

人工鼻フィルター —加温・加湿のしくみ—

石井一成*

ABSTRACT

Heat and Moisture Exchanger (Filter)
—Element Device and Humidification—

Kazunari ISHII*

Scientific and Laboratory Services, Nihon Pall Ltd., Ibaraki, 300-0315

Heat and moisture exchangers (HMEs) conserve heat and moisture during expiration of a patient and return to the inspired gases. The condensed elements of the HMEs are categorized into hygroscopic or hydrophobic material. The element of hygroscopic HMEs adsorbs additional water on expiratory gas, so the efficiency is increased by volume of the material. Hydrophobic HMEs are made of a water-repellent with a large surface area of the element, and are also efficient microbiologic filters.

The devices are cheap, safe, and easy to use and require neither external power nor water supply as heated hot water humidifiers. In addition, filter combined HME (HMEF) are able to provide physiological levels of humidity and prevent contamination of equipment.

However, HME output tends to decline as ventilatory minute volumes increase or the expiratory gas temperature decrease. Therefore, respiratory care must be meticulous if complications associated with thick secretions and tracheal tube occlusion is to be avoided.

1. はじめに

麻酔・人工呼吸に使用される乾燥ガスを加湿することは、気道からの水分損失による粘膜損傷を防止するばかりでなく、熱損害による耐温低下をも抑制することは既知の通りである^{1)~3)}。人工呼吸における吸気ガスの加湿には、加温加湿器などの装置や人工鼻を用いる方法などが広く採用されている。人工鼻という加湿デバイスが考案されてからすでに50年が経過した⁴⁾。現在ではバクテリア除去フィルター機能を併せ持つ人工鼻フィル

ターや加湿補助装置の開発により、多様な特徴を持つデバイスが麻酔・人工呼吸管理の患者口元デバイスとして普及している。

本編では人工鼻と人工鼻フィルターの加温加湿デバイスとしての位置づけ、構造・機能特性などについて概説する。また、人工鼻や人工鼻フィルターを安全かつ効果的に使用するための提案を行う。

2. 人工鼻と人工鼻フィルター

1) 人工鼻は加温加湿器といえるか？

人工鼻は、呼気に含まれる水分と熱を呼吸器回路の口元デバイスで一時的に捕捉・貯留して、吸

* 日本ポール株式会社応用技術研究所

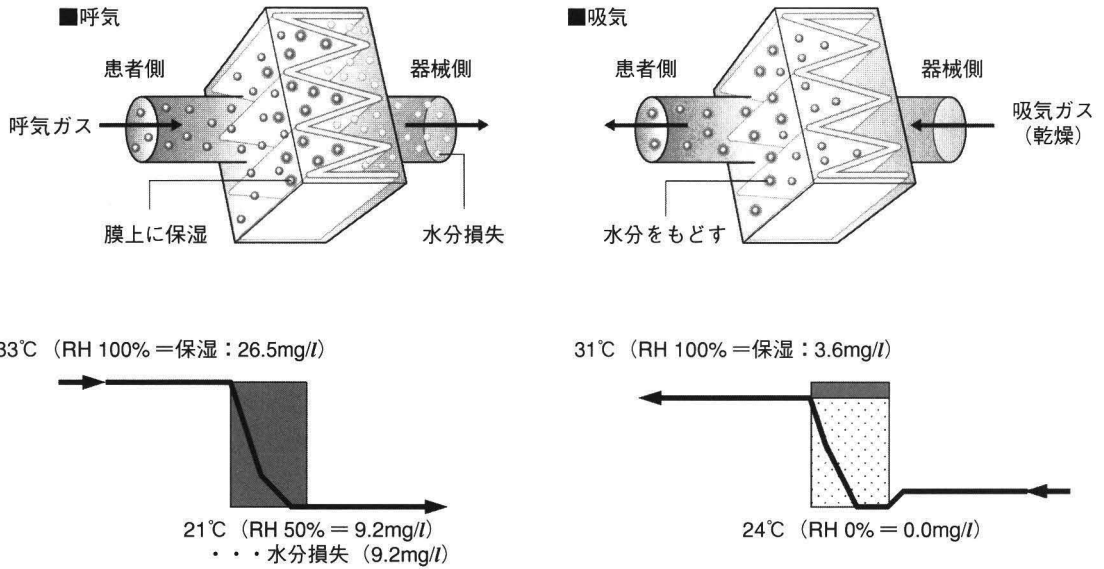


図1 人工鼻の加温・加湿のしくみ

人工鼻（フィルター）の保湿材料は、呼気中の水分と熱を貯留して吸気の際に戻すコンデンサー。仮に 33℃ の呼気ガスが 21℃ まで冷やされるならば、約 9.2mg/l の水分損失になる。また吸気が加温・加湿されて 31℃ で人工鼻を出るなら、32.1mg/l の水分を放出できる。

