

□呼吸管理の工夫□

流量制御型のシーパップ[®]

明石 学* 坂中 清彦** 野口 宏* 侘美好昭*

ABSTRACT

Flow-regulated Continuous Positive Airway Pressure

Manabu Akashi, Kiyohiko Sakanaka*, Hiroshi Noguchi and Yoshiaki Takumi

*Department of Anesthesiology and Acute Medicine,***Department of Clinical Engineering,**Aichi Medical University, Aichi, Japan*

To minimize imposed work of breathing, we have previously developed a flow-regulated CPAP (FR-CPAP). The FR-CPAP system delivers a basal flow, and regulates this basal flow to match the patient's flow demand at all times. In inspiration a gas flow equivalent to patient's inspiratory flow is added to the basal flow, and in expiration a gas flow equivalent to patient's expiratory flow is subtracted from the basal flow. FR-CPAP can maintain almost constant airway pressure during the entire respiratory cycle, resulting in an imposed work of breathing of nearly zero.

Using the flow-regulating algorithm of the FR-CPAP, we made some new ventilatory patterns which include a CPAP with a variable imposed work of breathing, a flow-regulated pressure support ventilation (FR-PSV) and a flow-proportional pressure support (FP-PS).

In the FP-PS, the airway pressure is changed in proportion to patient's flow. The FP-PS can minimize airway pressure fluctuations at the distal end of the endotracheal tube during the entire respiratory cycle, and minimize work of breathing imposed by the endotracheal tube.

Ventilatory patterns using the flow-regulating algorithm of the FR-CPAP could be harmonized with a patient.

はじめに

近年自発呼吸を残した人工呼吸管理が繁用されるようになり、低酸素血症による呼吸不全に対しては、CPAPによる呼吸管理が広く用いられている。CPAP中の患者の人工呼吸器により負荷される呼吸の仕事量を軽減するには、全呼吸相で気道内圧の変動を少なくすることが必要である。

このためには吸気時には患者の吸気流量と同じガス流量を患者に供給し、かつ呼気時には呼気抵抗がないCPAP装置が必要である。流量制御型のCPAP (flow-regulated CPAP : FR-CPAP)¹⁾では回路内にベースフローを流し、患者の呼吸流量に合わせて常時回路内流量を制御している。FR-CPAPは全呼吸相で、回路内圧の変動を少なくすることができ、負荷呼吸の仕事量を軽減する観点からは理にかなったCPAP法であるといえる。本稿ではFR-CPAPの回路内流量の制御

