

原 著

ネブライザー付酸素吸入器（インスピロンネブライザー[®]， アクアパックネブライザー[®]）で高濃度酸素吸入はできない

宮本 顕二

要旨：経鼻的（あるいは経口的）中～高濃度酸素吸入方法としてネブライザー付酸素吸入器が広く使われている．この装置はベルヌーイの原理に基づくベンチュリ管を利用したもので，吸入酸素濃度を 24%～100% まで調整することが出来る．本研究では，1) ネブライザー付酸素吸入器を使った場合，配管からの酸素流量とマスクに流れる酸素と空気の混合ガス流量の関係式を示し，この酸素供給方法では，実際の吸入酸素濃度は成人患者では最大でも 60% 程度にすぎないことを理論的に提示し，2) その結果をネブライザー付酸素吸入器（インスピロンネブライザー[®]とアクアパックネブライザー[®]）を用い，人工顔を使って実証した．
キーワード：酸素吸入，インスピロンネブライザー[®]，アクアパックネブライザー[®]，高濃度酸素

Oxygen inhalation, Inspiron nebulizer[®], Aquapak nebulizer[®], High oxygen concentration

はじめに

経鼻的（あるいは経口的）中～高濃度酸素吸入方法としてネブライザー付酸素吸入器（インスピロンネブライザー[®]，アクアパックネブライザー[®]）が広く使われている．この吸入器はベルヌーイの原理に基づくベンチュリ管を利用したもので（酸素を高速で流すと，その周囲の圧は低下し空気が混入する），吸入酸素濃度を 24% から 100% まで設定することができる．

しかし，患者に高濃度酸素を吸入させようとしても，我が国の医療施設で使われている酸素流量計は最大でも 15 L/分^a であるため，この流量では患者が必要とする 1 回吸気量を満たすことは出来ない．結局，患者は酸素マスクの左右の穴から周囲の空気を吸入することで不足分を補い，設定値より低い濃度の酸素を吸入することになる．

そこで本研究では，1) ネブライザー付酸素吸入器を使った場合，配管からの酸素流量とマスクから流れ出る酸素と空気の混合ガス流量の関係式を示し，実際の吸入酸素濃度が最大でも 60% 程度に過ぎないことを提示し，2) その結果をネブライザー付酸素吸入器を用い，人工顔を使った実験モデルで証明した．あわせてネブライザー付酸素吸入器の精度も検討した．

研究 I：配管からの酸素流量（以後，酸素流量） とマスクから流れ出る酸素と空気の混合 ガスの流量の関係

酸素流量を X (L/分)，混合ガス流量を Y (L/分)，設定酸素濃度を P (%) とすると，マスクへ流れる酸素の総量は配管からの酸素と混入した空気中の酸素の和であるので，

$$Y \times \frac{P}{100} = X + \frac{20.9}{100} \times (Y - X)$$

ここで 20.9 は空気中の酸素濃度 (%) を示す．
この式を変形すると，

$$Y = \frac{100 - 20.9}{P - 20.9} \times X \dots\dots\dots 1 \text{ 式}$$

が得られる．

この式をもとに，酸素流量と混合ガス流量の関係を，設定酸素濃度毎に示す (Fig. 1)．この図からわかるように，設定酸素濃度が高くなるにしたがって混入する空気が少なくなり，混合ガス流量も少なくなる．なお，この図で 30 L/分の点線は，1 回吸気量が 500 ml，吸気時間 1 秒のときの平均吸気速度を示す．

