

〔一般演題〕

呼吸同調型陰圧式人工呼吸器の開発

千 原 幸 司* 河原崎 茂 孝*
人 見 滋 樹* 清 水 慶 彦**

はじめに

近年、高齢者人口の増加に伴い肺気腫や慢性気管支炎などの慢性閉塞性肺疾患（COPD）や肺結核後遺症などに起因する慢性呼吸不全患者は増加の傾向にある¹⁾。一方、脊柱後側彎症による胸郭変形や筋ジストロフィーなどの神経筋疾患に起因する慢性呼吸不全患者も多く、前者と同様に長期にわたる呼吸補助を要する。これらの慢性呼吸不全患者への呼吸補助としてまず、致死的な低酸素血症を回避するために酸素療法がなされるが、酸素投与により低換気を助長し、高炭酸ガス血症、ひいては CO₂ ナルコーシスに陥らせる危険があるため低酸素血症を改善しうに充分な酸素投与ができないこともしばしば経験する。このような場合、次の手段として陽圧式人工呼吸の適応が考慮される。陽圧式人工呼吸による呼吸補助は器械の進歩とともに安定した治療法として確立され、急性呼吸不全の治療に果たしてきた役割は改めて述べるまでもなく、呼吸不全治療の主役であることに変わりはないが、一方苦痛を伴う気管内挿管が必須であり、発声不能、食事摂取障害などのストレスに加え、経気道感染の誘発や陽圧による肺損傷（とくに肺気腫においては著明で、時に不可逆）などの問題点により、このような慢性経過の疾患への陽圧式人工呼吸の適応にはなお、問題が多い。慢性呼吸不全患者はわずかの PO₂ 上昇と PCO₂ 低下で安定した状態になることが多く、これを得るには気管内挿管による陽圧式人工呼吸は過大すぎる呼吸補助法といえる。そこでこのような慢性呼吸不全患者に、効率こそ劣るも非侵襲的

に長期にわたり必要な量の呼吸補助・補完の方法があれば、合理的といえる。著者らは肺結核後遺症、肺気腫などの慢性呼吸不全患者への所謂、鉄の肺や Monaghan 社 cuirass レスピレータ²⁾³⁾の臨床応用の経験から、これら陰圧式人工呼吸の有用性を確認した。とりわけ cuirass レスピレータの利点、即ち着脱が容易で医療する側とうける側の合意が得やすく、施行中に食事、会話、四肢の運動も可能である点はすてがたい魅力であり、いまだ困難とされている呼吸同調と効率のいい種々の換気補助モードをなすうれば、慢性呼吸不全への非侵襲的で長期間の呼吸補助が可能と考え、呼吸同調型 cuirass 型陰圧式人工呼吸器の開発を行ったので、機器の開発を中心に若干の臨床応用の成績と併せて報告する。

機器の開発

cuirass レスピレータの基本構成は、① 胸腹部をおおう圧生成の場であるドーム（シェル）、② ドーム内に圧を生成するバキュームポンプ、③ ポンプとドームとを結ぶ回路からなる。著者らの cuirass レスピレータには、④ 患者の呼吸を感知するセンサー部門および、⑤ センサーからの信号で種々の圧パターンを作りうるようにコンピュータ制御により作動する弁機構を付加することとした。

まずドームおよびポンプの有すべき性格、性能を検討する目的で入手可能な cuirass レスピレータ（Emerson 型、Monaghan 型）を用いて健常人を対象として検討した。

1) ドームについて

cuirass レスピレータの場合、ドームと身体との密閉度が重要であるので、密閉度を高める目的

* 京都大学結核胸部疾患研究所胸部外科

** 京都大学医用高分子研究センター実験外科

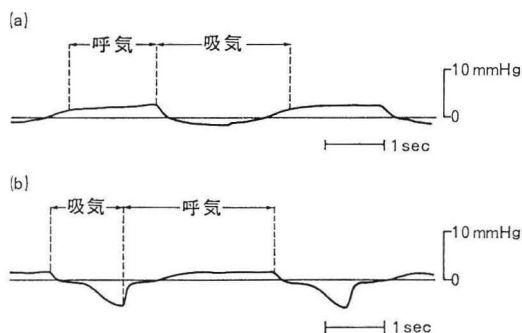


図 1 (a) ポンチョのみ装着し Monaghan 型ポンプを駆動した時のポンチョ内の圧。
(b) 胸膜周囲にガードを置いてポンチョを装着し、Monaghan 型ポンプを駆動した時のポンチョ内の圧。

