

●原 著

飽和潜水時の加圧関節痛についての検討

堂本英治* 藤井茂範* 伊藤正孝* 小沢浩二*
 和田孝次郎** 小此木國明* 妹尾正夫* 伊藤敦之*

窒素酸素、およびヘリウム酸素混合ガスをもちいた短時間深々度あるいは飽和潜水において認められる加圧関節痛は、加圧時や滞底時にみられる関節痛、関節音を主症状とした医学的問題の一つである。1974年のBradleyらの米海軍における報告が有名であるが、今回われわれは海上自衛隊で行われた飽和潜水で、日本人における加圧関節痛の出現頻度、深度との関係などについて調査し、先述の報告と比較検討するとともに、更に加圧関節痛の再現性、あるいは高圧神経症候群（HPNS）との関連性について検討を加えた。本研究からは、日本人においても加圧関節痛の発現頻度は潜水深度の増大とともに上昇し、症状の持続時間も長期化するというBradleyらの報告と同様の傾向がみられた。しかしその発現率には明らかな差異がみられ、対象群間での潜水ガス組成、加圧パターンといった物理的因子の差や人種差などが原因として考えられた。また繰り返し加圧関節痛を経験した13名のうち10名（76.5%）で、同一部位に再現性をもって出現することが新たに確認されたが、脳波検査の結果からはHPNSと加圧関節痛との関連性については認められなかった。繰り返し深々度の飽和潜水を行う海上自衛隊の飽和潜水員については、今後とも加圧関節痛を関節をとりまく医学的問題の一つとして捉え、慎重に追跡調査する必要があると考えられた。

キーワード：飽和潜水，加圧関節痛，高圧神経症候群

Hyperbaric arthralgia during saturation dives

Hideharu Domoto* Sigenori Fujii* Masataka Itoh* Kouji Ozawa* Koujiro Wada** Kuniaki Okonogi* Masao Senoh* Atsushi Ito*

*JMSDF Undersea Medical Center

**Department of Neurosurgery, National Defense Medical College

Hyperbaric arthralgia or compression arthralgia, with symptoms of joint pain and popping, occurs in divers breathing compressed nitrogen-oxygen or heliumoxygen gas mixtures during the compression phase of the dives and during time spent at the bottom in saturation dives. The main purpose of this study was to compare the relationship between the incidence of hyperbaric arthralgia and the depth of the dives among Japanese divers with that reported in 1974 by Bradley *et al.* We also investigated the reproducibility of hyperbaric arthralgia and the correlation between high

pressure nervous syndrome (HPNS) and hyperbaric arthralgia. As a result, we confirmed the progressive increase in the frequency of hyperbaric arthralgia with depth and found that the deeper the dive, the longer the duration of joint symptoms. Our results showed almost the same tendency as those of Bradley *et al.* It was revealed that 10 of 13 (76.5%) divers who had shown hyperbaric arthralgia complained of it again in the same joint. There were no significant interrelations identified between hyperbaric arthralgia and HPNS. Among saturation divers who repeatedly performed deep saturation dives in Japan, hyperbaric arthralgia should be considered as an important medical problem which will necessitate further investigation.

Keywords :

Saturation dive
 Hyperbaric arthralgia
 High pressure nervous
 syndrome

*海上自衛隊潜水医学実験隊

**防衛医大脳神経外科

はじめに

飽和潜水はより深く長時間の潜水作業を効率的に行うために開発された潜水技術であり、海底油田の開発、サルベージといった民間分野だけでなく、軍事分野においても実用化されている。海上自衛隊での潜水艦救難を目的とする飽和潜水作業においては、沈没した潜水艦の乗員をすみやかに救助するために、できるだけ早急に飽和潜水員を加圧して、救難作業を開始する必要がある。このように急速に深々度に潜水員を加圧する場合、高圧神経症候群 (High Pressure Nervous Syndrome: HPNS)、加圧関節痛 (Hyperbaric Arthralgia: HA)¹⁾²⁾³⁾が大きな医学的問題となる。このうち加圧関節痛は圧縮空気によるタンク加圧で観察された潜水員の関節音として Case, Haldane により 1941 年に初めて報告された⁴⁾ものであり、関節音と関節痛を主症状とする。しかしながら本症に関する疫学的研究は、米海軍で行った 215 回のヘリウム酸素混合ガスを用いた飽和潜水と、短時間深々度潜水での Bradley らによる 1974 年の報告⁵⁾以外には少ない。

