

熱線入り加温加湿器の使い方

宮尾 秀樹* 官川 響* 宮坂 勝之**

ABSTRACT

How to use a humidifier with a heating wire incorporated into the breathing circuit

Hideki MIYAO*, Tohru HIROKAWA*, Katsuyuki MIYASAKA**

* *Department of Anesthesiology, Saitama Medical Center, Saitama Medical School, Kawagoe, Saitama, Japan*

***Department of Anesthesia, National Children's Hospital, Tokyo, Japan*

Humidifying system with a heated water reservoir and a breathing circuit with heating wire incorporated has become common place.

Airway obstruction due to consolidation of airway secretions has been frequently experienced in our institution since the introduction of such a humidifier with a heating wire. We speculated that such problems were caused by the reduced relative humidity of the delivered gas.

In this study, we assessed both experimentally and clinically a hypothesis that a gas with lower relative humidity deprives more amount of water from a unit area of mucus membrane in the trachea than a gas with higher relative humidity when the both gases have the same absolute humidity. We conclude that the relative humidity should be almost 100% when using any type of humidifier and some rainout or condensation in the inspiratory limb of breathing circuit is a simple, reliable and essential monitor that ensure the delivered gas has a relative humidity of 100% even if using the humidifier with a heating wire.

はじめに

熱線入り加温加湿器は人工呼吸器の加湿システムとして広く使われてきている。絶対湿度を高く保てるという点と、呼吸回路内に水滴がつかないために、管理がしやすいことが広く普及している原因であると思われる。加湿システムにおける絶対湿度の重要性はひろく受け入れられているが、相対湿度に関してはあまり考慮されていないのが

現状である。

1970年代に Forbes¹⁾²⁾は動物実験で、絶対湿度が 33 mg/L and/or 相対湿度が 75% 以上あれば気道粘膜の粘液の流れへの影響はないと報告している。熱線なしの加温加湿器が主流の時代には、呼吸回路内を吸気ガスが移動する間に、冷却により含有蒸気が結露し、患者口元の相対湿度はほぼ 100% であったために、チャンバー温度の調節そのものが絶対湿度の多寡を決定していた。しかし熱線入りの加温加湿器の時代に入って、吸気ガスを熱することにより蒸気の結露をなくすこと

* 埼玉医科大学総合医療センター麻酔学教室

** 国立小児病院麻酔科

が相対湿度の低下をまねき、気道の乾燥化を促すことを指摘している研究者は少ない³⁾。また、最新型の熱線入り加温加湿器にも相対湿度低下の危険性が開発のコンセプトに入っているとは思えない。本研究において強調すべき点が二つある。第一に 37°C、相対湿度 75% のガスは 25°C 50% のガスと同じ乾燥化能力を持っているということである。どちらのガスも 11 mg/L の水を奪って飽和状態になるからである (37°C と 25°C の飽和水蒸気量はそれぞれ 44 mg/L と 23 mg/L で $44 \text{ mg/L} \times (1-0.75) = 11 \text{ mg/L}$, $23 \text{ mg/L} \times (1-0.5) = 11.5 \text{ mg/L}$ となる)。第二に気管内チューブ内には水蒸気を供給する水源がないために分泌物があれば乾燥化が非常に起こりやすいということである。

われわれの施設では、熱線入り加温加湿器 (Fisher & Paykel 社製 MR 600 Servo-controlled heated humidifier, 相対湿度調節ダイヤルなし) を導入してから、それ以前には見られなかったような気道内分泌物の固化による狭窄が多発した。われわれはその原因を相対湿度の低下によるものではないかと考えた。加温加湿チャンバーを出た後のガスの絶対湿度 (ガスの中に含まれる総水分量) は熱しても変化しないが、相対湿度は温度の上昇によって低下する。

本研究の目的は“吸気ガスの絶対湿度が同じであれば、温度が高い (すなわち、相対湿度が低い) 方が気管支粘膜の単位面積あたりから奪う水分量は多い”という仮説を、実験的かつ臨床的に証明し、熱線入りの加温加湿器の正しい使い方を示すことである。

