

# 気管・気管支形成術における高頻度ジェット換気法 使用に関する基礎的研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2017-10-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 村上, 眞也 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/7930">http://hdl.handle.net/2297/7930</a>

## 気管・気管支形成術における高頻度ジェット換気法 使用に関する基礎的研究

金沢大学医学部第一外科学講座 (主任：岩 喬教授)

村 上 眞 也

(昭和62年1月29日受付)

高頻度ジェット換気法 (High Frequency Jet Ventilation, HFJV)を用いて、気管・気管支形成術に関する動物実験を行った。すなわち、雑種成犬を用いて、種々の駆動条件下での血液ガス分圧および循環動態を測定し、その至適駆動条件について検討し、同時に HFJV による気道粘膜線毛の変化およびその再生について、走査電子顕微鏡にて検討した。HFJV 装置には HFO jet ventilator (泉工医科工業)を使用し、insufflation 方式には、外径 3.0 mm、内径 2.4 mm の強化ポリエチレン製チューブを使用した。結果は次のごとくである。sleeve lobectomy の際の補助換気として、術側残存肺の HFJV 併用は有用であり、駆動圧 0.5~1.0 kg/cm<sup>2</sup>、駆動回数 6~10 Hz が至適駆動条件であった。sleeve pneumonectomy の吻合操作中の換気は HFJV 単独で可能であり、駆動圧 1.0~2.0 kg/cm<sup>2</sup>、駆動回数 6~10 Hz が至適駆動条件であった。気管形成術、sleeve pneumonectomy において、駆動圧 1.0 kg/cm<sup>2</sup> の HFJV では IPPV と比較して、循環動態には著差は認められなかったが、駆動圧 2.0 kg/cm<sup>2</sup> では平均血圧、心拍出量に有意な低値を認めた。同一駆動圧下では、3 Hz で最も平均血圧、心拍出量の低下を認めた。HFJV チューブ先端は残存肺気管支分岐部 1~2 cm 口側が至適位置であった。それより残存肺気管支の長さが短いと、適切な換気が困難であった。気道粘膜については、駆動圧 1.0 kg/cm<sup>2</sup> の HFJV を 2 時間施行後には、気道粘膜線毛は不規則にもつれあい、互いに癒合していた。駆動圧 2.0 kg/cm<sup>2</sup> では 1.0 kg/cm<sup>2</sup> と比較して、線毛はより著しく乱れ、強度に癒合していた。同じ駆動圧下では線毛の乱れの程度は、駆動回数とは関連しなかった。駆動圧 2.0 kg/cm<sup>2</sup> の HFJV で破壊された線毛は、24 時間後には脱落し、2 日後には microvilli が認められ、3~4 日より線毛は再生し始め、10 日後ではほぼ完全に回復した。以上より、気管・気管支形成術に際し、HFJV にて術中呼吸管理を行うことができ、HFJV 用チューブは小口径であるため、良好な視野での吻合操作が可能であった。また、循環動態、気道粘膜障害の面から、なるべく低い駆動圧を使用することが望ましいと考えられた。

---

**Key words** 高頻度ジェット換気法, 気管・気管支形成術, 呼吸管理, 気道粘膜

---

近年、術前診断法、手術手技、縫合材料、術後管理などの進歩により、気管・気管支形成術は呼吸器外科の定型的手術術式の一つとしての地位を確立しつつある<sup>1-10)</sup>。しかし、術後吻合部合併症をはじめ、未解決の問題も少なくない。これら気道再建手術の成績を左右する重要な因子として、気道再建操作の容易性、確実性という点が指摘される<sup>11)12)</sup>。

これら気管・気管支形成術においては、術中換気法

と手術の難易性、確実性とは相反する関係にある。すなわち、従来使用されてきたような大口径チューブによる気道確保で間歇的陽圧換気法 (Intermittent Positive Pressure Ventilation, IPPV) を行えば、安全な換気が維持でき、呼吸管理は容易であるが、大口径チューブが吻合部を通過するため、気道再建操作に際して術野を障害する欠点がある。

一方、高頻度換気法 (High Frequency Ventilation,

---

Abbreviations: CO, cardiac output; HFJV, high frequency jet ventilation; HFO, high frequency oscillation; HFPPV, high frequency positive pressure ventilation; HFV, high frequency ventilation; HR, heart rate; IPPV, intermittent positive pressure ventilation;

HFV)は口径数mmの小口径チューブが吻合部を通過するのみで、換気を行うことが可能であり、気道再建に際して極めて好都合である。これまでも気管・気管支形成術にHFVを使用した報告は散見されるが<sup>13)~17)</sup>、その基礎的研究の報告はなく、至適駆動条件はいまだ確立されていない。

本研究では動物実験にて、HFVの一種である高頻度ジェット換気法(High Frequency Jet Ventilation, HFJV)を気管・気管支形成術に使用する際の至適駆動条件を、血液ガス分圧および循環動態より検討し、またHFJVによる気道粘膜線毛の変化およびその再生について、走査電子顕微鏡にて検討した。

### 対象および方法

#### I. HFJV 駆動条件と血液ガス分圧および循環動態について

##### 1. 実験モデルの作成

##### 1) 駆動条件と血液ガス分圧

体重10~18kgの雑種成犬10頭を使用し、塩酸ケタミン15mg/kgの筋肉内投与およびペントバルビタール15mg/kgの静脈内投与にて麻酔、バンクロニウムブロマイド4mgにて筋弛緩を行った。IPPV[ $\text{FIO}_2 = 0.5$ , 一回換気量12ml/kg, 換気回数20回/分], および種々の駆動条件[駆動ガス組成( $\text{FIO}_2$ ), 駆動圧(driving gas pressure), 駆動回数(frequency)]でのHFJVによる呼吸管理を行いつつ、右開胸、右上葉 sleeve lobectomy, および右側 sleeve pneumonectomyを施行した。各条件設定後は10分以上同じ条件で換気を行った後、大腿動脈血を採取しガス分圧を測定、また肺の振動を比較した(図1)。sleeve pneumonectomyの予備実験では、左主幹を気管分岐部直下にて切離し、左肺のHFJVを行ったが、犬では左主幹が約1cmと短く、適切な換気が困難であった。それゆえ本実験では、右側 sleeve pneumonectomyと同じ条件を設定するため、気管分岐部約1cm上で気管を切離しHFJVを行うこととした。

##### 2) カテーテルの位置と残存肺気管支の長さによる影響

HFJV insufflation カテーテルの至適位置と、残存末梢肺気管支の長さによる影響を検討した。体重9~11kgの雑種成犬5頭を使用した。右肺切除を行ったのち気管分岐部3cm口側にて気管を横切し、insufflation カテーテルの先端をそれぞれ左上・下幹分岐部

直上、気管分岐部、分岐部1cm口側、2cm口側に置き、 $\text{FIO}_2 = 0.5$ , 駆動圧2.0kg/cm<sup>2</sup>, 駆動回数6Hzの条件でHFJVを施行し、動脈血ガス分析を行った。更にinsufflation カテーテル先端を左上・下幹分岐部直上に置き、同一駆動条件でのHFJVを行いつつ、気管を気管分岐部2cm口側、1cm口側、分岐部にてそれぞれ切離し、同様に動脈血ガス分析を行った。

##### 3) 肺および体循環系への影響

HFJVによる肺および体循環系への影響を検討した。体重9~11kgの雑種成犬14頭を使用し、ケタミン15mg/kgの筋肉内投与後、大腿動脈に動脈内カテーテルを留置し、大腿静脈より左肺動脈にスワンガンツ・カテーテル(5Fr)を挿入した。ペントバルビタール15mg/kg, バンクロニウムブロマイド4mgにて非動化し、気管内挿管を行った。7頭においては、IPPV[ $\text{FIO}_2 = 0.3$ , 一回換気量15ml/kg, 換気回数20回/分]にて換気を行いつつ頸部気管を切離、insufflation カテーテルを先端が気管分岐部口側1~2cmに位置するように挿入し、種々の駆動条件[ $\text{FIO}_2 = 0.3$ , 駆動圧1~2kg/cm<sup>2</sup>, 駆動回数3~10Hz]でのHFJVにて呼吸管理を行った。他の7頭においては、IPPV[ $\text{FIO}_2 = 0.5$ , 一回換気量15ml/kg, 換気回数20回]にて換気しつつ、右側 sleeve pneumonectomyを施行後、HFJV[ $\text{FIO}_2 = 0.5$ , 駆動圧1~2kg/cm<sup>2</sup>, 駆動回数3~10Hz]にて呼吸管理を行った。各条件設定後は、10分以上、同じ条件で換気を行った後、血行動態と動脈血ガス分圧を測定した。

##### 2. HFJV 装置

HFJV装置にはHFO jet ventilator(泉工医科工業, 東京)を使用した。通常気管内チューブに装置するには、15ゲージのジェット針を、insufflation方式には、外径3.0mm, 内径2.4mmの強化ポリエチレン製のイラックス吸引チューブ(八光社, 長野市)の先端側孔部を切除し使用した。駆動圧は中枢側の圧とした。

##### 3. 測定装置

血液ガス分析装置には, PH/Blood-Gas analyzer (Instrument Laboratory, レキシントン市, 米国)を使用した。血行動態圧測定にはポリグラフ・システム(日本光電, 東京)を使用した。心拍出量はEdward Laboratories9520心拍出量計(Edward Laboratory, サンタアナ市, 米国)を用い、2回の測定値の平均値とした。

MBP, mean blood pressure; MPAP, mean pulmonary artery pressure; PCWP, pulmonary capillary wedge pressure; PVR, pulmonary vascular resistance; RAP, right atrial pressure; SVR, systemic vascular resistance.

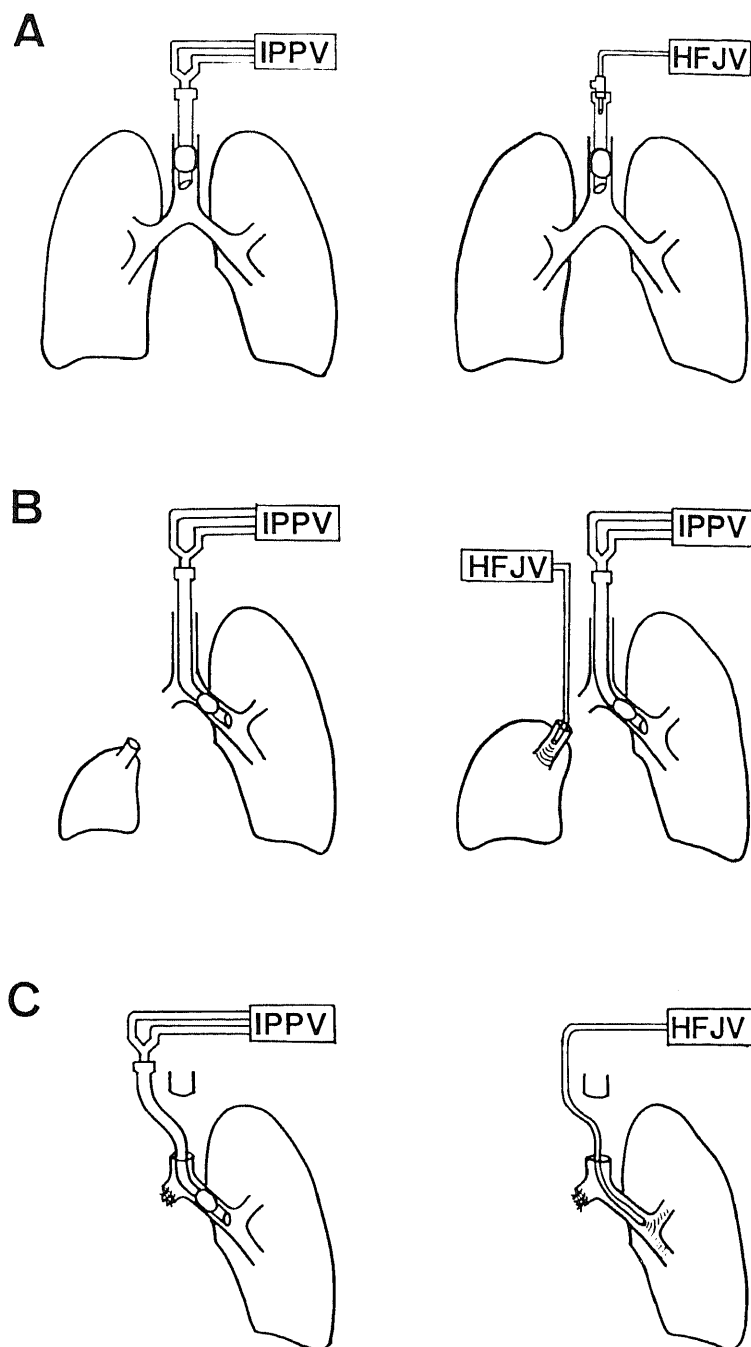


Fig. 1. Schematic presentation of ventilation methods in experiment 1.

