

## ●原 著

## 相当深度150mと230mの高圧ヘリウム酸素環境下の平衡機能

榎木 暢雄\* 富澤 儀一\*\* 毛利 元彦\*

ヘリウムを呼吸環境ガスに使用する深海潜水において、深度150m～200m以上では高圧神経症候群 (HPNS) が発現することは広く知られている。深度150mと230mの模擬飽和潜水実験において、高圧ヘリウム環境が平衡機能に及ぼす影響を重心動揺と頭部動揺から検討した。平衡機能の指標には、1分間の重心と頭頂部の軌跡距離と面積を用い、立位条件は開眼と閉眼とした。

重心と頭部の両者において、両潜水実験の最大深度環境下で軌跡距離と面積の増加による平衡機能の低下が認められた。しかし、頭部動揺は高圧神経症候群と同様に、加圧により増加し保圧期に回復したが、重心動揺は加圧による増加は小さく保圧期にも継続的に増加し、減圧により回復した。

キーワード：飽和潜水，ヘリウム，高圧環境，平衡機能，重心

#### Postural equilibrium functions at Helium-Oxygen hyperbaric environment: 150m and 230m equivalent depth

Nobuo Naraki\*, Gihchi Tomizawa\*\* Motohiko Mohri\*

\*Japan Marine Science & Technology Center

\*\*Science University of Tokyo

The HPNS (high pressure nervous syndrome) on deep sea diver was well known deeper than 150m or 200m. The equilibrium function with up-light standing were determined during the simulated saturation dive with helium-oxygen to 150m and 230m equivalent depth on four divers.

The displacement of the body's center of gravity and of the head were measured both lateral and antero-posterior direction during one minute upright standing with eyes open and with eyes closed.

The length of locus and the area enclosed by the most external locus of the center of gravity and of the top of head increased significantly at the maximal depths, it indicates the decrease of equilibrium function under helium-oxygen hyperbaric environment. The head displacement looks like a HPNS, it increased by compression and

returned to normal level during pressure holding, though the displacement of the center of gravity augmented slightly by compression and continuously increased during pressure holding, and it returned to normal level by the decompression.

#### Keywords :

Saturation dive  
Helium  
Hyperbaric  
Postural equilibrium  
Center of gravity

#### はじめに

呼吸ガスや居住用環境ガスにヘリウムを用いる深海潜水において、深度150m～200m以上では、脳波異常、めまいや震えなどの症状を呈する高圧神経症候群の発現が広く知られている<sup>1)</sup>。また高速加圧による深度180mへの短時間潜水では平衡機能の低下が報告されているが<sup>2)</sup>、本分野に関する研究は非常に少ない。そのためヘリウムを用いた大深度飽和潜水の条件である高圧、高密度ガス環境がヒトの平衡機能に及ぼす影響を検討した。

\*海洋科学技術センター，海域開発・利用研究部

\*\*東京理科大，理工学部

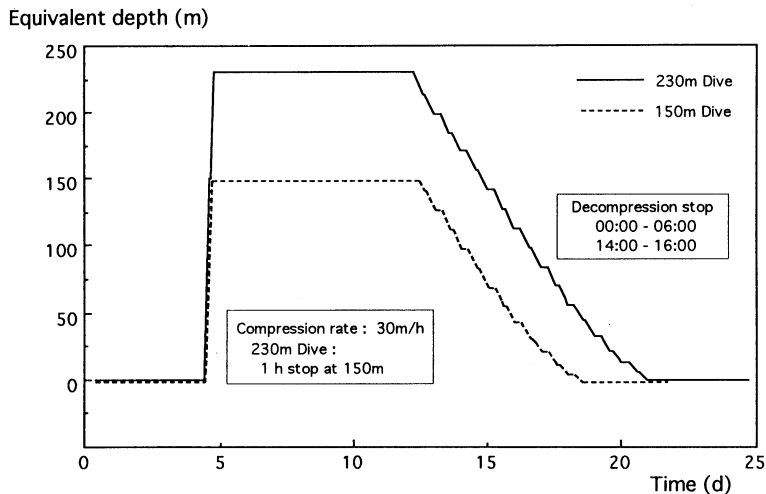


図1 飽和潜水実験の加減圧概要

Two simulated saturation dive profiles with helium-oxygen to 150 and 230m equivalent depth.

