

カテーテルマウント内の結露の存在は相対湿度100%を示す決定的な指標ではない

小高勇士^{1, 2)}・佐藤由実¹⁾・鶴田友加里¹⁾・吉田幸太郎¹⁾・加藤博史²⁾・保多隆裕^{2) †}

KEY WORDS 人工呼吸, 加湿, 結露, 濕度

要 旨

従来、人工呼吸においてカテーテルマウント内に結露が認められる場合、吸気ガスの相対湿度は100%に達しているとされている。我々は、カテーテルマウント内の結露は必ずしも相対湿度100%を示すものではないという仮説を立て検証した。方法として、Yピース出口とカテーテルマウント出口において吸気ガスの相対湿度を測定するとともに、カテーテルマウント内に蓄積した結露量を測定するベンチテストを実施した。さまざまな条件下で15回の測定を行った結果、すべてのケースで結露の存在が認められたが、相対湿度は大部分のテストで100%に達しなかった。このことから、カテーテルマウント内の結露の存在は、相対湿度100%を明確に示すものではないことが示唆された。

I 序 文

気管にチューブを挿入する侵襲的な人工呼吸では、上気道での自然な熱と水分の交換ができなくなるため、吸入ガスの加温と加湿が必要である¹⁾。加湿が不十分の場合、線毛の機能障害や喀痰の排泄不良などを引き起こす恐れがあり²⁾、さらに、気管チューブの内側では分泌物が蓄積して内腔が狭窄する可能性がある³⁾。気管チューブの内腔が狭窄すると呼吸仕事量が増大し⁴⁾、完全閉塞の場合には呼吸困難となり心肺蘇生が必要になる場合もある^{3, 5)}。

人工呼吸患者に供給されるガスの加温と加湿の方法は、人工鼻 (heat and moisture exchanger : HME) による受動的加湿と、加温加湿器 (heated humidifier : HH) による能動的加湿の2つに大別される。HMEは呼気に含まれる熱と水分を捕捉して次の吸気に再利用するデバイスであり、HHは蒸留水をヒーターで加熱して水蒸気を発生させるデバイスである⁶⁾。HHの呼吸回路は、外気などで冷やされると結露が多く発生するため⁷⁾、熱線付き呼吸回路を用いる加温加湿器 (heated wire humidifier : HWH)

も広く普及している⁸⁾。HWHでは、チャンバー出口を37°C、Yピースを40°Cに設定した場合、理論的にはチャンバー出口においての相対湿度 (relative humidity : RH) は100%、絶対湿度 (absolute humidity : AH) は44mg/Lと計算され、吸気ガスが熱線付き回路を通過する際にRHは85%程度まで低下するが、AHは44mg/Lのままと想定される。そして、Yピース以降ではガスの温度は3°C程度低下すると想定されるが、吸気ガスのRHは再度100%に戻り、AHは理論値の44mg/Lを維持するとされている⁹⁾。

米国呼吸療法学会 (American Association for Respiratory Care : AARC) のClinical Practice Guideline¹⁰⁾によると、侵襲的人工呼吸を受けている患者に能動的な加湿を行う場合、Yピースでの温度は34~41°C、AHは33~44mg/L、RHは100%を推奨している。Miyaoらの研究¹¹⁾では、低RHは分泌物の乾燥に大きく影響することから、気管チューブ閉塞を予防するうえでAHよりもRHの重要性が強調されている。加湿デバイスの中で、HWHは唯一RHを低下させるプロセスが入るため、低RHガスが患者へ供給されないように注意深く観察する必要があるが、臨床現場において湿度センサーなどはあまり普及していない。我々が知る限り、人工呼吸回路に組み込むことができるRHセンサーは、加温加湿器VHB 200 (Inspired Medical, China) に搭載されている温湿度センサーの1種

1) 神戸大学医学部附属病院 臨床工学部

2) 神戸大学大学院医学研究科 医療創成工学専攻

†責任著者

[受付日：2025年6月5日 採択日：2025年9月24日]

カテーテルマウント内の結露の存在は相対湿度100%を示す決定的な指標ではない

類のみである。AARCのClinical Practice Guideline¹⁰⁾では、気管チューブに接続されるコネクタに結露が認められる場合、RHは100%に達しているとしており、磨田¹²⁾は、RH 100%を確認する指標として、吸気温度センサーの数cm下流において、うっすら結露している状態を確認することが必要であると述べている。このような背景から、臨床においては、RHの評価方法として結露の目視確認が用いられており、カテーテルマウントにおいて結露がうっすら確認できた場合、RHは100%に達していると判断している。

