

## ●原 著

## SCUBA 潜水に伴う耳管調圧機能

芝山正治\* 中山 徹\*\* 山見信夫\*\*  
大久保仁\*\*\* 古橋廣之進\*\*\*\* 眞野喜洋\*\*

近年、スクーバ潜水の人口増加が著しく、中耳腔換気の不全による圧外傷の増加が目だつ。この障害は、大部分が鼓膜穿孔などその程度が軽度なために軽視されがちであるが、内耳の障害(内耳窓破裂)などが加わるとめまい、耳鳴り、難聴など重篤な症状を引き起こす。この問題に関しては、古くより耳管機能不全が原因である事が知られているにもかかわらず、潜水と耳管機能についての研究は乏しい。本論は、この中耳腔の換気調節に係わる高圧環境下の耳管機能についての研究結果である。耳管機能検査は、音響 Valsalva 検査装置を用いて、耳管が開放する鼻腔内圧を指標にして検討された。検査対象は健康成人とし、潜水が繰り返して行われた場合の耳管機能の変化や水中という異常圧環境下における体位変換での影響などについて検討した。その結果、一日に数回の潜降および浮上を繰り返すと耳管開放に要する鼻腔内圧はより高い負荷圧力を必要とした。また、潜水の潜降体位も耳管開放機能に影響を持つことが判明した。

キーワード：潜水、耳管機能、音響 Valsalva 検査、スクイーズ

### A Study of the Auditory Tube Function in Scuba Diving

\*Komazawa Women's Junior College

\*\*Faculty of Medicine, School of Allied Health Sciences, Tokyo Medical and Dental University

\*\*\*Department of Otorhinolaryngology, Tokyo Medical and Dental University

\*\*\*\*Department of Physical Education, Nihon University

The scuba diving population has increased very much recently, bringing with it a rise in barotrauma, a result of dysfunction of the auditory tube. Dysfunction of the auditory tube has been treated lightly because it leads to elementary barotrauma due to perforation of the tympanic membrane. When the dysfunction develops into the inner ear (because of a window rupture), it leads to serious symptoms such as vertigo, tinnitus, and deafness. It has long been known that dysfunction of the auditory tube can cause these condi-

tions. However, there are few reports on the relation between diving and dysfunction of the auditory tube. This report describes the auditory tube function under hyperbaric pressures which affect the inflation of the middle ear. Concerning, the auditory tube function, we measured the value of the nasal cavity internal pressure that opens the auditory tube (pressure is opened) during the Valsalva maneuver by measurement of sonotubometric auditory tube function. Subjects were normal adults who performed repeated diving in different postures. As a result, the internal pressure of the nasal cavity, or the opening pressure of the auditory tube, shows a tendency to increase. This experiment showed that the diving posture affects the opening and closing tube function.

#### Keywords:

Scuba diving  
Auditory tube function  
Sonotubometric auditory tube function  
Squeeze

\*駒沢女子短期大学

\*\*東京医科歯科大学医学部保健衛生学科

\*\*\*東京医科歯科大学医学部耳鼻咽喉科学教室

\*\*\*\*日本大学文理学部体育学科

はじめに

潜水(scuba diving：スクーバダイビング)に伴

う高気圧障害は、単純な squeeze (締め付け現象) による障害から減圧症や肺の破裂などの直接生命に影響する重大な障害まで様々である<sup>1)~3)</sup>。このなか耳管機能不全から生じる中耳腔の圧外傷は、直接生命への危険が少ないため軽視されがちである。しかし、鼓膜穿孔や内耳の損傷が生じると、種々の症状が生じて思わぬ事故に発展する恐れもある。最近、耳管機能不全による圧外傷が原因で耳鼻咽喉科を受診する潜水者が多くなっている。

常圧環境下で中耳腔を換気する耳管の開閉運動は、嚥下運動に付随して行われている。しかし、スクーバダイビングでは水面の1気圧から水深10mの2気圧まで約15~60秒の短時間に圧力が変化するため、嚥下運動や Valsalva 法 (耳抜き) を用いて耳管を強制的に開放し、中耳腔内圧と外圧との平衡を保つ必要が生じる。もしこの耳抜きが行われずに潜降を続けると中耳腔内は極端な陰圧となり、初期にはこの陰圧部分を滲出液や血液が充填し、陰圧の高度化とともに鼓膜の穿孔や内耳窓破裂に伴う外リンパ液の中耳腔への漏出という重篤な圧外傷を引き起こす<sup>4)5)</sup>。したがって、潜水のような気圧変化に遭遇する場合は、初歩的な圧外傷である耳の障害を予防するために耳抜きの方法を訓練する必要がある。

