

## ●解 説●

## タービン式人工呼吸器

木内耕己

キーワード：タービン式人工呼吸器，汎用人工呼吸器，搬送用人工呼吸器，在宅用人工呼吸器

## I. はじめに

人工呼吸器（mechanical ventilator）は機械的換気装置である。呼吸治療戦略に基づいた適切なモード選択や設定調整については議論も盛んであり重要であることは間違いないが、それは人工呼吸器が換気装置としての基本となるガス駆動源が安定的に稼働していることがあってこそ成り立つものであり、その供給方法と特性について理解しておくことは重要である。

人工呼吸器が換気を行うために使用する気体は酸素と空気である。それらを混合して吸入気酸素濃度を調整し要求された吸気流量を供給する。酸素や空気を人工呼吸器に供給する方法は主に3種類ある（表1）。このうち空気の供給に③のタイプを使用する人工呼吸器をタービン式人工呼吸器という。本稿ではタービン式人工呼吸器について、機器の分類と特徴および臨床使用における注意点などについて述べる。

## II. タービン式人工呼吸器とは

タービンとは、ある流体のもつ運動エネルギーを回転運動に変え、そこから機械的動力を得る装置をいう。代表的なものは水車である。水の流れによるエネルギーを羽根車に通し回転運動に変換しそれを利用して穀物を製粉する、といったような仕組みとなっている。

一般的に圧縮機を内蔵する人工呼吸器は「タービン式人工呼吸器」と表現され、海外の論文でも「turbine-

表1 人工呼吸器へのガス供給方法

①中央ガス設備で圧縮気体を作製し配管を通じて各病棟に供給する ⇒ 配管端末器から取り出す
②医療用ガスボンベメーカーが圧縮気体を作製しボンベを各病棟に供給する ⇒ ボンベから取り出す
③人工呼吸器内蔵圧縮機で圧縮気体を作製、供給する ⇒ そのまま使用する

based ventilator」<sup>1,2)</sup>と表記されていることが多い。ところが人工呼吸器の換気の駆動源として使用される圧縮機は、モータの機械的エネルギーによって流体にエネルギーをもたらす装置であり、厳密にはタービンとは異なる。日本工業規格（JIS B 0132）では圧縮機を「コンプレッサ」、圧縮機のうち吐出圧<200kPaのものを「ブロウ」としている。人工呼吸器に内蔵される圧縮機は一般的に吐出圧<200kPaなので本来は「ブロウ内蔵型人工呼吸器」と表現するのが正確かもしれない。実際、人工呼吸器メーカーにどう呼称しているかヒアリングしてみたが各社それぞれで異なっており統一されたものではなかった。本稿では混乱を招かぬよう便宜上タービン式人工呼吸器に統一して表現することとする。

タービン式人工呼吸器の送気方式は各機種によってさまざまな特徴があるが、代表的なものを図1に示す。これはその機種の使用目的に応じて必要とされる性能と、小型化や省コスト化とのバランスで人工呼吸器メーカーが選択していると考えられる。①は直接的にタ