で頸から大腿までを包み込むポンチョを製作し、両上下肢、頸部にバンドを巻き密閉し、Monaghan 型 cuirass レスピレータを駆動させると呼気時陽圧のためポンチョが ballooning し、有効な陰圧生成には時間を要した(図 1a)。またポンチョが身体に密着しないよう、胸腹周囲に半円柱状のガードをおいてポンチョを着け仰臥位になった場合、ポンチョがまずガードに付着し、次にポンチョ内全体に陰圧がかかり、陰圧は二段階に低下し、少なくとも陰圧—平圧のみの換気モードならこの方式でも可能だが、陰圧を解除した時の反動や、呼気に陽圧を付加した場合にはポンチョの ballooning のため、換気効率は低いことが考えられた(図 1b)。ドームはハードドームの方が望ましいと考えられた。前胸部のみをおおうドームでは換気量の増加は乏しかった。以上のことよりドームは軽量の FRP ハードドームで側胸腹部までおおうものとし、密閉度を高める目的で辺縁にラバーチューブを付けた。なお、ドーム内壁と前胸腹部との距離は横隔膜・胸郭運動の解析法⁴⁾より得たデータを基に約 5 cm 程度とした。

2) ポンプについて

cuirass レスピレータの場合、ドームと体表面との間には多少リークは生じるが、ポンプの高速排気が呼吸器の効率を決める大きな要因なので最大吸気流速 1.4 m³/分のブロー型ポンプとした。

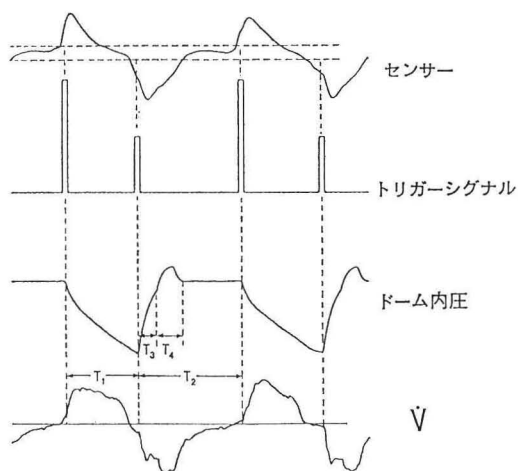


図 2 呼吸感知と同調する陰圧式人工呼吸器

鼻サーミスタより得られた信号の大きいシグナルが吸気、小さいシグナルが呼気の開始を示す。

3) 回路間の弁機構

ポンプとドームとを結ぶ回路には呼吸センサーからの吸気呼気の信号にて作動し、ドーム内に陰圧—平圧、陰圧—平圧—陽圧—平圧などを自在に生成する 5 つの弁およびレギュレータからなる吸気バルブユニット、呼気バルブユニットを設置した。

4) 呼吸同調

呼吸感知のセンサーとして鼻サーミスタを使用した。鼻口腔内の気流変化によってもたらされる温度変化を電気信号として得た通常の波形では呼吸感知は無理なので、この信号を微分処理し変化分として求め、Hi-cut, Low-cut フィルターを通して吸気時、呼気時に変化の大きな波形を得た。この波形の中央に基線を取り、正負方向に一定のトリガーレベルを設定すると吸気呼気のタイミングが鋭敏にとらえ得た(図 2)。さらにトリガーレベルは連続可変としそれぞれ違う患者の呼吸信号に追従しうるものとした。