しかしながら、たとえば生活環境において、冷えたグラスの表面や冬の窓ガラスに結露が生じることがある。この結露は、水蒸気を含む気体が冷却されることで、飽和水蒸気量を超えた水蒸気が凝縮し形成されたものであり、室内のRHが100%でなくとも発生する。このような現象は、カテーテルマウントにおいても同様に生じると考えられることから、カテーテルマウント内の結露は、必ずしもRH 100%を反映する指標ではないという仮説が立てられた。仮に実際のRHが低い場合、気管チューブの閉塞を引き起こす危険性が高まることから、本研究では、カテーテルマウント内における結露発生の有無とRHの関係を明らかにすることを目的とした。

II 方法

1. 相対湿度（RH）と温度の測定

Yピース出口（測定箇所A）とカテーテルマウント出口

（測定箇所B）で吸気ガスのRHと温度を測定する実験系を構築した。実験系は、加温加湿器MR 850（Fisher & Paykel, New Zealand）、熱線付き呼吸回路RT380（Fisher & Paykel, New Zealand）、カテーテルマウントSuperset 14cm/21cm（Intersurgical, England）、モデル肺Venti Plus 1L（Gale Med, Taiwan）、人工呼吸器Puritan Bennett 840（Medtronic, USA）で構成した。また、測定箇所AおよびBにおいて呼気ガスの逆流を防ぐため、バイパス回路と3つの一方弁を使用した。RHと温度の測定には、温湿度センサーHYT 939（Innovative Sensor Technology, Switzerland）を使い、データロガー SHTDL-3C（Ymatic, Japan）を用いてデータを記録した。HYT 939は、人工呼吸器に接続できる形状ではなかったため、呼吸回路に切り込みを入れセンサーを挿入し、測定部が呼吸回路の中心付近に位置するように配置した（図1）。なお、メーカー発行の試験成績書によれば、HYT 939のRH測定精度は80%未満で±1.8%、80%以上で±2.5%、温度測定精度は±0.2°Cである。

RHと温度の測定は、HHWのチャンバー出口温度/Yピース温度を37°C/40°C、39°C/39°C、42°C/39°C（温度勾配+3°C、±0°C、-3°C）とした3つの条件下で行った。人工呼吸器の設定は、量規定換気（矩形波）、一回換気量500mL、呼吸回数20/分、吸気流速30mL/分、吸気終末ポーズなし、IE比1:2、酸素濃度100%とし、周囲の温度は23~24°Cに制御した。人工呼吸器の出力ガス温度は、安定するまでに約5時間かかることが報告されているこ

