

【原著】

環境圧力の変化が鼓膜，耳管および中耳腔に及ぼす物理的影響－実験モデルによる検討

林 啓介¹⁾ 志賀美子¹⁾ 西山博司¹⁾ 小林繁夫¹⁾
宮澤享司²⁾³⁾ 中島 務¹⁾²⁾ 高橋英世⁴⁾ 中島太郎⁵⁾

名古屋大学医学部附属病院高気圧治療部¹⁾

名古屋大学医学部医学研究科頭頸部感覚器外科学（耳鼻咽喉科学）²⁾

社会保険中京病院耳鼻咽喉科³⁾

医療法人珪山会鶴飼病院⁴⁾

有限責任中間法人日本医療ガス協会前技術顧問⁵⁾

今回、著者は実験モデルを作成し、環境圧力の変化に対する耳管と中耳腔の物理的変化について実験を行い、環境圧力の上昇時と下降時における差異について考察した。中耳腔は一種の閉鎖空間であり、環境圧力が上昇すると中耳腔内部は外部に対して相対的に陰圧となる。また耳管の閉塞部位は中耳腔内部の相対的陰圧の強さにより閉塞度が大きくなることから、この相対的陰圧の増大によって耳管の開大はますます困難となることが分った。反対に環境圧力が下降すると、中耳腔内は外部に対して相対的に陽圧となることから、中耳腔内部の気体は、それ自身の膨張力で容易に耳管を押し開ける。耳痛の除去にはこれら耳管の特性を熟知した工夫が必要である。

キーワード 耳管，中耳腔，耳管閉塞度，耳痛，中耳腔コンプライアンス

Physical effect of the change of environmental pressure upon ear drum, Eustachian tube and middle ear cavity - An experimental study

Keisuke Hayashi¹⁾ Yoshiko Shiga¹⁾ Hiroshi Nishiyama¹⁾ Shigeo Kobayashi¹⁾
Takashi Miyazawa²⁾³⁾ Tsutomu Nakashima¹⁾²⁾ Hideyo Takahashi⁴⁾ Tarou Nakashima⁵⁾

- 1) Department of Hyperbaric Medicine, University of Nagoya School of Medicine
- 2) Department of Otorhinolaryngology, University of Nagoya School of Medicine
- 3) Chukyo Hospital
- 4) Ukai Hospital
- 5) Japanese Medical Gas Association

The authors designed an experimental model of middle ear cavity connected to Eustachian tube using plastic and latex materials, performed simulated experiments to testify their physical behavior against the change of environmental pressure, and confirmed the difference between compression and decompression phases. As middle ear cavity can be considered as a kind of enclosed space, so when the outside pressure is elevated, if not the Eustachian tube is open, the inside pressure of middle ear turns to be relatively negative against the increased outside pressure. As the degree of the occlusive part of Eustachian tube is strengthened by the increased negative pressure of the middle ear cavity, it was revealed that the opening of tentatively occluded tube became more difficult by this increased relative negative pressure. Contrary to this, when environmental pressure decreases, inside pressure of middle ear turns to be positive against outside, so the occluded air in the middle ear cavity can easily run through the tube spontaneously. It is indispensable to understand these physical properties of Eustachian tube and middle ear cavity to remove the ear squeeze of the patients effectively at the time of HBO practice.

keywords Eustachian tube, middle ear cavity, degree of Eustachian tube occlusion, ear squeeze, middle ear space compliance

はじめに

われわれは、車による峠越え、新幹線によるトンネル通過、航空機の離着陸、スキューバダイビングや高気圧治療などの折に環境圧力の変化を体験することができる。環境圧力が急激に変化した場合、中耳腔内と環境との間に圧力差が生ずるため、耳閉感を自覚するとともに音が聞こえ難くなり、そのまま放置すれば耳痛を招来することもある。これらの自覚症状は、一般に環境圧力が上昇する際にしばしば発生し、反対に環境圧力が下降する際には耳閉感を自覚しても耳痛を生ずることは希である。こうした症状を解消するために、通常、中耳腔と咽頭を連結する耳管を開大させ、中耳腔と環境との圧力の均衡をはかることが必要となる。今回、著者は環境圧力を変化させた場合に起こる耳管と中耳腔に発生する物理学的変化に関する実験的検討を行い、耳閉感および耳痛発生の成因、環境圧力の変化によって鼓膜、中耳腔、耳管へ及ぼされる影響について検討した。

