

上・下気道の気流動態 —エアロゾルの立場から— 副 鼻 腔

鹿児島大学医学部耳鼻咽喉科学教室

前山 拓夫, 渡辺 荘 郁, 大山 勝

鹿児島大学工学部

野崎 勉, 中西 賢二

はじめに

エアロゾル療法では、有効充分量の薬液粒子が標的器官に到達することが重要であるが、副鼻腔炎におけるそれは、エアロゾル到達のルートが、鼻腔を含めた解剖学的構築の複雑さ、および中鼻道ひいては上顎洞自然孔の狭窄や閉塞をしばしば伴うこととあいまって、吸入エアロゾルが上顎洞に流入しにくい状態にある。このような病態に対しては、エアロゾル療法を行なう前に、場合によっては観血的療法を含めた何らかの前処置にて、中鼻道ならびに自然孔を開大しておかなければならない。ところで、副鼻腔の気流動態は、鼻腔におけるそれと同様、エアロゾル療法における粒子の流入、沈着に関する不可欠の重要な問題と思われる。今回、鼻・

副鼻腔モデルを用い、従来不明であった副鼻腔内の気流動態を、最新の機器であるレーザー・ドップラー流速計を使って計測し、若干の知見を得ることができた。また、レーザー・ライト・シート法 (Laser light sheet : LLS) による上顎洞内気流動態のビデオによる可視化を行ったので、その映像の一部も併せて報告した。

レーザー・ドップラー流速計

(Laser Doppler Anemometer : LDA)

1) 装 置

図1に、本実験に使用した DANTEC 社製のレーザー・ドップラー流速計55 X型のブロックダイアグラムを示す。装置は主として光学系、ミニコンピューター、レーザー発振器、カウン

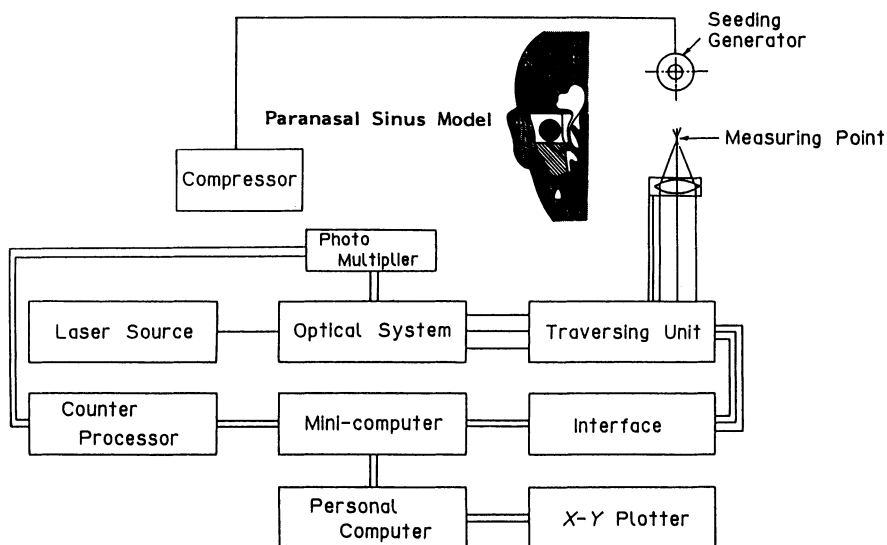


図1. レーザー・ドップラー流速計のブロック・ダイアグラム

タープロセッサー，三次元移動装置，シーディング・ゼネレーター，コンプレッサー，周波数シフタで構成される。レーザー光源としては，波長 $0.45\sim 0.52\ \mu\text{m}$ ，ビーム直径約 1.5mm ，出力 2ワット のアルゴン・イオンレーザーを用いた。図2は装置の外観を示している。

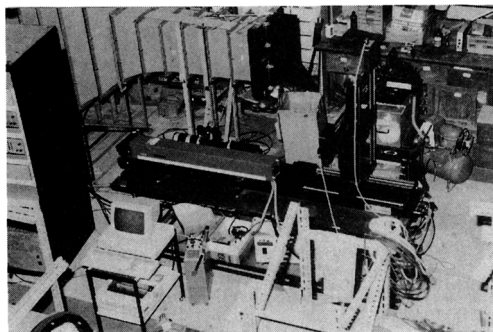


図2. レーザー・ドップラー流速計装置の外観

2) 原理

LDAは，移動する粒子による光散乱のドップラー効果を利用して，流体の速度を測定するもので，流体中の微粒子によって散乱させられた光は，入射光とは異なる周波数を持ち，その周波数差は，ドップラー・シフト (fd) と呼ばれ，粒子の速度に依存する。この周波数のずれを測定して，粒子速度，すなわち流速を測定する。図3にLDAのドップラー・シフト (fd) と粒子速度 (流速) のベクトル関係を示す。