1. 症例報告

症例 1：72 歳，男性。食道癌術後の肺炎のため気管切開下に人工呼吸管理となった患者で、気切チューブは一週間ごとに交換されていた。気管切開後三カ月たった頃分泌物の増加による気道狭窄症状が現れていたが気付かれていなかった。ある日、高炭酸ガス血症による意識レベルの低下が起り麻酔科医が呼ばれた。ベンチレーターは Newport E 100 でセッティングは FI_{O_2} 0.25, tidal volume 500 ml (inspiratory time 1 sec,

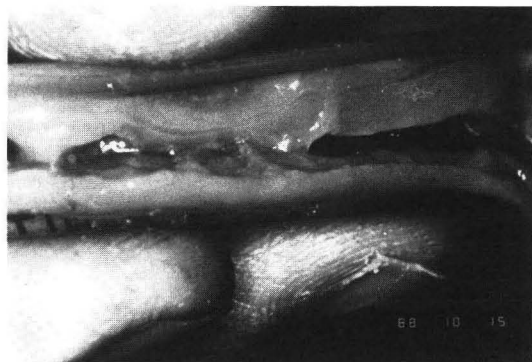


図 1 症例 2 の気管内チューブを縦割りにしたところ。粘調な分泌物が認められる。

inspiratory flow rate 0.5 L/sec), IMV 8/min, 回路内定常流 18 L/min であった。吸気時に胸郭の上がりが悪いためになんらかの狭窄を考え、気切チューブを交換したところ、乾燥し、固化した分泌物による狭窄が認められた。使用していた加湿器は Fisher & Paykel 社の熱線入り加温加湿器 MR 600 で設定温度は 35°C であった。

症例 2：58 歳，女性。患者は間質性肺炎の疑いで当センターに入院し、hypoxia のために気管内挿管された。Newport E 100 ベンチレーターによる人工呼吸を開始して六日後にチアノーゼとなり麻酔科医が呼ばれた。ベンチレーターのセッティングは FI_{O_2} 1.0, tidal volume 500 ml (inspiratory time 1sec, inspiratory flow rate 0.5 L/sec), IMV 18/min, PEEP 10 cmH_2O , 回路内定常流 12 L/min であった。気管内吸引チューブに粘調な粘液がくっついているのが認められたため、ファイバースコープを施行した。気管内チューブ一杯に満たされた分泌物により気道がわずかに通っているのが認められた (図 1)。使用していた加湿器は Fisher & Paykel 社の熱線入り加温加湿器 MR 600 で設定温度は 35°C であった。

この 2 例における人工呼吸器および加湿器は同じ機種であるがそれぞれ別の装置であった。

われわれは同じようなトラブルを他に 5 例経験している。このようなトラブルの原因を回路内の熱線によるのではないかと疑い、熱線入りの Fisher & Paykel MR 600 から熱線なしの Fisher

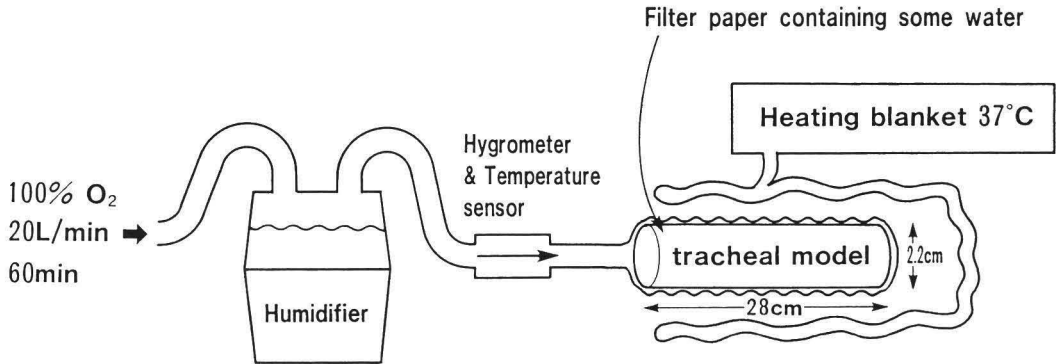


図 2 気管モデルの実験のシェーマ

表 1 気管モデルから奪われた水分量

absolute humidity	heating wire	temp.	relative humidity	water deprived	mean \pm s.d.
19 mgH ₂ O/L	(+)	35°C	48%	6.1 g 5.8 g 5.9 g	5.93 \pm 0.15 g
	(-)	24°C	87%	3.3 g 2.8 g 2.5 g	2.87 \pm 0.40 g*

