

□特集: 加温・加湿を考える□

人工呼吸中の適切な加温加湿

宮尾秀樹* 宮川響* 高田稔和*
岡本由美* 小山薰* 福山達也*

ABSTRACT

Adequate Airway Humidification during Artificial Ventilation

Hideki MIYAO MD, Toru HIROKAWA MD, Toshikazu TAKADA MD,
Yumi OKAMOTO MD, Kaoru KOYAMA MD and Tatsuya FUKUYAMA MD

*Department of Anesthesiology, Saitama Medical Center,
Saitama Medical School, Kawagoe, 350-8550*

Our basic concept of airway humidification has been focussed on the following the two ideas. 1. Humidifier deprives the upper airway of water unless the inspiratory gas contains at least 44 mg/l of water vapor: 2. The target of humidification is not only the mucous membrane of the upper airway, but the internal surface of the endotracheal (ET) tube. Our experiments showed that relative humidity (RH) is a dominant factor in the case of drying secretions in the upper airway, especially in the artificial airway. Absolute humidity (AH) is essential for determining the total amount of water deprived from the patient's lung, and RH is decisive in determining whence most of water is deprived. Our experiments and clinical findings such as inspection of the secretions in the ET tube just after extubation have led us to the final setting of humidifier with a heating wire, i.e., 39°C at patient's connection port and 41°C at humidification chamber. We found that a considerable temperature reduction occurred until the gas was delivered from the Y piece of the breathing circuit to the tip of the ET tube. We concluded that RH should be 100% and temperature should be the same as the patient's core temperature.

はじめに

人工呼吸中の適切な加温加湿といつても、マスク換気、nasal CPAP等では異なる。本論文では気管チューブによる人工呼吸管理中の加温加湿に絞って論じる。鼻を含んだ上気道は吸気の加温加湿に重要な役割を担っているが、気管チューブにより上気道をバイパスする場合は吸気ガスの加湿は必須である。誌上討論というこの企画に対する

われわれの基本認識として最初に申し述べたいことは次の2点に集約される。

1. 加湿器は吸気ガスには水分を付与しているが、実際は気道から水分を奪っている。
2. 加湿対象は気道粘膜というよりは気管チューブ内壁である。

特に上記2はわれわれの臨床経験といくつかの実験結果から導き出した結論であり、世界的な基準とわれわれの設定の違いを際だたせている。本論文では湿度の定義、正常呼吸中の温湿度、湿度の基準、われわれの考え方と実験結果およびその

