

□ 講 座 □

加温加湿と人工鼻

磨 田 裕*

1. 気道加湿の必要性

大気に含まれる水分はその時の天候や部屋の空調によって影響され、その量や程度は湿度として表現されている。例えば、図1のように¹⁾気温21°C、湿度50%の大気を呼吸している場合、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、気管分岐部付近ではほぼ37°C、湿度100%になる。しかし、人工呼吸中の患者においては、気管チューブを通して乾燥した吸入気が直接気管に流入する。乾燥ガスを吸入すると、気管、気管支の上皮細胞の損傷、線毛運動の障害により、喀痰が粘稠になり痰や異物の喀出が困難になる。また、硬くなった喀痰が気管チューブ内壁に付着し、チューブ内腔の狭窄・閉塞を起こすこともある。したがって、このような問題を防ぐために、人工呼吸中も大気呼吸と同程度には吸入気に加温加湿が必要となる。

2. 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に水分子はガス状になっている。湿度を表わすには、絶対湿度 (absolute humidity, AH, g/m³ または mg/l)、相対湿度 (relative humidity, RH, %)、分圧 (partial pressure, P, mmHg または kPa) が用いられる。絶対湿度は空気単位体積中の水分量、すなわち含水量を直接表すものである。すなわち図1では、大気1m³中に9g (1l中では9mg)の水が含まれていることを示す。また、ある温度下で存在できる最大の水蒸気が飽和水蒸気である。たとえば37°Cの空気では1l中に最大44mgの水分を含むことができる。相対湿度とは、ある温度下において、[実際に存在している水蒸気量]/[飽和水蒸気]×100で、%で表される。すなわちヘモグロビン酸素飽和度と同様に与えられた温度下での水分飽和度の意味合いをもつ。例えば図1では、21°Cでの飽和水蒸気は18mg/lであるので、絶対湿度9mg/lの大

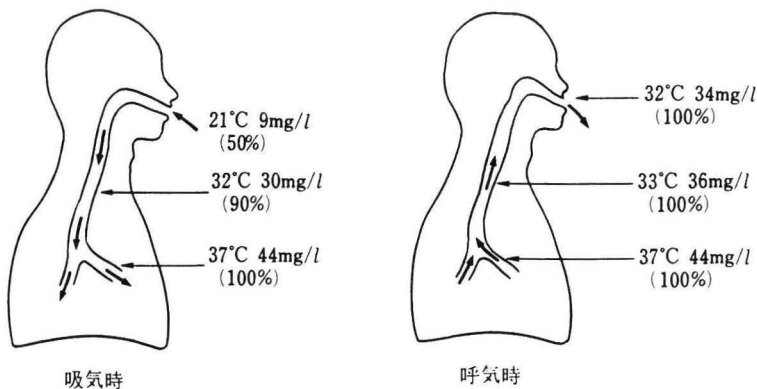


図1 21°Cの大気を呼吸している時の気道各部の温度・湿度分布の1例
()内は相対湿度〔文献1)より〕

* 横浜市立大学医学部附属病院集中治療部

気の相対湿度は50%ということになる。

水蒸気の分圧表示はおもに、肺胞気や呼気ガスなどのそれを表すときに用いられる。肺胞気方程式では肺胞内の水蒸気分圧を、37°C 飽和水蒸気分圧として 47 mmHg (6.3 kPa) を用いている。

気温が高いほど大気中にガスで存在できる水分すなわち水蒸気は多くなる。表1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。

表1 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

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。

3. 湿度測定

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が変化し高速応答の測定が困難なこと、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なみに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2はこのような機器の比較を示す。

なお、結露センサーは一般のビデオデッキ、ビデオ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おり、高湿度環境での特性に特徴がある。すなわち結露の有無を検出する。すなわち相対湿度が100% (またはそれ以上) か否かを知れるので、われわれはこのセンサーを応用した吸気湿度制御型加温加湿器を試作した³⁾。

以上のように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が設計できると期待される。

表2 湿度測定器の応答速度とカプノメータとの比較

	湿度測定		CO ₂ 測定	
	HUMICAP-H	MOISCOPE	OSCAR-OXI(CO ₂)	CO ₂ SMO
応答速度(秒)	5	2	0.28	0.06
	(90%)	(90%)	(立ち上がり)	(記載なし)
測定様式	M(a)	M	S	M
メーカー	Vaisala	泉工医科	Datex	Novamatrix

