原著

人工鼻フィルター（HMEF）が加湿不足あるいは加湿過剰をきたす換気条件に関する定量的研究

秋元郁美*, 中野順子^{*1}, 鴨志田麻実子^{*1},

Study of the Performance of a Heat and Moisture Exchanger Filters in Extreme Conditions.

Ikumi Akimoto, Junko Nakano^{*1}, Mamiko Kamoshida^{*1}*

Abstract

Heat and moisture exchanger filters (HMEFs) are commonly used in mechanical ventilation practices. We described the performances of HMEF in extreme conditions which may decrease expected moisture returns from HMEF. The experiments with dry gases were performed on the model lung-ventilator system. The test lung with soaked cotton inside was placed in the incubator where temperature was maintained at 37 °C .

Relative (RH) and absolute humidity and temperature of the circuit was measured electronically (Maphy+, S.K.I. Net, Inc.).

The results showed, firstly, RH went down below 90% when minute volume exceeded 12L/min. Secondly, air leak of 20% of the inspiration volume decreased RH below 90% when inspired minute volume exceeded 8L/min. Thirdly, addition of unheated cascade humidifier kept RH of the circuit at 100% in both of the above conditions throughout the minute volume of up to 20L/min by providing additional humidity of between 6 and 12 mg/L. We also reported additional effects of the atmospheric humidity as turbine ventilator inspired room air instead of dry gasses. Water content of HMEF increased approximately 8grams in seasons of high humidity whereas, that with dry gases was constantly 1.5±0.3grams(n=39). HMEF with water content of 8grams increased the inspiratory airway resistance by 33%.

1. 目 的

気管チューブや気管切開チューブなど人工気道を用いて人工呼吸を継続する場合、加温と加湿は必須であり、この目的で人工鼻フィルター（HMEF）が広く用いられている¹⁾。しかし、臨床上、HMEFで加湿不足となったり、加湿過

剰となる場合のあることが報告されている²⁾。そこで本研究では、通常の場合と異なって加湿不足あるいは加湿過剰となる以下の4点の場合を想定して定量的に研究した。

- 1) 分時換気量が大きく、10L /分を超えるような場合（加湿不足）。
- 2) 気管切開チューブのカフ周囲からのエアリークが続く場合あるいは、気胸から胸腔ドレーンを介してリークが続く場合（加湿不足）。
- 3) 加湿補助法としてカスケード型の加温加湿

* 平成会病院 看護部

^{*1} 平成会病院 リハビリテーション科
(原稿受付：2013年12月10日)

器のチャンバを非加熱で併用した場合の効果 (加湿補助)。

- 4) タービン型人工呼吸器では、ドライガスではなく大気を吸入させる。そこで大気湿度の変化がHMEFの気道抵抗特性に与える影響 (加湿過剰)、などについて検討した。

2. 方 法

ドライガスを用いた実験装置の概要を図1に示した。テスト肺 (MAQUET190) に化繊綿を詰めて20mlの蒸留水を注入した。これを恒温槽 (KINGSURO20, Rcom) 内で、37℃に保った。恒温槽内の温度は、サーミスタ (CT-280WR, カスタム) で連続的に測定した。テスト肺にカテーテルマウント、HMEF、呼吸器回路を接続した。人工呼吸器 Servo-S (フクダ電子) の換気モードは従量式として一回換気量を500ml, PEEP = 0, I : E = 1 : 2に固定した。

実験装置の概要。テスト肺は、恒温槽内で37℃に保った。A、B: 温度・圧力モニター MUPHY+ の設置位置を示す。C: リーク量の調節回路。リーク量は、クレンメで調節した。

図1

換気回数を8～40回で変化させ、分時換気量4, 8, 12, 16, 20L/分において測定した。回路の温度と湿度は、温・湿度・圧力モニター MAPHY+ (スカイネット) で測定して1サイクルの呼吸の最大値を求めた。そして、連続する5サイクルの平均を求めた。