1. 環境圧力変化時の耳管閉塞と耳管開大に関する実験的研究

耳は解剖学的に外耳、中耳、内耳の三つの部分に分けられる。外耳は鼓膜を境に大気に開放されているが、中耳腔は周囲を骨組織に囲まれた空間である。中耳腔と咽頭とをつなぐ耳管は外気につながる唯一の管であるが、嚙下運動などの通気動作を行わない限り通常は閉塞した状態となっている。すなわち、耳管が閉塞している通常の状態では中耳腔を一つの閉鎖空間とみなすことができる(Fig. 1)。

1.1. 実験方法

単純に中耳腔を一つの閉鎖空間、耳管を柔軟性のある管と考え、Fig. 2に示す実験装置を作成した。中耳腔に相当する部分には半分に切断したペットボトル(以下、Pボトルと略記)の口側部を使用し、これに耳管に準えて肉厚約1mm、内径15mm程度のゴム管を装着した。その反対側のPボトルの切断面には鼓膜に見立てた薄いビニールシートを張った。これらの装着

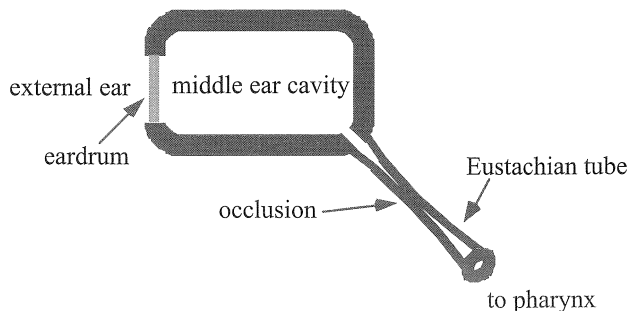


Fig.1 Schematic drawing of middle ear, Eustachian tube and ear drum

Eustachian tube is only one pathway leads to outer space (pharynx), but is usually occluded. Therefore, middle ear can be considered as a closed space.

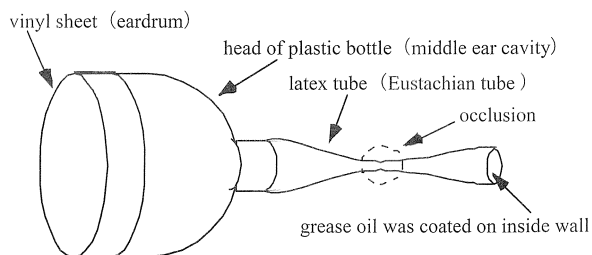
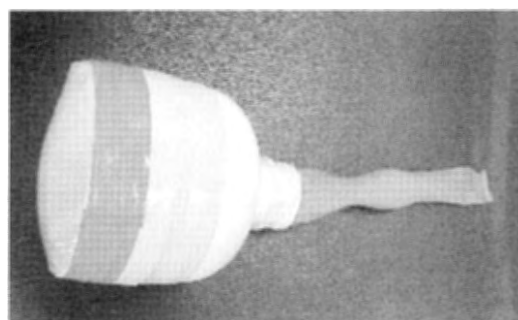


Fig.2 Experimental model of middle ear, Eustachian tube and ear drum

When environmental pressure increased, due to relatively negative pressure inside of the experimental model, vinyl sheet was drawn toward inside, and the occlusive part of latex tube extended its length toward middle ear cavity. Contrary to this, when environmental pressure decreased, due to relatively positive pressure generated inside of the model, vinyl sheet was pushed outward and occluded latex tube was opened gradually.

