

□ 総 説 □

Tracheal Gas Insufflation

今 中 秀 光*

ABSTRACT

Tracheal gas insufflation

Hideaki IMANAKA

Surgical Intensive Care Unit, National Cardiovascular Center

Tracheal gas insufflation (TGI) is a continuous or phase-specific injection of fresh gas into the central airways as an adjunct to mechanical ventilation and improves the efficiency of alveolar ventilation. TGI decreases arterial CO₂ tension in animal and patients with respiratory failure. Because ventilatory requirements (tidal volume or pressure) can be reduced, TGI has potential to improve the management of lung injury. However, it remains an investigational procedure because of possible complications, including auto-PEEP, changes in tidal volume/system pressures, and difficult monitoring. To avoid the adverse effect of TGI, careful setting of ventilator alarms is required.

はじめに

高い気道内圧や大きな一回換気量で人工呼吸を行うと肺傷害が発生する¹⁾²⁾。人工呼吸の副作用としての肺傷害を最小限に予防するためにさまざまな方法が提唱されている。tracheal gas insufflation (TGI) もその一つで、気管内に留置したカテーテルから低流量ガスを供給し、二酸化炭素 (CO₂) の再呼吸を減少させ、換気効率を改善させる換気補助手段である。TGI の概念は 1969 年の Stresemann に始まり³⁾、高流量ガスを気道に供給する constant flow ventilation⁴⁾⁵⁾、自発呼吸下の患者の気管切開部から低流量ガスを流し換気を補助する airway insufflation⁶⁾、transtracheal oxygenation⁷⁾⁸⁾、人工呼吸器の呼気弁を利用して

カテーテル流量を調節する intrapulmonary tracheal ventilation⁹⁾¹⁰⁾ と、類縁の補助手段は少なくない。Marini や Kolobow らが 1990 年ごろから動物・患者で TGI の有用性を報告してきた。TGI により動脈血炭酸ガス分圧 (Paco₂) が低下するか^{11)~15)}、同じ Paco₂ を得るのに必要な換気条件 (換気量や最高気道内圧) を低く抑えることができる¹⁶⁾。呼吸不全患者の Paco₂ を低下したり¹⁷⁾¹⁸⁾、COPD など呼吸不全患者の呼吸仕事量を低下したり¹⁹⁾、頭部外傷後の脳圧が低下した²⁰⁾ との短期的な変化については数多く報告されている。しかし肺傷害の程度を減らすとか、呼吸不全症例の予後を改善するといった報告はない。また最近 TGI の副作用についても報告されてきている。この総説では TGI の効果に影響を及ぼす因子、注意点について述べていく。

* 国立循環器病センター外科系集中治療科

1. TGI のメカニズム

TGI は通常の人工呼吸に上乘せする形で気管内に新鮮ガスを供給し、解剖学的死腔や呼吸回路死腔(気管分岐部～Y ピース)の CO₂ を含んだ呼気ガスを洗い流し、次の吸気時に再呼吸する CO₂ の量を減らし、結果的に解剖学的死腔を減少させる¹²⁾¹³⁾。TGI カテーテルより近位側にある CO₂ を洗い流す作用が主なものであるが、TGI ガスがカテーテル先端から遠位側に及んで乱流形成・ガス交換を促進する可能性も指摘されている¹⁴⁾。

TGI の PaO₂ への影響は著明ではないが、再呼吸が減る分吸入酸素濃度が上昇し、auto-PEEP が増えるため PaO₂ は若干上昇する^{13)~15)21)}。

2. システムと方法

市販の TGI システムはないので、各施設がそれぞれのシステムを手作りしている。TGI ガスを注入する時相、カテーテルの種類・先端位置、併用する人工呼吸により分類されるが、一番簡単な定常流型 TGI では、細いカテーテル (もしくは吸引チューブ) を挿管チューブ先端と気管分岐部の間 (通常、気管分岐部の上方 2 cm) に進め定常流を流す (図 1 a)²²⁾。酸素ブレンダーを用い TGI ガスと人工呼吸器の吸入酸素濃度をそろえ、加湿器を通して TGI ガスの加温・加湿を行う。TGI カテーテルは Y ピースから気管内チューブ内腔を通して進めるのが一般的である^{16)~21)}。人工呼吸器回路との接続は気管支ファイバースコー