## 方 法

平衡機能の指標として立位時の生体動揺を深度150mと230mの2ヘリウム酸素飽和潜水実験において調査、測定した。2つの潜水実験の最大深度は異なるが、加圧速度や諸測定の日程、減圧速度、0.4気圧の酸素分圧はほぼ同じで、全日程の差はほとんど減圧所要時間の違いによるものである(図1)。また各実験における被験者は、その全入室者4名とした。さらに、実験開始の約10日前より訓練を始め、実験開始時に被験者は測定に慣熟していた。

150m実験では1分間の開眼、閉眼状態における立位時(両踵を接したまま両足尖を開き右内足縁と左内足縁の角度が30°の30°扇足位)の重心動揺を記録し、加圧前0mで4回、加圧途中の100mで1回、150mで5回、減圧期に4回と減圧後0mで2回の計16回の測定を行った。230m実験では頭部動揺の測定を追加し、加圧前0mで4回、230mで4回、減圧期に4回、さらに減圧後0mで2回の計14回の測定を実施した。なお、各測定における立位条件の計測は2度ずつ実施した。

重心動揺の測定には日本電気三栄社製“平衡機能計:1G06”を、頭部動揺の測定には同社製頭部

動揺計(超小型セラミックス・振動子(スピーカー):40kHzとセラミック・マイクロフォン)を使用した。頭部動揺測定用の振動子は軽量ヘルメットの頭頂部に設置し、発振子からの超音波は前方と右方向のマイクロフォンで受信し距離を測定した。また高圧ヘリウム環境下ではマイクロフォンの受信特性が大幅に低下するため、平衡機能計もあわせて各測定直前に較正用測定を実施した。なお、重心動揺と頭部動揺は水平方向(前:Y+,後:Y-,右:X+,左:X-)のみ記録し、その信号は20Hz周期で記録した。なお、計測初期の大きな動揺を避けるため、全測定条件において姿勢開始直後の3秒間の資料は削除した。さらに、開眼時の測定において視標は使用せず前方注視のみの指示とした(図2)。

平衡機能の指標としては、1分間の重心と頭頂部の軌跡移動距離(距離)と最も外側の軌跡が囲む動揺面積(面積)を求め、さらに各ダイバー毎に指標の加圧前比(加圧前の開眼立ちの平均を1とする)により加減圧の影響を検討した。

## 結 果

記録信号の一例として、230m実験において動揺の大きかったダイバーBの230m初回の閉眼立

位時の平面図(図3)で示すように、頭部動揺の中心は重心動揺の中心の数センチ前方に位置する傾向にあった。

150m実験では加圧前に対する変化率で、開・閉眼の両条件の重心距離と面積について、加圧前0m(4測定:n=32)、150m(5測定:n=40)、減圧後0m(2測定:n=8)を比較した。その結果、閉眼条件の重心面積の加圧前0mと減圧後0m以外の組み合わせにおいて、加圧による増加と減圧による加圧前への有意な低下(有意水準:5%)が認められた(図4-a)。いっぽう、重心動揺の距離と面積における閉眼/開眼比において、有意な加減圧の影響は認められなかった(図4-b)。

230m実験における開眼時と閉眼時の頭部と重心動揺の距離と面積について、加圧前0m(n=32)、230m(n=32)、減圧後0m(n=8)を比較した結果、開眼時の頭部面積以外の組み合わせにおいて、加圧による有意な増加と減圧による加圧前値以下への有意な低下が認められた。しかし、その230m条件下の頭部と重心動揺の増加内容は、頭部動揺が加圧と保圧初期に大きく、保圧後期には加圧前値に回復していることに対し、重心動揺は加圧の影響は少ないが保圧期に徐々に増大し、減圧期に回復する傾向が認められた。さらにこの傾向は、不安定な姿勢の閉眼時により顕著であった(図5)。