気の際に戻すことによって気道の保湿を行う、『受動的な加温・加湿器（保温・保湿器）』である。人工鼻の機能は、デバイスを通する「呼気と吸気」といった双方向の気流の流れを利用した、いわば“呼吸ガスと保湿デバイスのマジック”であるといえる（図1）。

それに対して、加温加湿器は呼気を利用するのではなく、熱源（外部エネルギー）を用いて吸気ガスを加温・加湿させて患者に供給するデバイスであり、『能動的な加温・加湿器』である。

2) 人工鼻（HME）とフィルターは別物？

(a) 人工鼻

人工鼻機能を有するデバイスが多種市販されているが、細菌除去機能の有無や保湿のしくみの違いなどによって分類することができる（図2）⁵⁾⁶⁾。

初期の人工鼻には金属ワイヤーが用いられた⁴⁾⁷⁾。金網をロール状に巻いたり何段にも積層して厚みを持たせたものや金属ワイヤーのチューブを束ねたもので、半閉鎖麻酔回路での使用には耐えうるものと評価されていた⁸⁾。しかし金属を

材料にするために重い、デバイス内部が冷えすぎて捕捉水分の気化効率が悪い、などの欠点があった。さらに冷却による結露水によって目詰まりといった問題もあった。

金属を用いた人工鼻はリユーザブルであったが、10年後には多孔質の紙をロールに巻いたもの⁹⁾やポリウレタンの多孔質材料（スポンジ）を保湿材として用いる¹⁰⁾ディスポーザブルの製品が開発された。金属ワイヤーを材料に用いた人工鼻も多孔質の紙や多孔質のポリウレタンを材料にする人工鼻も加湿の原理は同じで、「複雑に入り組んだ材料の隙間に呼気中の水分を結露させて吸気ガスが材料を通過する場面で、その結露水を蒸発させて戻す」という仕組みである。しかし金属を材料にする人工鼻に比べて「安い・軽い・小さい」に加えて熱伝導性が小さいために水分捕捉能力も高く、水分損失が少ないなどの優位性が複数の比較評価で確認され、やがて金属材料に取って代わることになった。これが現在の人工鼻の原型といえる。

