

【原著】

二次元超音波機器を用いた潜水後心腔内および下大静脈内気泡検出度の相違

小島泰史^{1, 2)}, 森松嘉孝³⁾, 小島朗子⁴⁾, 柳下和慶¹⁾
東京医科歯科大学医学部附属病院 高気圧治療部¹⁾
東京海上日動メディカルサービス²⁾
久留米大学医学部環境医学講座³⁾
ULTRAMarine Lab⁴⁾

【要約】

減圧症発症のリスクファクターに二次元超音波検査による潜水後の心腔内の気泡量があるが、検査手技修得に訓練を要し、なかでも緊急の現場において正確な評価は困難である。これに比し、下大静脈内の気泡測定は簡便で仰臥位で実施可能であるも、心臓検査と比較した報告は見られない。そこで、無減圧潜水後の気泡検出度の比較を行った。男性24名、女性4名の28名を対象に、プロトコールに従って1日3本の潜水を行い、1本目の潜水前と各潜水30分後に、二次元超音波検査で下大静脈と心臓の気泡を評価、比較した。経過中に1回でも気泡が検出された被験者は下大静脈で14名(50.0%)、心臓で8名(28.6%)であった。気泡検出群と陰性群に2分し、心臓検査結果を正しいと仮定した上での下大静脈検査の精度は、検査の陽性率22.7%(95% CI: 15.3-31.7%)、真の陽性率10.0%(5.1-17.2%)、感度72.7%(39.0-94.0%)、特異度82.8%(73.9-89.7%)、陽性適中率32.0%(14.9-53.5%)、陰性適中率96.5%(90.0-99.3%)、診断精度81.8%(73.3-88.5%)、陽性尤度比4.2(2.4-7.4)、陰性尤度比0.3(0.1-0.9)であった。下大静脈における二次元超音波気泡検査は、潜水事故現場における減圧症鑑別の補助的な検査になる可能性を持っていると思われた。

キーワード

鑑別診断、減圧症、減圧ストレス、ダイビング、病院前医療

【Original】

Comparison of post-dive venous gas emboli detection in four-chamber view and inferior vena cava view in two-dimensional ultrasound

Yasushi Kojima^{1, 2)}, Yoshitaka Morimatsu³⁾, Akiko Kojima⁴⁾, Kazuyoshi Yagishita¹⁾

1) Hyperbaric Medical Center, Medical Hospital of Tokyo Medical and Dental University

2) Tokio Marine & Nichido Medical Service Co., Ltd.

3) Department of Environmental Medicine, Kurume University School of Medicine

4) ULTRAMarine Lab

Abstract

Background and purpose: High-grade bubbles in the cardiac cavity by two-dimensional ultrasonography (2D-US), which requires training and is not always easy to perform on a diving accident site, are a risk factor for decompression sickness. 2D-US of inferior vena cava (IVC) has the advantage of being performed in a supine position and easier to learn. However, there are no published studies comparing the accuracy of the IVC test to the four-chamber test. In this study, we investigated the accuracy of the IVC test. Methods: We investigated the accuracy of the IVC test in 28 divers performing three scheduled dives in one day. The IVC and cardiac 2D-US tests were performed before the first dive and 30 minutes after each consecutive

dive, graded on a modified Eftedal-Brubakk scale. Results: The percentage of divers with bubble detected after any dive was 50.0% in the IVC and 28.6% in the cardiac group. The positive rate of the IVC test was 22.7% (95% confidence interval: 15.3-31.7%). In comparison to that cardiac test results (positive rate 10.0%), the sensitivity of IVC test was 72.7% (39.0-94.0%), specificity of 82.8% (73.9-89.7%), positive predictive value of 32.0% (14.9-53.5%), negative predictive value of 96.5% (90.0-99.3%), and diagnostic accuracy of 81.8% (73.3-88.5%). Conclusion: The results show that the IVC test could be adjunctive to decompression sickness differentiation on site.

keywords

differential diagnosis, decompression sickness, decompression stress, diving, pre-hospital care