For HFJV, HFO jet ventilator (Mera Co., Tokyo) was employed. A, ventilation at right thoracotomy; B, ventilation at sleeve right upper lobectomy; C, ventilation at right sleeve pneumonectomy. IPPV, intermittent positive pressure ventilation; HFJV, high frequency jet ventilation.

#### 4. 測定項目

血液ガス分析の指標には、PH, PaO<sub>2</sub>, PaCO<sub>2</sub> を使用した。血行動態の指標としては、心拍数 (HR), 平均血圧 (MBP), 平均肺動脈圧 (MPAP), 肺動脈楔入圧 (PCWP), 右房圧 (RAP), 心拍出量 (CO), 体血管低抗 (SVR), 肺血管低抗 (PVR) を用い、算出は下式によった。

$$SVR = \frac{80 (MBP - RAP)}{CO}$$

$$PVR = \frac{80 (MPAP - PCWP)}{CO}$$

#### 5. 統計学的処理

各指標は、平均値 (mean) または平均値 ± 標準偏差 (mean ± S.D.) で表示し、比較には Student's t-test を用い、 $p < 0.05$  をもって有意と判定した。

#### II. HFJV による気道粘膜線毛の変化について

##### 1. 実験モデルの作成

体重 9~11 kg の雑種成犬 21 頭を使用し、次の 5 群に分けた。

A 群 (2 頭): コントロール。

B 群 (2 頭): 塩酸ケタミン 15 mg/kg で麻酔後、通常気管内チューブに 15 ゲージのジェット針を直結装

置し、駆動圧 2.0 kg/cm<sup>2</sup>, 駆動回数 10 Hz の HFJV を 2 時間施行、直ちに屠殺した。

C 群 (4 頭): 同様に麻酔挿管後、小口径チューブを胸部気管に挿入、その先端を気管分岐部約 2 cm 口側に位置させ、insufflation 方式にて、1.0 kg/cm<sup>2</sup>, 3~10 Hz の HFJV を 2 時間施行、直ちに屠殺した。

D 群 (4 頭): C 群と同様の insufflation 方式にて、2.0 kg/cm<sup>2</sup>, 3~10 Hz の HFJV を 2 時間施行、直ちに屠殺した。

E 群 (9 頭): C 群と同様の insufflation 方式にて、2.0 kg/cm<sup>2</sup>, 10 Hz の HFJV を 2 時間施行、1~14 日後に屠殺した。

#### 2. 標本の作製および観察

実験犬は屠殺後、すみやかに分岐部直上の気管および右下葉支の粘膜を採取し、生理食塩水で噴射洗浄して粘液を除去、2.5% グルタルアルデハイド (0.1 M カコジール酸緩衝液, pH 7.4) にて 2 時間の前固定を行い、ついで 2% オスミウム酸 (3% サッカロース + 0.1 M カコジール酸緩衝液, pH 7.4) にて 2 時間の後固定を行った。さらに上昇アルコール系列にて脱水、酢酸イソアミルを中間液として使用後、臨界点乾燥装置 (日立製作所, 東京) にて乾燥し、資料台に固定後、金パラジウムを蒸着した。走査電子顕微鏡 HFS-2 型 (日立製作所, 東京) にて鏡検、写真撮影を行った。

#### 成 績

##### I. 駆動条件と血液ガス分圧

##### 1. 右開胸 (図 2)

IPPV では PaO<sub>2</sub> 130.1 ± 31.6 torr, PaCO<sub>2</sub> 39.4 ± 6.5 torr, pH 7.36 ± 0.06 であった。FIO<sub>2</sub> = 0.5, 駆動圧 1.0 kg/cm<sup>2</sup>, 駆動回数 6 Hz の HFJV では PaO<sub>2</sub> 113.4 ± 39.3 torr, PaCO<sub>2</sub> 29.3 ± 9.2 torr, pH 7.46 ± 0.09 であり、術野の振動は手術操作の障害とはならない程度であった。3 Hz では PaO<sub>2</sub> 108.8 ± 33.2 torr, PaCO<sub>2</sub> 14.5 ± 5.4 torr, pH 7.63 ± 0.08 と CO<sub>2</sub> の排出過多があり、また術野の振動は 6 Hz よりも大きかった。駆動圧を 0.5 kg/cm<sup>2</sup> とすると、3 Hz, 6 Hz とともに PaO<sub>2</sub> の軽度低下があり、3 Hz ではやはり CO<sub>2</sub> の排出過多が認められた。

##### 2. 右側上葉 sleeve lobectomy (図 3)

左片側 IPPV のみでは PaO<sub>2</sub> 64.8 ± 14.8 torr, PaCO<sub>2</sub> 36.6 ± 10.4 torr, pH 7.36 ± 0.10 であった。この際、術側残存肺に FIO<sub>2</sub> = 0.5, 駆動圧 1.0 kg/cm<sup>2</sup>, 駆動回数 6 Hz の HFJV を併用すると、PaO<sub>2</sub> 130.4 ± 54.5 torr, PaCO<sub>2</sub> 27.0 ± 10.2 torr, pH 7.45 ± 0.10 となった。駆動圧を 0.5 kg/cm<sup>2</sup> とすると、駆動回数 6 Hz の HFJV 併用では、PaO<sub>2</sub> 121.4 ± 48.9 torr,

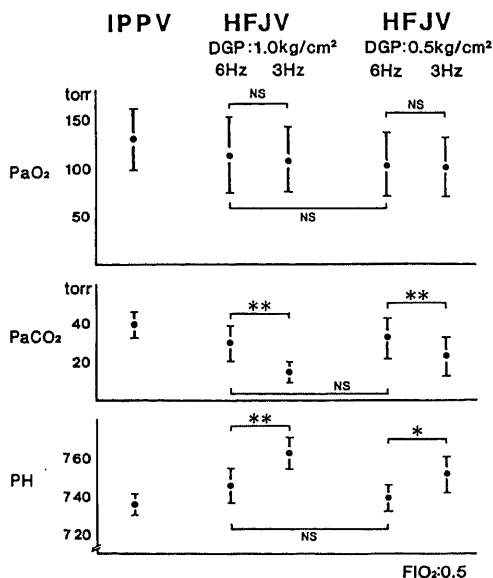


Fig. 2. Blood gas analyses at right thoracotomy. Ventilation was maintained by IPPV at first, and then by various setting of HFJV. IPPV, intermittent positive pressure ventilation; HFJV, high frequency jet ventilation; DGP, driving gas pressure; Hz, hertz; FIO<sub>2</sub>, inspired fraction of oxygen. Each value represents mean ± S.D. \*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; NS, not significant. Student's t-test.

$\text{PaCO}_2$   $28.8 \pm 11.2$  torr, pH  $7.44 \pm 0.10$  となり、ともに IPPV に HFJV を併用することにより、IPPV 単独と比較して有意 ( $p < 0.01$ ) に  $\text{PaO}_2$  が上昇した。また術側残存肺の HFJV による振動は吻合の障害とはならない程度であった。

### 3. 右側 sleeve pneumonectomy (図4)

通常気管内チューブを左主幹に挿入しての IPPV では、 $\text{PaO}_2$   $143.1 \pm 69.7$  torr,  $\text{PaCO}_2$   $30.2 \pm 13.7$  torr, pH  $7.40 \pm 0.12$  であった。HFJV insufflation カテーテルを左主幹に挿入、その先端が左上・下幹分岐部直上に位置するようにし、 $\text{FIO}_2 = 0.5$ 、駆動圧  $1.0 \text{ kg/cm}^2$ 、駆動回数  $6 \text{ Hz}$  の HFJV を施行すると、 $\text{PaO}_2$   $72.3 \pm 51.0$  torr,  $\text{PaCO}_2$   $26.7 \pm 16.3$  torr, pH  $7.46 \pm 0.16$  と  $\text{PaO}_2$  の低値が認められた。ここで駆動圧を  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  に上昇させると、同じ駆動回数 ( $6 \text{ Hz}$ ) でも  $\text{PaO}_2$   $111.1 \pm 74.3$  torr,  $\text{PaCO}_2$   $16.2 \pm 9.7$  torr, pH  $7.57 \pm 0.16$  と  $\text{PaO}_2$  は有意 ( $p < 0.01$ ) に上昇した。この際、対側肺はやや過膨張となったが、吻合操作の障害とはならない程度であった。駆動回数  $3 \text{ Hz}$  では  $\text{PaO}_2$

$151.2 \pm 92.3$  torr,  $\text{PaCO}_2$   $9.5 \pm 6.7$  torr, pH  $7.67 \pm 0.13$  と  $\text{PaO}_2$  は上昇したが  $\text{CO}_2$  の排出過多があり、また対側肺の過膨張が増大した。一方、駆動回数を  $10 \text{ Hz}$  とすると  $\text{PaO}_2$   $136.7 \pm 90.8$  torr,  $\text{PaCO}_2$   $17.4 \pm 13.1$  torr, pH  $7.54 \pm 0.14$  であった。

## II. カテーテル位置と残存肺気管支の長さによる影響

### 1. HFJV insufflation カテーテルの位置による影響

右肺切除および気管分岐部  $3 \text{ cm}$  口側にて気管を切離し、 $\text{FIO}_2 = 0.5$ 、駆動圧  $2.0 \text{ kg/cm}^2$ 、駆動回数  $6 \text{ Hz}$  の駆動条件で HFJV を施行した (図5)。カテーテル先端が左上・下幹分岐部直上にあるとき、 $\text{PaO}_2$   $217.7 \pm 47.4$  torr,  $\text{PaCO}_2$   $8.45 \pm 2.09$  torr, pH  $7.71 \pm 0.13$  であった。カテーテル先端が気管分岐部にある時は  $\text{PaO}_2$   $239.8 \pm 43.4$  torr,  $\text{PaCO}_2$   $6.23 \pm 1.84$  torr, pH  $7.75 \pm 0.13$  と  $\text{PaO}_2$  は軽度上昇した。カテーテル

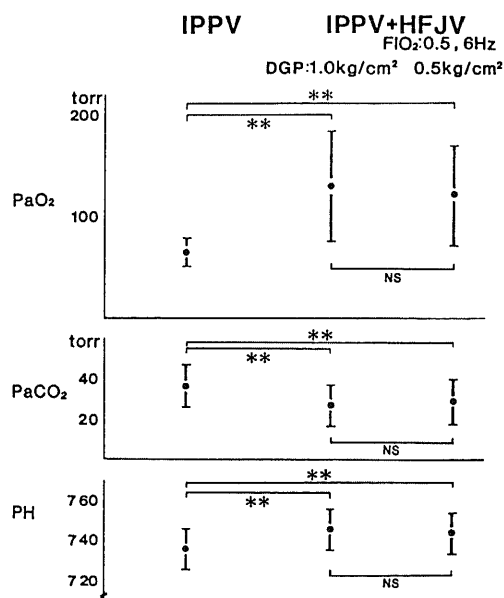


Fig.3. Blood gas analyses at sleeve right upper lobectomy.