重心動揺と頭部動揺の閉眼/開眼比の加圧前0m、230m、減圧後0mを比較では、両者とも距離は1.4~1.6で、面積は2.1~2.2となり、頭部動揺面積以外では加圧により有意に増加し減圧により低下する傾向が認められた(図6-a)。

頭部動揺/重心動揺の比は、開眼時、閉眼時とも距離は1もしくはそれ以下であるが、面積は1.7~1.8で、しかもこの値が加圧により有意に低下する傾向が認められた(図6-b)。

## 考 察

平衡機能の指標として重心や頭部動揺の軌跡解析は臨床などの分野<sup>3)-5)</sup>や、近年では長期宇宙滞在後の飛行士リハビリの指標<sup>6)</sup>としても広く行われている。

150m、230mの2実験において最大深度環境下で重心動揺や頭部動揺の指標が増加し、平衡機能が低下していることは明確である(図4、5、6)。

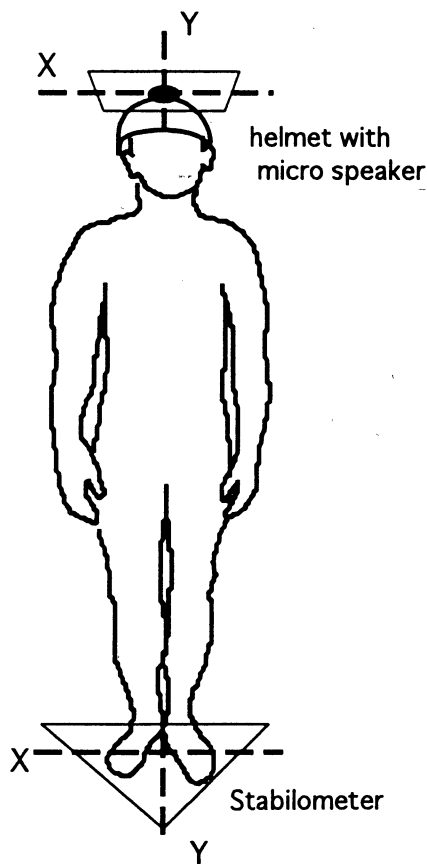


図2 平衡機能測定装置の概要

Diagram of postural equilibrium test apparatus. The displacements of the body's center of gravity and the top of head were measured for one minute with the stabilometer and the ultrasonic speaker and microphone system.

さらに、230mにおける低下傾向は150mに比べ非常に顕著で、HPNSの発現深度閾値とされている150m~200mを挟み<sup>1)</sup>、平衡機能においても大きな変局点があると思われる。

(測定手法)

重心動揺指数(移動距離と動揺面積)の個人差の要因として、若年化と老齢化、体重や身長が増加による指標値の増大があげられているため<sup>7)</sup>、各被験者における加圧前の開眼立位時の値に対す