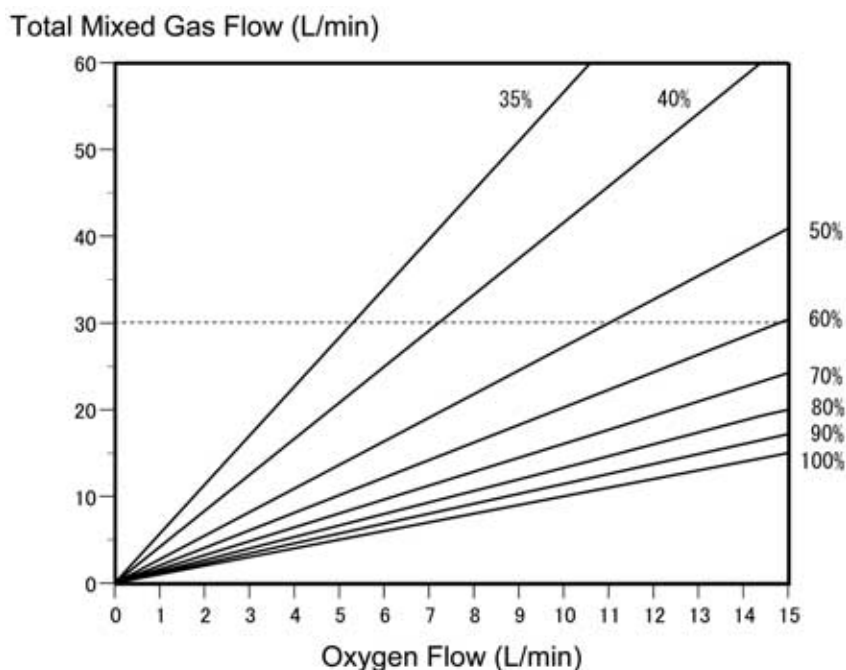


Fig. 1 Relationship between oxygen flow and total mixed gas flow
Horizontal dotted line indicates total flow of 30 L/min (500 ml/s) providing sufficient inhaled gas flow to a patient inhaling 500 ml of air in 1 second.

Table 1 Expected and measured oxygen concentrations using three Inspiron Nebulizers®

Oxygen Flow (L/min)	40%*			50%*			70%*			100%*		
	A (%)	B (%)	C (%)	A (%)	B (%)	C (%)	A (%)	B (%)	C (%)	A (%)	B (%)	C (%)
6	41	39	38	52	50	49	84	80	82	98	98	100
8	42	40	39	52	51	51	84	82	83	98	99	100
10	42	40	39	53	52	52	84	82	82	98	99	100
12	43	41	40	54	53	53	85	83	83	98	99	100
14	42	41	41	52	53	53	85	82	83	98	99	100

* : Expected oxygen concentrations
A, B and C indicate each instrument number.

研究Ⅱ：ネブライザー付酸素吸入器を用いた場合の吸入酸素濃度 人工顔を用いた検討

1. ネブライザー付酸素吸入器の精度の検討

インスピロンネブライザー®とアクアパックネブライザー®をそれぞれ3個使い、設定酸素濃度どおりの混合ガスが作られているかどうかを、酸素流量毎に検証した。

1) 方法

各ネブライザーから出てきた酸素と空気の混合ガスを500 mlのビニール袋にいれた。ビニール袋には混合ガスをオーバーフローさせるために下端に直径1 cmの穴を計4個開けた。酸素濃度計（高速ガスアナライザー、

チェスト、東京）のサンプリングチューブをこのビニール袋にいれ、測定値が安定したのを確認してから数値を読み取った。なお、ネブライザーには水を入れなかった。設定濃度はインスピロンネブライザー®が40%、50%、70%、100%、アクアパックネブライザー®が40%、60%、80%、98%とした。酸素流量は6 L～14 L/分とした。ただし、アクアパックネブライザー®はネブライザー自体の抵抗のため、最大でも11.5 L/分であった。

酸素濃度計の校正は、設定酸素濃度が40%から70%の時は室内空気（酸素濃度20.9%）と校正ガス（酸素濃度63.5%）で、70%以上の時は二つの校正ガス（酸素濃度63.5%と99.9%）でおこなった。

Table 2 Expected and measured oxygen concentration using three Aquapak Nebulizers®

Oxygen Flow (L/min)	40%*			60%*			80%*			98%*		
	A (%)	B (%)	C (%)	A (%)	B (%)	C (%)	A (%)	B (%)	C (%)	A (%)	B (%)	C (%)
6	38	38	37	54	53	54	80	73	73	95	97	96
8	38	39	38	55	55	55	81	76	76	94	97	97
10	38	40	38	56	56	55	80	77	76	94	97	97
11.5	39	41	39	57	57	56	82	79	78	94	98	97

* : Expected oxygen concentrations

A, B and C indicate each instrument number.

