

## 呼気再吸入回路

印南比呂志\* 高崎正人\* 岡田和夫\* 小清水靖\*\*

### ABSTRACT

#### A New Rebreathing Circuit for Controlled Ventilation

Hiroshi IN-NAMI, Masahito TAKASAKI, Kazuo OKADA and Yasushi KOSHIMIZU\*

*Department of Anesthesiology, Teikyo University School of Medicine*

*\*Senko Medical Instruments mfg Co. Ltd.*

We have designed and made a rebreathing circuit for keeping normocapnia (NC) during hyperventilation (HV). The new rebreathing circuit is consisted of an anesthesia circuit and a corrugated plastic tube with a manipulatable ball valve in the center; one end of the tube is connected to a proximal side of the inspiratory limb and the other end of the tube to a terminal side of the expiratory limb of an anesthesia circuit. With the ball valve open, rebreathing will occur and a part of the circuit would function as a mechanical dead space. By monitoring end-tidal  $\text{CO}_2$  and manipulating the ball valve, we can control the rebreathing flow rate for maintaining NC during HV.

### はじめに

全身麻酔下での呼吸管理の際、従来、 $\text{PaCO}_2$ の上昇(hypercapnia)に対しては嚴重な注意が向けられてきたが、 $\text{PaCO}_2$ の低下(hypocapnia)にはあまり注意が向けられていなかった。事実、人工呼吸(IPPV)の際、 $\text{PaCO}_2$ が25 mmHg程度の呼吸性アルカローシスはしばしばみられる。しかしながら、呼吸性アルカローシスの副作用も種々知られている。例えば、交感神経系の活性低下<sup>1)</sup>、hypoxic pulmonary vasoconstriction (HPV)の抑制<sup>2)3)</sup>による肺での血液酸素化能の低下<sup>4)5)</sup>などである。

他方、 $\text{PaCO}_2$ を指標とした適正換気(normocapnia)を行った場合、肺のコンプライアンスの低下<sup>6)</sup>、肺のdependent areaでの無気肺の発現<sup>7)8)</sup>、機能的残気量の減少<sup>9)</sup>などが起こる。

以上から、調節呼吸(IPPV)の際は、肺内ガス分布の均等化や機能的残気量の減少防止のため、1回換気量( $V_T$ )は体重kg当り10 mlに設定することが多い。しかし、この場合、呼吸数(f)を毎分10~12回くらいにすると $\text{PaCO}_2$ は25~30 mmHg位のhypocapniaになる。そしてその際、しばしば、心拍出量や $\text{PaO}_2$ が低下する。特に全身麻酔下の肥満患者では、 $\text{PaO}_2$ の低下は著明となる<sup>10)</sup>。

そこで、われわれは、換気条件を変えずに $\text{PaCO}_2$ を正常化するために、患者自身の呼気を部分的に再吸入させる装置を考案・試作した<sup>11)12)</sup>。

### 「呼気再吸入回路」について

一般に、調節呼吸(IPPV)の際、呼吸回路(蛇管)では、図1のように、吸気相、すなわち患者への吸気ガスの送入の際には、呼気弁は閉鎖されるから、呼気側蛇管内には比較的高濃度の炭酸ガスを含む患者からの呼気ガスが一時的に停留

\* 帝京大学医学部麻酔科

\*\* 泉工医科工業 KK

する。それらのガスは、次の呼気相で呼気弁が開き、呼吸回路外へ移動する。そこで、われわれは、回路内に残っている呼気ガスの一部を再吸入させることにより、 $\text{PaCO}_2$  を上昇させ得る点に