Ventilation was maintained by IPPV of left lung alone at first, and then HFJV to the reconstructing lung in the affected lung was supplemented. IPPV, intermittent positive pressure ventilation; HFJV, high frequency jet ventilation; DGP, driving gas pressure; Hz, hertz;  $\text{FIO}_2$ , inspired fraction of oxygen. Each value represents mean  $\pm$  S.D.. \*\*,  $p < 0.01$ ; NS, not significant. Student's t-test.

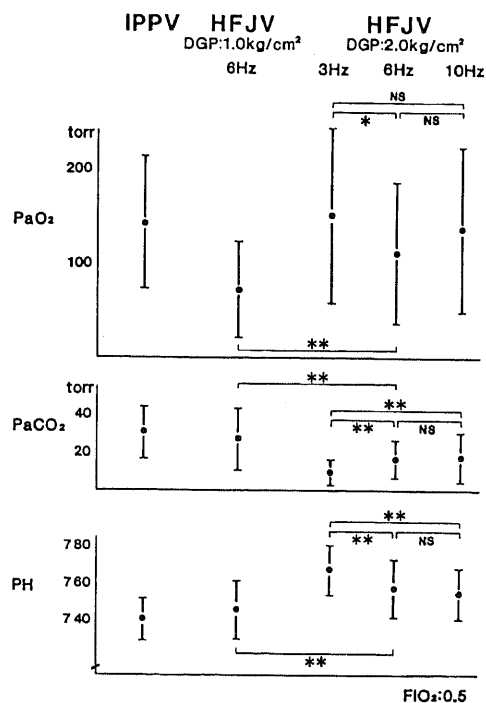


Fig.4. Blood gas analyses at right sleeve pneumonectomy.

Ventilation was maintained by IPPV at first, and then by various setting of HFJV. IPPV, intermittent positive pressure ventilation; HFJV, high frequency jet ventilation; DGP, driving gas pressure; Hz, hertz;  $\text{FIO}_2$ , inspired fraction of oxygen. Each value represents mean  $\pm$  S.D.. \*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; NS, not significant. Student's t-test.

先端が気管分岐部 1 cm 口側, 2 cm 口側では血液ガス分析値の差は認められなかった。

## 2. 残存肺気管支の長さによる影響

HFJV insufflation カテーテル先端を左上・下幹分岐部直上に置き,  $\text{FIO}_2 = 0.5$ , 駆動圧  $2.0 \text{ kg/cm}^2$ , 駆動回数  $6 \text{ Hz}$  の駆動条件での HFJV を施行しつつ, 気管を徐々に短く切離した (図 6). 残存肺気管支が短くなるにつれ,  $\text{PaO}_2$  の低下,  $\text{PaCO}_2$  の上昇が認められた。気管分岐部で切離し残存肺気管支が約 1 cm の場合は,  $\text{PaO}_2$   $65.9 \pm 27.4 \text{ torr}$ ,  $\text{PaCO}_2$   $12.4 \pm 5.8 \text{ torr}$ ,  $\text{pH}$   $7.59 \pm 0.10$  と  $\text{PaO}_2$  が最も低値を示した。

## III. 肺および体循環系への影響

1. 気管形成応用時の循環動態および血液ガス分圧  
頸部に気管を切離し, insufflation カテーテル先端が気管分岐部口側 1~2 cm に来るように挿入し, HFJV にて呼吸管理を行った。心拍数は駆動圧  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  では軽度減少したが有意ではなかった。平均血圧は駆動圧  $1.0 \text{ kg/cm}^2$  の HFJV では IPPV と比

較して有意差はなかったが, 駆動圧  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  では有意 ( $p < 0.05$ ) に下降した。同一駆動圧下では  $3 \text{ Hz}$  で最も低値を示した (図 7)。平均肺動脈圧には変化は認められなかった。肺動脈楔入圧は駆動圧  $1.0 \text{ kg/cm}^2$  の HFJV で IPPV と比較して有意差はなかったが, 駆動圧  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  では有意 ( $p < 0.05$ ) に上昇した (図 7)。右房圧も同様に駆動圧  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  の HFJV では IPPV と比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に上昇した (図 7)。心拍出量は IPPV と比較して, 駆動圧  $1.0 \text{ kg/cm}^2$ , 駆動回数  $3 \text{ Hz}$  の HFJV では有意 ( $p < 0.05$ ) に低下したが,  $6 \sim 10 \text{ Hz}$  ではこのような低下はみられなかった。駆動圧  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  の HFJV では有意 ( $p < 0.05$ ) に低値であった。同一駆動圧下では  $6 \sim 10 \text{ Hz}$  と比較して,  $3 \text{ Hz}$  で有意 ( $p < 0.01$ ) に減少した (図 8)。体血管低抗はいずれの駆動条件下でも著変は認められなかった (図 8)。肺血管低抗は駆動圧  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  の HFJV では軽度上昇した。同一駆動圧下では  $6 \sim 10 \text{ Hz}$  と比較して,  $3 \text{ Hz}$  で有意 ( $p < 0.05$ ) に高値を

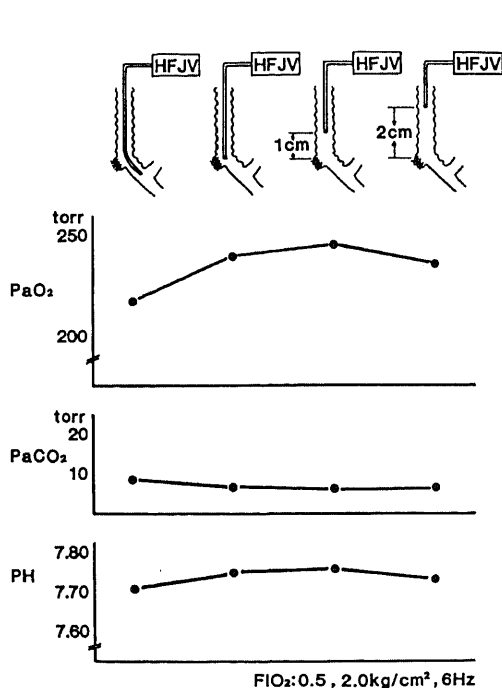


Fig. 5. Effect of the location of HFJV tube.

For evaluation of the most optimal location of the catheter tip for adequate maintenance of HFJV, insufflation HFJV were done at various levels in the tracheo-bronchial tree which had transected 3 cm above the carina after right pneumonectomy. HFJV, high frequency jet ventilation;  $\text{FIO}_2$ , inspired gas fraction. Each value represents mean.

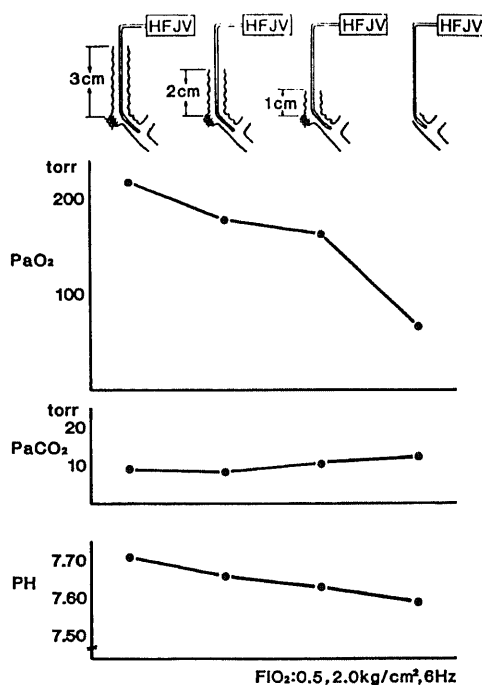


Fig. 6. Effect of the bronchial length of the remaining lung.

At first, insufflation catheter tip was located just above the bifurcation in the tracheo-bronchial tree which had transected 3 cm above the carina after right pneumonectomy. Trachea was shortened 1 cm by degree. HFJV, high frequency jet ventilation  $\text{FIO}_2$ , inspired gas fraction. Each value represents mean.

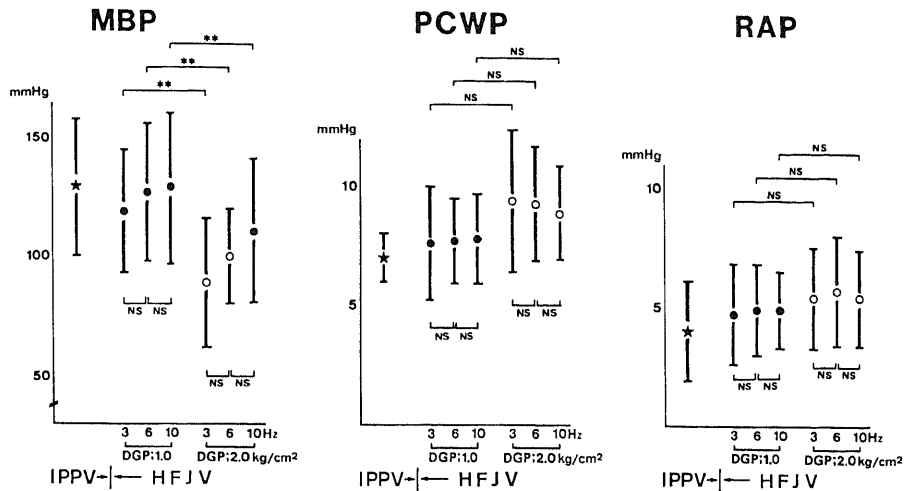


Fig. 7. Mean blood pressure, pulmonary capillary wedge pressure and right atrial pressure at the model of tracheoplasty.

Insufflation HFJV was done after trachea was transected at the neck. MBP, mean blood pressure; PCWP, pulmonary capillary wedge pressure; RAP, right atrial pressure; IPPV, intermittent positive pressure ventilation; HFJV, high frequency jet ventilation; DGP, driving gas pressure; Hz, hertz. Each value represents mean  $\pm$  S.D.  $\bullet$ , statistically not different from  $\star$ ;  $\circ$ , statistically different from  $\star$  by  $p < 0.05$ .  $\star$ ,  $p < 0.05$ ;  $\star\star$ ,  $p < 0.01$ ; NS, not significant. Student's t-test.

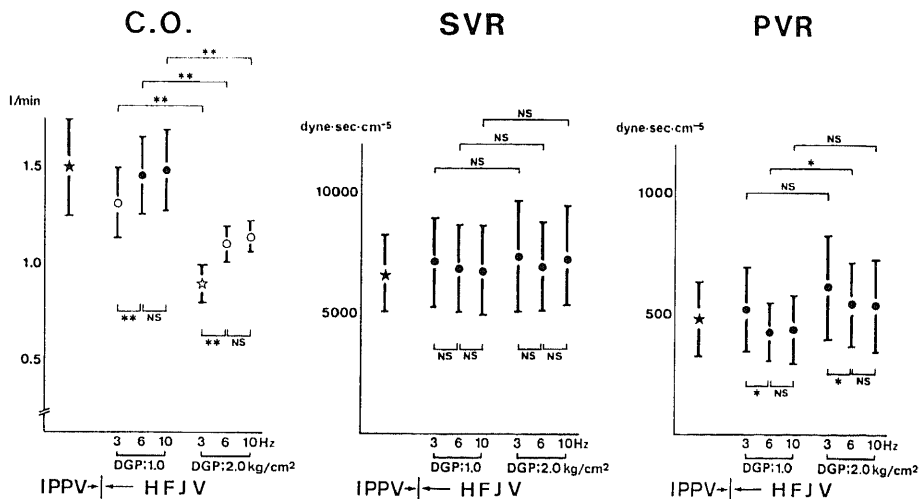


Fig. 8. Cardiac output, systemic vascular resistance and pulmonary vascular resistance at the model of tracheoplasty.