* 愛知医科大学麻酔・救急医学教室

** 愛知医科大学 ME 室

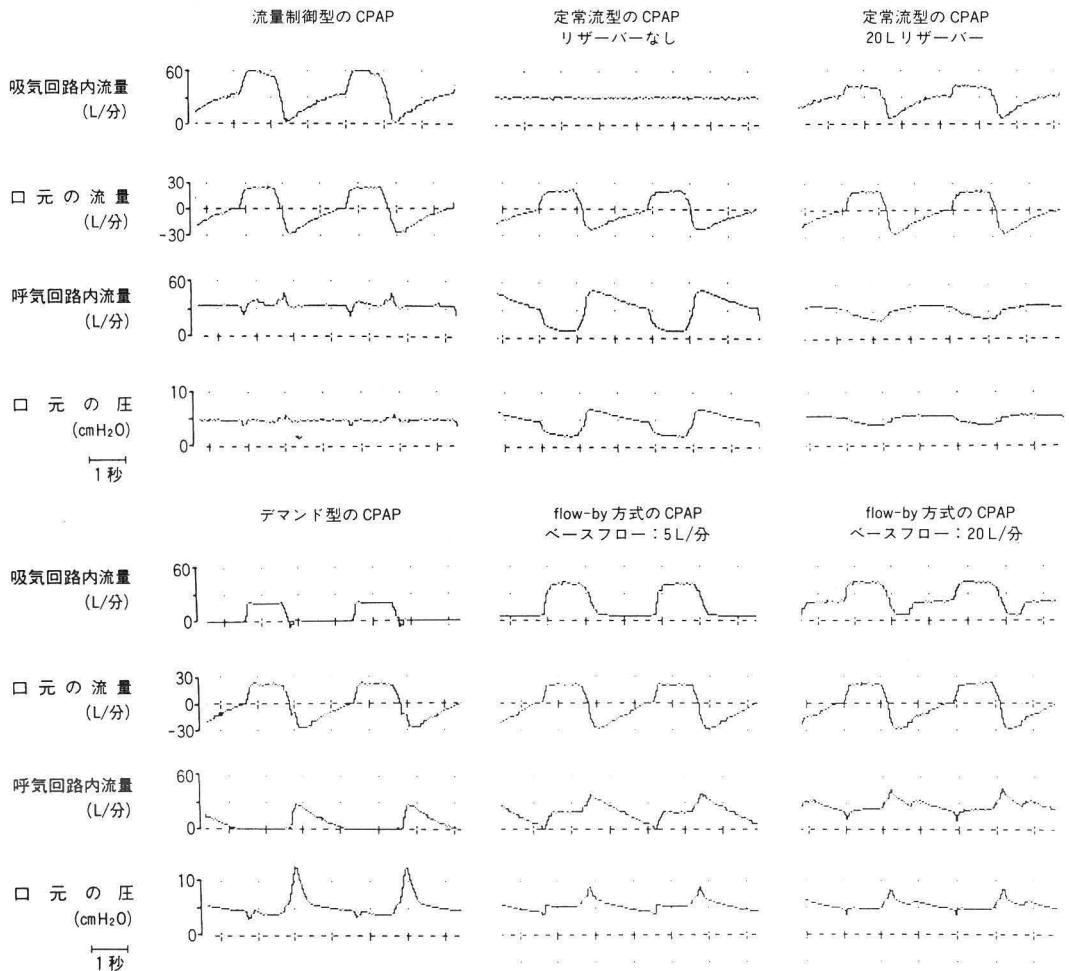


図 1 各 CPAP における各回路内流量

流量制御型の CPAP と定常流型の CPAP ではベースフローを 30 L/分とした。デマンド型の CPAP と flow-by 方式の CPAP では、Puritan-Bennett 7200 a を用いた。デマンド型の CPAP では圧トリガーを $-1 \text{ cmH}_2\text{O}$ 、flow-by 方式の CPAP では流量トリガーを 2 L/分とした。モデル肺 (TTL) を用いて自発呼吸をシミュレートし、一回換気量 400 ml、呼吸数 20 回/分に設定した。

方式について概説し、更にこの流量の制御方式を用いた新しい換気パターンについても概説する。

1. FR-CPAP の回路内流量の制御方法

FR-CPAP では、回路内にベースフローを流し、患者の呼吸流量に合わせて常時回路内流量を制御している。つまり吸気時には患者の吸気流量と同じガス流量をベースフローに加算し、呼気時には患者の呼気流量と同じガス流量をベースフローから減じている。従って吸気回路内流量波形

は、患者の呼吸流量にベースフローを加えた波形と同じ波形になる。呼気回路内流量は、全呼吸のサイクルでほぼ一定にすることができる（図 1）。

完全な threshold resistor として作用する PEEP バルブはない。このために PEEP バルブと呼気回路の気流抵抗により、PEEP バルブを通過するガス流量の変動に伴い、回路内圧は変動する。FR-CPAP では、呼気回路内流量をほぼ一定にするため、回路内圧の変動を著明に少なくすることができる。従って FR

-CPAP の気道内圧一容量曲線は CPAP レベルの線上をほぼ一直線に上下する波形となり、負荷呼吸の仕事量をほぼゼロにすることができる（図 2）。

2. 従来の CPAP と FR-CPAP の性能の比較 (図 1, 図 2)

CPAP 装置における回路内のガス供給方法として、これまでに定常流方式、デマンド方式、flow-by 方式が考案されてきた。回路内圧を一定に保ち、負荷呼吸の仕事量を軽減する点からみると、それぞれの方式にいまだ問題点がある。

1) 定常流型の CPAP²⁾

定常流型の CPAP では、吸気回路内流量は一定であるが、呼気回路内流量は、吸気時には定常流量から患者の吸気流量と同じ流量が減算され、呼気時には呼気流量と同じ流量が加算される。PEEP バルブや呼気回路には気流抵抗があるため、これらを通過する流量の変動とともに、回路内圧は変動する。