これからスクーバダイビングを始める者を対象に高圧タンク室 (加圧室) を用いて耳抜きの加圧テストを行った。その結果、56名 (112耳) の中で耳抜きができなかった者が3.6% (4/112耳) に認められた。このことはレジャーで潜水を楽しんでいる、いわゆるスポーツダイバーのなかに、耳管機能が悪く耳抜きができ難い者が含まれている可能性を示唆している。そして潜水人口の増加とともに耳管調圧不全による障害の増加が考えられる。そこで、これらの傷害についての研究を涉猟すると、動物を用いた研究は多くみうけられる<sup>6)</sup>が、人に関する研究は少ない<sup>7)</sup>。とくに水中という圧力環境下における体位変換による影響や潜水が繰り返して行われた場合の耳管機能がどのような対応をとるかなどを比較した研究は皆無と言わざるを得ない。このように圧力環境での耳管機能に関する研究も数少ない現況に対して、耳管機能に潜水を繰り返して行った場合や体位を換えることでどのような影響を受けるかを音響耳管検査法と Valsalva 法を組み合わせた音響 Valsalva 検査装

置により耳管開放圧を測定し、また潜水中の潜降体位が耳抜きにどのような影響を与えるかも併せて検討し、結語に示す新知見を得た。

## 検査装置および方法

### 1. 音響 Valsalva 検査装置

音響耳管検査と Valsalva 法を組み合わせた検査法は音響 Valsalva 検査法と呼ばれている。その原理は鼻孔に圧力センサーと反対側の鼻孔に音源スピーカーを設置し、検査を行う耳管の外耳道側にマイクロホンを固定し、被検者は鼻歌を歌う要領で肺から息を鼻腔へ送り、圧力がある一定以上に高まると耳管が開放し、外耳道に設置されているマイクロホンに音圧が伝わると同時に耳管が開放した圧力も記録される。負荷された圧力は、バイパスに落とされそれ以上の圧力が中耳腔などに負荷されないようにセットされている<sup>8)9)</sup>。

本検査法による記録可能な最大圧力は、1000 mmH<sub>2</sub>O (水深1m相当圧力) を限度とした。

### 2. 繰り返し潜水に伴う耳管開放圧力の検査および期間

潜水回数と耳管開放機能の関係を検討するため、音響 Valsalva 検査装置を用い、耳管の開放圧力を潜水前後に検査した。

実際に潜水が行われた海域の水深は、最大で10mあり、1日5~10回の潜降および浮上を行われた。これらの潜水の期間は、2週間に亘り行われた。2日連続で行い、5日間の休止日をはきんで、また2日間行い、合計4日間の実施日数とした。

### 3. 異なる体位による潜降方法

実海域の潜水において潜降方法の違いが耳管開放機能にどのような影響を与えるかを調べた。潜降方法は、頭から潜降する head-down と足から潜降する head-up の2方法により行われた。潜降は海面と海底とをロープで連絡し、そのロープに添って水深10mまで潜降する方法とした。

### 4. ダイビング・データ・レコーダ

潜水中の潜水プロフィールを調べるため、オートマチック・ダイブ・ログ (ADL) を用いて記録した。この ADL は、アドニスエンジニアリング社製の ADL コンピュータシステム (adonis diving recording computer system) を使用し、ADR (ダイビングレコーダ)、ADD (デジタルディスプレイ)、AIA (インフォメーションアダプター)、APP

表1 初心者と指導者の潜水実施日数の経過に伴う耳管開放圧力  
および耳管開放率の変化

	初 心 者			指 導 者		
	開放圧		陽性率	開放圧		陽性率
	mmH <sub>2</sub> O mean ±SE	% mean		mmH <sub>2</sub> O mean ±SE	% mean	
コントロール	414	37	100	289	66	100
第1日目の潜水後	503	44	89	469	96	88
第2日目の潜水後	558	35	79	553	111	100
☆						
5日間の休憩						
第3日目の潜水前	505	44	82	400	59	100
第3日目の潜水後	556	44	82	451	79	100
☆						
第4日目の潜水後	525	45	89	425	89	100

☆: P < 0.05, ±SE: standard error (標準誤差)