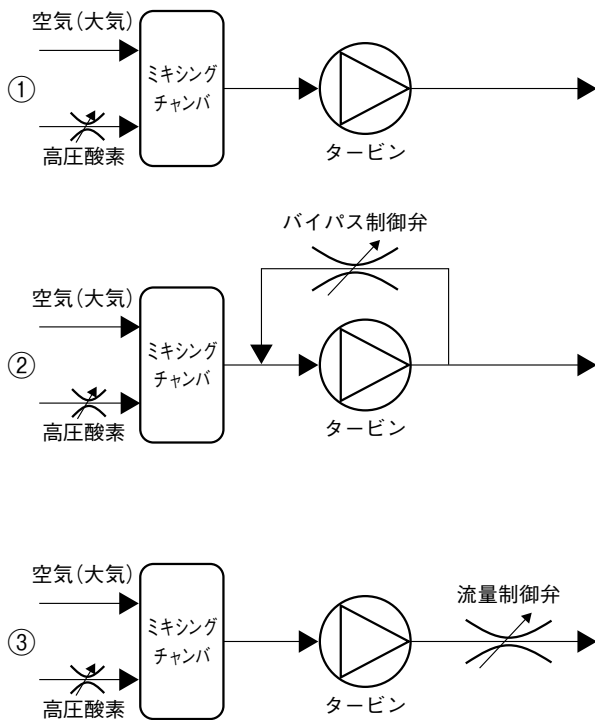


図1 人工呼吸器のガス送気略図

表2 人工呼吸器の用途別分類<sup>2,4,5)</sup>

①高機能人工呼吸器 (ICU ventilator) :	重症の急性呼吸不全に使用される
②汎用人工呼吸器 (mid-level ventilator) :	ICU 以外の一般病棟でも使用される
③搬送用人工呼吸器 (transport ventilator) :	CT 検査や転院の際に使用される
④在宅用人工呼吸器 (home care ventilator) :	在宅療養で使用される

ービン回転数をコントロールする。機構が単純だが要求される流量や圧に対してタービン回転数を調整するので応答遅れを生じる可能性がある。搬送用や在宅用など小型化が求められる人工呼吸器はこのタイプが多い。②はタービンを定常的に回転させバイパス流量を制御弁でコントロールする。換気応答性はよいがタービンを定速回転させているため消費電力が増える。③はタービンで発生させた高圧ガスを流量制御弁（吸気弁）でコントロールする。より精密な流量調節が可能だが機構が複雑化する<sup>3)</sup>。

### Ⅲ. タービン式人工呼吸器の用途別分類と特徴

人工呼吸器は用途によって大きく4種類に分けられる(表2)。これらの人工呼吸器はそれぞれの使用環境

に応じて換気の駆動源が異なる。今回テーマとして取り上げるタービン式人工呼吸器は主に②・③・④で使用されることが多い。それぞれについて解説する。

#### 1. 汎用人工呼吸器 (図2)

汎用人工呼吸器が使用される環境は幅広い。ICUにおいては急性呼吸促進症候群 (acute respiratory distress syndrome : ARDS) などの重症呼吸不全の管理としてオプション機能が多彩な高機能人工呼吸器が選択されることが多い。一方で意識障害や手術後覚醒不良などにおける換気補助目的であれば汎用人工呼吸器で十分対応できる。

ICUにおける治療によって急性呼吸不全の状態を脱したものの、呼吸筋力低下や意識障害遷延などで長期人工呼吸管理が余儀なくされた場合、ベッドコントロールの必要性によって人工呼吸器を装着したままICUから一般病棟への転棟が行われる。一般病棟の場合、酸素の配管端末器は人工呼吸器だけでなく鼻カニューラやフェイスマスク、リザーバマスクなどの酸素療法器具でも使用されるため各病室に設置されていることが多い。一方で空気の配管端末器は人工呼吸器以外に利用する場面が少ない。設備投資の観点からも一般病棟の全ての病室に空気の配管端末器を設置するのは現実的ではない。したがって転棟先に空気の配管端末器がない場合にはタービン式の汎用人工呼吸器を選択する必要がある。

#### 2. 搬送用人工呼吸器 (図3)

タービン式人工呼吸器が開発されたことで拡大した用途の1つは、人工呼吸器装着患者の搬送時であろう。搬送時は患者の病態によってベッドサイドモニタ、輸液ポンプ、補助循環装置などを携行することがある。したがって付帯する物品類は少なく小さいに越したことはない。人工呼吸器で空気の供給源にポンペを使用するのは、準備が手間であること、重量が大きいこと、搬送先に空気配管がない場合はポンペが空になった時に対応できないことなどから考えてもデメリットが大きいため、搬送用人工呼吸器では酸素ポンペのみ使用され、空気ポンペは使用されない。

ここで気をつけなければいけないのは、空気の供給方法は必ずしも内蔵型タービンとは限らないということである。タービンを使用しない搬送用人工呼吸器で



Savina300  
(Dräger、ドイツ、ドレーゲル)