今回我々は海上自衛隊で、ヘリウム酸素混合ガスを用いて実施した 440m までの飽和潜水において、日本人における加圧関節痛の出現頻度、部位について調査するとともに、先述の Bradley らの報告と比較を行い、また新たに再現性や高圧神経症候群 (HPNS) との関連性についても検討することを目的に本研究を行った。

方 法

1986 年から 1993 年までの 8 年間に海上自衛隊で実施した、29 回のヘリウム酸素混合ガス飽和潜水 (60m～440m) に参加した延べ 172 名の潜水員 (平均年齢 31.2±7.10 歳) を対象として調査を行った。各深度ごとの実施回数と延べ潜水員を Table 1 に示す。飽和潜水中、朝起床後及び夜就寝前の 1 日 2 回実施した問診表の記録に、加圧途中の保圧時にも適宜行われていた問診の記録を加えて、これらの記録から発現頻度や好発部位について調査した。加圧関節痛を認めた潜水員については DDC (Deck Decompression Chamber, 船上減圧室) 内の潜水員から聞き取った記録から、症状の発現部位、発現深度、症状の変化、さらには消失時刻

などについて詳細に調査した。発現率における Bradley らの報告との比較は、2 群間での回帰係数の傾きの差の検定を行い、 $P < 0.05$ をもって有意と判定した。

また、HPNS との関連性については、飽和深度 200m 以上の潜水に参加した潜水員のうち、60 名について脳波記録が行われた。一回の潜水で 2 名は加圧開始から減圧開始まで、また他の 4 名の潜水員については滞底時にのみ、国際式 10-20 法に基づき頭部 13 部位から電極導出し、多用途脳波計にて記録した脳波⁶⁾⁷⁾をもとに比較検討を行った。両者の発現に関しては Fisher の直接確立計算法をもちい、有意水準 $\alpha = 0.05$ として判定した。

結 果

1. 加圧関節痛の発現頻度

加圧関節痛は潜水員 175 名中 80 名 (46.5%) に見られ (Fig. 1)、動作時に明らかな疼痛として感じられるものから、わずかな不快感や関節の重苦しさとして自覚されるものなど、その訴えは多種多様であった。このうち関節痛を訴えたものと、訴えなかったものの年齢平均±標準偏差はそれぞれ 30.2 ± 5.2 歳と 33.0 ± 7.6 歳であり、両群間に年齢的差異は認めなかった。また関節痛のために水中作業に支障を来したものは見られなかった。

2. 加圧関節痛と発現深度

飽和深度と発現深度の相関を検討するため、飽和潜水を飽和深度ごとにそれぞれ 100m 以下、200m、300m、330m～370m、400m 以上の 5 群に分類した。なお加圧関節痛には関節痛と関節音の 2 つの主症状があることから、各深度ごとに関節痛のみのものと、関節痛または関節音のものに分けて検討した (Fig. 2)。潜水深度が深くなるにつれ発現頻度は次第に増加したが、330m 以深では増加傾向は明らかでなかった。また潜水深度とともに明らかに加圧関節痛が増大することはなかった。

3. 加圧関節痛の持続時間と深度

飽和深度を同様に 100m 以下、200m、300m、330m～370m、400m 以上の 5 群に分け、症状の持続時間との関連性を検討した結果を Fig. 3 に示した。加圧関節痛を認めた潜水員 80 名中 46 名 (58.5%) の者は、24 時間以内に症状が完全に消失していたが、平成 2 年度に実施された最大深度 330m の飽和潜水では、6 人の潜水員のうち 4 人が、高圧曝

Table 1 対象とした飽和潜水実績の内訳
(昭和61年～平成5年)

飽和深度 (msw)	実施回数	潜水員数 (人)
60	13	76
100	2	12
200	5	30
300	4	24
330	2	12
370	1	6
400	1	6
440	1	6
計	29	172

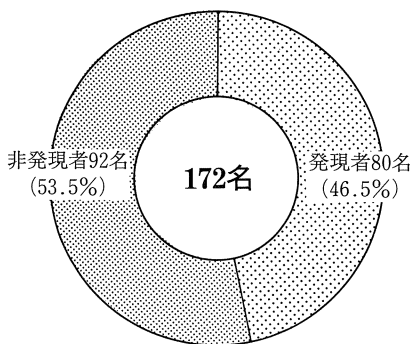


Fig. 1 発現頻度について

露中、最長18日間にも及ぶ症状の持続を訴えた。潜水深度が深くなるにつれ、症状の持続時間が長くなる傾向がみられたが、逆に400m以深では330m～370m群と比較して、持続時間が短くなっていた。