注) (1) 各社の製品仕様書による。(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。

4. 加温加湿器

加温加湿器は図2のように基本的に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。また、最近では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きた。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ており、構造上は pass-over 型の変形と考えられる。

1) カスケード加湿器

Bubble diffusion 型の改良されたもので、ガスを水中に導き、細かい泡状にしてガスと水との接触面積を増やしている。また、水はサーモスタット付きヒーターで加温されているので加湿効率は非常によい。ただし、ガスが水中に入るため気流抵抗が高くなり、自発呼吸を行うときは呼吸負荷になったり、吸気トリガーの遅れの原因になりうる。またガスを水中に導くため、装置のガスインレット下部に一方弁があり、一部の人工呼吸器ではファイティング時の気道内圧異常上昇の原因になっている⁴⁾。

Bubble diffusion 型加温加湿器では小さな気泡がたくさんできるためエロゾールと同程度の水微粒子が生成される。そのため加温加湿器の水が細菌で汚染されると、水粒子によって細菌が運搬されてくることが示されている⁵⁾⁶⁾。

水温は、ヒーター調節用ダイヤルで4~7の位置に設定される。しかし、実際の吸入気の温度は

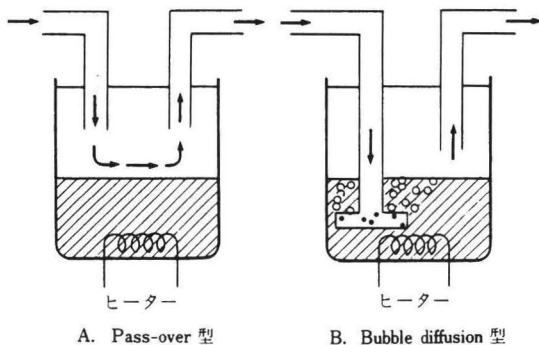


図2 加湿器が基本的な2方式〔文献1)より〕

不明であるので、気道温度計でモニターする必要がある。

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を取り付け、この中に滅菌水をいれて使用する。このチャンバーは底面から加温され、水の表面から水が蒸発する。MR-210 は従来使用されていた 310 型よりも容量が少ないので水を入れすぎると吸気回路に容易に水が噴き出してくる。しかし、給水不足になると「空だき」状態になり、乾燥ガスが駆出されるので注意が必要である。すなわち、常に適正水位を保持しなければならないが、この範囲は意外に狭い。

気流抵抗は小さいが、高流量ガスに対して加湿効率は低下する。すなわち、20~30 l/分以上のガスを流す高流量 CPAP などにおいては、加湿不足になることもある⁷⁾。

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。回路内に貯留した水は、細菌繁殖の培地になるので、結露がないことは呼吸器回路の細菌汚染防止になる。

しかし、図3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いても、相対湿度が低くなっており、水分が足りないこともある。すなわち、RH (相対湿度) 調節ダイヤルの機能は、チャンバー出口と気道末端の温度差を制御するものである。RH を下げるこ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ほうが高いことを意味する。実際の使用においては、温度 (気道末端部) 32~35°C とし、表3を参考に RH ダイヤルを 0~+2 程度に調節する。ただしフィッシャーパイケル社では、主力モデルである 700 シリーズにおいては、回路内結露防止と相対湿度 100% となるように、温度 39°C, RH マイナス 2 の設定を推奨している。これは加湿チャンバー出口の温度が 37°C [39°C-2°C], 100% 飽和、気道温度測定部 (吸気回路末端) で 39°C, 湿度 90%, その後冷却されて口元で 37°C,

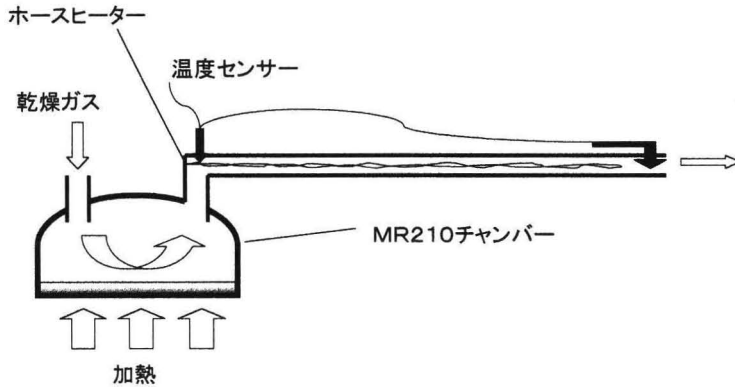


図 3 ホースヒーター付き加温加湿器の略図 (MR 730+MR 210, フィッシャー&パイクル)