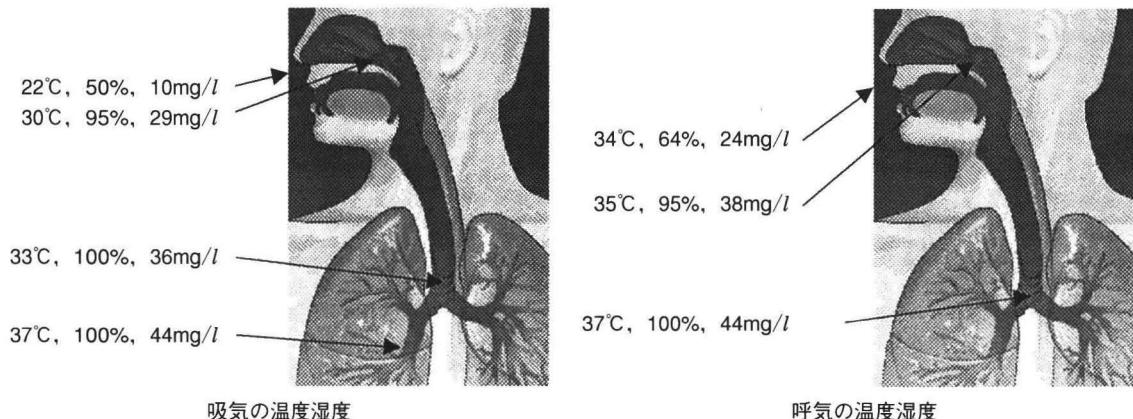


図 1 正常鼻呼吸時の吸気、呼気の湿度と温度

解釈、われわれの設定について論ずる。

2. 湿度の定義

湿度は絶対湿度と相対湿度があり、次の式で定義される。

$$\text{相対湿度} (\%) = \text{絶対湿度} / \text{飽和水蒸気量}$$

絶対湿度 (AH) は単位体積当たりの水蒸気含有量で mg/l (あるいは $\text{mg H}_2\text{O/l}$) で表される。飽和水蒸気量 (AHs) は単位体積当たり、ある温度で含みうる最大の水蒸気量で絶対湿度と同じく mg/l で表され、温度 (T) の関数である ($\text{AHs} = 16.41563 - 0.731 \text{T} + 0.03987 \text{T}^2$: for $24.1 \sim 38^\circ\text{C}$ ¹⁾)。絶対湿度が飽和水蒸気量を超えると水蒸気から水に変わり結露する。相対湿度 (RH) は絶対湿度と飽和水蒸気量の比で % で表される。絶対湿度、相対湿度、温度との関係はこの 3 つのパラメータのうち 2 つが決まれば自動的にもう一つは決まる。

3. 正常呼吸中の温湿度

正常呼吸中の気道における温湿度はいろいろの文献で測定されているが、おおよそ図 1 に示される値である²⁾。鼻腔内では線毛上皮が $10 \sim 20 \text{ Hz}$ でムチのように動きながら 1 cm/min のスピードで粘液を咽頭に向かって送っている。喉頭以下の気道では線毛は逆に喉頭に向かって動く。杯細胞による粘液の産生は一日 500 ml にもおよぶ。鼻孔の入り口には線毛上皮や杯細胞がない。 22°C ,

50% の吸気は約 10 mg/l の水分含量を持つ。鼻に入ると暖められ、咽頭では 30°C になるとともに粘膜から水分を奪い、 95% 、水分含量 29 mg/l となる。気管では 33°C 、 100% 、 36 mg/l となり気管支の第 3 分枝ぐらいで 37°C 、 100% 、 44 mg/l (isothermal saturation boundary : ISB³⁾) となる。ISB までに奪取される水分量は 34 mg/l でその内 56% は鼻腔から 76% はカリーナまでに奪取される。呼気時には冷却され (吸気時の気化熱奪取による気管粘膜壁の冷却)、気道内で結露し咽頭で 35°C 、 95% 、 38 mg/l となり鼻から呼出されるときには 34°C 、 63% 、 24 mg/l となる。この 24 mg/l と外気の 10 mg/l の差、 14 mg/l が 1 呼吸サイクルでの呼吸器系からの不感蒸泄である。

4. 湿度の基準

International Organization for Standardization (ISO) は絶対湿度の下限を $33 \text{ mgH}_2\text{O/l}$ と規定している。これは上記正常呼吸の絶対湿度に即して決められたように思われる。しかし絶対湿度のみの規定では吸気ガスの性質は一様ではない。温度を高くすれば相対湿度が下がり危険な状態に成りうる。American Association of Respiratory Care (AARC) は温度と絶対湿度を併記し、Emergency Care Research Institute (ECRI) は温度と相対湿度を併記している (表)。

表 人工呼吸時の湿度の世界基準

名 称	発行年	基 準
ISO ⁴⁾	1997	above 33 mg/l
ASTM ⁵⁾	1999	above 33 mg/l
AARC ⁶⁾	1992	above 30 mg/l and 33±2°C (*76~94% RH)
ECRI ⁷⁾	1987	100% RH and 32~34°C (*34~38 mg/l AH)

(ISO : International Organization for Standardization, ASTM : American Society for Testing and Material, AARC : American Association of Respiratory Care, ECRI : Emergency Care Research Institute)

*は著者が計算。

RH : 相対湿度, AH : 絶対湿度

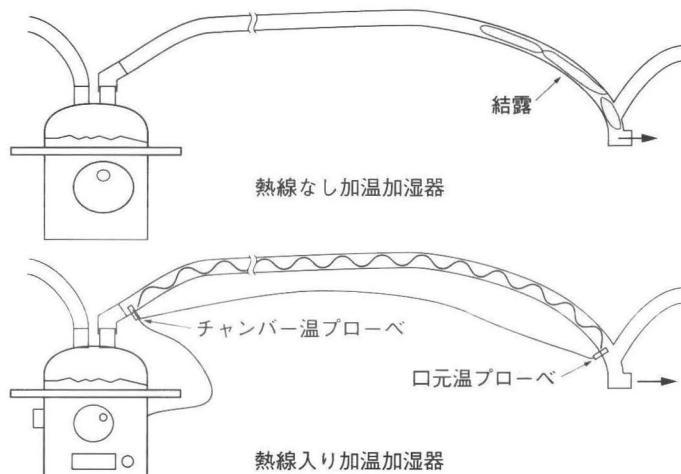
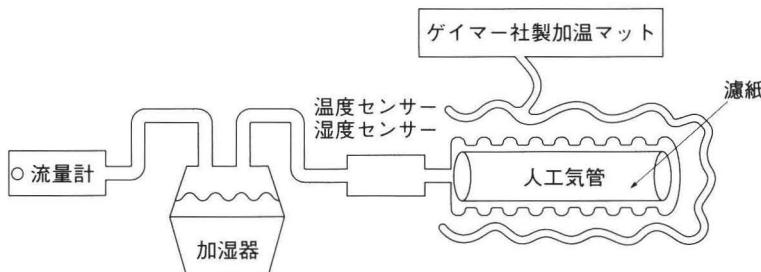