4. 加圧関節痛の再現性についての検討

加圧関節痛が認められた80名の中で、2回以上の飽和潜水に参加し、繰り返し加圧関節痛を訴えた者は13名あり、そのうち10名(76.9%)については同一部位に症状の出現が認められた(Fig. 4)。

5. 加圧関節痛の出現部位

出現部位については Fig. 5 に示すとおり肩関

節(38.7%)、手関節(20.5%)、腰部(9.1%)、股関節(6.8%)の順であった。

6. HPNS との比較

延べ172名の潜水員のうち、前述した HPNS 検出のための脳波検査を行った者は60名であった。このうち加圧関節痛が出現した者は45名(75%)で、脳波記録から HPNS に比較的特徴的とされる Fmθ 波や Diffuseθ 波がみられた者は6名(13.3%)であった(Fig. 6)。逆に60名のうち加圧関節痛を訴えなかった15名のなかで高圧神経症候群発現者は2名(13.3%)であった。両者間の検定では $P > \alpha = 0.05$ となり加圧関節痛と HPNS との間には、有意な相関性を認めなかった。

考 察

加圧関節痛は窒素酸素潜水、あるいはヘリウム酸素潜水加圧時に生じる関節症状の総称で、動作時の関節痛と関節音を主症状とする。Bradley らは関節音が加圧関節痛での必要不可欠の症状であるとしており、一般的に両者は同時に出現する傾向がある。

本研究を行う意義は、以下の3点に集約される。すなわち 1) 飽和潜水での水中潜水作業を安全かつ正確に行うにあたって、加圧関節痛がいかなる影響を及ぼすのか 2) 日本では今後飽和潜水を繰り返すにつれ、多数回飽和潜水作業に従事す