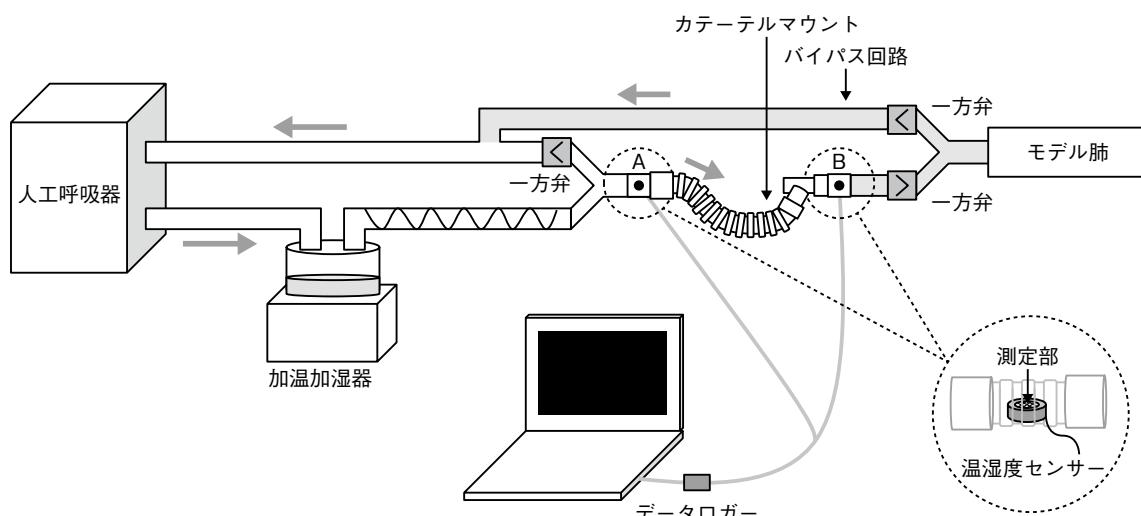


図1 実験系

Yピース出口（測定箇所A）とカテーテルマウント出口（測定箇所B）で吸気ガスのRHと温度を測定するための実験系を構築した。測定箇所において呼気ガスの逆流を防ぐため、バイパス回路と3つの一方弁を使用した。温湿度センサーは呼吸回路内に挿入し、測定部が呼吸回路の中心付近に位置するように配置した。

カテーテルマウント内の結露の存在は相対湿度100%を示す決定的な指標ではない

とから¹³⁾、RHと温度を測定する前に人工呼吸器のウォームアップとして少なくとも5時間稼働させた。HWHの温度は、運転開始後30分以内に安定するため¹⁴⁾、データ収集はHWHの運転開始30分後に行った。RHと温度の測定は各温度設定で5回ずつ、それぞれ5つの異なる日に行つた。

2. 絶対湿度（AH）の算出

本ベンチテストにおけるRHの妥当性を評価するため、測定されたRHと温度の値を用いて以下の式からAHを算出し、過去の研究のAHと比較した。計算では1気圧（1013.25hPa）と仮定した。

$$E = 6.1078 \times 10^{(7.5 \times T / 237.3 + T)}$$

$$a = 217 \times e / T + 273.15$$

$$AH = a \times RH / 100 / 1,000$$

e：飽和水蒸気圧 (hPa)

T：気体の温度 (℃)

a：飽和水蒸気量 (g/m³)

AH：絶対湿度 (mg/L)

RH：相対湿度 (%)

3. 結露量の測定

結露量を定量的に評価するため、カテーテルマウントの重量測定を実施した。結露量は、カテーテルマウントの乾燥状態と湿潤状態の重量差と定義し、重量測定は乾燥したカテーテルマウントを装着して60分間稼働させた後、電子天秤BCE223I-1SJP (Sartorius, Germany) を用いて行った。なお、結露量測定前には、ウォームアップとして人工呼吸器は5時間以上、HWHは30分以上稼働させた。HWHのチャンバー出口温度/Yピース温度は、37°C/40°C、39°C/39°C、42°C/39°C（温度勾配+3°C、±0°C、-3°C）とし、測定は各温度設定で5回ずつ、それぞれ5つの異なる日に行つた。

4. 統計分析

RH、温度、AHのデータは平均値±標準偏差で示した。カテーテルマウント内の結露量とカテーテルマウント出口のRHの関係を評価するためにスピアマン相関分析を行った。統計検定は両側検定とし、p値<0.05を統計的に有意とみなした。分析にはSPSS Statistics version 27.0 (IBM, USA) を使用した。

III 結 果

1. カテーテルマウント内の結露量

結露量は、カテーテルマウントの乾燥状態と湿潤状態の重量差と定義し、60分間にカテーテルマウント内に蓄積した結露を定量化した。結果、結露量は37°C/40°Cの設定で0.7±0.1g/時、39°C/39°Cの設定で1.3±0.2g/時、42°C/39°Cの設定で2.8±0.2g/時であった（表1）。目視による観察では、37°C/40°Cの場合、カテーテルマウント全体にうっすらと結露が生じており、一部は凝集し水滴となっていることを確認した。そして、チャンバー温度上昇に伴って水滴が増加し、42°C/39°Cの場合ではカテーテルマウントの下部に水溜まりを形成していることを確認した。

2. RH

RHをYピース出口とカテーテルマウント出口で測定した。結果、HWHの温度が37°C/40°Cの場合、Yピース出口のRHは62.4±3.2%であり、理論値の85%に比して低い結果であった。そして、カテーテルマウント出口のRHは84.2±2.9%であり、理論値の100%には達しなかった。さらに、カテーテルマウント出口のRHは、HWHの温度が39°C/39°Cの場合も100%に達することではなく、HWHの温度が42°C/39°Cの場合も5回中4回が100%に達しなかった。一方で、カテーテルマウント内の結露量とカテーテルマウント出口のRHの間には強い相関関係が認められた（p<0.001、r=0.896）（表2、図2）。