C3  
(Hamilton、スイス、日本光電工業)



SERVO-air  
(Getinge、スウェーデン、フクダ電子)



monnal T75  
(Air Liquide、フランス、IMI)



VELA  
(Vyaire、アメリカ、IMI)



V60  
(Philips、アメリカ、フィリップスレスピロニクス)

**図2 汎用人工呼吸器**

( ) 内には製造元、国、日本での販売メーカを記載した。(各メーカーから写真提供)



monnal T60 (Air Liquide、フランス、IMI)



Oxylog3000 (Dräger、ドイツ、ドレーゲル)



T1 (Hamilton、スイス、日本光電工業)



paraPAC plus (Smith Medical、アメリカ、スミスメディカル)

**【タービン内蔵タイプ】**

**【ベンチュリ機構内蔵タイプ】**

**図3 搬送用人工呼吸器**

( ) 内には製造元、国、日本での販売メーカを記載した。(各メーカーから写真提供)

はベンチュリ機構が内蔵されている。どちらのタイプも移動時は酸素ポンペにホースアセンブリを接続して使用するが、ポンペが空になる、ポンペの元栓を開け忘れるなどで酸素供給が止まった時の動作がそれぞれで異なる。ベンチュリ機構内蔵タイプは酸素供給が途絶するとベンチュリ効果で周辺大気から取り込んでいた空気も同時に供給されなくなり換気自体が即座に停止する。人工呼吸器のアラームは当然鳴動するのだが医療スタッフの誰かが消音ボタンを1回押してしまえば再鳴動するまでしばらく気付かないことも起こりうる。自発呼吸がない、もしくは弱い場合には非常に危険であるが、患者の胸郭の動きやカプノメータによる呼吸数モニタおよび波形の変化で比較的早期に気付くことができる。一方で、タービン内蔵タイプは酸素供給が途絶してもタービンは作動できるので空気による換気は可能であり危険度は低下する。ただし胸郭の動き、カプノメータの波形や数値からは気付くことはできない。高濃度酸素が必要な患者の場合、結果的にはSpO<sub>2</sub>が低下してから気付くことになり対処が遅れてしまうことになる。搬送時において人工呼吸器が安全かつ確実に稼働していることを常に確認することは基本

中の基本ではあるが、ベッド移動時における各種カテーテルの事故抜去防止や画像結果の確認などに気を取られ、ベッドサイドモニタには目が行く（特にSpO<sub>2</sub>低下はなぜか皆がよく気付く）ものの人工呼吸器にまで注意が及ばないという医療スタッフは経験上非常に多い。解決方法はさまざま考えられるが、まずは人工呼吸器の特徴をしっかりと理解したうえで観察ポイントをお互いに確認しておくべきだろう。

ベンチュリ機構内蔵タイプはその機構特性上FiO<sub>2</sub>の下限が0.4～0.5程度となる。タービン式ではFiO<sub>2</sub> 0.21での換気も可能であり余計な酸素投与を防ぐことができる。

### 3. 在宅用人工呼吸器（図4）

タービン式人工呼吸器のなかには圧縮酸素を必ずしも必要としない機種がある。代表的なものといえば在宅用人工呼吸器がそれにあたる。機器内部の小型タービンを用いて空気のみでの換気補助を行う。酸素投与が必要な場合は低流量ガスを機器に取り込むことになるが、厳密なFiO<sub>2</sub>の設定はできない。しかし在宅療養が可能な病態であることを前提として使用するの



図4 在宅用人工呼吸器  
 ( ) 内には製造元、国、日本での販売メーカーを記載した。(各メーカーから写真提供)

