

中耳腔の換気のメカニズムとその障害

山 本 裕

新潟大学大学院医歯学総合研究科耳鼻咽喉科・頭頸部外科学分野

Homeostatic Mechanics and Injury of the Middle Ear Ventilation

Yutaka YAMAMOTO

*Department of Otolaryngology Head and Neck Surgery,
Niigata University Faculty of Medicine*

Abstract

Recent studies have shown that the gas exchange through the middle ear (ME) mucosa as well as through the Eustachian tube plays a very important role in the regulation of ME pressure. In this paper, homeostatic mechanics of the Eustachian tube and those of the gas exchange function through the ME mucosa were reviewed. Then the relationship between those functions and the morphological characteristics of the ME cavity were discussed. The gas exchange function through the ME mucosa, especially mucosa of the mastoid cavity was confirmed in normal ears, but the function was reduced in inflamed ears. The human ME cavity had a large surface area corresponding to a large volume due to the presence of the air cell system. The gas exchange function through the ME mucosa depended on the surface area. These suggested that the morphological characteristics of the ME cavity provides a great advantage in regulating the ME pressure by transmucosal gas exchange function.

Key words: Eustachian tube, transmucosal gas exchange, mastoid cavity, surface area, volume

はじめに

側頭骨の含気腔として存在する中耳腔は、鼓膜の内側に耳小骨を納める鼓室腔、その後方の乳様突起内に広がる乳突腔（乳突洞と乳突蜂巣）で構

成される。中耳腔は薄い粘膜上皮で被覆された骨組織で形作られており、内部には気体が充満している。中耳腔の主な機能は、鼓膜が受け止めた音の振動を3つの耳小骨を介して内耳に伝えることであるが、この機能（中耳伝音系）を保つために

Reprint requests to: Yutaka YAMAMOTO
Department of Otolaryngology Head and Neck
Surgery Niigata University Faculty of Medicine
1 Asahimachi - dori Chuo - ku,
Niigata 951 - 8510 Japan

別刷請求先: 〒951 - 8510 新潟市中央区旭町通1
新潟大学大学院医歯学総合研究科耳鼻咽喉科・
頭頸部外科学分野

山 本 裕

は巧妙なしくみが必要となる。本稿ではそのうち最も重要な中耳腔の換気メカニズムとその障害について概説する。

中耳伝音系の恒常性と中耳疾患

中耳伝音系の機能が保たれるには、まず中耳腔が大気圧と等しく調圧されていることが必須となる。鼓膜―耳小骨の振動系は中耳圧と大気圧が等しい時に最も効率よく動作する。もし中耳腔が陰圧もしくは陽圧となると伝音系に振動のロスが生じる。

加えて中耳伝音系の恒常性に欠かせないもう一つの要件として、中耳腔が閉鎖状態であることがあげられる。通常、外耳道から進入する音圧は一方向性に中耳伝音系を通過して内耳窓に到達する。もし中耳腔が開放されていて音圧が他の経路からも侵入すれば、音圧は干渉しあい伝音系の効率が低下する。

この2つの条件、すなわち中耳腔が大気圧と等しく調圧されていることと閉鎖状態が保たれていることは、二律背反する難しい条件ともいえる。

もしこれらの条件が破綻した場合、どのようなことが起こるのであろうか。中耳腔の調圧のメカニズムが崩れた場合には、一般に腔内は陰圧となる。そして陰圧の状態が慢性化すると滲出性中耳炎を発症する。この疾患の成立に関してはBortnickらが1964年に提唱した「補腔水腫説」が長い間支持されてきた¹⁾。すなわち中耳腔の換気能が障害されると腔内の酸素が周囲の組織に吸収され陰圧化し、血漿成分が漏出、貯留するというものである。本症では鼓膜は内陥し、鼓室腔の液の貯留が鼓膜を介して透見される。このような換気不全の状態が年余に渡るとさらに深刻な病態に移行する。その一つは癒着性中耳炎である。高度な内陥の結果、鼓膜が組織学的に鼓室粘膜と癒着し、慢性的な感染と炎症を呈する疾患である。もう一つの深刻な病態は真珠腫性中耳炎である。鼓膜が高度に陥凹し角化型扁平上皮が嚢状に中耳腔に侵入し、骨破壊を呈する疾患である(図1)。いずれの疾患でも中耳伝音系が高度な障害を受け