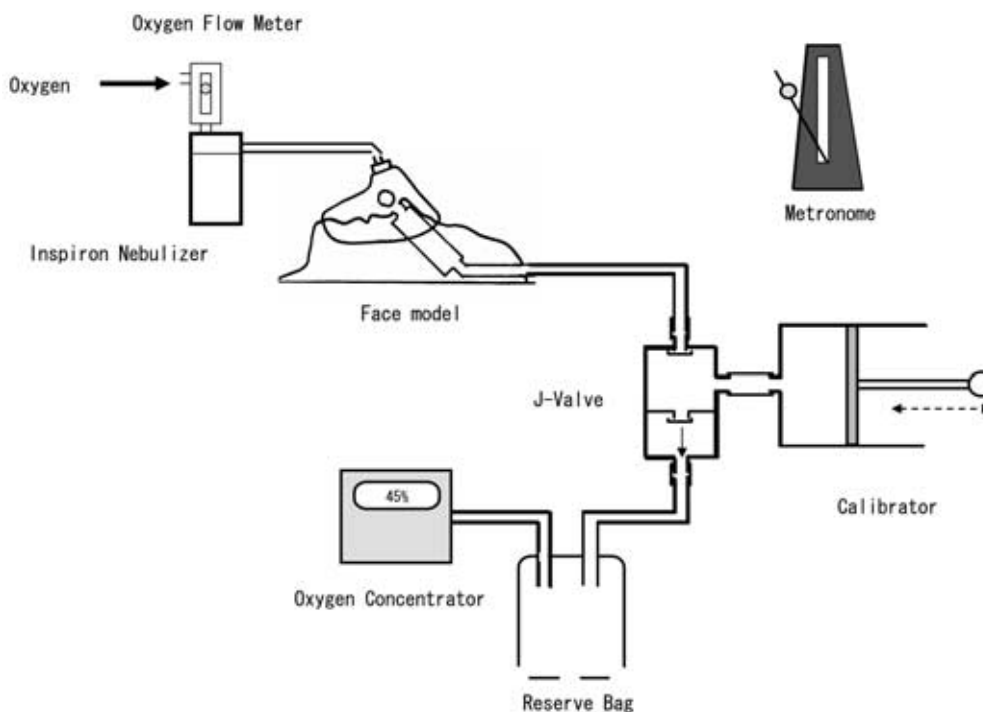


Fig. 2 Experimental model

2) 結果

(1) インスピロンネブライザー®

設定酸素濃度が40%と50%のときは酸素流量にかかわらずほぼ安定した濃度の混合ガスを供給していた。しかし、設定酸素濃度70%のとき、実測酸素濃度は3個とも80%を超えており、かつ、製品毎に異なった (Table 1)。

(2) アクアパックネブライザー®

設定酸素濃度が40%のときは酸素流量にかかわらずほぼ安定した濃度の混合ガスを供給していた。しかし、設定酸素濃度60%、80%、98%では実測酸素濃度は製品毎に異なった (Table 2)。

2. 人工顔を用いた吸入酸素濃度の測定

1) 方法

人工顔は粘土で作成した (Fig. 2)。鼻腔内には50 ml

の死腔を作成し、そこからつながったビニールチューブはJバルブを介して校正用シリンダーに接続した。手動的にシリンダーを動かし、人工の鼻腔を介して酸素ガスを吸入した。種々の濃度の酸素ガスは研究II-1で用いたインスピロンネブライザー®とアクアパックネブライザー®のうち1個を使用した (Table 1と2でそれぞれ製品番号A)。シリンダーから出た酸素ガスはJバルブを介して測定用ビニール袋に流し、そこに酸素濃度計のサンプリングチューブを入れて酸素濃度を測定した。