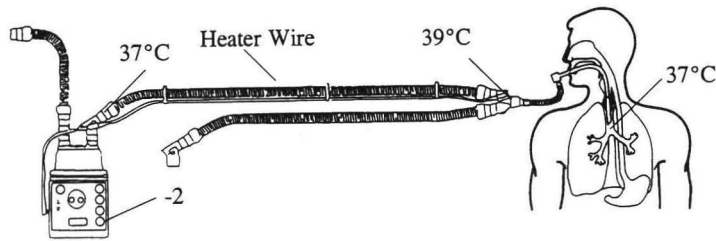


図 4 ホースヒーター付加温加湿器設定の 1 例 (フィッシャーパイクル社取扱説明書 [文献 10]より) ただし、この方法では加湿不足になりうる (本文参照)。

表 3 臨床的な適正加湿評価の指標 [文献 28]より]

1. 喀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 (32~35°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はいること

(人工鼻使用下では 1, 4, 5 を指標にする)

100%、になると説明されている^{8)~10)} (図 4)。しかし、実際にはこの様になるとは限らず、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¹¹⁾。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、表 3 のように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。

この MR-210 チャンバーには注水ポートがあるので、蒸留水点滴ビン、輸液セット、三方活栓を接続して使用すると便利である。この方法によると、注水時の換気の一時中断、ガスリーク、汚染なども防げる。なお、この注水ポートを使用しないときはしっかりと栓をしておく。なお、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ビン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。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-310 チャンバーは 1998 年 6 月で製造が打切られたが、チャンバー内部のらせん状に巻かれた濾紙の弛みにより、チャンバー内の水が吸気回路に噴出する事例が報告されている¹²⁾。そのため、MR-310 の最終モデルでは斜めにカットされた濾紙が採用された。

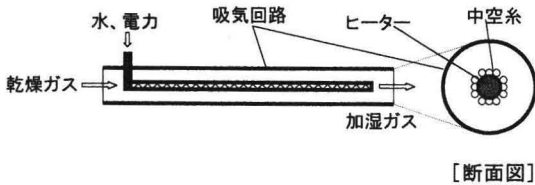


図5 中空糸を用いた加温加湿器 HUMMAX (メトラン) モジュール部分の略図
中空糸は直径 0.54 mm, 32 本使用されている。

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5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) 常温気泡型加湿器

酸素マスクや鼻カニューラでの酸素療法や、ジャクソンリース回路や AMBU-bag などで酸素を投与するときは、流量計付き湿潤器が使用される。この常温気泡型加湿器は、ヒーターのない bubble diffusion 型、すなわち本方式の原形といえる。しかし、水温が室温以下になるので加湿効率はあまりよくない¹³⁾。また、患者搬送時の酸素ポンベに取り付けられて使用されるが、傾いて水が流出することがあるので、ごく短時間の搬送時なら使用しないほうが安全である。

5. 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、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、除菌フィルタ機能の有無などの違いがある¹⁴⁾。また加湿効率を上げるため繊維やスポンジに塩類を添加したり、殺菌のための薬物を加えたものなどもある。そして理想的な人工鼻は、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。しかし現状ではこれらは相反するものであり、まだこのような理想的なものは出現していない。

表4 人工鼻の使用をさけるべき症例

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
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

人工鼻を長期人工呼吸に使用することについては賛否両論があった。すなわち、人工鼻の使用は、従来の加温加湿器と同程度であるとするものと、気管チューブ内腔の閉塞が起こったなどとするものである¹⁵⁾¹⁶⁾。後者のような結果は、人工鼻を単独使用した場合、通常、吸気湿度は 23~29 mg/l 程度しかなく¹⁷⁾、加湿が不十分であることによるものと考えられる。そこで、ICU などで長期の人工呼吸に使用する場合は、非加温加湿器と併用する方法が考案された¹⁸⁾。

