防 音 気 圧 装 置

北原 正章・児玉 章・小澤 博史・井上 秀蔵

Sound-Proof Pressure Chamber

Masaaki Kitahara, Akira Kodama, Hiroshi Ozawa and Shuzo Inoue

(Shiga University of Medical Science)

Although the effect of atmospheric pressure on hearing and/or equilibrium has been studied, many questions remain unanswered. The major reason is thought to be in the specifications of the pressure chamber. Most pressure chambers used previously were capable of generating either overpressure or underpressure. Further, since the chambers were usually not designed for otological examinations, ventilation with fresh air produced noise above 60 dB within the chamber. For neurotological research, we constructed a sound-proof pressure chamber in which pressure could be varied between 1,000 mmH₂O and -1,000 mmH₂O at a maximum speed of 100 mmH₂O/sec. The noise in the chamber could be kept below 30-35 dB while pressure was maintained at the same level.

Key words: sound-proof, pressure chamber, hearing

はじめに

耳は空気の振動である音の受容器であり、そのような意味からしても大気圧の変動を最も受けやすい器官の一つである。解剖学的に外耳道は大気中に解放され、中耳も耳管、鼓膜を経て直接、間接に大気圧の影響を受ける。ヒトの内耳圧は正門窓や卵門窓を経てある程度中耳圧と連動するが、静脈圧や脳脊髄圧を介しても気圧の影響を受けると思われる。ある種の魚では内リンパ嚢でさえ直接水中に開いている¹⁾。

実際、僅かの気圧変化で難聴が生じるし、ヒトでは眼振を生じない程度の弱い気圧の影響で身体の変位を生じることも知られている²⁾。気圧や水圧の変化が種々の聴平衡障害を引き起こすことは古くから知られている。古くは主として潜函作業従事者 (Ferdinand³⁾ 1896年, Hill⁴⁾ 1912

年, Curnow⁵⁾ 1894年, Vail⁶⁾ 1929年) の内耳障害が報告された時代もあるが、その後は航空機やダイビングによる聴平衡覚障害 (Armstrong⁷⁾ 1939年, Hyde⁸⁾ 1952年, Fields⁹⁾ 1958年, McFee¹⁰⁾ 1964年, Lundgren¹¹⁾ 1965年¹¹⁾, 1966年¹²⁾, Enders¹³⁾ 1970年, Eichel¹⁴⁾ 1970年, Brown¹⁵⁾ 1971年, Frederic¹⁶⁾ 1971年, Freeman¹⁷⁾ 1972年) が専ら報告されてきた。最近では環境条件の改善から、一般にヒトが重大な耳障害を来す程の気圧変化に遭遇する機会は少なくなったが、それでも航空機やダイビングをはじめ気圧の変化をもたらす環境は依然として多い。一方、気圧の変化がめまいの治療になるとの報告もある。1975年 Densert¹⁸⁾ は大気圧を低下させることで、メニエール病のめまい治療が出来ると報告して以来、主としてスウェーデンの研究者によ

り低圧室がメニエール病の治療に有効であるとの報告がなされてきた¹⁹⁾²⁰⁾。1984年 Younger ら²¹⁾ はこの低圧室治療は効果に乏しいとしたが、1987年 van Deelen ら²²⁾ はスウェーデンの研究者らとほぼ同じ手法でメニエール病に対し有効な成績を報じている。この様に、メニエール病の低気圧室での治療は20年近く行われてきたが、これにしてもなお多数の疑問点を未解決のまま残している。

このように大気圧に関する神経耳科学は環境医学的にも臨床医学的にも重要であるが、現時点ではこの研究にとって不可欠な気圧室の構造上の不備が溢路となって、更に進んだ実験をできなくしている。例えば、多くの気圧室は陰圧或は陽圧のいずれか一方の負荷しかできないし、Younger ら²¹⁾ は環境医学研究所の、van Deelen ら²²⁾ は航空実験隊の気圧室を借用し実験を行っているが、室内の騒音レベルには全く考慮が払われていない。また独自の気圧室を持つ Tjernstrom¹⁹⁾ の場合でも私信によるとかなりの騒音があるようだが、その測定すらなされていない。わが国にある程度普及している高圧酸素治療室も室内騒音は大きく、当然のことながら陰圧附加はできない。

そこで筆者らは、変化する気圧環境下での神経耳科研究を目的とした防音気圧装置の作製を

試みたので報告する。

防音気圧装置の概要と性能実験成績

本気圧装置の作製は川崎エンジニア㈱に依頼した。

図1は防音気圧装置のブロックダイアグラムを示す。気圧装置は気圧チャンパー本体、加圧系、減圧系、操作板、酸素供給器より成る。気圧チャンパー本体はハッチ、観察窓、交話装置、非常呼び出し、照明器、測定器用コネクターが装備されている。加圧系は小型コンプレッサー、エアリザーブタンク、エアクリーナ（除塵、除菌器）、冷却器、消音器から成り、減圧系は真空ポンプ、真空タンク、消音器から構成されている。操作板では8種類のプログラムがセット