3. 温 度

温度をYピース出口とカテーテルマウント出口で測定した。結果、HWHの温度が37°C/40°C、39°C/39°C、42°C/39°Cの場合、Yピース出口の温度はそれぞれ、39.2±0.5°C、38.5±0.4°C、38.6±0.8°Cであり、いずれもYピースの設定温度に近い値を示した（表3）。

4. AH

Yピース出口およびカテーテルマウント出口で測定さ

表1 カテーテルマウント内の結露量

HWH設定温度 (℃) (チャンバー出口/Yピース)	結露量 (g/時)
37 / 40	0.7±0.1
39 / 39	1.3±0.2
42 / 39	2.8±0.2

全設定でカテーテルマウント内に結露の存在が認められた。また、結露量はHWHチャンバー出口温度の上昇に伴って増加する傾向が認められた。

カテーテルマウント内の結露の存在は相対湿度100%を示す決定的な指標ではない。

表2 吸気ガスのRH

HWH設定温度 (℃) (チャンバー出口/Yピース)	Yピース出口 RH (%)	カテーテルマウント出口 RH (%)
37 / 40	62.4±3.2	84.2±2.9
39 / 39	76.1±2.5	89.5±1.9
42 / 39	86.7±2.3	94.4±3.3

HWHが37°C/40°Cの場合、Yピース出口とカテーテルマウント出口のRHは、理論値に比して低かった。

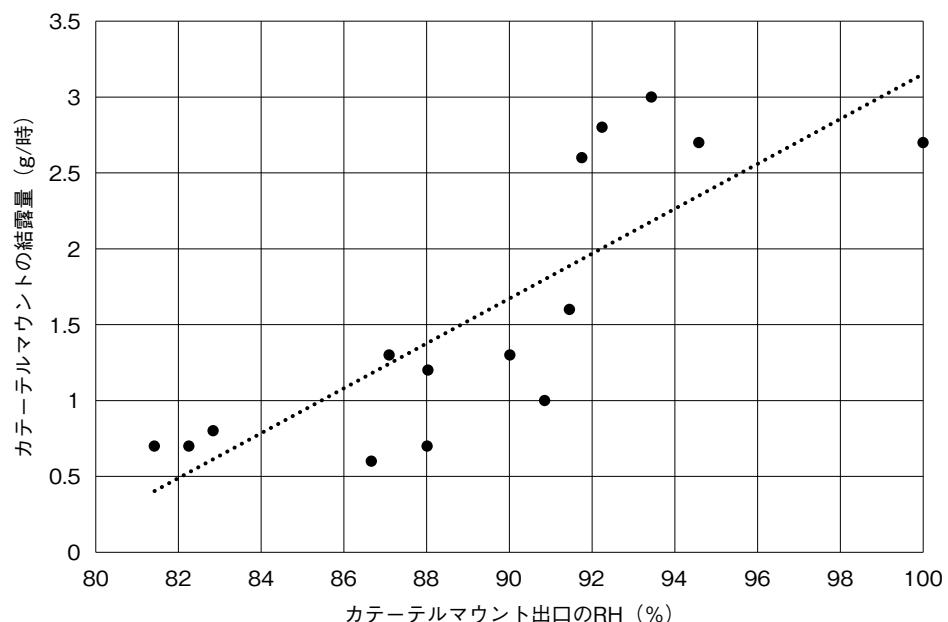


図2 カテーテルマウントの結露量とRHの相関関係

カテーテルマウントの結露量とカテーテルマウント出口のRHの間には強い相関関係が認められた ($p<0.001$ 、 $r=0.896$)。

表3 吸気ガスの温度

HWH設定温度 (℃) (チャンバー出口/Yピース)	Yピース出口温度 (℃)	カテーテルマウント出口温度 (℃)
37 / 40	39.2±0.5	33.4±0.9
39 / 39	38.5±0.4	34.8±0.5
42 / 39	38.6±0.8	36.0±0.6

Yピース出口の温度は、HWHのYピース設定温度に近い値であることを確認した。

表4 吸気ガスのAH

HWH設定温度 (℃) (チャンバー出口/Yピース)	Yピース出口 AH (mg/L)	カテーテルマウント出口 AH (mg/L)
37 / 40	30.7±1.2	30.7±0.9
39 / 39	36.1±0.9	35.0±1.2
42 / 39	41.3±1.2	39.3±1.6