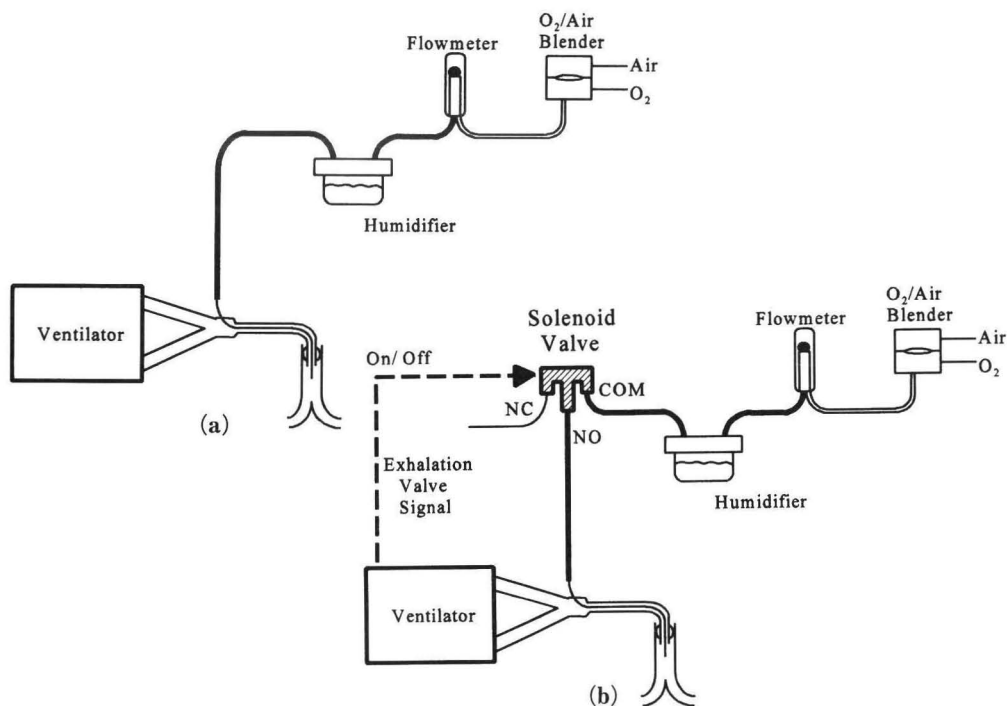


図 1 TGI システム

(a) 定常流型 TGI

細いカテーテルを人工呼吸回路の Y ピースから挿入し、挿管チューブ先端と気管分岐部の間に進める。酸素ブレンダー、加湿器を通したガスを気管に注入する。

(b) 呼吸同期型 TGI

人工呼吸器の呼気弁用のシグナルを取り出し、TGI 用電磁弁を制御する。呼気時には TGI 流量は気管内へ、吸気時には大気に解放される。

ブ用のコネクターを利用することが多い。

3. TGI の効果に影響をおよぼす因子

1) TGI の時相

TGI ガスは全呼吸相にわたって(continuous flow TGI：定常流型 TGI)，あるいは呼吸相に選択的^{15)23)~26)}に供給することができる。後者はさらに全呼気相(expiratory phase TGI：呼気同期型 TGI)，呼気相の後半(end-expiratory wash-out)，吸気相(inspiratory bypass)に分けられる¹⁵⁾。定常流型 TGI は最も簡単に実施することができ効率も呼気同期型 TGI や吸気相 TGI に比べ優るが¹⁵⁾，合併症の可能性が高くなる。時相選択的な供給のためには gating 装置が必要となる(図 1 b)¹⁵⁾²⁵⁾²⁶⁾。