図2 気圧チャンパー外観（ハッチ解放時）

図1 防音気圧装置のブロックダイアグラム

されワンタッチでの操作を可能としている。これらのプログラムの変更や、自動/手動操作の切り替えも可能である。酸素供給器からは気圧チャンパー内圧と連動してチャンパー内圧上の一定圧でチャンパー内に任意の量の酸素を供給することができる。図2(ハッチ開放), 図3(ハッチ閉鎖)は防音気圧チャンパーの外観を示す。

〈気圧チャンパー内圧, 内圧変化速度, 換気量〉

気圧チャンパー内圧はチャンパーを設置した実験室での大気圧(0 mmH₂O)と、その大気圧上下1,000 mmH₂Oの範囲での加圧減圧が可能で、圧変化速度は最大100 mmH₂O/secある。例えば気圧チャンパー内圧を0 mmH₂Oから-1,000 mmH₂Oへ100 mmH₂O/secの速度で変化させるということは、初気圧は異なるが、海面から六甲山頂レベルまで10秒で上昇させた時の気圧変化に相当する。気圧チャンパー内換気量は任意に設定できる。本実験での換気量はチャンパー内圧により異なるが、ほぼ40~60 l/minに設定した。

〈気圧チャンパー内酸素分圧または酸素濃度〉

図4は気圧チャンパー内圧0 mmH₂O(実験室での大気圧), $\pm 1,000$ mmH₂O時の酸素濃度と酸素分圧の関係を示す。気圧チャンパー内には大気がそのまま導入されるので0 mmH₂O時の気圧チャンパー内酸素濃度は21 vol%である。チャンパー内圧が下がると酸素分圧も低下する。例えば内圧が0 mmH₂Oから-1,000

mmH₂Oに低下するとチャンパー内酸素分圧は210 mmH₂Oだけ低下することになる。従ってチャンパー内の酸素分圧をチャンパー内圧0 mmH₂O時と同じ値に保つためには、チャンパー内の酸素濃度を21 vol%から23.2 vol%に上げればよいことになる。図5は実際チャンパー内

図4 チャンパー内の3段階(0 mmH₂O, 1,000 mmH₂O, -1,000 mmH₂O)の気圧下での酸素分圧と酸素濃度との関係

但し0 mmH₂Oは実験室での大気圧を意味する。

図3 気圧チャンパー外観(ハッチ閉鎖時)

図5 気圧チャンパー内での被検者の動脈血酸素飽和度(SaO₂)と脈拍の変化

チャンパー内圧は0 mmH₂Oに保たれている。上段の大きな点はSaO₂, 下段の小さな点は脈拍を示す。横軸: 時間経過で、数字は実際の時刻, 1目盛りは1分を示す。縦軸: SaO₂はフルスケールが50~100%間を, 脈拍数はBPMで示され, フルスケールは0~250/min間を示す。被検者は29歳, 男子。

圧を 0 mmH₂O のまま、図 6 は圧変化速度 50 mmH₂O/sec で 0 mmH₂O から 1,000 mmH₂O に上げた場合、図 7 は同じ速度で 0 mmH₂O から -1,000 mmH₂O に下げた場合の動脈血酸素飽和度 (SaO₂) と脈拍の Pulsoxymeter (日本光電製 OLV-1200) による測定値を示すが、実際にはチャンパー内圧を ±1,000 mmH₂O に上下しても SaO₂、脈拍の変化は正常範囲に留まることが分かる。もっとも細かくみると SaO₂ は加圧または減圧後約 1 分から数分して 1~2% は増減する。例えば図 8 の症例の SaO₂ はチャンパー内圧 -1,000 mmH₂O で内圧 0 mmH₂O と比較し約 2% 低下するが、この程度の SaO₂ の微量低下も 10 liters/min の酸素供給で十分防ぐことができる。この酸素は前記のようにチャンパー内圧に連動した圧力で供給されるので、チャンパー内の酸素濃度または酸素分圧をチャンパー内圧と関係なく更に上げることが可能で