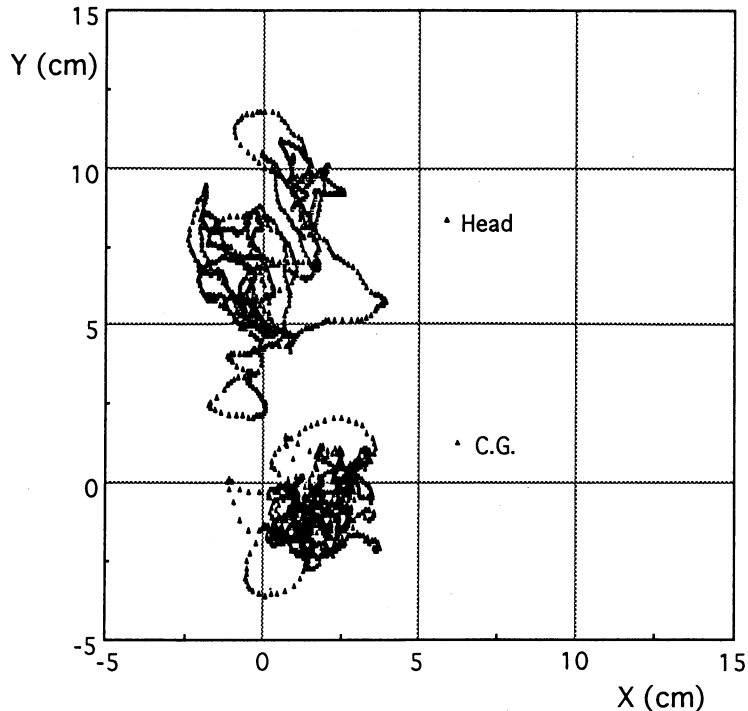


図3 重心動揺と頭部動揺の例 (被験者 B: 230m 初回の閉眼立位)

Example of displacement of C.G. and head signal for 1 minute, 230m subjects-B.

Head: displacement of the top of head

C.G.: displacement of the body's center of gravity

X: lateral direction, Y: antero-posterior direction

る変化率で諸解析を行った。しかし Panzer ら<sup>8)</sup>は 21~78歳までの健常者の重心動揺の測定結果より、安静立位における高齢者に平衡機能の低下は認められないとも報告している。

立位時の足位は、閉足位と60°扇足位の重心動揺の結果に差がないとの報告<sup>9)</sup>と、大久保ら<sup>10)</sup>の推奨に基づき30°扇足位とした。

#### (閉眼の影響)

本実験の重心と頭部動揺の閉眼/開眼比は、両者とも移動距離は1.4~1.6、面積は2.1~2.2であったが、Taguchi ら<sup>11)</sup>の重心移動距離では1.56で、また坂口<sup>12)</sup>の結果では、重心と頭部はそれぞれ約1.4と1.5で両者とも若年齢層において増加する傾向が示されている。230m 実験における頭部動揺

面積以外の加圧による閉/開眼比の有意な増加は、高圧下では若年齢層に類似した平衡機能の低下を示すものと思われる(図6-a)。さらに、150mと230mにおける重心動揺の閉眼/開眼比において移動距離以上に面積が増大する傾向が見られ(図4-b, 6-a)、この現象はめまい感を有する患者群に多いと報告されており<sup>13)</sup>、毛利<sup>2)</sup>の深度180mへの高速加圧に見られたように、高圧環境下における平衡機能低下がめまい的なものと考えられる。

さらに、脊髄障害と末梢神経障害者では閉眼時の重心動揺が著しく増加し、動揺面積の閉眼/開眼比が4以上に、また小脳失調症では3.4にもなるという報告<sup>14)</sup>と比較すると、今回の230mの重心動揺面積の増加は病的域にまでは達していないこと

