

□原 著□

ベンチュリ効果を利用したネブライザにおける 結露の影響

田 中 千 年*¹ 阿 部 剛*¹ 三 浦 真 樹*¹
大 塚 将 秀*² 磨 田 裕*³

ABSTRACT

Influence of water accumulation on large-volume nebulizers
based on the Venturi effect

Chitose TANAKA*¹, Tsuyoshi ABE*¹, Masaki MIURA*¹,
Masahide OHTSUKA*² Yutaka USUDA*³

*¹Division of Clinical Engineering,

*²Department of Anesthesiology and

*³Intensive Care Unit, Yokohama City University Hospital

We evaluated the flow characteristics of large-volume nebulizers (LVN) based on the Venturi effect under the following two conditions. First, without addition of water or heating, the relationship between the delivered gas flow and the circuit pressure was investigated. To increase the circuit pressure, a positive end-expiratory pressure (PEEP) valve was connected to the distal end of the circuit. Second, similar investigation was performed with water in the LVN and heating as in the clinical setting. Three LVN models were evaluated: Puritan-Bennett (PB), Aquatherm III (AQ III), and Inspiron (INSP).

With an increase in the circuit pressure, the gas flow from the LVN decreased. At a circuit pressure of 2.5 cmH₂O, the gas supply from the AQ III was less than 50% of the theoretically estimated value. At a circuit pressure of 5 cmH₂O, the PB could supply 50~60% gas flow of the theoretically estimated value, but the AQ III and INSP could not supply gas flow.

With water in the LVN and heating, aerosol dispersion through the air intake port was observed after 60~170 minutes in both the AQ III and INSP, at which the circuit pressure was 1.3 cmH₂O.

The cause of LVN malfunction was an increase in the circuit pressure due to an increase in the circuit resistance resulting from water condensation and water retention in the circuit. With a larger jet orifice for the pressurized gas flow, the influence of the circuit pressure on the delivered gas flow and oxygen concentration was more marked.

In conclusion, water condensation in the respiratory circuit during use of a LVN based on the Venturi effect may reduce or interrupt gas delivery. It is important to monitor water condensation in the circuit, discard retained water using a water trap, and determine the oxygen concentration in the delivered gas.

*¹ 横浜市立大学医学部附属病院 ME 室,

*² 同麻酔科, *³ 同集中治療部

1. はじめに

ベンチュリ効果を利用したネブライザは、その簡便さから酸素療法、給湿療法に利用されている¹⁾²⁾。またTピース方式や、その呼気側に positive end-expiratory pressure (PEEP) 弁を取り付けることにより簡易 continuous positive airway pressure (CPAP) システム³⁾⁴⁾の構成部品としても使用されている。

しかし、ベンチュリ効果を応用した装置は圧力、負荷の影響を受ける⁴⁾。特に負荷が大きくなると、十分なガスを駆出できなくなることも考えられる⁵⁾。

そこでこれらのネブライザの特性を把握し、安全で適切な使用方法を知ることが必要と考え、臨床現場で使用されている3種類のネブライザについて以下の実験を行ったので報告する。

2. 実験方法

実験の構成図を図1に示す。実験の対象としたネブライザはピューリタンネブライザ (Puritan Bennett, USA)、アクアサーム III (Hudson RCI, USA)、インスピロンネブライザ (Unimed, USA) の3機種である。第一の実験ではネブライザに水を入れず、負荷抵抗をつけた場合の特性を測定した。120 cm、口径 22 mm の呼吸回路用蛇管 (Owens BriGam, USA) に負荷抵抗として 2.5、または 5.0 cmH₂O の PEEP 弁 (Vital Sings, USA) を組み合わせ、酸素流量を 3、5、8、10、12 l/min としたときの回路内圧・酸素濃度と総流量を測定した。第二の実験で

は、ネブライザに水を入れ、加温加湿の状態、回路の長さは 120 cm および 240 cm とし、負荷の違いを調べるためにも臨床使用と同様の状況にした。酸素流量を 8 l/min、酸素濃度設定を 35% とし、回路内圧、駆出されるガスの酸素濃度の経時的变化を測定、記録した。酸素中央配管圧力は 3.7 kg/cm²、酸素流量計はそれぞれの機器専用のものを用いた。酸素濃度は OX-30 (アトム、東京)、ガス流量は呼吸モニタ OMR-7130 (日本光電、東京)、回路内圧は RT-200 (Alied Health Care, USA)、ガス温度は SK-2000 MC (佐藤計量器製作所、東京) で測定した。1つの設定条件に対して総流量は 9 回測定し、結果は平均±標準偏差で示した。