図 6 気圧チャンパー内での被検者の動脈血酸素飽和度 (SaO₂) と脈拍の変化

チャンパー内圧は矢印の区間で 0 mmH₂O から 1,000 mmH₂O に上げられている。縦横軸のスケール、図中の表示、被検者は図 5 に同じ。

図 7 気圧チャンパー内での被検者の動脈血酸素飽和度 (SaO₂) と脈拍の変化

チャンパー内圧は矢印の区間で 0 mmH₂O から -1,000 mmH₂O に下げられている。縦横軸のスケール、図中の表示、被検者は図 5 に同じ。

ある。但しチャンパー内酸素を高濃度とする場合はチャンパー内で扱う測定器具の安全性を確認しておかねばならない。

〈気圧チャンパー内騒音と電氣的シールド〉

チャンパー内騒音を減ずるため、気圧チャンパー本体は加減圧系と分離して防音室内に設置し、加減圧系では騒音の少ない小型のコンプレッサーと真空ポンプを用い、実際の急速な加圧減圧はリザーブタンクと真空タンクで行うよう設計した。また送気には大口径で曲がりの緩やかな非金属パイプを使用するとともに、排気、吸気パイプと気圧チャンパー本体間には各々大型高性能のサイレンサーを設けた。図 9, 10 は 0 mmH₂O から 1,000 mmH₂O または -1,000 mmH₂O に、100 mmH₂O/sec, 50 mm/sec, 33

図 8 気圧チャンパー内での被検者の動脈血酸素飽和度 (SaO₂) と脈拍の変化

チャンパー内圧の -1,000 mmH₂O 減圧 (最初の矢印) で SaO₂ は約 2% 低下するが、10 literes/min の酸素供給 (横軸に示された数字の 17 時 50 分から 17 時 55 分迄の 5 分間) で回復する。後の矢印では内圧を 0 mmH₂O に戻している。縦横軸のスケールと図中の表示は図 5 と同じ。被検者は 27 歳、男子。

mmH₂O の3種類の速度で加減圧した際のチャンパー内騒音を示す。騒音はリオン騒音計 (NA-40) のAレンジで測定した。定常圧時のチャンパー内部騒音は、いずれの場合も 30~35 dB 以下であった。100 mmH₂O/sec での加圧 (零圧から陽圧に持っていくとき、または陰圧から零圧に戻すとき) の騒音は瞬時 50~55 dB に達することがあり、同じ速度での減圧時 (零圧から陰圧に持っていくとき、または陽圧から零圧に戻すとき) の騒音、約 45 dB より大きか

った。50 mmH₂O/sec での加圧減圧時の騒音は 40 dB 未満、33 mmH₂O/sec 加減圧時の騒音は 35 dB 前後であった。この様に圧変化時の短時間、騒音レベルは多少上昇するものの以後の騒音レベルは 30~35 dB 以下で少なくとも低速度での加減圧時、定常圧時の気圧チャンパー内聴力検査は充分可能であると考えた。また加減圧系、操作板、気圧チャンパーを完全にシールドすることで、チャンパー内での眼振電図、蝸電図の測定も行うことができた。

図9 気圧チャンパー内騒音レベル

上から 100 mmH₂O/sec で 1,000 mmH₂O に加圧した際のチャンパー内圧と騒音レベル, 50 mmH₂O/sec で 1,000 mmH₂O に加圧した際のチャンパー内圧と騒音レベル, 33 mmH₂O/sec で 1,000 mmH₂O に加圧した際のチャンパー内圧と騒音レベルを示す。

図10 気圧チャンパー内騒音レベル

上から 100 mmH₂O/sec で -1,000 mmH₂O に減圧した際のチャンパー内圧, 騒音レベル, 50 mmH₂O/sec で -1,000 mmH₂O に減圧した際のチャンパー内圧, 騒音レベル, 33 mmH₂O/sec で -1,000 mmH₂O に減圧した際のチャンパー内圧と騒音レベルを示す。

〈測定器の気圧差に基づく誤差〉

Younger ら²¹⁾ は気圧変化による聴力検査用レシーバーの感度差を測定し、その差は誤差範囲であるとした。筆者らはリオン技術部の協力を得て、音圧校正器（リオン MA64, マイクロフォンは KPT100 使用）を用い聴力検査関係レシーバーの感度を各周波数について $\pm 1,000$ mmH₂O 間で測定した。例えば、リオン AD-02 気導受話器 (42816) の感度は $-1,000$ mmH₂O で低下し、 $1,000$ mmH₂O で増大する。その程度は 1 kHz 以下の周波数では 2 kHz 以上の周波数より大きい。結果はいずれも 1 dB 以内の誤差範囲に留まることを確認した。

〈気圧チャンバーの安全対策〉

気圧チャンバーには観察窓、非常呼び出しおよび交話装置を設けた。緊急時には加減圧系と気圧チャンバー本体を手動で遮断し、チャンバーのドレイン弁を開くことで、チャンバー内圧を外気圧に近づけた後、速やかにハッチを解放することができる。

