

◎解 説◎

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

磨田 裕

はじめに

気道管理には気道確保、気管チューブの管理、加温加湿、人工呼吸器関連肺炎予防対策など多くの内容が含まれる。ここでは、これらのうちもっとも重要なものの一つである加温加湿を中心に解説する。

I. 加温加湿の必要性

図1は健常人が大気中で自然呼吸をしている様子を示したものである¹⁾。とくにここでは呼吸ガスの温度と湿度に注目している。図1のように吸入された空気は上部気道を通過していくうちに気道粘膜から加温加湿され、その結果、気管分岐部付近ではほぼ37℃、

相対湿度 (relative humidity ; RH) 100%になる。

このように一般自発呼吸の場合は空気中に少し湿度があり、しかも自然気道を通して呼吸している。一方、気管挿管人工呼吸では、まず、人工呼吸器からのガス(酸素と圧縮空気の混合気)には水分がほとんど含まれていない。気管挿管しているのでこの乾燥ガスは気管の中まで直接入っていくことになる。乾燥ガスを呼吸すると、表1のような障害を引き起こす。

そこで、このような障害を回避するためには、人工呼吸中であっても自然呼吸と同等に吸気を加温加湿することが必要になる。

表1 乾燥ガスがそのまま気管に入っていくと
起こりうる呼吸器系の障害

気道粘膜の乾燥
気道粘膜の線毛運動の低下・障害
気道粘膜の損傷、乾燥
痰の乾燥、固形化
気道・気管チューブの痰による閉塞
無気肺
肺炎

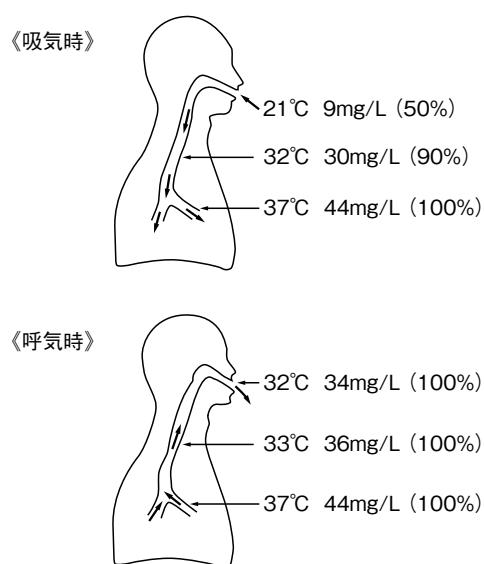


図1 呼吸ガスの温度と湿度

21°Cの大気を呼吸しているときの気道各部の温度、湿度分布の一例。()内は相対湿度。(文献1より引用)

II. 湿度について

1. 湿度の表現方法

水が水蒸気として空気中に存在している場合、分子はガス状になっているために目には見えない。このようなとき、空気中に存在する水分の量を表すには、絶対湿度 (absolute humidity ; AH、mg/L または g/m³)、相対湿度 (relative humidity; RH、%)、分圧 (partial pressure ; P_{H2O}、mmHg) がある。

2. 絶対湿度

絶対湿度は空気単位体積中の水分量、すなわち単位体積あたりの含水量を表すものである。たとえば図2のように水蒸気を含む空気が密閉されている内容量1Lの密閉容器について考える。今、図2左のように温度が21°C、この容器の中に含まれる水分が全体で9mgであるとする。このとき絶対湿度は9mg/Lとなる。この容器の空気の温度が25°Cになっても、37°Cになっても、水分子の出入りはないので、絶対湿度でいうならば、温度にかかわらずその値は9mg/Lで一定である。

3. 飽和水蒸気

大気中にガスで存在できる水分子は温度とともに増加する。すなわち低温では少なく、高温では水蒸気として多くの水分子が存在できる。このときある温度で存在できる最大の水蒸気を飽和水蒸気という。飽和水蒸気以上に水分を増やそうとしても、水蒸気として存在できず、液体の水になる。このように飽和水蒸気は気温が高いほど多くなる。図3は温度と飽和水蒸気の関係を示したものである。