Insufflation HFJV was done after trachea was transected at the neck. CO, cardiac output; SVR, systemic vascular resistance; PVR, pulmonary vascular resistance; IPPV, intermittent positive pressure ventilation; HFJV, high frequency jet ventilation; DGP, driving gas pressure; Hz, hertz. Each value represents mean  $\pm$  S.D.  $\bullet$ , statistically not different from  $\star$ ;  $\circ$ , statistically different from  $\star$  by  $p < 0.05$ ;  $\star$ , statistically different from  $\star$  by  $p < 0.01$ .  $\star$ ,  $p < 0.05$ ;  $\star\star$ ,  $p < 0.01$ ; NS, not significant. Student's t-test.



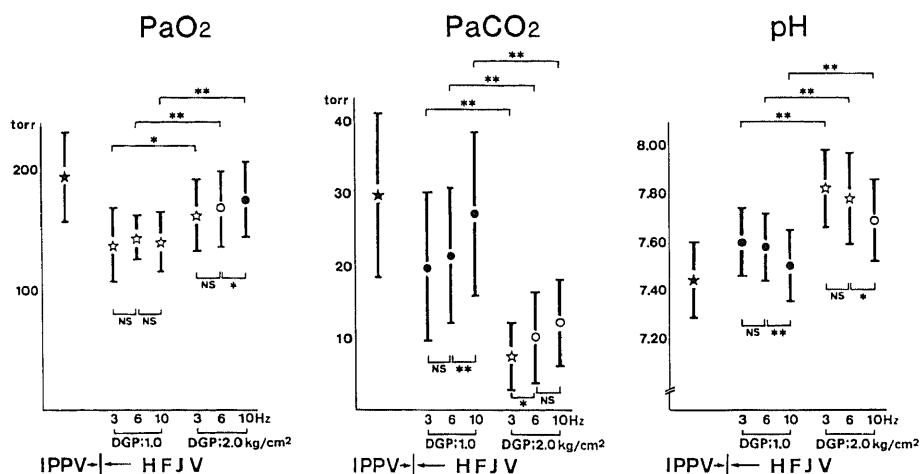


Fig. 9. Blood gas analyses at the model of tracheoplasty.

Insufflation HFJV was done after trachea was transected at the neck. IPPV, intermittent positive pressure ventilation; HFJV, high frequency jet ventilation; DGP, driving gas pressure; Hz, hertz. Each value represents mean  $\pm$  S.D.. ●, statistically not different from ★; ○, statistically different from ★ by  $p<0.05$ ; ☆, statistically different from ★ by  $p<0.01$ . \*,  $p<0.05$ ; \*\*,  $p<0.01$ ; NS, not significant. Student's t-test.

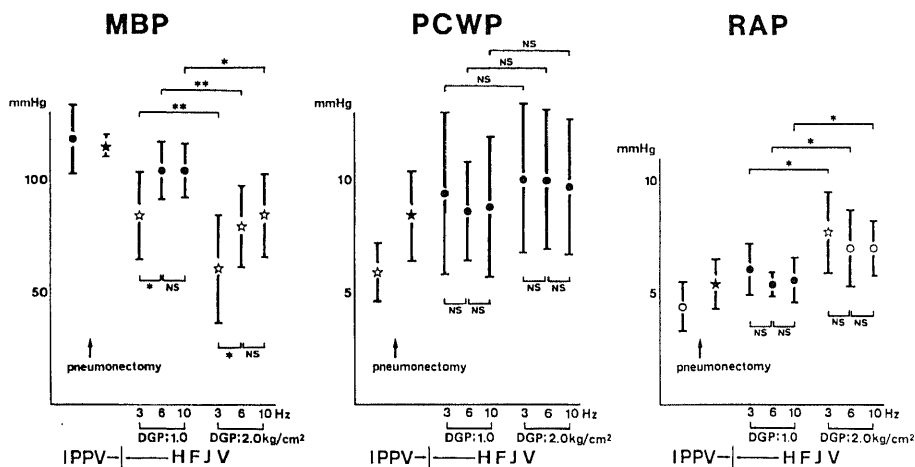


Fig. 10. Mean blood pressure, pulmonary capillary wedge pressure and right atrial pressure at the model of right sleeve pneumonectomy.

Insufflation HFJV of the left lung was done after right pneumonectomy. MBP; mean blood pressure; PCWP, pulmonary capillary wedge pressure; RAP, right atrial pressure; IPPV, intermittent positive pressure ventilation; HFJV, high frequency jet ventilation; DGP, driving gas pressure. Each value represents mean  $\pm$  S.D.. ●, statistically not different from ★; ○, statistically different from ★ by  $p<0.05$ ; ☆, statistically different from ★ by  $p<0.01$ ; \*,  $p<0.05$ ; \*\*,  $p<0.01$ ; NS, not significant. Student's t-test.

認めた (図8).  $\text{PaO}_2$  は駆動圧  $1.0 \text{ kg/cm}^2$  の HFJV では IPPV と比較して有意 ( $p < 0.01$ ) に低値であった. 駆動圧  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  では軽度の下降であった (図9).  $\text{PaCO}_2$  は駆動圧  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  の HFJV では IPPV と比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に低値であった. 同一駆動圧下では  $3 \text{ Hz}$  で最も  $\text{PaCO}_2$  が低値となった (図9).  $\text{pH}$  は駆動圧  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  の HFJV では有意 ( $p < 0.05$ ) に上昇し, 同一駆動圧下では  $3 \text{ Hz}$  で最も高値であった (図9).

## 2. Sleeve pneumonectomy 応用時の循環動態および血液ガス分圧

心拍数には変化は認められなかった. 平均血圧は IPPV と比較して, 駆動圧  $1.0 \text{ kg/cm}^2$ , 駆動回数  $3 \text{ Hz}$  の HFJV では有意 ( $p < 0.01$ ) に低下したが,  $6 \sim 10 \text{ Hz}$  では血圧低下は軽度であった. 駆動圧  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  の HFJV では有意 ( $p < 0.01$ ) に低下した. 同一駆動圧下では  $6 \sim 10 \text{ Hz}$  と比較して,  $3 \text{ Hz}$  で有意 ( $p < 0.01$ ) に低値であった (図10). 平均肺動脈圧には変化は認められなかった. 肺動脈楔入圧は駆動圧  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  の HFJV では IPPV と比較して軽度上昇したが, 有意でなかった (図10). 右房圧は駆動圧  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  の HFJV では IPPV と比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に上昇した (図10). 心拍出量は IPPV と比較して, 駆動圧  $1.0 \text{ kg/cm}^2$  駆動回数  $3 \text{ Hz}$  の HFJV では軽度低下したが,  $6 \sim 10 \text{ Hz}$  ではほぼ同値であった. 駆動圧  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  の HFJV では有意 ( $p < 0.05$ ) に低値であ

た. 同一駆動圧下では  $6 \sim 10 \text{ Hz}$  と比較して,  $3 \text{ Hz}$  では低値であった (図11). 体血管低抗は駆動圧  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  の HFJV では減少傾向を示した. 同一駆動圧下では  $3 \text{ Hz}$  で最も低値であった (図11). 肺血管低抗は駆動圧  $1.0 \text{ kg/cm}^2$  の HFJV では IPPV と比較して変化は認められなかったが, 駆動圧  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  では上昇し, とくに  $3 \text{ Hz}$  では有意 ( $p < 0.05$ ) に上昇した (図11).  $\text{PaO}_2$  は駆動圧  $1.0 \text{ kg/cm}^2$  の HFJV では IPPV と比較して低値を示したが, 有意の低下ではなかった. 駆動圧を  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  とすると  $\text{PaO}_2$  の改善が認められた (図12).  $\text{PaCO}_2$  は駆動圧  $1.0 \text{ kg/cm}^2$  の HFJV では IPPV と比較して低値であったが, 有意ではなかった. 駆動圧  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  の HFJV では有意 ( $p < 0.01$ ) に低値であった. 同一駆動圧下では  $3 \text{ Hz}$  で最も  $\text{PaCO}_2$  が低値であった (図12).  $\text{pH}$  は駆動圧  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  の HFJV では有意 ( $p < 0.05$ ) に上昇し, 同一駆動圧下では  $3 \text{ Hz}$  で最も高値であった (図12). 駆動圧  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  では対側肺はやや過膨張となった. また, 駆動回数が  $3 \text{ Hz}$  では  $6 \sim 10 \text{ Hz}$  と比較して縦隔の動揺が激しかった.

## IV. HFJV による気道粘膜変化

### 1. 正常気道粘膜 (A 群)

正常気道粘膜は長さのほぼ均等な多数の線毛でおおわれており, 線毛は互いに癒合することはなく, また線毛の走行は整然と一定の方向に配列していた (図13). これらの所見は気管粘膜と右下葉気管支粘膜とで

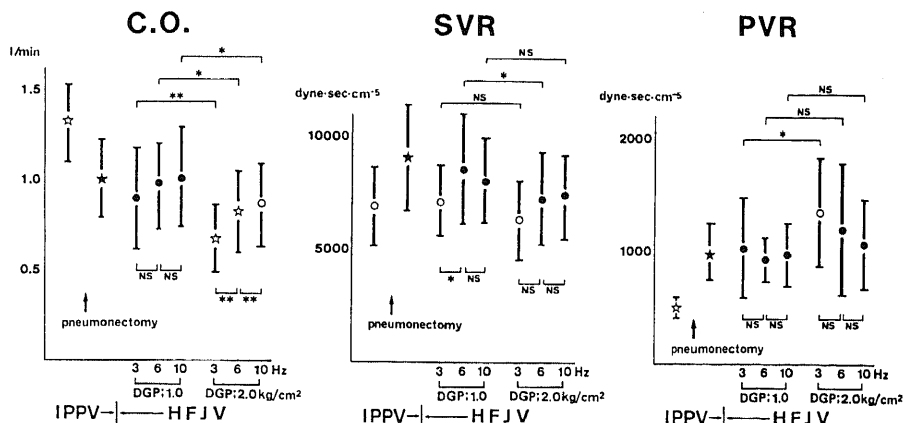


Fig. 11. Cardiac output, systemic vascular resistance and pulmonary vascular resistance at the model of right sleeve pneumonectomy. Insufflation HFJV of the left lung was done after right pneumonectomy. CO, cardiac output; SVR, systemic vascular resistance; PVR, pulmonary vascular resistance; IPPV, intermittent positive pressure ventilation; HFJV, high frequency jet ventilation; DGP, driving gas pressure. Each value represents mean  $\pm$  S.D. ●, statistically not different from ★; ○, statistically different from ★ by  $p < 0.05$ ; ☆, statistically different from ★ by  $p < 0.01$ . \*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; NS, not significant. Student's t-test.

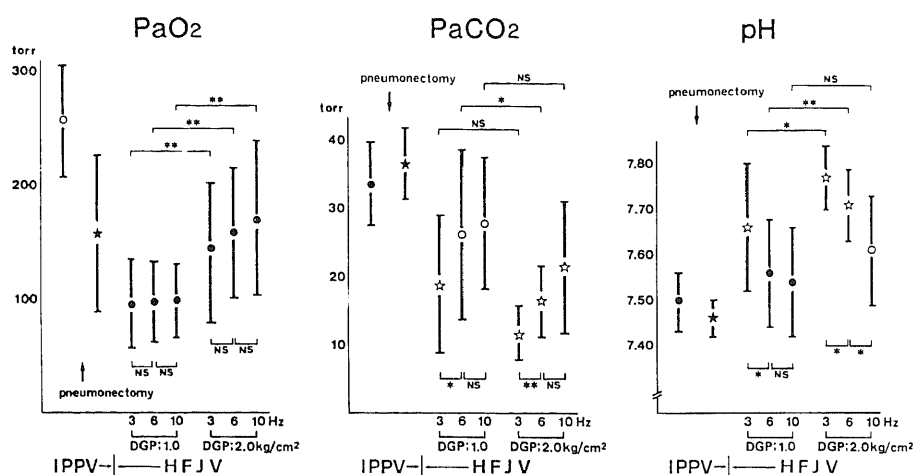


Fig. 12. Blood gas analyses at the model of right sleeve pneumonectomy.