れば、酸素濃縮器を用いた低流量酸素で必要十分なケースがほとんどである。

#### IV. タービン式人工呼吸器の性能

タービン式人工呼吸器は一般病棟でも使用されることを想定されているためか高機能人工呼吸器の簡易版と捉えられる傾向がある。しかしタービンによるガス供給能力が空気配管式よりも劣っているかというところも言い切れない。最大吸気流量は機種によって差はあるものの空気配管式で180Lpm程度、タービン式で240Lpm程度と、実はタービン式のほうが高い。マスクリークを前提とした非侵襲的陽圧換気（noninvasive positive pressure ventilation：NPPV）対応機においては、リークに応じてフローを調節する必要があり高性能なタービンがその技術を支えている。また近年タービン性能は向上してきており、旧世代機種に比べてタービンのサイズは1/10程度まで小型化されている機種もある。タービン式人工呼吸器の中には抜管後のハイフローセラピーに対応するオプションを設ける機種も出てきた。これらからわかるように、いわゆる高機能機種との差はほとんど感じることはなく選択できるようになっている。また、タービンの小型化、軽量化が進むことで搬送用、在宅用人工呼吸器においてはさらにその恩恵を受けることができるだろう。

一方で、高機能人工呼吸器との優劣がつくことはなくなっているとはいえ数多くの機種が存在する人工呼吸器においては、メーカーや世代によって性能差

が存在するのもまた事実である。次項にて解説する。

#### V. 機種ごとの性能比較

機種ごとの性能比較における評価項目には気道内圧のPTP（pressure time product）、PTP 0.3、PTP 0.5、トリガ遅れ時間がある（図5）<sup>2)</sup>。PTP<sub>trig</sub>は患者が自発呼吸を始めてから陽圧のサポートが始まるまでに必要な仕事量にあたる。これが大きければ患者にとって呼吸努力がより必要であるといえる。PTP 0.3やPTP 0.5は陽圧のサポートが始まってから0.3秒後および0.5秒後までに人工呼吸器がサポートすべき仕事量のうちどこまで到達しているかを示す。これが小さければ追従性が悪いと考えられる。

搬送用人工呼吸器の中で、タービン内蔵タイプとベンチュリ機構内蔵タイプで比較する研究が報告されている<sup>6)</sup>。ここではタービン内蔵タイプはベンチュリ機構内蔵タイプに比べてPTPは小さく、PTP 0.3、PTP 0.5ともに大きいと評価している（図6）。これは臨床上日常的に経験する事象である。重度の呼吸障害によって強い努力呼吸がある患者などでは高機能人工呼吸器でさえも同調性に難渋することがある。そのような患者がCT検査や病棟移動する際に、ベンチュリ機構内蔵タイプの搬送用人工呼吸器に付け替えるとシーソー呼吸の出現、明らかなトリガ非同調、 $P_{ET}CO_2$ の上昇などが起こることがある。その際は高機能人工呼吸器と同じ設定にするのではなく患者に合わせて設定調整し、搬送用人工呼吸器に付け替えた後も呼吸が安定し