2) TGI カテーテルと挿管チューブ

TGI カテーテルが細いほど挿管チューブの有効断面積は大きくなるが，一方で TGI ガスの噴出速度が速くなり呼気を障害したり，気管粘膜を損傷する危険性が増す。内径 1~2 mm のカテーテルを用いた報告が多い。TGI カテーテル先端の性状は効果にあまり影響を及ぼさない¹³⁾。気管内チューブ内腔側から TGI カテーテルを進めるのが一般的である^{16)~21)}。動物実験では気管内チューブ外側から進めたり¹²⁾¹³⁾¹⁵⁾，ダブルルーメンチューブの一方のルーメンから TGI カテーテル²⁷⁾や金属製 TGI チューブ¹⁴⁾²³⁾²⁴⁾を進めている。TGI ガスを直接気管に噴出せず，挿管チューブの内腔に向かって噴出したり²⁸⁾，TGI ガスの向きを口元の方へ逆転する⁹⁾¹⁰⁾²⁶⁾工夫もされている。Kolobow らは reversed thrust catheter を小児患者用の挿管チューブの内腔から挿入し，TGI ガス方向を逆転することにより auto-PEEP の発生を予防した⁹⁾¹⁰⁾。Max らは特殊ダブルルーメンチューブの一方から TGI 流量の向きを口元の方へ逆転させている²⁶⁾。

3) TGI 流量，TGI カテーテル先端の位置

TGI 流量を上げると P_{aCO_2} は低下していくが，TGI 流量 10 l/分ではほぼプラトーに達する(図 2)¹³⁾ ので，臨床では 4~6 l/分の TGI 流量が用いられている。TGI の効率は TGI 流量そのものよりも，TGI によって呼気時に洗い流された

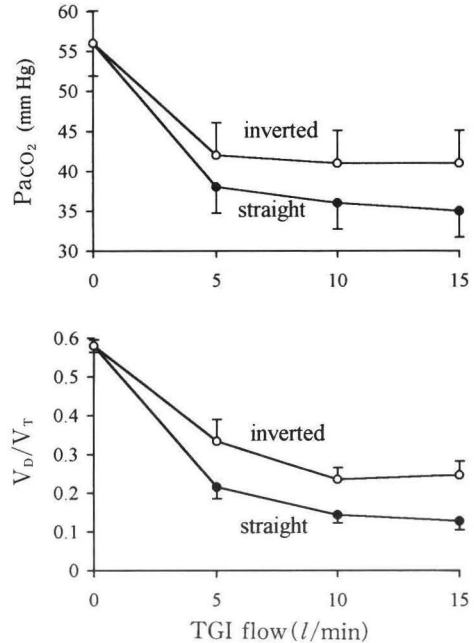


図 2 TGI ガスの流量と向きの影響

TGI 流量を 5, 10, 15 l/分とし P_{aCO_2} ，死腔換気率 (V_D/V_T) に対する影響を順方向 TGI (straight) と逆方向 TGI (inverted) で比較した。順方向 TGI の方が効率に優れている。TGI 流量 10 l/分と 15 l/分との間で P_{aCO_2} に差はない。

黒丸；順方向 TGI，白丸；逆方向 TGI

(文献 14 より改変ののち引用)

ガス量に左右されると Ravenscraft は報告している²⁴⁾。TGI カテーテル先端が気管分岐部に近いほど TGI の効率は良くなる¹³⁾が，厳密な位置は重要ではなく気管分岐部の数 cm 上方に位置させればよい。

4) TGI 流量の方向

気管分岐部に向かって TGI ガスが出る順方向 TGI と，逆に口元に向かってガスが噴出する逆方向 TGI がある¹⁴⁾。順方向 TGI の方が効率に優れ，犬の実験では P_{aCO_2} が順方向 TGI (10 l/分) で 56 torr から 36 torr へ，逆方向 TGI では 41 torr へ減少した(図 2)。カテーテルから遠位側に噴出したガスが乱流を引き起こしガス交換を促進するためとされている。ただし順方向 TGI では auto-PEEP 発生²⁵⁾²⁶⁾，気管粘膜損傷の点に注意