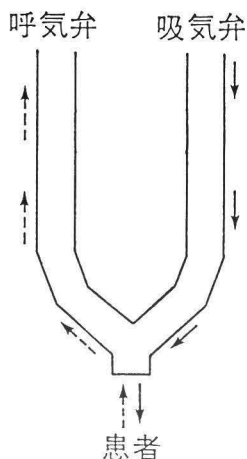


図 1 呼吸回路（蛇管）内のガスの流れ  
実線と点線の矢印は、それぞれ、吸気相と呼気相でのガスの流れを示す。

着目した。

図 2 はわれわれが試作した「呼気再吸入回路」を麻酔器に接続した状態を描写したものである。本装置では吸気側蛇管と呼気側蛇管とが、呼気弁の直前で、接続管で接続されている。そして、接続用プラスチック管の中央にはボールバルブが装着されており、このバルブの調節により、この管を流れる流量を任意に増減できるようになっている。従って、回路内のボールバルブを開くことにより、吸気時には、蛇管内に残っている呼気ガスが部分的に再吸入されるはずである。そして、その際、 $\text{PaCO}_2$  を正常に戻すには、呼気終末炭酸ガス濃度 ( $\text{F}_{\text{ETCO}_2}$ ) をモニターしながら、ボールバルブの開き具合を調整することにより、呼気の再吸入量を制御すれば良い。

#### 「呼気再吸入回路」内でのガスの流れ

IPPV の際、ボールバルブが開いている場合、吸気相と呼気相とで、回路内をどの方向にガスが流れるのかわからない。そこで、 $\text{CO}_2$  ガスを指

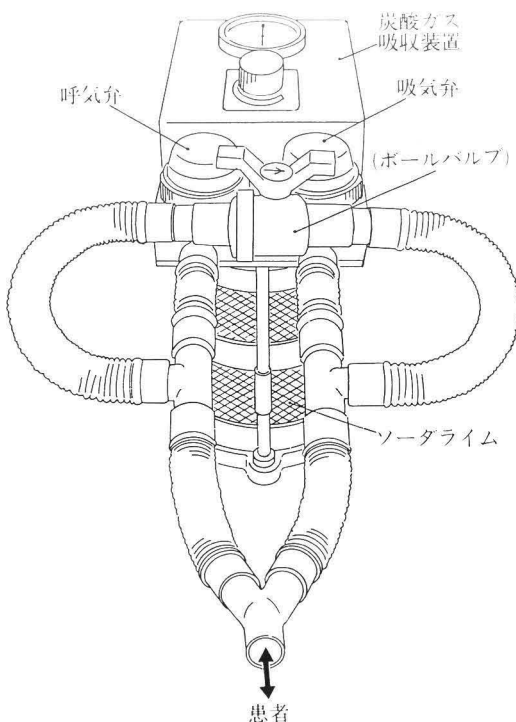


図 2 麻酔器に接続した「呼気再吸入回路」

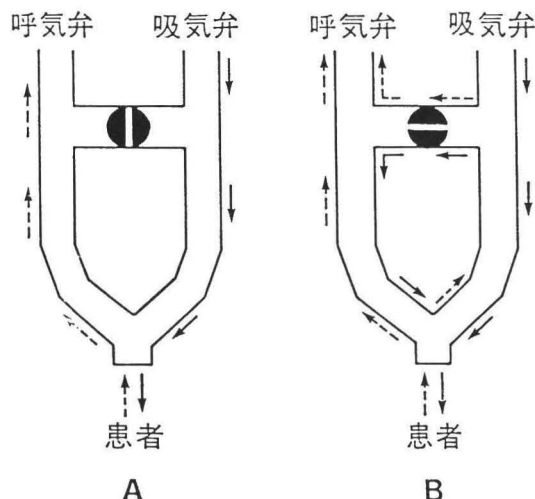


図3 呼吸再吸入回路装着時の麻酔循環回路内のガスの流れ

A：ボールバルブ閉鎖時。B：ボールバルブ全開時。

実線と点線の矢印は、それぞれ、吸気相と呼気相とでの流れを示す。

標として、吸気相と呼気相での回路内のガスの流れを検索した。

臨床麻酔の際、図1の回路で、吸気側蛇管、ボールバルブのついた接続管、呼気側蛇管のそれぞれ2カ所（合計6カ所）から、吸気時と呼気時にガス標本を連続的に採取し、ガス中の $\text{CO}_2$ 濃度はCapnograph（Normocap<sup>®</sup>，Datex社製）で測定した。