3. 結果

1) 負荷抵抗による総流量の変化

蛇管長 120 cm、酸素濃度設定を 35% とし加温加湿を行わず負荷抵抗もない場合、酸素流量と総流量の関係を図2上に示す。この図2の理論値は、

$$\text{総流量} = 0.79 / (\text{設定酸素濃度} - 0.21) \times \text{設定酸素流量}$$

から算出した。

どの機種も理論値とほぼ平行な直線性が得られた。このうち、総流量が理論値とほぼ一致していたのはピューリタンネブライザであった。アクアサーム III では理論値の 80~85%、インスピロンネブライザでは 60~70% であった。

図2中では負荷抵抗として 2.5 cmH₂O の PEEP

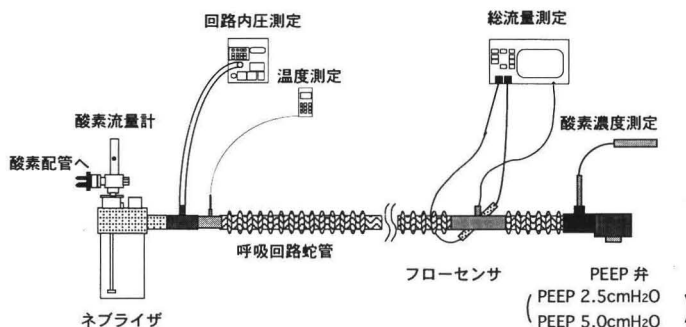


図1 実験に用いたネブライザ・回路の構成と測定装置

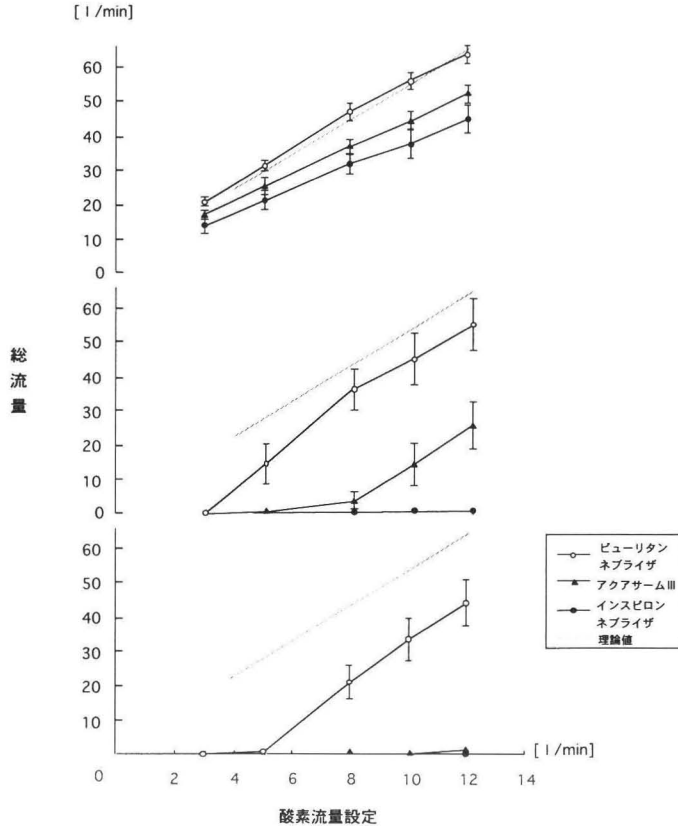


図2 蛇管長 120 cm, 酸素濃度設定 35%
 負荷抵抗 (PEEP 弁) なし (上), 負荷抵抗 (PEEP 弁) 2.5 cmH₂O (中), 負荷抵抗 (PEEP 弁) 5.0 cmH₂O (下) としたときの酸素流量と総流量の関係

弁を取り付けた場合である。ピューリタンネブライザでは酸素流量設定 5 l/min 以上、アクアサームIIIでは同 8 l/min 以上で理論値とほぼ平行な流量特性が得られた。すなわち、ピューリタンネブライザとアクアサームIIIのグラフは理論値より下方に平行移動した形になった。インスピロンネブライザでは酸素流量設定 10 l/min のとき、総流量は平均 0.26 l/min しか流れなかった。