しなければならぬ。

5) 対象患者

解剖学的死腔が大きい条件、すなわち気管径の太い動物で低換気を行った場合 TGI の効果は最も大きくなり、 Paco_2 が 40% 以上低下するとの報告もある^{12)~15)}。実際の患者でのデータはそれほど多くない。Nakos らは成人の急性呼吸不全患者 7 人で定常流型 TGI (6 l/分) を行い、換気量を一定に保った場合 25% Paco_2 が低下し、 Paco_2 を一定に保った場合一回換気量を 25% 減少させることができたとして報告している¹⁶⁾。Ravenscraft はさまざまな呼吸器疾患患者に¹⁷⁾、Belghith は成人呼吸窮迫症候群 (ARDS) 患者 6 人に定常流型 TGI を施行し²¹⁾、それぞれ 15%、22% の Paco_2 減少を報告している。Kuo らは ARDS 患者 20 人に定常流型 TGI (4~6 l/分) を行い Paco_2 が 13.3%~16.7% 低下したと報告している¹⁸⁾。最近 permissive hypercapnia の有用性が指摘されているが^{29)~31)}、急激に hypercapnia が進行すると呼吸性アシドーシスのために循環抑制や肺高血圧症を発生する²⁾。TGI は hypercapnia の急激な進行を抑えることができる。さらに TGI と permissive hypercapnia を組み合わせると、TGI により洗い流されるガスの CO_2 濃度が大きくなるので Paco_2 の下げ幅は大きくなる¹⁸⁾²⁰⁾²¹⁾²⁷⁾。

6) TGI と併用する人工呼吸モード

厳密に換気量をそろえた場合人工呼吸モードの選択は TGI の効果に余り影響を与えないと考えられる。Kuo によれば換気量をそろえた場合 TGI の効率は PCV と VCV との間で差がなかった¹⁸⁾。しかし異常高圧や換気量の増加など、TGI の副作用は併用する人工呼吸モードに左右される²²⁾²⁵⁾²⁶⁾。胸壁から振動を加えたり高頻度換気を併用すると末梢気道でガス交換が増大するため TGI の効果が増強するとの報告もある³³⁾³⁴⁾。

4. TGI の問題点

1) auto-PEEP

TGI は auto-PEEP を増大させ機能的残気量が增加する。理由として、噴出するジェット流のモーメントが肺泡レベルまで伝達される、TGI

カテーテルにより挿管チューブの有効断面積が減少する、TGI 流量が呼吸回路・呼吸弁を通過するために back pressure が上昇する、の 3 つで説明される¹³⁾¹⁴⁾。TGI ガスはカテーテルから気管内に高速で吹き出す。例えば 10 l/分の TGI 流量が断面積 1 mm² のカテーテルを通る場合、計算上の移動速度は 167 m/秒になる。われわれはモデル肺を用いて auto-PEEP (呼吸終末における気道内圧とモデル肺肺胞圧の差) の発生を調べた (図 3)²²⁾。auto-PEEP は TGI 流量が大きいほど、吸気時間が長いほど、患者の気道抵抗が大きいほど増加した。TGI を VCV と併用する場合に一回換気量を補正しないと非常に高値の auto-PEEP が観察される²²⁾。Nahum¹⁴⁾ は犬を用い定常流型 TGI (10 l/分) で機能的残気量が 53 ml 増加し、Belghith²¹⁾ は定常流型 TGI (4 l/分) により機能的残気量が 200 ml 増加した症例を報告している。auto-PEEP が発生すると PCV の換気のための駆動圧 (プラトー圧 - total PEEP)³⁵⁾ が低下するため、呼吸同期型 TGI を PCV と併用した場合には換気量が低下する²⁵⁾²⁶⁾。

2) 換気量の増大

PCV と定常流型 TGI を併用する場合、換気量が增大することがある。PCV による吸気流量と、TGI の定常流との合計が吸気時に供給されるが、人工呼吸器は PC レベルを保つべく TGI 流量の分だけ吸気流量を低下させて全体の換気量を保とうとする (図 4)。しかし人工呼吸器からの流量が吸気途中でゼロに達する (図 4 の*) と人工呼吸器からの制御が効かなくなる。すなわち人工呼吸器の呼吸弁は閉じたままで TGI 流量が患者に流れ込むので、換気量が増大する。これは設定吸気時間が長い、患者のコンプライアンスが低い場合著明になる。VCV と TGI を併用した場合、一回換気量の補正が十分でないと当然換気量は増大する。

3) 過剰な最高気道内圧

定常流型 TGI を VCV と併用する場合、auto-PEEP 増大のため最高気道内圧が増大するので applied PEEP を補正する必要がある。定常流型 TGI を PCV と併用する場合、換気量が増え気道内圧が設定値を上回ることがある (図 3)。pres-