開発した cuirass レスピレータのブロックダイヤグラムを示す(図 3)。

器械の性能評価

健康人を対象に器械の性能評価を行った。被験者は立位で側胸腹部まで覆うドームを装着し、鼻腔をクリップで閉鎖し、ニューモタコメータ、サ

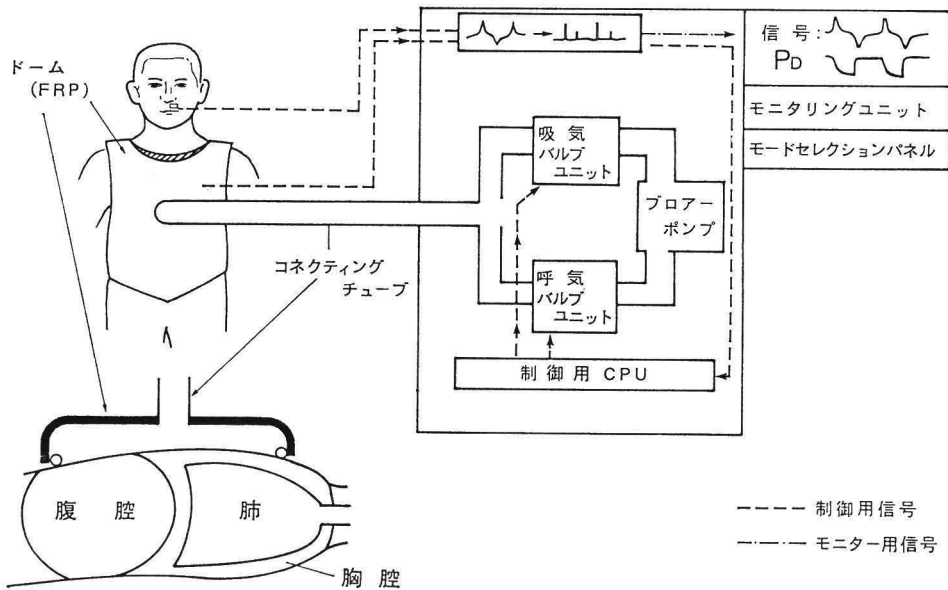


図 3 呼吸同調型 cuirass 型陰圧式人工呼吸器のブローダイアグラム

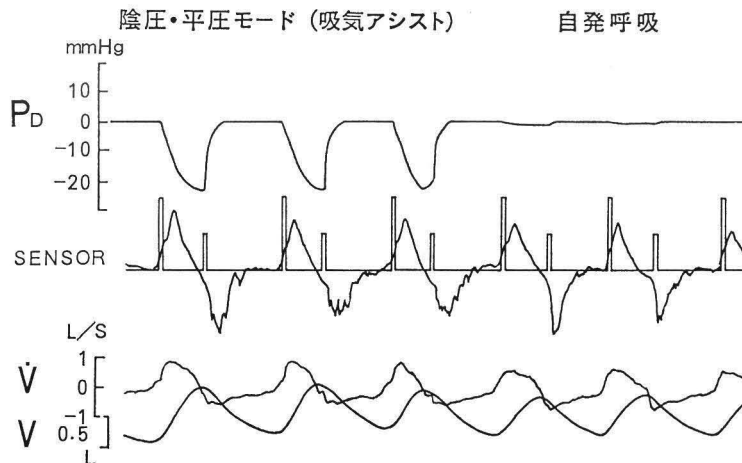


図 4 サーマスタからの呼吸サイクルの信号によりドーム内に速やかに有効な陰圧が生成されている。自発呼吸に比して、吸気流速と一回換気量の増加が認められる。呼気流速は変わらない。

ーミスタを取りつけたマウスピースをくわえた。口腔内圧 (P_M)、気流速 (\dot{V})、気流量 (V) およびドーム内圧 (P_D) が測定された。

サーミスタが吸気と呼気を感じて弁機構が作動して得られる陰圧—平圧モード (吸気アシスト) ではサーミスタの吸気信号より吸気バルブユニットは速やかに作動し、400~700 msec 後にドーム内に -15 mmHg の陰圧を生成し、吸気流速は 1 l/sec と自発呼吸時の $0.6\sim 0.7$ l/sec に比し

て増加し、換気量も増した。呼気信号により呼気バルブユニットの作動で 100~200 msec 後にドーム内は平圧に復した。呼気流速は増加せずパターンも自発呼吸時と同様であった (図 4)。一方呼気信号とともに吸気補助が終了し、ドーム内陰圧がリリースされた時点より可変ダイヤルで設定された delay time (T_3) の後に可変ダイヤルで設定された duration (T_4) に陽圧を付加して得られる陰圧—平圧—陽圧—平圧 (吸気呼気アシスト)