図3は麻酔器に本回路を装着した場合のガスの流れを示した。図3からわかるとおり、IPPVの際、ボールバルブが開いている場合、吸気時には、吸気弁を通して流入するガスは一部は吸気側蛇管を、他の一部はボールバルブを通り呼気側蛇管を、それぞれ、経由し、患者の肺に流入する。そして、次の呼気時には、吸気弁は閉鎖するから、患者の肺から呼出されたガスは一部は呼気側蛇管へ、他の一部は吸気側蛇管→ボールバルブ→呼気側蛇管へ、それぞれ流れ、呼気弁へと向うことがわかった。

### 「呼吸再吸入回路」の臨床的有用性の検定

次に、われわれの考案・試作した「回路」が実

地臨床において、 $\text{PaCO}_2$ の正常化に有効に作動するかどうかを確かめるために、以下の検索を行った。

#### 1. 麻酔器の使用下での検定

使用した麻酔器はベンチレーター付のもの（Narkomed<sup>®</sup>，North American Dräger社製）で、麻酔循環回路に使用した蛇管は市販のプラスチック製であった。蛇管の容積は吸気側と呼気側とが、それぞれ、約400 mlであった。 $\text{F}_{\text{ETCO}_2}$ のモニターには前記のCapnographを用いた。対象患者はBody Mass Indexが25以上で中・高年の鼓室形成術の手術患者11例であった。観察期間中、麻酔の維持には $\text{N}_2\text{O}$ （3 l/分）、 $\text{O}_2$ （2 l/分）、 $\bar{\text{E}}$ （2%）を用い、呼吸は調節呼吸とし、 $\text{V}_\text{T}=10 \text{ ml/kg}$ ， $f=12/\text{分}$ に固定した。

図4は $\text{F}_{\text{ETCO}_2}$ の記録（capnogram）の一例である。上段と下段は、それぞれ、呼吸再吸入開始後と再吸入中止後のカプノグラムである。呼吸再吸入開始20分後（上段の右端）の $\text{F}_{\text{ETCO}_2}$ は5.7%で、その時点での $\text{PaCO}_2$ は39.2 mmHgであった。再吸入中断20分後（下段の右端）の $\text{F}_{\text{ETCO}_2}$ は3.6%で、その時の $\text{PaCO}_2$ は26.9 mmHgであった。

表1は呼吸再吸入開始20分後と再吸入中断20分後の時点での血液ガス・pHの測定結果を示す。 $\text{PaCO}_2$ は呼吸再吸入により約27からほぼ40 mmHgに戻っている。なお、HypocapniaからNormocapniaへの移行により、 $\text{PaO}_2$ は有意に上昇した。

#### 2. ベンチレーターの使用下での検定

通常のベンチレーターでは、呼吸回路は、麻酔器の場合と異なって、非再呼吸式となっている。ベンチレーターにはサーボベンチレーター（900 B）を用い、本器は麻酔器にも兼用した。そして、前記のプラスチック製蛇管（総容積が約800 ml）を呼吸回路に使用した。なお、「呼吸再吸入回路」のボールバルブが付いた接続管は、呼気側では、呼気弁の直前で呼気側蛇管と接続した。対象患者は非開胸・非開腹の肥満（ $\text{BMI}>25$ ）の手術患者5人で、観察は全身麻酔（ $\text{G-O-}\bar{\text{E}}$ ， $\text{F}_{\text{IO}_2}=0.4$ ）下で行った。その際、換気条件は $\text{V}_\text{T}=10 \text{ ml/kg}$ ， $f=12/\text{分}$ に固定した。そして、