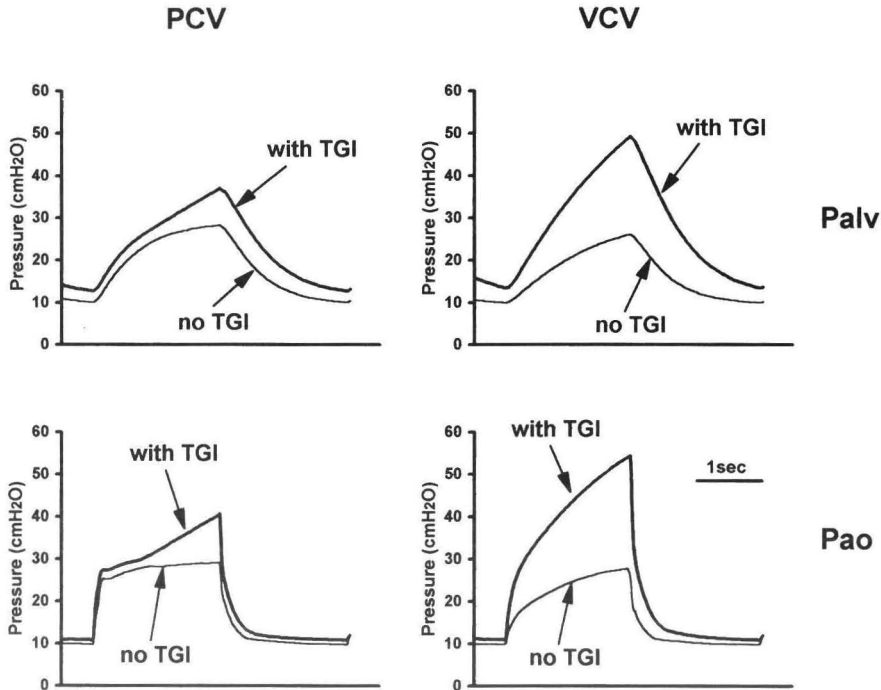


図3 定常流型 TGI での気道内圧曲線

上段：肺胞圧，下段：Yピースでの気道内圧

左が PCV，右が換気量補正を行っていない VCV。PCV では吸気途中から気道内圧が上昇し，設定圧（この場合 30 cmH₂O）を越える。TGI 施行に伴い呼気終末時の肺胞圧が上昇し，しかも気道内圧の上昇よりも著しい。auto-PEEP の増加を意味する。

TGI 流量=12 l/分，モデル肺のコンプライアンス 20 ml/cmH₂O，抵抗 20 cmH₂O/l/s，吸気時間=2 秒（文献 22 より改変のち引用）

sure relief valve を用いこの気道内圧の上昇を防ぐ工夫が報告されている³⁶⁾。

4) 人工呼吸器のモニター機能，アラーム機構を障害する

呼気時に TGI が流れていると，auto-PEEP が発生するばかりでなく，換気量のモニターも障害を受ける。成人人工呼吸器では呼気の換気量を測定しているものが多い。定常流型 TGI や呼気同期型 TGI では，呼気時に TGI 流量が流れているので，一回換気量が (TGI 流量×呼気時間) の分だけ大きく表示される。呼気換気量が大きく計算されるため，回路内にリークがあってもそれを検知することは難しくなる。

5) トリガーを障害する

自発呼吸をしている患者に TGI を実施する場合，補助呼吸のトリガーが問題となる。回路内に

定常流が流れるので圧トリガーも流量トリガーも鈍くなる。TGI により増加した auto-PEEP によりトリガーはさらに障害される³⁷⁾。

6) 安全性

TGI システムは個々の施設の手作りであり，安全性が十分確立しているとはいえない。挿管チューブが閉塞や狭窄を起こすと末梢気道に過剰な圧を引き起こす。細い TGI カテーテルから高流量の TGI 流量を流すので，TGI システムが高圧となり，リークや disconnection，加湿器破損を引き起こすことがある。

TGI ガスに加湿の程度が適正かどうかの評価は難しく，加湿不足から合併症を引き起こすおそれがある³⁸⁾。高速のジェット流により気管粘膜の障害を起こすおそれもある。気管内チューブ内腔から TGI カテーテルを挿入している場合，気管

