

【第2出版物】 (Lemaître F, et al. Doppler detection in ama divers of Japan. Wilderness Environ Med 2014; 25: 258-262)

日本のアマでの気泡の検出

Frédéric Lemaître¹⁾ 合志 清隆^{*2)} 玉木 英樹^{2,3)} 中安 一夫⁴⁾ 原田 昌範⁵⁾
岡山 雅信⁵⁾ 佐藤 祐佳²⁾ 星子 美智子²⁾ 石竹 達也²⁾

Guillaume Costalat¹⁾ Bernard Gardette⁶⁾

Faculté des Sciences du Sport, Université de Rouen, France¹⁾

久留米大学医学部 環境医学講座²⁾

玉木病院 外科・総合診療科³⁾

大島診療所⁴⁾

自治医科大学 地域医療センター地域医療学部門⁵⁾

Comex S.A., Marseille, France⁶⁾

(* : 琉球大学病院 高気圧治療部)

要旨

目的：日本の複数の地域から素潜り漁業者（アマ）に神経系の減圧症（DCS）の症状がみられるとの報告がある。今回の調査目的は、アマにDCSの発症があるとされる地域において、連続した繰り返しの素潜りによる血管内気泡の有無の確認である。

方法：対象者は男性アマ12名であり、全例がフンドウを用いて潜行して自力で浮上していた。専用の装置（AQUALAB）は、5MHzの周波数で連続的な波形ドップラーが測定可能なものであり、そのプローベを前胸部に当てると肺動脈円錐に向かう超音波が計測される。われわれは連続した潜水の終了から10分間の連続測定をドップラーで行った。その記録は数値化されたものであり、2名の経験豊富な別々の調査者がSpencerのコード分類に沿って記録音を解析した。

結果：すべてのアマでの潜水深度は8~20mであり、その回数は75~131回であった。1回の平均した潜水と息継ぎの時間は、それぞれ64±12秒と48±8秒であった（平均±SD）。対象者の12名のなかで1名にgrade I（Spencer分類）の血管内気泡が聴取されたが、その息継ぎの時間は35.2±6.2秒と極めて短かった。さらに、99回の素潜りを解析すると、潜行、在底と浮上の平均時間は、それぞれ10.4±1.6, 39.2±8.0, 18.2±3.0秒であった。

結論：アマで血管内気泡が形成される条件は、短い息継ぎ時間の素潜りを繰り返すこと、あるいは連続した長時間にわたる潜水のようである。繰り返す素潜りでの神経症状の要因の一つに血管内気泡の可能性があげられ、この種の潜水における安全性の検討が必要かもしれない。

キーワード 気泡, 減圧症, アマ

keywords bubbles, decompression sickness, Ama divers

はじめに:息を止めての潜水である素潜りは、より深くて長時間の潜水の記録に更新されてきた。しかし、これを行うことのリスクがないわけではない。各地域からの複数の報告によれば、素潜りを繰り返すことで減

圧症（decompression sickness; DCS）と思われる症状がみられるようであり、この潜水法ではDCSは起こらないと考えられえきたなかで、それらの報告は141例にのぼっている¹⁻³⁾。近年では素潜りダイバーにDCS

が起り得ることは認識されているが、その機序は未だ明らかではない。素潜りダイバーのなかでも日本のアマとの折衝は制約を受けることが多く、この調査研究が進んでいなかった。

アマは素潜りによって魚介類を採取する漁業者であり、その方法には2種類がある。“カチド”とよばれるアマは3~6mの水深で自力での潜水であり、もう一つの“フナド”とよばれるアマは潜行時に錘を使用して15~25mまで潜っている。日本の日本海沿岸の某地域では、“フナド”の40%が潜水中やその後に脳血管障害に類似した症状を経験している。最も一般にみられる症状は、3時間以上の連続した潜水後に生じやすく、片側性の手足の感覚障害か運動麻痺、あるいは発語障害やめまいであった。ある報告によれば、潜水による障害は“カチド”に比べて“フナド”で頻発している⁴⁾。このようなアマの症状は、組織や血液内に窒素が継続的に蓄積してDCSが生ずるポリネシアの“Taravana症候群”に類似しない一致したものである⁵⁾。したがって、繰り返す素潜りでのDCSのリスクを調べることは潜水生理学で重要なことである。さらに、アマで静脈性の気泡が確認され、その具体的な評価は行われていない。