(カラープリンタープロッター)の4つのシステムから構成されている<sup>10)</sup>。

## 被 検 者

被検者はこれから潜水をはじめの初心者(novice)28名とその潜水を指導する熟練者(expert: instructor)6名であり、既往歴および現症歴についてはいずれも異常を認めぬ健康成人である。それぞれの平均年齢は、24.0±6.1歳、35.4±5.9歳である。しかし、各検査の実施日は、実海域や実験室で行われたため、全日程の検査が行われた被検者は異なってしまった。それらの内訳は、

### 1. 繰り返し潜水に伴う耳管開放圧の検査を行った被検査

初心者で14名(平均年齢23±4.6歳、男子5名、女子9名)であり、指導者で4名(平均年齢33±4.3歳、全員男子)の合計18名である。

### 2. 異なる体位による潜降方法の被検者

初心者で25名(平均年齢24±5.4歳、男子10名、女子15名)であり、指導者で6名(平均年齢37±4.4歳、男子4名、女子2名)の合計31名である。

## 結 果

### 1. 繰り返し潜水に伴う耳管開放圧力

期間中に調べられた耳管開放圧力の結果を表1および図1に示す。この中には1000mmH<sub>2</sub>Oまでの圧力を加えても耳管が開放しない者は記録ができないため含めていない。第1日目の潜水が始まる前の耳管開放圧力は、初心者が414±37mmH<sub>2</sub>Oであり、指導者が289±66mmH<sub>2</sub>Oであった。これをcontrol値とした。実海域で潜水を行った時の初心者の値は、いずれも潜水終了後に高い値を認めた。また、指導者においても初心者同様高い値が認められた。初心者の耳管開放圧力は、controlと比較して第2および3日目の潜水終了後に上昇し、有意な差(P < 0.05)が認められた。

陽性率は、1000mmH<sub>2</sub>Oまでの圧力を加えて耳管が開放した者の割合である。潜水開始前には初心者および指導者とも全員が開放したが、その後の初心者の陽性率は、第2日目の潜水終了後に79%(22/28耳)と最も低下し、第2日目以外も100%の陽性率は認められなかった。指導者の陽性率

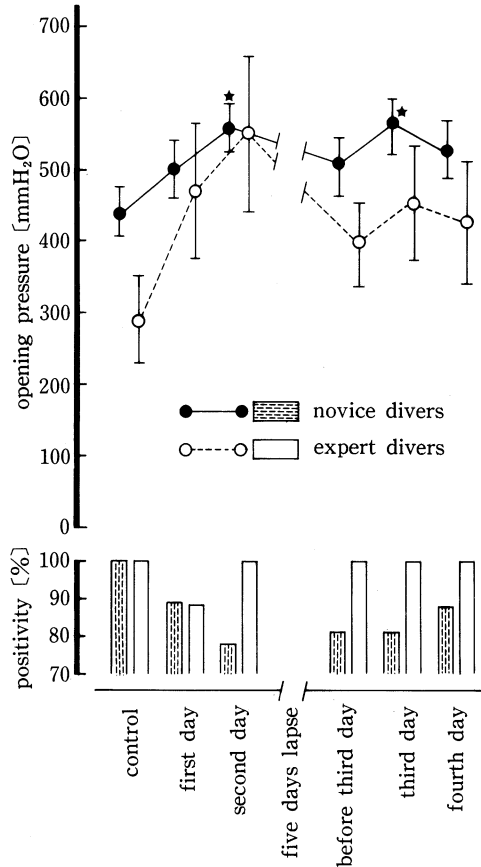


図1 繰り返し潜水に伴う耳管開放圧力と耳管開放の陽性率

★:  $P < 0.05$ , mean  $\pm$  SE

は、第1日目の潜水終了後のみが88% (7/8耳)であった。

## 2. 異なる体位による潜降方法と耳管開放機能

異なる体位による潜降方法の被検者は、その日にスクーバ潜水で5~7mの潜水を経験した者を対象とした。潜降方法の順位は、第1回目に頭からの潜降(★印, head-down)を行い、第2回目に足からの潜降(head-up)とした(図2, 3)。記録はADLを被検者に装着して行った。2方法の異なる潜降が可能であった者の潜水プロフィールを図2に示す。潜降途中で耳抜きができず中止した者の潜水プロフィールを図3に示す。図3において1番目に示されている22歳男子は、head-downの潜降を2回行ったが水深3.5mで耳抜き