図3の曲線上側の点Aは飽和水蒸気を超過しており、このような空気・水蒸気の混合気は1気圧下では存在しない。なお、体温37°Cでの飽和水蒸気は44mg/L(g/m³)であり、分圧で表現すると47mmHgである。とくに47mmHgという値は肺胞気酸素分圧の計算などで必要になるので記憶しておく必要がある。

4. 相対湿度

相対湿度とは、ある温度下において、[実際に存在

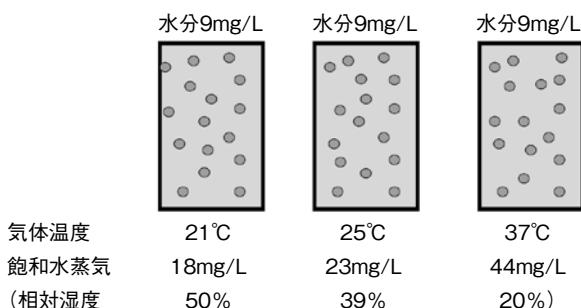


図2 温度変化と相対湿度

9mgの水蒸気を含む1Lの密閉容器。温度が変化したとき、相対湿度がどのように変化するかを示す。それぞれの温度での飽和水蒸気（空気1Lあたり）は固有の値である。

している水蒸気量] / [飽和水蒸気] × 100として求められ、%で表される。すなわちある温度下での水蒸気飽和度の意味合いをもつ。図2の密閉容器（1L）の中には9mgの水分が存在しているが（図3の点B）、21°Cの空気は最大で18mg/Lの水蒸気を含有できる（点C、飽和水蒸気）。すると、この場合、最大量の半分しか存在していない。したがって相対湿度は9 ÷ 18 × 100で、50%となる。

5. 気体の温度

図2は3つの温度について、容器の中にある空気の相対湿度がどのように変わるかを示している。もともと容器の中に存在する水分は温度が変わっても不变である。しかし、含有できる最大の水蒸気（飽和水蒸気）は25°Cでは23mg/L、37°Cで44mg/Lである。したがって、同じ容器の中の空気でも温度上昇にともない相対湿度は低下することを示している。このことは図3ではそれぞれ、点B、点D、点Eで表されており、飽和水蒸気曲線から下方に離れるほど相対湿度が低いことを示している。すなわち、図3からも明らかなように空気は温度が上昇すると、より多くの水分を取り込んで水蒸気として保持できることを示している。

表2に20°Cから40°Cまでの飽和水蒸気の絶対湿度、およびその水蒸気分圧を示す。

以上のように、絶対湿度が等しくとも、温度が異なれば相対湿度は変わってくるので、湿度を論ずるときには、必ずそのときの温度も同時に考慮しなければならない。

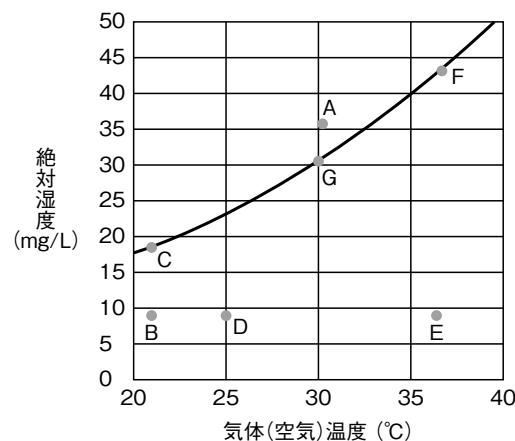


図3 飽和水蒸気の絶対湿度 (20 ~ 40°C)
(各点は本文参照)

表2 飽和水蒸気の絶対湿度と分圧 (20 ~ 40°C)

温度(°C)	絶対湿度(mg/L)	水蒸気分圧(mmHg)
20	17.3	17.5
21	18.3	18.6
22	19.4	19.8
23	20.6	21.0
24	21.8	22.3
25	23.1	23.7
26	24.4	25.1
27	25.8	26.7
28	27.2	28.3
29	28.8	29.9
30	30.4	31.7
31	32.1	33.6
32	33.4	35.5
33	35.7	37.6
34	37.6	39.8
35	39.6	42.0
36	41.8	44.4
37	44.0	46.9
38	46.3	49.5
39	48.7	52.3
40	51.1	55.1