モードでは呼气中期に生成されたドーム内陽圧に同期して呼気流速の増加が得られた(図5)。

呼気信号より一定時間内に吸気信号がない場合(無呼吸など)、自動的に陰圧-平圧モード(吸気アシスト)による調整呼吸がスタートするバックアップ機構も設置したが、設定通り作動した(図6)。

また、種々のアラーム機構も設定されたように作動した。

臨床応用

開発された呼吸同調型 cuirass 型陰圧式人工呼吸器の臨床応用の1例を呈示する。

症例：H.M. 63歳，男。

主訴：呼吸困難(H-J IV°)。

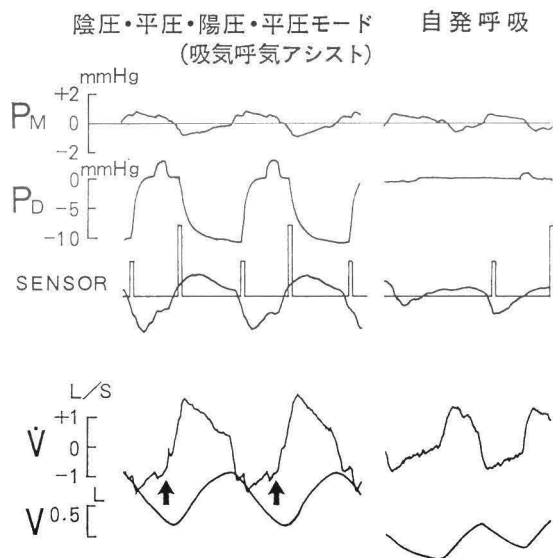


図5 呼気に陽圧を付加するとその時に一致して呼気流速の増加(矢印)が認められる。

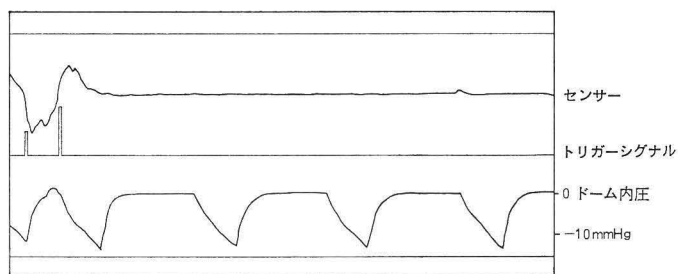


図6 バックアップ機構

現病歴：2，3年前より階段昇降時に息切れを覚えるようになった。1週間程前に感冒様症状の後より呼吸困難は増し，平地歩行も休み休みでないとできなくなり，当科を受診した。

既往歴：33歳の時，肺結核のため右上葉切除+胸郭成形術を受けた。

喫煙歴：20本/日×40年。

経過：入院時 $PO_2=42$ mmHg, $PCO_2=64$ mmHg と低 O_2 高 CO_2 血症を呈していたので，ただちに調節酸素療法，気道の感染管理，気管支拡張剤などの薬物投与がなされた。 $PO_2 \div 60$ mmHg となるも $PCO_2 \div 70$ mmHg と上昇し，入院後1週間目より連続3日間の数時間の間歇的な呼吸同調型 cuirass 型陰圧式人工呼吸器による呼吸補助を行った。呼吸同調は良好で PCO_2 , HCO_3^- はしだいに低下し $PO_2=75$ mmHg, $PCO_2=54$ mmHg となり階段昇降時の呼吸困難もなく退院した(図7, 8)。