リザーバーバッグの装着により回路内圧の変動を緩衝することができる。リザーバーバッグと Y ピース間の回路内の流量、つまり吸気回路内流量は吸気時には定常流量にリザーバーバッグからのガス流量が加わり、呼気時にはリザーバーバッグで定常流を一時的に貯留させることにより、定常流量を減じている。このリザーバーバッグが大きくなるほど吸気回路内流量の波形は、患者の呼吸流量に定常流を加えた流量波形に似た波形を示すようになり、呼気回路内流量の変動は少なく、回路内圧の変動も少なくなる。

もし、無限大のリザーバーバッグを装着することができれば、回路内圧が変動しない理想的な CPAP が行えると考えられ、吸気回路内流量曲線は、患者の呼吸流量に定常流を加えた波形になると思われる。従って、FR-CPAP はリザーバーバッグを使用せずに、この理想的な CPAP の吸気回路内流量波形を作ることができるとも言える。

2) デマンド型の CPAP³⁾

デマンド型の CPAP では患者が吸気を開始することにより回路内圧が低下し、この回路内圧の

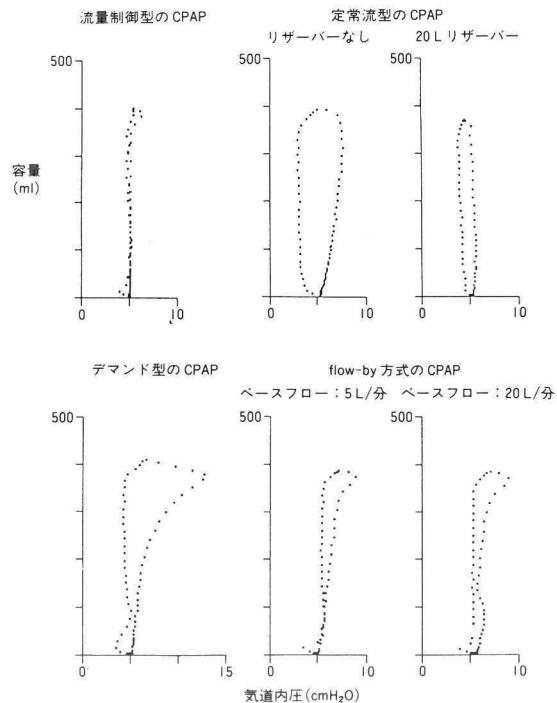


図 2 各 CPAP における気道内圧一容量曲線

低下をトリガーとし、デマンドバルブを開放してガスが供給される。近年吸気バルブの性能は向上したものの、吸気開始時にはトリガー感度以上の回路内圧の低下は避けられない。吸気開始時に患者が吸いやすいように回路内にベースフローを流す方式も考えられているが、この方式では圧トリガーの感度が鈍くなる。呼気時には、設定された回路内圧のレベルを保つように、回路内圧をフィードバックして、回路内流量をクローズドループ制御を行っている。しかしこのような制御を行っても吸気回路内流量は患者の吸気流量と同じ流量となる。従って患者の吸気流量に合った吸気回路内流量がリアルタイムに人工呼吸器から供給されないと、回路内圧の振動を起こすことがある。また呼気時には呼気バルブの開放遅延や、呼気バルブの抵抗のために回路内圧の上昇がみられる。

一方 FR-CPAP ではトリガーではなく、吸気開始直前には既にベースフローが流れているので、吸気開始時の患者の吸気流量はこのベースフローから供給できる。従って吸気開始時の回路内圧の

