

□ 特集：加温・加湿を考える □

## 【和訳】 ヒトの気道における熱と水分の動力学

Robert R. Demers, B.S., R.R.T.\* James Maguire, PhD\*\*  
Akito Ohmura, MD, PhD\*\*\*

## 要 旨

正常条件でのヒト気道における熱と水分の生理的バランスはこれまで広く誤解されてきた。機械的換気中に用いられる加湿器として最も一般的なものは依然として加温水槽式加湿器であるが、この種の能動的加湿器によって吸気に供給される水蒸気は、正常な上気道で自発呼吸するときの水分量を大きく上回っている。この種の能動的加湿器を採用することで起きる吸入ガスへの過剰な水分供給をどのような患者にも害がないと安易に思い込むことは正しいとは言えない。残念なことに、温湿交換フィルタなど別のタイプの加湿器具を加温水槽式加湿器に比べて劣っていると考え、加温水槽式加湿器が「標準」であると誤解している医師は多い。加温水槽式加湿器が開発されて以後可能になった熱と水分の収支に関する正確な分析で、世界で知られている限りの最も有効な加湿装置、すなわちヒトの正常な気道の加湿性能基準が得られている。幸いなことに、受動的加湿は能動的加湿よりはるかに低コストなので、HMEFの使用を考えているコスト意識の高い病院管理者にとってはさらに魅力的である。受動的加湿の禁忌に該当する場合には、能動的加湿器の温度を、それまで使用していたより低い範囲に調節することが推奨される。

## ヒトの気道における熱と水分の状態

ヒト肺胞内のガスはいわゆる「体温、大気圧、水蒸気飽和」(BTPS) 条件で存在することが前から知られている。「水蒸気飽和」という表現は、ガスがその温度で可能な最大量の水蒸気を運んでいることを示しており、体温 (37°C) では、これはガス 1 l 当たり水蒸気 44 mg である。陽圧での機械的換気は 1950 年代に一般的になったが、このときの吸入ガス加湿を目的として開発された器具が加温水槽式加湿器である。十分予想されることであるが、当時このような初期の加湿器の

メーカーは、この装置を、挿管された気道に対して吸入サイクル中に BTPS ガスを供給するように設計した。自発的換気中の吸入ガスの熱と水分量を精密に測定できるようになるには、かなり後になって動作が迅速な質量分析計が発明されるまで待たなければならなかった。そのような質量分析計が開発され、ヒトの呼吸に応用されると、バイオメディカル技術者はカテーテルを気管分岐部まで挿入し、それを用いて全呼吸サイクルでガスを採取できるようになった<sup>1)~4)</sup>。この測定により、(1) 呼気が気管分岐部において実際に 37°C を示すこと、および(2) 気管分岐部の吸入ガスが約 32°C を示すことが明らかになった。32°C の飽和ガスは水蒸気を 32 mg/l 含むことができるが、これは当初想定されていた 44 mg/l をはるかに下回っている。今日から振り返ってみると、機械的換気患者の気道に BTPS 吸入ガスを供給するための熱心な努力がやり過ぎであったことがわかる。そのようなガスは、気管チューブや気管切開チューブの先端が通常留置されている気管分岐部

\* Sole Proprietor, Demers Consulting Services, 225 Crossroads Blvd., PMB # 415, Carmel, California 93923  
Staff Respiratory Therapist, Community Hospital of the Monterey Peninsula, Monterey, California, U.S.A.