部の気密性を確実にし、また耳管に相当するゴム管の内面に耳管内壁の粘膜を模倣し、耐熱性のグリース油を塗布して適度な粘着性を保持した。

この実験装置のゴム管中央部分をあらかじめ用指的に圧閉してPボトル内部を閉鎖空間とした後、実験装

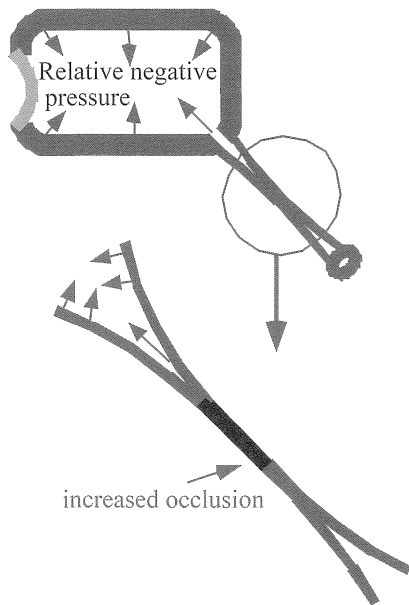


Fig.3-a Middle ear, Eustachian tube and ear drum receiving increased environmental pressure.

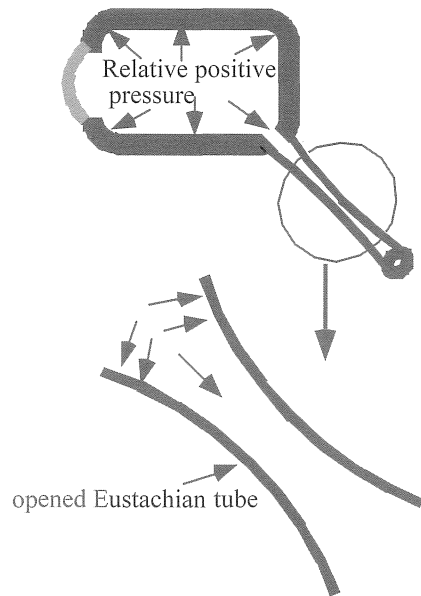


Fig.3-b Middle ear, Eustachian tube and ear drum receiving increased environmental pressure.

When environmental pressure increases, inside wall of Eustachian tube is drawn inside due to relatively negative pressure created within middle ear, and occlusive state increases its strength in proportion to the negative pressure.

When environmental pressure decreases, inside of Eustachian tube is opened by relatively positive pressure within middle ear and the occlusion is released passively.

置を高気圧治療装置内に入れて加圧・減圧を行い、環境圧力の変化によるゴム管およびビニールシートの変動する状態を観察した。

1.2. 実験結果

環境圧力が上昇するに連れて鼓膜に見立てたビニールシートはPボトルの内側方向に圧迫されて陥凹し、耳管に相当するゴム管は閉塞部からPボトル側へ向かって閉塞部分が次第に延長し、環境圧力がさらに上昇すると閉塞部分はPボトルとの接続部にまで達し、ゴム管にそれ以上の変化はみられなかった。さらに環境圧力を増大させてもPボトルには肉眼的変化を認めなかったが、鼓膜に相当するビニールシートの緊張がさらに増大した。環境圧力の上昇に伴いPボトル内部に発生する相対的陰圧が増大する程、ゴム管の内壁は受動的に内側に引き込まれた。

この状態で一旦ゴム管の圧閉を解除して（いわゆる「耳抜き」に相当）Pボトル内部の圧力を高気圧治療装置内部の圧力と平衡させた後、再びゴム管を閉鎖して

環境圧力を徐々に下降させると鼓膜に相当するビニールシートはPボトルの外側へ向かって膨隆した。またゴム管の閉塞部分はPボトル側からゴム管先端へ向かって開大して通気が行われるとともに膨隆したビニールシートは平坦になり環境圧力が変化する前の状態に復元した。