われわれは以下のことを考えており¹⁾、連続のドップラー検査は素潜りによる窒素ガス気泡の形成をイメージで捉えることが可能であろうし²⁾、“フナド”で繰り返す素潜りが気泡形成のリスクになっている可能性があり、さらに³⁾素潜りでみると“フナド”の潜水パターンはDCSの発症リスクを上げる可能性である。したがって、今回の調査目的はアマの日常的な活動状況で気泡の有無を確認することである。さらに、素潜りとDCSとの関連因子を探る目的で潜水パターンの特徴を検討する試みを行った。

対象と方法

調査対象者

今回の調査は日本海沿岸の某地域において、本研究に同意した12名のアマを対象にして実施された。この研究は久留米大学医学部の倫理委員会で承認を受けたものである。また、調査日の早朝には安静の状態での形態上の計測がなされた。

手法

最初に、出発の2、3時間前に身長、体重や皮下脂肪の厚さによる体脂肪率が計測された⁶⁾。次いで、5-MHz用のプローブを用いてドップラー装置(AQUALAB)にて連続波形の計測が行われた。心臓の信号を感知しやすいように左側臥位をとってもらい、測定から1分間はその状態を維持してもらった。フナドは錘を持ったまま潜行し泳いで海面に浮上して自ら船に上がるので、水に浸かることに加えて、例えば利尿、血液濃縮や脱水、さらに冷曝露の影響も予測された。しかし、フナドでの気泡発生^{1,3)}の程度は、実際の状態を反映しているものと考えられる^{1,3)}。直接、肺漏斗の部位で超音波にて捉えられるように、プローブは前胸部に設置された。前後の比較のために12名のフナドが潜水を始める30分前の少なくとも1分間は心臓ドップラーが行われた。一連の潜水作業が終了してアマが水から上がると、再度同様の機種にて同一調査者による10分間の連続測定が行われた。この測定時間を選んだ理由は、Wongから指摘されたことであるが、素潜りダイバーでは血流が速い組織で早期にガスの飽和状態になるためである³⁾。

気泡はSpencerのシグナル分類*に沿って⁷⁾、経験の豊富な2名の調査者によって判定された。シグナルの発生で解釈に差があれば、両者の同意が得られるまで検討が行われた。さらに、フナドの潜水作業の状況(潜水深度と時間、息継ぎ時間)に影響を与えないように、特別な指示は出されていない。潜水の各種パラメーター測定のために、アマにはダイビングコンピュータのSuunto D4 (Suunto Oy, Vantaa, Finland)を装着してもらった。アマは個々人の装備を持っており、フィンとマスクを着けており、船上の巻き上げ機に20Kgの重りが装着されていた。潜水プロフィールはSuunto Dive Manager 3 (Suunto Oy)のソフトを用いて解析された。

(注:* grade 0:気泡のシグナルなし, grade I:ほとんどのシグナルはないか稀にみられる, grade II:多くの気泡のシグナルがあるが心臓サイクルの半分以下である, grade III:ほとんどの心臓サイクルで気泡のシグナルがあるが心音との区別は可能である, grade IV:多くの気泡のシグナルで心音が不明瞭である。)

統計

測定結果は平均とSDで示されている。潜水パラメーターはWilcoxonの符号順位検定を用いて個人別の相関関係も検討され、p値の0.05未満を有意として、Statviewソフト(Abacus Concepts, Inc, Berkeley, CA; 1992)にて検定された。

結果:アマの人体計測上のパラメーターはTable 1に示されている。病歴の聴取では12名のアマのうち4名に今回の調査の前に、例えば10年ほど前に神経障害とみられる症状を経験していた。これは3~4時間の連続した素潜りの最中か、その後に自覚していた。2名のアマは糖尿病の病歴があった。

アマの潜水パターンが示されている (Table 2)。カ

Table 1. Anthropometric parameters of the Ama divers.

| (n=12) | Mean±SD | Range |
|--------------|-----------|---------------|
| Age (years) | 55.6±5.3 | 48.0 – 66.0 |
| Height (cm) | 165.0±6.3 | 159.0 – 178.0 |
| Weight (kg) | 66±12.3 | 44.5 – 83.0 |
| Fat mass (%) | 23.7±7.2 | 8.5 – 33.1 |

Standard Deviation (SD).