だけでなく、内耳障害や顔面神経麻痺などを伴う危険性がある。

一方、中耳腔の閉鎖環境が破綻した場合にも深刻な状態が生まれる。鼓膜が穿孔している場合には、当然ながら鼓膜が受け止める音圧の利得が低下するが、加えて穿孔から侵入した音圧が、内耳からの音圧の出口である正円窓に干渉し利得をさらに減じてしまう現象(キャンセルエフェクト)が生じてしまう。一方、鼓膜が正常でも鼓室腔と上咽頭を結ぶ耳管が開放し続けると、咽頭を経由した音圧が中耳腔に侵入、干渉してしまう現象(耳管開放症)を来してしまう。この疾患は強い耳閉感の他、自分の声が響いてしまう自声強調を起こすため、強い不快感を覚えることになる。

以上のように中耳伝音系が維持されるためには、中耳腔の閉鎖性を保ちつつ、外圧と等しく調圧するという命題が科せられていることになる。

耳管と中耳炎症性疾患

1. 耳管の構造と機能

前述の恒常性を保つために最も大きな役割を担っているのは耳管である。耳管は鼓室と上咽頭を連絡する長さ30から45mmの管である。内側の骨部と外側の軟骨部に分かれるが、とくにその機能に重要な部位は軟骨部である。同部は耳管軟骨とそこに付着する口蓋帆張筋と口蓋帆拳筋で構成される²⁾。普段内腔は閉塞しているが、嚥下時に2つの筋の働きで内腔が開大、疎通する。このメカニズムにより前述した調圧能と閉鎖性の両立がなされている。耳管にはこのような能動的換気能の他、外界と一定以上の圧格差が生じた場合に自然に気体が疎通する圧力弁作用ともいえる受動的換気能も備わっている。その他、中耳腔に貯留した液体を排出する排泄能や免疫担当細胞による防御能も耳管は併せ持っている³⁾(図2)。

2. 耳管の発達と中耳炎症性疾患

耳管の換気能は幼小児では未熟で、能動的換気能、受動的換気能ともに10歳前後でようやく成熟するといわれている⁴⁾⁵⁾。急性中耳炎、滲出性

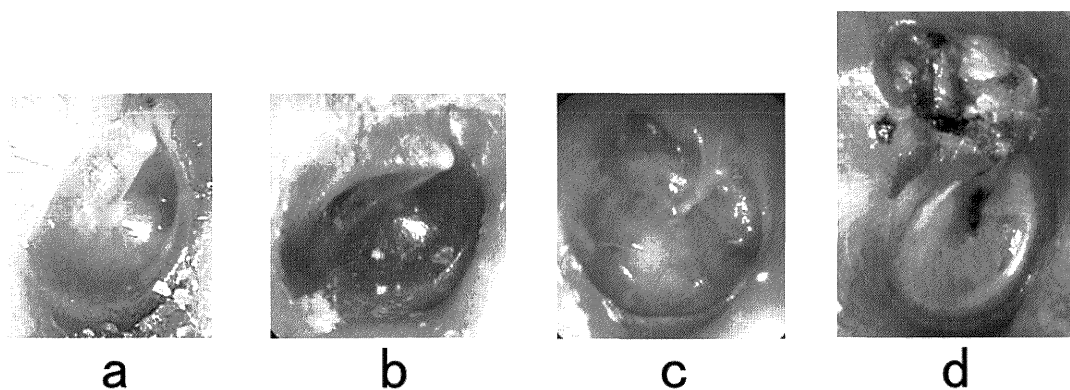


図1 鼓膜所見（正常と中耳換気不全症例）

- a 正常
- b 滲出性中耳炎
鼓膜は内陥し滲出液が透見される。
- c 癒着性中耳炎
鼓膜と鼓室粘膜の組織学的な癒着が生じている。
- d 真珠腫性中耳炎
鼓膜上方（弛緩部）の強い陥凹と角化物の付着を認める。