ができず、また耳痛を訴えたため head-down の潜降を中止した。続いて head-up の体位で潜降を行ったが水深5mで同じように耳痛を訴えたため中止した事例である。つぎに2番目に示されている23歳女性のケースは、水深5mまで head-down で潜降したが耳痛を訴え水深2.5mまで一度浮上し、その水深で再び耳抜きを行い耳痛が治まったので head-down の体位で水深10mまで潜降した。続いて head-up の体位で潜降を行ったところ10mまで問題なく潜降できたケースである。これらの結果をまとめると、head-down の潜降方法で水深10mまで潜水できなかった者は初心者で25名中8名(32.0%)に認められ、指導者でも6名中1名(16.7%)に認められた。また、head-up の潜降方法で潜水できなかった者が、初心者で2名(8.0%)に認められたが、指導者では認められず全員が水深10mまで潜水できた。また、head-down と head-up のいずれの潜降方法を用いても潜水できなかった者が初心者で2名の8%に認められた。head-down の潜降方法で中止した9名の平均水深は $3.7 \pm 1.6$ mであり、head-up の2名においては $4.6 \pm 0.7$ mであった。

## 考 察

本研究は、頻回の潜水などが行われた時の耳管機能を音響 Valsalva 検査法<sup>8)9)</sup>で検討することである。音響 Valsalva 検査装置の特徴は、耳管開放機能を数値で表現できることである。

運動生理学の一般的な考え方としては、運動や作業が繰り返して行われると、練習効果が生じるといわれている。本研究の繰り返し潜水が行われた結果では、それとは一見異なるごとき現象を認めた。潜水を続けていると度重なる能動的耳管開放が必要であるために局所疲労による耳管開放機能の一時的劣化をきたして、耳抜き動作に必要以上の圧力を加えないと耳管調圧ができなくなる研究結果であった。すなわち、連続した潜水回数(日数)により耳管開放圧力は、初回の耳管開放圧力より高い圧力を必要とした。control 値とその後の潜水を継続した値とを比較すると初心者および指導者の両者でもともに高い耳管開放圧力値を示した。潜水を行うことは、常圧環境の耳管開放の生理学的機能から全く外れた行為であるといえる。熟練した潜水者の発言として繰り返し潜水を

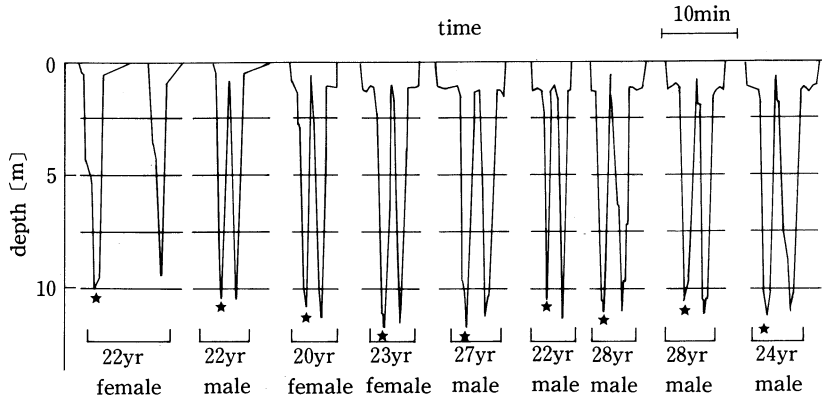


図2 異なる体位による潜降方法により水深10mまで潜水が行えた潜水プロフィール (正常者)

★：1回目が頭からの潜降 (head-down), 無印：2回目が足からの潜降 (head-up), 潜水プロフィールの下段の数字は、年齢 (性別)

行くと耳抜きの際に耳管開放機能が低下すると述べることに符合する現象である。

日常生活における中耳腔の換気機能は、生理的に中耳腔にガス代謝<sup>11)</sup>が生じ、中耳腔内の圧力変動が起きたときに、嚥下運動に伴い耳管開放が中耳側から咽頭に向かって一方向にガスが排出される。これが中耳腔の正常な換気機能である。その機能に対して潜水では逆のルートをとる結果となり、本来の耳管正常機能の生理学的メカニズムの逆転現象を起こし、生体にとっては非生理的な現象となる。すなわち、潜水することは、生体周囲の環境圧力が陽圧となるため中耳腔内の陰圧を解消する手段として強制的に嚥下運動やValsalva法によって耳抜きを行う結果、逆のルートでガスが流れることになる。このような繰り返しの潜水によってとくに初心者では、耳管開放を過度に行い、この調圧頻度の増加が局所の疲労を生じて耳管開放圧力の劣化を引き起こしていると推察される。また潜水による強制換気が作用して中耳腔内の粘膜変化を引き起こす危険性がある。このことは手術の全身麻酔で笑気ガスが用いられ、術後に中耳腔が陰圧を形成する Blackstock and Gettes<sup>12)</sup>の報告があり、耳管粘膜への強制換気の影響、耳管開大筋自身の疲労などが耳管開放機能を低下させていると考えられる。