\*\* Senior Scientist/Lecturer, Pall Critical care, Ann Arbor, MI

\*\*\* Department of Anesthesiology, University Hospital Mizonokuchi, Teikyo University School of Medicine, Kawasaki, 213-8507

訳：日本ポール株式会社

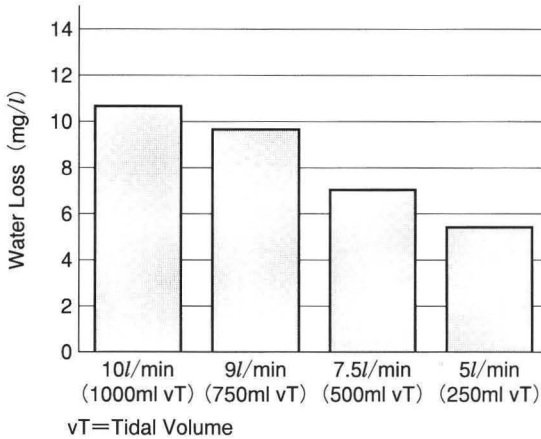


図1 各種一回換気量における水分損失 (ISO 9360-Draft 1998)

\*48時間の試験時間での平均水分損失

における、自発的に吸入されたガスの水蒸気量を大幅に上回っている。

#### 「水蒸気量」データと「水分損失」データ

本稿ではすでに、吸入ガスの水蒸気量をその絶対湿度 (ガス 1 l 当たり mg) で表している。しかし、すぐ後で述べるように、温湿交換器 (HME) や温湿交換フィルタ (HMEF) の規格では一般に、その性能が「水分損失」で示されている。水分損失を用いることで最初はとまどうかもしれないが、この2つの概念は容易に対応させることができる。

Pall Medical Corporation が最近発表したテクニカルレポート<sup>5)</sup>から、Ultipor<sup>®</sup> 100 HMEF の性能を示した図1を抜粋しているが、この図1について考えてみよう。この図1では、Ultipor<sup>®</sup> の性能が各種一回換気量における水分損失 (mg/l) で示されている。これらのデータは、ISO規格で厳密に指定されている構成の試験装置を換気することによって得られたものである。この装置には、ヒト肺胞の熱と水分の条件をモデル化した、37°C に維持された水槽が組み込まれている。この装置に、乾燥したガスが図1に挙げられている容積ずつ周期的に導入され、ヒトの一回の換気が再現される。この乾燥ガスが装置内で急速に平衡に達するにつれてこの「吸入」ガスは BTPS 条

件となり、このガスが装置から排出されるときには水分を水蒸気の形で運び出す。このプロセスが無限に続くのであれば、当然ながら、最初に水槽に入っていた水は完全になくなってしまいうだろう。水がこのようにしてなくなる速度が、装置重量の減少を導入ガス 1 l 当たり mg 単位で観察することによって測定される。この HMEF について行われた実際の試験は 48 時間行われた。説明のため、この 48 時間の試験を 100 分ごとに考えることにする。Ultipor<sup>®</sup> 100 をこの装置に接続された吸気/呼気回路に取り付け、一回換気量 1,000 ml を毎分 10 サイクルの呼吸数で試験装置に周期的に供給すると、100 分間で観察される水分損失は約 10.9 g となった。したがって、試験装置を計 1,000 l (1 回 1.0 l × 毎分 10 回 × 100 分) で換気したとき、装置から 10.9 g の水が運び出された。これは、図1の 10 l/min のところの棒グラフの高さで示されているように、1 l 当たり 10.9 mg の水分損失値に換算される。水槽から発生するガスの水蒸気量は当然ながら 44 mg/l であることがわかっており、BTPS 条件に一致する。呼気時に水蒸気が Ultipor<sup>®</sup> を通過するとき、この水蒸気のすべてではないがほとんどがこの HMEF 内に捕捉され、この水分が次のサイクルの吸気に戻される。この吸気ガスの水蒸気量 (33.1 mg/l) は、示されている水分損失値 (10.9 mg/l) と 44 mg/l の算術的な差として容易に算出される。ゆえに、「水分損失」データと「水蒸気量」データは単純な引き算で簡単に換算できる。図1に挙げられている一回換気量における平均水分損失は、一回換気量 1,000 ml で 10.9 mg/l、一回換気量 750 ml で 9.8 mg/l、一回換気量 500 ml で 7.0 mg/l、一回換気量 250 ml で 5.4 mg/l であった。図1から、一回換気量が 1,000 ml, 750 ml, 500 ml および 250 ml のときの吸入ガスの水蒸気量はそれぞれ 33.1, 34.2, 37.0 および 38.6 mg/l である。これらの水蒸気量は、正常なヒトの正常な気道において観察されている吸気の生理的湿度よりわずかに～かなり高い値である。