Table 2. Diving pattern of the Funado divers analysed from 1241 dives.

| (n=12) | Means±SD | Range | A |
|--------------------------------------|------------|-------------|-----------|
| Descent duration (sec) | 9.1±2.3 | 6.2 – 14.5 | 10.4±1.6 |
| Bottom duration (sec) | 38.4±8.4 | 26.6 – 50.0 | 39.2±7.8 |
| Ascent duration (sec) | 15.9±3.2 | 9.5 – 22.3 | 18.2±3.0 |
| Diving duration (sec) | 64.0±12.1 | 42.5 – 78.3 | 68.0±9.0* |
| Mean maximum diving depth (m) | 12.5±2.8 | 7.9 – 17.8 | 15.8±1.8* |
| Surface interval between dives (sec) | 48.0±7.8 | 35 – 57 | 35.2±6.2* |
| SI/Dive ratio | 0.77±0.1 | 0.5 – 0.89 | 0.5** |
| Length of diving shifts (min) | 186.0±26.7 | 143 – 225 | 170 |
| Number of dive / hour / Ama | 30.4±3.9 | 26 – 37 | 39.6 |
| Number of dives/Ama | 94.2±15.7 | 75 – 131 | 99 |

Standard Deviation (SD). SI/Dive: ratio between surface interval and diving duration.

A: Represent the diving pattern of the BH diver with the grade I score. *: p<0.05, **:

p<0.01.

チドとフナドとしての潜水歴は、それぞれ28.9±7.9年と26.2±10.5年であった。すべてのアマは習慣的な仕事をこなしており、午前中は2.5~3.75時間であり、30分程度の昼食後に1~2時間の潜水作業を続けていた。半数以上のアマが当初はカチドから開始して、数年後に潜行に重りを用いるフナドになっていた。彼らは浮力を調整するために5.0±1.7 kgの重力のベルトを用いており、すべてのアマが20±1.5 kgのフンドウを用いて受動的に潜行して、それから自ら泳いで浮上していた。12名のアマでの潜水は計1,241回の記録がなされた。アマの潜水時間は42秒から2分間で、水深は8~20mであり、94±16回の素潜りを行っていた。浮上の速度は0.8±0.2 m/sであり、潜行の速度は1.4±0.3 m/sであった。

静脈性気泡を検索するなかで1名のアマにSpencerの分類で⁸⁾ grade Iの気泡が心臓内の循環系で確認された。この気泡は測定を開始して2分後に10秒間だけ確認された。このアマは17年間のフナドの経歴のなかで潜水中や、その後に神経障害を経験したことはなかった。それでも、彼の潜水深度が最も深く(20.6 mに際して1分18秒間)、他のアマに比べて最も長いものであった(18.9 mに際して2分26秒間)。彼の平均した最大深度(15.8±1.8 m vs. 12.5±2.8 m; p<0.05)と平均した潜水時間(68±9秒間 vs. 64±12秒間; p<0.05)は、それらで他のアマを超えていた。このアマは他のアマに比べて短い息継ぎの時間であり(35±6秒 vs. 48±7秒; p<0.05)、99回の素潜りの48%は非常に短くなっていた (Table 2)。彼の浮上速度は0.8±0.3 m/sであり、潜行速度は1.5±0.2 m/sであった。

この潜水の期間で最大深度の平均は息こらえ時間に正の相関を示しており、さらに浮上速度にも関連していた (p<0.001; Figure 1)。息継ぎ時間は息こらえ時間の平均に正の相関を示した (p<0.001; Figure 2)。しかし、それ以外に人体計測値と他の計測値に相関はなかった。ドップラーでgrade Iの気泡が確認されたアマの潜水パターンが示されている (Figure 3)。