HWHが37°C/40°Cの場合、Yピース出口とカテーテルマウント出口のAHは、理論値に比して低かった。

れたRHと温度の値を用いてAHを算出した。結果、HWHの温度が37°C/40°Cの場合、AHはYピース出口で 30.7 ± 1.2 mg/L、カテーテルマウント出口で 30.7 ± 0.9 mg/Lであ

り、理論値の44mg/Lに比して低い結果であった。また、HWHの温度設定が39°C/39°C、42°C/39°Cの場合もAHは44mg/Lに達しなかった(表4)。

カテーテルマウント内の結露の存在は相対湿度100%を示す決定的な指標ではない

IV 考察

本研究は、カテーテルマウント内における結露発生の有無とRHの関係を明らかにするために行われ、カテーテルマウント内の結露の存在はRH 100%を明確に示すものではないことが明らかになった。

臨床においては、RHの評価方法として結露の目視確認が用いられており、カテーテルマウント内に結露がうっすら確認できる場合、RHは100%に達していると判断されている。しかし、本ベンチテストでは、カテーテルマウント内に結露の存在を認めたにもかかわらず、大部分のテストでカテーテルマウント出口のRHは100%に達しなかった。

結露のメカニズムは、水蒸気を含む気体が冷却されることで飽和水蒸気量を超えた余分な水蒸気が凝縮して形成される。本ベンチテストのチャンバー出口37°C、Yピース40°Cの実験結果を例にとると、Yピース出口のAHは $30.7 \pm 1.2 \text{mg/L}$ であった。この条件下では、RH 100%を達成するためにガスは約30°Cまで冷却される必要があるが、カテーテルマウント出口の温度は $33.4 \pm 0.9^\circ\text{C}$ であった。このことは、凝縮を促進するのに十分な温度降下がなかったことを示しており、観察された結露はカテーテルマウントの内壁に接触した一部のガスが冷却されて凝縮したものと考えられ、吸気ガスのすべてがRH 100%に達したのではないことを示唆している。

Ricardら¹⁵⁾は、カテーテルマウント内の結露の目視検査結果とAHレベルに相関関係があることから、結露の目視検査がベッドサイドでの湿度モニタリングに有効であると報告している。同様に、本ベンチテストにおいてもカテーテルマウント内の結露量とカテーテルマウント出口のRHの間に強い相関関係があることが確認された。したがって、一定時間ごとに結露の量を測定することはRHモニタリングとして役立つ可能性はあるが、結露の存在そのものをRH 100%の決定的な指標として解釈することは誤りである。

本ベンチテストでは、チャンバー出口37°C、Yピース40°Cの設定とした場合Yピース出口においてRHは $62.4 \pm 3.2\%$ 、AHは $30.7 \pm 1.2 \text{mg/L}$ であり、理論値に比して低い結果であった。過去に行われた研究では、亀鳩ら¹⁶⁾が加温加湿器MR850と人工呼吸器Puritan Bennett 840を用いたRH測定実験を行っており、チャンバー出口37°C、Yピース40°Cの設定において、Yピース出口のRHは63%であったと報告している。また、Lelloucheら¹⁴⁾は、

加温加湿器 MR850を用いてAH測定実験を行っており、チャンバー出口37°C、Yピース40°Cの設定において、Yピース出口のAHは平均29mg/Lであったと報告している。本ベンチスタディのRHおよびAH測定結果は、これらの過去の研究と近い値であることから妥当性があると考えられる。

Yピース出口のRHおよびAHが理論値に達しなかった要因としては、人工呼吸器出力ガスの温度が考えられる。HWHは、人工呼吸器出力ガスの温度が高い場合、設定されたチャンバー温度を維持するためにヒータープレートの加温を抑制し、その結果、水蒸気量が減少するとの報告がある¹⁷⁾。本ベンチテストにおいて使用した人工呼吸器Puritan Bennett 840の出力ガス温度は約35°Cであり¹³⁾、目標の温度に近いため十分な加温が行われず、水蒸気量が減少していた可能性がある。人工呼吸器出力ガス温度は機種によって異なるため、すべての人工呼吸器で今回のような低RHになるとは限らないが、RHが100%に達しない可能性があることを理解しておくことは必要である。とくに、十分な一回換気量を確保できないようなケースでは、死腔を最小化するためにカテーテルマウントを取り外すことがあるが¹⁸⁾、このような場合はカテーテルマウントでのRHの上昇は期待できないため、非常に低いRHのガスが患者へ供給される恐れがあることを理解しておく必要がある。HWHは加湿デバイスの中で唯一RHを低下させるプロセスが入るためRHの評価は重要であり、RH 100%のガスを確実に供給するためには、結露の目視確認だけではなく、湿度センサーを用いたRHのモニタリングが必要であると考えられる。