図2 熱線なし加温加湿器と、熱線入り加温加湿器
熱線入り加温加湿器はチャンバー温プローブでチャンバー温を制御し、口元温プローブで口元温を制御する。口元温はチャンバー温の相対温度で示される。

5. われわれの考え方

まず最初に考え方として加湿の対象は気管粘膜というより気管チューブであることを強調したい。加湿器は吸気が 44 mg/l 以上の水分を含まない限り最終的には気道から水分を奪う宿命にある。加温加湿器は生体に水分を与えてはいるのではなく、水分を奪取しているという概念は臨床現場では納得しがたいものがあるが、理論的には正しい。表のように ISO や American Society for

Testing and Material (ASTM) は挿管患者の加湿器の絶対湿度は 33 mg/l 以上あれば良いことになっている。ごく単純に言えば、44 mg/l - 33 mg/l = 11 mg/l の水分を奪う可能性がある。分時換気量を 6 l とすると 1 分間で 66 mg, 1 時間で 4 g, 1 日で 95 g の水分を奪うことになる。逆に言えば 1 日にコップ半分の 95 ml の水しか奪わない。体内水分量からみれば微々たる量である。どの場所から奪うかが問題で、例えばテニスコート程の広さのある肺胞から 95 ml の水分を



	吸気回路内	湿度	人工気管より除去される水分量g
絶対湿度 19mgH ₂ O/l	熱線入り	相対湿度 48% 温度 35°C	1回目 6.1 2回目 5.8 3回目 5.9
流量 50l/分 30分間	熱線なし	相対湿度 87% 温度 24°C	1回目 3.3 2回目 2.8 3回目 2.5

図3 同一絶対湿度で相対湿度の違いによる水分奪取量の差
インスピロンのディスポ蛇管1節の中に湿潤滤紙を入れて気管モデルとし、図中の実験条件で人工気管の重量を測定し、奪取水分量を測定した。詳細は文献9参照。

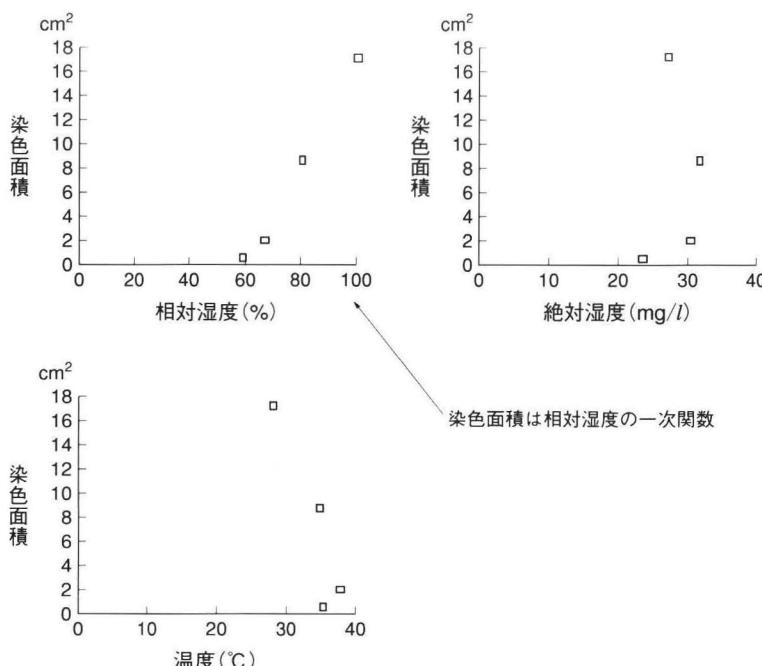


図4 相対湿度、絶対湿度、温度に対するイソジンゲル染色面積との関係

図2と同じシステムで湿潤滤紙の替わりに乾燥滤紙上にイソジンゲル0.5gを置き、4種類の湿度の異なるガスを流した。吸着した水分により溶けたイソジンゲルの染色面積をコンピュータにより計算しプロットした。詳細は文献16参照。