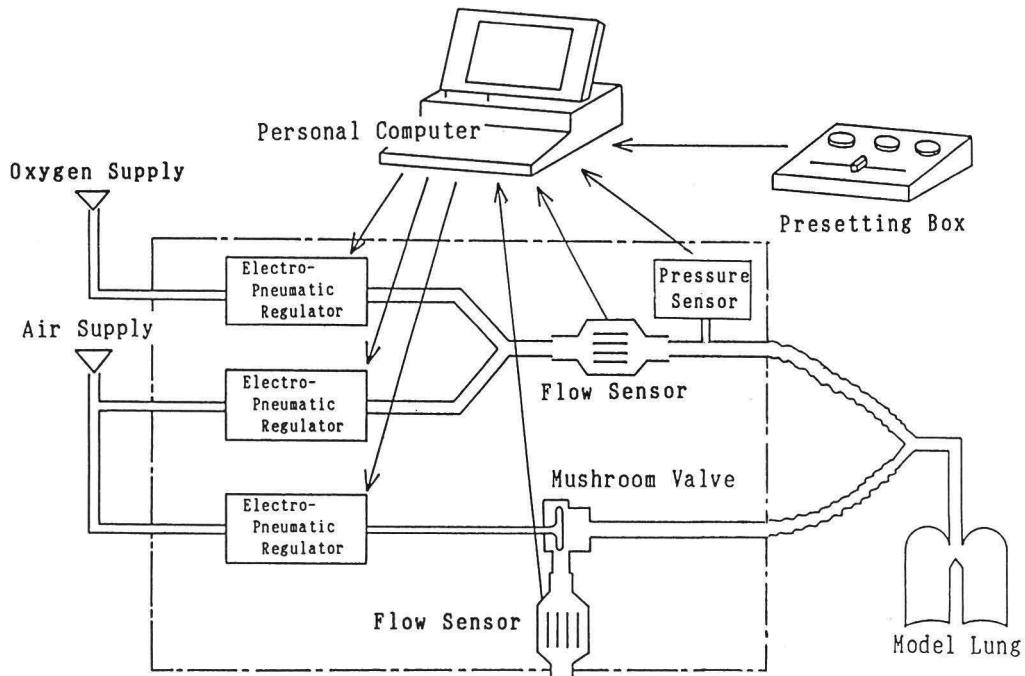


図 3 人工呼吸法開発支援システムのシステム図

患者の呼吸流量と回路内圧の信号がパーソナルコンピュータに入力され、プログラムに従い、回路内流量と回路内圧を制御することができる。

低下はデマンド型の CPAP より少ない。回路内流量は常時患者の呼吸流量の信号に合わせてオーバンループ制御している。仮に吸気時に患者の吸気流量より少ない流量がベースフローに加算されたとしても、この不足分はベースフローから補うことができる。また患者の吸気流量より多いガス流量がベースフローに加算されたとしても、その超過分は呼気バルブから排出される。従ってデマンド型の CPAP で見られるような回路内圧の振動は起こらない。吸気バルブ、呼気バルブは常時開放されているため、デマンド型の CPAP で見られるようなバルブの開閉による回路内圧の変動はない。呼気時においても呼気回路内流量がほぼ一定になるため、回路内圧の上昇は少ない。

3) flow-by 方式の CPAP⁴⁾

flow-by 方式の CPAP では回路内にベースフローを流し、患者の吸気流量で患者の吸気開始を認知し、これをトリガーとして、吸気回路内流量を増加させる。続いて CPAP レベルを保つよう回路内圧をフィードバックして、回路内流量を

制御している。呼気時には呼気抵抗を少なくするために、呼気開始時から 0.5 秒間ベースフローを 5 l/分に減じている。しかし患者の呼気流量がこの減量した流量より多いと呼気回路内の流量が増加し、回路内圧が上昇する。このために呼気時のベースフローを更に減少させることができると提唱されている⁵⁾。しかし flow-by 方式の CPAP においても、FR-CPAP と同じように、患者の呼気流量と同じガス流量をベースフローから減ずるようすれば、呼気時の回路内圧の変動を更に少なくすることができると思われる。

3. FR-CPAP が行える人工呼吸器

FR-CPAP を行うには、患者の呼吸流量を常時測定し、この流量信号をコンピュータなどの制御装置に送り、この制御装置により呼吸流量に合わせて回路内流量を制御できるシステムが必要である。口元に一つの流量計を装着し、これで呼吸流量を測定することができるが、この方式では臨床使用に際し、流量計に水滴や分泌物が付着する