6. 結露と相対湿度

図3のように点Fのガスが点Gのように温度が下がる。すなわち点Fでは37°Cで飽和水蒸気44mg/Lの水蒸気を含む。点Gでは30°Cなので、30°Cでの飽和水蒸気は30mg/Lになる。したがって空気1Lあたり14mgの水蒸気は液体の水になり、容器の底に水ができる。これが結露である。このとき、容器内の相対湿度は100%である。つまり、結露を生じたときは、相対湿度が100%以上に存在できない水蒸気があったことを意味し、気体の中は相対湿度100%になっている。

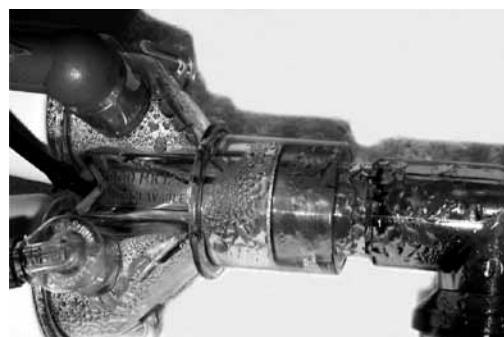


図4 人工呼吸器回路の内壁に生じた結露
回路内壁に結露している様子。このような状況は相対湿度100%と考えられる。

なお、冷たいコップの外壁に生じる水滴も結露である。図4は人工呼吸器回路の内壁に生じた結露の写真であり、このとき呼吸回路の中のガスは相対湿度100%であることを意味している。

7. 湿度の測定

大気中の湿度は露点湿度計、乾湿湿度計などで測定される²⁾。しかし呼吸ガス中の湿度を適切に測定する方法はない。その理由は、呼吸ガスは相対湿度が100%近いこと、吸気呼気でガスの流れや湿度・温度が変化し変化が速いこと、痰・エロゾールなど測定器を汚染したり障害を与えるものが存在すること、等である。各種の湿度測定方法のうち、高分子膜による静電容量変化検出タイプの湿度計は比較的応答速度が速いが、それでも90%応答速度が2~5秒程度である。呼吸ガスをbreath-by-breathで測定するにはカプノメータ並みに0.2~0.3秒程度の応答速度がないと正確な測定はできない。表3はこのような機器の応答速度についての比較を示す³⁾。

表3 湿度測定器の応答速度とカプノメータとの比較 (文献3より引用)

	湿度測定		CO ₂ 測定 (カプノメータ)	
	HUMICAP-H	MOISCOPE	OSCAR-OXI (CO ₂)	CO ₂ SMO
応答速度 (秒)	5 (90%)	2 (90%)	0.28 (立ち上がり)	0.06 (記載なし)
測定様式	M (a)	M	S	M
メーカー	Vaisala	スカイネット	Datex	Novametrix

注1) 各社の製品仕様書による

注2) M: メインストリーム、S: サイドストリーム、ただし、(a)は呼吸回路で測定する仕様にはなっていない。

なお、表には示されていないが、質量分析計（マススペクトロメータ）も水蒸気分圧測定が可能であり、しかもレスポンスタイムも0.2秒程度なので湿度測定の研究に使用できる。しかし、これは非常に高価で保守管理も容易ではない。

このように、人工呼吸器呼吸回路での湿度の直接測定は容易ではないので、呼吸器系の湿度、加温加湿器、人工鼻の水分供給能力などを調べる場合は、テスト肺を使用して「Water Loss 試験法（ISO/EN 9360）」で水分喪失量を測定する方法が標準とされている⁴⁾。

また、結露センサーは一般のビデオテープデッキ、ビデオテープカメラのヘッドの結露状況を検出するために使用されていたものである。これは高湿度環境での特性に特徴があり、結露の有無を検出する。すなわち相対湿度が100%か否かを知ることができるので、このセンサーを応用した吸気湿度制御型加温加湿器が試作された⁵⁾。