*p < 0.01 unpaired t-test

& Paykel MR 428 に交換したところ、それ以来ここに挙げたような重篤な気道内分泌物の固硬化による狭窄は経験していない。

熱線入りの加温加湿器と熱線なしの加温加湿器の違いを検討するために、以下の実験を行った。

2. 実験方法

熱線入りの加温加湿器として、Fisher & Paykel 社の MR 500 servo-controlled humidifier, 熱線なしの加温加湿器として同じく MR 428 を使用した。温度と相対湿度は Vaisara 社製 HMP 113 湿度計を用いた。絶対湿度は温度と相対湿度から算出した。

気管モデルはインスピロン社のディスプレイル蛇管 (内径 2.2 cm, 長さ 28 cm) の中に水を含ませた円筒形の濾紙を入れて作った。同じ絶対湿度 (19 mgH₂O/L) を持つが相対湿度の異なる二種類のガス (熱線入りの MR 500 からは相対湿度 48%, 35°C, 熱線なしの MR 428 からは相対

湿度 87%, 24°C) を 50 L/min の流量で気管モデルの中を 30 分間流した。気管モデルは Gaymer 社製 MEDI-THERM MTA-4701 heating blanket でくるみ、37°C に設定した (図 2)。気管モデルから奪われた水は実験の前後で、気管モデルの重量を測定して求めた。実験は二種類のガス、それぞれ三回ずつ行った。統計は unpaired Student's t-test とした。

3. 結果

同じ絶対湿度 (19 mgH₂O/L) にもかかわらず、高温低相対湿度のガス (35°C, 48%) が低温高相対湿度のガス (24°C, 87%) より有意に多くの水分を奪った (5.9 \pm 0.2 vs, 2.9 \pm 0.4 g; p < 0.01) (表 1)。