負荷抵抗として 5.0 cmH₂O の PEEP 弁を取り付けた場合を図2下に示す。ピューリタンネブライザは 8 l/min 以上で理論値とほぼ平行な流量特性が得られた。しかし、ピューリタンネブライザのグラフは図2中よりさらに下方へ移動していた。アクアサームIII、インスピロンネブライザは酸素流量設定 10 l/min のとき、総流量はともに

ゼロであった。すなわち、酸素は大気取込口から大気中に流出した。

2) 加温加湿下における回路内圧、酸素濃度の経時的変化

加温加湿の条件下で、回路内の水滴による回路内圧と酸素濃度の変化を経時的に測定したグラフを図3、図4に示す。この設定では実験開始時、駆出されるガスの総流量は約 45 l/min、ガス温度は約 32°C であった。

蛇管長 120 cm の場合の回路内圧の変化を図3上、酸素濃度の変化を図4上に示す。図3上の回路内圧は 90分～150分あたりから上昇し、ピューリタンネブライザでは 240分後、3.7 cmH₂O になった。ただし、図3上の矢印 ① (90分後)、② (170分後) で示す時点で、インスピ

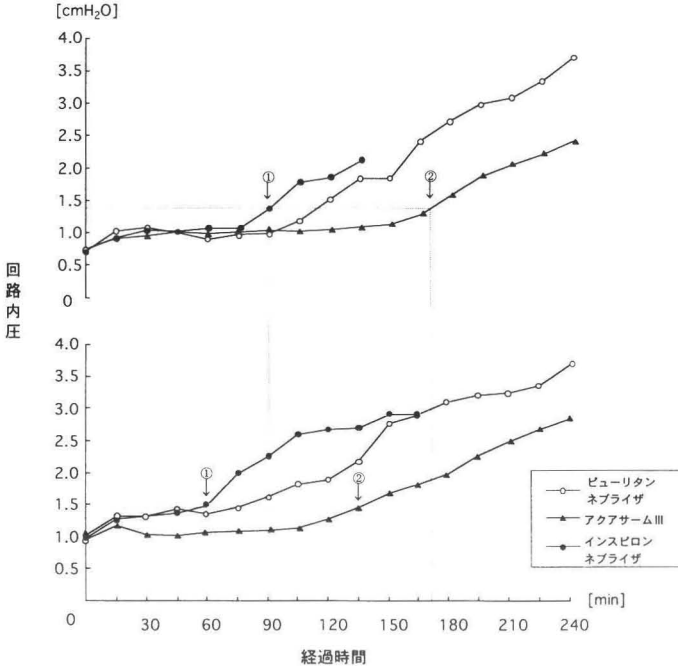


図3 上：蛇管長 120 cm，下：蛇管長 240 cm
酸素濃度設定 35%，酸素流量 8 l/min としたときの回路内圧の経時変化
矢印は大気取入口からのエアロゾルの噴出開始を示す。
ピューリタンネブライザでは回路内圧上昇するものエアロゾルの噴出を認めなかった。