病院によっては、活動性結核 (TB) 患者に頻繁に遭遇することがある。したがって、この種の

施設では機械的換気患者が活動性 TB に罹患していることは珍しくない。しかし、施設の患者集団中での結核の罹患率が低くても、結核が懸念される病原体であることには変わりない。というのは、患者が活動性結核に罹患しているかどうかは入院時や挿管時にはわからないのが普通で、挿管から何日も経ってから活動性結核への罹患が判明することが多いからである。このことから、ヒト免疫不全ウイルス (HIV) についてわれわれが日常的に行うようになってきている普遍的注意のような方法で、この分野についても予防的監視を行うべきであることは明らかである。HIV が含まれた血液に接触するリスクを避けるため、看護者は血液への接触が予想される場合常に、自分自身を保護するため適切な衣類を着用している。特に耐性結核菌が警戒すべき頻度で報告されていることからみて、このような普遍的注意の考え方を結核についても同様に常に適用すべきであると十分言うことができる。結核患者の機械的換気に適用される普遍的注意事項として、十分な能力のあるフィルタを人工呼吸器の呼気側に挿入することは必須であると考えられる。

米国疾病対策予防センター (CDC) は、結核菌感染が確認されている非挿管患者を看護するとき高性能微粒子エアロゾル (HEPA) 規格に適合するマスクを着用することを義務づけているガイドラインを公表している<sup>6)</sup>。このような患者に挿管する必要があるときには常に HEPA グレードの濾過を行うべきであることは間違いないが、患者が結核に感染していないことはほとんどの場合誰にも保証できないので、HEPA グレードの濾過は日常的に行うべきである。驚くべきことに、人工呼吸器の回路に接続する目的で設計されている呼吸回路フィルタや HMEF のほとんどは HEPA 基準にはるかに達しておらず<sup>7)</sup>、HEPA 基準の 1/47~1/20 の効率を示すに過ぎない。その一方で、樹脂結合セラミックファイバー型フィルタの性能は、HEPA グレードの濾過を 3 倍以上上回っていることが示されている<sup>4)</sup>。ゆえに、看護者は、このタイプのフィルタメディアを換気回路に挿入することで、患者と自分自身に対する保護性を大幅に高めることができる。

残念なことに HMEF にはある種の使用禁忌があるので、あらゆるカテゴリーの患者に適用できるわけではない。HMEF の使用禁忌に該当するかどうかはチャート (図 2)<sup>7)</sup> で判定できる。使用禁忌に該当する場合には、HMEF の代わりに加温水槽式加湿器を使用する必要がある。しかしそのような場合でも、人工呼吸器のそばに多くの看護者と患者を保護するため、十分なレベルの濾過を行うことは依然として非常に重要である。このような場合、患者を人工呼吸器に接続する前に、十分な能力のあるフィルタを人工呼吸器の呼気側に取り付けなければならない。中には、ある種のブランド/型式の人工呼吸器の回路に組み込まれている多用途フィルタ (Mallinckrodt 製 Omni<sup>®</sup> フィルタなど) で十分だと思込んでいる呼吸療法士もあるかもしれないが、そのような器具が HEPA 基準を満たしていないということに留意しなければならない。

### 気道の熱と水分の動力学

加温水槽式加湿器の代わりに温湿交換器を採用すると正常時と比較して気道の乾燥を招くという主観的印象を持っている医師は多いが、正確には、事実はその逆である。

前記のとおり、Ultipor<sup>®</sup> は気管分岐部近傍に、正常レベルである 32 mg/l に近い水蒸気量の吸入ガスを供給する。ほとんどの場合、われわれが吸入する空気の水蒸気量は 32 mg/l をかなり下回っている。72°F で水蒸気が飽和している空気をわれわれが正常な上気道で自発呼吸するときの状況を考えてみよう。そのような空気の水蒸気量は約 20 mg/l である。その空気に、環境から気管分岐部に達するまでの過程で約 12 mg/l の水分が供給され、前記の値に達するのである。ゆえに、気管分岐部から近位側の気道 (鼻咽頭または口腔咽頭、下咽頭、喉頭および気管) からは、気管分岐部の位置で正常な吸気とするために不足する分を空気に補うための水分が失われる。しかし、Ultipor<sup>®</sup> のような HMEF が取り付けられ、上気道がバイパスされている挿管患者では、HMEF でこの機能を行うことができるので、上気道から追加の水分を供給する必要がない。した