以上のように呼吸器系での湿度測定は容易ではなく、今後簡便かつ理想的な湿度センサーが開発されれば、今より高性能・高安全性の加温加湿器の設計開発ができると期待される。

III. 加温加湿の種類

人工呼吸中に吸入気の加温加湿を行う装置としては加熱型の加温加湿器と人工鼻がある。前者はactive humidifierまたはheated humidifier、後者はpassive humidifierとも呼ばれる。

1. 加温加湿器

加温加湿器は、ガスを水中に導き多数の気泡を発生させるタイプ（bubble diffusion型）と、貯水槽の水面から水を蒸発させるタイプ（pass-over型）とに大きく2つに分類される。かつては、bubble diffusion型のカスケード加湿器もよく使われていたが、現在はpass-over型のフィッシャーパイケル社MRシリーズの加温加湿器が多く使われている。その他、水蒸気透過性膜を利用して加湿効果を得ようとするものも開発されている。これは水が高分子膜の下または高分子膜中空糸の中を流れおり、原理的にはpass-over型の変形と考えられる。

2. フィッシャーパイケル社 MR型シリーズ

このシリーズは、pass-over型加温加湿器として動作する。いずれも使い捨てのMR-210、290加温加湿チャンバーなどを取り付け、この中に滅菌水を入れて使用する。このチャンバーは底面から加温され、水表面から水が蒸発する。

フィッシャーパイケル社では現在MR-850を主力としているが、旧モデルである410、730シリーズも使われている。MR410では吸気回路の加温がなく、外気で冷却されるため、回路内に大量の結露を生じる。また水温を相当高くしないと十分な温度と絶対湿度が得られない。吸気温度を確認するためには、吸気回路末端に気道温度計を取り付けてモニターする必要がある。

MR730、850などホースヒーター付きのタイプは、吸気回路内に電熱線を入れることにより、吸気ガス冷却による回路内結露を防いでいる。

しかし、図5のようにホースヒーター付きの加湿器では、その使用状況によっては、適温のガスが駆出されても、相対湿度が低くなってしまい、水分が足りないこともある。

すなわち、MR-730ではRH（相対湿度）調節ダイアルがあり、チャンバー出口と気道末端の温度差を制御している。RHを下げるとはホースヒーターをより加熱して（別の言い方をすればチャンバー加熱を少し控えて）チャンバー出口温度よりも気道末端温度の方が高いことを意味する。使用においては、温度（気道末端部）35～37°Cとし、RHダイアルを0～+2程度に調節する。しかし、実際には制御が可能なのは温度だけなので、この様な状況になるとは限らず、相対湿度が相当に低下していることもある。相対湿度が

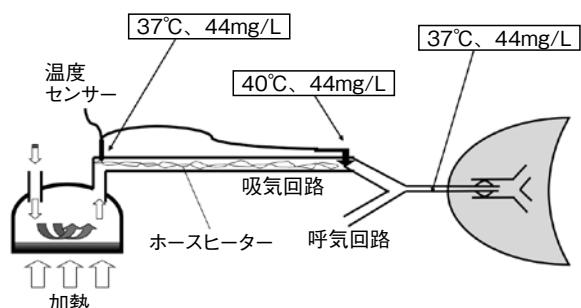


図5 フィッシャーパイケルMR850での
メーカー初期設定値と温度の説明
(MR850取扱説明書をもとに作成)

低下していると気管チューブ、気管から水分を奪い喀痰硬化の原因になる⁶⁾。結局のところ、加湿状況の注意深い観察が必要である。すなわち、相対湿度が100%になっているためには、吸気温度モニターの数cm下流の吸気回路終末部分にうっすらと結露していることなどが必要である。

MR850では温度設定などが自動化されており、通常使用では温度の設定などの作業は不要である。この機種では今までの設定の困難さなどが回避され、十分な湿度の吸気を供給するように設計されている。しかし、やはり加温加湿状況の注意深い観察は必要である。

これら加温加湿器で使用するMR-290チャンバーは自動給水方式になっている。しかし、この自動給水方式は蒸留水点滴瓶とチャンバーとの静水圧差を利用するため、高いPEEPや気道内圧が高い場合は水が落下しにくくなることもある。また、接続チューブの途中に空気層があるとエアロックが起こり、水が滴下しなくなる場合もある。そのためチャンバー内に水があるかどうか注意深い観察が必要である。