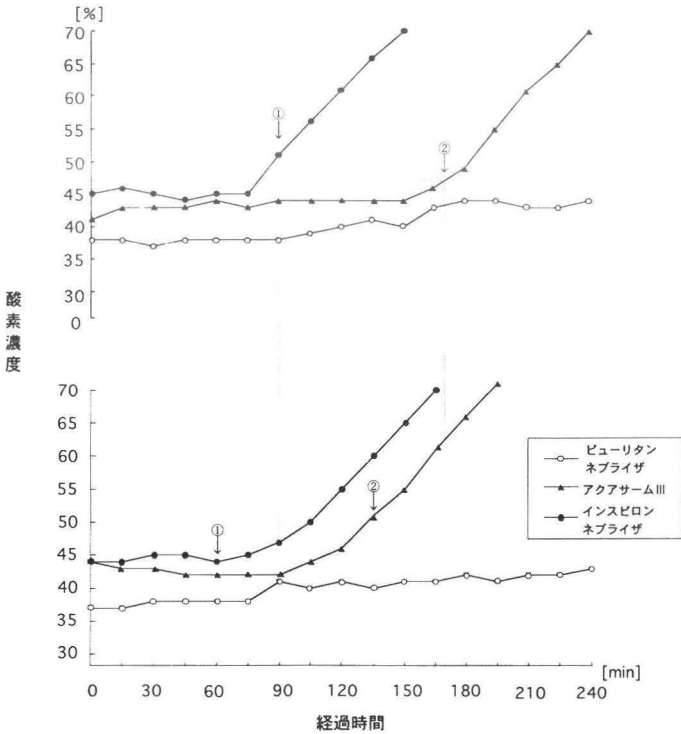


図4 上：蛇管長 120 cm，下：蛇管長 240 cm
酸素濃度設定 35%，酸素流量 8 l/min としたときの酸素濃度の経時変化
矢印は図3と同様

ロンネブライザおよびアクアサームIIIにおいては、それぞれ大気取入口からエアロゾルの噴出が始まった。このときどちらも回路内圧は1.3

cmH₂Oであった。図4上の酸素濃度の変化をみると、矢印の時点にほぼ一致して、インスピロンネブライザでは45%から51%へ、150分後には

70%，アクアサームIIIでは44%から49%へ、240分後には70%と急激な上昇を認めた。なお、ピューリタンネブライザではエアロゾルの噴出を認めず、回路内圧上昇に伴う酸素濃度変化も、90分後に38%，170分後に43%，240分後に44%と他の2機種よりも小さかった。

図3下，4下は回路が240 cmの場合である。回路内圧と酸素濃度の変化は，120 cmの場合と同様の傾向である。インスピロンネブライザとアクアサームIIIでは回路内圧が約1.3 cmH₂Oに達したときに，大気取込口からエアロゾルの噴出が始まった。この時間はそれぞれ60分と130分であり，120 cmのときよりも早かった。この条件でも，ピューリタンネブライザではエアロゾルの噴出は認めなかった。

4. 考察

ネブライザ装置の大気取込口からの霧の噴出および酸素濃度上昇が起こった原因として，水滴等が付着することにより，回路内圧が上昇してベンチュリ効果が減弱し，空気の取込みが十分行われなくなったためと推測された。このような現象が起こりうることは一部の成書には記載があるが⁵⁾，具体的な根拠やデータは示されていない。そのためわれわれは実験によってこの現象の解析を行った。図5のようにベンチュリ効果が応用されている装置において，P₁，V₁，A₁を酸素噴出部以前の圧力，流速，面積，P₂，V₂，A₂を酸素噴出部の圧力，流速，面積，ρを流体の密度とすると，ベルヌイの定理と連続の式から⁶⁾，

$$V_1^2 = \frac{2(P_2 - P_1)}{\rho} + V_2^2 \dots\dots\dots (1)$$

$$V_2 = \frac{A_1 V_1}{A_2} \dots\dots\dots (2)$$

が成り立つ。(1)(2)より

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2} V_1^2 \left(\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1 \right) \dots\dots\dots (3)$$

となり，A₂が小さければ小さいほど，P₁-P₂は大きくなる。すなわち，P₂は低下し，強い陰圧発生を期待できる。したがって回路内圧の上昇による影響を受けにくいことがわかる。このことは，エアロゾル産生にも関わっている。ピューリタンネブライザのみ回路内圧が上昇しているにも関わらず，大気取込口からエアロゾル噴出を認めなかったが，これはエアロゾル産生が水（液）の吸い上げによるので，P₂と関連する。すなわち，この機種では|P₂|が大きいと考えられる。

図5のネブライザ模式図において，各々の酸素流出部の開口部断面積，A₂を決定する内径の実測値はピューリタンネブライザ：0.50 mm，アクアサームIII：0.65 mm，インスピロンネブライザ：0.70 mmであった。これを断面積の比でみると1：1.69：1.96と大きな差があり，酸素流出部の開口面積のちがいが実験結果において各装置の相違となったものと思われる。

今回の実験で回路内圧の上昇により，総流量の減少と酸素濃度の上昇が確認された。図3，のように回路内圧が1.3 cmH₂Oを越えるような状況は臨床現場では容易に起こりうる。すなわち，今回の実験のような回路内結露のほかに，回路の屈