背景・目的

減圧症の病態は未だ完全に解明されていないが、高圧環境下で生体内に取り込まれた生理的不活性ガス(空気潜水では窒素)が、減圧時に過飽和となり、体外への排出が間に合わずに体内で気泡化することで引き起こされると考えられている¹⁾。しかし、全ての減圧症患者で気泡の存在が確認されるとは限らず、一方で、サイレントバブルと呼ばれる潜水後に気泡が確認されても減圧症を発症しないダイバーも多く存在する。ただし、気泡発生量は減圧ストレスの指標であり、気泡発生量が多い潜水ほど、減圧症発症のリスクは高くなる²⁻⁴⁾。気泡の検出にはドップラー検査、二次元超音波検査、CT検査が用いられる。ドップラー検査は潜水現場で以前より広く用いられているが、測定には周囲が静音な環境である必要があり、緊急時には不適である。CT検査は主に医療機関内で減圧症が疑われる場合に実施される。近年、二次元超音波検査機器は小型化が進み、バッテリー駆動が可能なることから、潜水現場での研究利用が進んでいる。潜水後の二次元超音波検査では心腔内気泡の有無、量が測定されることが多いが、その手技には習熟を要する。一方、下大静脈での気泡測定は、心臓検査に比較すると、その手技は容易であり仰臥位で実施可能である。近年、救急医療において、二次元超音波検査機器はドクターカーやドクターヘリに装備されているため、事故現場でも利用可能だが、救急現場では分秒を争い、且つ迅速な評価、判断が求められる。気道確保、静脈確保、心電図検査等の患者への処置を行うにあっても、患者は仰臥位に維持することが望ましい。また、潜水事故であっても減圧症以外にも鑑別すべき

疾患はあり、気泡以外にも胸腹部超音波検査でチェックすべき点は多く、検査のための体位変換は少ないほうが望ましい。また、患者の全身状態が不良の場合は、側臥位での検査実施には困難が予想される。以上より、心腔内気泡と下大静脈内気泡が相関すれば、減圧症が疑われる事故現場において、より簡便な下大静脈気泡評価を行うことが鑑別診断の一助になる可能性を持っている。ドクターヘリに装備した二次元超音波検査機器を用いた潜水事故現場での下大静脈内の気泡測定結果を、事故現場での鑑別診断、搬送先選定判断に用いた症例報告が2018年にある⁵⁾。しかし、下大静脈と心臓での気泡測定を比較した報告は渉猟する限り存在しない。そこで今回、下大静脈と心臓における、無減圧潜水後の二次元超音波検査の気泡検出度の比較を行ったので、報告する。

方法

2020年1月に潜水指導団体認定のインストラクターダイバーを対象に研究内容の説明と被験者募集を行った。参加の意思を示した28名を対象に、2020年2月3~5日のいずれかの日に、静岡県沼津市獅子浜において潜水及び生体測定を行った。

潜水方法は圧縮空気を用いたスキューバ潜水で、スーツはドライスーツを着用し、バディ単位で行った。潜水は先行研究の潜水プロフィール⁶⁾に沿って行った。具体的には、1日3本のビーチエントリー潜水で水面休憩時間は各90分間とし、リバースダイビングにならないように、また、減圧停止が生じないように潜水プロフィールを計画し、被験者は同プロフィールに従って潜水を行った。エントリーポイントからロープを引き、深

Table 1. modified Eftedal-Brubakk scale⁷⁾

Grade	Description
0	No bubble seen
1	Rare (< 1/S) bubble seen
2	Several discrete bubbles visible per image
3	Multiple bubbles visible per image but not obscuring image
4	Bubbles dominate image, may blur chamber outlines

度10m, 20m, 30mでは横方向に25mのロープを張った上で、1本目は30mまで10m/分の潜降速度で一気に潜降し、横方向に設置した25mロープを指標に同深度で100mの遊泳(5分)を行い、その後5m/分の浮上速度で浮上し、20m, 10mでも同様の遊泳を行い、5mで安全停止を3分施行後に浮上した(滞底時間8分, 総潜水時間27分)。2本目は同様に20mまで潜降し、同深度で100mの遊泳(5分)を行い、その後10mで200mの遊泳(15分)を行い、3本目は同様に10mまで潜降し、同深度で300mの遊泳(25分)を行い、いずれも安全停止後に浮上した(2本目:滞底時間7分, 総潜水時間29分 3本目:滞底時間26分, 総潜水時間31分)。

