副鼻腔の気流動態に関する実験的研究

——エアロゾル療法の基礎的検討——

鹿児島大学医学部耳鼻咽喉科学教室（主任：大山 勝教授）

前山 拓夫, 渡辺 莊郁, 原口 兼明, 岩瀬 康則
鰺坂 孝二, 大山 勝

鹿児島大学工学部

野崎 勉, 中西 賢二

EXPERIMENTAL STUDY ON THE AIR STREAMS IN THE PARANASAL SINUS

TAKUO MAEYAMA, M.D., SOIKU WATANABE, M.D., KANEAKI HARAGUCHI, M.D.
YASUO IWABUCHI, M.D. KOUJI AJISAKA, M.D. and MASARU OHYAMA, M.D.

Department of Otolaryngology, Faculty of Medicine, Kagoshima University, Kagoshima

TSUTOMU NOZAKI, KENJI NAKANISHI

Department of Technology, Kagoshima University, Kagoshima

Air streams in the paranasal sinus were investigated using Nose-Sinus Model to contribute to the fundamental knowledge of aerosol therapy. The results obtained were as follows;

1. The velocity of air streams in the paranasal sinus was measured by Laser Doppler Anemometer and the visualization of streams was done by Laser Light Sheet method.
2. The amount of aerosol passed into the maxillary sinus is approximately in proportion to the sectional area of the ostium.
3. A considerable amount of aerosol passing into the sinus was noted under LLS technique applying positive pressure from the choana.

From the above results, it is necessary for the effective entrance of aerosol into the sinus first to open the middle meatus wide and to add the intermittent pressure.

Key words: 副鼻腔気流動態, エアロゾル, 可視化, レーザー・
ドップラー流速計, レーザー・ライト・シート法

A 92-1070-33125

I. 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。しかしながら、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う前に、観血的療法を含む何らかの前処置を行うことによって、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。加えて、副鼻腔における気流動態は、鼻腔におけるそれと同様、エアロゾル療法に際して粒子の流入、沈着に関与し、その効果を期待するためには不可欠の重要な問題と思われる。今回、鼻・副鼻腔モデルを作製し、従来必ずしも十分明らかでなか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 (Laser Doppler Anemometer: LDA) を使って計測し、若干の興味ある新知見を得ることが出来た。また、これまで行われてきた気流の可視化の方法¹⁾²⁾とは異なる、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撮影による可視化を試みたので、その映像の一部も併せて報告する。

II. 研究方法

1. レーザー・ドップラー流速計 (LDA)

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

図2 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
 θ = 散乱角

1) 装置

図1は、本研究に用いた DANTEC 社製のレーザー・ドップラー流速計 55X 型のブロックダイアグラムである。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、周波数シフタ等で構成されている。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。

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ある。すなわち、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もち、その周波数差は、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ものである (図2)。

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. 較正を必要としない。

図3 レーザー・ドップラー流速計の特徴

3) 特徴

図3に示すごとく、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は著しい相違があり、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

図4 鼻・副鼻腔モデルの外観

A: 鼻腔側

B: 上顎洞側

C: 透明アクリル板および着脱可能な自然孔、副孔部の部品をはずしたところ。

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。

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、周波数シフトにより、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問題点もある。

2. レーザー・ライト・シート (LLS) 可視化装置
レーザー光源 (NEC, GLG3, 200, ヘリウムネオンレーザー 2W) からの光を、コンデンサレンズを含むファイバー取付台 (理化精機工業株) を通して、レーザー光をファイバースコープへ導き、その先端にシリンドリカルレンズを装着することによってレーザー光を扇

形のシート光へ変換し、流れの様子を観察するためのスリット光を得るシステムである。

3. 鼻・副鼻腔モデル (Nose-Sinus Model : N-SM)

鼻・副鼻腔モデル (N-SM) は、屍体頭部を基本にしてポリエチレンで作製したもので、体積比3.3倍の大きさの模型である。図4に示すように、鼻腔側はガラス板で密閉してあり (図4-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4-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出来る (図4-C, D)。また、上顎洞外方のアクリル板着脱部の気密性を

保つために、ゴム製のパッキングおよび粘土（パラスティシン）を用いている。

4. 実験方法

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用い、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 0.8m/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、副孔の大きさ、状態および咽頭側より加圧するか、しないかなどにより、次のA～Hの8項目の条件を設定した。

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

III. 研究成績

1) LDAによる鼻・副鼻腔気流の測定結果

図5は、LDAによる鼻腔内気流動態を、鼻中隔面より鼻腔側壁側へ 5mm 移行した、点線で示す位置で測定して得られた流速と方向のベクトル表示である。図

図5 レーザー・ドップラー流速計による鼻腔内気流動態

図6 レーザー・ドップラー流速計による上顎洞内気流動態

図7 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: 自然孔部 (矢印) 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: エアロゾルが、太い矢印方向の流れに沿って副孔部 (矢印) より流出していくのが観察される。

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 B)
 典型的な層流旋回流が観察される。層が厚く、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 C)
 副孔を閉鎖した状態。

6 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、洞自然孔と副孔の中間で、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かう、流速 10mm/sec 前後の流れが示されている。