人工鼻は、24 時間毎に交換するように推奨されているが、一般の加温加湿器よりも手軽に扱える利点がある。また、人工鼻を使用したほうが加温加湿器よりも安いコストですむとされるが¹⁹⁾、24 時間毎に交換するとコストが高くなるのが危惧される。Thomachot ら²⁰⁾は 48 時間の長期間使用について調べたところ、24 時間使用と比較して 48 時間使用でも問題がないと報告した。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もよい。特に細菌フィルタ機能を持つ人工鼻 (HME 15-22 F など) の場合は、人工呼吸器回路汚染が低減されるので、呼吸器回路交換を 1 週間に一度程度に延長できる²¹⁾。このように特に除菌作用を持つ人工鼻フィルタでは、気道・肺の感染を低減できたという報告²²⁾が多い。

間欠的に薬物をネブ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。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^{23)~25)}。

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²⁶⁾。しかし、小児での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安全とはいえない。

6. 気道加湿の評価

適切な吸入気加湿の例として、アメリカ標準規格 (ANSI) では、加湿器についてはその供給能力を絶対湿度 30 mg/l 以上としている²⁷⁾。実際には、吸入気温度 32~34°C、相対湿度 95~100%、絶対湿度 30~35 mg/l 程度が必要である。ところが、すでに述べたように現在のところ吸入気の相対湿度または絶対湿度をモニターする方法がない。すなわち、多くの加温加湿器で温度モニターは可能であるが、その時の温度で水分がどの程度かは不明である。したがって、何らかの方法で加湿の程度を判断しなければならない。例えば、人工呼吸器回路の内壁に水滴が結露していれば、その温度においては相対湿度 100% といえる。そこで、臨床的に加湿が適切であるかどうかを判断するには、やはり表 3 のような点が参考になる²⁸⁾。

また、最新の加温加湿器でもその動作様式は温度の制御であるので、水が全くない状態でも温度さえ設定値が維持されていれば何ら警報を発しない。したがって、常に臨床的に加湿が適正かを観察しなければならない。

7. 特殊な状況下での加温加湿

1) ネブライザ施行中の加温加湿

薬物を経気道的にネブライザで投与する場合がある。このときは加温加湿器がないほうが噴霧効率は良いとされる²⁹⁾。

2) クベース内の患児に人工呼吸器を使用する場合

口元におかれる温度センサーがクベースの温度やクベース加湿のためのヒーターの影響を受ける³⁰⁾。したがって正確な気道温度測定ができなく

表 5 加温加湿器, 人工鼻を使用するとき起こりうる副作用・注意点 [文献 32) より]

	加温加湿器	人工鼻
細菌汚染	+	+
加湿不足	+	+
過剰加湿	+	-
気道粘膜熱傷	+	-
うつ熱	+	-
機械的死腔増加	-	+
抵抗増加	+	+
喀痰による抵抗増加	-	+
換気中断	+	-
ガスリーク	+	+
回路誤接続	+	-
温度モニタの誤り	+	-
水の噴出	+	-
感電・漏電	+	-

(+ : 起こりうる, - : ない~ほとんどない)

なるので、温度センサー部分を遮熱するなどの工夫が必要である。

3) ジェットベンチレーション

ジェットに用いるガスは乾燥しているので加湿が必要である。ジェットの駆出流量にあわせて半生食などをノズルから一定速度で注入する方法が紹介されている³¹⁾。

8. 副作用・注意点

表 5 に加温加湿器, 人工鼻を使用するときの副作用・注意点をあげる³²⁾。

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, pp 139-146
- 2) 湿度測定の方法, 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, pp 36-104
- 3) 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, 尾山 力編. 東京, 克誠堂出版, 1992, pp 80-83
- 4) 磨田 裕, 山口 修, 沼田克雄：人工呼吸器に