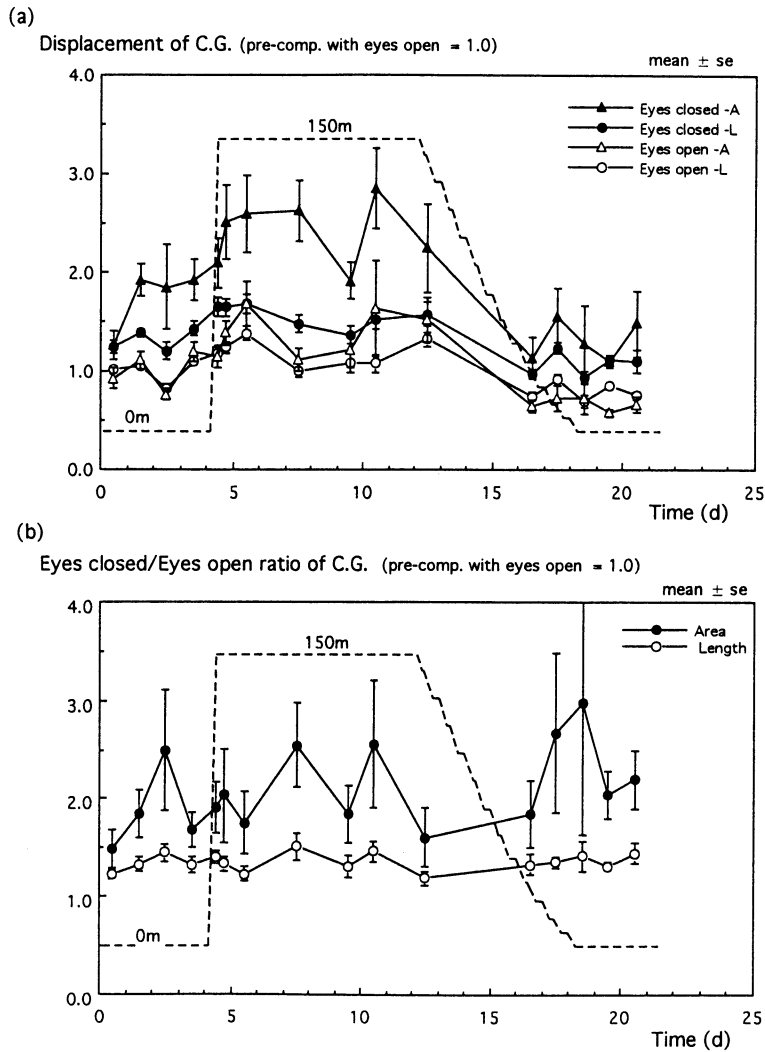


図4 150m潜水実験における重心動揺(a)と閉眼/開眼比(b)の変化 (各被験者の開眼時の加圧前平均値=1, mean & s.e.4被験者の2回の測定, n=8)

of the body's center of gravity (a) and the ratio of area and length with eyes closed compared with those of with eyes open (b), 150m Dive (mean and s.e. of 4 subjects, n=8).

The values were presented as the rate for pre-compression average of each subject, eyes open condition.

(a) ▲ : area with eyes closed ● : length with eyes closed  
 △ : area with eyes open ○ : length with eyes open

(b) ● : area ○ : length

がわかる。

(重心と頭部動揺の関連)

230m実験における頭部動揺/重心動揺の比にお

ける加圧前値は、移動距離では約1.0、面積では1.5~2.5であった(図6-b)。坂口<sup>12)</sup>の4~28歳の測定結果では、それぞれ距離が1もしくはやや小