2) LLS 法による上顎洞内気流の観察結果

LLS 法で可視化した上顎洞気流のビデオ撮影における成績を、前記の各々 A～H の条件別に示す。

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 7-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観察されるが、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している) (図 8)。

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 9)。

D: C の場合と大方、同様の成績である。

E: 咽頭側より 0.04kg/cm^2 で加圧した場合で、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 10)。

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)。

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の場合に比べ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多量に流入するのが観察される。

3) LDAによる流速の測定結果およびLLS法により可視化した上顎洞内気流のビデオ画像よりの解析から得られた成績

- 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
 $2.56 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{sec}$ (自然孔径 6.4mm)
 $1.704 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sec}$ (自然孔径 13.5mm)
- ③ 上顎洞流入率(②/①)
0.084% (径 6.4mm)
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)

V. 考 察

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、いまだ明確な答

えが見出せないのが現状である。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、かつ効果的に行うためには、その前処置として鼻腔内に貯留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、その部の分泌物を可及的に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、手術的に自然孔の開大を計る必要がある³⁾⁴⁾。当教室で行ったRIエアロゾルを用いたネブライザーによる副鼻腔移行の実験でも、このことを裏付けるような結果が確認されている⁹⁾。すなわち、フチン酸をラベルした^{99m}Tcを含む液体を5分間ネブ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、正常者ではRIエアロゾルの上顎洞への良好な移行を認めた。しかし、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。次に、レーザー手術により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。ところで、副鼻腔の換気や気流動態に関しては、Wessely⁶⁾、後藤⁷⁾、車⁸⁾、中村⁹⁾、臼井¹⁰⁾、Drettner¹¹⁾、今野¹²⁾、名越¹³⁾等による詳細な報告がなされている。臼井¹⁰⁾は、副鼻腔模型標本での実験で、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7、8に示すごとき、層流旋回流を観察した。エアロゾルとして、3~5μm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かっており、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ような、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を置いたのは、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ってある程度の解決をみた。つまり、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計算上は、8.4~37.4%のエアロゾルの上顎洞内移行が期待できると考えられる。咽頭側よりの加圧の意義は、口を閉じ、鼻翼をつまみ、強く呼気を行うバルサルバ法と原理的に同じで、兵¹⁴⁾や佐藤¹⁵⁾の報告と一致する。和久田¹⁶⁾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¹⁵⁾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¹⁷⁾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 μ m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 μ mを中心として3~10 μ mの粒子径のものが有用である¹⁸⁾としているが、粒子径を容易に変化させ得る、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と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う必要のあることは言うまでもない。

VI. おわりに

1. 鼻・副鼻腔モデルを用いて、上顎洞内気流動態を、レーザー・ドップラー流速計により計測するとともに、レーザー・ライト・シート法によりその可視化に成功した。

2. レーザー・ドップラー流速計により算出した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って、上顎洞内への多量のエアロゾル流入が認められた。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）処置を行うか、手術等によりこの部を開大しておくことが重要である。加えて、この状態において、鼻腔に充満させたエアロゾル（3~5 μ m径）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。

文 献

- 1) 小林一郎 他：口呼吸における口腔内気流の可視化実験(2)——発煙法による観察と口腔内の部位別蒸発量測定——。流れの可視化 4: 67-72, 1984.
- 2) 百海 均 他：口呼吸時の口腔内の流れ構造の可視化 8補: 113-118, 1988.
- 3) 鈴木淳一 他：エアロゾル療法の基礎と臨床。日耳鼻

82: 1290-1302, 1979.

- 4) 坂倉康夫：ネビュライザー療法実施上の注意点。耳鼻臨床 74: 217-219, 1981.
- 5) 大山 勝：上気道粘膜の病態生化学。斯文堂，鹿児島，1984, pp 88-91.
- 6) Wessely E: Die Luftdruckverhältnisse in den Nebenhöhlen der Nase. Mschr Ohrenheilk 55: 1730-1746, 1921.
- 7) 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.
- 8) 車 重雄：副鼻腔（上顎洞）気流について。耳鼻臨床 46: 700-702, 1953.
- 9) 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，東京，1955, 29-105頁。
- 10) 白井信郎：鼻腔・副鼻腔気流の実験的研究。日耳鼻 69: 1714-1726, 1966.
- 11) Drettner B: Die Ventilation der Nase und der Nebenhöhlen. Z Laryng Rhinol 46: 159-172, 1967.
- 12) 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.
- 13) 名越好古 他：副鼻腔の換気。耳喉 42: 409-419, 1970.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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，1986, pp 104-111.
- 17) 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.
- 18) 兵 昇：エアロゾル療法の基礎。日耳鼻 89: 812-815, 1986.

本研究に際し、御協力下さった工学部の学生諸君に深謝する。本論文の要旨は、第12回日本医用エアロゾル研究会（東京）パネルディスカッション“上・下気道の気流動態——エアロゾルの立場から”（副鼻腔）において口演した。

（原稿受付 1989年1月24日）

別刷請求先 〒890 鹿児島市宇宿町1208-1

鹿児島大学医学部耳鼻咽喉科学教室 前山拓夫