今回作成した実験装置は、分時換気量8L/分の条件下で3時間以上に渡ってカテーテルマウント部位 (図1A) の相対湿度100%, 絶対湿度 $26.5 \pm 0.5 \text{ mg/L}$, 温度 $27.2 \pm 0.4^\circ\text{C}$ を保った。従って、ヒト肺の *in vitro* 実験モデルとして適当であると考えた。

回路のリーク量を調節するために、テスト肺

とカテーテルマウントの間にルアーロック側孔付きのアダプターを設置して輸液回路を接続した (図1C)。リーク量は、クレンメで調節した。

HMEFによる加湿不足に対する加湿補助法として、必要に応じて吸気回路の途中に注水したカスケード型の加温加湿器のチャンバ (MR290F&P 社) を非加熱で併用した。この場合の測定点は、チャンバの吐出口とHMEFの間とした (図1B)。

HMEFによる加湿過剰を想定したタービン型人工呼吸器の場合は室内空気を患者に供給する。従ってドライガスとは異なり、人工呼吸器の回路内湿度は大気湿度の影響を受ける。そこで、1年を通じてHMEF重量を電子天秤 (CS-320D, Yuyama) を用いて測定し、室内湿度と対応させた。HMEF重量の増加は、HMEF内の水分増加量に一致すると考えた。対象は、タービン型人工呼吸器 (クリンエア VS ULTRA, フクダライフテック) 装着患者で分時換気量が4～7L/分とし、年齢、性別、疾患は問わなかった。対象患者の人工呼吸器回路に新たなHMEFを装着し、24時間後に電子天秤を用いてHMEF重量を計測した。HMEFに明らかに喀痰が付着した場合は、測定対象から除外した。室内温度、湿度、大気圧はデータロガー TR-73U (T&D 社) を用いて24時間の平均値を求めた。HMEF重量 (水分量) の増加に対応する気道抵抗は、圧縮空気型人工呼吸器サーボ-i (フクダ電子) を用い、従量式、換気量500ml, 呼吸数12回, PEEP 0, I : E比1 : 2, 休止時間15%, 立ち上がり0%, 圧トリガー-20に設定した。テスト肺 (MAQUET-190) を接続し、5吸気目の吸気抵抗を測定した。HMEFの加湿には、蒸留水を接続したインスピロンアクサームⅢネブライザーヒーター (インターメドジャパン) を用いた。HMEFを加湿して重量増加 (水分量の増加) が4g～12gの間で吸気抵抗を測定した。

全ての実験は、暖房と冷房でコントロールされた室内温度 $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ でおこない、HMEFは、インターサーム1341000S (インターサージカル) を用いた。*In vitro* の実験の場合は、5回の計測値の平均値と標準偏差を求めた。統計学

的有意差検定には、student の t -テストを用い、 $p < 0.05$ を有意差ありとした。患者を被験者とする場合は、実験が患者の不利益とならないことを確認し、当院倫理委員会で承認を得た。人工呼吸の分野では、回路の目視のために相対湿度が重視されているので、結果の表記は絶対湿度と相対湿度を併記した。

3. 結 果

1) 加湿不足となる換気条件

分時吸気量を 4 ～ 20 L / 分の間で変化させた場合、吸気量 12 L / 分以下では全ての HMEF で相対湿度は 100%，絶対湿度は約 30mg / L だった (図 2)。しかし、吸気量が 16 L / 分を超えると、いくつかの HMEF では相対湿度が 100% 以下となり、吸気量 20 L / 分では HMEF の一つは相対湿度が 88% となった。

分時換気量を変化させた場合の絶対湿度 (□) と相対湿度 (○) の変化。温室度・圧力モニター MUPHY+ の設置位置は図 1A。

図 2

2) リークによる加湿不足と加湿補助の効果

吸気量に対して 20% のリークを回路に作成した場合、分時吸気量が 12 L / 分 (分時呼気量 9.6 L / 分) を超えると、カテーテルマウント内の相対湿度は 100% 以下となった (図 3)。

これら加湿不足の場合に、加湿補助として非加熱チャンバを吸気側にカスケード接続すると、全ての場合でカテーテルマウント内に露滴を認め、相対湿度が 100% となった。