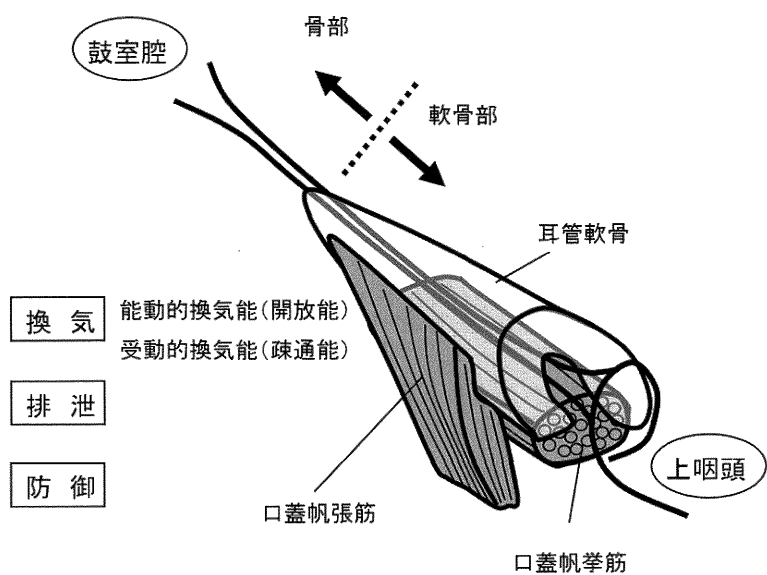


図2 耳管の構造と機能

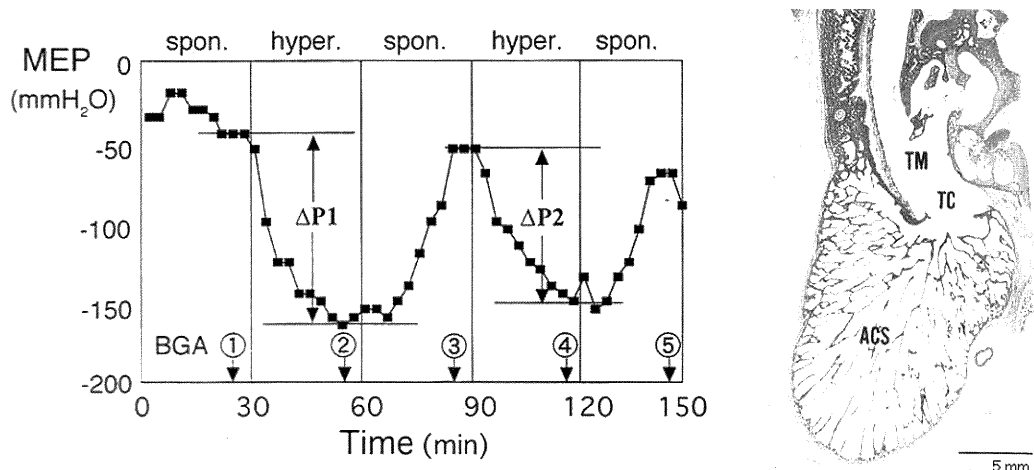


図3 血中二酸化炭素分圧の変化に伴う中耳圧変化(正常耳)
血中二酸化炭素分圧の下降, 上昇に呼応し中耳圧が下降, 上昇している。
右は計測例の正常な側頭骨組織所見(HE染色)。