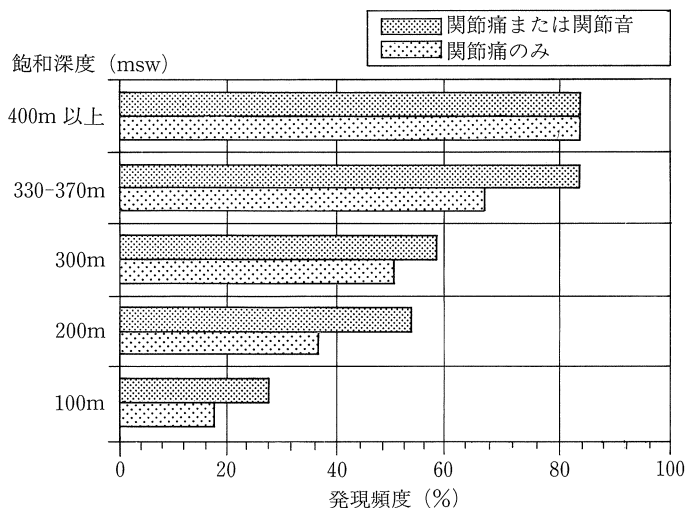


Fig. 2 飽和深度と発現頻度

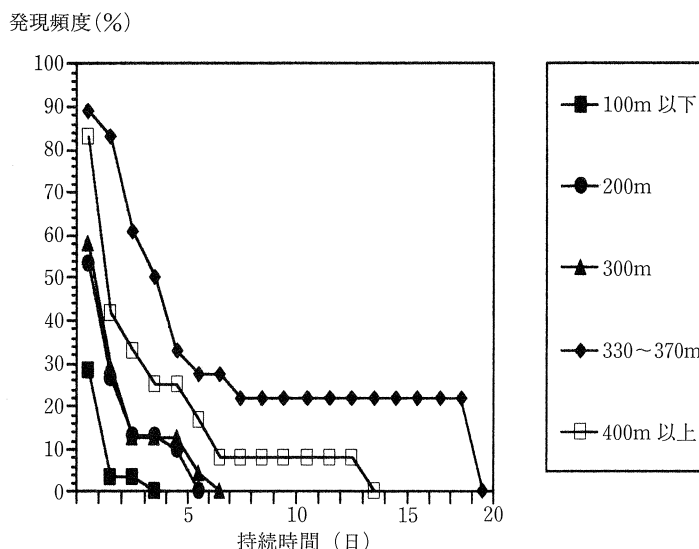


Fig. 3 加圧関節痛の持続時間と飽和深度

る隊員が増加していく可能性が考えられるが、加圧関節痛の再現性についての検討は過去にはなされていない。また加圧関節痛を繰り返して生じることにより骨壊死などを含めいかなる障害が潜水員に生じうるのか 3) 日本での飽和潜水を基にした加圧関節痛の疫学的検討が過去にはなされておらず、1974年のBradleyらの報告と同様の傾向を示すのか、あるいは人種による差異が存在する

のか、といった3点である。

加圧関節痛は飽和潜水以外の他の潜水器を用いた潜水では発生頻度が低いとされており、その原因としては加圧時のチャンパー内では、水中での潜水と比較して関節を速く動かす傾向があるためと考えられている²⁾。また本研究では関節痛が潜水作業に影響を及ぼした例は見られず、ほとんどの潜水員が水中作業開始前までにその消失を認め

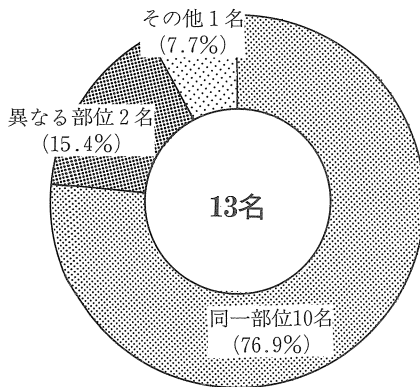
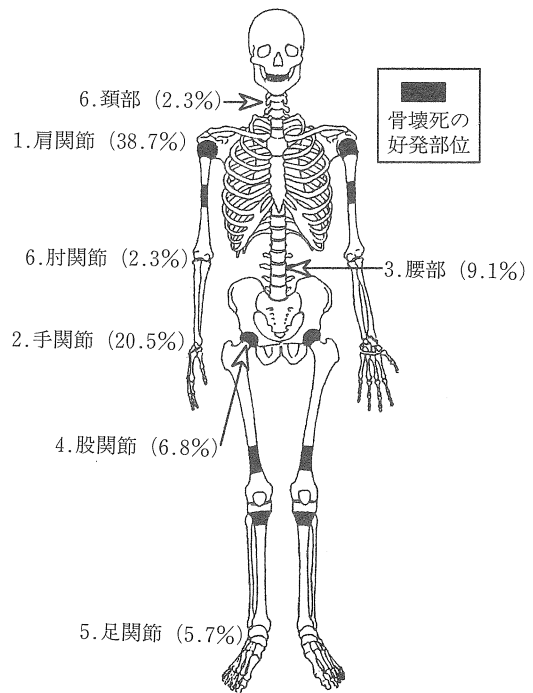


Fig. 4 再現性について

たこと、潜水現場は水中であることなどから、今後も加圧関節痛が実際の潜水作業に何らかの影響を及ぼす可能性は低い。また深度が深くなるにつれて痛みの程度が増大することもないことから、飽和潜水の最大深度を決定する要因とはならないと考える。

1974年 Bradley と Vorosmarti⁹⁾は、深度100ft (水深30m) から850ft (水深250m) までのヘリウム酸素混合ガス潜水 (飽和潜水のみならず、短時間深々度潜水を含む)、計215回の潜水で得られた結果から、加圧関節痛についての検討結果を報告している。加圧関節痛の関節音、関節痛の出現に関して、本研究と比較検討を行った結果を Fig. 7 に示す。潜水深度の増大に伴い、加圧関節痛の発現率が上昇するという傾向は一致するが、本研究では関節音、関節痛両者の発現率でいずれも低値を示した ($P < 0.05$)。その主な原因として加圧速度、潜水ガス組成といった物理的因子、そして人種差といった3点が考えられた。Bradley らは短時間深々度潜水による結果を含めて検討していたが、300ft を超える潜水深度ではその対照は飽和潜水のみになると考えられ、飽和深度300m での発現率の差異は加圧速度の差のみでは説明がつかない。また米海軍の飽和潜水では深度14ft まで空気加圧を行い、以後 DDC 内を酸素分圧0.3ATA に保つようにヘリウムガスで加圧しているのに対し、我々の飽和潜水では10m まで空気加圧を実施し、以後 DDC 内を酸素分圧0.42ATA に保つよう