その後、人工鼻はより吸湿性の高い素材・構造

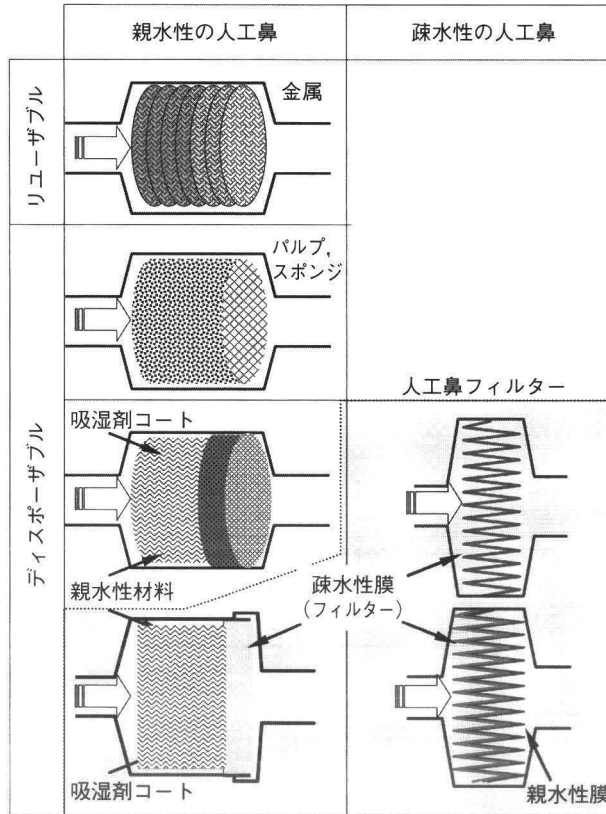


図2 人工鼻のしくみによる分類

人工鼻は親水性・疎水性に分かれる。また疎水性のフィルターからなる人工鼻および親水性の人工鼻に疎水性のフィルターがついたものが、人工鼻フィルターである⁵⁾⁶⁾。

の工夫および化学物質を添加した素材の追加によって、性能の向上がはかられてきた^{11)~13)}。

(b) 人工鼻フィルター (HMEF)

フィルターとは「バクテリア除去性能を有する」ろ過器を指す。もともと麻酔回路の吸気ガスに含まれる微粒子を除去することを目的とした回路フィルターとして開発され、1960年はじめにはグラスファイバー不織布の吸気ガスフィルターが製品化されていた¹⁴⁾。その後、フィルター内部を結露させない工夫によって使用中の気流抵抗上昇を防止できる疎水性の材料からなるバクテリアフィルターが作られ¹⁵⁾、麻酔・呼吸器の回路呼吸側への装着も可能になった。さらに疎水性のバクテリアフィルターを患者口元に装着すれば、「麻酔・呼吸器システムからの患者汚染」と「患者に

よるシステム汚染」の双方を防止可能という観点から、患者口元とY-ピースの間に装着して使用できる疎水性のバクテリアフィルター（口元フィルター）が開発された。口元で使用する疎水性のフィルターは、同時に人工鼻と同等の加温・加湿機能を発揮できることが理論的・実験的に確認され、親水性素材を用いる従来の人工鼻（親水性の人工鼻）に対して、「疎水性の人工鼻フィルター」と分類されるようになった⁵⁾⁶⁾¹⁶⁾¹⁷⁾。

現在市販されている人工鼻フィルターは、疎水性フィルターに親水性素材を付加した“フィルター由来”²⁰⁾ および、従来の人工鼻に疎水性フィルターを付加した“人工鼻由来”²¹⁾²²⁾ の2つの系統がある⁵⁾⁶⁾。

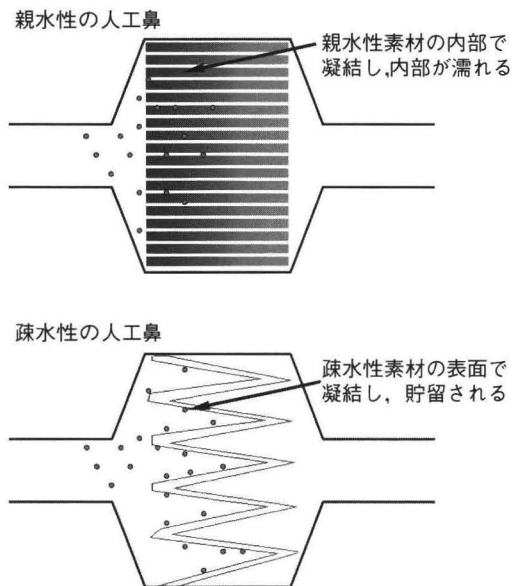


図3 保湿のしかた（親水性の人工鼻と疎水性の人工鼻）

3. 加温・加湿のしくみ

親水性の人工鼻も疎水性の人工鼻（フィルター）も、暖かい呼気に含まれる水蒸気を温度格差のある保湿材で冷やして凝結させて「結露水」というかたちで一時的に保湿し、吸気の際に結露水を気化させて乾燥ガスを加湿して戻すしくみである。なお、結露水が気化される際に奪われる気化熱によって保湿材の表面が冷やされ、次の呼気通過のときに水蒸気凝結と熱の貯留を行う（図1）。ともに「呼気と吸気」の双方向の気流の流れを利用するという基本的な機能は同じであるが、“保湿のしかた”が異なる。

親水性の人工鼻は、濡れやすい（水との親和性が大きい）素材で作られており、保湿材料の内部で呼気を冷やして凝結させて貯留する（図3）。そのため、厚みを持たせた多孔質の構造にするなど、内表面積を大きくする工夫がなされている。ただし、厚くしすぎると人工鼻が大きくなるばかりか、気流抵抗も大きくなってしまいます。また孔の数を増やすために孔径を小さくすると、気流抵抗が大きくなるとともに貯留した結露水で目詰まりやすくなってしまいます。そのために構造的な工夫に