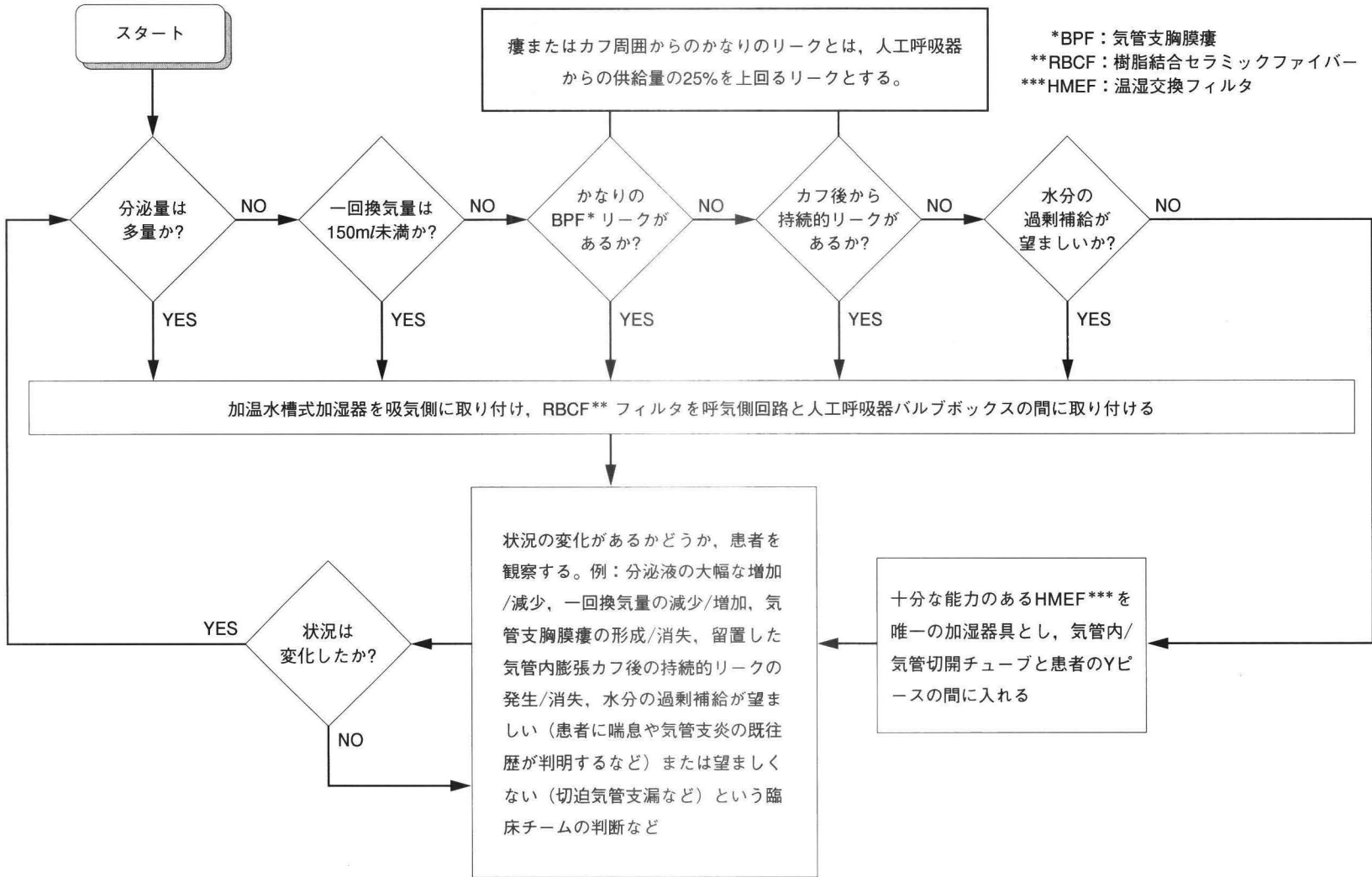


図 2 機械的換気患者に対する適切な加湿/濾過法を選択するためのチャート

がって、近位気道で生じる水分損失がなくなる。したがって、正味水分損失は、患者が正常な気道で呼吸するときよりも小さくなる。気道に供給する水分がHMEやHMEFと比較して可視的に多い加温水槽式加湿器の方がHMEやHMEFより優れていると考えがちかもしれないが、誤解すべきではない。前記のとおり、水槽式加湿器は熱と水分の正常かつ生理的な動力学状態とは程遠い状況を作り出しているのである。前述のとおり水槽式加湿器は吸入ガスを過剰に加湿しているのであって、水分や熱の収支からそれが「正常」で「生理的」であるとする風潮には異を唱えるべきである。言い換えれば、加温水槽式加湿器は性能が正常な生理的状态から著明に乖離しているので、どのような器具との比較においても標準として不適当だと考えられる。

気道の粘膜面で発生する熱損失は、粘膜から相対的に低温の吸入ガスへの熱伝導だけでなく、粘膜面での蒸発によっても起こり、後者の比率の方がはるかに高い。水の気化熱は540 cal/gと非常に大きい。健常者は1時間に空気を約360 l吸入する。この空気が先の例の絶対湿度(20 mg/l)を示すとすると、気道は大気から肺胞に到達するまでの間に吸気に24 mg/lを供給しなければならない。その半分は気管分岐部より近位側、残りは気管分岐部から肺胞までの間で供給され、肺胞ガスの絶対湿度は98.6°F (37°C)で44 mg/lとなる。ゆえに、この間の気管気管支樹からの総水分損失は $24 \text{ mg/l} \times 360 \text{ l} = 8,640 \text{ mg}$ 、すなわち8.64 gとなる。この量の水が蒸発する過程で体から供給される熱エネルギーは、 $540 \text{ cal/g} \times$