Insufflation HFJV of the left lung was done after right pneumonectomy. IPPV, intermittent positiv pressure ventilation; HFJV, high frequency jet ventilation; DGP, driving gas pressure. Each value represents mean  $\pm$  S.D.. ●, statistically not different from ★; ○, statistically different from ★ by  $p < 0.05$ ; ☆, statistically different from ★ by  $p < 0.01$ . \*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; NS, not significant. Student's t-test.

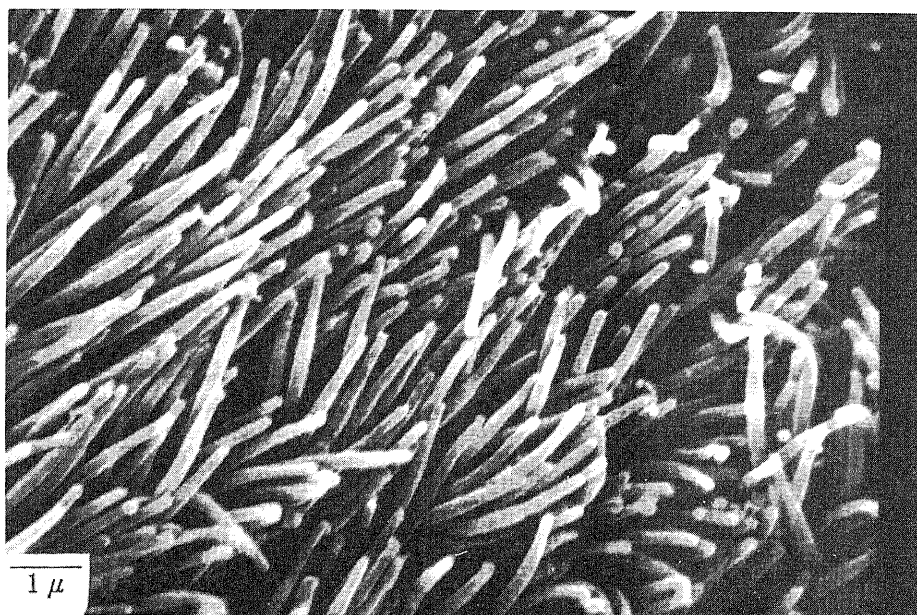


Fig. 13. Scanning electron micrograph of the tracheo-bronchial mucosa of the control group. Uniform array of the normal cilia is seen. This finding is equally seen trachea and right lower bronchus.

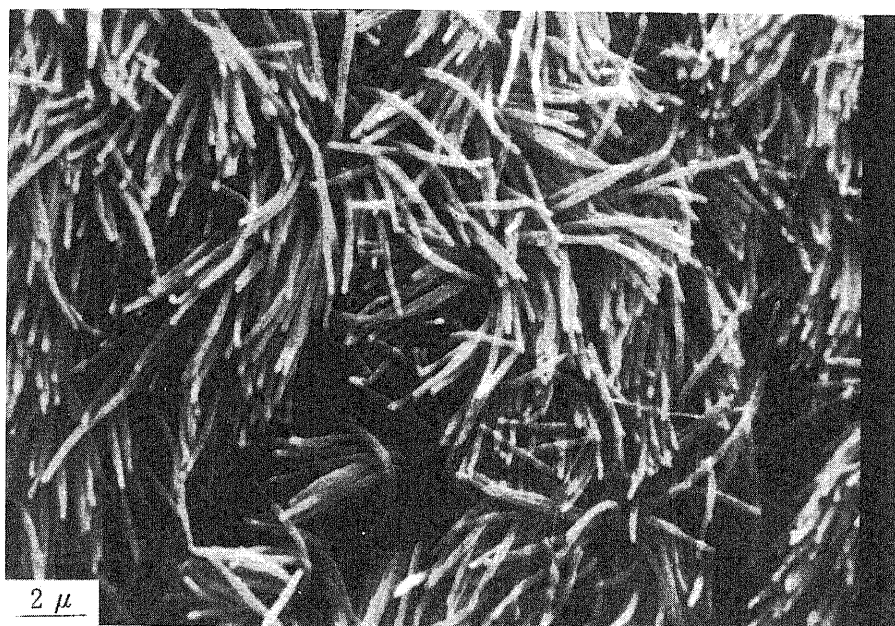


Fig. 14. Scanning electron micrograph of the tracheo-bronchial mucosa after HFJV through conventional tracheal tube.  
The array of cilia is disoriented.

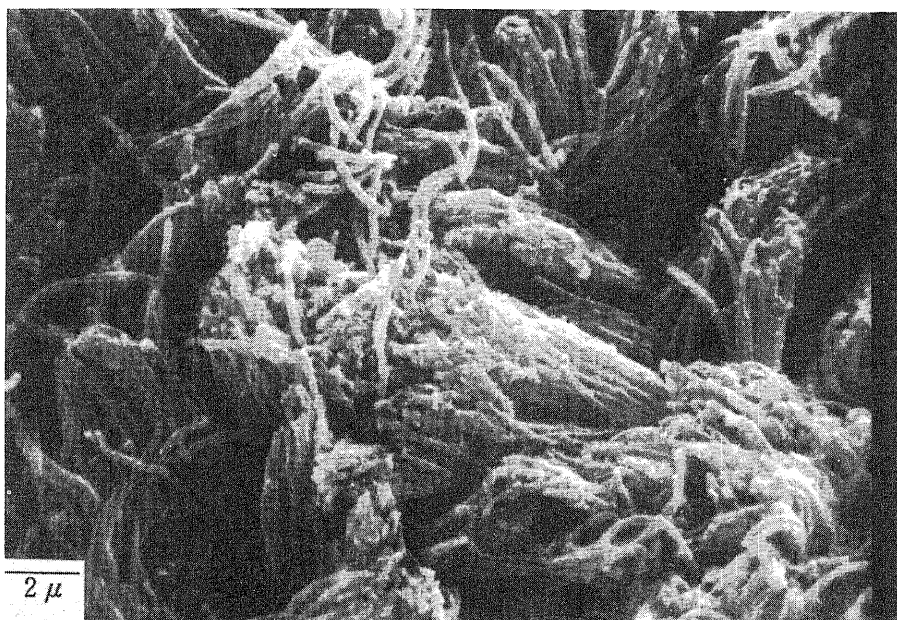


Fig. 15. Scanning electron micrograph of the tracheo-bronchial mucosa after insufflation HFJV of driving gas pressure of 1.0 kg/cm<sup>2</sup>. The cilia are irregularly tangled and adhered to each other.

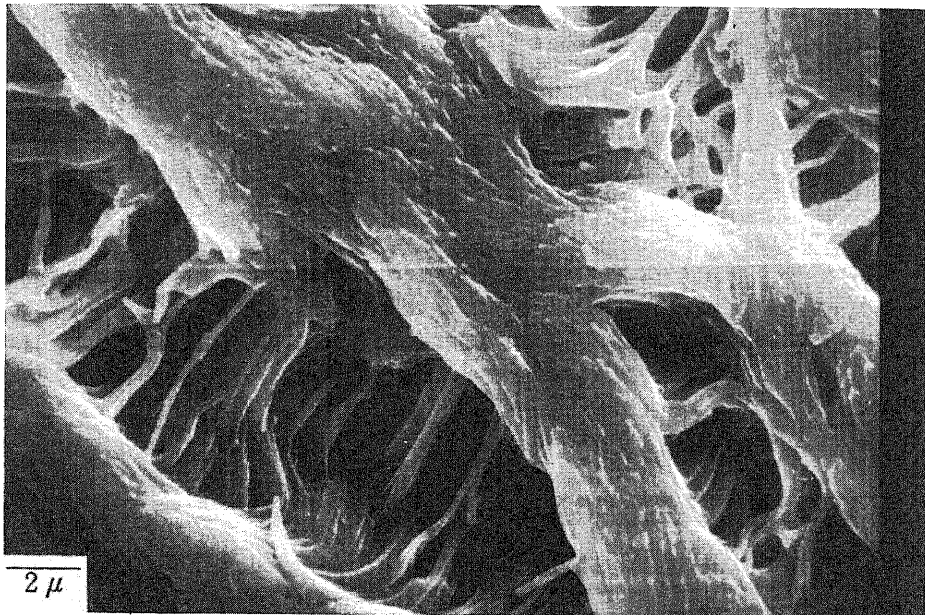


Fig. 16. Scanning electron micrograph of the tracheo-bronchial mucosa after insufflation HFJV of driving gas pressure of 2.0 kg/cm<sup>2</sup>. The cilia are severely deteriorated and adhered to each other.

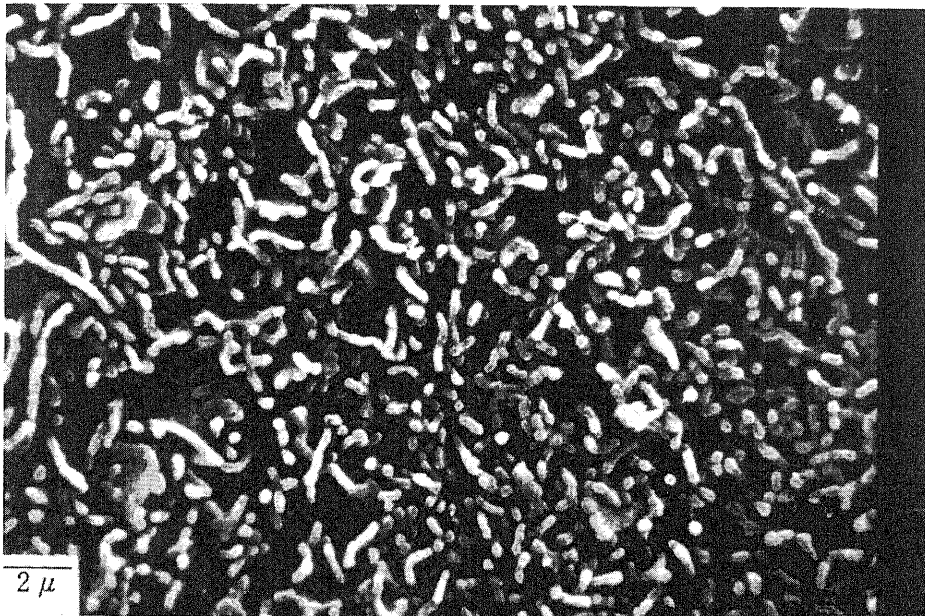


Fig. 17. Scanning electron micrograph of the tracheo-bronchial mucosa of 24 hours after insufflation HFJV (driving gas pressure of 2.0 kg/cm<sup>2</sup>). The injured cilia have fallen off.





Fig. 18. Scanning electron micrograph of the tracheo-bronchial mucosa of 2 days after insufflation HFJV (driving gas pressure of 2.0 kg/cm<sup>2</sup>). Microvilli are found.



Fig. 19. Scanning electron micrograph of the tracheo-bronchial mucosa of 3 days after insufflation HFJV (driving gas pressure of 2.0 kg/cm<sup>2</sup>). The regenerated cilia begin to sprout.