ことにより信頼できる測定値が得られなくなる可能性がある。われわれが最近試作した人工呼吸法開発支援システム（図3）⁶⁾では、呼気、および吸気回路内にそれぞれ流量計を装着し、この二つの流量計で測定された流量の差で患者の呼吸流量を算出している。これらのそれぞれの方法でFR-CPAPを行ったが、両方法とも同様の回路内流量の制御が可能であった。従って現在は吸気、および呼気回路内に流量計を装着して患者の呼吸流量を測定し、この流量信号に合わせて回路内流量を制御している。

近年開発された人工呼吸器の多くは、コンピュータ化され高性能なハードウェアをコンピュータのソフトウェアで制御している。また患者の呼吸流量をリアルタイムで測定しているものが多い。従ってこれらの人工呼吸器にFR-CPAPのソフトウェアを組み込むことにより、これらの人工呼吸器においてもFR-CPAPを行うことは可能であると考えられる。

4. FR-CPAPの回路内流量の制御方式を用いた新しい換気パターン

人工呼吸法開発支援システムでは呼吸流量と回路内圧の信号をパーソナルコンピュータに取り込み、プログラムに従い、これらの信号に合わせて、回路内流量と回路内圧を制御することができる。従って本システムのパーソナルコンピュータのプログラムを組むだけで、短時間に思い通りの換気パターンを作成することができる⁶⁾。そこで本システムを用いて、FR-CPAPの回路内流量の制御方式を組み込んだ種々の換気パターンを作成している。

1) 負荷呼吸の仕事量可変CPAP法⁷⁾

FR-CPAPにより負荷呼吸の仕事量をほぼゼロにできるものの、呼吸筋のトレーニングなどのために、呼吸の仕事量を負荷することが必要な場合がある。FR-CPAPではベースフローに加減算するガス流量は患者の呼吸流量と同じ流量であるが、この加減算する割合を任意に変化させることが可能である。つまり負荷呼吸の仕事量をリザーバーバッグを装着しない定常流型のCPAPのレベルから、FR-CPAPのゼロのレベル、更

にマイナスのレベルまで、任意のレベルに容易に連続的に変化させることができる。

2) 流量制御プレッシャーサポート換気 (FR-PSV) 法⁸⁾

現在市販されている人工呼吸器のPSVの回路内流量の制御方式はデマンド方式が採用されている。しかし吸気開始時の気道内圧の低下を防止するために、PSVにおいても回路内に常時ベースフローを流し、流量トリガーさせることができていた⁹⁾¹⁰⁾。FR-PSV法では、回路内流量の制御は、FR-CPAP法と同じ流量の制御アルゴリズムを用い、回路内圧は流量トリガーにより吸気時にはプレッシャーサポート (PS) レベルに、呼気時にはCPAP レベルにしている。本法は Puritan-Bennett 7200 a の PSV より、吸気開始時の気道内圧の低下は少なく、PS レベルに速く達し、呼気時には CPAP レベルに速く戻すことができた。

3) flow-proportional pressure support (FP-PS) 法¹¹⁾

FR-CPAPにより気管内チューブの近位側の気道内圧をほぼ一定にすることができるが、気管内チューブの遠位側の気道内圧は、吸気時に低下し、呼気時に上昇する。この気道内圧の変動は患者の呼吸流量に比例する。そこで気管内チューブにより負荷される呼吸の仕事量を軽減するために、回路内流量の制御はFR-CPAPと同じ制御アルゴリズムを用い、回路内圧を全呼吸相で呼吸流量に比例して変化させる FP-PS 法を考案した（図4）。

PSVにより人工呼吸器や気管内チューブにより負荷される吸気の仕事量を代償することができるが、吸気終了時から呼気相にわたって、気管内チューブの遠位側の気道内圧は上昇する。しかし FP-PS では全呼吸相で気管内チューブの遠位側の気道内圧の変動幅を少なくすることができた。従って FP-PS は、PSV に比べて気管内チューブにより負荷される呼吸の仕事量を全呼吸相で適切に軽減することができると思われる。今後 FP-PS は、人工鼻装着や気道抵抗などにより増加した呼吸の仕事量を適切に軽減できることが期待されている。