4. 考察

後の考察のために湿度と温度の関係を確認しておく。絶対湿度は温度に関係なく、1 L のガスの

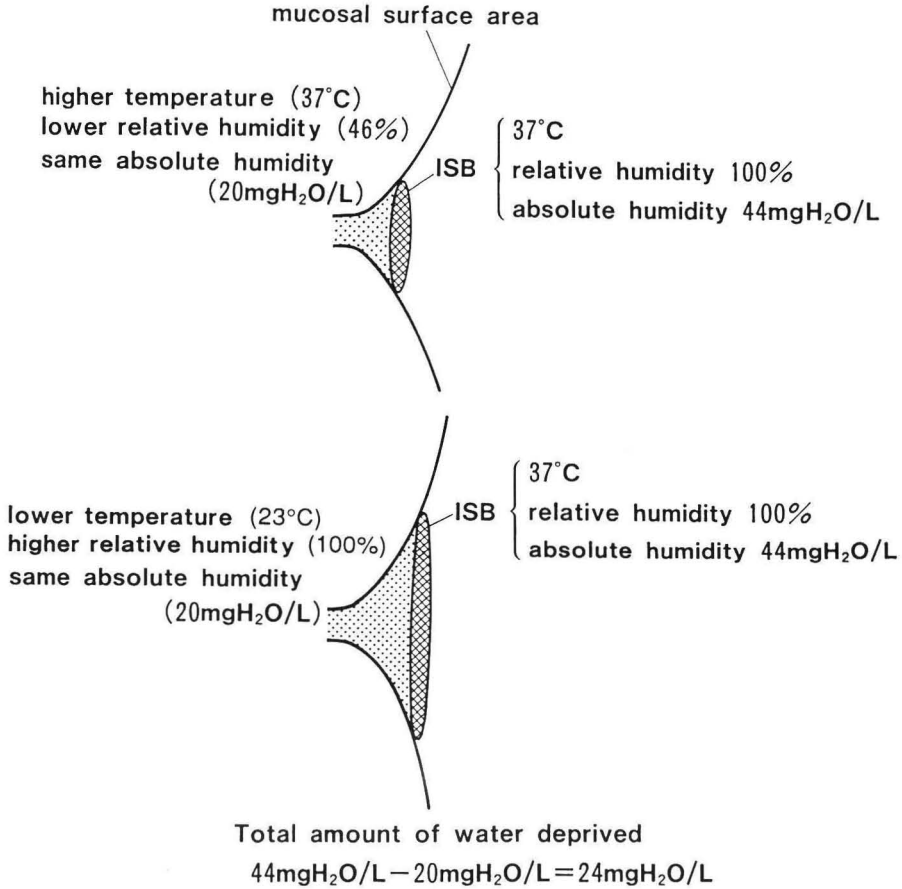


図 3 気管支粘膜面積が末梢に行くに従って、ラッパ状に拡大していく。もし奪われる水分量が等しければ、ISB (本文参照) が末梢にあるほど、単位面積から奪われる水分量は少なくなる。

(Miyao H, 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 より引用。一部改変。)

中に含まれる水蒸気の量で、mg/L または mgH₂O/L で表す。相対湿度はその温度におけるガスが最大限含み得る水蒸気の量に対する実際含んでいる水蒸気の量の比で%で表す。温度が上昇すると、絶対湿度は一定であるが、相対湿度は低下する。なぜなら含有水蒸気量は変化しないが、最大限含み得る水蒸気の量が温度上昇によって増加するからである。

1) 理論的側面

吸気時の気管内チューブの先端におけるガスの含有水蒸気量 (絶対湿度) は患者肺から奪う総水分量を決定する。どんな湿度のガスであれ最終的に肺胞に達するまでに、絶対湿度 44 mgH₂O/L

(37°C における飽和水蒸気量) となる。従って、44 mgH₂O/L から吸気ガスの絶対湿度を引いた分が患者肺から奪われる総水分量となる。このように吸気の絶対湿度は患者肺から奪う水分量の一意的决定因子である。一方、後述するが、相対湿度は患者肺のどの場所から水を奪うかの決定因子となる。

吸気ガスは気管支樹のどこかで 37°C 飽和状態 (44 mgH₂O/L, 100% relative humidity) となる。その場所を Isothermic Saturation Boundary⁴⁾ (以下 ISB と略) という。気管支樹が分岐を重ねるにつれ、気管支粘膜の面積は急激に拡大し、肺胞面積 50~100 m² にまで達する。最近の

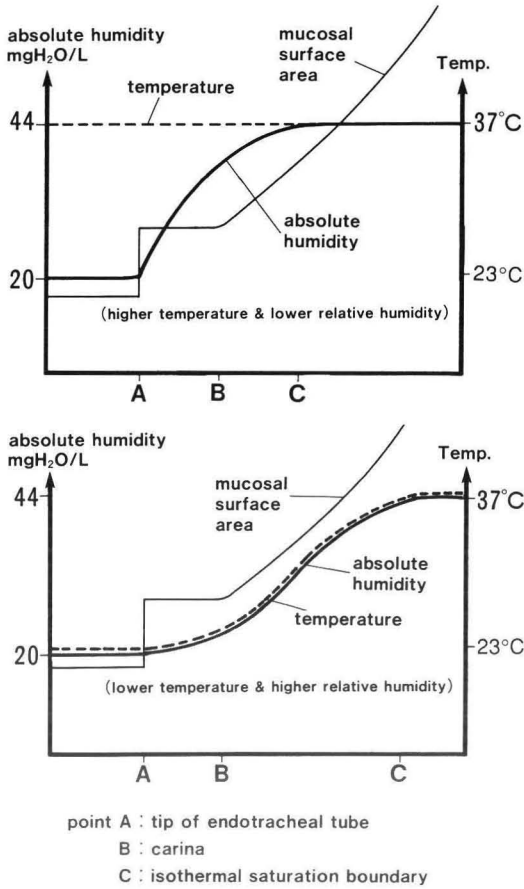


図4 温度、絶対湿度、気管支粘膜面積の相互関係
 上図は温度が高く相対湿度が低いために、絶対湿度カーブが急峻となり気管粘膜の狭い部分からほとんどの水分を奪い、ISBも左に移動する。下図は温度が低いため、体温により暖められるに従って水分を奪うため、絶対湿度カーブの傾きは緩やかで、相対湿度100%を保ったまま、ISBに達する。ISBも右に移動する。気管支粘膜面積の拡大と絶対湿度カーブの急峻な部分が一致し、より広い面積から水を奪うので、単位面積あたりから奪われる水分量は減少する。