2. 環境圧力変化によって起こる中耳腔と耳管の物理的変化に関する考察

環境圧力は生体に均等に加わる。また生体内に存在する遊離気体の体積は環境圧力に追従して変化する。ここで中耳腔を閉鎖空間と考えると、環境圧力の上昇によって中耳腔内部の気体は圧縮され、外界に対して相対的に陰圧となる。この力の中耳腔全体に均等に及ぶが、骨組織で構成された中耳腔壁よりも柔軟で可動性のある鼓膜に動的な作用を及ぼしてこれを中耳腔側に引き込み、さらに中耳腔側の耳管内壁にまで及ぶ。また、この力によって耳管の閉塞域が広がり、耳管閉塞の度合がさらに増大する（Fig.3-a）。この状況下で

耳管を開大させるには強制的な方法によらない限り不可能で、中耳腔内部は相対的な陰圧を保ち続ける。

これらのことから、耳管の閉塞度（閉塞部の長さの中耳腔内の相対的陰圧力との関数と考えることができる）は中耳腔内部の相対的陰圧の強さにより増大すると考えられる。また、この相対的陰圧力により耳管内壁の粘膜が充血、腫脹したり粘液が滲出すると耳管閉塞度に影響を与えるものと思われる。

一方、環境圧力が下降する際は、中耳腔内部は外部環境に対して相対的に陽圧となり中耳腔内部の気体は膨張しようとする。そして、この力は柔軟で可動性のある鼓膜を外耳側へ押し出すように作用する。さらにその力は中耳腔の耳管内腔をも拡大させようとし、耳管閉塞部を受動的に押し開ける力となる。その力が耳管の閉塞力を凌駕したとき、膨張した中耳腔内部の気体は咽頭へ押し出される。すなわち中耳腔内部の気体はそれ自身の膨張力だけで耳管を開大させることができる（Fig.3-b）。この事実は車による高所移動や高気圧治療時の減圧過程などで認められるが、詳細については次項で述べる耳管開大操作をしないでいると「プスプス」というような音を伴って、中耳腔から咽頭へ受動的に空気が押し出されるのが自覚されることから理解できる。ちなみに耳管機能に障害が認められなければ、350～400mmH₂O(3.43～3.92kPa)近辺の圧で中耳腔内部の気体を受動的に耳管から押し出される¹⁾。

耳管通気性が不良で中耳腔内の圧力調整が十分にできない場合、環境圧力が上昇すると鼓膜は陥凹しながら中耳腔内圧を調節する。鼓膜は加圧時に100～500mmHg(13.3～66.7kPa)相当の圧力で穿孔するとされている²⁾。鼓膜が穿孔しない場合は、内耳窓が破裂し、蝸牛管内腔を満たすリンパ液が漏出することもある³⁾。中耳腔内圧と内耳リンパ液圧との圧力差によって惹起されるこの損傷は、以下に述べるバルサルバ法による脳脊髄圧の上昇を介して内耳圧が更に上がるために生起する可能性がある⁴⁾。

3. 耳管開大操作法に関する考察

「耳抜き」と通称される耳管開大法には、咽頭側から

息を押し込むバルサルバ法と嚙下やあくびなどの動作によるフレンツェル法などがある。

これらのうちバルサルバ法は、鼻を摘んで咽頭側へ息を押し込むことにより行う。この押し込まれた息は、咽頭部を環境気圧よりも相対的に陽圧にする。この相対的陽圧の力が耳管の閉塞力を凌駕したとき耳管は受動的に開大される。この方法は中耳腔内に強く息を押し込むことから中耳腔内圧が大気圧よりも相対的に陰圧となっている場合により有効である。

また、嚙下やあくびなどの動作によって耳管開大筋である口蓋帆張筋を作動させることによっても耳管の開閉が行われるフレンツェル法などの場合、中耳腔内部と外部環境との圧力差によって耳管の通気方向が決まる。嚙下運動による耳管開大能は年齢により異なるが、一般的にこの耳管開大能力は10歳位までに十分に発育するようになる。逆に50、60歳代以上になると徐々に耳管機能が低下してくると考えられている。小児期ではこの働きが未発達であるため、嚙下運動による耳管の開大が十分に行われにくい⁵⁾。しかし小児期までの特徴として、耳管は太くて短いことから、耳管は圧力によって受動的に耳管が開大しやすい構造であり、高気圧環境等の気圧の変化に順応しやすいと考えられている⁶⁾。また先天性疾患である口蓋裂患者においては、口蓋帆張筋の低形成や筋力不足の原因により能動的耳管開大が不良であるため、嚙下運動などによる耳管の能動的開大はあまり期待できないことが多い⁷⁾。