職業ダイバーの耳管開放圧力が一般成人と比較

して高い圧力を要し、耳管開放率が60%と非常に低い値であることが報告されている<sup>13)</sup>。しかしこれは年間の潜水日数が100日以上を潜水を職業としている者を対象とした報告であり、今回の被検者である熟練者は年間の潜水日数が多い者で30日程度のスポーツダイバーに近い者を被検者にした違いにより、職業ダイバーのような耳管開放圧力や開放率の低下がコントロール値で認められなかったと考えられる。

潜水が行われるとき潜降の体位が問題となる。この体位に関しては、head-downの体位で潜降する時よりもhead-upすなわち立位のまま足から潜降する方が調圧しやすいことが実海域で行った本研究で調べられた。常圧環境下で行われた体位変換と耳管機能に関する報告<sup>14)15)</sup>によると坐位、側臥位、head-downの異なる体位においては耳管開放圧力に最も高い圧力を必要とする体位はhead-downであり、最も低い圧力で開放する体位は坐位であった。これは本研究の実海域で行った実験と一致するところである。しかし、Virtanen<sup>16)</sup>は、音響耳管検査法を用いて体位変換時の開放機能を検討し、あきらかな体位の影響は認められないと報告しているが、この検査法は、音圧変化を指標とした結果であり、本研究の方法とは異なる。

体位が耳管開放機能に影響する因子としては、

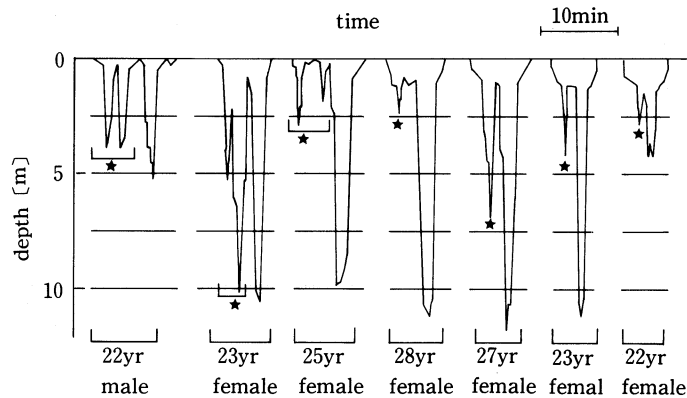


図3 異なる体位による潜降方法により水深10mまで潜水が行えなかった潜水プロフィール

大野ら<sup>17)</sup>は耳管粘膜の腫脹が最も大きいと述べている。これは、Andreassonら<sup>18)</sup>寺邑<sup>19)</sup>が背臥位やhead-downでとも鼓室内圧が高まり、坐位から前屈位に変換すると、中耳腔内圧が22mmH<sub>2</sub>O上昇すると述べ、この原因については、鼓室や乳突蜂巣粘膜の容積が増加するためと報告している。容積増加の現象は、背臥位で内頸静脈を測定すると、88mmH<sub>2</sub>Oの差を生じ<sup>20)</sup>、体位変換が血流に影響されている現象である。しかしこれらの実験条件は、常圧環境下で行われ、水中環境とは異なるがhead-downの体位が頭部に付加を加えている結果といる。研究結果においてもhead-downの体位で潜降できなかった者(初心者で32.0%)がhead-upの体位で潜降できた(初心者で8.0%できない)ことを考えると安全な潜降方法はhead-upの体位(姿勢)であるといえる。

以上、本研究は繰り返し潜水の耳管開放機能について考察を行った。近年、スクーバダイビングがわが国でも活発となり、50万人ものスポーツダイバー人口になろうとしている。本研究は、これらのダイバーに耳の圧外傷防止に役立つ新知見を提供した。また、職業潜水に対しても労働衛生学的見地から有用な情報を提供できたものと考えられる。なお本研究に関連する事項としては、長期潜水作業に従事した場合の耳管機能の経年変化や耳管機能の順化順応などの生理学的な解析が重要であり、これらの事項は今後解明されなければならない課題といえよう。

## 結 語

1) 音響耳管検査装置とValsalva法を組み合わせさせて潜水に伴う耳管機能の開放能について調べた。

2) 繰り返し潜水は、耳管機能を低下させ、耳管開放圧が潜水回数とともに高い圧力を要した。

3) 水中で行われた体位変換によって、立位で潜降する体位(head-up)と頭を下にして潜降する体位(head-down)を比較したところ、耳管機能はhead-downの体位でより過大な影響を受け、機能の低下が認められた。head-upの体位で潜降することが安全な潜水を行うことである。

## 【参 考 文 献】

- 1) Department of the Navy: U.S. Navy Diving manual. p. 3. 12-15, 7. 25-33, 1987, Department of the Navy, Washington, DC
- 2) 眞野喜洋: 減圧症治療の現状と問題点—東京医科歯科大学における減圧症治療の現状と問題点—. 日高圧医誌, 23(4): 185-192, 1988
- 3) Bennet P.B. and Elliott D.H.: The Physiology and Medicine of Diving. p. 200-238, p. 262-296, p. 353-382, p. 507-536, 1982, Bailliere Tindal
- 4) 大久保仁, 寺邑公子, 小山澄子, 小川明, 仲博美, 臼井洋行, 渡辺勲, 眞野喜洋, 芝山正治: 潜水(スクーバ)事故と耳管機能について. 耳鼻咽喉科, 59: 573-578, 1987
- 5) Goodhill V.: Sudden deafness and round win-

- dow rupture. Laryngoscope, 81 : 1462-1471, 1971
- 6) Takahashi S.: Inner ear barotrauma. Bull. Tokyo Med. Dent. Univ., 32 : 19-30, 1985
  - 7) 芝山正治, 眞野喜洋, 大久保仁: 漁業 (追込み漁法) ダイバーの耳管機能に関する研究. 産業医学, 29 : 265-270, 1987
  - 8) 大久保仁, 渡辺勲, 石川紀彦, 大柿徹, 石田博義, 羽成敬一: 音響耳管検査法一(続) WI0-01型試作機の使用経験一. 耳鼻臨床, 77 : 1747-1754, 1984
  - 9) 大久保仁, 渡辺勲, 渋沢三伸, 石川紀彦, 石田彦義, 大柿徹, 羽成敬一, 大木幹文: Valsalva 法の耳管開閉能と鼻腔圧について. (3)一音響耳管検査法による一. 耳鼻臨床, 78 : 339-344, 1985
  - 10) 芝山正治, 眞野喜洋: 追込み漁潜水作業による潜水プロフィールと労作強度. 日衛誌, 44 : 587-594, 1989
  - 11) Bylander A. K. H., Ivarsson A. I. and Tjernstrom, O. : Middle ear pressure variation during 24 hours in children. Ann Otolaryngol. Suppl., 120 : 33-35, 1985
  - 12) Blackstock D. and Gettes M. : Negative pressure in the middle ear in children after nitrous oxide anaesthesia. Can. Anaesth. Soc. J., 33 : 32-35, 1986
  - 13) 大久保仁, 渡辺勲, 石川紀彦, 渋沢三伸, 石田彦義, 枝松秀雄, 寺邑公子, 石田博義, 大野文夫: 潜水漁法に従事するダイバーの耳管機能について一音響耳管検査法利用の Valsalva 値一. 耳鼻臨床, 80 : 755-762, 1987
  - 14) Rundcrantz H. : Posture and Eustachian tube function. Acta. Otolaryngol., 68. : 279-292, 1969
  - 15) Ivarsson A. Tjernstrom O. and Bylander A. : High speed tympanometry and ipsilateral middle ear reflex measurements using a computerized impedancemeter. Scand Audiol, 12 : 157-163, 1983
  - 16) Virtanen H. : Relation of body posture to Eustachian tube function. Acta Otolaryngol., 95 : 63-67, 1983
  - 17) 大野文夫, 大久保仁, 石川紀彦, 寺邑公子, 渡辺勲: 体位と耳管開閉能一音響耳管検査法による測定一. 耳鼻臨床, 80 : 657-662, 1987
  - 18) Andreasson L. Ingerstedt S. and Ivarsson A. : Pressure dependent variation in volume of mucosal lining of the middle ear. Acta Otolaryngol., 81 : 442-449, 1979
  - 19) 寺邑公子: 中耳腔内圧の変動要因に関する研究. 耳鼻臨床, 81 : 1789-1801, 1988
  - 20) Jonson B. and Rundcrantz H. : Posture and pressure within the intracranial jugular vein. Acta Otolaryngol., 68 : 271-275, 1965