C209

スプリッタ付きネーザルCPAP素子の特性

細井 健司[○](埼玉大学), 川橋 正昭 (埼玉大学)

松本 崇 (埼玉大学)、平原 裕行 (埼玉大学)

Performance Characteristics of a Nasal CPAP Device

Kenji HOSOI, Masaaki KAWAHASHI, Sou MATSUMOTO and Hiroyuki HIRAHARA

ABSTRACT

Artificial respiration techniques for patients with respiratory disorder are important as a basic life support treatments for the patients. The nasal CPAP (Continuous Positive Airway Pressure) is a typical clinical treatment for infants keeping self respiration. Some devices for the nasal CPAP have been used in clinical procedure. However, in order to reduce the load for patients in the treatments, the downsizing and improvement of fitting of the devices are required. A new type device of nasal CPAP has been developed by the authors, but its performance in MAP (Mean Airway Pressure) variation did not meet the condition for clinical use. In this report, the performance of a nasal CPAP device improved has been investigated and it has been clarified that the performance was meet to clinical use.

Keywords: Nasal CPAP, Artificial Respiration, PIV, Visualization

1. 緒 論

呼吸機能不全の新生児に対する呼吸管理医療では、さまざまな人口呼吸法が適用されている。自呼吸が維持されている患者に対しては、肺末端組織の虚脱防止や肺の機能的残気量を増加させて低酸素症を改善するために、気道内を陽圧に維持する方法がとられる。このとき、新生児が主として鼻呼吸を行うことから、鼻孔装着型の素子を用いた気道内陽圧維持法として、ネーザルCPAP(Continuous Positive Airway Pressure)が適用される。このネーザルCPAPの作動条件としては、患者の吸気時および呼気時に気道内平均圧であるMAP(Mean Airway Pressure)の変動が、なるべく小さくなるようにすることが求められる。このような基本的要件を満たすいくつかのネーザルCPAPのための素子が、すでに臨床応用されている。しかし、医療現場では、これらの素子を装着する際の、新生児への過大負荷が問題となり、小型化と装着性の改善が求められている。

著者らは、ネーザルCPAP素子の小型化と装着性の改善と同時に、MAP変動を臨床応用に可能な範囲に抑えることを目的として、供給気流が鼻孔に対向しない横型

ネーザルCPAP素子の開発を行ってきた。しかし、MAP変動値において、当初の目標には至らなかった。そこで、特に呼気時の圧力上昇の低減を目指して、給気ノズル出口に噴流分配用の楔形スプリッタを形成するとともに、スプリッタ背後と仕切り板の間に隙間を設けた改良型のネーザルCPAP素子の2次元モデルを作成し、その特性を調べた。その結果、MAP変動値が、現用のCPAP素子とほぼ同様の値となることが明らかにされ、臨床応用可能な素子開発への知見が得られた。

2. 実験装置

本実験で用いられたネーザルCPAP素子モデルの概略図がFig.1に示されている。5mm×1mmのスリット状断面を有する給気ノズル、広がり角25度のディフューザ部、MAP発生のためのよどみ部、大気放出部からなる。また、ノズル出口後流に幅5mm、長さ4mm、先端角度15度の楔状スプリッタが形成されている。スプリッタ先端位置は、ノズル出口から下流側に1mm、噴流中心軸に対して上方に0.5mmシフトされている。スプリッタ背後の仕切板との隙間Lは、0~5mmの範囲で調整される。

Fig. 1 Schematic view of nasal-CPAP device.