考察

従来の鉄の肺や cuirass レスピレータなどの陰

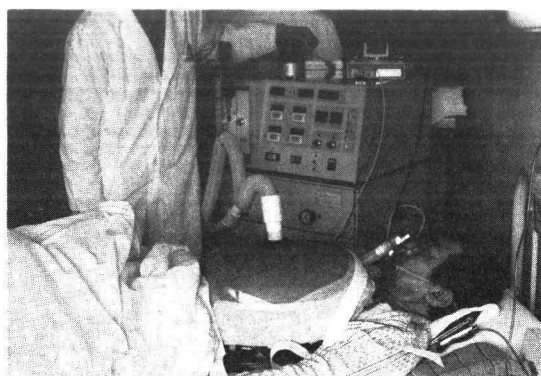


図7 呼吸同調型 cuirass 型陰圧式人工呼吸器の臨床応用

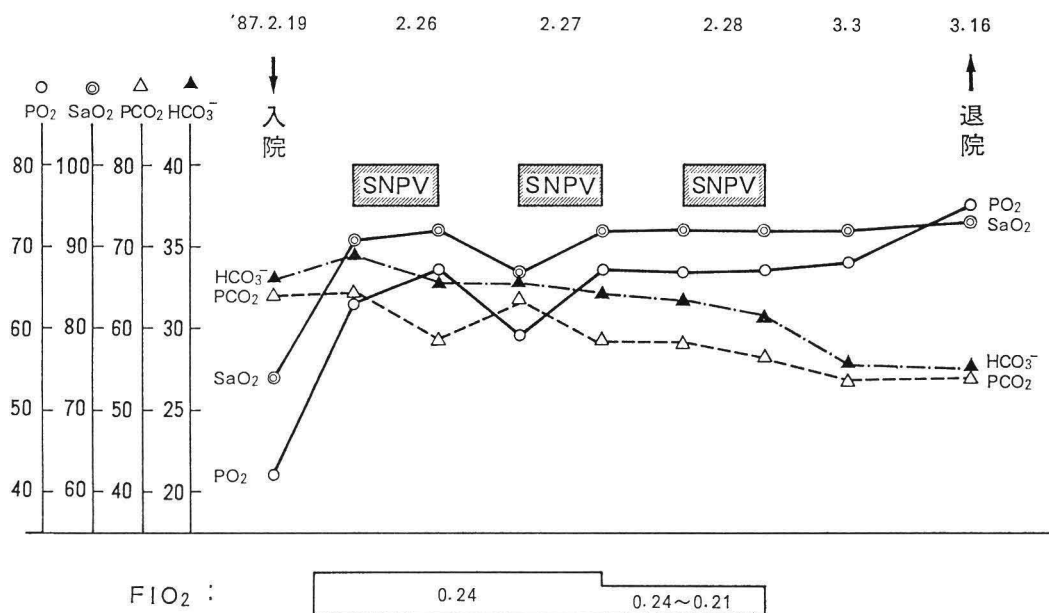


図 8 呼吸同調型陰圧式人工呼吸 (Synchronized Negative Pressure Ventilation) がなされた症例の臨床経過および血液ガス所見

圧式人工呼吸器の²⁾³⁾場合、呼吸困難のために増加している患者の呼吸数近くにこれらの呼吸器の換気サイクルを設定し、次に有効な換気量が得られるように呼吸器の換気サイクルを漸減し、患者はこの換気サイクルに努力して同期させる方式がとられるが、休むことなく一定の換気サイクルに同期する努力を強いられる患者の負担は大きく、医療サイドの介護が不可欠なことも多い。著者らの器機では呼吸サイクルを感知し同調して作動するのでこの負担を取り除くことができ、より生理的な補助が可能と考えられる。

Venti-Mask や経鼻カスラにて酸素が投与されている条件下でもサーミスタの吸気信号は $\dot{V}=0$ 、 $P_m=0$ の時点に一致しており、酸素投与が呼吸感知の障害にはならないことを示している。図 4, 5 において特に呼気信号が $\dot{V}=0$ の時点即ち吸気から呼気への変換時点より遅れているが、これは気流速、気流量を定量化する目的のためマウスピース内にサーミスタを取りつけたが、マウスピース内の温度変化が小さかったため、把えにくかったことによると考えられる。サーミスタを鼻翼につけ気流量、気流速の信号は吸気と呼気を見分けるためだけの目的で行った実験では信号のずれは認

めなかった (図 9)。臨床応用にも呼吸同調は良好であった。

今日まで鼻腔内圧や気管切開口の圧をトリガーに呼吸同調型が試みられたが困難であったと報告されている³⁾。圧の変化は±数 cmH₂O の範囲であり呼吸感知は難しいのかもしれない。