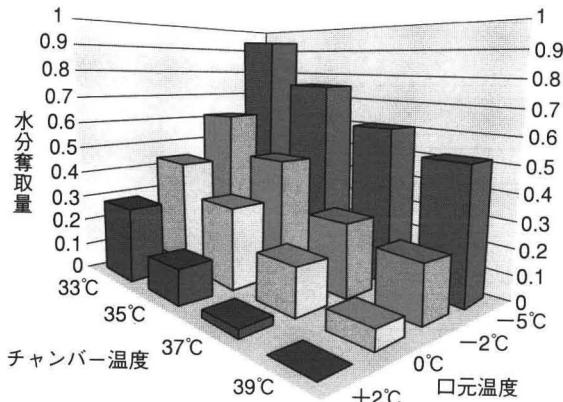


図 5 MR 730 の各設定条件下の人工気管水分奪取量

熱線入り加温加湿器の各種設定値における、水分奪取量。口元温度はチャンバー温度に対する相対値 (37°C , -2 であれば、チャンバー温 37°C , 口元温度 35°C となる)。 38°C に暖めた銅管の中に図 1 と同じ人工気管モデルを入れ、毎分 30 l の空気を 10 分間システム内に流し、実験前後の気管モデルの重量測定で奪取水分量を決定した。詳細は文献 17 参照。

奪ったとしても分泌物の固形化は起こらないが、気管チューブ内の分泌物から 95 ml の水分を奪うと気管チューブの閉塞が起こっても不思議ではない。図 1 から分るよう正常呼吸時の 56% の水分奪取は鼻腔で行われることから、鼻腔をバイパスする気管チューブは内在する分泌物の水分奪取による固形化の危険に晒されている。われわれは上気道の気管内分泌物固形化は絶対湿度よりも相対湿度が重要な役割を果たしていることを報告した^{9)~16)}。気道の加湿に関する論文は気管粘膜や線毛上皮の働きの形態学的な観察報告がほとんどで、気管チューブあるいは気管切開チューブ内の分泌物固形化に関する実験的な報告は皆無といつても良い。勿論気管粘膜や線毛上皮の損傷は防がなければならないが、一方では粘膜下血管からの水分補給により、粘膜の乾燥化に関しては、ある程度の予備力を持った生体防御系が働くと考えられる。しかし、気管チューブ内の分泌物の水分供給源は人工呼吸器からの吸気ガスあるいは自分自身の呼気ガスしかないので、不適切な加湿器の

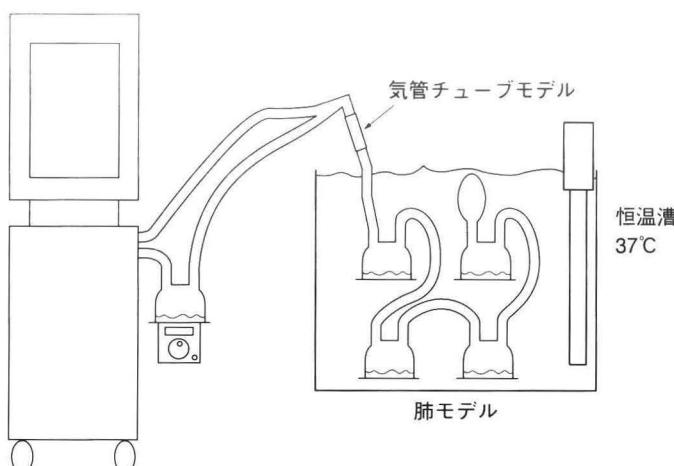


図 6 肺モデル、気管チューブモデルを用いた実験図

水を入れた加温加湿器のチャンバー 4 個を連結し、最後にリザーバーバッグを連結し人工肺とした。肺モデル全体を 37°C の恒温槽に沈めた。室温 26°C , A/C モード, P トリガ一定常流は $0.5\text{ l}/\text{min}$, $TV=500$, 12 回/分, PEEP $5\text{ cmH}_2\text{O}$ 。それぞれの加湿設定条件にて、60 分間換気後（ランニングさせた後）、湿潤濾紙を内包した気管チューブモデルを用いて 30 分間の重量測定実験を行った。気管チューブモデル内の温度も測定した。