回路に 20% のリークを設けた場合 (破線) と、非加熱チャンバを追加した場合 (実線) の絶対湿度 (△) と相対湿度 (○)。

図 3

3) 非加熱カスケード型の加湿加湿器のチャンバの加湿効果

ドライガスが非加熱のチャンバを通過することによって、どの程度加湿されるか (温・湿度・圧力モニター MAPHY+ を図 1 B の位置に設置) について、換気量 4 から 20 L / 分の間で測定した。この間、6 ～ 12mg / L 程度、加湿された (図 4)。

非加熱チャンバの加湿補助効果。温室度・圧力モニター MUPHY+ の設置位置は図 1B。

図 4

4) タービン型人工呼吸器による HMEF の加湿過剰

タービン型人工呼吸器に接続した HMEF の重量増加と室内湿度との関係を図 5 に示した。HMEF の重量は、室内の絶対湿度に相関して 1 ～ 8 g 程度増加した ($y = 0.42x + 0.14$, $r = 0.76$)。比較のために、圧縮空気型人工呼吸

タービン型人工呼吸器におけるHMEFの重量増加（水分増加）量と室内湿度（絶対湿度）との関係。両者の相関は、 $y=0.42x+0.14$, $r=0.76$

図5

器に接続した HMEF の重量を同様の方法で測定した所、重量の増加は年間を通じてほぼ一定で、 1.5 ± 0.3 g ($n = 39$) であった。

次に、HMEF の重量増と気道抵抗の変化について図 6 に示した。HMEF を接続せず、テスト肺のみを装着した時の吸気抵抗は $12 \text{ cmH}_2\text{O} / \text{L} / \text{秒}$ であった。無加湿の HMEF を接続した場合の吸気抵抗は $15 \text{ cmH}_2\text{O} / \text{L} / \text{秒}$ であった。HMEF の重量増加（水分量の増加）が $4 \sim 12$ g の範囲で、吸気抵抗は $15 \sim 20 \text{ cmH}_2\text{O} / \text{L} / \text{秒}$ であった。この変化について、

HMEFの水分重量増と吸気気道抵抗の関係。吸気気道抵抗は増加する傾向を認めたが、いずれの場合も有意差を認めなかった ($p < 0.05$)。

図6

無加湿の HMEF を接続した場合の吸気抵抗 $15 \text{ cmH}_2\text{O} / \text{L} / \text{秒}$ に対する増加率として求めると、増加率は $0 \sim 33\%$ の範囲にあった。しかし、異なる水分増加量における吸気抵抗の増加率の間にはいずれも有意差を認めなかった。

4. 考 察

加湿不足と非加熱チャンバの加湿補助効果
市販されている HMEF の大部分は、 $30 \text{ mg} / \text{L}$ 強の加湿能力がある³⁾。末梢気道は、1 日に約 300 ml の不感蒸泄によって体温 37°C の時、相対湿度 100% （絶対湿度 $44 \text{ mg} / \text{L}$ 、飽和水蒸気圧 63 hPa ）に保たれる⁴⁾。しかし人工気道部分では粘膜からの不感蒸泄は失われる。このため、カテーテルマウント内の相対湿度が 100% 未満になると、人工気道内の相対湿度は 100% 以下となり、人工気道内及び周辺の喀痰から水分が蒸発して固くなり、カテーテル内部を閉塞させる場合もあると思われる^{5, 6)}。

一般に、HMEF と加湿加湿器を併用することは加湿過剰によって HMEF が閉塞する危険があるので禁忌とされる⁷⁾。一方、Suzukawa らは、室温で非加熱の加湿加湿器のチャンバを吸気回路に追加した場合の回路内の湿度について詳細に研究し、室温で非加熱のチャンバを通過後、ドライガスは $13 \text{ mg} / \text{L}$ 程度加湿されることを報告した⁸⁾。この値は、本研究の成績とほぼ一致する。本研究の成績は、HMEF で加湿不足となる換気条件下であっても、室温で非加熱の加湿加湿器のチャンバを吸気回路に追加することによって、カテーテルマウント内の相対湿度を 100% 、絶対湿度 $28 \text{ mg} / \text{L}$ 以上に保つことができることを示した。臨床の現場において、加湿加湿器チャンバを非加熱で使用する方法是気道の乾燥を防ぐ方法として安全且つ簡便有用であると思われる。