頸部以下を box 内に入れてしまう鉄の肺と違い、cuirass レスピレータの場合、ドームと体表面との気密性が換気効率を増す上で、また呼吸同調にとっても重要である。気密性向上のための工夫の 1 つに Tunncliffe ジャケットや Emerson 社のポンチョ型ラップ³⁾があるが、吸気から呼気への圧解除時や、呼気時に陽圧を付加する場合にはポンチョの ballooning を来し、換気効率は低いと考えられる。また、密閉されるため、温く、また着脱が容易でなく、呼吸困難の患者にとっては負担と思われる。体表面にかかる陰圧で胸腹部が受動的に動くのを期待する訳だから、ドームは固定端、体表面は自由端となる方が効率がいいと考えられる。この意味においてドームは rigid である事が望ましいが、気密性保持のためにドームと体表面との間にスペーサーが必要である。開発したドームにはラバーチューブを装着して気密性

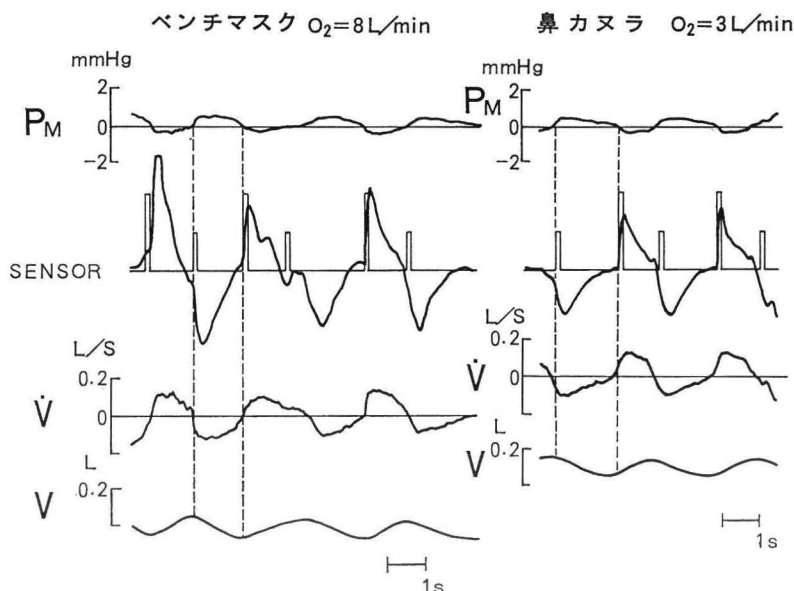


図9 酸素投与下でも鼻サーマスタの呼吸感知には問題がない。

を高めたが、一方このチューブはクッションとなり圧の逃げ場ともなり、さらに改良を要する点である。胸郭変形の高度な胸郭成形術後や脊柱後側彎症、筋ジストロフィー症などの場合は患者の体型を型どりして作製したドーム（シェル）を用いて良好な臨床効果を得たとの報告も多く⁵⁾⁶⁾、ドーム作製の方向として、胸郭変形の少ない肺気腫、重症筋無力症、ギランバレー症⁷⁾ などには汎用型を、また、胸郭変形の高度の疾患には患者の体型に合うオーダーメイドドームの作製が必要となると考えられる。

ポンプはブロアー型で最大吸引速度が $1.4 \text{ m}^3/\text{min}$ と高出力で圧生成は速やかである一方、騒音も無視できない。呼吸補助には良好な効果を得たにも拘らず、騒音をもたらすトラブルを苦に自殺した症例の報告⁵⁾もあり、とくに夜間使用の場合の騒音対策も重要であり、ドームの気密性改善を図り、小型のポンプを使用するなど今後の改良を要するところである。

アシストモードは陰圧—平圧—陽圧—平圧も可能であるが、呼気陽圧時に呼気流速が増幅されることからみて、気道閉塞のない神経筋疾患などには適応がありうる。原田らは筋ジストロフィー症などの場合、末期的には筋収縮力が疲弊してし

まうため、胸郭の縮小機転が障害され体外陰陽圧呼吸器の必要性を述べており、このような患者にては効果が期待される。また、弾性収縮力が低下し気道虚脱を来たしやすい肺気腫の場合、呼気気流が開始した後の呼気中期に陽圧を付加すれば有効かもしれない。