$8.64 \text{ g} = 4,666 \text{ cal}$ 、すなわち4.67 kcalとなる。熱い空気を吸入したときでも、その空気が比較的乾燥している限り気道でかなりの蒸発冷却が起きるのはこのためである。砂漠地帯の居住者にとっては、気温が高いだけでなくほとんど常に湿度が非常に低いことが幸いとなっている。

ある種の気候条件では、上気道の温湿交換機能が機能しなくなる可能性がある。例えば、ルイジアナ州ニューオーリンズのような場所で8月の暑い日によくある条件を考えてみよう。午後の気温は100°Fに達し、相対湿度は66%になる。このような空気の絶対湿度は約32 mg/lで、気管分岐部の通常の水蒸気量とすでに同等であるので、この空気を吸入した場合には気管分岐部までに水分を追加する必要がないと考えられる。ゆえに、上気道の温湿交換機能はここでは不必要である。

それどころか、ときには空気中の熱と水分がBTPS条件を超えている熱帯気候の条件に遭遇することもある。気温が100°Fを超え、相対湿度が100%である熱帯雨林をかき分けながら歩いているところを想像してみよう。このような条件では(幸い、めったに遭遇することはないだろうが)、吸気している間に気道を通るガスから熱と水分が逆に抽出され、上気道でも下気道でも吸気に対して熱や水分が供給されることはない。言い換えれば、赤道直下のジャングルを歩いているときには吸気している間に気道で蒸発ではなく凝結が発生する可能性がある。吸気に普通ともなう蒸発冷却はここではまったく起きないので、このような厳しい条件では、息をしても熱暑を一層感じるに過ぎない。