3) 特徴

図4に示す如く，非接触型であることがピトー管や熱線流速計による従来の測定法との著しい相違で，従って流れを乱すことなく，また，検出部が小さいので微小領域での測定が可能である。流速範囲は数 mm/sec から超音速までと広域で，対象流体は，気体から液体まで，光を通し易いものであれば可能である。

また，周波数シフタにより，反転流も計測できる。ただし，測定に際して，流体中に光を散乱する粒子が必要なこと，光学系の調整に高度の技術が必要であり，また，装置自体も高価であるなどの厄介な点もある。

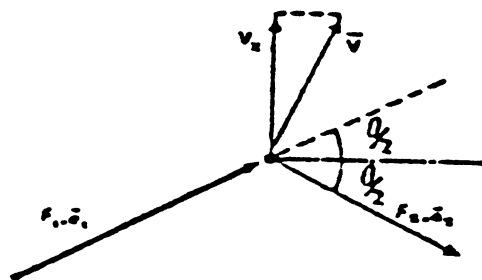


図3. レーザー・ドップラー流速計のベクトル関係

$f_i \cdot e_i$ = 入射光の周波数と単位ベクトル
 $f_s \cdot e_s$ = 散乱光の周波数と単位ベクトル
 V = 粒子の速度ベクトル
 V_x = 粒子速度のX軸方向成分
 λ = 入射光の波長
 θ = 散乱角

1. 非接触であるので，流れを干渉しない。
2. 非接触であるので，腐蝕流体や高温流の測定も可能。
3. 低流速から高流速まで，測定範囲が広い。
4. 検出部が小さい。
5. 較正を必容としない。

図4. レーザー・ドップラー流速計の特長

鼻・副鼻腔モデル

(Nose-Sinus Model : N-SM)

鼻・副鼻腔モデル (N-SM) は，屍体頭部を元にして作製した，ポリエチレン製，体積比 3.3 倍の大きさのものである。図5に示すように，鼻腔側はガラス板で密閉してあり (図5-A)，上顎洞側は上顎洞の外方を，多面体の透明アクリル板で作製し，観察，ビデオ撮影やレーザー光の照射を容易にしてある (図5-B)。上顎洞の自然孔ならびに副孔の部位は，一つの部品として，モデルから着脱可能にしてあり，自然孔，副孔の大きさを自由に変えることができる (図5-C, D)。また，上顎洞外方のアクリル板付着部の気密性を保つために，ゴム製のパッキングおよび粘土 (パラスティン) を用いた。