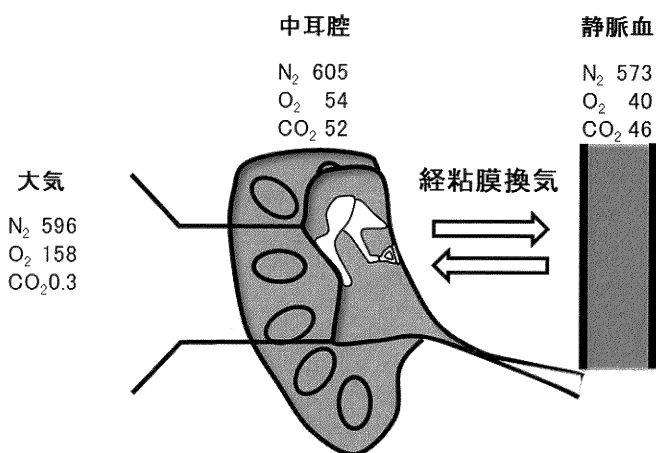


図4 大気, 中耳腔, 静脈血の気体組成と経粘膜換気
中耳腔の気体組成は静脈血のそれと近似する。両者の間には
分圧勾配による経粘膜換気が存在する。

中耳炎などの幼小児に多くみられる中耳炎は、概ね5歳から7歳に患者数のピークを持ち、10歳以降では激減する⁶⁾。また成人以降で発症することが多い癒着性中耳炎症例、真珠腫性中耳炎症例では耳管機能が著しく悪いことから、耳管機能と

中耳炎症性疾患の成立との間には、大きな関連性があることがうかがわれる。

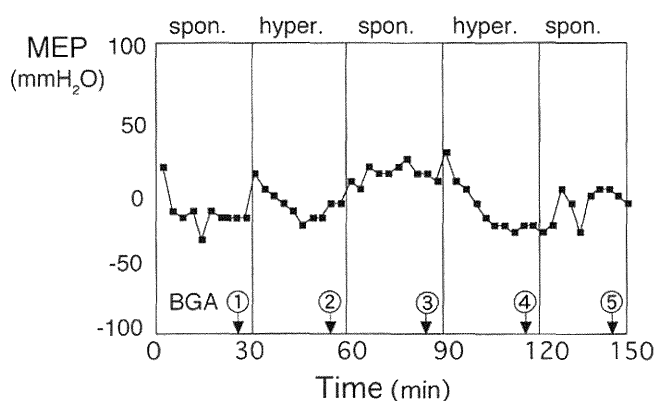


図5 乳突腔の慢性炎症モデルにおける中耳圧変化

正常耳で見られたような圧変化が認められない。右は計測例の側頭骨組織所見 (HE 染色)。蜂巣内に慢性炎症を有する。

中耳腔の経粘膜換気能

1. 中耳腔の気体組成

前述したように中耳腔の換気、調圧を耳管が担っていることは紛れもない事実である。そして長い間、耳管の換気能が正常ならば、中耳腔の気体の組成は大気中のそれと同じであると考えられてきた。しかし近年、分析技術の進歩に伴い中耳腔の気体組成が正確にわかるようになってきた。その結果、両者の組成は全く異なるものであることが明らかになった。すなわち、中耳腔の気体組成は窒素 600mmHg、酸素 50mmHg、二酸化炭素 50mmHg 程度であり⁷⁾⁸⁾、大気の組成（窒素 596mmHg、酸素 158mmHg、二酸化炭素 0.3mmHg）に比し、著しく低酸素、高二酸化炭素状態であることがわかった。そしてこの組成は静脈血の気体組成と非常に近似していることが判明した。

2. 経粘膜換気能の存在

これまでの補腔水取説に基づき、中耳腔の気体は一方的に吸収されているものと信じられてきた。しかし 1980 年代に入り気体が拡散により中耳腔に放出される現象が報告されるようになった。前述した中耳腔の気体組成が静脈血のそれと

類似しているという事実も踏まえて、われわれは中耳腔と血管との間には粘膜を介したガス交換能（経粘膜換気）が経耳管換気とは別に存在するのではないかという仮説を立てた。そこでそれを実証するために種々の実験を行ってきた。

実験にはヒト乳突蜂巣と類似する構造を中耳骨胞に有するブタを用いた。経鼓膜的に酸素センサーを鼓室内に留置、気管内挿管下に酸素の投与と中止を 30 分おきに繰り返した。その結果、血中酸素分圧の上昇、下降に伴い、中耳腔の酸素分圧は上昇、下降することがわかった⁹⁾¹⁰⁾。この結果は血管内と中耳腔との間に、分圧勾配に基づいた双方向性の酸素の移動があることを示している。