HMEF をタービン型人工呼吸器に使用すると、HMEF 内の水分量が大きく変動することを認めた。この理由は、タービン型人工呼吸器はドライガスを吸入させる圧縮空気型人工呼吸器とは異なり、室内空気を直接患者に供給することに起因すると思われた。HMEF の水分増加量を比較すると、圧縮空気型においては、室

内湿度の変化に関わらず僅か 2 g 未満と一定であった。他方、タービン型では冷暖房で年間を通じてほぼ一定の室温に調節された環境下においても約 8 g に達する場合があった。高湿度が持続する環境下では、HMEF の水分量が増加して気道抵抗を上昇させる可能性があると思われる⁹⁾。本研究では、HMEF の水分増加が吸気抵抗を増加させる傾向を認め、中には 30% 以上吸気抵抗が増加する HMEF があった。しかし今回、両者の間に統計学的に有意差のある関連性は認めなかった。室内湿度が上昇すると HMEF が加湿過剰となって、患者の吸気努力の上昇、吸気トリガー感知あるいは気道内圧の上昇など、呼吸状態に影響を与える可能性がある¹⁰⁾。患者の観察とともに、HMEF とカテーターマウントの湿潤状態の観察と、療養環境の空調管理の重要性が示唆された。

5. 結 論

- 1) 分時換気量が 10 L を超えると HMEF のみでは加湿不足となる。
- 2) 気管切開チューブのカフ周囲からのエアリークが続く場合あるいは、気胸から胸腔ドレーンを介してリークが続く場合は加湿不足となり易い。
- 3) HMEF のみで加湿不足となる場合、カスケード型の加湿加湿器のチャンバを非加熱で併用すると安全且つ簡便な加湿補助法となる。
- 4) タービン型人工呼吸器では、ドライガスではなく大気を吸入させるので、室内湿度の変化が HMEF 内の水分量を変化させて加湿過剰となる場合がある。

文 献

- 1) 山村剛康, 福田正人, 平清水智実: 長期人工呼吸症例の加温・加湿. 呼吸器ケア. 7月号: p.48-51. 2009.
- 2) 田中京子, 井上裕美子, 福田正人: 気道の加湿が有効であった気管拡張による持続的カフ漏れの 1 例. 人工呼吸. 30 巻 1 号: p.53-57. 2013.
- 3) ISO document 9360-1. Anesthetic and respiratory equipment-Heat and moisture exchangers (HMEs) for humidifying respired gasses in humans. ISO 9360-1: 2000 (E). 2000.
- 4) 真島英信: 不感蒸泄. 生理学 (改訂 18 版). 文光堂: p.491-502. 1990.
- 5) 磨田裕: 加温加湿と気道管理. 人工気道での加温加湿をめぐる諸問題. 人工呼吸. 27 巻: p.57-63. 2010.
- 6) 並木昭義, 氏家良人. 気道の生理的機能. よくわかる人工呼吸管理テキスト (改訂第 4 版). 南江堂: p.99-111. 2007.
- 7) 厚生労働省: 人工呼吸器回路における人工鼻と加温加湿器の併用に係る添付文書の自主点検等について. 薬食審査発第 0911003 号, 薬食安発第 0911001 号. 2008.
- 8) Masayuki Suzukawa, Yutaka Usuda, Katsuo Numata: The Effects on Sputum Characteristics of Combining an Unheated Humidifier with a Heat-Moisture Exchanging Filter. Respir Care. 34: p.976-984. 1989.
- 9) 木村政義: 人工鼻フィルターの流量抵抗についての検討. 人工呼吸. 2003 年 10 月号: p159. 2003.
- 10) 田中淳, 市山智義, 他: 人工鼻フィルターが呼吸トリガーに及ぼす影響. 医科学. 76 (10): p589-590. 2006.