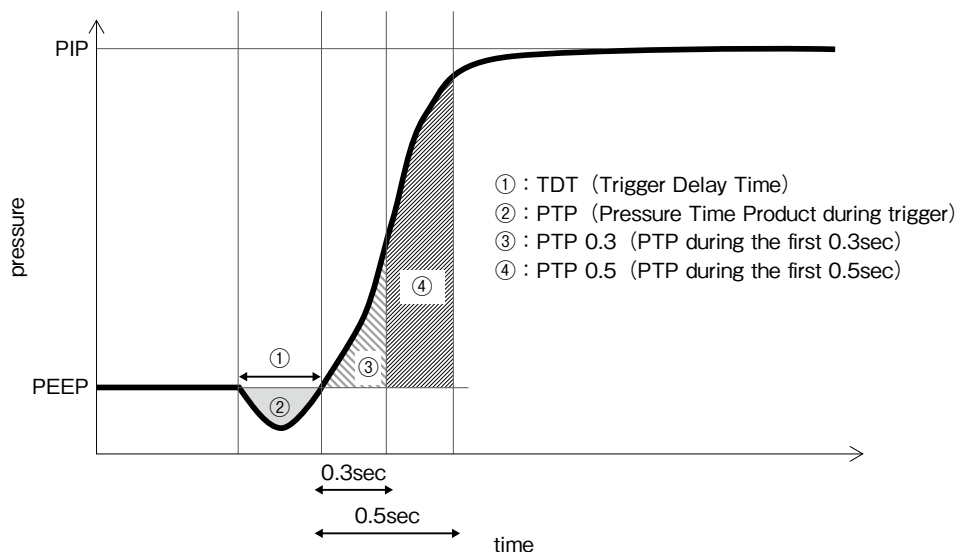


図5 人工呼吸器の性能評価（TDT、PTP、PTP 0.3、PTP 0.5）（文献2より引用改変）

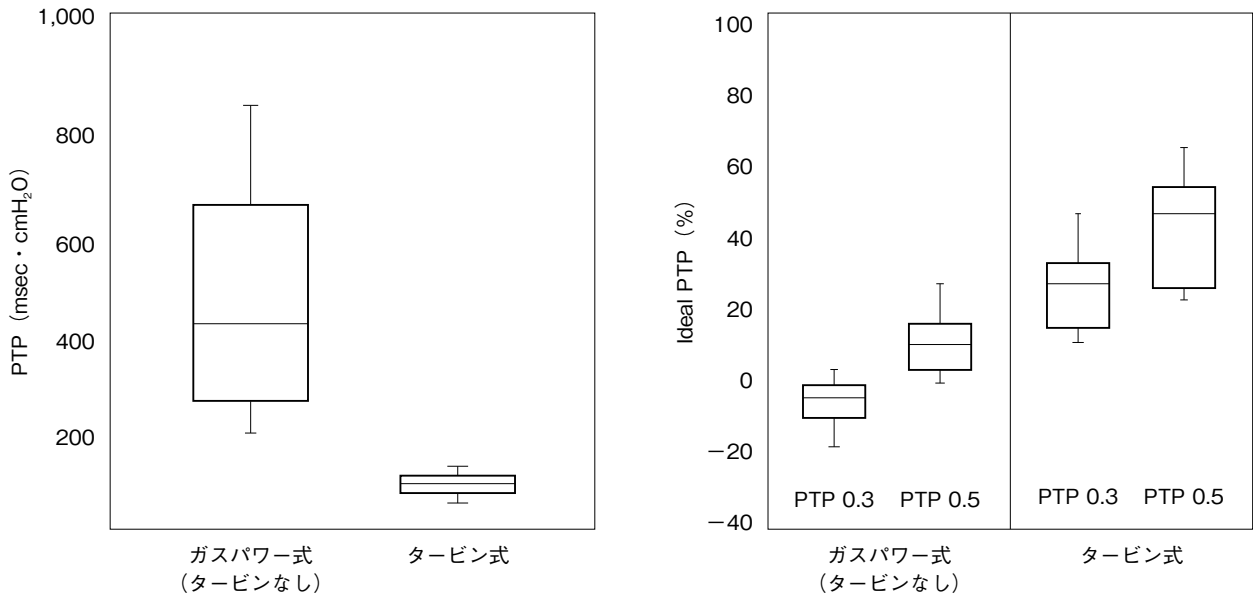


図6 搬送用人工呼吸器の性能比較（タービンなし vs タービンあり）（文献6より引用改変）

ていることを確認したうえで移動を開始すべきである。それでも対応できない場合はタービン内蔵タイプの人工呼吸器での搬送も検討する。

空気配管式人工呼吸器とタービン式人工呼吸器で性能比較した結果、比較的新しい世代の人工呼吸器であればトリガ遅れ時間や PTP 0.3 では大きな差がない、とする研究報告がある<sup>1)</sup>。タービン性能の向上や各社のソフトウェアの工夫などによってガス供給源が換気性能に影響しないところまで進んできているものと考えられる。また、タービン式人工呼吸器の中でも性能差は存在しているとする研究がある<sup>2)</sup>。機種別で PTP や PTP 0.3 を比較すると比較的古い機種に比べて比較的新しい機種は結果がよい。同施設内で発売時期にギャップがあるものを所持している場合にはこの点を考慮して運用方法を検討したほうがよい。