次に同様のブタを用いて、二酸化炭素の交換能の存在を検証することにした。中耳腔内の二酸化炭素分圧を直接計測できる装置はないため、この実験では中耳腔の全圧を計測することにした。二酸化炭素は酸素の約 20 倍の拡散能を有しており、ガスの移動を全圧の変化として捉えやすいと考えたためである。気管内挿管下、自発呼吸と人工呼吸器による過換気を反復し、血中の二酸化炭素分圧を変化させ、それに伴う中耳圧の変化を計測した。その結果、過換気を開始すると中耳圧は速やかに下降、自発呼吸とすると上昇するという変化

が再現性を持って認められた。この結果は血管内と中耳腔との間に、分圧勾配に基づいた双方向性の二酸化炭素の移動があることを示している¹¹⁾(図3)。

同様の現象はヒトでも確認された。ボランティアにより、嚥下を禁止した状態で過換気、低換気を繰り返して行い血中の二酸化炭素分圧を変化させると、中耳圧が呼応して下降、上昇を繰り返すという現象が確認された。すなわちヒト中耳腔にも同様の双方向性の二酸化炭素の交換能があることがわかった¹²⁾(図4)。

3. 経粘膜換気能と中耳炎症性疾患

このガス交換能は中耳腔の炎症をどのように受けるのであろうか。われわれはさらに含気蜂巢内に慢性炎症を作成し、同様の実験を行った。その結果、含気蜂巢内の炎症により、二酸化炭素の交換が抑制されること、抑制の程度は炎症の程度に依存することがわかった。これらの実験で乳突腔の炎症により経粘膜換気能は障害されることが実証された¹¹⁾(図5)。

4. 中耳腔の形態学的特徴

ヒト中耳腔には内部に多数の蜂巢構造を有する

大きな乳突腔が存在する。その存在意義に関しては以前より議論がなされてきたが、筆者はまず乳突腔の体積と表面積の関係の検討を行った。

中耳疾患の既往がない患者の側頭骨CT軸位断画像を用いた。PCソフトを用いて各スライスから含気腔部分を抽出、その外周長と面積を算出し、各々にスライス間隔を乗じて合算することにより、乳突腔の表面積と体積を求めた。その結果、乳突腔は平均49.2cm²と非常に大きい表面積を有することがわかった。加えて全症例の表面積と体積の関係を検討すると、両者の間には強い一次相関関係があることが明らかになった¹⁰⁾(図6)。

もし乳突腔が蜂巢構造を持たない単一の空間であれば、その体積値と表面積値は一次相関しない。しかし蜂巢構造の存在により、中耳腔はその体積に見合った表面積を有していることがこの検討から明らかになった。

5. 中耳腔の形態と経粘膜換気能

次に筆者らは中耳腔の表面積と経粘膜換気能との関連を調べることにした。中耳腔に活動性の炎症のない鼓膜穿孔症例を対象とした。全身麻酔下に鼓膜形成術を行う際に、外耳道に圧センサーを留置し中耳圧の変化を計測した。麻酔には60%