1回吸気量は400 mlと800 mlとし、いずれも吸気時間は1秒、呼気時間は2秒とした。つまり、平均吸気速度はそれぞれ24 L/分と48 L/分に相当する。吸気と呼気時間の制御はメトロノームを利用し、手動的におこなった。

酸素流量は6 L/分から14 L/分 (アクアパックネブライ

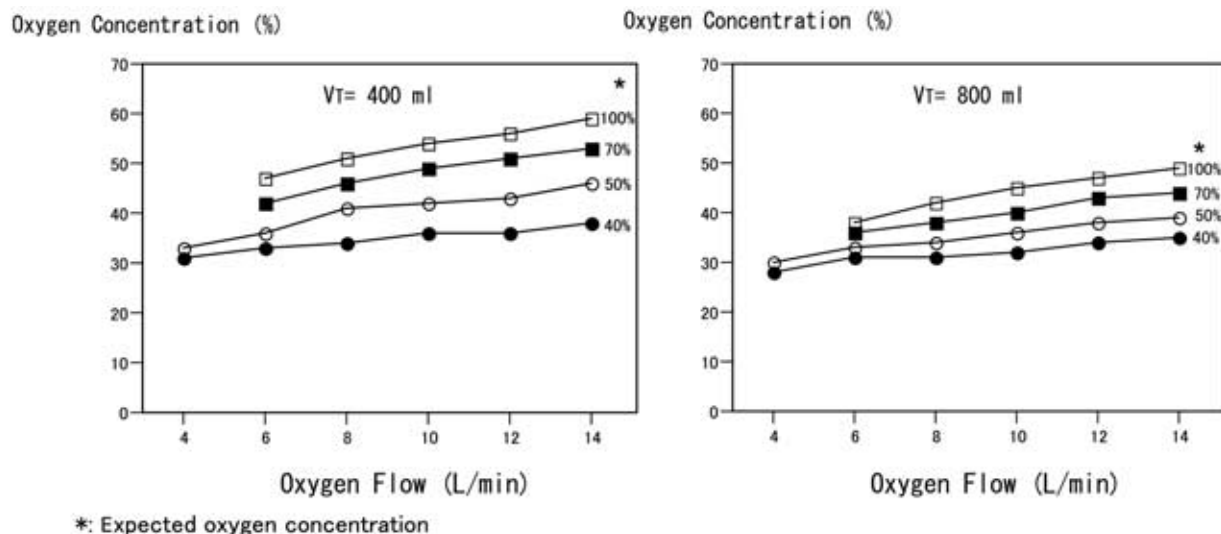


Fig. 3 Measured oxygen concentrations at inspired volumes of 400 ml and 800 ml, using an Inspiron nebulizer®.

