}。

成人例では非侵襲的換気が first line となっている COPD が適応のひとつと考えられる。高頻度振動を用い、CO₂ 蓄積を改善させ呼吸筋の負荷を解除して気管挿管を回避したという報告⁸⁾ や、持続陰圧や陰圧換気により吸気筋の回復と呼吸パターンの改善が得られるという報告²⁰⁾ がある。佐藤らは結核後遺症や胸郭形成術後の低肺機能症例でも有効と報告した²¹⁾。その機序についていくつかの仮説をあげている。BCV による穏やかな酸素化および高二酸化炭素血症の改善、呼吸困難感の緩和は慢性呼吸不全患者の換気補助に役立つ。慢性呼吸不全例では、長期間にわたる経過から、呼吸筋運動の異常が見られる場合がある。キューラス型タイプは移動角度の大きい前胸部肋骨～横隔膜までを覆い胸郭全体の動きをサポートできるので、肋間筋など胸郭を形成する筋肉の可動性や柔軟性を取り戻すための呼吸リハビリテーションとして機能すると考えられ BCV の長期使用により呼吸筋機能改

善が期待できる。循環器系には悪影響がないことが報告されており²²⁾、BCV 施行中に見られる利尿の促進は右心負荷減少に有利である。さらに慢性呼吸不全の終末像である肺性心を回避できるか検討されている。筆者は肺炎後の急性肺損傷 (acute lung injury) に対し、NPPV で管理したところ、NPPV 施行中は胸部 X 線所見もよくガス交換も維持されたが、口腔ケアのため陽圧をはずすと酸素化が悪化し肺胞の安定性が得られなかった。そこで BCV に変更したところ、BCV 中断中も良好な酸素化が維持できた²³⁾。陽圧式では気道内に直接ガスを送り込むことから、不均一性の高い肺や病変の局在性があると、コンプライアンスの良い部分に対する肺胞の過伸展が問題となり換気量の不均等分布を起こしやすい。前述の Grasso ら⁹⁾ の報告と同様、BCV の穏やかな換気様式は効果的な肺泡リクルートメントをもたらす肺胞の安定性を高めた可能性がある。

BCV は動物研究や基礎研究が十分でないために臨床応用が進んでいないが、今後臨床研究を慎重に重ねていくことで、BCV にしか達成できない成果が生まれる可能性は十分ある。本特集が BCV に関する知見を結集し、BCV の持つ可能性を再検討する機会となれば幸いである。

参考文献

- 1) Scholz SE, Knothe C, Thiel A, et al : Improved oxygen delivery by positive pressure ventilation with continuous negative external chest pressure. *Lancet*. 1997 ; 349 : 1295-1296.
- 2) Mundie TG, Finn K, Balaraman V, et al : Continuous negative extrathoracic pressure and positive end-expiratory pressure. A comparative study in *Escherichia coli* endotoxin-treated neonatal piglets. *Chest*. 1995 ; 107 : 249-255.
- 3) Hayek Z, Peliowski A, Ryan CA, et al : External high frequency oscillation in cats. Experience in the normal lung and after saline lung lavage. *Am Rev Respir Dis*. 1986 ; 133 : 630-634.
- 4) al-Saady NM, Fernando SS, Petros AJ, et al : External high frequency oscillation in normal subjects and in patients with acute respiratory failure. *Anaesthesia*. 1995 ; 50 : 1031-1035.
- 5) Hardinge FM, Davies RJ, Stradling JR : Effects of short term high frequency negative pressure ventilation on gas exchange using the Hayek oscillator in normal subjects. *Thorax*. 1995 ; 50 : 44-49.
- 6) Segawa J, Nakashima Y, Kuroiwa A, et al : The efficacy

- of external high frequency oscillation : experience in a quadriplegic patient with alveolar hypoventilation. *Kokyu To Junkan*. 1993 ; 41 : 271-275.
- 7) Scherer TA, Barandun J, Martinez E, et al : Effect of high-frequency oral airway and chest wall oscillation and conventional chest physical therapy on expectoration in patients with stable cystic fibrosis. *Chest*. 1998 ; 113 : 1019-1027.
 - 8) Spitzer SA, Fink G, Mittelman M : External high-frequency ventilation in severe chronic obstructive pulmonary disease. *Chest*. 1993 ; 104 : 1698-1701.
 - 9) Grasso F, Engelberts D, Helm E, et al : Negative-pressure ventilation : better oxygenation and less lung injury. *Am J Respir Crit Care Med*. 2008 ; 177 : 412-418.
 - 10) Pinsky MR. Cardiovascular effects of ventilatory support and withdrawal. *Anesth Analg*. 1994 ; 79 : 567-576.
 - 11) Takeda S, Nakanishi K, Takano T, et al : Effect of external high-frequency oscillation on severe cardiogenic pulmonary edema. *J Anesth*. 1997 ; 11 : 83-87.
 - 12) Shiga T, Takeda S, Nakanishi K, et al : Transesophageal echocardiographic evaluation during negative-pressure ventilation using the Hayek oscillator. *J Cardiothorac Vasc Anesth*. 1998 ; 12 : 527-532.
 - 13) Scholz SE, Sticher J, Haufler G, et al : Combination of external chest wall oscillation with continuous positive airway pressure. *Br J Anaesth*. 2001 ; 87 : 441-446.
 - 14) Sideno B, Vaage J : Ventilation by external high-frequency oscillations improves cardiac function after coronary artery bypass grafting. *Eur J Cardiothorac Surg*. 1997 ; 11 : 248-257.
 - 15) Sanna A, Veriter C, Stanescu D : Upper airway obstruction induced by negative-pressure ventilation in awake healthy subjects. *J Appl Physiol*. 1993 ; 75 : 546-552.
 - 16) Dolmage TE, Eisenberg HA, Davis LL, et al : Chest wall oscillation at 1 Hz reduces spontaneous ventilation in healthy subjects during sleep. *Chest*. 1996 ; 110 : 128-135.
 - 17) Penny DJ, Hayek Z, Redington AN : The effects of positive and negative extrathoracic pressure ventilation on pulmonary blood flow after the total cavopulmonary shunt procedure. *Int J Cardiol*. 1991 ; 30 : 128-130.
 - 18) Shekerdemian LS, Shore DF, Lincoln C, et al : Negative-pressure ventilation improves cardiac output after right heart surgery. *Circulation*. 1996 ; 94 : II49-55.
 - 19) Shekerdemian LS, Schulze-Neick I, Redington AN, et al : Negative pressure ventilation as haemodynamic rescue following surgery for congenital heart disease. *Intensive Care Med*. 2000 ; 26 : 93-96.
 - 20) Gorini M, Corrado A, Vilella G, et al : Physiologic effects of negative pressure ventilation in acute exacerbation of chronic obstructive pulmonary disease. *Am J Respir Crit Care Med*. 2001 ; 163 : 1614-1618.
 - 21) 佐藤庸子, 栗生和幸, 鹿間裕介ほか : 胸郭形成術後慢性呼吸不全の急性増悪例に体外式人工呼吸器が有用であった1例. *呼吸と循環*. 2008 ; 56 : 957-960.
 - 22) Ambrosino N, Cobelli F, Torbicki A, et al : Hemodynamic effects of negative-pressure ventilation in patients with COPD. *Chest*. 1990 ; 97 : 850-856.
 - 23) 小谷透, 佐藤敏朗, 齊藤まり子ほか : シベレスタットと新しい体外式人工呼吸 Biphasic Cuirass Ventilation を用いた急性肺損傷の治療経験. *呼吸*. 2006 ; 25 : 11-15.