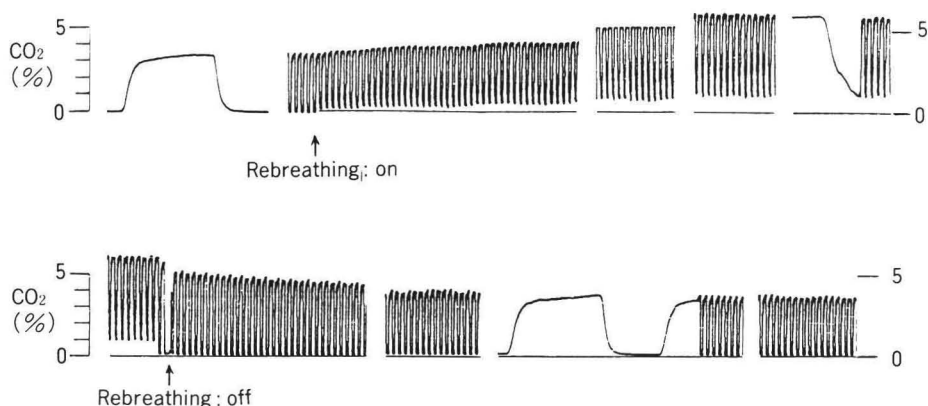


図 4 「呼気再吸入回路」による呼気再吸入時の  $\text{CO}_2$  濃度曲線（カプノグラム）

上段は呼気再吸入開始後の  $\text{CO}_2$  濃度の変化を，下段は再吸入停止後の  $\text{CO}_2$  濃度の変化を，それぞれ示す。

表 1 麻酔器の使用下での「呼気再吸入」の血液ガス・pH におよぼす影響

	Normocapnia	Hypocapnia
$\text{PaO}_2$ (mmHg)	$131 \pm 14$	$97 \pm 12^*$
$\text{Paco}_2$ (mmHg)	$39.6 \pm 2.2$	$27.4 \pm 12^*$
pH	$7.383 \pm 0.023$	$7.494 \pm 0.028^*$
B.E. (mEq/l)	$-1.3 \pm 1.6$	$-1.0 \pm 1.7$

Values are Mean  $\pm$  SD of 11 obese patients.

\* $P < 0.005$

表 2 ベンチレーター使用下での「呼気再吸入」の血液ガス・pH におよぼす影響

	Normocapnia	Hypocapnia
$\text{Paco}_2$ (mmHg)	$40.9 \pm 2.8$	$30.4 \pm 2.9^*$
$\text{PaO}_2$ (mmHg)	$135 \pm 18$	$118 \pm 14^*$
pH	$7.375 \pm 0.021$	$7.471 \pm 0.020^*$
B.E. (mEq/l)	$-1.5 \pm 1.2$	$-0.5 \pm 0.5$

Values are mean  $\pm$  SD of 5 obese patients.

\* $P < 0.005$

呼気の再吸入の前後で血液ガス・pH の測定を行った。

表 2 には呼気の再吸入前後での血液ガス・pH の変化を示した。表 1 の場合と同様に，呼気再吸入により  $\text{Paco}_2$  は正常化された。なお， $\text{Paco}_2$  の正常化によって  $\text{PaO}_2$  は有意に上昇した。

## 考 案

換気条件を変えずに  $\text{Paco}_2$  を上昇させるには表 3 に示す方法がある。A 項の 1 と 2 に関しては諏訪<sup>13)14)</sup>，山村<sup>15)</sup>の優れた研究が報告されている。われわれの考案した方法は A-3 に相当する。

本法は， $\text{F}_{\text{ETCO}_2}$  をモニターしながら，回路内のボールバルブの操作により呼気の再吸入量を調

表 3 過換気下での Normocapnia の維持

- |                         |
|-------------------------|
| A. 呼気の再吸入法              |
| 1. 機械死腔の付加              |
| 2. ソーダライムの除去            |
| 3. 呼気再吸入路の装着            |
| B. $\text{CO}_2$ ガスの吸入法 |

節できるので，比較的簡単に  $\text{Paco}_2$  を正常域に戻し得ることが判明した（図 4，表 1，表 2）。

わが国では，今日， $\text{F}_{\text{ETCO}_2}$  の測定は，少なくとも全身麻酔下では，ルーチンのモニターとして定着しつつある。従って， $\text{F}_{\text{ETCO}_2}$  をモニターすれば，「呼気再吸入回路」は実地臨床で簡便に使用できると思われる。