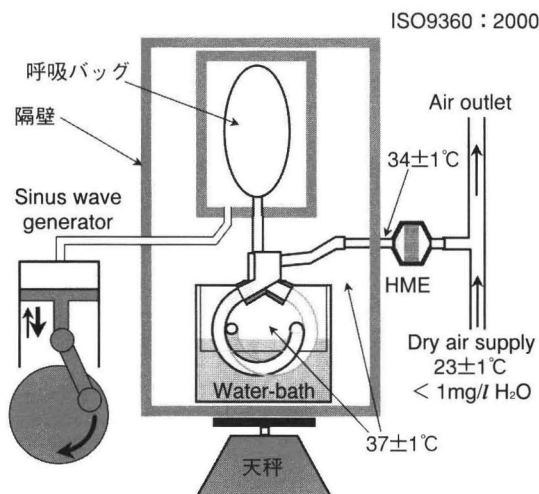


図4 Water Loss 試験法の肺モデル（ISO9360：2000）

は限界があり、吸湿効率を向上させるためのコンデンサーとして塩化カルシウム（ CaCl_2 ）や塩化リチウム（ LiCl ）などの水との親和性が高い化学物質を塗り込んだ材料を組み込んだ人工鼻（HCH）も登場した¹⁹⁾。

疎水性の人工鼻（フィルター由来）は水を材料の表面ではじく（水との親和性が極めて小さい）素材で作られた膜で、膜の表面で水分を凝結させて小さな結露水にして保湿する仕組みである。そのために、広い膜面積を有する必要がある。また気体中の水分（水蒸気）が凝結し始める大きさは知られている小さいウイルス（ $0.02\ \mu\text{m}$ ）よりも小さいことから、微細な凝結水の通過を阻止できる程度に細かい孔であることが望ましい。ウイルス除去グレードの疎水性フィルター¹⁸⁾は広い過面積と緻密な膜構造を有しており、上記の要件を満たす工夫がなされている。しかし疎水性の材料のみで水分の捕捉効率をさらに高くしようとして膜を広くすると、人工鼻フィルターが大きくなってしまいます。また材料の膜孔径をより緻密にしても気流抵抗が大きくなってしまいますので、やはり膜を広くしなければならなくなる。そのため構造的な工夫には限界があり、保湿効率を向上させるために親水性の材料を組み合わせることで保湿効率を高めた人工鼻フィルターが登場し

た²²⁾²³⁾。

4. 人工鼻の性能評価技術

1) 人工鼻（フィルター）の性能はどのように評価すべきなのか

臨床現場では、それぞれの施設・管理手技の中で取り付け位置の適切性や実際の加湿状態を確認することを目的として、回路結露の状態や気道の湿潤性を観察する工夫が従来から行われている。また最近では臨床用湿度計で相対湿度を直接モニターする方法も取り入れられてきている。しかし環境や患者の状態がまちまちであることに加えて、本来調査すべき要件の一部しかモニターできていないのがほとんどであり、施設間で一致しないことが多い。

モデル肺などを用いたシミュレーション実験や臨床での評価研究が多く行われているが、評価方法・環境条件などがまちまちであるためか研究間でのデータに一致性・相似性を認めないケースがある。また人工鼻（フィルター）の構造や特徴が多用であることも手伝ってか、それぞれの研究フォーカスも関心事に左右されて測定・調査項目選定がなされてしまい、研究間の比較ができないケースもある。

2) 国際標準試験規格

人工鼻として含むべき測定要件・方法と基準の国際標準試験規格（ISO9360）が、ISO（International Standardization Organization）によって1992年に初めて公開された²⁴⁾。

ISO9360の改訂版が2000年に公開されている（ISO9360：2000）²⁵⁾。この試験規格は肺モデルを用いたシミュレーションによって人工鼻の性能や安全性を評価するためのものであり臨床評価の規格を定めたものではないが、保湿性能に加えて安全性の指標とすべき気流抵抗の測定方法も規定している。また使用する肺モデルのスペック、精度、再現性評価方法、試験環境、測定装置の要件などを詳細に規定している。