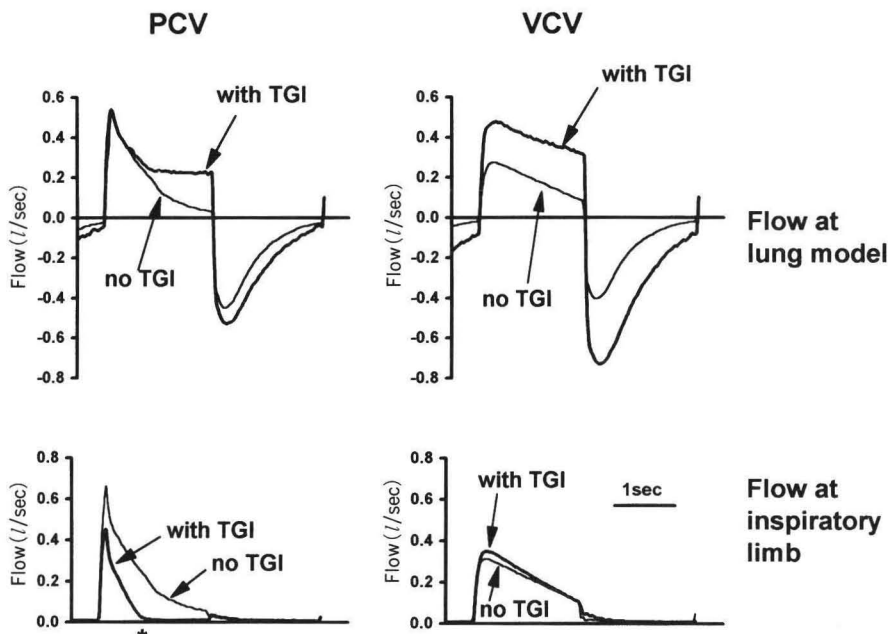


図 4 定常流型 TGI での流量曲線

上段；Y ピースでの流量，下段；吸気側回路での流量

左が PCV，右が換気量補正を行っていない VCV。PCV では人工呼吸器からの流量は吸気途中 (*) でゼロになる。その後も TGI 流量がモデル肺に流れ続けるため一回換気量は増大する。

TGI 流量=12 l/分，モデル肺のコンプライアンス 20 ml/cmH₂O，抵抗 20 cmH₂O/l/s，吸気時間=2 秒 (文献 22 より改変ののち引用)

内吸引操作や気管支ファイバースコープ検査の度に TGI カテーテルを抜去し，再挿入する必要が生じる。TGI カテーテルが誤って深くなった場合，片側肺に著明な air trapping を引き起こすかもしれないので，カテーテルが深くなりすぎないように注意を要する。時相特異的な TGI を行うためには gating 装置が必要だが，その安全性は確立していない。

5. TGI 中のモニタリングとアラーム

TGI の合併症を防ぐためには気道内圧や auto-PEEP をモニターする必要がある。

過剰な圧を防ぐためには気道内圧の絶対値だけでなく気道内圧波形をモニターした方がよい。定常流型 TGI を PCV と併用した場合気道内圧曲線および流量曲線は特徴的なパターンを示す(図 3, 4)。安全のため最高気道内圧アラームは予想

される値ぎりぎりに設定する。人工呼吸器の換気量モニターは TGI 流量，回路コンプライアンス，呼気時間から補正して解釈する必要がある。

respiratory inductive plethysmography (RIP) によって total PEEP や一回換気量を測定し補正することが可能であるが，TGI 適用の前に較正を行う必要がある¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁷⁾²³⁾²⁴⁾²⁷⁾。

capnograph で TGI の洗い出し効果をモニターすることができる。TGI により死腔の CO₂ が十分洗い流されれば，呼気終末に capnograph 上の CO₂ 濃度は低下する¹⁷⁾。すなわち呼気終末 CO₂ 濃度の低下が大きいほど Paco₂ 低下も著しくなる¹⁸⁾。ただし capnograph の値から Paco₂ の値を類推することはできない。

auto-PEEP を測定し applied PEEP を再調整する必要があるが，定常流型 TGI では auto-PEEP の測定は困難である。auto-PEEP の指標

として食道内圧，中心静脈圧などの胸腔内圧モニターや，RIP，機能的残気量を用いることができる。

まとめ

急性呼吸不全の呼吸管理の補助手段としてTGIは有用である。特に解剖学的死腔が増大している状態ではTGIは非常に有効であるが，肺胞死腔が増加している状態では PaCO_2 の低下はそれほど大きくない。またTGIは安全な施行方法が確立しているとはいえ十分な注意を要する。auto-PEEPの発生に十分注意し，applied PEEPや人工呼吸の換気量設定などを調整する必要がある。