咽頭と中耳腔との間に炎症などが存在するときは受動的、能動的共に耳管開大が困難となる。代表例として鼻腔側ではアデノイドなどが存在する場合、中耳腔側では中耳炎に罹患している場合などがあげられる。

4. 耳管の開大を容易にするための工夫に関する考察

環境圧力が上昇する際に耳管開大操作を怠ったため、強度の耳痛を生じた場合、中耳腔内の相対的陰圧を解消しない限り耳痛は緩和されない。その場合、前述した機序によって耳管の閉塞度は中耳腔側の相対的陰圧の強さにより増大するので、一旦強い疼痛を生じた場合、それを解消することは困難となる。その際

は一旦環境圧力を若干下げ、相対的陰圧を緩めることにより耳管の開大をしやすいことが望ましい。耳管開大操作は相対的陰圧が増す前に、できれば鼓膜に違和感、圧迫感などを自覚したら直ちに行うべきである。また、炎症、腫脹、滲出物などにより咽頭側の耳管開口部の開放性が障害された状態で環境気圧が上昇した場合にも耳管の開大が困難になることがある。嚙下やあくびなどの運動を行っても痛みを取り除くことはできず、バルサルバ法を無理に行うと、体位等にもよるが滲出物が耳管内へ逆入り、中耳腔への通気抵抗を増大させてしまうと考えられる。この場合も一旦上昇させた環境圧力を若干低下させ、鼻をかむなどして耳管開口部付近の滲出物を取り除くと耳管通気が可能となることがある。但し炎症が強度で、耳管咽頭粘膜が腫脹して耳管開口部が閉塞しているような場合は、この方法でも耳管の開大が困難であるので高気圧酸素治療を強行することは禁忌であり、炎症などを招来した原疾患の治療を優先すべきである。また、体位を直立位から仰臥位にすると耳管部の静脈圧が上昇するため耳管粘膜が充血、腫脹し、耳管開大に対しての抵抗が増すと考えられる⁹⁾。つまり、直立位や坐位のように頭を持ち上げた体位の方が耳管開大操作は容易となる。

5. 環境圧力変化に伴う耳管開大操作回数

ボイルの法則によれば、温度が一定のとき一定質量の気体の体積は圧力に反比例する。この法則に従えば環境圧力が上昇する際、耳管の開大に必要な気体の体積は圧力が上昇する程少なくて済むことになる。1回の耳管開大操作を行うとき一定体積の気体が耳管を通気するとすれば、一定の速度で加圧するときには圧力が低い程気体の体積変化が大きいので、耳管開大操作を頻回に行う必要がある。これとは逆に、環境圧力が高い程、耳管の開大に要する気体体積は少なくなり、耳管開大操作の回数も減少する。

高気圧酸素治療において加圧速度が一定ならば、治療装置内の圧力が低いとき、耳管の開大に必要な気体体積の大きな変化を補うため単位時間あたりの耳管開大操作の回数は当然多くなる。このことは患者が、1

気圧から1.3気圧(101.3~131.7 kPa)の間では耳管開大操作が間に合わず、耳痛を自覚する頻度が高くなることから理解できる。環境圧力が1.3気圧を超えてからは患者が耳痛を自覚することは希である。これは体積変化の大きい1気圧から1.3気圧の時期に耳管の開大に成功しているため、この後の体積変化の小さい高压側においては耳管開大に余裕が生ずるためであると思われる。このことから特に耳管開大操作に慣れない患者の場合、気体の体積変化を緩除にするよう、装置内の圧力上昇速度を当初は緩くし、体積変化の少ない高压時では平常の加圧速度になるよう調節することが推奨される。