考 察

従来、大気圧に関する神経耳科学研究で用いられてきた気圧室は、何れの国の実験を見ても航空宇宙実験²¹⁾²⁾、高圧酸素療法を目的として設計された気圧室を借用して行われることが多かった。施設を借用して実験すること自体は悪くはないが、生理実験や臨床実験はきめ細かくしにくいという難点がある。また一般に、これらの気圧室は高度の異常気圧環境を作ることができて、それは低圧環境だけ、または高圧環境だけということが多かった。神経耳科学研究ではこれらの両者を必要とするし、気圧の絶対値より気圧変化速度の問題となることが多いから、種々の速度で気圧を変化し得る設計も必要である。更に最も難しいが、気圧室につきものの換気流による騒音防止対策も必須である。

筆者らの試作した加減圧可能な気圧装置では気圧変化速度を最高 100 mmH₂O/sec に設定でき、定常圧時の騒音を $30\sim 35$ dB 以下に抑えることが出来た。また実際の実験で用いられる圧

変化速度は主として $33\sim 50$ mmH₂O/sec 以下で、圧変化時発生するノイズレベルも 40 dB に満たない。その意味では本装置を防音気圧装置 (Sound-proof pressure chamber) と呼ぶことができると思う。急速に圧を変化させる時の騒音レベルは $40\sim 45$ dB を越すが、この騒音は加減圧プログラムの微調整、換気量調整によって更に減じたいと考えている。

文 献

- 1) Portmann G : Vertigo ; surgical treatment by opening the saccus endolymphatics. Arch Otolaryngol 6 : 309~319, 1927.
- 2) Fukuda T : Studies on human dynamic postures from the view point of postural reflexes. Acta Otolaryngol Suppl 161 : 130~143, 1961.
- 3) Ferdinand A : Uber apoplektiforme labyrinthischer Krankheiten bei caisson Arbeitern. Monatschr f ONR 30 : 341, 1896.
- 4) Hill L : Caisson sickness and the physiology of work in compressed air. pp 1~89, Longmans, Green & Company, New York, 1912.
- 5) Curnow J : Auditory vertigo caused by working in compressed air. Lancet 10 : 1088~1089, 1894.
- 6) Vail HH : Traumatic conditions of the ear in workers in an atomosphere of compressed air. Arch Otolaryngol 10 : 113~126, 1929.
- 7) Armstrong HG : The effect of flight on the middle ear. JAMA 109 : 417~422, 1939.
- 8) Hyde RW : Aerotitis media. Ann Otol Rhinol Laryngol 61 : 937~975, 1952.
- 9) Fields JA : Skin diving. A.M.A. Arch Otolaryngol 68 : 531~541, 1958.
- 10) McFee DD : ENT problems of diving. Med Serv Canada 20 : 845~861, 1964.
- 11) Lundgren CEG : Altenobaric vertigo ; a diving hazard. Brit Med J 28 : 511~513, 1965.
- 12) Lundgren CEG : Alternobaric vertigo among pilots. Aerospace Med 37 : 178~180, 1966.
- 13) Enders LJ and Rodriguez-Lopez E : Aero-medical consultation service case report ; alternobaric vertigo. Aerospace Med 41 : 200~202,

- 1970.
- 14) Eichel BS and Landes BS : Sensorineural hearing loss caused by skin diving. Arch Otolaryngol **92** : 128~131, 1970.
 - 15) Brown FM : Vertigo due to increased middle ear pressure ; six-year experience of the aeromedical consultation service. Aerospace Med **42** : 999~1001, 1971.
 - 16) Frederic MB : Vertigo due to increased middle ear pressure. Aerospace Med **42** : 999~1001, 1971.
 - 17) Freeman P : Inner ear barotrauma. Arch Otolaryngol **95** : 556~563, 1972.
 - 18) Densert O, Ingelstedt S, Ivarsson A, et al : Immediate Restoration of Basal Sensoryneural Hearing Using a Pressure Chamber. Acta Otolaryngol **80** : 93~100, 1975.
 - 19) Tjernstrom O : Effects of middle ear pressure on the inner ear. Acta Otolaryngol **83** : 11~15, 1977.
 - 20) Densert B and Densert O : Overpressure in treatment of Meniere's disease. Laryngoscope **92** : 1285~1292, 1982.
 - 21) Younger R, Longbidge NS and Mekjavic I : Effect of reduced atmospheric pressure on patients with fluctuating hearingloss due to Meniere's disease. J Otolaryngol **13** : 76~82, 1984.
 - 22) van Deelen GW, Hulk J and Huijing EH : The use of the underpressure chamber in the treatment of patients with Meniere's disease. J Laryngol Otol **101** : 229~235, 1987.