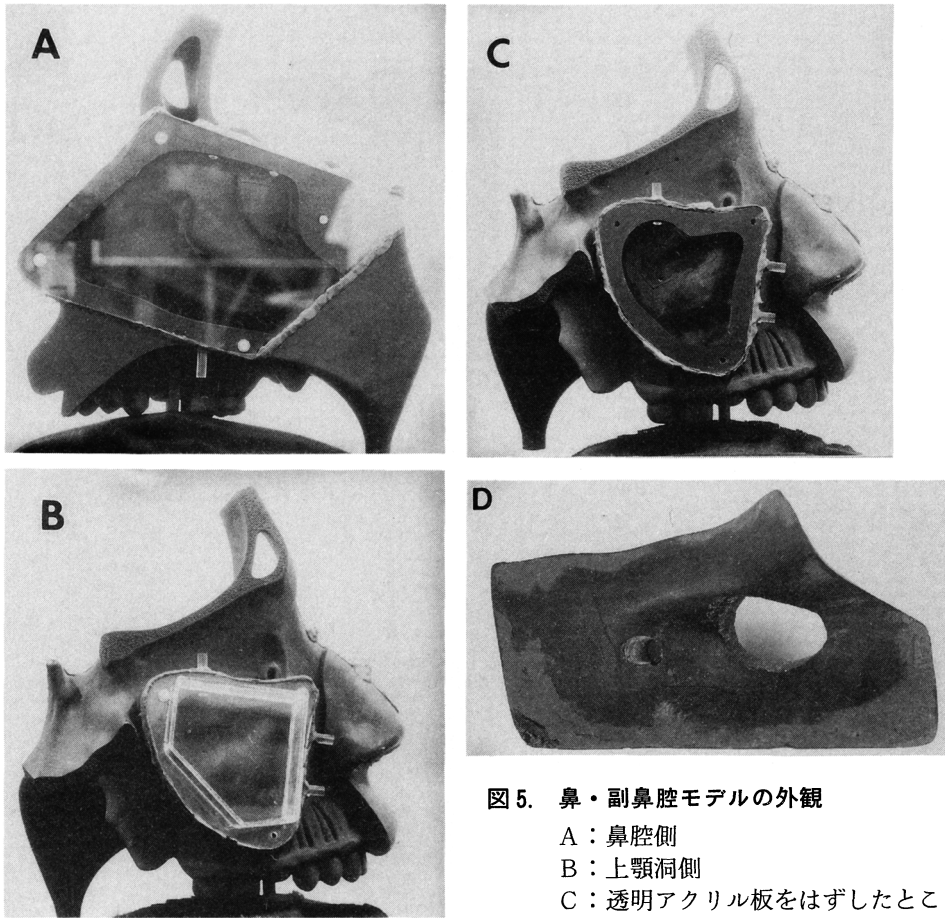


図5. 鼻・副鼻腔モデルの外観

- A : 鼻腔側
- B : 上顎洞側
- C : 透明アクリル板をはずしたところ。
自然孔, 副孔が観察できる(部品として着脱可能)。
- D : 自然孔, 副孔部の部品。
自然孔, 副孔の大きさ, 互いの位置関係は自由に変えることができる。

研究方法

エアロゾルとしては、水とグリセリンを1 : 1に混合し、シーディング・ゼネレーターで、 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ に粒子径を調整したものを、前鼻孔部に粘土で密着固定したプラスチック製のチューブを通して、コンプレッサーで鼻腔内へネブライゼーションを行った。前鼻孔部でのエアロゾルの流速は約 0.8 m/sec に調節した。上顎洞の気流動態の観察には、N-SMの外側方より、透明アクリル板に直角になるようにレーザー光を照射し、N-SMの前方から、アクリル板を通してビデオ撮影を行った。実験は、N-SMの自然孔, 副孔の状態および咽頭側より加圧するか、しないかにより、A~Hの8つの条件を設定した。

- A : N-SMの自然孔の直径小(6.4mm), 副孔開存。
- B : N-SMの自然孔の直径大(13.5mm), 副孔開存。
- C : N-SMの自然孔の直径小, 副孔閉鎖。
- D : N-SMの自然孔の直径大, 副孔閉鎖。
- E : N-SMの自然孔の直径小, 副孔開存。
咽頭側より 0.04 kg/cm^2 で加圧。
- F : N-SMの自然孔の直径小, 副孔閉鎖。
咽頭側より加圧。
- G : N-SMの自然孔の直径大, 副孔開存。
咽頭側より加圧。
- H : N-SMの自然孔の直径大, 副孔閉鎖。
咽頭側より加圧。