(Miyao H, 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 より引用。一部改変)

研究では、口呼吸で分時換気量が多い場合、ISBは亜区域気管支のレベルであると言われている⁵⁾⁶⁾。われわれは挿管患者の場合も同じような

状況にあると考えている。このような患者に温度は低い相対湿度100%のガスを吸入させた場合、その温度においては水を奪う能力はない。体温によって暖められて相対湿度が下がった時に初めて水を奪う能力が生まれる。一方、温度は37°Cであるが低い相対湿度のガスを吸入させた場合は、そのガスはすでに水を奪う能力を持っているために気管に入った時点で粘膜から水分を奪い始め、ISBは口側に移動する。絶対湿度が同じであれば、患者肺から奪われる水分量は決まっているので、ISBが口側にあるほど、単位面積あたりから奪われる水分量は多くなる(図3)。多くの研究者が、ISBが口側にあるほど、気管支粘膜の繊毛運動や肺機能に対して好影響を及ぼすとしているが⁷⁾⁹⁾。このことは熱線なしの加温加湿器を使用している場合には正しい。熱線入りの加温加湿器では、もし相対湿度が低くなるような使い方をした場合、ISBの口側で、より大きな問題が発生する可能性がある。

図4に温度と絶対湿度と気管支粘膜面積の関係を示す。同じ絶対湿度(Absolute Humidity, 以下AHと略)を持つが、異なった相対湿度(Relative Humidity, 以下RHと略)の二種類のガスを仮定してみよう。37°C, AH 20 mgH₂O/L, RH 46%のガスを高温ガスと呼ぶことにする。23°C, AH 20 mgH₂O/L, RH 100%のガスを低温ガスと呼ぶことにする。

高温ガスは気管内ではisothermicであるが、飽和されていない。高温ガスは熱エネルギーが高いために、気管粘膜の非常に狭い面積から水分をすばやく奪い、飽和状態に向かってAHカーブは急峻となりISBは口側に移動する。気管支粘膜面積がラップ状に拡大する以前に、奪うべき水分のほとんどを奪う(図4, 上図)。

一方、低温ガスは37°Cに向かってゆっくり暖められ、RH 100%を保ったまま、AHが44 mgH₂O/Lに達するので、AHカーブは緩やかな傾きとなり、ISBは末梢に移動する。気管支粘膜面積の拡大とAHカーブの急峻な部分が一致し、より広い面積から水分を奪うので、単位面積あたりの奪われる水分量は減少する(図4, 下図)。

このように、絶対湿度は患者肺から奪う総水分量を決定し、相対湿度は患者肺のどの場所から主に水を奪うかの決定因子となる。

McFadden は空気呼吸時の呼気相において、気道から口に向かって呼気が移動する時、冷却により相対湿度が上昇し過飽和になるために、水分が気道に戻ると書いている⁹⁾。もし気道が 37°C に温められていれば、呼気時に気道に戻す水分量はゼロになる。

このように高温ガスは、三つの気道乾燥化の可能性を持つ。第一に吸気時に ISB を口側に移動させる (図 3)。第二に AH カーブを急峻にする (図 4)。第三に呼気時に気道へ戻す水分をなくす。

2) 実験の評価

われわれの呈示した 3 症例の吸気流速の理論的な最大流速は、瞬間的には 42 L/min から 48 L/min となる (inspiratory flow rate 0.5 L/sec = 30 L/min に回路内定常流 12 と 18 L/min を足す)。実験において 50 L/min の定常流を選んだのは、実験設定を簡素化して二種類のガスの違いを際立たせるためである。

もし気管モデル内で ISB に達するように、気管モデルの長さを十分長くするか、ガスの流速を遅くすれば、気管モデルから奪う水分量はどちらのガスも同じになるはずである。なぜなら絶対湿度 19 mgH₂O/L のガスは ISB (AH = 44 mgH₂O/L) に達するのに 25 mgH₂O/L (= 44-19) の水を奪うからである。そのような条件設定の実験なら奪われる水分総量は 37.5 g となる (= 25 mgH₂O/L × 50 L/min × 30 min)。この量はわれわれの実験結果より多い。このことは 28 cm の気管モデル内では、ISB に達していないことを意味し、気管モデル内の濾紙は ISB より口側の気管支粘膜の単位面積に相当すると考えても良い。従って、“吸気ガスの絶対湿度が同じであれば、温度が高い (すなわち、相対湿度が低い) 方が気管支粘膜の単位面積あたりから奪う水分量は多い” という仮説の正当性は明らかである。