1952年、Copenhagen でのポリオ流行の時、Lassen が IPPB を用いて死亡率を 80% から 40% に下げたと報告して以来、鉄の肺のようなタンクレスピレータや cuirass レスピレータなどの陰圧式人工呼吸から陽圧人工呼吸へと人工呼吸法は大きくその方向を変え以後陽圧式人工呼吸が主流となり³⁾、急性呼吸不全治療に果たしてきた役割はいままでもない。一方慢性呼吸不全患者においては陰圧式人工呼吸による長期にわたる呼吸補助が可能で有効であったとの報告も散見されていたが^{8)~11)}、近年、欧米においてはこの方法による在宅管理の有効性が見直されつつある¹²⁾。陰圧式人工呼吸の場合、持続胸郭外陰圧で^{13)~15)}低酸素血症の改善を図る方向もあるが、自発呼吸に同調し換気を補助し低 O_2 高 CO_2 血症の改善が得られ、長期にわたる非侵襲的な呼吸補助が可能な症例は存在すると考える。さらに臨床応用を重ねて検討したい。

まとめ

鼻サーミスタを呼吸感知センサーとする呼吸同調型 cuirass 型陰圧式人工呼吸器を開発した。本器にては陰圧—平圧モード（吸気アシスト）、陰圧—平圧—陽圧—平圧モード（吸気呼気アシスト）が自在で可能であり、無呼吸時にはバックアップ機構としての調節呼吸も可能である。若干の臨床応用でよい効果が得られ、今後、低換気型慢性呼吸不全への換気補助による非侵襲的で長期にわたる呼吸補助が期待される。

文 献

- 1) 原澤道美, 吉村敬三: 臨床呼吸器病学, 呼吸器疾患の疫学. 東京, 朝倉書店, 1982, p. 103
- 2) Woollam CHM: The development of apparatus for intermittent negative pressure respiration. (1) 1832-1918. *Anaesthesia* 31: 537, 1976
- 3) Woollam CHM: The development of apparatus for intermittent negative pressure respiration (2) 1919-1976, with special reference to the development and use of cuirass respirators. *Anaesthesia* 31: 666, 1976
- 4) 千原幸司, 松延政一, 寺田泰二ほか: X線連続撮影による横隔膜—胸郭運動の評価. 日胸疾会誌 (増刊号), 23: 51, 1985
- 5) Wiers PWJ, Coulter LE, Dallinga OT, et al: Cuirass respirator treatment of chronic respiratory failure in scoliotic patients. *Thorax* 32: 221, 1977
- 6) Powner DJ, Hoffman LG: Bedside construction of a custom cuirass for respiratory failure in kyphoscoliosis. *Chest* 74: 469, 1978
- 7) Lands L, Zinman R: Maximal static pressures and lung volumes in a child with Guillain-Barré Syndrome ventilated by a cuirass respirator. *Chest* 89: 757, 1986
- 8) Boutourline-Young HJ, Whittenberger JL: The use of artificial respiration in pulmonary emphysema accompanied by high carbon dioxide levels. *J Clin Invest* 30: 838, 1951
- 9) 篠崎 拓, 秋山文弥, 金 泰希ほか: 低肺機能患者の管理における鉄の肺の利用. 麻酔 13: 288, 1964
- 10) 安藤博信: 慢性肺疾患に伴う急性増悪の成立並びにその治療 特に“鉄の肺”の治療効果 第2報 慢性肺疾患に伴う急性増悪の治療 特に“鉄の肺”の治療効果. 内科宝函 19: 45, 1971
- 11) 佐尾山信夫, 原田邦彦, 島田良昭ほか: 胸腹鋳型陰平圧人工呼吸器による呼吸管理. 臨床胸部外科 4: 153, 1984
- 12) Nicholas S Hill: Clinical applications of body ventilators. *Chest* 90: 897, 1986
- 13) Chernick V, Vidyasagar D: Continuous negative chest wall pressure in hyaline membrane disease: one year experience. *Pediatrics* 49: 753, 1972
- 14) Sanyal SK, Mitchell C, Hughes WT, et al: Continuous negative chest-wall pressure as therapy for severe respiratory distress in older children. *Chest* 68: 143, 1975
- 15) 奥津芳人, 磨田 裕, 沼田克雄: 胸郭外陰圧式人工呼吸—その生理と臨床応用—呼吸と循環 34: 407, 1986
- 16) Rochester DF, Braun NM, Laine S: Diaphragmatic energy expenditure in chronic respiratory failure the effect of assisted ventilation with body respirators. *Am J Med* 63: 223, 1977