なお、本研究は、ベンチテストに基づいてRHの評価を行った。RHが低い場合、気管チューブ閉塞のリスクが高まるためRHのモニタリングは重要だと考えられるが、臨床的に許容されるRHの範囲については明らかになっていない。したがって、今後は臨床的観点から適切なRHの範囲に関する検討が必要である。

V 結論

カテーテルマウント内の結露の存在はRH 100%を明確に示すものではないことが示唆された。結露量とRHの間には強い相関関係があるが、結露の存在そのものをRH 100%の指標とみなすのは誤りである。

本稿のすべての著者には規定されたCOIはない。

カテーテルマウント内の結露の存在は相対湿度100%を示す決定的な指標ではない

参考文献

- 1) Branson RD : Humidification for patients with artificial airways. *Respir Care.* 1999 ; 44 : 630-41.
- 2) Williams R, Rankin N, Smith T, et al : Relationship between the humidity and temperature of inspired gas and the function of the airway mucosa. *Critical Care Medicine.* 1996 ; 24 : 1920.
- 3) Villafane MC, Cinnella G, Lofaso F, et al : Gradual reduction of endotracheal tube diameter during mechanical ventilation via different humidification devices. *Anesthesiology.* 1996 ; 85 : 1341-9.
- 4) Bolder PM, Healy TEJ, Bolder AR, et al : The extra work of breathing through adult endotracheal tubes. *Anesthesia & Analgesia.* 1986 ; 65 : 853.
- 5) Kapadia EN : Factors associated with blocked tracheal tubes. *Intensive Care Med.* 2001 ; 27 : 1679-80.
- 6) Plotnikow GA, Accoce M, Navarro E, et al : Humidification and heating of inhaled gas in patients with artificial airway. A narrative review. *Rev Bras Ter Intensiva.* 2018 ; 30 : 86-97.
- 7) Al Ashry HS, Modrykamien AM : Humidification during mechanical ventilation in the adult patient. *BioMed Research International.* 2014 ; 2014 : e715434.
- 8) Gillies D, Todd DA, Foster JP, et al : Heat and moisture exchangers versus heated humidifiers for mechanically ventilated adults and children. *Cochrane Database Syst Rev.* 2017 ; 9 : CD004711.
- 9) 大藤 純 : 呼吸管理中の加温加湿デバイス : その原理と使用法. *人工呼吸.* 2020 ; 37 : 179-86.
- 10) Restrepo RD, Walsh BK : Humidification during invasive and noninvasive mechanical ventilation : 2012. *Respir Care.* 2012 ; 57 : 782-8.
- 11) 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.* 1992 ; 20 : 674-9.
- 12) 磨田 裕 : 加温加湿と人工鼻. *人工呼吸.* 1998 ; 15 : 83-90.
- 13) Chikata Y, Onodera M, Imanaka H, et al : Temperature of gas delivered from ventilators. *J Int Care.* 2013 ; 1 : 6.
- 14) Lellouche F, Rousseau E, Bouchard P-A : Evaluation of the humidification performances of new generation of heated wire humidifiers. *Respir Care.* 2024 ; 69 : 430-7.
- 15) Ricard J-D, Markowicz P, Djedaini K et al : Bedside evaluation of efficient airway humidification during mechanical ventilation of the critically ill. *Chest.* 1999 ; 115 : 1646-52.
- 16) 鶴鳴 弘, 福岡敏雄, 小野寺睦雄ほか : 人工呼吸器Bennett840を加温加湿器Fisher & Paykel MR-850と組み合わせて発生した加湿不足に関する検討. *人工呼吸.* 2004 ; 21 : 210-1.
- 17) Lellouche F, Taillé 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 : 1073-9.
- 18) Shimoda T, Sekino M, Higashijima U, et al : Removal of a catheter mount and heat-and-moisture exchanger improves hypcapnia in patients with acute respiratory distress syndrome : A retrospective observational study. *Medicine (Baltimore).* 2021 ; 100 : e27199.