なお、MR-210チャンバーは自動給水方式ではなく、注水ポートから給水する。このとき、この注水ポートを使用しないで、呼吸回路を一時外してガスポート給水すると、換気は一時中断する。この換気中断を回避するため、外した回路を短絡しておくと、再接続時の異常過熱、気道熱傷の危険がある。そのため、給水ポートから給水し、ガスポートを使用しないように勧告が出されている⁷⁾。

3. 水蒸気透過膜型

液体状の水は通過せず、水蒸気のみを通過させるような高分子膜を利用した加温加湿器が開発されてきた。この膜は一面の構造のものや、中空糸構造にして表面積を大きくしたものなどがある。図6³⁾は中空糸・ヒーターが一体化されて吸気回路に入ったものである。

4. 人工鼻 (heat and moisture exchanger; HME)

人工鼻はYピースと気管チューブの間に装着する。内部は繊維、紙、スポンジなどでできており、図7のように⁸⁾呼気中の熱や水分を貯え、次の吸気時に放出するものである。

機種によって加湿効率や気流抵抗、機械的死腔量、さらには、除菌フィルター機能の有無などの違いがあ

る⁹⁾。除菌フィルター機能を持つものはとくにHMEF(人工鼻フィルター、HME フィルター)と呼ばれる。また加湿効率を上げるために繊維やスポンジに塩類(カルシウム塩化物、リチウム塩化物、マグネシウム塩化物など)を添加したものなどもある¹⁰⁾。そして高性能な人工鼻は、十分な加湿能をもち、小型軽量で、抵抗や機械的死腔が小さいことである。しかしこれらは相反する特性であり、まだこのような理想的なものは出現していない。

人工鼻での吸気絶対湿度は30mg/L前後であり、加温加湿器のそれよりも一般には低い。そのため加湿が不十分である場合も生じる。そのため次項に述べる加湿補助装置も開発されている。

人工鼻は、24または48時間毎に交換するように推奨されている。しかしコスト削減から、より長期間の使用について検討されており、その結果、1週間もの長期間の使用が可能であることが示されている^{11, 12)}。なお、林ら¹³⁾はHMEを48時間ごとに交換した場合と加温加湿器を1週間使用する場合のコストを比較し、3、4日以内の人工呼吸管理ならHMEのほうが低コストになると報告している。

また、呼吸器回路に結露がないので、細菌汚染予防の点から有利と考えられ、細菌フィルター機能を持つ

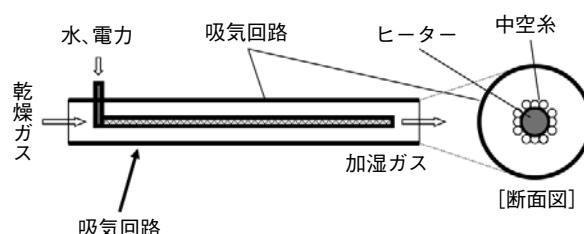


図6 中空糸を用いた加温加湿器 HUMMAX®(メトラン)
モジュール部分の略図

中空糸は直径0.54mm、32本使用されている。

(文献3より引用)

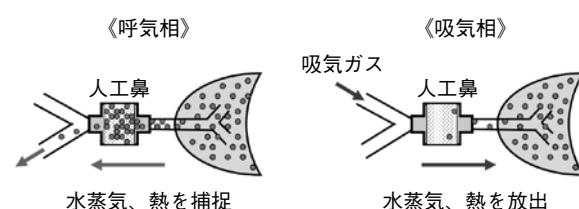


図7 人工鼻の動作の様子

点は水分および熱を意味する。

表4 人工鼻使用を避けるべき症例

1. 人工鼻の抵抗、死腔が無視できない場合
自発呼吸、CPAPなどの場合、高CO₂血症
2. 気道分泌物が人工鼻まで到達する場合
泡沫痰を吹き出す肺水腫、気道出血
3. 肺・気道から大量のガスリークがある場合
気管支胸膜瘻、カフなしチューブ使用例
4. 人工鼻での加湿不十分な場合
5. 人工鼻重量の保持が困難な場合