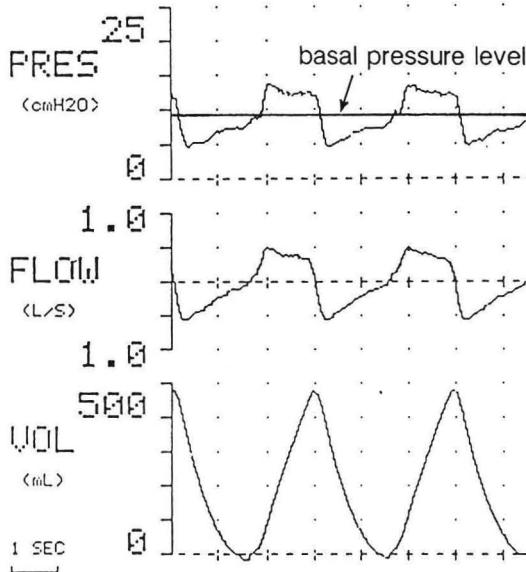


図4 FP-PSの回路内圧、呼吸流量、容量曲線

回路内圧の波形が呼吸流量の波形に比例した波形になるように制御されている。つまりベースとなる圧レベルを設定し、吸気時には吸気流量に比例した圧をこの圧レベルに加え、呼気時には呼気流量に比例した圧をこの圧レベルから減じている。

おわりに

従来の人工呼吸器のCPAPやPSVの多くは、気道内圧をフィードバックして回路内流量や回路内圧の制御を行っている。これらの制御方式は、患者との調和の点からみると、いまだ多くの問題点が残されている。しかしFR-CPAPは患者の呼吸流量に合わせて回路内流量を制御することにより、気道内圧の変動幅を少なくすることができ、負荷呼吸の仕事量を軽減する観点からは理にかなったCPAP法であるといえる。また患者の呼吸流量に合わせて回路内圧を制御することにより粘性抵抗に合わせた換気を行うことができ、更に呼吸流量から換気量が算出され、この換気量に合わせて回路内圧を制御することにより弾性抵抗に合わせた換気を行うことができると考えられる。従って今後、患者に調和した換気を行うには、気道内圧や流量をトリガーにしたり、気道内

圧をフィードバックして制御する方式よりも、患者の呼吸流量信号に合わせて回路内流量と回路内圧を連続的に制御する流量制御型の換気法が自然であると思われる。

文献

- 1) 明石 学, 坂中清彦, 野口宏ほか: 流量制御CPAP法の開発. ICUとCCU 13: 1117-1123, 1989
- 2) 明石 学, 坂中清彦, 野口宏ほか: 流量制御CPAPと定常流型のCPAPにおける負荷呼吸の仕事量の比較. ICUとCCU 14: 253-259, 1990
- 3) 明石 学, 坂中清彦, 野口宏ほか: 流量制御CPAPとデマンド型のCPAPにおける負荷呼吸の仕事量の比較. ICUとCCU 14: 331-337, 1990
- 4) 明石 学, 坂中清彦, 野口宏ほか: 流量制御CPAPとflow-by方式のCPAPの性能の比較. ICUとCCU 14: 1151-1155, 1990
- 5) 斎藤清子: Continuous positive airway pressureモードにおけるflow-byの有用性. ICUとCCU 14: 131-138, 1990
- 6) 坂中清彦, 明石 学, 山本康裕ほか: 人工呼吸法開発支援システムによる人工呼吸法の開発. 人工呼吸 7: 203, 1990
- 7) Akashi M, Sakanaka K, Noguchi H, et al: A new CPAP with a variable imposed work of breathing, Chest 98: S 78, 1990
- 8) 明石 学, 坂中清彦, 野口宏ほか: 流量制御プレッシャーサポート換気法の開発. ICUとCCU 14: 1055-1060, 1990
- 9) 時岡宏明: Pressure support ventilation. 集中治療 2: 305-312, 1990
- 10) Cox D, Tinllo SF, Ferrimond JG: Investigation of the spontaneous modes of breathing of different ventilators. Intensive Care Med 14: 532-537, 1988
- 11) 明石 学, 坂中清彦, 堀場清ほか: Flow-proportional pressure support (FP-PS)法の開発. 第18回日本集中治療医学会総会抄録集 1991