6 中耳腔壁のコンプライアンス

閉鎖された中耳腔内部の気体は環境圧力の変化の影響を受け体積が変化し、中耳腔内壁を押し引きする力を生む。もしも壁に弾性があれば、壁はこれらの力により変動するが、この動きは閉鎖空間内部の圧力が外部環境のそれに近づこうとするための力であると同時に、閉鎖空間内部の気体の体積変化により生じた圧力差を緩和させようとする働きとも理解することができる。環境圧力が上昇すると中耳腔内は相対的に陰圧になるが、その圧力差を相殺しようとして中耳腔および中耳腔側の耳管組織を内側へ引き込む力を生ずる。中耳腔にはその外壁を構成する大きな要素として鼓膜があり、鼓膜の柔軟性も大きく関与してくる。これらのことから中耳腔壁には、僅かではあるがコンプライアンスが存在するものと考えることができる。つまり外部環境と中耳腔内部に一定の圧力差を生じ、これが原因で耳痛を生ずるならば、中耳腔内壁のコンプライアンスはダンパーの役割を果たし、僅かではあるが耳痛を緩和するように作用する。

結語

環境圧力が上昇してゆくときの方が、下降してゆくときより耳抜きが難しいとはよくいわれる。この理由としては、中耳腔という閉鎖空間への耳管を介しての空気の流れが、反対方向への流れに比し環境圧力の変化に

よる相対的中耳内腔圧が、中耳側の耳管内腔で閉じる方向に働くか開く方向に働くかの違いによるものと考えられる。今回、われわれは実験モデルを用いて検討を行い、環境圧力上昇時には下降時よりも耳管の閉鎖される領域が長くなり、そのため耳管は、環境圧力上昇時の方が下降時より開き難くなるとする見解を提唱した。

もちろん、この実験モデルには幾つかの問題点が存することも承知している。第一には、生体の耳管は軟部組織または骨格に囲まれて存在し、気体圧力の変化に直接曝されるのは、むしろその内腔である。それに対しこのモデルがまともに環境圧力の影響を受けるのは、その外部からで内部からではない。さらに本モデルでは、咽頭への耳管開口部に存するバルブ機能を模するため、内部にグリース油を塗布したチューブを、外部から摘むことを行ったが、このことが生体耳管のバルブ機能を十分に模しているとは言い難い。

実際、人の耳管で、環境圧の変化につれて耳管の閉鎖範囲に変化が起きるかどうかは今後の検討課題ではある。しかし最近、画像診断技術の進歩によりMRIやCTを用いて、耳管粘膜を含めた画像評価が可能になりつつあり、今後、相対的に中耳腔が陰圧になった症例において、耳管領域がどのように変化するかを検討してゆきたい。

参考文献

- 1) 大久保仁：G. ヒトの中耳腔換気(気圧)を支える耳管の物理学，大久保仁，中耳腔換気の生理学，東京，総合医学社，73-85，1994
- 2) AP Keller Jr : A study of the relationship of pressures to myringorupture, Laryngoscope 68: 2015-2029, 1958
- 3) 眞野喜洋：高圧下の生理機能障害，関邦博，坂本和義，山崎昌廣(編)，高圧生理学，東京，朝倉書店，199-206，1988
- 4) JC Farmer Jr : Otologic and paranasal sinus problems in diving, (eds.) PB Bennett and DH Elliott, The Physiology and Medicine of Diving, London, Baillière Tindall, 507-536, 1982
- 5) 山口隆：耳管機能の年齢変化について，(第一報) 正常人の耳管機能，日本耳鼻咽喉科学会会報，97: 668-673，1994
- 6) 大久保仁：(付) 異常環境と生体空洞換気，vi 圧外傷事故を避けるための問題点，大久保仁，中耳腔換気の生理学，東京，総合医学社，183-187，1994
- 7) O Kriens: Anatomy of the velopharyngeal area in cleft palate, Clin Plast Surg 2: 261-283, 1975
- 8) 大久保仁：D. 中耳腔内圧を左右する因子，大久保仁，中耳腔換気の生理学，東京，総合医学社，27-43，1994