3) 臨床的側面

熱線入りの加温加湿器使用の注意点：熱線入り

の加温加湿器の特徴は、呼吸回路内での水分の結露をなくすことによって、絶対湿度の低下をなくし、感染の原因となり易い回路内の水の管理を容易にすることなどが挙げられる。理想的な吸気ガスは 37°C, AH 44 mgH₂O/L, RH 100% である。このようなガスを供給するためには、よくコントロールされた熱線入りの加温加湿器が必須であるが、現時点の最新鋭の加温加湿器であると思われる Fisher & Paykel 社製 MR 700 シリーズも本論文のコンセプトは取り入れられていない。相対湿度調節ダイヤルは装備されているが、患者口元の温度を加温チャンバーの出口温度より 5 度も高くするような危険な設定も可能だからである。これは加湿器製造メーカーのための標準規格である ANSI (American National Standard) や ISO (International Standard) が相対湿度を無視して、絶対湿度 30 mg/L 以上を満たしていればよいという勧告に起因しているからのように思われる。British Standard¹¹⁾²⁾ の AH 33 mgH₂O/L も 37°C に熱せられれば 75%RH となり、水源のない気管内チューブ内では分泌物乾燥化の原因となる可能性も否定できない。われわれは RH 100% は必須条件であると考えている。

RH 100% を満たすための簡単で最も信頼できるモニターは吸気回路内での水分の結露である。結露するということは、過飽和の状態になっていることの証明であり、RH 100% の証明である。回路内の水分の結露をなくすために開発された熱線入りの加温加湿器使用の際も、相対湿度調整ダイヤルのついている機種 (最近の Fisher & Paykel 社の熱線入り加温加湿器はすべてこのダイヤルがついている) では、吸気回路内の水分の結露を目安として相対湿度 100% にして使用することが必須である。

熱線なしの加温加湿器使用上の注意：熱線なしの場合、吸気回路内の水分結露がおきやすく 100% RH は確保できやすいが、チャンバーの温度が低すぎると、適正な絶対湿度を保てず、患者肺から奪われる総水分量が多くなる。また回路内の流量が多い場合は、相対湿度の低下の可能性もあり、患者口元での温度のモニターと吸気回路内の水分結露の存在が大切である。

われわれの呈示した2症例は、気切チューブの先端、気管内チューブ内の分泌物の固形化による気道狭窄であり、気管モデルの実験結果から、前述した仮説の正当性は明らかである。

熱線入り加温加湿器の使用に際しては、吸気温度のモニターだけでは不十分であり、吸気回路内の水分結露の存在を目安として、高い相対湿度を保つことが肝要である。

文 献

- 1) Forbes AR : Humidification and mucus flow in the intubated trachea. *Br J Anaesth* 45 : 874-878, 1973
- 2) Forbes AR : Temperature, humidity and mucus flow in the intubated trachea. *Br J Anaesth* 46 : 29-34, 1974
- 3) 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
- 4) 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* 114 : 287-298, 1967
- 5) Breslin FJ, McFadden ER Jr, Ingram RH Jr, et al : Effects of atropine on respiratory heat loss in asthma. *J Appl Physiol* 48 : 619-623, 1980
- 6) McFadden ER Jr, Pichurko BM, Bowman HF, et al : Thermal mapping of the airways in humans. *J Appl Physiol* 564-573, 1985
- 7) Shelly MP, Lloyd GM, Park GR : A review of the mechanisms and methods of humidification of inspired gases. *Intensive Care Med* 14 : 1-9, 1988
- 8) Dery R : The evolution of heat and moisture in the respiratory tract during anaesthesia with a non-rebreathing system. *Can Anaesth Soc J* 20 : 269-309, 1973
- 9) Noguchi H, Takumi Y, Aochi O : A study of humidification on tracheostomized dogs. *Br J Anaesth* 45 : 844-848, 1973