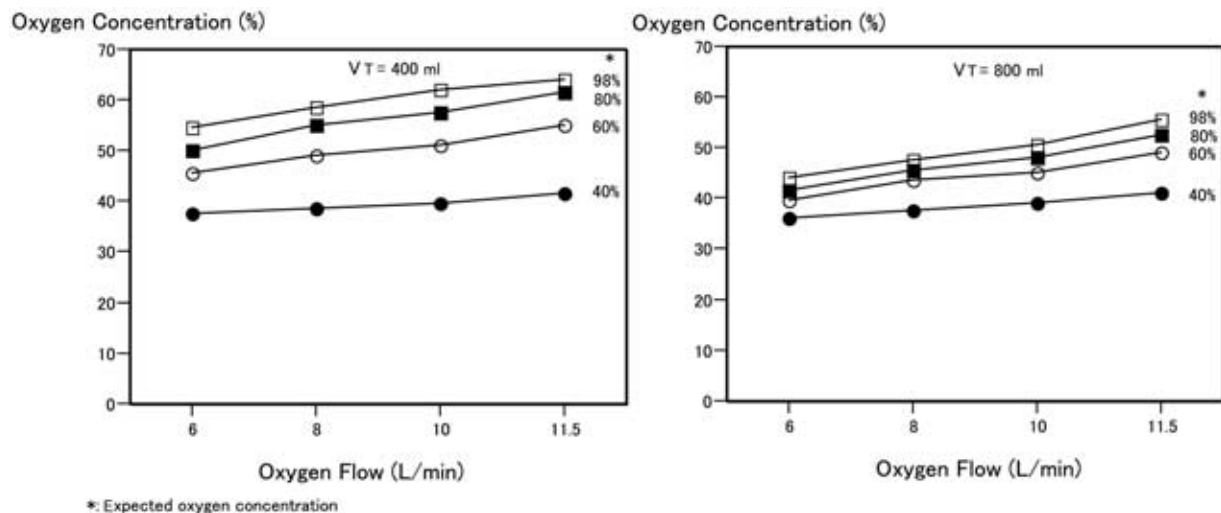


Fig. 4 Measured oxygen concentrations at inspired volumes of 400 ml and 800 ml, using an Aquapak nebulizer®.

イザー®では 11.5 L/分)までで、設定酸素濃度はインスピロンネブライザー®では 40%、50%、70%、100%、アクアパックネブライザー®では 40%、60%、80%、98%とした。

2) 結果

(1) インスピロンネブライザー®

1 回吸気量が 400 ml (平均吸気速度 24 L/分) や 800 ml (48 L/分) では、いずれの設定酸素濃度でも実測吸入酸素濃度は設定値より低かった。また、設定酸素濃度が高くなるほど設定値と吸入酸素濃度の乖離が大きくなった (Fig. 3)。たとえば、最大吸入酸素濃度は 1 回吸気量が 400 ml のとき、100% 酸素を 14 L/分流して 59%、

1 回吸気量が 800 ml では 49% にすぎなかった。

設定酸素濃度と実測酸素濃度の乖離は 1 回吸気量が 800 ml のときのほうが 400 ml より大きかった。

(2) アクアパックネブライザー®

設定酸素濃度と実測吸入酸素濃度の関係はインスピロンネブライザー®の時と同じであった (Fig. 4)。たとえば、1 回吸気量が 400 ml のとき、設定値が 98% の酸素を 11.5 L/分流して実測吸入酸素濃度は 64%、1 回吸気量が 800 ml のときは 56% に過ぎなかった。

考 案

本研究からネブライザー付酸素吸入器では、一般病棟

において通常の酸素流量計を使う限り、設定酸素濃度をいくら高くしても実際の吸入酸素濃度は最大でもほぼ60%であることを理論と実験で明らかにした。また、ネブライザー付酸素吸入器から流れ出る酸素と空気の混合ガスの酸素濃度も設定どおりではなく、製品間でばらつきが多いことも明らかにした。

・成人患者が必要とする必要最小限の混合ガス流量について

酸素吸入を必要とする患者の最小限の混合ガス流量は過去の研究報告から推測することができる。高度の低酸素血症を伴うCOPD患者の1回吸気量は 330 ± 140 ml (平均 \pm SD, 平均吸気時間=0.94秒, 平均 $\text{PaO}_2 = 47$ mmHg¹), あるいは 341 ± 26 ml (平均吸気時間=0.73秒, 平均 $\text{PaO}_2 = 38$ mmHg²) であるので, 平均吸気速度は約 $350 \text{ ml} \pm 150 \text{ ml/秒}$ と推定される。酸素投与の面から安全を見越して平均+1SDを採用すると, 患者の平均吸気速度は 500 ml/秒 (30 L/分に相当) になる。拘束性肺疾患の場合, 1回吸気量は $385 \text{ ml} \pm 105 \text{ ml}$ (平均吸気時間=1.25秒) であるので, 平均+1SDを1秒あたりに換算すると 413 ml/秒 (約25 L/分に相当) になる。

以上の計算結果から, 患者が必要とする酸素を充分供給するための最小限の混合ガス流量は約30 L/分であろう。しかし, 肺血栓塞栓症やARDSなどで過換気状態になっている患者はもっと多くの混合ガス流量が必要である。

・ベンチュリ管を利用した酸素吸入装置を使った場合の予想される最大吸入酸素濃度

インスピロンネブライザー[®]の場合, 混合ガス流量が必要最小限の30 L/分以上になる酸素濃度は, 酸素流量を最大15 L/分流しても60%である (Fig. 1より)。アクアパックネブライザー[®]の場合は加湿器の抵抗の関係で最大酸素流量は11.5 L/分であるので, 混合ガス流量が30 L/分以上にできる酸素濃度は51%にすぎない。この数値以上に酸素濃度を設定すると混合ガス流量は30 L/分以下になり, 患者は不足分をマスク周囲の空気を吸入してしまう。人工顔を用いた実験では1回吸気量を400 ml (24 L/分) と800 ml (48 L/分) で行ったので若干測定結果が異なるが, これを支持する結果であった。

ネブライザー付酸素吸入器を使って高濃度酸素を吸入させたと思っても患者の PaO_2 が改善せず, 同じ濃度の酸素テントに患者を移動したとたん, 患者の PaO_2 が著明に改善することをしばしば経験する。その理由は上記の説明から明らかである。また, ネブライザー付酸素吸入器で吸入酸素濃度を60%以上に設定した場合, 肺の酸素傷害を危惧する医師や看護師が多いが, その可能性はすくないことも明らかである。ただし, 1回吸気量が少ない患者, 特に, 乳幼児については酸素傷害を起こす

危険性があるのは当然である。

・酸素流量について

現在, 病院施設の酸素ガス配管は日本工業規格 (JIS) にて配管圧力 $4.0 \pm 0.5 \text{ kg/cm}^2$, 流量60 L/分以上と定められている。したがって, 酸素流量が最低でも60 L/分の酸素流量計を作ることが可能である。しかし, 現行の健康保険では10 L/分までしか請求できないこともあり, 酸素流量計は最大でも15 L/分, 主流は10 L/分である。しかし, 一部の流量計はフラッシュ機能として30 L/分 (あるいは60 L/分) 流せるものがある。それでは, 仮に, フラッシュ機能をつかって酸素を60 L/分流すと患者に100%の高濃度酸素を吸入させることができるのであろうか。ネブライザー付酸素吸入器を使う限り不可能である。何故ならば, アクアパックネブライザー[®]は, 設定酸素濃度に関係なく, ネブライザー自体の抵抗と配管圧力のため, 酸素は最大でも約12 L/分^bしか流せない。また, インスピロンネブライザー[®]についても, 今回, 最大30 L/分のフロート式酸素流量計を入手し, インスピロンネブライザー[®]へ流れる酸素流量を測定したが, いくら流量を上げて最大で18 L/分までしか流せなかった (この場合, 1式より吸入酸素濃度は最大68%になる)。また, ダイアル式酸素流量計の一部にフラッシュ時に30 L/分流せるものがあり試みたが, インスピロンネブライザー[®]に接続し, 最大30 L/分を流しても, 実際は8 L/分にすぎなかった^c。このように, 仮に15 L/分以上の流量計を用いても, ネブライザーに記載されているような高濃度酸素は吸入できない。

・ネブライザー機能付酸素吸入器の精度について

今回, インスピロンネブライザー[®]とアクアパックネブライザー[®]をそれぞれ3個用いて設定酸素濃度どおりの混合ガスが作られているかどうかを検討した。インスピロンネブライザー[®]は設定値より高い濃度を, アクアパックネブライザー[®]では設定濃度より低い酸素濃度の混合ガスを供給していた。なかでもインスピロンネブライザー[®]は設定酸素濃度70%でも実際は80%以上の酸素が供給されていた。これはいずれの機種も濃度設定の目盛りがアナログ式で正確に目盛りをあわせることが出来ず, また, わずかな目盛りのずれで空気の取り込み口の大きさが変わる構造になっているためである。今回使用した酸素吸入器はすべて使い捨て製品である。そのため安価な作りになっている。そのことが, 精度が悪いだけでなく, 製品間のばらつきが大きかった原因であろう。