参考文献

- 1) Corbridge TC, Wood LDH, Crawford GP, et al : Adverse effects of large tidal volume and low PEEP in canine acid aspiration. *Am Rev Respir Dis* 142 : 311-315, 1990
- 2) Dreyfuss D, Saumon G : Role of tidal volume, FRC, and end-inspiratory volume in the development of pulmonary edema following mechanical ventilation. *Am Rev Respir Dis* 148 : 1194-1203, 1993
- 3) Stresemann E, Votteri B, Sattler F : Washout of anatomical dead space for alveolar hypoventilation : preliminary case report. *Respiration* 26 : 425-434, 1969
- 4) Lehnert BE, Oberdorster G, Slutsky AS : Constant-flow ventilation of apneic dogs. *J Appl Physiol* 53 : 483-489, 1982
- 5) Sznajder JI, Nahum A, Crawford G, et al : Alveolar pressure inhomogeneity and gas exchange during constant-flow ventilation in dogs. *J Appl Physiol* 67 : 1489-1494, 1989
- 6) Hurewitz N, Bergofsky EH, Vomero E : Airway insufflation. Increasing flow rates progressively reduce dead space in respiratory failure. *Am Rev Respir Dis* 144 : 1229-1233, 1991
- 7) Couser JJ, Make BJ : Transtracheal oxygen decreases inspired minute ventilation. *Am Rev Respir Dis* 139 : 627-631, 1988
- 8) Slutsky AS, Watson J, Leith DE, et al : Tracheal insufflation of O_2 (TRIO) at low flow rates sustains life for several hours. *Anesthesiology* 63 : 278-286, 1985
- 9) Wilson JM, Thompson JR, Schnitzer JJ, et al : Intratracheal pulmonary ventilation and congenital diaphragmatic hernia : a report of two cases. *J Pediatr Surg* 28 : 484-487, 1993
- 10) Kolobow T, Powers T, Mandava S, et al : Intratracheal pulmonary ventilation (ITPV) : Control of positive end-expiratory pressure at the level of the carina through the use of a novel ITPV catheter design. *Anesth Analg* 78 : 455-461, 1994
- 11) Jonson B, Similowski T, Levy P, et al : Expiratory flushing of airways : a method to reduce deadspace ventilation. *Eur Respir J* 3 : 1202-1205, 1990
- 12) Nahum A, Burke WC, Ravenscraft SA, et al : Lung mechanics and gas exchange during pressure-control ventilation in dogs : augmentation of CO_2 elimination by an intratracheal catheter. *Am Rev Respir Dis* 146 : 965-973, 1992
- 13) Nahum A, Ravenscraft SA, Nakos G, et al : Tracheal gas insufflation during pressure-control ventilation : effect of catheter position, diameter, and flow rate. *Am Rev Respir Dis* 146 : 1411-1418, 1992
- 14) Nahum A, Ravenscraft SA, Nakos G, et al : Effect of catheter flow direction on CO_2 removal during tracheal gas insufflation in dogs. *J Appl Physiol* 75 : 1238-1246, 1993
- 15) Burke WC, Nahum A, Ravenscraft SA, et al : Modes of tracheal gas insufflation : comparison of continuous and phase-specific gas injection in normal dogs. *Am Rev Respir Dis* 148 : 562-568, 1993
- 16) Nakos G, Zakinthinos S, Kotanidou A, et al : Tracheal gas insufflation reduces the tidal volume while PaCO_2 is maintained constant. *Intensive Care Med* 20 : 407-413, 1994
- 17) Ravenscraft SA, Burke WC, Nahum A, et al : Tracheal gas insufflation augments CO_2 clearance during mechanical ventilation. *Am Rev Respir Dis* 148 : 345-351, 1993