ISO9360では人工鼻（フィルター）の加湿性能評価に、Water Loss試験法を規定している。この方法は、24時間の換気中に装置内部より失われる水分の重量（mg）を秤量し、総換気量で割っ

た数値（mg/l）で表すことから重量法とも呼ばれている。図4に肺モデルの概略図を示す。

最近では臨床現場での湿度をモニターするために電子式湿度センサーを応用しているが、ISO基準では気流中の湿度を湿度センサーで直接測定する評価方法は採用されていない。気流中の湿度を測定する方法としては、①熱力学的平衡温度から相対湿度を導き出す、②空気中に含む水分の熱伝導特性や赤外線・マイクロ波などの吸収特性から絶対湿度を導き出す、③吸湿性素材の電流変化特性から相対湿度を導き出す、などの方法がある。しかし、これらの方法では飽和水蒸気量を超える水分の動きを正確に測定することができない。また応答性（応答時間）が数秒から数十分になるため、リアルタイムに湿度の変化をとらえることができない。さらに、湿度センサーや温度センサープローブが結露にさらされると、応答時間がさらに延長するといった欠点がある。そのために、一定時間（実際には24時間の水分移動を“重量変化”によって測定する「重量法」に頼らざるを得ない。

5. 人工鼻や人工鼻フィルターを安全に使用するために

1) 利点

人工鼻は能動的な加湿加湿器と比較すると「加湿」能力は劣るが、①安価で小型・軽量、②電気や熱源や吸水を必要としない、③過剰な加湿・加湿の危険がなく、④蛇管内部の結露もない、などの特徴により、呼吸回路をシンプルにすることができる。またバクテリア除去機能を有する人工鼻フィルターを用いることによって、患者の気道と呼吸器回路の間の微生物拡散を防止可能になり、また回路交換の頻度を減らすことが可能になる。

2) 注意すべきこと

呼吸管理の環境や条件によっては、加湿不足に陥ることがある。人工鼻は保湿が不十分、吸気時の供給ガス温度が低いなどの場合には、能力を下回る加湿しかできないことを考慮する必要がある。

・患者口元の距離が離れすぎている場合や呼吸回路が冷風にさらされている状態の場合、人工鼻

へ到達する呼気の温度が下がり保湿できる水分量が減少する。低体温患者では呼気の温度が低い分、減少する。

・一回換気量が多いほど水分損失が大きくなり、保湿できる水分量が減少する²³⁾²⁶⁾。

・人工鼻単独での加湿が不十分な場合に加湿補助装置を併用する方法がある。しかしそれによる人工鼻の過剰保湿は気流抵抗上昇を招く。

・喀痰・血液および回路結露水が人工鼻へ多量に流入すると、目詰まりによる気流抵抗上昇を導く。疎水性の人工鼻フィルターは膜表面積が大きく、水をはじく特性からリスクが小さい。しかし親水性の人工鼻は流入部の表面積が小さいうえに液量が多い場合、内腔を閉塞してしまい、液体の貫通によって呼吸回路を汚染する可能性がある²³⁾²⁷⁾²⁸⁾。