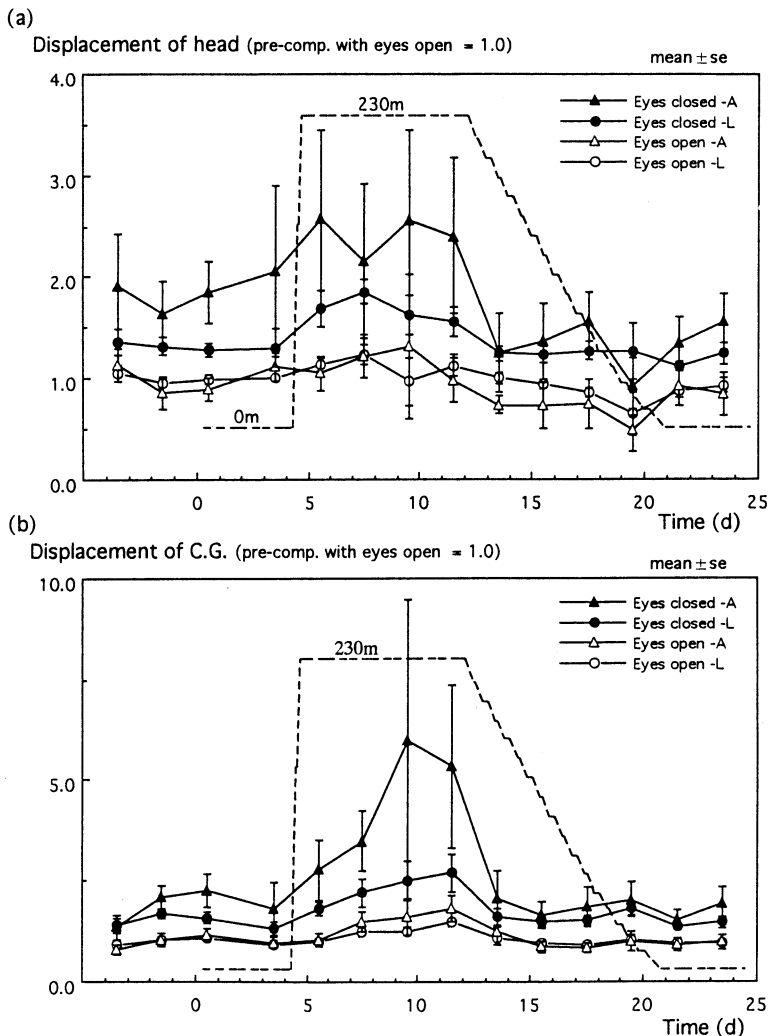


図5 230m 潜水実験における重心と頭部動揺の変化 (各被験者の開眼時の加圧前平均値=1, mean & s.e. 4 被験者の 2 回の測定, n=8)  
 Displacements of the center of gravity (a) and of the top of head (b), 230m Dive (mean and s.c. of 4 subjects, n=8).  
 The values were presented as the rate for pre-compression average of each subject, eyes open condition.  
 ▲ : area with eyes closed ● : length with eyes closed  
 △ : area with eyes open ○ : length with eyes open

さく、面積が約2であり、若年化による増加と平衡機能が確立された成人での減少が報告されている。しかし、本実験ではこの比が加圧により低下し、さらに230m 保圧期も継続的に減少しており、この比の低下が平衡機能の向上を表しているとは