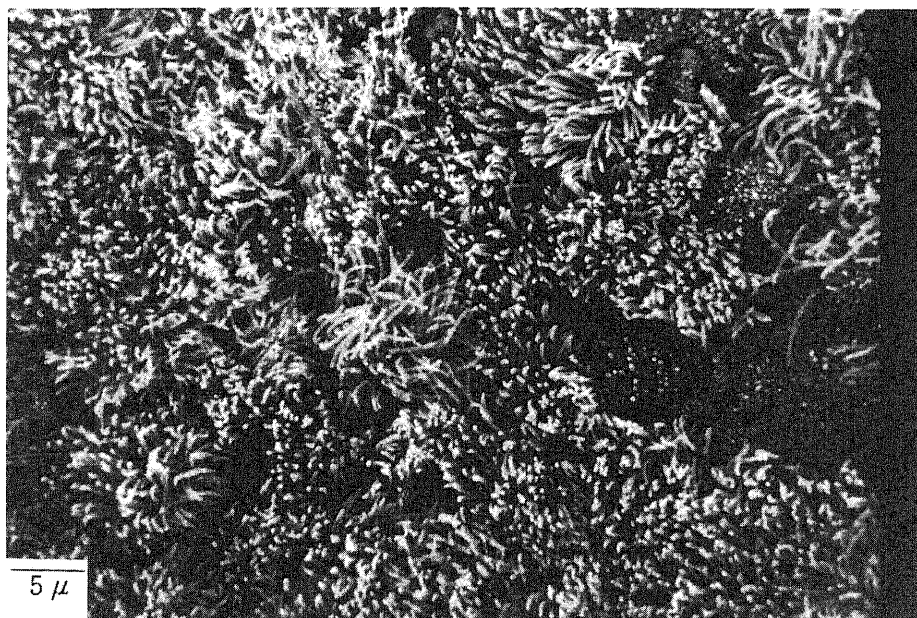


Fig. 20. Scanning electron micrograph of the tracheo-bronchial mucosa of 6 days after insufflation HFJV (driving gas pressure of 2.0 kg/cm<sup>2</sup>). The cilia have increased in number.



Fig. 21. Scanning electron micrograph of the tracheo-bronchial mucosa of 10 days after insufflation HFJV (driving gas pressure of 2.0 kg/cm<sup>2</sup>). The complete regeneration of cilia is observed.

は差異は認められなかった。

## 2. 気管内挿管チューブによる HFJV 後の気道粘膜 (B 群)

通常気管内挿管チューブに 15 ゲージのジェット針を直結装着し、駆動圧  $2.0 \text{ kg/cm}^2$ 、駆動回数 10 Hz の HFJV を 2 時間行った後の気道粘膜では、軽度線毛の方向が乱れていた (図 14)。

## 3. insufflation 方式による HFJV 後の気道粘膜 (C, D 群)

駆動圧  $1.0 \text{ kg/cm}^2$  の insufflation 方式による HFJV を 2 時間行った後の気道粘膜では、線毛は不規則にもつれあい、互いに癒合していた (図 15)。駆動圧  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  では  $1.0 \text{ kg/cm}^2$  と比較して線毛はさらに著明に乱れ、強度に癒合していた (図 16)。同じ駆動圧下では線毛の乱れの程度は、駆動回数とは関連しなかった。また気管粘膜と右下葉支粘膜とは差異は認められなかった。

## 4. HFJV 後の気道粘膜線毛の再生 (E 群)

駆動圧  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  の insufflation 方式による HFJV にて破壊された気道粘膜線毛は、24 時間後には脱落し (図 17)、2 日後には microvilli が認められた (図 18)。3 日後では細く丈の短い再生線毛が出現し始め (図 19)、6 日後には再生粘膜の密度は著しく増した (図 20)。10 日後ではほとんど正常に回復した (図 21)。

## 考 察

高頻度換気法 (High Frequency Ventilation, HFV) は、少量の一回換気量と高頻度の換気回数で行う人工呼吸法の総称である。HFV が一つのまとまった概念として発表されたのは、1971 年 Sjöstrand 一派<sup>18)</sup>によってである。彼らは 60~100 回/分の換気法を高頻度陽圧換気法 (High Frequency Positive Pressure Ventilation, HFPPV) と呼び、その後、喉頭鏡や気管支鏡検査、乳幼児の麻酔に応用した<sup>19)</sup>。1977 年 Klain ら<sup>20)</sup>は経皮的に 14 ゲージのカテーテルを挿入、200 回/分までの高頻度ジェット換気法 (High Frequency Jet Ventilation, HFJV) を行い、安定した  $\text{PaO}_2$ 、 $\text{PaCO}_2$  を維持し得たことを報告した。Brayn を中心とするグループ<sup>21)22)</sup>は、未熟児、新生児の持続陽圧換気に伴う barotrauma や bronchopulmonary dysplasia などの合併症を防止する目的で、高頻度の振動を気道内に与える換気法を研究し、1980 年にピストン型オシレーターを用いた高頻度オシレーション (High Frequency Oscillation, HFO) を発表した。

気道内のガス輸送のメカニズムは、気管分岐の第 15~17 分岐部付近に critical zone があり、これより中

枢では対流 (convection) が、それより末梢では拡散 (diffusion) が主たるガス運搬機序であるとされている。また、動きのある気道内のガスには本来の分子のもっている拡散能に加えて、Taylor 拡散という 2 つの拡散現象が加わる。管内を流れるガスは先端が円錐状の放物面を形成しているが、拡散しやすいガスでは流れに直角に円心方向への拡散 (radial diffusion) が強く、先端がぼやけてしまう。逆に拡散しがたいガスは、流れの方向に沿う拡散 (axial diffusion) が著しく、鋭い先端が生じる<sup>23)</sup>。この Taylor 拡散、特に長軸方向の axial diffusivity は HFV の機序と密接に関連していると考えられている。Taylor は、有効拡散能 (Deff) は層流であれば流速の 2 乗×直径、乱流であれば流速×直径とともに増加することを予測し、Scherer<sup>24)</sup>は気管分岐モデルを用い、実際に気道は乱流モデルに近いことを示した。これは一般式として、

$$\text{Deff} = \text{Dmol} + \epsilon u d$$

(Deff, 有効拡散能; Dmol, 分子拡散能;  $\epsilon$ , 係数;  $u$ , 流速;  $d$ , 直径) で表現できる。つまり、流速を多くすれば有効拡散能を大きくできることを示している。

HFV による肺のガス交換機構については、まだ定説はないが、HFPPV や HFJV では対流と、それによる強化拡散 (enhanced diffusion) が、HFO では加速拡散 (accelerated diffusion) が関与していると考えられている<sup>22)25)</sup>。

HFV は従来、喉頭鏡や気管支鏡検査<sup>19)26)27)</sup>、乳幼児の麻酔<sup>19)</sup>、気管支瘻の治療<sup>28)</sup>、呼吸不全の呼吸管理<sup>29)~31)</sup>などに研究され、用いられてきた。近年、HFV は気道内圧の変化が少なく、肺の容積変動が少ないという利点で、開胸手術にも利用されている<sup>32)~35)</sup>。これら HFV 法には小口径のチューブで換気可能という大きな特徴がある。この小口径チューブによる換気を気管・気管支形成術に応用できるなら、従来のように大口径チューブによって術野が障害されることなく、容易に気道再建操作が可能であり、極めて有用といえる。

HFV が気管・気管支形成術に応用されたのは、1981 年 Jensik 一派の El-Baz らが右側 sleeve pneumonectomy に使用したのが最初である<sup>13)</sup>。いまだ日も浅いことから、HFV の気管・気管支形成術応用に関し、至適駆動条件、術中管理、麻酔維持などについては不明な点が多く、その基礎的研究の報告はみられない。

一方、小口径のチューブを介して、通常の換気回数にて高圧高流量の酸素を気道に送り込むジェット換気法 (Jet Ventilation) も報告されているが<sup>36)~38)</sup>、これは HFV とは異なる換気法である。HFV は低い駆動圧で換気が可能であり、気道内圧変化、肺の容積変化が少なく、また循環抑制も少ないため、ジェット換気



法よりも気管・気管支形成術には適していると考えられる。

HFV 装置には数種類があり、機種性能に大きな差があり、駆動条件について一様に論ずることは困難である。El-Baz, Jensik ら<sup>13)14)</sup>は、みずからの high frequency ventilator (駆動圧 0~60 psi, 駆動回数 0.5~5 Hz に変換可能) (14.2 psi = 1.0 kg/cm<sup>2</sup>) を用い、内径 2 mm のカテーテルによる、20~25 psi (= 1.35~1.68 kg/cm<sup>2</sup>), 80~150/min の HFPPV を 6 例の気管・気管支形成術に応用し、十分な換気と酸素化を保ちつつ、良好な視野のもとで気道再建操作を行い得たと報告している。

我々の使用した装置は、流体素子によるジェット方式の HFO jet ventilator (泉工医科工業) である。駆動圧は 0~6.0 kg/cm<sup>2</sup>, 駆動回数 3~50 Hz と調整可能であるが、inspiration: expiration (I/E 比) は 1:1 と固定されている。

HFO jet ventilator を使用した今回の動物実験では、気管・気管支形成術に HFJV を応用する場合、開放性の呼吸回路となるため、高い駆動圧を必要とした。sleeve lobectomy の補助換気として術側残存肺の HFJV 併用を行う場合は、駆動圧を高くすると術側残存肺の過膨張による吻合操作の障害が認められ、0.5~1.0 kg/cm<sup>2</sup> の駆動圧が至適であった。一方、sleeve pneumonectomy の場合は、駆動圧 1.0 kg/cm<sup>2</sup> 以下では十分な酸素化が得られない場合があった。しかし、これを 2.0 kg/cm<sup>2</sup> に上昇させると、ほぼ満足すべき酸素濃度が得られた。この際、対側肺の過膨張と軽度の縦隔偏位が認められたが、吻合操作の障害は認められなかった。sleeve lobectomy のモデル実験では片側 IPPV のみに対して、術側残存肺に HFJV を併用すると、有意 ( $p < 0.01$ ) に PaO<sub>2</sub> 上昇、PaCO<sub>2</sub> 下降を認めている。それゆえ低肺機能症例に対する sleeve lobectomy に際して、片側 IPPV のみで十分な換気が得られない場合は、術側残存肺への HFJV 併用が有効なこともあろうと考えられる<sup>39)</sup>。関ら<sup>34)35)</sup>は同じ機種を通常の肺切除除に用いた検討から、0.5 kg/cm<sup>2</sup> が至適駆動圧であったとしている。これは、この場合は気道が半閉鎖回路となっているためであり、気管・気管支形成術のような開放回路の場合とは至適駆動圧に差があるのは当然であると考えられる。

HFJV 駆動回数については、回数が減少するにつれて CO<sub>2</sub> 排出過多と術野の動揺が認められた。本実験では駆動圧をやや高く設定する必要があるため、3 Hz では術野の動揺が大きく、細かな吻合操作には不都合であった。ほとんど動揺しなくなるのには 5~6 Hz 以上が必要であった。また、実験犬では肺容量が小さいた

め、全体に CO<sub>2</sub> 排出過多が認められたが、臨床例では 6~8 Hz で至適 CO<sub>2</sub> 濃度が得られている<sup>16)</sup>。

残存肺気管支と HFJV insufflation チューブの位置については、チューブ先端を次分岐部にまで近付けすぎると、PaO<sub>2</sub> の低下が認められた。これはチューブ先端の動揺により、残存肺の換気が不均等になるためと考えられ、このことから次分岐部 1~2 cm 口側が至適であろうと思われる。

残存肺気管支の長さの影響に関しては、気管支が短くなるにつれて、PaO<sub>2</sub> 下降、PaCO<sub>2</sub> 上昇が認められた。この原因については、開放気管支端と次分岐部との距離が短いため、分岐部で起こるとされる渦流 (eddy flow) が開放端よりリークしたり、呼吸抵抗が小さく HFJV での PEEP 様効果が減少するため、等と考えられるが詳細は不明である。このようなことから、今後は複数のチューブを次気管支にまで挿入したり、小カフ付き小口径チューブを利用するなどの工夫が必要と考えている。