CPAP 素子は、アクリル製であり、流路前面はフロートガラスを用いた観測窓である。本実験では出口部を大気開放としている。

Fig.2 に実験装置を示す。供給空気は、面積流量計、チャンパーを経て、CPAP 素子モデルに流入する。呼吸は、減速歯車付モータにより駆動されるクランク機構に接続されたシリンジによる機械式人工肺により模擬される。なお、呼吸の各位相における可視化および PIV 計測は、モータに取り付けられたタイミング板（1 周期 8 分割）と光学系との組み合わせにより発生させた同期信号により制御される。素子内よどみ部の圧力は鼻孔装着ブロンゴの中央部で、圧力測定孔（ $\phi 0.2$ ）に接続された増幅器付微差圧計で測定され、ノズル入口圧力は、超小型デジタル圧力センサで測定される。それぞれの圧力変動波形とタイミング信号は、データロガーにより記録される。定性的可視化用光源にはアルゴンイオンレーザ（出力 4W）を、PIV 計測にはダブルパルス YAG を用いて、高速度デジタルハイスピードカメラ（XS-5）により時系

Fig. 2 Experimental setup.

列画像を記録した。トレーサには、線香の煙が用いられた。実験条件としては、供給流量を 6~9 l/min、呼吸回数と換気量を、それぞれ 50 回/min と 10 ml/回とした。

3. 実験結果

3.1 圧力測定

最初に、定常状態におけるスプリッタと仕切り板との隙間によるよどみ部圧力(MAP に相当)の変化を、供給流量を変化させて調べた。このとき供給流量は、6~9 l/min とした。その結果を Fig.3 に示す。

Fig. 3 Change of MAP with distance between splitter and separator for different flow rates.

図より各流量での MAP は、スプリッタと仕切板との間隔を増すとよどみ部から出口部への流出面積が増加し、単調に減少している。供給流量が増加すると、MAP は増加する。新生児に対するネーザル CPAP 条件は、通常鼻腔内圧が 300~500Pa で行われることから、本実験で用いた素子を用いる場合、図よりスプリッタと仕切板との隙間は、1~3mm 程度とする必要がある。

Fig. 4 Changes of MAP and inlet pressure in respiration mode.

Fig. 5 Phase relation between pressure change in device and plunger displacement.

そこで供給流量が 7 l/min の場合、スプリッタと仕切板間の距離を調整して、CPAP 内の MAP を約 500 Pa に維持し、人工肺を作動させたときのノズル入口圧力変動波形と MAP 波形、および同期信号波形を Fig. 4 に示す。図中スタート点は、人工肺のプランジヤを下死点とする。MAP を 500 Pa にした維持した場合、ノズル入口圧力は約 1 KPa である。ノズル入口圧力は、CPAP 素子内圧力とほぼ同位相で変化し、圧力振幅もほぼ同じ 120 Pa であることがわかる。この CPAP 変動圧力は、現在実用化されている CPAP 素子による変動圧力と同じオーダーである。

次に呼吸 1 周期間の CPAP 素子内変動圧力 ΔP とプランジヤ変位、同期信号の関係を Fig. 5 に示す。プランジヤ下死点①から、⑤の上死点までが呼気周期である。上死点⑤から吸気が始まり、下死点①で終了する。素子内の圧力は、鼻孔プロング通過流量変動に応じて変動することから、プランジヤ変位に対して $\pi/2$ だけ位相が進んでいることが予想される。しかし、図より、その位相差は約 60° であることが分かる。このことは、プランジヤによる排除体積速度が最大になる位相に対して、素子内の圧力が最大となる位相が約 30° 遅れることを示している。さらに、供給流量と幾何学的条件を一定にして、模擬呼吸動作状態にすると、素子内の平均圧力が、定常状態で得られる MAP 値に対して約 16 Pa (約 3% 増) 上昇することが分かる。これらの動作特性は、呼吸時の素子内流れ状態とどのような関係になっているかを定量的に明らかにすることが、呼吸時の MAP 変動振幅を減少させるための重要な要素となる。

Fig. 6 は、供給流量一定としたときの、呼吸動作時のスプリッタと仕切板間距離 L の変化に対する CPAP 素子内圧力変動 ΔP の関係を示す。このとき呼吸動作時の L の変化に対する MAP 値は、Fig. 3 に示した定常時に比較して僅かに増加する。 ΔP は、 L が約 0.75 mm 以下では大きな値を示し、 $0.75 \sim 2 \text{ mm}$ ではほぼ一定となり、 2 mm 以上では減少している。この傾向は、流量が増えて

Fig. 6 ΔP level change with distance between splitter and edge.