^b 施設によっては配管の酸素圧が異なるため, 最大流量は若干異なることが予想される。

^c ダイアル式流量計は配管圧力を低下させて流量を調節する構造になっているためである。

本研究で使用した吸入器は使い捨て製品であるにもかかわらず消毒して繰り返し使用している施設がある。そのような使い方をしていると精度は一段と劣ることになる。

・本研究の問題点

今回使用した人工顔の測定系では吸気と呼気が一方向へ流れる構造になっている。人の場合、解剖学的死腔にたまった呼気ガスを再吸入する。そのため、今回人工顔をつかった測定結果は、実際の人の場合より吸入酸素濃度は高い値を示しているはずである。そのため、今回の測定結果をもって人に当てはめるのは無理がある。

また、今回は吸入時間と呼気時間はメトロノームを使い手動的に調整した。そのため、若干正確さに欠けた可能性がある。研究IIの人工顔のモデル実験ではアクアパックネブライザー[®]を使用した場合、1回吸気量が1秒で400 mlの場合は24 L/分に相当するので、Fig. 1に挿入すると予測最大酸素濃度は酸素流量が11.5 L/分で59%になるはずである。しかし、測定結果は64%であった。手動的に校正用シリンジで吸入したため吸気時間が1秒よりすこし長くなったためと考える。このように、人工顔の測定系は人とは異なるが、研究Iの理論的計算結果を裏付けるものとしては問題ないと思う。

なお、人工顔の実験にはインスピロンネブライザー[®]とアクアパックネブライザー[®]それぞれ1個を使用し、3個すべてについて測定しなかった。それは、本研究の主旨には各1個で十分と判断したためである。

以上、ベンチュリ管を利用した装置で酸素吸入を行う場合、つねに酸素流量と混合ガス流量の関係を念頭におこなうべきである。可能であれば簡易換気量計を用いて

患者の1回吸気量を測定する。平均吸気時間はほぼ1秒として、患者が必要とする最低限の混合ガス流量を求め、その値をFig. 1に当てはめることで投与可能な最大酸素濃度を予測することができる。その濃度以上の酸素を吸入させたいときはリザーバー付酸素マスクや酸素テントを考慮すべきである。

現在普及しているネブライザー付酸素吸入器には設定酸素濃度が100%(あるいは98%)まで表示されている。そのことは、その設定濃度どおりの酸素を患者が吸入していると医療者に誤解させてしまう危険性がある。繰り返すが、吸入酸素濃度70%、80%、98%など設定どおりの濃度を吸入させることができるのは1回吸気量が少ない患者、特に乳幼児などの場合のみである。

謝辞：本研究にあたって、人工顔を製作し、かつ、実験を手伝ってくれた本学3年、前川弘恒君と岡田晃君、また、測定に協力いただいた小池メディカル技術部R&Dグループ高野英一氏に感謝いたします。

引用論文

- 1) Loveridge B, West P, Kryger MH, et al: Alteration in breathing pattern with progression of chronic obstructive pulmonary disease. Am Rev Respir Dis 1986; 134: 930-934.
- 2) Aubier M, Murciano D, Milic-Emili J, et al: Effects of the administration of O₂ on ventilation and blood gases in patients with chronic obstructive pulmonary disease during acute respiratory failure. Am J Respir Dis 1980; 122: 747-754.

Abstract

An oxygen delivery device with a jet nebulizer function (Inspiron Nebulizer[®] or Aquapak Nebulizer[®]) can not provide high concentrations of oxygen to adult patients with respiratory failure

Kenji Miyamoto, M.D.

Division of Physical Therapy, Department of Health Science, School of Medicine, Hokkaido University

Oxygen delivery devices with a jet nebulizer function are widely used in Japan. The device, utilizing the Bernoulli principle, can provide oxygen concentrations of 24-100%. The present study demonstrated that maximal inspired oxygen concentration provided by this oxygen delivery device is theoretically 60%, as total gas flow is insufficient to meet all inspiratory requirements to provide oxygen concentrations of greater than 60%. This theoretical calculation was verified using a face model to which oxygen was delivered using an Inspiron Nebulizer or Aquapak Nebulizer.