Fig. 5 加圧関節痛と骨壊死の好発部位⁹⁾

にヘリウムガスで加圧しているので、これら潜水ガス組成の違いが加圧関節痛の発現率に影響した可能性も否定できない。さらに体格差などの人種差が根底に存在する可能性が示唆された。

一方好発発現部位については、肩関節 (38.7%)、手関節 (20.5%)、腰部 (9.1%)、股関節 (6.8%) の順で、Bradley らの報告と合致した。1966年 Hamilton らは加圧関節痛は、滑膜を有する関節のみに発現すると報告した⁹⁾が、それ以外に滑膜を持たない頸部、腰部にも加圧関節痛の発現が見られることが再検証された。また骨壊死の好発部位と加圧関節痛の発現部位との比較では、両者とも肩関節、股関節などに多発するという傾向は類似するものの、加圧関節痛の訴えが認められない骨幹部での骨壊死の発生は、両者での発生機序が全く異なることを示すと考えられる。しかし、加圧関節痛を訴える者に、骨壊死が発生しやすいかどうかについては報告はなく、今後の追跡調査の必要性が考えられた。

本研究で新たに検討を加えた加圧関節痛の再現

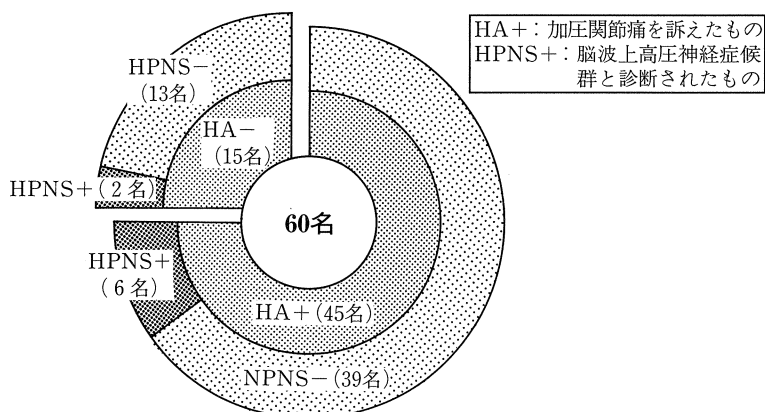


Fig. 6 加圧関節痛と高圧神経症候群との関連性

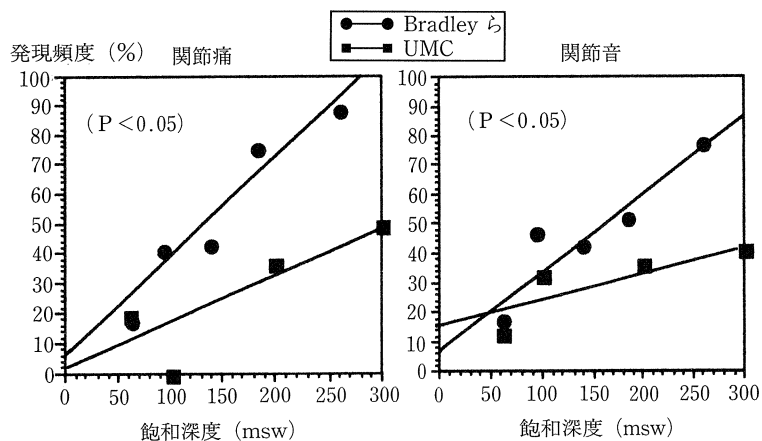


Fig. 7 Bradley らの報告との比較

性については、13名中10名 (76.9%) の潜水員が同一部位に症状の出現を訴えており、過去に関節痛を自覚したものは、その後の潜水でも同一部位に加圧関節痛を発症する可能性が高いことが示された。ところで、加圧関節痛の発生機序としては、高圧環境暴露によって生じる関節部の不規則性の助長⁹⁾、あるいは、不活性ガスの体内溶け込みにより誘発される関節軟骨での浸透圧較差や水分の移動¹⁰⁾などが提唱されていた。これに対し Bradley らは従来からの諸説を再検討し、関節軟骨の脱水