- 18) Kuo P-H, Wu H-D, Yu C-J, et al : Efficacy of tracheal gas insufflation in acute respiratory distress syndrome with permissive hypercapnia. *Am J Respir Crit Care Med* 154 : 612-616, 1996
- 19) Nakos G, Lachana A, Prekates A, et al : Respiratory effects of tracheal gas insufflation in spontaneously breathing COPD patients. *Intensive Care Med* 21 : 904-912, 1995
- 20) Levy B, Bollaert PE, Nace L, et al : Intracranial hypertension and adult respiratory distress syndrome : usefulness of tracheal gas insufflation. *J Trauma* 39 : 799-801, 1995
- 21) Belghith M, Fierobe L, Brunet F, et al : Is tracheal gas insufflation an alternative to extrapulmonary gas exchangers in severe ARDS? *Chest* 107 : 1416-1419, 1995
- 22) Imanaka H, Kacmarek RM, Ritz R, et al : Tracheal gas insufflation—pressure control vs. volume control ventilation : a lung model study. *Am J Respir Crit Care Med* 153 : 1019-1024, 1996
- 23) Nahum A, Shapiro RS, Ravenscraft SA, et al : Efficacy of expiratory tracheal gas insufflation in a canine model of lung injury. *Am J Respir Crit Care Med* 152 : 489-495, 1995
- 24) Ravenscraft SA, Shapiro RS, Nahum A, et al : Tracheal gas insufflation : Catheter effectiveness determined by expiratory flush volume. *Am J Respir Crit Care Med* 153 : 1817-1824, 1996
- 25) Imanaka H, Riggi V, Hess D, et al : Continuous vs. expiratory phase tracheal gas insufflation during pressure control ventilation : a lung model study. (abstract) *Respiratory Care* 40 : 1196, 1995
- 26) Kirmse M, Imanaka H, Mang H, et al : Tracheal gas insufflation with a new double lumen endotracheal tube : a comparison of continuous vs. expiratory TGI during pressure control ventilation. (abstract) *Respiratory Care* 40 : 1196, 1995
- 27) Nahum A, Chandra A, Niknam J, et al : Effect of tracheal gas insufflation on gas exchange in canine oleic acid-induced lung injury. *Crit Care Med* 23 : 348-356, 1995
- 28) Danan C, Dassieu G, Janaud J-C, et al : Efficacy of dead-space washout in mechanically ventilated premature newborns. *Am J Respir Crit Care Med* 153 : 1571-1576, 1996
- 29) Hickling KG, Henderson SJ, Jackson R : Low mortality associated with low volume pressure limited ventilation with permissive hypercapnia in severe adult respiratory distress syndrome. *Intensive Care Med* 16 : 372-377, 1990
- 30) Hickling KG, Walsh J, Henderson S, et al : Low mortality rate in adult respiratory distress syndrome using low-volume, pressure-limited ventilation with permissive hypercapnia : a prospective study. *Crit Care Med* 22 : 1568-1578, 1994
- 31) Tuxen DV : Permissive hypercapnia. In Tobin MJ, editor. *Principles and practice of mechanical ventilation*. New York, McGraw-Hill, 371-392, 1994
- 32) Viitanen A, Salmenpera M, Heinonen J : Right ventricular response to hypercarbia after cardiac surgery. *Anesthesiology* 73 : 393-400, 1990
- 33) Dolan S, Derdak S, Solomon D, et al : Tracheal gas insufflation combined with high-frequency oscillatory ventilation. *Crit Care Med* 24 : 458-465, 1996
- 34) Gavriely N, Eckmann DM, Grotberg JB : Intra-airway gas transport during high-frequency chest vibration with tracheal insufflation in dogs. *J Appl Physiol* 79 : 243-250, 1995
- 35) Marini JJ : Pressure-controlled ventilation. In Tobin MJ, editor. *Principles and practice of mechanical ventilation*. New York, McGraw-Hill, 305-317, 1994
- 36) Gowski DT, Delgado E, Miro AM, et al : Effects of airway insufflation on peak airway pressure during pressure-control ventilation. (abstract) *Am J Respir Crit Care Med* 151 : A 428, 1995
- 37) Hoyt JD, Marini JJ, Nahum A : Effect of tracheal gas insufflation on demand valve triggering and total work during continuous

- positive airway pressure ventilation. Chest 110 : 775-783, 1996
- 38) Burton GG, Wagshul FA, Henderson D, et al : Fatal airway obstruction caused by a mucous ball from a transtracheal oxygen catheter. Chest 99 : 1520-1523, 1991
-