- おける最高気道内圧リリーフ機構の問題。医科器械学 55 : 29-30, 1985
- 5) Rhame FS, Streifel A, McComb C, et al : Bubbling humidifiers produce microaerosols which can carry bacteria. *Infect Control* 7 : 403-407, 1986
 - 6) Gilmour IJ, Boyle MJ, Streifel A, et al : The effects of circuit and humidifier type on contamination potential during mechanical ventilation : a laboratory study. *Am J Infect Control* 23 : 65-72, 1995
 - 7) Harrison DA, Breen DP, Harris ND, et al : The performance of two intensive care humidifiers at high gas flows. *Anaesthesia* 48 : 902-905, 1993
 - 8) Peterson B, Rankin N, Galler D : Temperature loss in deadspace exposed to ambient. *Respir Care* 40 : 1164, 1995
 - 9) Williams RB : The effects of excessive humidity. *Respir Care Clin N Am* 4 : 215-228, 1998
 - 10) MR 700, MR 720, MR 730 Respiratory Humidifiers Operation Manual. Fisher & Paykel Healthcare, New Zealand, 1997
 - 11) 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* 20 : 674-679, 1992
 - 12) 磨田 裕, 大塚将秀, 瀬波克彦ほか : フィッシャーパイクル社 MR-310 加湿チャンバーからの水の流出. *人工呼吸* 15 : 1998
 - 13) Thomachot L, Viviani X, Arnaud S, et al : Preservation of humidity and heat of respiratory gases in spontaneously breathing, tracheostomized patients. *Acta Anaesthesiol Scand* 42 : 841-844, 1998
 - 14) 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* 29 : 45-56, 1995
 - 15) Cohen IL, Weinberg PF, Fein IA, et al : Endotracheal tube occlusion associated with the use of heat and moisture exchangers in the intensive care unit. *Crit Care Med* 16 : 277-279, 1988
 - 16) Villafane MC, Cinnella G, Lofaso F, et al : Gradual reduction of endotracheal tube diameter during mechanical ventilation via different humidification devices. *Anesthesiology* 85 : 1341-1349, 1996
 - 17) Luchetti M, Stuardi A, Castelli G, et al : Comparison of three different humidification systems during prolonged mechanical ventilation. *Minerva Anestesiologica* 64 : 75-81, 1998
 - 18) Suzukawa M, Usuda Y, Numata K : The effects on sputum characteristics of combining an unheated humidifier with a heat-moisture exchanging filter. *Respir Care* 34 : 976-984, 1989
 - 19) Rathgeber J, Henze D, Zuchner K : Air conditioning with a high-performance HME (heat and moisture exchanger)—an effective and economical alternative to active humidifiers in ventilated patients. A prospective and randomized clinical study. *Anaesthesist* 45 : 518-525, 1996
 - 20) Thomachot L, Vialet R, Viguier JM, et al : Efficacy of heat and moisture exchangers after changing every 48 hours rather than 24 hours. *Crit Care Med* 26 : 477-481, 1998
 - 21) 磨田 裕, 大塚将秀, 蒲生正裕ほか : 加温加湿器と併用した人工鼻使用による人工呼吸器回路汚染の低減. *人工呼吸* 10 : 195, 1993
 - 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. Rate of ventilator-associated early-onset (community-acquired) or late-onset (hospital-acquired) pneumonia and incidence of tube occlusion. *Chest* 112 : 1055-1059, 1997
 - 23) Chiaranda M, Verona L, Pinamonti O, et al : Use of heat and moisture exchanging (HME) filters in mechanically ventilated ICU patients : influence on airway flow-resistance. *Intensive Care Med* 19 : 462-466, 1993
 - 24) Manthous CA, Schmidt GA : Resistive pressure of a condenser humidifier in mechanically ventilated patients. *Crit Care Med* 22 :

- 1792-1795, 1994
- 25) Iotti GA, Olivei MC, Palo A, et al : Unfavorable mechanical effects of heat and moisture exchangers in ventilated patients. *Intensive Care Med* 23 : 399-405, 1997
- 26) 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* 25 : 1755-1760, 1997
- 27) American National Standards Institute (ANSI). American national standard for humidifiers and nebulizers for medical use. ANSI Z 79.9, 1979
- 28) 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, pp 310-313
- 29) O'Riordan TG, Greco MJ, Perry RJ, et al : Nebulizer function during mechanical ventilation. *Am Rev Respir Dis* 145 : 1117-1122, 1992
- 30) O'Hagan M, Reid E, Tarnow-Mordi WO : Is neonatal inspired gas humidity accurately controlled by humidifier temperature? *Crit Care Med* 19 : 1370-1370, 1991
- 31) Berman LS, Heard SO, Banner MJ : Humidification techniques for high frequency jet ventilation. *Crit Care Med* 12 : 284, 1984
- 32) 磨田 裕 : 気道確保と気道管理. *救急医学* 22 : 1174-1177, 1998
-