HFJV の血行動態に対する影響については種々の報告がある。Dedhia ら<sup>40)</sup>は開心術後に 15~20 psi, 100/min の HFJV を行ったところ、血行動態には有意な変化は見られなかったと報告している。Schuster ら<sup>41)</sup>は HFJV (一回換気量 300 ml, 100~150/min) では IPPV と比較して平均血圧は上昇したが、心係数には変化は認められなかったと報告している。Szele ら<sup>42)</sup>は動物実験にて HFJV (20 psi, 150/min) では心拍数、平均血圧、心拍出量に変化を認めていない。Hoff ら<sup>43)</sup>は Emerson's high frequency ventilator (10 psi, 300~2400/min) を用い、心拍出量は減少したと報告している。これらの HFV 装置はそれぞれ異なった機種が用いられており、駆動条件について一様に論ずることは困難である。桑迫ら<sup>44)</sup>は著者と同機種を使用した半閉鎖系での動物実験において、駆動圧 0.8~1.2 kg/cm<sup>2</sup>, 2~10 Hz の HFJV で検討し、IPPV と比較して、いずれの駆動条件でも循環動態に有意な変動は認められなかったと報告している。

著者の今回の開放性呼吸回路での実験では、駆動圧 1.0 kg/cm<sup>2</sup> の HFJV では IPPV と比較して循環動態に著変は見られなかったが、駆動圧 2.0 kg/cm<sup>2</sup> では平均血圧、心拍出量の有意な低下 (特に 3 Hz において) が認められた。この心機能低下は右房圧、静脈還流減少の他に、気道内圧上昇と肺の過膨張による肺血管抵抗上昇 (特に 3 Hz において) および直接の心圧迫が関与すると考えられる。著者らのこれまでの臨床例では駆動圧 2.0 kg/cm<sup>2</sup> の条件で HFJV を行った症例もあったが、著明な心拍数、血圧の変動は認められ

なかった。これは人間と実験犬とでは肺容量に大きな差があるためと考えられる。

一方、Enderson ら<sup>45)</sup>は一回換気量 15~20 ml/kg、換気回数 100/min の HFJV を成犬に 48 時間行ったところ、IPPV と比較して肺動脈楔入圧は上昇し、肺血管外水分量が増加したと報告している。短時間での本実験でも、高い駆動圧の HFJV では肺動脈楔入圧が上昇しており、長時間の HFJV では肺水腫が起こりうる可能性があると考えられる。

気道線毛運動を主とした粘膜線毛輸送系は気道防御機構の重要な因子であり、呼吸器外科術後合併症の発生などにも深く関与する重要な問題である<sup>46)</sup>。急性の気道粘膜障害は、空気汚染、感染、各種の医療行為（気管切開、気管内挿管、放射線治療、ネブライザー療法）、外傷などによりしばしば起こりうる<sup>47)48)</sup>。気管内挿管による気道粘膜の障害は、原田<sup>49)</sup>の走査電子顕微鏡による研究にては、主として気管内挿管チューブのカフ圧迫によるものとしている。すなわち、長時間のカフによる圧迫では、線毛の脱落のみならず粘膜の剝脱による壊死、さらには潰瘍が生じ、それ以上になると軟骨の壊死が起こることも報告されている。また原田<sup>47)48)</sup>は、マスタードガスによるマウスの実験的気管粘膜障害は極めて著しく、ほんの少量でも線毛のうず巻状変化、水疱性変化、さらには線毛の脱落が起こるとしている。ころらの線毛の再生は 2 週間後頃より始まり、1 カ月もすると線毛はほとんど再生されたが、強度に障害の受けた部分には線毛は再生されず、6 カ月間の観察でも扁平上皮化を示したところのみみられたと報告している。滝沢<sup>50)</sup>によるモルモットの気道内にエラスターゼを注入した実験では、注入 24 時間で気道線毛の著明な脱落と杯細胞増生を推測させる変化が出現するが、注入 3 日後では細く丈の短い再生線毛が出現し、複合線毛や杯細胞の円蓋状膨化なども目立つようになり、注入 7 日後には気道線毛の高さ、密度ともにほとんど正常に復することが認められている。以上のように、気道粘膜はその修復機能により新しい上皮により被われ、再び正常の機能を営むこともあるが、強度の障害では不可逆的变化を残すことが知られている。本実験では、駆動圧 2.0 kg/cm<sup>2</sup>、2 時間の HFJV では、脱落した線毛は 3~4 日後より再生し始め、10 日後にはほぼ完全に修復された。より高い駆動圧や長時間では、不可逆的变化が生じる可能性も考えられるが、臨床床上では、そのような高い駆動圧や長時間での手術を行う必要がある症例はありえない。

HFV による気管粘膜輸送機能や肺微細構造への影響についても種々の報告がある。McEvoy ら<sup>51)</sup>の <sup>99m</sup>Tc エアロゾルを使用した成犬の実験によると、一

回換気量 3.5~4.0 ml/kg、駆動回数 20 Hz のピストン方式の HFV では、IPPV と比較して換気中は同位元素の停滞が見られたが、4 時間後では同位元素の輸送能は回復し、IPPV 後と同様であったと報告している。Frank ら<sup>52)</sup>は成犬に駆動圧 8~14 cmH<sub>2</sub>O の HFPPV を 2~5 時間行い、透過電子顕微鏡で肺胞構造を検討したところ、肺胞には変化は認められなかったと報告している。気管・気管支形成術後の気管支粘膜変化については、佐藤<sup>53)</sup>は走査電子顕微鏡での検討にて、線毛細胞の減少、杯細胞の増加、分泌顆粒の増加がみられ、線毛自体にも数の減少、不揃い、相互の癒合、粗糙化が認められたと報告している。HFJV 使用下での気管・気管支形成術後は本実験と異なり、気道粘膜の再生はさらに遅延し、かつ不完全に終わる可能性があると思われ、気管・気管支形成術に HFJV を使用する時は、なるべく低い駆動圧が望ましいと考えられる。

## 結 論

気管・気管支形成術に際しての高頻度ジェット換気法 (HFJV) 使用に関して雑種成犬による動物実験を行い、血液ガス分圧および循環動態を測定し、その至適駆動条件について検討した。また、HFJV による気道粘膜線毛の変化およびその再生について、走査電子顕微鏡にて検討した。

1. sleeve lobectomy の際の補助換気法として、術側残存肺の HFJV 併用は有用であり、駆動圧 0.5~1.0 kg/cm<sup>2</sup>、駆動回数 6~10 Hz が至適条件であった。

2. sleeve pneumonectomy の吻合操作中の換気は HFJV 単独で可能であり、駆動圧 1.0~2.0 kg/cm<sup>2</sup>、駆動回数 6~10 Hz が至適条件であった。

3. 気管形成術、sleeve pneumonectomy において、駆動圧 1.0 kg/cm<sup>2</sup> の HFJV では IPPV と比較して、循環動態に著変は認められなかったが、駆動圧 2.0 kg/cm<sup>2</sup> では平均血圧、心拍出量に有意な低値を認めた。同一駆動圧下では、3 Hz で最も平均血圧、心拍出量の低下を認めた。

4. HFJV チューブ先端は残存肺気管支分岐部 1~2 cm 口側が至適位置であった。それより残存肺気管支の長さが短いと、適切な換気が困難であった。

5. 駆動圧 1.0 kg/cm<sup>2</sup> HFJV を 2 時間施行後には、気道粘膜線毛は不規則にもつれあい、互いに癒合していた。駆動圧 2.0 kg/cm<sup>2</sup> では、1.0 kg/cm<sup>2</sup> と比較して、線毛はより著しく乱れ、強度に癒合していた。同じ駆動圧下では線毛の乱れの程度は、駆動回数とは関連しなかった。

6. 駆動圧 2.0 kg/cm<sup>2</sup> の HFJV で破壊された線毛は、24 時間後には脱落し、2 日後には microvilli が認められた。3～4 日目より線毛は再生し始め、10 日後ではほぼ完全に回復した。

以上のことから、気管・気管支形成術に際しては、駆動条件を選択すれば HFJV にて気道再建操作中の換気維持が可能であることが明らかになった。

## 謝 辞

稿を終えるに臨み、御指導、御校閲を賜りました恩師岩喬教授に心から謝意を表します。また直接御指導を賜りました本学第一外科渡辺洋宇助教授に深謝いたします。また本研究に御協力頂いた本学麻酔科の諸先生方、本学第一病理学教室小田恵夫博士に厚く御礼申し上げます。

本論文の要旨は第 37 回胸部外科学会総会（昭和 59 年）において会長推薦一般演題として、また第 86 回日本外科学会総会、第 9 回日本気管支学会総会、第 39 回日本胸部外科学会総会（昭和 61 年）において一般演題として発表した。

## 文 献

- 1) Paulson, D. L., Urschel, H. C., McNamara, J. J. & Shaw, R. R.: Bronchoplastic procedures for bronchogenic carcinoma. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.*, **59**, 38-47 (1970).
- 2) Naruke, T., Yoneyama, T., Ogata, T. & Suemasu, K.: Bronchoplastic procedures for lung cancer. *J. Thorac. Cardiovas. Surg.*, **73**, 927-935 (1977).
- 3) Weisel, R. D., Cooper, J. D., Delarue, N. C., Theman, T. E., Todd, T. R. J. & Pearson F. G.: Sleeve lobectomy for carcinoma of the lung. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.*, **78**, 839-849 (1979).
- 4) Faber, L. P., Jensik, R. J. & Kittle, C. F.: Results of sleeve lobectomy for bronchogenic carcinoma in 101 patients. *Ann. Thorac. Surg.*, **37**, 279-285 (1984).
- 5) Deslauriers, J., Beaulieu, M., Benazera, A. & McClish, A.: Sleeve pneumonectomy for bronchogenic carcinoma. *Ann. Thorac. Surg.*, **28**, 465-474 (1979).
- 6) Grillo, H. C.: Carinal reconstruction. *Ann. Thorac. Surg.*, **34**, 356-373 (1982).
- 7) 渡辺洋宇, 佐藤日出夫, 岩 喬: 肺癌に対する気管支形成術とその成績. *日外会誌*, **80**, 1220-1224 (1979).
- 8) Jensik, R. J., Faber, L. P., Kittle, C. F., Miley, R. W., Thatcher, W. C. & El-Baz, N.: Survival in patients undergoing tracheal sleeve pneumonectomy for bronchogenic carcinoma. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.*, **84**, 489-496 (1982).
- 9) 市橋 匠, 山田哲司, 渡辺洋宇, 岩 喬: 進行肺癌に対する sleeve pneumonectomy の経験. *気管支学*, **6**, 233-238 (1984).
- 10) 渡辺洋宇, 佐藤日出夫, 小林弘明, 飯田茂穂, 木元春生, 市橋 匠, 皆川真樹, 山下良平, 村上真也, 岩 喬: 肺癌に対する気管・気管支形成術とその成績. *日胸外会誌*, **34**, 140-146 (1986).
- 11) Faber, L. P. & Jensik, R. J.: The planning of tracheal surgery. *Surg. Clin. North Am.*, **50**, 113-122 (1970).
- 12) 井上宏司, 小川純一, 金淵一雄, 福田崇典, 稲村俊一, 小出司郎策, 川田志明, 正津 晃: 気管・気管支再建術の問題点. *胸部外科*, **38**, 677-684 (1985).
- 13) El-Baz, N., El-Ganzouri, A., Gottschalk, W. & Jensik, R.: One-lung high-frequency positive pressure ventilation for sleeve pneumonectomy. *Anesth. Analg.*, **60**, 683-686 (1981).
- 14) El-Baz, N., Jensik, R., Faber, L. P. & Faro, R. S.: One-lung high-frequency ventilation for tracheoplasty and bronchoplasty. *Ann. Thorac. Surg.*, **34**, 564-571 (1982).
- 15) 上村浩一, 長谷川正宣, 久場良也, 松原康博, 上平 敦, 田中 彰, 山内教宏, 小田 貢, 佐藤 暢: 高頻度ジェット換気法 (HFJV) による気道再建術の麻酔管理. *臨外*, **39**, 1349-1354 (1984).
- 16) 渡辺洋宇, 小林弘明, 村上真也, 木元春生, 屋敷初郎, 品川 誠, 清水淳三, 小田 誠, 岩 喬, 藤田充明, 野沢朗子, 遠山芳子, 小林 勉, 村上誠一: HFV (高頻度換気法) 併用呼吸管理下での気管・気管支形成術. *日胸*, **43**, 989-998 (1984).
- 17) 藤田充明, 野沢朗子, 遠山芳子, 小林 勉, 村上誠一: 高頻度ジェット換気法 (HFJV) による気管・気管支形成術の麻酔管理. *北陸麻誌*, **19**, 71-77 (1985).
- 18) Jonzon, A., Öberg, P. A., Sedin, G. & Sjöstrand, U.: High-frequency positive pressure ventilation by endotracheal insufflation. *Acta. Anaesthesiol. Scand.*, **43** (Suppl), 1-43 (1971).
- 19) Sjöstrand, U.: Review of the physiological rationale for and development of high-frequency positive-pressure ventilation-HFPPV. *Acta. Anaesthesiol. Scand.*, **64** (Suppl), 7-27 (1977).
- 20) Klain, M. & Smith, R. B.: High frequency percutaneous transtracheal jet ventilation. *Crit. Care. Med.*, **5**, 280-287 (1977).
- 21) Bohn, D. J., Miyasaka, K., Marchark, B. E.,

- Thompson, W. K., Froese, A. B. & Bryan, A. C.: Ventilation by high-frequency oscillation. *J. Appl. Physiol.*, **48**, 710-716 (1980).
- 22) Bulter, W. J., Bohn, D. J., Bryan, A. C. & Froese, A. B.: Ventilation by high-frequency oscillation in humans. *Anesth. Analg.*, **59**, 577-584 (1980).
- 23) 太田保世: 拡散. *医学のあゆみ*, **117**, 542-546 (1981).
- 24) Scherer, P. W. & Schendalman, n. m.: Measurement of axial diffusivities in a model of the bronchial airways. *J. Appl. Physiol.*, **38**, 719-723 (1975).
- 25) Sjöstrand, U. H. & Eriksson, I. A.: High rates and low volumes in mechanical ventilation-not just a matter of ventilatory frequency. *Anesth. Analg.*, **59**, 567-576 (1980).
- 26) Eriksson, I. & Sjöstrand, U.: Effects of high-frequency positive-pressure ventilation (HFPPV) and general anesthesia on intrapulmonary gas distribution in patients undergoing diagnostic bronchoscopy. *Anesth. Analg.*, **59**, 585-593 (1980).
- 27) Eng, U. B., Eriksson, I. & Sjöstrand, U.: High-frequency positive-pressure ventilation (HFPPV), A review based upon its use during bronchoscopy and for laryngoscopy and micro-laryngeal surgery under general anesthesia. *Anesth. Analg.*, **59**, 594-603 (1980).
- 28) Carlon, G. C., Ray, C. Jr., Klain, M. & McCormack, P. M.: High-frequency positive-pressure ventilation in management of a patient with bronchopleural fistula. *Anesthesiology*, **52**, 160-162 (1980).
- 29) Guntupalli, K. K., Sladen, A. & Klain, M.: High-frequency jet ventilation, A case report. *Thorax*, **37**, 558-559 (1982).
- 30) Wright, K., Lyrene, R. K., Truog, W. E., Standaert, T. A., Murphy, J. Woodrum, D. E.: Ventilation by high-frequency oscillation in rabbits with oleic acid lung disease. *J. Appl. Physiol.*, **50**, 1056-1060 (1981).
- 31) El-Baz, N., Faber, L. P. & Doolas, A.: Combined high-frequency ventilation for management of terminal respiratory failure, A new technique. *Anesth. Analg.*, **62**, 39-49 (1983).
- 32) Malina, J. R., Nordström, S. G., Sjöstrand, U. H. & Wattwil, L. M.: Clinical evaluation of high-frequency positive-pressure ventilation (HFPPV) in patients scheduled for open-chest surgery. *Anesth. Analg.*, **60**, 324-330 (1981).
- 33) 和田洋己, 神頭 徹, 乾 健二, 大島英治, 荒井俊之: 胸部外科手術麻酔における HFV (High frequency ventilation) の応用. *日外会誌*, **83**, 60-65 (1982).
- 34) Seki, S., Fukushima, Y., Goto, K., Kondo, T., Konishi, H. & Kosaka, F.: Facilitation of intrathoracic operations by mean of high-frequency ventilation. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.*, **86**, 388-392 (1983).
- 35) 関 洲二, 福島泰法, 近藤哲司, 五藤恵次, 小西英毅, 小坂二度見: 高頻度呼吸法 (High frequency ventilation) による胸腔内手術操作の平易化, *日胸外会誌*, **32**, 30-36 (1984).
- 36) Lee, P. & English, I. C. W.: Management of anaesthesia during tracheal resection. *Anaesthesia*, **29**, 305-306 (1974).
- 37) Baraka, A.: Oxygen-jet ventilation during tracheal reconstruction in patients with tracheal stenosis. *Anesth. Analg.*, **56**, 429-432 (1977).
- 38) McClish, A., Deslauriers, J., Beaulieu, M., Desrosiers, R., Fugere, L., Ginsberg, R., Hebert, C., Heroux, M., Martineau, A., Piraux, M., & Proulx, Y.: High-flow catheter ventilation during major tracheobronchial reconstruction. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.*, **89**, 508-512 (1985).
- 39) Watanabe, Y., Kobayashi, H., Murakami, S., Sawa, S., Shinagawa, M. & Iwa, T.: Bilateral sleeve lobectomy for metachronous multiple primary lung cancer. *Jap. J. Surg.*, **16**, 56-61 (1986).
- 40) Dedhia, H. V.: Hemodynamic effect of high frequency ventilation in open heart surgery patients. *Crit. Care. Med.*, **9**, 158 (1986).
- 41) Schuster, D. P., Snyder, J. V., Klain, M. & Grenvik, A.: The use of high frequency ventilation during respiratory failure. *Crit. Care. Med.*, **9**, 162 (1981).
- 42) Szele, G. & Mohammad, B. G.: Comparison of cardiovascular effects of high frequency ventilation and intermittent positive pressure ventilation in hemorrhagic shock. *Crit. Care. Med.*, **9**, 161 (1981).
- 43) Hoff, B. H., Robotham, J. L., Smith, R. B., Cherry, D. & Bunegin, L.: Effects of high frequen-

cy ventilation (300 to 2400/min) on cardiovascular function and gas exchange in dogs. *Anesth. Analg.*, **60**, 256 (1982).

44) 桑迫勇登, 安本和正, 細山田明義: 高頻度ジェット換気が換気力学ならびに血液ガスに及ぼす影響—正常成犬による実験的検討. *救急医学*, **9**, 101-107 (1985).

45) Enderson, B. L., Rice, C. L., Beaver, C. W., Rosen, A. L., Sehgal, L. R. & Moss, G. S.: High frequency ventilation and the accumulation of extravascular lung water. *J. Sur. Res.*, **36**, 433-437 (1984).

46) 玉置 淳, 岡澤光芝, 工藤 律, 安井修司, 片山道夫, 川上雅彦, 滝沢敬夫: 慢性気道感染における気管支粘膜の超微形態学的研究. *日胸疾会誌*, **23**, 436-443 (1985).

47) 原田康夫: 気管粘膜の障害の観察. *耳鼻*, **23**, 660-665 (1977).

48) 原田康夫: 走査電子顕微鏡から見た気道の各種

障害. *Therapeutic Research*, **1**, 300-308 (1984).

49) 原田康夫, 佐々木尚: 気管内挿管による気管粘膜障害について. *耳鼻臨床*, **68**, 789-799 (1975).

50) 滝沢敬夫, 玉置 淳, 岡澤光芝, 永井厚志: 気道線毛系の構造. *呼吸*, **3**, 680-688 (1984).

51) McEvoy, R. D., Davies, N. J. H., Hedenstierna, G., Hartman, M. T., Spragg, R. G. & Wagner, P. D.: Lung mucociliary transport during high-frequency ventilation. *Am. Rev. Respir. Dis.*, **126**, 452-456 (1982).

52) Frank, L., Noack, W., Lunkenheimer, P. P., Ising, H., Keller, H., Dickhuth, H. H., Rafflenbeul, W. & Jacobson, M.: Light- and electron microscopic investigations of pulmonary tissue after high-frequency positive-pressure ventilation (HFPPV). *Anaesthesist*, **24**, 171-176 (1975).

53) 佐藤日出夫: 気管支再建術に関する病態学的研究. *十全医会誌*, **86**, 599-615 (1977).

**Experimental Study on High Frequency Jet Ventilation for Tracheo-bronchoplasty**  
Shinya Murakami, Department of Surgery (I), School of Medicine, Kanazawa University,  
Kanazawa 920—J. Jusen Med. Soc., **96**, 231—251 (1987)

**Key words:** high frequency jet ventilation, tracheo-bronchoplasty, ventilation methods, tracheo-bronchial mucosa

### Abstract

High frequency jet ventilation (HFJV) is a useful method in case of tracheo-bronchoplastic surgery, because it can provide adequate ventilation and oxygenation by a small diameter tube with the least obstruction of the operative field. An experimental study using dogs was performed to decide the most optimal driving condition of HFJV by measurements of blood gas analysis and hemodynamics. In addition tracheo-bronchial mucosal change was evaluated by scanning electron microscopy. For HFJV, HFO jet ventilator (Mera Co., Tokyo) was employed. For insufflation, a 3.0 mm sized tube with a 2.4 mm internal diameter was used. The results were as follows: In case of sleeve lobectomy, application of HFJV to the reconstructed lung in the affected side could improve blood gas analyses during operation. A driving gas pressure (DGP) of 0.5-1.0 kg/cm<sup>2</sup> and a frequency (F) of 6-10 Hz was the most optimal setting for sleeve lobectomy. In case of sleeve pneumonectomy, adequate ventilation and oxygenation were achieved only by HFJV to the opposite lung. The most optimal setting of HFJV for the case of sleeve pneumonectomy was DGP of 1.0-2.0 kg/cm<sup>2</sup> and F of 6-10 Hz. In case of tracheal reconstruction and sleeve pneumonectomy under HFJV with DGP of 1.0 kg/cm<sup>2</sup>, no significant hemodynamic changes were observed in contrast to the hemodynamics under IPPV. However, when HFJV was used under DGP of 2.0 kg/cm<sup>2</sup>, mean blood pressure and cardiac output were significantly decreased. Under the same DGP, these changes were the most prominent at F of 3 Hz. Optimal location of the tube tip for adequate insufflation was 1-2 cm above the bronchial bifurcation of the remaining lung.

When the length of the bronchus above the bifurcation was less than 1-2 cm, adequate ventilation and oxygenation were not obtained. Concerning the tracheo-bronchial mucosal change, the cilia were irregularly tangled and adhered to each other immediately after insufflation HFJV under DGP of 1.0 kg/cm<sup>2</sup>. Under DGP of 2.0 kg/cm<sup>2</sup>, the cilia were more severely deteriorated and adhered to each other compared with DGP of 1.0 kg/cm<sup>2</sup>. These changes were not related with the driving frequency. The injured cilia by insufflation HFJV under DGP of 2.0 kg/cm<sup>2</sup> had fallen off 24 hours after the insufflation HFJV. However, microvilli were found 2 days after, and short regenerated cilia began to sprout 3-4 days after. The complete regeneration of cilia was observed about 10 days after.