(文献3より引用)

人工鼻（HMEF）の場合は、気道・肺の感染を低減できたという報告¹⁴⁾が多い。しかし、CDCガイドライン¹⁵⁾では人工鼻フィルターと加温加湿器との比較において、感染予防の見地からの優位性は、現在のところ未解決としている。

ただし結核などの空気感染の危険がある場合は、人工鼻フィルターの使用は感染予防上有利とされる。

間欠的に薬物をネプライザーで投与する場合は、その時だけ人工鼻ははずす。さもないと薬が気道に到達しないばかりではなく、薬剤により人工鼻の目詰まりを起して抵抗の著しい上昇をまねく。

表4は人工鼻を使用しないほうがよい場合を示す³⁾。すなわち、大量の痰が吹き出してくる症例や気道出血の症例である。また、喀痰が固くて吸引しにくい場合や、CPAP 施行中など人工鼻の気流抵抗や機械的死腔が問題となる症例も通常の加温加湿器を使用する。

なお、小児で長期間人工鼻を使用しても加温加湿器と同程度であったとする報告もある^{16, 17)}。しかし、小児ではカフなしチューブを用いた場合や死腔負荷などから考えて必ずしも安全とはいえない。

5. 人工鼻における湿度付加装置（HME ブースター（HME-Booster™））

前述のように人工鼻の加湿性能は向上したもの、加湿器としての水分供給量は 28～31mg/L 程度である。これは加温加湿器には及ばない。そこでこの加湿不足を補うために開発されたのが HME-Booster™ (MEDISIZE) である。これは図8のように¹⁸⁾人工鼻と気管チューブの間に取り付けて水蒸気を付加する装置である。これを使用することにより、人工鼻単独使用に比較して温度は 5°C、湿度は 7.5mg/L 上昇するとされる。同様の目的の装置で Humid-Heat™ (Gibeck)

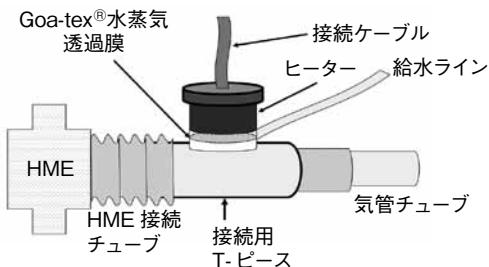


図8 HME ブースター (MEDISIZE) の概略図

人工鼻 (HME) と気管チューブの間に装着する。ゴアテックス®膜を通して回路に水蒸気が付加される。

(文献18より)

表5 臨床的な適正加湿評価の指標

1. 咳痰が柔らかくなっていること
2. 吸気回路終末部に配置した温度モニターで適温（35～39°C）になっていること
3. 吸気回路末端付近で内面に結露していること
4. 気管チューブ内壁に結露、水滴があること
5. 気管内吸引カテーテルが気管チューブにスムーズに入ること

*人工鼻使用下では 1・4・5 を指標にする

(文献19より引用)

もある。

このような装置が開発された背景は、やはり人工鼻単独では加湿不足になりやすいことを認識した結果と思われる。なお、おもに大気を取り込んで行う在宅人工呼吸で人工鼻を用いた場合は、大気中の湿度が吸気回路に加わる。そのため、ICU などの乾燥ガス使用時に比べると加湿は良好になる。

IV. 加温加湿の評価

呼吸回路での湿度モニターは困難であることを述べたが、日常の人工呼吸管理では気道への加温加湿が適切かを評価しなくてはならない。そのためには以下の表5のような項目について観察していくことになる¹⁹⁾。

おわりに

呼吸管理における湿度、加温加湿器、人工鼻について述べた。これらを使うときはそれぞれの特性、使用方法を理解し、適正な設定動作確認が求められる。また、これら装置、機器は周囲の温度などの影響²⁰⁾も受けやすいので、1日のうちでも動作状況が異なり、