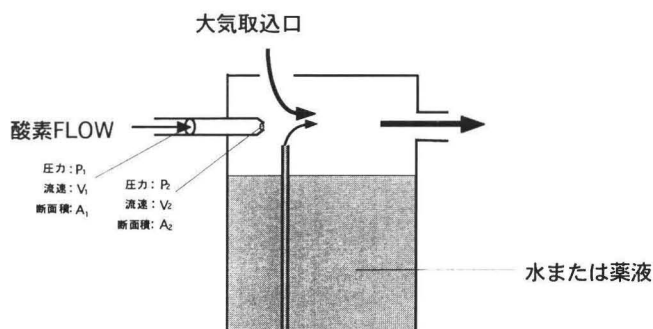


図5 ベンチュリ効果を応用したネブライザの動作 (本文参照)

曲, 狭窄などがある。また, このようなベンチュリー装置のCPAPへの応用については, CPAP用に設計されたもの⁴⁾では, 負荷抵抗による影響は少ないものの, その他のネブライザなどでは動作特性が負荷抵抗によって大きく影響される。とくにアクアサームIIIやインスピロンネブライザでは, 回路内圧が1.3~1.5 cmH₂Oをこえると, ガス駆出が極端に減少するか停止してしまう。したがってこのような現象の予防対策としては, 回路内圧の上昇の原因となる水滴を除去するためのウォータートラップの取付けや, 1時間に1回程度の回路内結露の確認, 結露水のこまめな排除をし, 回路を必要以上に長くしたり, 規定より細い回路等は使用せず, 回路が屈曲, 狭窄, 閉塞しないように注意し, またガスの出口が十分に確保されていること, つまりマスクに穴や, 顔との間に多少の隙間があること, Tピース等の開放端が確実に大気に開放していることが必要であると思われる。また, ネブライザからの駆出ガスの酸素濃度上昇も, 回路負荷抵抗上昇や駆出ガス流量減少のサインであるので, 酸素濃度の変化に注意を払う必要もある。このように, 酸素濃度は時間とともに大きく変化する可能性があるので, 動脈血酸素分圧やPaO₂/FI₂(P/F)などの評価には誤りをきたす危険性もある。すなわち, この種の装置使用中の吸気酸素濃度はその設定値ではなく, その都度実測値を確認する必要がある。

また, 強い陰圧を発生して駆動する機種の方が安定動作する, つまり酸素噴出部の開口面積が小さいほど酸素の流速が速くなり, 強い陰圧が生じ, 回路内圧上昇による影響が少ないことがわかった。このことはこのようなベンチュリー効果を利用した装置の設計段階で考慮されるべきことであり, 設計・製造者の配慮を期待したい。なお, 酸素流量計には流量調節バルブの位置の違いによって恒圧式と大気圧式とがあるが, これらのネブライザを使用する時の酸素流量計は高い圧力がかかり, 安定した流量が得られる恒圧式を使用することが望ましい。

5. 結 語

- 1) ベンチュリー方式のネブライザ装置では, 大気取込口からエアロゾルが噴出する場合がある。
- 2) このような装置では, 回路の負荷抵抗によって総流量, 酸素濃度が大きく影響されるため, 簡易CPAPシステムとしては不適である。
- 3) 回路内の結露による抵抗上昇だけでも急激な流量減少, 酸素濃度上昇, さらに大気取込口からのエアロゾルの噴出が認められる。
- 4) このような現象の予防には, 回路の負荷を上昇させない対策, すなわち結露水の除去などの工夫が必要である。

引用文献

- 1) Weber D: Humidity and aerosol therapy. Clinical Application of Respiratory Care. 3rd edition. Edited by Shapiro BA, Harrison RA, Kacmarek RM, Cane RD. Chicago, Year Book Medical Publishers, 1985, pp 90-109
- 2) Kacmarek RM: Humidity and Aerosol Therapy. Foundations of Respiratory Care, Edited by Pierson DJ, Kacmarek RM. New York, Churchill Livingstone, 1992, pp 793-824
- 3) Stock MC, Downs JB, Frolicher DA: Airway pressure release ventilation. Crit Care Med 15: 462-466, 1987
- 4) Hayakawa J, Usuda Y, Numata K: Evaluation of ejectors using the venturi effect for a continuous positive airway pressure system without compressed air. J Anesthesia 3: 166-171, 1989
- 5) Hess D, Kacmarek RM: Technical aspects of the patient-ventilator interface, Principles and Practice of Mechanical Ventilation. Edited by Tobin MJ. New York, McGraw-Hill, 1994, pp 1039-1065
- 6) 西川進栄, 平岡克己: 流体力学のやさしい導入, 工学の物理2流体力学. 東京, 培風館, 1995, pp 14-15