・人工鼻や人工鼻フィルターはそれ自体が死腔をふやすデバイスであるため、換気量を考慮して選択する必要がある。

3) 使用を避けた方がよいケース

加湿不足と、死腔増大および気流抵抗上昇による呼吸仕事量 (WOB) 増大への配慮を行う必要がある。また、気道分泌物が多い患者への配慮も必要である²⁶⁾²⁸⁾。

引用文献

- 1) Chalon J, Patel C, Ali M, et al : Humidity and the anesthetized patient. *Anesthesiology* 50 : 195-198, 1979
- 2) Forbes AR : Temperature, humidity and mucus flow in the intubated trachea. *Br J Anaesth* 46 : 29-34, 1974
- 3) Berry FA Jr, Hughes-Davise DI, DiFazio CA : A system for minimizing respiratory heat loss in infants during operation. *Anesth Analg* 52 : 170-175, 1973
- 4) Walley RV : Humidifier for use with tracheotomy and positive-pressure respiration. *Lancet* 26 : 781-782, 1956
- 5) Hedley RM, Allt-Graham J : Heat and moisture exchangers and breathing filters. *Br J Anaesth* 73 : 227-236, 1994
- 6) Lloyd G, Roe JA : Filtration and humidification. *Problems in Respiratory Care* 4 : 474-486, 1991
- 7) Toremalm NG : A heat and moisture exchanger for post tracheotomy care. An experimental study. *Acta Otolaryngology* 52 : 461, 1960
- 8) Mapleson WW, Morgan JG, Hillard EK : Assessment of condenser-humidifiers with special reference to a multiple-gauze model. *Br Med J* 1 : 300-305, 1963
- 9) Walker AKW, Bethune DW : A comparative study of condenser humidifiers. *Anaesthesia* 31 : 1086-1093, 1976
- 10) Revenas B, Lindholm CE : The foam nose : a new disposable heat and moisture exchanger. A comparison with other similar devices. *Acta Anaesthesiol Scand* 23 : 34-39, 1979
- 11) Gedeon A, Mebius C : The hygroscopic condenser humidifier. A new device for general use in anaesthesia and intensive care. *Anaesthesia* 34 : 1043-1047, 1979
- 12) Stoutenbeck CH, Mirand D, Zandsta D : A new hygroscopic condenser humidifier. *Intensive Care Med* 8 : 231-234, 1982
- 13) Weeks DB : Evaluation of a disposable humidifier for use during anesthesia. *Anesthesiology* 54 : 337-340, 1981
- 14) Bishop C, Roper WA, Willams SR : The use of an absolute filter to sterilize the inspiratory air during intermittent positive pressure respiration. *Br J Anaesth* 35 : 32-34, 1969
- 15) Lumley J, Holdcroft A, Gaya H, et al : Expiratory bacterial filters. *Lancet* 2 : 22-23, 1976
- 16) Chalon J, Markham JP, Ali MM, et al : The Pall Ultipor breathing circuit filter : an efficient heat and moisture exchanger. *Anesth Analg* 63 : 566-570, 1984
- 17) Hedley RM, Allt-Graham J : A comparison of the filtration properties of heat and moisture exchangers. *Anaesthesia* 47 : 414-440, 1992
- 18) Ball PR, et al : Viral removal efficiency of Pall Ultipor breathing system filter. *Scientific and Laboratory Services, Pall Europe Limited*. 1987
- 19) Shelly MP, Bethune DW, Latimer RD : A comparison of five heat and moisture exchangers. *Anaesthesia* 41 : 527-532, 1986
- 20) Axelrod FB, Pan L : Validation of the Ultipor

- 100 breathing system filter for 48-hour use. Scientific and Laboratory Services, Pall Corp. 1999
- 21) Heat and moisture exchanger : DAR Hygroster. Evaluation 142 : 1-6, 1992
- 22) Kirton OC, DeHaven B, Morgan J, et al : A prospective, randomized comparison of an in-line heat moisture exchange filter and heated wire humidifiers : rates of ventilator-associated early-onset or late-onset pneumonia and incidence of endotracheal tube occlusion. Chest 112 : 1055-1059, 1997
- 23) Lee MG, Ford JL, Hunt PB, et al : Bacterial retention properties of heat and moisture exchange filters. Br J Anaesth 69 : 522-525, 1992
- 24) International Organisation for Standardisation : Anaesthetic and respiratory equipment : heat and moisture exchangers for use in humidifying respired gases in humans. Geneva : International Organisation for Standardisation Technical Committee, 1992, International Standard ISO 9360, 2
- 25) International Organisation for Standardisation : Anaesthetic and respiratory equipment : heat and moisture exchangers (HMEs) for humidifying respired gases in humans. Part-1. Geneva : International Organisation for Standardisation Technical Committee, 2000, International Standard ISO 9360, 1
- 26) Demers RR, Maguier J, Ohmura A : Heat and moisture dynamics of human airway. 人工呼吸 19 : 27-38, 2002
- 27) Lloyd G, Howells J, Liddle C, et al : Barriers to hepatitis C transmission within breathing systems : efficacy of a pleated hydrophobic filter. Anaesth Intensive Care 25 : 235-238, 1997
- 28) 磨田 裕 : 病態と加温・加湿法の選択. Clinical Engineering 14 : 945-950, 2003
-