また季節によっても異なる場合もあり、細心の注意が必要である。

参考文献

- 1) 磨田裕：気道の給湿療法、呼吸療法テキスト、三学会合同呼吸療法士委員会編、東京、克誠堂出版、1992、pp139-146.
- 2) 湿度測定の原理、湿度・水分計測と環境のモニタ、日本機械学会編、東京、技報堂出版、1992、pp36-104.
- 3) 磨田裕：加温加湿と人工鼻、人工呼吸、1998；15：83-90.
- 4) International Organization for Standardization. Anesthetic and respiratory equipment – Heat and moisture exchanger for use in humidifying respired gases in humans. ISO. 9360 : 2000.
- 5) 大塚将秀、磨田裕、山口 修ほか：結露センサーを用いた加温加湿器の試作、麻酔集中治療とテクノロジー、盛生倫夫、風間富栄、池田和之ほか編、東京、克誠堂出版、1992、pp80-83.
- 6) Miyao H, Hirokawa T, Miyasaka K, et al : Relative humidity, not absolute humidity is of great importance when using humidifier with a heating wire. Crit Care Med. 1992 ; 20 : 674-679.
- 7) 「加温加湿器に係る使用上の注意等の改訂について」薬食審査発第1126009号、薬食安発第1126001号、平成16年11月26日(厚労省)
- 8) 磨田裕：呼吸療法に必要な機器 3. 加温加湿器、妙中信之監修、呼吸療法マニュアル、大阪、メディカ出版、2003、pp164-173.
- 9) Vanderbroucke-Grauls CM, Teeuw KB, Ballemans K, et al : Bacterial and viral removal efficiency, heat and moisture exchange properties of four devices. J Hosp Infect. 1995 ; 29 : 45-56.
- 10) Rosi R, Buscalferrri A, Monfregola MR, et al : Systemic lithium reabsorption from lithium-chloride-coated heat and moisture exchangers. Intensive Care Med. 1995 ; 21 : 937-940.
- 11) Ricard JD, Le Miere E, Markowicz P, et al : Efficiency and safety of mechanical ventilation with a heat and moisture exchanger changed only once a week. Am J Respir Crit Care Med. 2000 ; 161 : 104-109.
- 12) Thomachot L, Leone M, Razzouk K, et al : Randomized clinical trial of extended use of a hydrophobic condenser humidifier : 1 vs. 7 days. Crit Care Med. 2002 ; 30 : 232-237.
- 13) 林真理、田尾朗子、香西睦美：人工鼻フィルターの使用経験—看護師の立場から—。Inspiration. 2007 ; 5 : 5-8.
- 14) Kirton OC, DeHaven B, Morgan J, et al : A prospective, randomized comparison of an in-line heat moisture exchange filter and heated wire humidifiers. Rate of ventilator-associated early-onset (community-acquired) or late-onset (hospital-acquired) pneumonia and incidence of tube occlusion. Chest. 1997 ; 112 : 1055-1059.
- 15) GUIDELINES FOR PREVENTING HEALTH-CARE-ASSOCIATED PNEUMONIA, 2003 : Recommendations of CDC and the Healthcare Infection Control Practices Advisory Committee
- 16) Schiffmann H, Rathgeber J, Singer D, et al : Airway humidification in mechanically ventilated neonates and infants : a comparative study of a heat and moisture exchanger vs. a heated humidifier using a new fast-response capacitive humidity sensor. Crit Care Med. 1997 ; 25 : 1755-1760.
- 17) Fassassi M, Michel F, Thomachot L, et al : Airway humidification with a heat and moisture exchanger in mechanically ventilated neonates. A preliminary evaluation. Intensive Care Med. 2007 ; 33 : 336-343.
- 18) 磨田裕：加湿器としての人工鼻。ICUとCCU. 2002 ; 26 : 405-409.
- 19) 磨田裕：加温加湿。新版 図説 ICU—呼吸管理編。沼田克雄、奥津芳人編、東京、真興交易医書出版部、1996、pp310-313.
- 20) Lellouche F, Taille'S, Maggiore SM, et al : Influence of ambient and ventilator output temperatures on performance of heated-wire humidifiers. Am J Respir Crit Care Med. 2004 ; 170 : 1073-1079.