このほかにも一回換気量の正確性、バッテリーの性能（重量と使用時間の比率）、FiO<sub>2</sub> の安定性などが評価項目として挙げられている<sup>7)</sup>。

## VI. その他考慮すべき性能

タービン式人工呼吸器は各病棟の個室や在宅で使用するケースがあり、静音性が求められる。たとえば Savina300 ではタービン周囲に消音材を配して静音性を向上させている。また最近の在宅用であればかなり静かに動く。在宅療養方針となり汎用人工呼吸器から在宅用人工呼吸器に変更した時「静かになって嬉しい」

と患者から声をかけていただくことを経験する。

酸素消費量についても検討が必要である。特に搬送用人工呼吸器や在宅用人工呼吸器は酸素消費量が少ないことは酸素の安定供給に寄与するため重要である。主にベースフローを抑えている人工呼吸器は酸素消費量が少ない傾向にある。各機種のベースフローおよび酸素消費量については把握しておいたほうがよい。

人工呼吸器は一般的に耐用期間が設定されているが、タービンはその期間であれば交換なく使用できるものがある。耐用期間を超えて長期で使用する場合にはオーバーホール時にタービン交換によって費用が追加発生することを念頭に入れておく必要がある。在宅用人工呼吸器ではメーカーとのレンタル契約が主なので検討する必要はない。

## VII. さいごに

人工呼吸器においてガス供給源による性能差は小さくなってきているが、全てを新しい機種で統一できる施設は多くない。また本稿で在宅用と分類した人工呼吸器を一般病棟で使用するケースや、搬送用と分類した人工呼吸器を一般病棟用として使用するケースもある。現実的には各施設が持つ各種人工呼吸器の特徴を理解し使いこなしていく必要があり、ガス駆動源の違いを把握し対応することが重要な場面も実際には存在する。

PTP やトリガ遅れを実際に測定、評価するのは難し

い。参考となるような各研究についても使用するシミュレータや設定がそれぞれ異なることもあり一概に機種の良いかを判定することはできない。まずは自施設で所持している、もしくは今後購入を検討している人工呼吸器について医療スタッフ自身が強い自発呼吸、弱い自発呼吸の応答を試してみるとよい。実際明らかに違いを体感できることもある。これらを通じて適切な人工呼吸器の選択や観察ポイントの把握に努めていただきたい。

本稿の著者には規定された COI はない。

#### 参考文献

- 1) Thille AW, Lyazidi A, Richard JC, et al : A bench study of intensive-care-unit ventilators : new versus old and turbine-based versus compressed gas-based ventilators. *Intensive Care Med.* 2009 ; 35 : 1368-76.
- 2) Delgado C, Romero JE, Puig J, et al : Performance of the new turbine mid-level critical care ventilators. *Respir Care.* 2017 ; 62 : 34-41.
- 3) 丸川征四郎, 福山 学 : 人工呼吸器ハンドブック 2009/2014. 東京, 医学図書出版, 2009/2014.
- 4) L'Her E, Roy A, Marjanovic N : Bench-test comparison of 26 emergency and transport ventilators. *Crit Care.* 2014 ; 18 : 506.
- 5) Baboi L, Subtil F, Guérin C : A bench evaluation of fraction of oxygen in air delivery and tidal volume accuracy in home care ventilators available for hospital use. *J Thorac Dis.* 2016 ; 8 : 3639-47.
- 6) Boussen S, Gannier M, Michelet P : Evaluation of ventilators used during transport of critically ill patients : a bench study. *Respir Care.* 2013 ; 58 : 1911-22.
- 7) Blakeman TC, Branson RD : Evaluation of 4 new generation portable ventilators. *Respir Care.* 2013 ; 58 : 264-72.