思われない。そのため高圧ヘリウム環境下の平衡機能の評価において、通常の指標を用いるには注意が必要である。

重心と頭部動揺の関連において、当初頭部動揺は Smith による身体動揺のモデルにおいて、足関

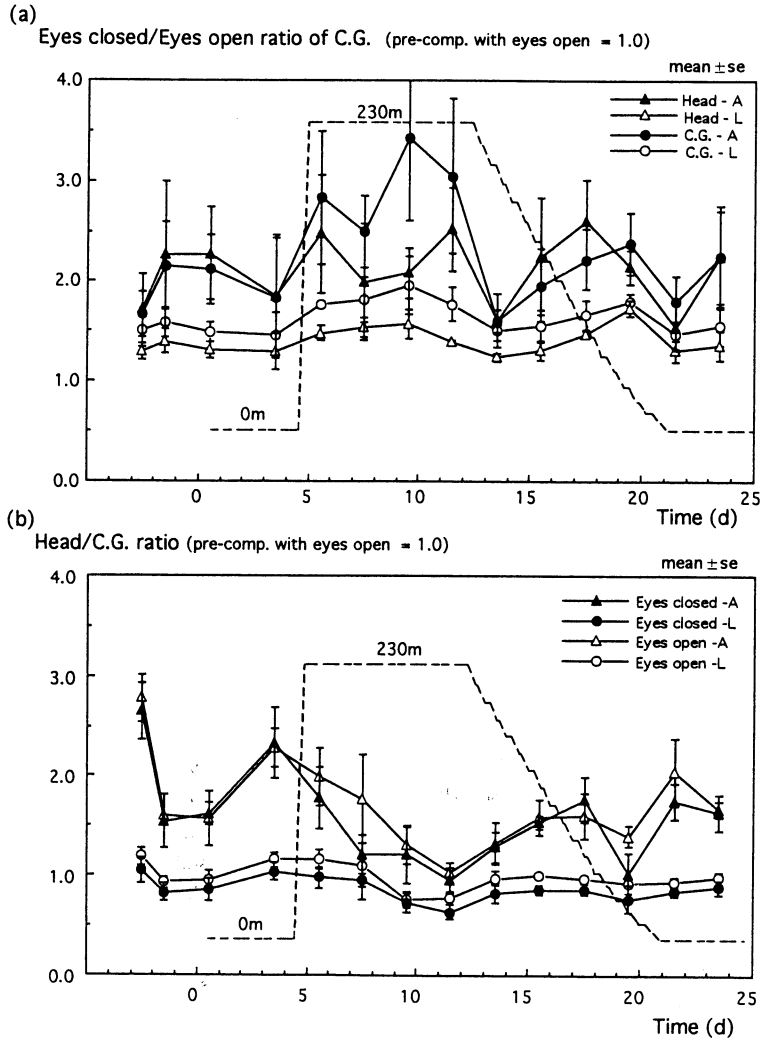


図6 230m潜水実験における重心と頭部動揺の閉眼/開眼比 (a)と頭部動揺/重心動揺比の変化 (各被験者の開眼時の加圧前平均値=1, mean & s.e. 4被験者の2回の測定, n=8)

The ratio of area and length with eyes closed compared with those of with eyes open (a) and the ratio of the displacement of head compared with that of body's center of gravity (b), 230m Dive (mean and s.e. of 4 subjects, n=8).

The values were presented as the for rate for pre-compression average of each subjects, eyes open condition.

- (a) ▲ : area of head ● : length of head
- △ : area of C.G. ○ : length of C.G.
- (b) ▲ : area with eyes closed ● : length with eyes closed
- △ : area with eyes open ○ : length with eyes open

節を中心に身体が剛体として揺れるため、頭部動揺は体幹や重心以上に動揺すると考えられていた<sup>15)</sup>。しかし時田ら<sup>16)</sup>は、頭部動揺と重心動揺の相関分析を行い、立位時の身体動揺には0.5Hz以下の周期を持つ緩徐な動揺と1 Hz以上の周期をもつ速い動揺があり、緩慢な動揺は頭部にまた速い動揺は重心に現われやすいことを報告している。そしてその緩徐な動揺は主として迷路性の立ち直り反射が、また速い動揺は筋の自己受容器からの立ち直りを示していると考えた。さらにTaguchi<sup>17)</sup>は、身体動揺の眼球への影響を減少させるため、頭部動揺は重心動揺により調節されているとした。また、坂口<sup>12)</sup>は立位維持への諸外乱に対し、前庭および脳を有する頭部の動揺を最小限にするため、身体下部に生じた速い動きがそれより上部の関節の弾性と脊柱の湾曲によって吸収するとの合目的機序を提案している。

また、平沢<sup>18)</sup>は”下腿筋活動からみて、開眼時の姿勢維持には抗重力筋の筋紡錘からの求心性発射による脊髄レベルの反射機能が主制御機構として働き、閉眼時の姿勢維持にはそれに加え錘外筋をふくむ $\alpha$ - $\gamma$ 連合の比較的高位の中枢の関与があるとしている。

さらに、閉眼時の平衡機能低下に関しては、明所閉眼と暗所閉眼の比較より、単なる視覚の立ち直り反射に及ばず影響欠如のみでなく、閉眼の際の眼球の上転に伴う外眼筋からの影響が小脳を経由して立位姿勢維持機構に及ぶ可能性も示されている<sup>19)</sup>。そのため、立位維持の平衡機能において頭部動揺が迷路性（前庭中枢系）調整系の指標で、さらに重心動揺が筋の自己受容器（末梢系）により調整系の指標とみれば、230m実験において頭部動揺が加圧により増加し、保圧中に回復することに対し、重心動揺は保圧中も増加している現象は、立位維持機構においては、視覚との協調性を含む比較的上位中枢の機能が、抹消の反射系に比べて早期に高圧順応しているとも考えられる。またしかし、重心動揺と頭部動揺の高圧環境下の変化の違いが、高圧ヘリウム環境の中枢神経系と抹消神経系とに及ぼす影響の質的な違いなのか、また抹消への影響が単に遅れるだけのものなのか、今後も研究を続ける必要があると思われる。