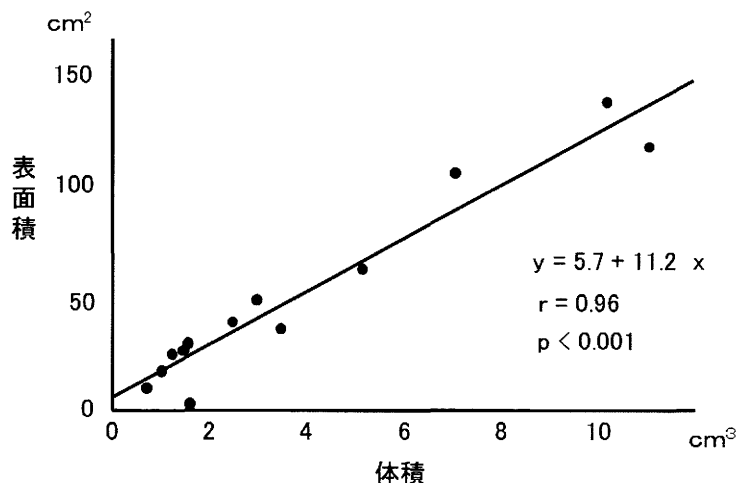


図6 乳突腔の体積と表面積の関係
両者の間に強い一次相関を認めた。

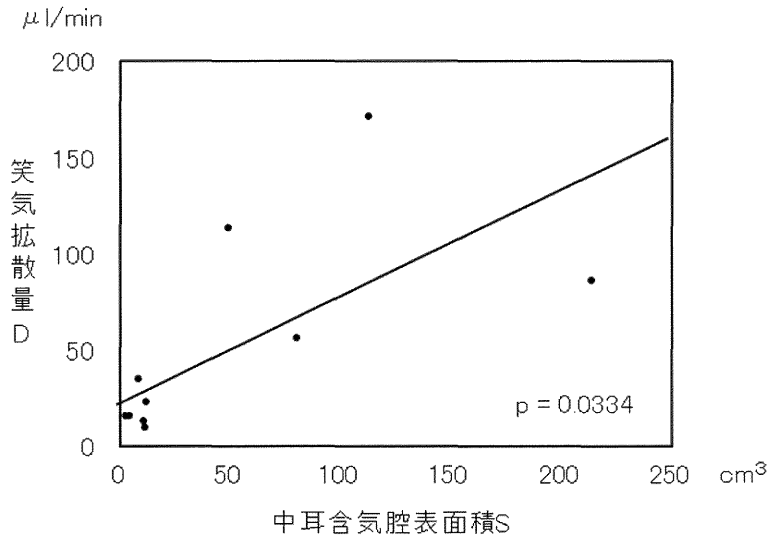


図7 中耳腔表面積と笑気拡散能の関係
有意な正の相関を認めた。

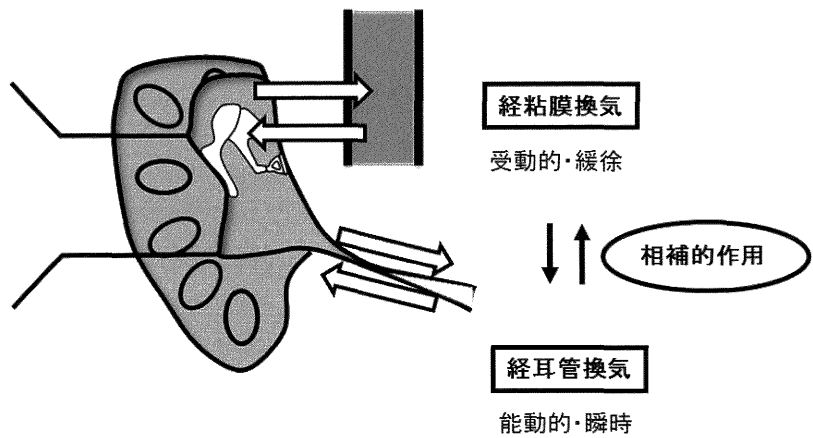


図8 経粘膜換気と経耳管換気の関係
お互い相補的に作用している。

の笑気ガスが使用された。笑気ガスは極めて高い拡散能を有し、吸入により血中に速やかに溶解し、呼気から速やかに排泄されることが分かっている。この性質を利用し血中の笑気が中耳粘膜へ拡

散することによる中耳圧の変化を捉え、経粘膜換気能を定量的に評価することにした。その結果、実験を行った全例で中耳圧の上昇を認めた。圧変化率から笑気の拡散量を算出すると、平均 51.4μ

l/min という活発な笑気の拡散が認められた。加えて前述と同様な手法で各症例の中耳腔の表面積も算出し、拡散量と表面積の関係を検討した。その結果、笑気の拡散量と中耳腔の表面積には強い正の相関関係がみられることがわかった(図7)。この結果から中耳腔の経粘膜換気能は粘膜の表面積に依存することが判明した¹³⁾¹⁴⁾。