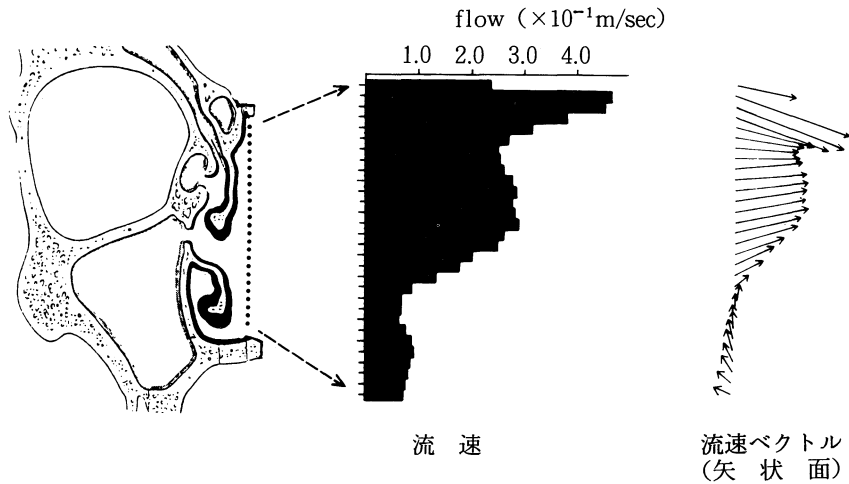


図6. レーザー・ドップラー流速計による鼻腔内気流動態

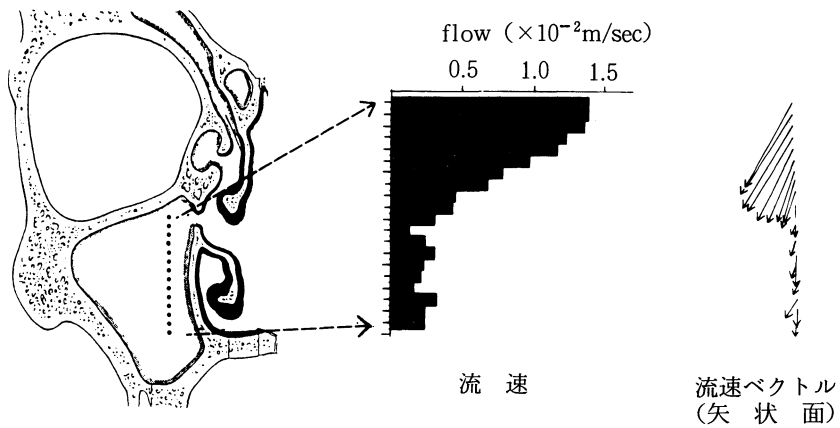


図7. レーザー・ドップラー流速計による上顎洞内気流動態

研究成績

図6は、LDAによる鼻腔内気流動態を、鼻中隔面より深さ5mmの点線で示した位置で測定して得られた流速と方向のベクトル表示を行ったものである。図7は同様に、上顎洞気流動態の一部をLDAで測定した結果である。測定は、洞自然孔と副孔の間で、図の点線の位置で行っており、自然孔部から副孔方向に向う流速10mm/sec前後の流れが認められる。次に、LLS法で可視化した上顎洞気流のビデオ撮影における、前述した各々A～Hの条件での成績を示す。

A：上顎洞自然孔部から始まり、上顎洞の前後径を回転軸とする、ゆっくりとした層流旋回

流が観察され、旋回しながら徐々に副孔部から流出していく状態が認められる(図8-a, b)。また、観察のために設けた透明アクリル製チャンバーのコーナーの部分は、ほとんど死水領域となっており、実際の上顎洞のプロフィールとよく似た流れが形成されている。

B：Aと同様に層流旋回流が認められるが、Aの場合よりも、旋回速度が明らかに大で、エアロゾルの量も多い(ビデオ画面上、層が厚く、白っぽく見え、多量のエアロゾルの存在を示唆する)(図9)。

C：層流旋回流が観察できるようになるまで時間を要し、流れもゆるやかである(図10)。

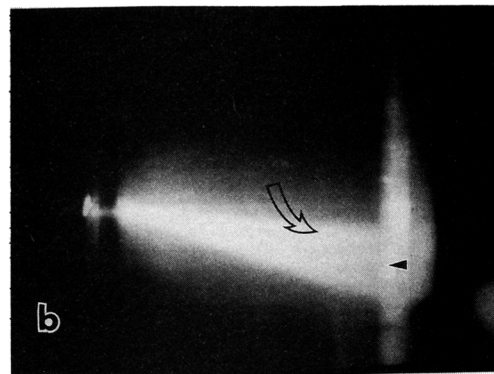
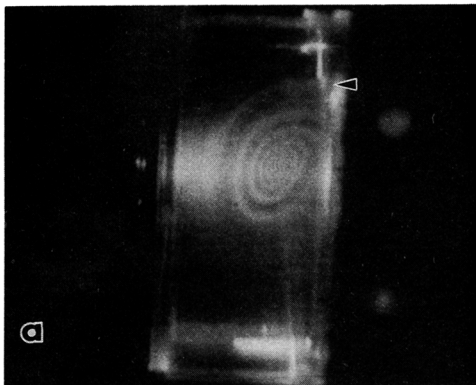


図8. レーザー・ライト・シート法による上顎洞内気流動態の可視化 (条件A)

- a : 矢印の自然孔部よりエアロゾルが流入して、層流旋回流を形成している。
 b : 副孔部(矢印)よりエアロゾルが、太い矢印の流れに沿って流出していくのが観察される。

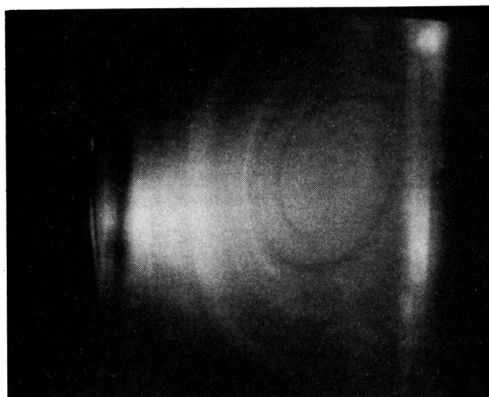


図9. レーザー・ライト・シート法による上顎洞内気流動態の可視化 (条件B)

典型的な層流旋回流が観察される。層が太く、白っぽく見え、多量のエアロゾルの存在を示唆している。

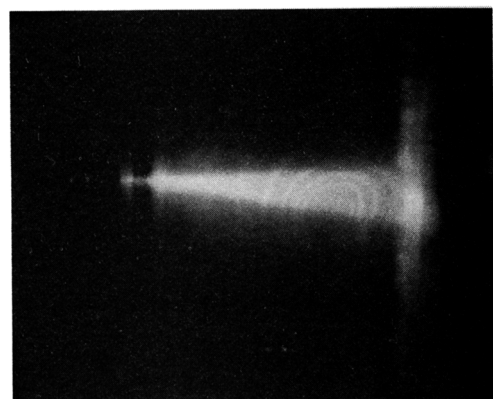


図10. レーザー・ライト・シート法による上顎洞内気流動態の可視化 (条件C)

副孔を閉鎖した状態。

多量に流入するのが認められる。

D : Cと大方、同様の成績が認められる。

E : 咽頭側より $0.04\text{kg}/\text{cm}^2$ で加圧した場合、加圧時に上顎洞内にエアロゾルを含んだ気流が、瞬時に、多量に流入するのが観察される(図11)。

F : 副孔を閉鎖した場合でも、加圧によりエアロゾルが多量に流入する。

G : 自然孔断面積が、Eの場合に比して大であることにより、より多量に流入する。

H : 副孔を閉鎖した場合も同様にエアロゾルが

考 按

エアロゾル療法における粒子の副鼻腔到達性の問題は、最も重要であるにもかかわらず、未だ明瞭な答えが見出せないでいるのが現状である。これまで多くの研究者が述べているように、エアロゾル治療を円滑に、且つ、効果的に行なう為には、その前処置として、鼻腔内に貯溜した鼻汁を吸引除去し、血管収縮剤にて周囲粘膜の腫脹を軽減させ、中鼻道を開き、その部の分

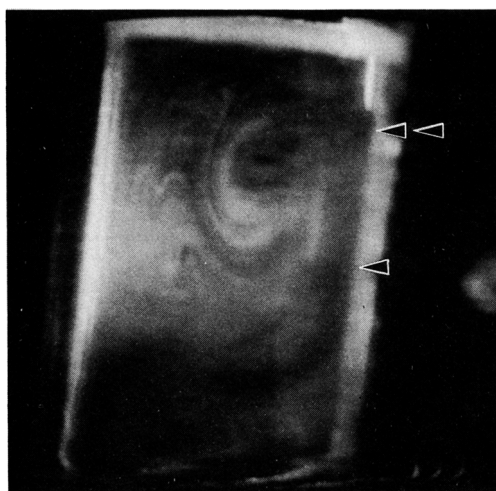


図11. レーザー・ライト・シート法による
上顎洞内気流動態の可視化 (条件E)
咽頭側より加圧。瞬時に多量のエアロゾル
が洞内に流入し、層流旋回流が乱れ始める
のが観察される。
自然孔部(矢印2つ)、副孔部(矢印1つ)。

分泌物を注意深く除去することが最も大切であり、また、ポリープ等の存在や、中鼻道病変が高度な場合には、手術的に中鼻道、自然孔の開大を計る必要がある。当教室で行った、RIエアロゾルを用いたネビュライザーによる副鼻腔移行の実験でもこの事を裏付けるような結果が確認されている¹⁾。フチン酸をラベルした^{99m}Tcを含む液体を5分間ネビュライザーで経鼻吸入させ、シンチレーションカメラ装置にて、RI値を測定した結果、図12に示す如く、正常者では、RIエアロゾルの上顎洞への良好な移行（前頭洞に比して、4～5倍の分布を示す）を認めた（図12-A）。しかしながら、慢性副鼻腔炎例では、RI粒子の上顎洞への移行がほとんどみられなかった（図12-B）。次に、レーザー手術で、左側洞自然孔を開大した場合、RIエアロゾルの左側上顎洞への移行が著明に認められた（図12-C）。ところで、副鼻腔の換気や気流動態に関しては、Wessely²⁾、後藤³⁾、車⁴⁾、中村⁵⁾、臼井⁶⁾、Drettner⁷⁾、今野⁸⁾、名越⁹⁾等による詳細な報告がなされている。臼井⁶⁾は、副鼻腔模型標本

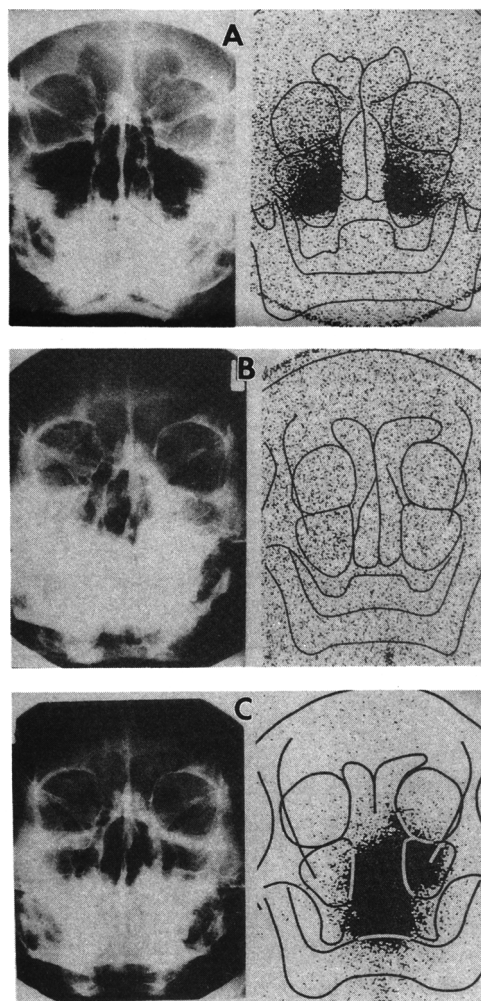


図12. RIエアロゾルによる、洞自然孔開存度の比較

- A：健康者
- B：副鼻腔炎例
- C：左側レーザー手術例

での実験で、正常上顎洞では、吸気から呼気に移行し、流れの静止した瞬間に、自然孔より上顎洞へ、煙が輪環を作って流入するのを観察したと報告している。今回のわれわれの実験では、エアロゾル療法を目的とした、前鼻孔側よりの一方向性の流れであったが、上顎洞内に図8,9に示す如き、層流旋回流を観察した。エアロゾルとして、3～5 μ mの大きさのオーダーでは、

空気の流れと同じ動態を示すことが分っており、生理的呼吸状態においても、また、副鼻腔エアロゾル療法においても、同じ様な、合目的と思われる流れのパターンを示しているのが興味深い。前述したように、本研究において最も主眼としたのは、如何にしたら鼻腔よりのエアロゾルを副鼻腔に効率よく、多量に到達させ得るかということであるが、これは、咽頭側よりの加圧によりある程度の解決をみた。つまり、LS法により可視化した上顎洞内気流のビデオ画像上（一部はすでに写真として示した）、およびLDAによる測定結果から比較的満足のいく結果を得た。

以下にその成績の概略を示す。

- 1) 前鼻孔（一側）での流量
 $3.04 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}$
- 2) 自然孔での流量
 $2.56 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{sec}$ (径 6.4mm)
 $1.704 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sec}$ (径 13.5mm)
- 3) 上顎洞流入率 (2)/₁)
 0.084% (径 6.4 mm)
 0.56% (径 13.5mm)
- 4) 咽頭側より加圧(0.04kg/cm²)した場合の流量
 $2.56 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec}$ (径 6.4mm)
 $1.136 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}$ (径 13.5mm)
- 5) 加圧なしと加圧ありの場合の流入量の差異 (4)/₂)
 100倍 (径 6.4mm)
 66.7倍 (径 13.5mm)

以上の成績より、通常のエアロゾル療法では上顎洞へは、前鼻孔での流入量の0.084~0.56%しか移行しないが、咽頭側よりの加圧により8.4~37.4%のエアロゾルの上顎洞内移行が期待できる。咽頭側よりの加圧の意義は、口を閉じ、鼻翼をつまみ、強く呼吸を行なうバルサルバ法と原理的に同じで、兵¹⁰⁾や佐藤¹¹⁾の報告と一致する。和久田¹²⁾は、加圧により17.4%の副鼻腔への粒子沈着増を認め、また、佐藤¹¹⁾は、同じ圧を加えた場合は、自然孔径が大きいほど多く、径が一定の場合は、圧力差に比例すると報告している。今野¹³⁾も、間歇的加圧の必要性を示唆している。われわれの実験においては、上顎洞

への粒子移行は、大方、自然孔の断面積に比例して大となる成績を認めた。いずれにしても、3~5 μmの薬液粒子を、加圧により副鼻腔内に圧入させることが有効な手段の一つであることは明白であると思われる。また、エアロゾルとして副鼻腔には7 μmを中心として3~10 μmの粒子径のものが有用である¹⁴⁾としているが、粒子発生装置として今回われわれが用いた、粒子径を容易に変え得るシーディング・ゼネレーターの改良使用が有望であると思われる。以上はほぼ剛体モデルでの実験であるが、今後、生体に近い条件を具備したモデルの改良、病態モデルでの実験を継続し、より臨床に則した、精度の高い研究を行なわなければならないと考えている。

おわりに

1. 鼻・副鼻腔モデルを用いて、レーザー・ライト・シート法により上顎洞内気流動態をビデオで可視化した（層流旋回流）。
2. 上顎洞へのエアロゾル流入量は、自然孔断面積におおよそ比例する。
3. 咽頭側よりの加圧により、上顎洞への多量のエアロゾルの流入を認めた。これは、副孔を閉鎖した状態でも同様であった。
4. 前鼻孔より流入したエアロゾルを上顎洞に効率よく移行させるには、まず中鼻道（自然孔）を、処置や手術等により開大しておくことが重要であり、この状態で、鼻腔に充満させたエアロゾル（3~5 μm）に、一定の圧を、一定の間隔で間歇的に加える方法が有効であると考えられる。

本研究に際し御協力下さった教室の原口、岩淵、鯨坂諸先生ならびに工学部の学生諸士に深謝します。

文 献

- 1) 大山 勝：上気道粘膜の病態生化学。斯文堂、鹿児島、pp 88-91、1984。
- 2) Wessely E：Die Luftdruckverhältnisse in den Nebenhöhlen der Nase. Mschr. Ohrenheilk. 55：1730-1746、1921。

- 3) 後藤敏郎：呼吸時に於ける上顎洞内気圧変動機能とその臨床上の意義について．大日耳鼻 41：1112-1119, 1935.
- 4) 車 重雄：副鼻腔（上顎洞）気流について．耳鼻臨床 46：700-702, 1953.
- 5) 中村文雄：日本耳鼻咽喉科全書，西端驥一編：鼻腔及び副鼻腔，金原出版，東京，29-105, 1955.
- 6) 臼井信郎：鼻腔・副鼻腔気流の実験的研究．日耳鼻 69：1714-1726, 1966.
- 7) Drettner B：Die Ventilation der Nase und der Nebenhöhlen. Z. Laryng, Rhinol. 46：159-172, 1967.
- 8) 今野昭義，他：上顎洞内圧変動よりみた上顎洞自然孔の閉塞度，その基礎と臨床．日耳鼻 72：66-74, 1969.
- 9) 名越好古，他：副鼻腔の換気．耳喉 42：409-419, 1970.
- 10) 兵 昇：フィブラチオンス・エアロゾル療法 特に UDV の有用性に就て．耳鼻 25：611-614, 1979.
- 11) 佐藤良暢，他：圧力変動とエアロゾル粒子の上顎洞内沈着特性．神戸常盤短大紀要 5号：81-84, 1983.
- 12) 和久田幸之助：医用エアロゾル発生装置の現状と未来．第10回医用エアロゾル研究会報告，pp 104-111, 1986.
- 13) 今野昭義，井谷 修：Vibration によるエアロゾルの副鼻腔移行—基礎的検討—．日耳鼻 84：13-17, 1981.
- 14) 兵 昇：エアロゾル療法の基礎．日耳鼻 89：812-815, 1986.