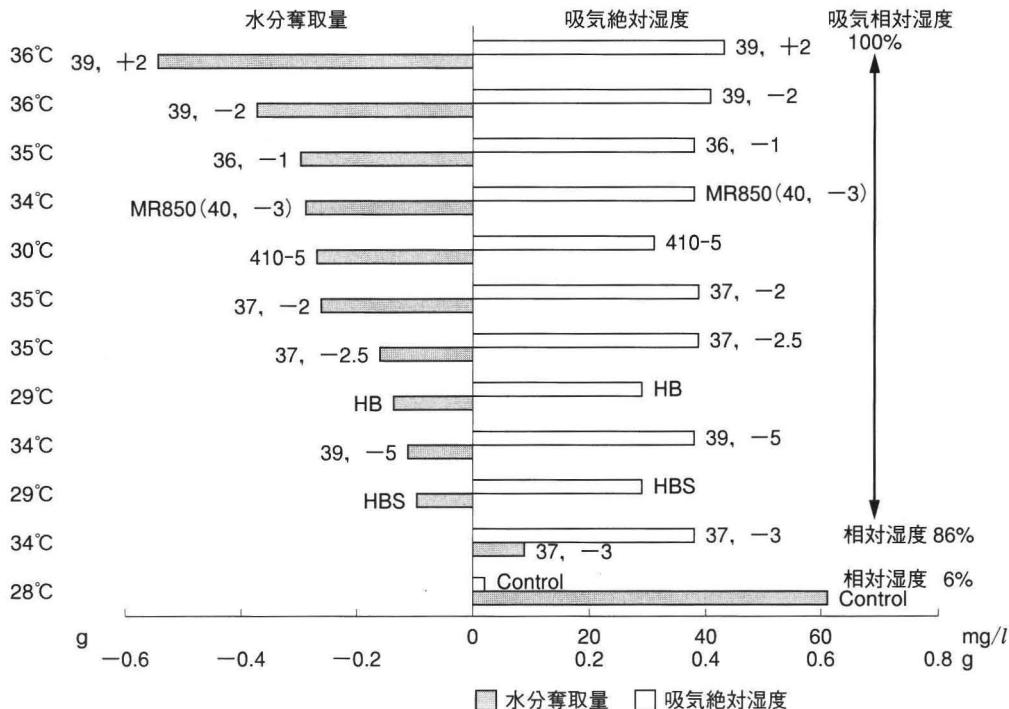


図 7 実験結果

縦軸右に相対湿度。横軸に水分奪取量（左側と右側）と絶対湿度（右側のみ）を示す。水分奪取の負の値は湿潤紙の水分が増えたことを示す。左端の温度は気管チューブモデル内の温度を示す。図中の MR 850 はフィッシャーパイケル社の最新機種、410 は同社熱線なし加温加湿器 MR 410 でダイアル 5 で測定した。HB, HBS はダール社の人工鼻。その他はフィッシャーパイケル社の MR 730 を使用した。下端のコントロールは加温加湿器なしで測定した。

設定は分泌物の固形化から気道閉塞につながり、致死的な合併症を起こす危険をはらんでいる。われわれは日々の気管吸引の分泌物の性状や気管チューブ抜管時に気管チューブ内の分泌物の性状をみながら加湿器の設定を加減してきた。それを通して、世界的な基準では加湿がどうしても不足であるとの認識のもとに種々の実験を行った。

6. 加温加湿器

加温加湿器は大きく分けて熱線なし加温加湿器と、熱線入り加温加湿器に大別される（図 2）。熱線なし加温加湿器は加温チャンバーで水蒸気になった水分が吸気回路内を進むうちに外気により冷やされて、途中で結露する。相対湿度は高いが、絶対湿度は低くなる。熱線入り加温加湿器はその結露を防ぐために回路内に熱線を入れてい