とその変形、さらには潤滑性変化 (Squeeze Film Lubrication¹¹⁾¹²⁾ により促進されるキャビテーション現象、あるいは関節液の減少が加圧関節痛の主たる原因である⁹⁾と報告している。したがって過去の外傷に伴う関節軟骨の損傷、あるいは骨と関節軟骨間の微小なずれなど、関節の接合性不良が高圧環境下で助長され、加圧関節痛の発現につながるという可能性は否定できない。しかしながら、本研究では繰り返し同一部位に加圧関節痛を訴えた10名のうち、その関節に明らかな外傷の既

往を持つ者はわずかに1名(10%)であり、両者間には明らかな相関は認めなかった。この10名の加圧関節痛発現部位でも、肩関節が7名(70%)で第1位であった。これらのことから過去に骨関節領域に損傷を受けた潜水員でも、潜水作業に支障を来さない限りにおいて、飽和潜水に参加することに問題はないと考える。

加圧関節痛とHPNSが、いずれも飽和潜水の加圧時に見られることから、加圧関節痛がHPNSの部分症状とする考え方¹³⁾も以前には見られたが、現在ではもっぱら両者は別個の事象であるとする考えが主流である。HPNSの検出に2次元脳電図を用いた本研究でも両者の関連性は否定的であった。

現在海上自衛隊では約10年間飽和潜水を実施してきているが、多数回にわたり飽和潜水に参加する潜水員が増加する傾向にある。これに伴って加圧関節痛を繰り返し発現する人員が増加することは十分に予想される。加齢に伴う変形性関節症の発生率の増加や、飽和潜水員に見られる骨壊死¹⁴⁾などの関節をとりまく医学的諸問題とともに、今後とも加圧関節痛についての長期にわたる追跡調査が必要であると考えられた。

(参 考 文 献)

- 1) Aquadro, C. F. and Chouteau, J.: Problems of extreme duration in open sea saturation exposure, Lambertsen C. J., Proceedings of the third symposium on underwater physiology, Baltimore, Md, The Williams & Wilkins Co., pp98-107, 1967
- 2) Bradley, M. E.: Hyperbaric arthralgia, Shilling, C. W., Charlston C. B., and Mathias R. A., The Physician's guide to diving medicine New York, Plenum Press, pp190-191, 1984
- 3) Shilling, C. W., Werts, M. F. and Schandelmeier, N. R.: Hyperbaric arthralgia, The underwater handbook, New York, Plenum Press, pp223-224, 1976
- 4) Case, E. M. and Haldane J. B. S., Human physiology under high pressure, J. Hyg., 41 (3): 225-249, 1941
- 5) Bradley, M. E. and Vorosmarti, J., Hyperbaric arthralgia during helium-oxygen dives from 100-850 fsw, Undersea Biomedical Research, 1: 151-167, 1974
- 6) Ozawa, K., Hashimoto, A. and Oiwa, H. Psychophysiological changes in sleep during simulated 200m heliox saturation dives, Undersea Biomedical Research, 18: 397-412, 1991
- 7) 小沢浩二, 西野秀治, 高圧ヘリウム酸素ガス環境下で出現するFm θ 波の特徴, 臨床脳波, 32 (別冊): 85-90, 1990
- 8) Dennis N. W.: Aseptic necrosis of bone, Bove, A. A. And Davis, J. C., Diving Medicine, Philadelphia, W. B. Saunders, p192, 1990
- 9) Hamilton, R. W. Jr., Malnnis, J. B., Noble, A. D. and Schreiner, H. R.: Saturation diving at 650 feet, Tech. Memo B-411, New York, Ocean systems, Inc., 1966
- 10) Kystra, J. A., Longmuir, I. S. and Grace, M., Dysbarism: osmosis caused by dissolved gas?, Science, 169: 289, 1968
- 11) McCutchen, C. W., Boundary lubrication by synovial fluid: demonstration and possible osmotic explanation, Fed. Proc. 25 (3): 1061-1068, 1966
- 12) Dintenfass, L., Rheology of complex fluids and some observation. Fed. Proc. 25 (3): 1054-1060, 1966
- 13) Fructus, X., Agarate, C. and Sicardi, F., Postponing the "high pressure nervous syndrome (HPNS) down to 500 meters and deeper, In: Proceedings of the Fifth Symposium on Underwater Physiology, 1972
- 14) Evance, A., Aseptic bone necrosis in commercial divers. A report from the decompression sickness central registry and radiological panel, The Lancet, Aug 22: 384-388, 1981