#### 〔参 考 文 献〕

- 1) High pressure nervous syndrome 20 years later. - First meeting of the international group on high pressure biology. ed. by Rostain, J. C., E.Martinez and C. Lemaire, ARAS-SNHP Publications, Marseille, France. p342, 1989
- 2) 毛利元彦. 重心動揺からみた高圧神経症候群発現時のダイバーのめまいについて. 日本高気圧環境医学会誌, 25(3)153-158. 1990
- 3) Baron, J. B.; N. Ushio, M. Gregoric, T. Mano, J.Noto, G.Bizzo, P. M.Gagey, J. C.Bessineton and M. Pacifici. Probability of the functional vestibulo-oculo-cervico-spinal ways affecting the placement and maintenance of the body's center of gravity in the suport plane in erect man. Acta Oto-Laryngologica. Supplement, 330: 72-76. 1975
- 4) Taguchi, K., M. Kikukawa, Y. Miyashita, A. Goto, K.Ito and O. Fukuzawa. Relationship between movements of the head and the center of gravity of the body in Meniere's disease. Auris·Nasus·Larynx, Vol.13 S161-S169. 1986
- 5) Mouchnino, L., R. Aurenty, J. Massion and A. Pedotti. Coordination between equilibrium and head-trunk orientation during leg movement: a new strategy build up by training. J. Neurophysiol, Vol.67 (6) 1587-1598. 1992
- 6) Black, F. O. W.H.Paloski, D.D.Doxey-Gasway and M. F. Reschde. Vestibular plasticity following orbital spaceflight: recovery from postflight postural instability, Acta Otolaryngol, Suppl. 520 pt2: 450-454. 1995
- 7) Sugano, H. and T. Takeya. Measurement of body movement and its clinical application. Japanese Journal of Physiology (20) 296-308. 1970
- 8) Panzer, V. P., S. Bandinelli, and M. Hallett. Biomechanical assessment of quiet standing and changes associated with aging. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation Vol. 76 (2) 151-157. 1995
- 9) 五島桂子. 重心動揺検査の検討 -検査条件について-. Equilibrium Res. Vol. 47 (2), pp174-186. 1988
- 10) 大久保仁, 渡辺 勲, 小高修司, 小川 明, 明・暗所における閉眼時の視覚が重心動揺に及ぼす影響について -正常者及び先天性眼振症について-, Equilibrium Res, (8) 29-35, 1979
- 11) Taguchi, K., M. Iijima and T. Szuki. Computer calculation of movement of body's center of gravity. Acta Otolaryngol, Vol. 85 (8-5)



- 420-425. 1978
- 12) 坂口正範. 小児の重心動揺および頭部動揺の年齢的变化. *Equilibrium Res.* Vol. 48 (4) 341-350. 1990
  - 13) 長山郁生, 宮崎為夫, 鶴家 透, 岡部陽三, 滝口哲也, 嘉藤秀章, 梅田良三. 重心動揺検査における距離と面積の関係について. *Equilibrium Res.* Vol. 46 (3) 221-227. 1987
  - 14) 岡田多加志. 神経内科領域における二次元重心動揺記録装置の臨床的応用. *慶応医学* 52 (4) 265-277. 1975
  - 15) Smith, J. W. The force operating at the human joint during standing. *J. Anat.* Vol. 91 : 545-564. 1957
  - 16) 時田喬, 宮田英雄, 藤垣熙, 永田隆郎, 小林武. 直立時の身体動揺の分析 — 動揺の多現象記録と相関分析による —. *耳鼻臨床* 63 : 363-387. 1970
  - 17) Taguchi, K. Relationship between the head's and the body's center of gravity during normal standing. *Acta Otolaryngol.* Vol. 90 (1-2) 100-105. 1980
  - 18) 平沢彌一郎. 日本人の立ち構え. *日本人の生理*. 佐藤方彦編集. p.198 : 107-137. 1988
  - 19) 田近由美子. 重心動揺移動距離と重心動揺図 (X軸長, Y軸長) についての研究. *金沢大学十全医学会雑誌*. 88 (1) : 122-137. 1979