る。そのためにチャンバー温と口元温の制御が必要で、設定も複雑であるが、最新の機種はチャンバー温と口元温の設定を固定している物もある。

7. 今までの実験

われわれは、以下の 4 つの実験を行った。

1. 同じ絶対湿度で相対湿度の異なる 2 種類のガスが人工気管から奪う水分量（図 3）⁹⁾
2. 水溶性ゲルへの水分付加と相対湿度（図 4）¹⁶⁾
3. 热線入り加温加湿器の各設定値における水分奪取量（図 5）¹⁷⁾
4. 肺モデルと気管チューブモデルを用いた、人工呼吸中の水分奪取量と湿度（図 6, 7）
1. の実験から導き出された結論は人工気管モデルから奪取される水分は絶対湿度ではなく、相

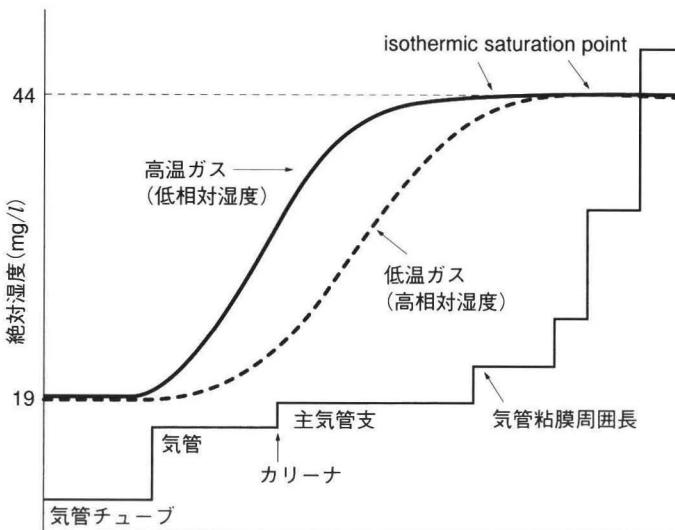


図 8 図 3 絶対湿度 19 mg/l の 2 種類のガスと気管粘膜周囲長の理論的関係図

気管粘膜周囲長の下の面積が粘膜面積に相当する。高温ガスは相対湿度が低いために粘膜面積の狭い場所から多くの水分を奪取する。低温ガスは温度上昇に伴って相対湿度が下がり、粘膜面積の広い場所から水分を奪取する。人工気管モデルは図の気管の部分のみをシミュレートしている。気管粘膜周囲長は Weibel のモデルから計算した¹⁹⁾。詳細は文献 9, 16 参照。

対湿度の関与が大きい。図 8 から分るように、絶対湿度は奪取水分の総量を決め、相対湿度はどの場所から水分を奪取するかを決める。すなわち相対湿度の低いガスは上気道から水分を奪いやすい。

2. の実験からは人工気管中の水溶性イソジンゲルへの水分付加は相対湿度の一次関数であり、絶対湿度との相関はない。

3. 熱線入り加温加湿器の水分奪取はほとんどの設定で起こる¹⁷⁾。

4. 上記 1. 2. 3. の実験は一方向性ガスの実験であるため、吸気ガスの水分奪取が呼気ガスによりどのように修飾されるかを検討した。

この実験から次のことが解る。

a. 相対湿度 100% 以下の吸気ガス (87%: 図 7 の 37°C , -3) は気管チューブモデル内の水分奪取を起こす。

b. 絶対湿度が高くて (38 mg/l: 図 7 の 37°C , -3) 水分奪取は起こる。この 38 mg/l は

現在のどの世界基準もクリアする。(表の ECRI の 100% 相対湿度のみ満たさない)。

c. 口元温を制御する Y コネクタの部分から気管チューブ内に入るまでに $2\text{--}6^\circ\text{C}$ の温度低下が起こる。

4 の実験は 3 の実験と矛盾するようであるがそうではない。3 の実験は純粋に吸気ガスの影響を見、4 の実験はそれに呼気ガスの影響を加えた。吸気ガスにより奪われた水分が呼気ガスにより再付与されるのであれば、極端にいえば加湿器は不要となる¹⁸⁾。乾燥ガスで換気しても患者自身の呼気ガスに含まれる水分で再び加湿されるという理屈が実際的ではないことと一般である。また呼気ガスは患者の状態によりかなり異なると考えられる。喀痰の性状も個々人でかなり異なる。4 の実験では人工鼻も行っているが、結果は水分奪取は起こらず、水分付与となつた。受動的加湿のために高温にならずそのために相対湿度が高い。人工鼻が使い勝手が良いのは高相対湿度の故と思われ