以上より、中耳腔には経粘膜換気が存在すること、経粘膜換気は中耳腔の表面積に依存すること、中耳腔は蜂巢構造を持つことにより経粘膜換気に関して合目的な構造を持っていることがわかった。

経耳管換気と経粘膜換気

ここまで中耳腔には2つの換気作用、すなわち経耳管換気と経粘膜換気が存在することを述べてきた。ところでこの2つの作用はお互いどのような関係にあるのだろうか。経耳管換気は主に嚥下に伴うもののため能動的にかつ瞬時に生じる。一方、経粘膜換気は血管内と中耳腔の間の気体分圧勾配により起こるため、受動的かつ緩徐なものであり、両者は性質を異にする。しかし各々が独立して働いているのではなく、お互い何らかの形で相補的に作用し、中耳腔の生理的環境を維持していると考えるのが妥当である(図8)。一方、その両方が深刻な障害を受けた場合、中耳腔に不可逆的な換気不全が起こり、中耳炎症性疾患の成立に至るのではないかと推察される。

従来、耳管換気障害のみから一元的に理解されてきた中耳腔の換気障害の病因・病態論、さらにそれに対応する治療法、中耳手術の術式理論には未解決な部分が多い。今後は経粘膜換気能を加味した多角的な研究がこれらの問題を解決する糸口となることに期待したい。

引用文献

- 1) Bortnick E and Proud GO: On the egress of fluid from the middle ear. Arch Otolaryngol 80: 297-302, 1964.
- 2) 野村恭也, 原田勇彦, 平出文久: 耳科学アトラス 形態と計測値. 第3版, シュプリンガー・ジャパン, 東京, pp109-116, 2008.
- 3) 山藤 勇: 臨床医のための側頭骨・耳管アトラス, 金原出版, 東京, pp55-62, 1998.
- 4) 山口 隆, 隈上秀伯: 耳管機能の年齢変化と滲出性中耳炎の発症年齢について. 耳鼻 42: 1-6, 1996.
- 5) 山本 裕, 高橋 姿: 耳管機能と滲出性中耳炎. 耳喉頭頸 77: 899-903, 2000.
- 6) 山本 裕, 浦野正美, 高橋 姿, 中野雄一: 小児滲出性中耳炎に対する鼓室チューブ留置術の検討 長期留置型と短期留置型の比較. Otology Japan 5: 588-592, 1995.
- 7) Hergils L and Magnuson B: Human middle ear gas composition studied by mass spectrometry. Acta Otolaryngol (Stockh) 110: 92-99, 1990.
- 8) Grøntved A, Møller A and Jørgensen L: Studies on gas tension in the normal middle ear. Acta Otolaryngol (Stockh) 109: 271-277, 1990.
- 9) 大倉隆弘, 山本 裕, 花澤秀行, 五十嵐文雄, 中野雄一: 中耳含気蜂巢の酸素分圧. 日耳鼻 98: 1697, 1995.
- 10) 山本 裕: 乳突蜂巢とガス交換. JONHS 19: 85-99, 2003.
- 11) Yamamoto Y: Gas exchange function through the middle ear mucosa in piglets: Comparative study of normal and inflamed ears. Acta Otolaryngol 119: 43-47, 1999.
- 12) Ikarashi F, Takahashi S and Yamamoto Y: Carbon dioxide exchange via the mucosa in healthy middle ear. Arch Otolaryngol head Neck Surg 125: 975-978, 1999.
- 13) 山本 裕, 渡辺一道, 花澤秀行, 高橋 姿: 中耳含気腔の体積, 表面積と経粘膜換気能の関係について. Otology Japan 14: 149-153, 2004.
- 14) Yamamoto Y, Watanabe K, Hanazawa H and Takahashi S: Relationship between the surface area and volume of the human middle ear cavity and the transmucosal gas exchange function. Otology Neurotology 26: 308, 2005.

1) Bortnick E and Proud GO: On the egress of fluid from the middle ear. Arch Otolaryngol 80: