

## 繰り返し潜水 (スクーバダイビング) における 耳管機能の影響

芝 山 正 治

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

Masaharu SHIBAYAMA

キーワード：スクーバダイビング、耳管機能、繰り返し潜水

#### I. はじめに

レクリエーションダイバー人口は、Cカード (Certification card: 認定証) 発行枚数の累積で約75万枚と推定され、その中で現在活動している人口は約30万人と予測されている<sup>1)</sup>。これらのダイバーが潜水活動を行うことによって潜水障害 (高気圧障害) に罹患する<sup>2~4)</sup>。この障害の発生頻度の中で最も多い障害が耳の障害であり、約11%のダイバーが経験している<sup>5)</sup>。また、耳の障害の発生原因は、潜水時に必ず行う耳抜き失敗や無理な潜水または体調の悪いときの潜水などのケースが多い。しかし、今までの研究で耳抜きに負担が掛かるケースとして一日に複数回の繰り返し潜水や一回の潜水で潜降・浮上を頻繁に行うことによって、また数日間に渡って続けて行う潜水で耳の機能に負担が掛かることが知られている<sup>6)</sup>。

耳の障害は、耳管機能不全から生じる中耳腔の圧外傷であり、直接生命への危険が少ないため潜水障害の中で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。

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、潜水では水面の1気圧から水深10mの2気圧まで約15~60秒の短時間で気圧変化を受けるため、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>7,8)</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理解したうえで訓練する必要がある。

レクリエーションダイバーが当初行う耳抜きの訓練方法は、通常プールや海で実際に潜水を行い修得しているが、この時にはじめて潜水を経験するため技術的にも心理的にも大きな負荷が掛かり、結果的に失敗し、障害に罹患し耳鼻咽喉科に受診するケースが多いようである。また経験者においても体調の悪いときに無理に潜水し中耳炎や内耳障害に罹患するケースもある。

最近の傾向として耳の障害の発生頻度は以前と比較しても減少傾向にあるとは言えず、ほぼ同じ割合を示している。この原因を調べるため1989年<sup>9)</sup>にレクリエーションダイバーを対象に行った音響耳管検査法と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調べた手法を用いて、今回同様の実験を行ったところ新しい知見がみいだせたのでその結果を報告する。

## II. 検査装置及び方法

### 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(図1)。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設置し、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り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>6,9,10)</sup>。

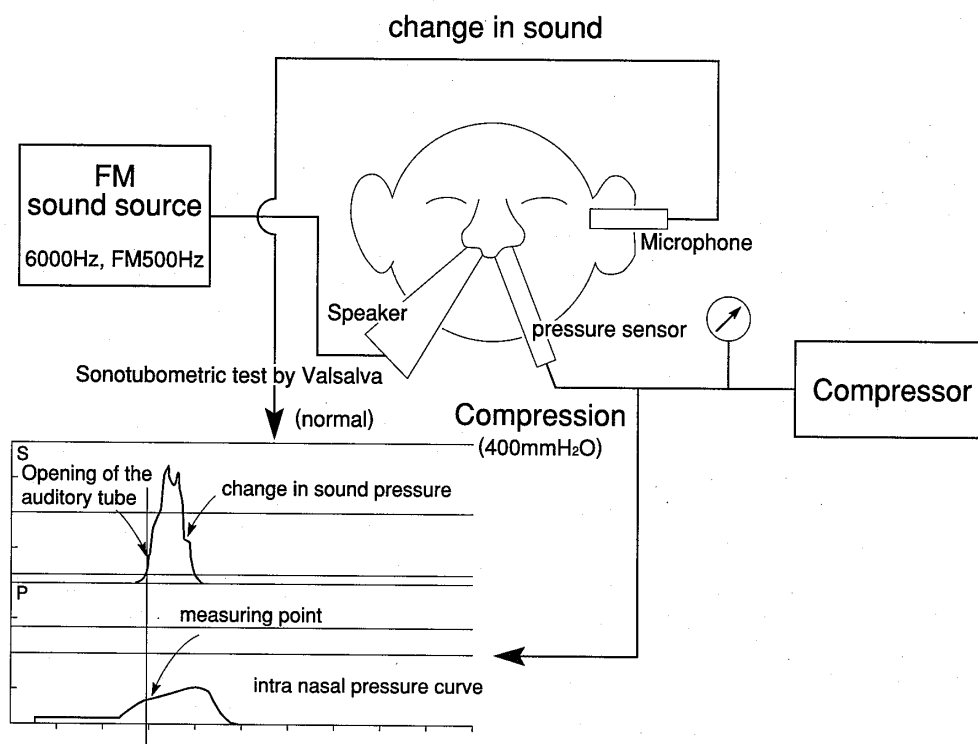


図1. 音響バルサルバ法による耳管開放圧力の検査システム

### III. 被検者

被検者はこれから潜水をはじめる初心者 (novice) 14名 (男子5名、女子9名) とその潜水を指導する熟練者 (expert: instructor) 5名 (男子) であり、既往歴及び現症歴について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、22.9歳±4.6歳、33.6歳±4.7歳である。

### IV. 結果

期間中に調べられた耳管開放圧力の結果を表1及び図1に示す。第1日目の潜水が始まる前の耳管開放圧力の平均と±SDは、初心者が458±169mmH<sub>2</sub>Oであり、指導者が310±171mmH<sub>2</sub>Oであった。これをcontrol値とした。第1日目の実海域で潜水を行った後の初心者の値は、いずれも高い値を認め初心者で571±189mmH<sub>2</sub>O、指導者で458±245mmH<sub>2</sub>Oであった。初心者の耳管開放圧力は、controlと比較して第2及び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。

controlを100%とした割合では、初心者ですべてが有意な差 ( $p<0.10$ 及び $0.05$ ) が認められたが、指導者

では第1及び4日目で $p < 0.10$ 、第2日目で $p < 0.05$ の有意な差が認められた。

表1を図にまとめたものが、図2及び3である。第1日目の潜水後から第2日目の潜水後に掛けて上昇し、5日間の休憩によって回復したが、初心者は第3及び4日目の潜水後に再び上昇している。

表1. 繰り返し潜水に伴う耳管開放圧力の変動

	初心者ダイバー				インストラクターダイバー			
	開放圧力		割合		開放圧力		割合	
	(mmH <sub>2</sub> O)		(%)		(mmH <sub>2</sub> O)		(%)	
	mean	± SD	mean	± SD	mean	± SD	mean	± SD
control	458	169	100		310	171	100	
第1日目潜水後	571	189	125	34	458	245	171	94
			★ ★					
第2日目潜水後	596	129	136	35	600	254	226	106
	★ ★		★ ★		★		★ ★	
5日間の休憩								
第3日目潜水前	526	166	116	35	452	194	157	41
			★					
第3日目潜水後	607	158	137	39	449	201	164	84
	★ ★		★ ★					
第4日目潜水後	550	153	125	39	439	228	168	100
	★		★ ★				★	
7日目の検査	407	142	93	30	342	127	124	46

★ ;  $p < 0.10$    ★★ ;  $p < 0.05$

## V. 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>6,9,10)</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、練習効果の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及び指導者の両者で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

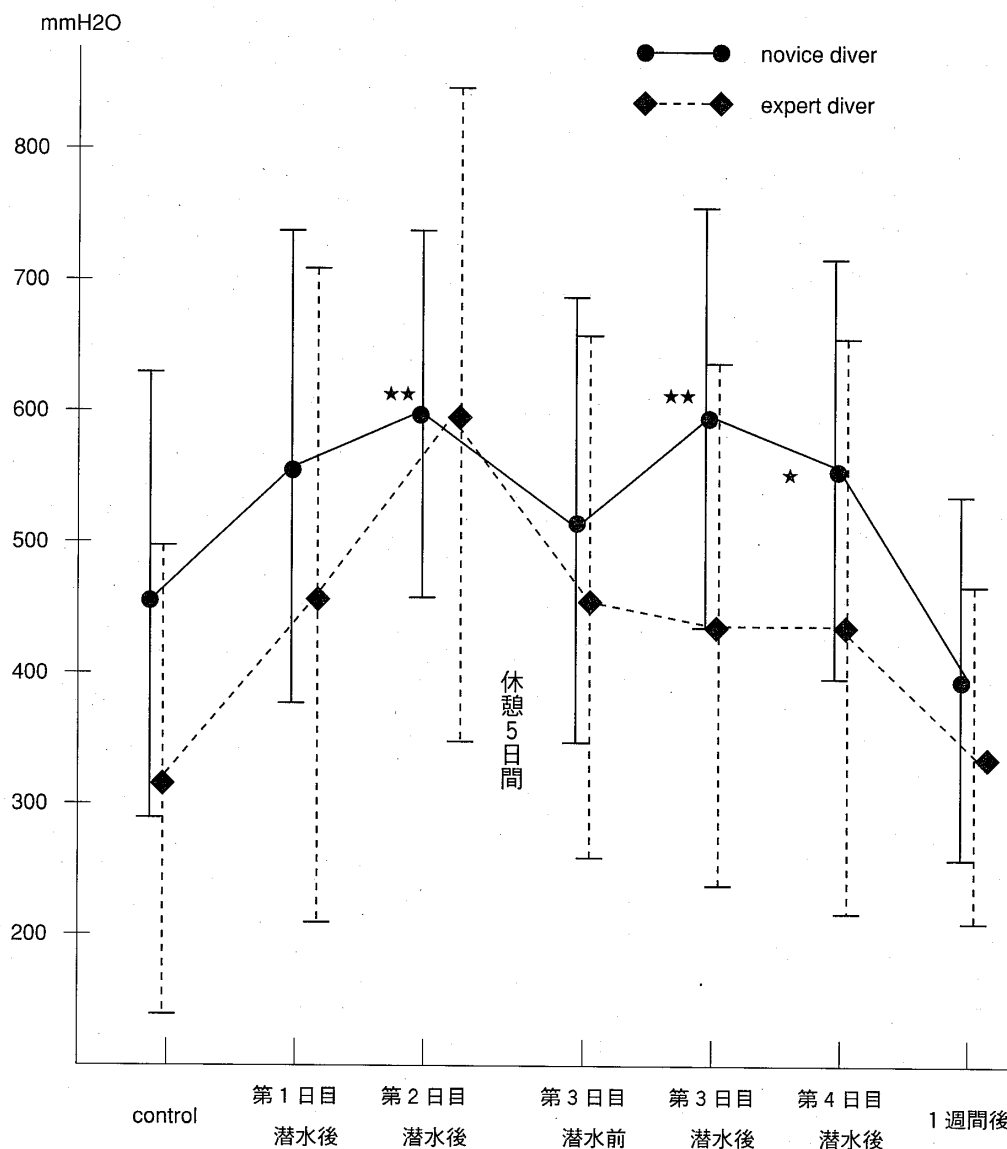


図2. 初心者 (novice diver) と指導者 (expert diver) の繰り返し潜水に伴う耳管解放圧力 (耳抜き) の変動 (音響バルサルバ検査法を用いて)

★:  $p < 0.10$  ★★:  $p < 0.05$

者の発言として繰り返し潜水を行うと耳抜きの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し、生体にとっては非生理的な現象となる。即ち、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

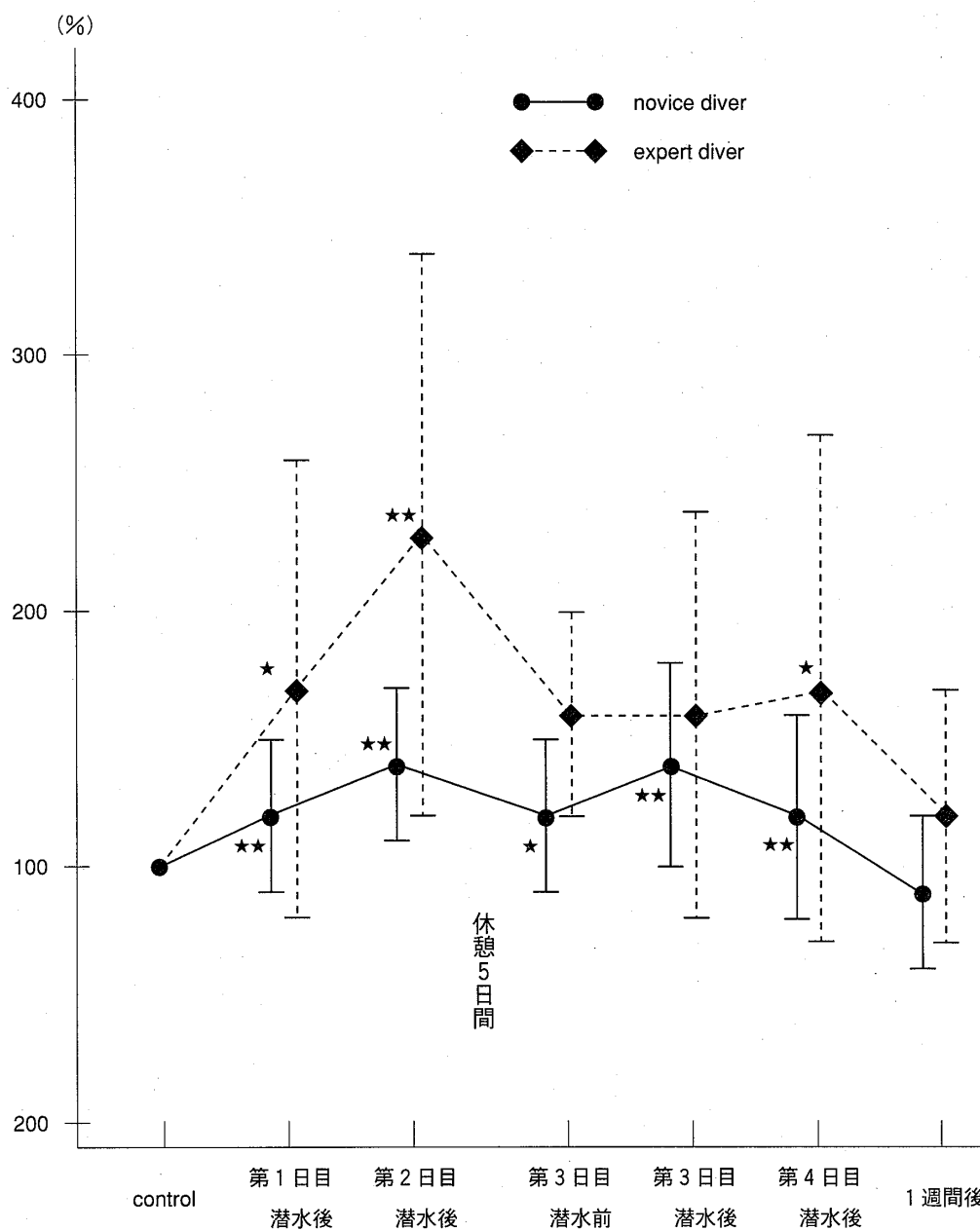


図3. 初心者 (novice diver) と指導者 (expert diver) の繰り返し潜水に伴う耳管解放圧 (耳抜き) の変動 (%) (音響バルサルバ検査法を用いて)

★:  $p < 0.10$    ★★:  $p < 0.05$

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方で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>13,14)</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>15)</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。

潜水の時に潜降する体位 (head-upまたはhead-down) が耳管開放機能に影響する因子としては、大野ら<sup>16)</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>17)</sup>寺邑<sup>18)</sup>が背臥位やhead-downでともに鼓室内圧が高まり、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、鼓室や乳突峰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>19)</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う。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%) ことを考えると耳抜きに負担を掛けず、耳の障害を予防する安全な潜降方法はhead-upの体位 (姿勢) である<sup>6)</sup>。

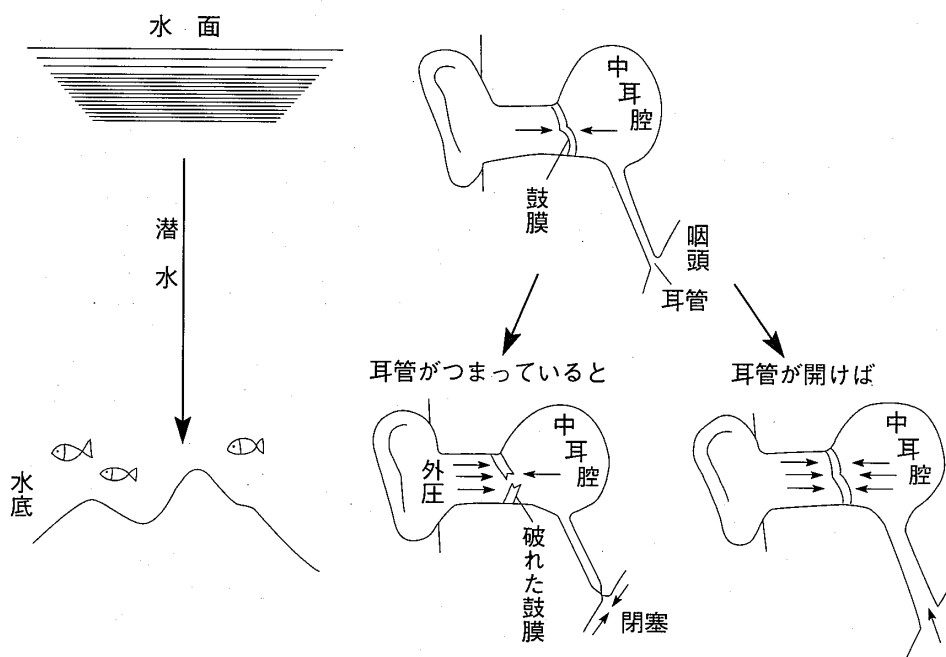


図4. 潜水に伴う耳抜きの成功例と失敗例 (潜水土テキスト参考 20)

指導者は、初心者をはじめて潜水させる場合は潜降用のロープに捕まらせてhead-upの姿勢で耳抜きを行わせれば、図4で示した成功例 (図の右側) の通り、耳管は少ない負荷で開放し、中耳腔側と外圧とのバランスが保たれる。鼓膜穿孔例の中で最も症例の多い原因としては、無理なスキンドイビングや耳抜きの有無を確認しないで強制的に潜降させたケースなどによって図4 (図の左側) で示す鼓膜穿孔などの障害に陥ることがある。水深が5m前後の比較的浅い地点では特に障害が発生しやすいので注意深く潜水させることが耳の障害を予防するために大切な安全対策である。また、一日に繰り返して潜降及び浮上または数日間の潜水期間を要して潜水をさせる場合は、耳抜きの機能が低下してくることを考慮に入れて無理のない潜水を指導する必要がある。

耳抜きの理論 (方法) を初心者理解してもらう必要もある。耳にできるだけ負担を掛けないために耳抜

きの方法を、まず

- ①燕下法（唾を飲み込む動作）で試み、できない場合は
- ②トゥインビー法（鼻を塞いで燕下を行う動作）を行わせ、それでもうまくいかない場合は
- ③バルサルバ法（鼻を塞いで鼻腔内の圧力を高める動作）を行わせる順番で、耳抜きの手段を教育しなければならない。

本研究は繰り返し潜水及び安全な潜水方法について、耳抜きと耳管開放機能に関して考察を行った。ここ10年、スクーバダイビングがわが国でも盛んに行われるようになり、毎年活動しているレクリエーションダイバー人口は30万人以上と予測される。これらのダイバーに対して耳の圧外傷防止に役立つ新知見を提供できたと考える。

なお本研究に関連する事項としては、長期潜水を行っ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。

## 文献

- 1) 海中開発技術協会：平成8年度ダイビング産業の実態調査に関する動向調査。（社）海中開発技術協会、東京、p19-22、1997.
- 2) Department of the Navy : U.S.Navy Diving manual. p.3.12-15, 7.25-33, 1987, Department of the Navy, Washington,DC.
- 3) 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況と問題点－. 日高圧医誌、23(4):185-192,1988.
- 4) 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.
- 5) 芝山正治、山見信夫、内山めぐみ、東美奈子、中山徹、中山晴美、高橋正好、水野哲也、眞野喜洋：レジャーダイバーの高気圧障害に関する実態調査 その1－ダイビングコンピューター－. 日高圧医誌、31(1):36, 1996.
- 6) Shibayama M. : A study of the auditory tube function in scuba diving by measuring sonotubometric auditory tube function during the Valsalva maneuver. St.Marianna Med. J.. 18:967-983,1990.
- 7) 大久保仁、寺邑公子、小山澄子、小川明、仲博美、白井洋行、渡辺勇、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.
- 8) Goodhill V. : Sudden deafness and round window rupture. Laryngoscope, 81:1462-1471,1971.
- 9) 大久保仁、渡辺勇、石川紀彦、大柿徹、石田博義、羽成敬一：音響耳管検査法－（続）WIO-01型試作機の使用経験－. 耳鼻臨床、77:1747-1754,1984.
- 10) 大久保仁、渡辺勇、渋谷三伸、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）－音響耳管検査法による－. 耳鼻臨床、78:339-344, 1985.
- 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) Rundcrantz H. : Posture and Eustachian tube function. Acta. Otolaryngol., 68:279-292,1969.
- 14) 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.
- 15) Virtanen H : Relation of body posture to Eustachian tube function. Acta Otolaryngol., 95:63-67,

1983.

- 16) 大野文夫、大久保仁、石川紀彦、寺邑公子、渡辺勇：体位と耳管開閉能—音響耳管検査法による測定—、耳鼻臨床、80:657-662,1987.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) Jonson B. and Rundcrantz H. : Posture and pressure within the intracranial jugular vein. Acta Otolaryngol., 68:271-275,1965.
- 20) 労働省：潜水士テキスト、p291-300、中央労働災害防止協会、東京、1992