考察: 今回の主たる結果は、99回の素潜りを繰り返した1人のアマで、わずかな気泡音が確認されたことで

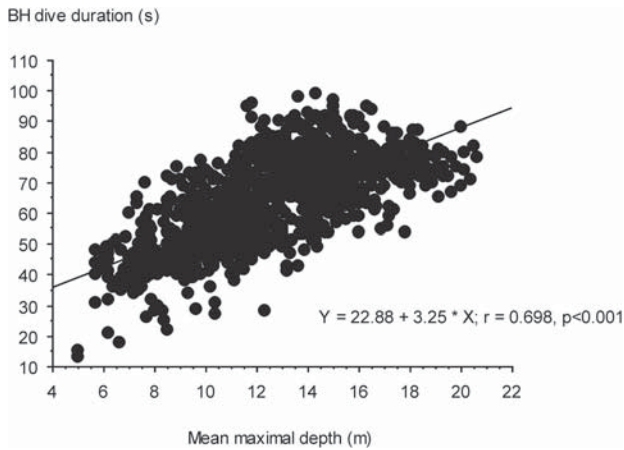


Figure 1

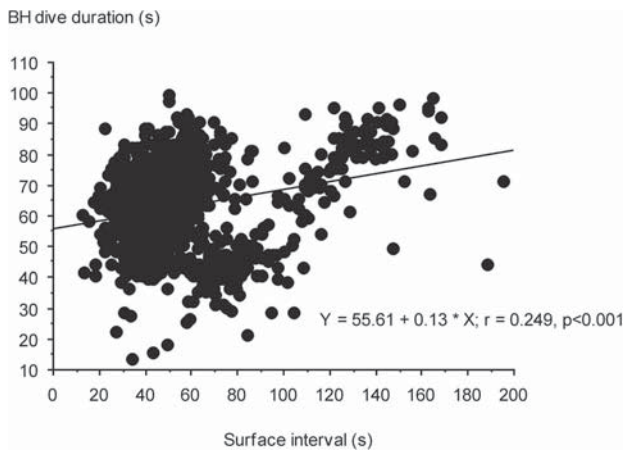


Figure 2

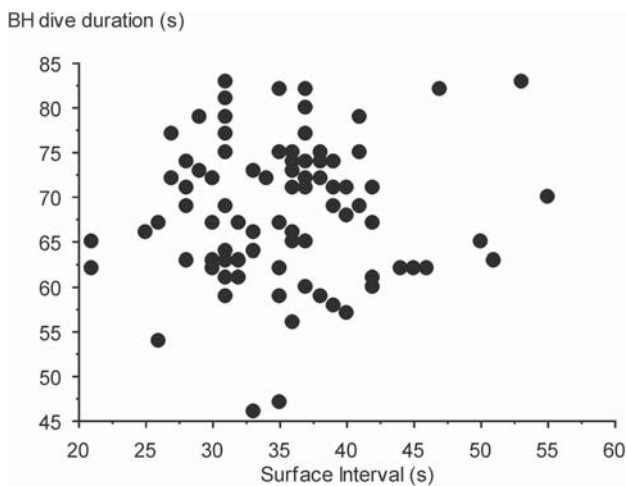


Figure 3

ある。

この地域のフナドはフンドウを用いるが自力で浮上しており、連続して3~4時間の潜水を続けている⁴⁾。この潜水パターンは舩倉島のそれと極めて類似してお

り、その平均した潜水パターンは16.8mと58.4秒であるがDCSの例は報告されていない¹⁾。今回の調査での男性アマの在底時間は39.2±7.8秒であり、これは舩倉島の女性アマの23.6±6.4秒に比べて長い、前者の時間はgrade Iの気泡が確認されたアマと変わりはない。しかし、このアマは平均深度が最大で息継ぎ時間が最短であり、特殊な潜水パターンであった。素潜りでは、水深と全体の潜水時間に加えて長い在底時間がDCSの大きな因子になるようであるが、このことが真珠貝ダイバーでの繰り返す素潜りによる神経系のDCSの原因と考えられている。真珠貝ダイバーは水中で平均して2分間で30m以上の水深で、しかも日に40~60回の潜水を行ない、息継ぎの時間は3~4分間である。その多くのダイバーがTaravana症候群を経験しており、その臨床症状はめまい、吐き気、部分ないし完全な運動麻痺、意識障害、さらに死亡例もあった。運動麻痺は最も一般的な神経障害であるが、一過性で完全に消失していた。アマは20m以上の水深の潜水になるが、短い息継ぎ時間で3時間以上の繰り返した素潜りが神経系のDCSと考えられる脳卒中症状を引き起こす原因ではなからうか。今回の調査でgrade Iの気泡が確認されたアマは、その潜水の48%で他のアマに比べて短い息継ぎ時間とより深い潜水深度になっていた。このアマでは、より高い気圧曝露が流れの速い組織（迅速に気泡が溶解する組織）でのガスの飽和状態が高まり、さらに短い息継ぎ時間は組織平衡状態の回復を抑制するようである。しかし、今回の調査でのアマに比べてより浅くて短い潜水で、しかも連続した時間の短い繰り返す素潜りで、DCSの神経症状を示した21才の男性症例の報告は注目に値する¹⁾。この発症には他のパラメーターである潜行速度と浮上速度がDCSの発症因子である可能性がある。今回のgrade Iの気泡が確認されたアマでは潜行時間が短く、他のアマに比べて高いリスクを有しているようである。

繰り返す素潜り後の脳障害の基本的な機序は未だ明らかではない。再圧治療に顕著に反応することは脳に気泡が存在すること以外には考えにくい、素潜りダイバーでの脳障害の原因は検討課題である。進行性の不活性ガス形成の結果としてin situの気泡形成の可

能性がある。短い息継ぎ時間で素潜りが繰り返されると、理論的には窒素の蓄積が生じると計算される^{1,2)}。しかし、窒素の動力学と血流の多い脳循環からすると、脳に気泡自体が発生するとは考えにくい。窒素の気泡は複数回の繰り返す素潜り後に、全身の臓器の血管内や血管外に生じるであろう。素潜り時には肺内で空気が圧縮され、肺胞内の窒素分圧が上昇し窒素が血液に移行する。浮上の間に組織から血液への僅かな窒素分圧の格差が生ずるが、潜行時の血液と組織への窒素の迅速な移行は肺胞内へはない。静脈内の窒素の蓄積はカチド(アマ)で報告されているので^{3,4)}、息継ぎの時間が短く深い素潜りを繰り返すことは理論的にはDCSの原因になると考えられる。

脳神経系のDCSを有したアマでの放射線学的所見は、臨床症状に一致する脳の領域に多発性の脳梗塞がみられることである。その脳病変は、基底核、内包、脳幹、深部ないし皮質下白質に位置していた⁴⁾。アマでの脳病変は圧縮空気潜水での病変と変わりが無い。基底核の虚血性病変は終末領域に位置し、深部ないし皮質下白質の病変は境界領域ないし分水嶺領域に一致していた。これらは終末枝領域において脳還流圧が低下した結果生ずる脳梗塞であり、この病変は脳の動脈ガス塞栓症と考えられる。

素潜りでの病変が主に脳に限定されることは未解決の課題である。“trapped”された気泡は在底時には、さらに気泡の蓄積や貯留もあって肺動脈圧の上昇でも圧縮されるので、静脈性気泡は潜水中に肺を通過しやすくなる⁴⁾。そこで動脈化された気泡は毎回の浮上に際した拡張して、脳の終末血流領域の境界領域と分水嶺領域に集まる。水面ないし浮上に際して、これらの動脈化された微細な気泡は環境圧の低下で拡大して、脳の動脈ガス塞栓症を誘発すると考えられる^{1,2)}。多発性の大きな脳梗塞は、以上の現象の繰り返しによるものであろう。この仮説によると、すべての静脈性気泡は動脈化されることになり、その結果として脳の動脈ガス塞栓症をきたすと考えられる^{1,2)}。これはアマでの脳神経系のDCS発生の仮説であるが、この障害の発症機序は未だ不明な部分が多い。

結論:素潜りを長期に繰り返した後に、血管内気泡がDCSの経験のない1名のアマで確認された。潜水のパターン、特に短い息継ぎ時間が気泡発生に重要な役割を果たしているようで、その結果としてDCSの発症リスクを高めることになろう。しかし、素潜りダイバーでの神経系の障害と気泡形成からみて、その発生機序は未だ明らかではない。

参考文献

- 1) Lemaître F, Fahlman A, Gardette B, Kohshi K: Decompression sickness in breath-hold divers: a review. *J Sports Sci* 2009; 27: 1519-1534.
- 2) Schipke JD, Gams E, Kallweit O: Decompression sickness following breath-hold diving. *Res Sports Med* 2006; 14: 163-178.
- 3) Wong RM: Decompression sickness in breath-hold diving. In: Lindholm P, Pollock NW, Lundgren CEG, eds. *Breath-Hold Diving. Proceeding of the Undersea and Hyperbaric Medical Society/Divers Alert Network 2006 June 20-21 Workshop*. Durham, NC: Divers Alert Network; 2006: 119-129.
- 4) Tamaki H, Kohshi K, Sajima S, et al: Repetitive breath-hold diving causes serious brain injury. *Undersea Hyperb Med* 2010; 37: 7-11.
- 5) Cross ER: Taravana diving syndrome in the Tuamotu diver. In: Rahn H, Yokoyama T, eds. *Physiology of Breath-Hold Diving and the Ama of Japan*. Washington, DC: National Academy of Sciences Research Council; 1965: 205-219.
- 6) Dumin JV, Womersley J: Body fat assessed from total body density and its estimation from skinfold thickness: measurements on 481 men and women aged from 16 to 72 years. *Br J Nutr* 1974; 32: 77-97.
- 7) Spencer MP: Decompression limits for compressed air determined by ultrasonically detected blood bubbles. *J Appl Physiol* 1976; 40: 229-235.
- 8) Spencer MP, Okino H: Venous gas emboli following repeated breath-holding dives. *Fed Proc* 1972; 31: 355 (abstract)

本論文はLemaître F, et al: Doppler detection in ama divers of Japan. *Wilderness Environ Med* 2014; 25: 258-262をElsevier Scienceから許可を得て和訳したものである。