なお、本研究では肥満患者を対象患者とした。それは、全身麻酔下の肥満患者では呼吸性アルカローシスにより  $\text{PaO}_2$  が著明に低下する<sup>5)</sup>からである。本研究では  $\text{PaCO}_2$  の正常化により  $\text{PaO}_2$  が有意に上昇した。これは、 $\text{PaCO}_2$  の正常化により呼吸性アルカローシスによる HPV の抑制<sup>2)3)</sup>が緩和され、 $\dot{V}_A/\dot{Q}$  mismatching が改善されたためと推定される。

本装置では呼吸回路内に残っている呼気ガスを部分的に再吸入させる。従って、 $\text{CO}_2$  の再吸入量を維持するためには、回路の容積はある程度大きくする必要がある（本研究では 800 ml）。また、半閉鎖式循環回路での呼気の再吸入の場合、回路内への fresh gas（本研究では毎分 5 l）があまり少ないと、呼気再吸入の際、分時換気量に対する酸素摂取量の比率が大きくなるため、 $\text{FIO}_2$  が小さくなりすぎ、hypoxemia となる危険性がある。以上から「呼気再吸入回路」内のガスの流量、蛇管の長さ（容積）、 $\dot{V}_{\text{CO}_2}$  などの相互間の関係の検索を今後に行う必要がある。

#### 参考文献

- 1) Moster WG, Reier CE, Cardier RW, et al : Cardiac output and post-ganglionic sympathetic activity during acute respiratory alkalosis. *Anesthesiology* 31 : 28, 1969
- 2) Lloyd TC : Influence of blood pH on hypoxic pulmonary vasoconstriction. *J Appl Physiol* 21 : 358, 1966
- 3) Marshall C, Lindgren L and Marshall BE : Metabolic and respiratory hydrogen ion effects on hypoxic pulmonary vasoconstriction. *J Appl Physiol* 57 : 545, 1984
- 4) Noble WH, et al : The effects of  $\text{PCO}_2$  on hypoxic pulmonary vasoconstriction. *Canad Anes Soc J* 28 : 422, 1981
- 5) In-nami H, Kikuta Y, Nagai H, et al : The increase in pulmonary venous admixture by hypocapnia is enhanced in obese patients. *Anesthesiology* 63(3A) : A520, 1985.
- 6) Mead J and Collier C : Relation of volume history of lungs to respiratory mechanics in anesthetized dogs. *J Appl Physiol* 14 : 669, 1959
- 7) Brismar B, Hedenstierna G, Lundqvist H, et al : Pulmonary densities during anesthesia with muscle relaxation—a proposal of atelectasis. *Anesthesiology* 62 : 422-428, 1985
- 8) Hedenstierna G, Tokics L, Strandberg A, et al : Correlation of gas exchange impairment to development of atelectasis during anaesthesia and muscle paralysis. *Acta Anaesth Scand* 30 : 183-191, 1986
- 9) 印南比呂志：全身麻酔と FRC の変動。岡田，沼田編：麻酔科 Q & A 104。金原出版，pp 90～94，1986
- 10) In-nami H, Kikuta Y, Nagai H, et al : The increase in pulmonary venous admixture by hypocapnia is enhanced in obese patients. *Anesthesiology* 63(3A) : A520, 1985
- 11) 印南比呂志，岡田和夫，小清水靖：全身麻酔・調節呼吸の際， $\text{PaCO}_2$  正常化のための「呼気再吸入回路」の試作。人工呼吸 6 : 95～97，1989
- 12) In-nami H, Okada K and Koshimizu Y : A new rebreathing circuit for controlled ventilation. *Anesthesiology* 75(3A), 1991 (in press).
- 13) Suwa K and Bendixen HH : Change in  $\text{PaCO}_2$  with mechanical deadspaces during artificial ventilation. *J Appl Physiol* 24 : 556-563, 1968
- 14) 諏訪邦夫：炭酸ガス吸収装置を欠く半閉鎖循環麻酔法の研究。麻酔 18 : 715～721, 808-812, 925-931, 1969
- 15) 山村秀夫，花岡一雄，諏訪邦夫ほか：半閉鎖式循環回路における炭酸ガス再呼吸についての研究。臨床生理 4 : 58-63, 1974