も同様であるが、流量増加に伴って ΔP は単調に増加する。

前述のように呼吸作動時には MAP と ΔP は L によって変化するが、ネーザル CPAP 素子の特性として最も重要な点は、吸気および呼気時に、如何に MAP の変動を少なくできるかが重要である。そこで、本素子を用いた場合に、必要な MAP を発生させながら、呼吸動作時にどの程度の MAP 変動 (ΔP) に押さえられるかについて明らかにするため、MAP に対する ΔP の分布図を求め、Fig. 7 に示す。この図において、各流量における MAP と ΔP の関係は L によって異なり、MAP の最大値は L が 0.5 mm のときに生じ、 L の増加とともに MAP と ΔP が減少している。Fig. 7 より、MAP に対する ΔP の分布は、流量によらずほぼ同一線上に分布している。その延長上には、仕切り板が無いときの値がプロットされており、仕切り板によって MAP が生じていることがわかる。また、MAP が 500 Pa のとき ΔP が 120 Pa 程度となっており、この結果は現用の CPAP 素子における値とほぼ同

Fig. 7 MAP-level and pressure fluctuation ΔP .

じオーダーとなっている。

3. 2 可視化

Fig. 8 Visualization of flow nasal-CPAP device.

上述の結果を、素子内の流動状態に関連付けて考察するため、以下に流れの可視化およびPIVによる定量的流速場計測結果を示す。

はじめに人工肺を作動させていない定常状態で、レーザライトシート法によりCPAP内の流れを定性的に可視化した結果をFig. 8に示す。実験条件は、供給流量を7 l/min、MAPを500Pa、スプリッタと仕切板との隙間を約1mmとした。使用したレンズはf:105mmであり、露光時間は100 μ 秒である。Fig. 8より、ノズルからの流れは、ディフューザ下面とスプリッタ下面との間を通り、キャビティ部に入り、流れの一部は、スプリッタと仕切板との隙間部を通過し、直接出口部に向かっていていることが分かる。また、一部はよどみ室での循環流を形成している。

3. 3 流速計測

次に流量を7 l/min、スプリッタと仕切板との隙間距離を1mm一定とし、呼吸を模擬したときの呼気・吸気時について、PIVで得られた流速分布計測結果をそれぞれFig. 9(a)および(b)に示す。照明時間間隔は、1 μ 秒である。それぞれの図に示されている基準ベクトルの大きさは、30m/sに相当する。Fig. 9(a)は呼気時を示しており、スプリッタ下部からキャビティ内に流入した流れの一部が、スプリッタと仕切板との隙間部で上方に曲げられ、よどみ室内を循環した流れと合流して出口部に向かっていていることが分かる。その流れの流速は、ノズル出口部平均流速23m/sと同程度である。Fig. 9(b)は吸気時を示しており、ノズルからの流れは、仕切板先端から下面に沿ってよどみ室に向かっていている。その流れは、壁面に沿って曲げられ、右側ブロング入り口直前では12m/s程度に減速されており、一部がブロングから鼻腔部に入っている。

これらの流動状態が、MAPを維持しながら新生児の患者の呼吸負荷を軽減することになる。

(a) expiratory phase.

(b) inspiratory phase.

Fig. 9 Velocity distribution of nasal-CPAP device.

4. まとめ

ノズルからの流出噴流が直接鼻孔に対抗しないタイプの横型ネーザルCPAP素子について、特に呼気時の抵抗低減を目的として改良した素子の特性を実験的に調べ、臨床応用に可能なMAP変動を実現できることを明らかにした。また、このような特性と素子内流れとの関連について調べた結果、呼気時と吸気時の素子内流れの切り替わり状態が明らかにされ、さらに実用化に向けて検討すべき知見が得られた。

参考文献

- 1) 細井、他3「ネーザルCPAP素子内流れの可視化」、可視化情報、Vol23 Suppl.No.1(2003),p425-426