る。しかし実地臨床上は分泌物の多い患者や粘痰の患者では人工鼻では加湿不足は明らかである。

8. われわれの設定値

世界的な基準では気管チューブ内の分泌物の固化は起こる。相対湿度100%は必須で、チューブ内での条件は37°C 100%の吸気ガスが最適であると考える。すなわち吸気回路での若干の結露（相対湿度が100%であることの証明）が必須であり、回路内の熱線は結露過多を防ぐ意味で使っている。そのうえで、気管分泌物の性状により設定を加減することが肝要である。

以上の結果からわれわれの設定値はチャンバー温41°C、患者口元温39°Cとして、4年間管理しているが、それでも粘痰の患者にはネブライザーが必要なこともある。この設定はおそらくどの施設より高いと思われるが、臨床的には加湿过多を示す徵候はなく、過加温による気道熱傷は皆無である。図7からは、この設定でもわれわれの理想とする気管チューブ内の37°C 100%はクリアしていない。

9. 結語

人工呼吸中の適切な加温加湿は

1. 100%相対湿度であること（吸気回路内の結露）。
2. 温度は気管チューブ内で患者体温と同等であること。

引用文献

- 1) Condon Handbook of physics, Churchill Livingstone, New York, 1967
- 2) Branson RD : Humidification of Inspired Gases during Mechanical Ventilation. Respir Care 38 : 461-768, 1993
- 3) Dery R, Pelletier J, Jacques A, et al : Humidity in anaesthesiology III : heat and moisture patterns in the respiratory tract during anaesthesia with the semi closed system. Can Anaesth Soc J 14 : 287-298, 1967
- 4) ISO 8185 : 1997 (E) Humidifiers for medical use-General requirements for humidification systems. Section 11. 11.1 Humidifier output
- 5) ASTM Standards : Standard Specification for Humidifiers for Medical Use-Part 1 : General Requirements for Active Humidification Systems. Section 11. 49 (60) Humidifier Output p 1085, 1999
- 6) AARC Clinical Practice Guideline Humidification during Mechanical Ventilation. Respir Care 37 : 887-890, 1992
- 7) Emergency Care Research Institute. Heated humidifiers. Health Devices 16 : 223, 1987
- 8) 宮尾秀樹：加温加湿器は乾燥器？LiSA 2 : 40-45, 1995
- 9) Miyao H, Hirokawa T, Miyasaka K, et al : Relative humidity, not absolute humidity, is of great importance when using a humidifier with a heating wire. Crit Care Med 20 : 674-679, 1992
- 10) Miyao H, Miyasaka K : Hazards of Humidifiers with Heated Wires. Crit Care Med 21 : 477-478, 1993
- 11) Miyao H, Miyasaka K : Relative humidity, not absolute humidity, is of great importance when using a humidifier with a heating wire. Crit Care Med 21 : 634-635, 1993
- 12) Miyao H, Miyasaka K : Low relative humidity delivered by a humidifier with a heating wire. Crit Care Med 21 : 948, 1993
- 13) Miyao H, Miyasaka K : Relative humidity with heating wire. Crit Care Med 21 : 1613-1615, 1993
- 14) 宮尾秀樹, 宮川 韶, 宮坂勝之：熱線入り加温加湿器の使い方. 人工呼吸 10 : 37-43, 1993
- 15) 宮川 韶, 宮尾秀樹, 片山顯徳ほか：人工呼吸中の加温加湿について—相対湿度の重要性—. 臨床呼吸生理 27 : 13-18, 1995
- 16) Miyao H, Miyasaka K, Hirokawa T, et al : Consideration of the International Standard for Airway Humidification Using Simulated Secretions in an Artificial Airway. Respir Care 41 : 43-49, 1996
- 17) 宮川 韶, 宮尾秀樹, 高田稔和ほか：気管チューブ内腔への吸気ガス湿度の影響—人工呼吸中の分泌物固化について—. 埼玉医科大学雑誌 28 : 89-94, 2001 (<http://www.saitama-med.ac.jp/uinfo/jsms/vol28/moku2802.html>)

- 18) Miyao H, Miyasaka K, Hirokawa T, et al :
Humidity and Standards : More Questions
than Answers. *Respir Care* 41 : 344-346, 1996
- 19) Weibel ER : *Morphometry of the Human
Lung*. Heidelberg, Springer-Verlag, 1963, 13
-