ブリーフィングの後、患者背景(性別, 年齢, body mass index (BMI), 既往症, 潜水歴, インストラクター歴, 減圧障害の既往)を聴取した。二次元超音波検査は1本目の潜水前と各潜水30分後に、超音波検査技師が安静時の気泡の測定を行った。心臓検査は左側臥位で心尖部より4チャンバー測定し、下大静脈検査は仰臥位で、可及的に近位部で長軸断面測定した。それぞれ10秒間録画した。使用した機器はフクダ電子社製 超音波画像診断装置 PaoLus L-468AG, 電子セクタプローブ FUT-SA162-5である。気泡量のグレード評価はmodified Eftedal-Brubakk scale (Table 1)⁷⁾を用い、現地で二次元超音波検査を行った超音波検査技師とは別の技師及び循環器内科指導医の2名が、録画した動画から後日にスコア化した。

統計学的解析方法は、気泡の有無で気泡検出群と陰性群に2分し、下大静脈検査における検査の陽性率、真の陽性率、感度、特異度、陽性適中率、陰性適中率、診断精度、陽性尤度比、陰性尤度比を、心臓での気泡測定結果を正しいものと仮定して計算した。

本研究は久留米大学倫理委員会の承認(研究番号17139 2020年1月7日承認)を得て、緊急時には静岡済生会総合病院の受け入れ体制を確立後に、また、日本救急医学会専門医及び日本高気圧環境・潜水医学会高気圧医学専門医の立ち会い下に、潜水現場には監視インストラクターダイバーを常に1名地上待機させた状態で行った。

結果

被験者は28名(男性24名, 女性4名)で、平均年齢40歳(25-58歳), BMIは平均22.7(19.6-30.3)であった。潜水歴は平均19.4年(5-35年), インストラクター歴は平均16.3年(4-31年)であった。喫煙者(現喫煙者ないしは喫煙歴有り)は23名, 既往症は気管支喘息を2名に、椎間板ヘルニア, 尿路結石を各1名に認めた。減圧障害の既往を1名に認めた。4名は定期的な健康診断を受けていなかった。潜水当日の水温は16度であった。本研究中に減圧障害を疑う症状を発症した被験者はいなかった。潜水前後における二次元超音波検査の結果をTable 2に示す。症例21と25の2例は3本目の潜水を辞退したため、3本目潜水後の測定結果は無い。経過中に1回でも気泡が検出された被験者の割合は下大静脈で14名(50.0%), 心臓で8名(28.6%)であった。減圧障害の既往のある被験者1名は、下大静脈及び心腔内共に1度も気泡を認めなかった。次に、気泡の有無で、気泡検出(グレード1,2,3)群, 検査陰性(グレード0)群に2分し、Table 3のように下大静脈検査結果を定義した上で、クロス集計表を作成した(Table 4)。このクロス集計表をもとに下大静脈検査の精度を計算した。検査の陽性率は22.7%(95% confidence interval (CI): 15.3-31.7%), 真の陽性率10.0%(95% CI: 5.1-17.2%), 感度72.7%(95% CI: 39.0-94.0%), 特異度

Table 2. Grade of post-dive venous gas emboli detection in four-chamber view and inferior vena cava view in two-dimensional ultrasound. BMI=body mass index

Case	BMI	Smoking	Heart				Inferior vena cava			
			Pre-dive	After 1st dive	After 2nd dive	After 3rd dive	Pre-dive	After 1st dive	After 2nd dive	After 3rd dive
1	20.2	Yes	0	3	1	0	0	3	1	0
2	24.9	Yes	0	0	0	0	0	0	0	0
3	22.9	No	0	1	0	0	0	1	0	0
4	23.7	Yes	0	0	0	0	0	0	0	0
5	22.0	No	0	0	0	0	0	0	0	0
6	25.4	Yes	0	0	0	0	0	0	0	0
7	26.0	Yes	0	0	0	0	0	0	0	0
8	21.1	Yes	0	0	0	0	0	0	0	0
9	19.6	Yes	0	1	0	0	0	1	1	1
10	21.5	Yes	0	0	0	0	0	0	0	0
11	26.2	Yes	0	0	0	0	0	0	0	0
12	26.7	Yes	0	0	0	0	0	0	0	0
13	20.3	Yes	0	0	0	0	0	0	0	0
14	20.3	Yes	0	0	1	0	0	0	1	0
15	20.9	No	0	0	0	0	0	0	0	0
16	22.1	No	0	0	0	0	0	0	2	0
17	24.6	Yes	0	0	0	0	0	0	1	0
18	30.3	Yes	0	0	0	0	0	0	0	0
19	20.5	Yes	0	0	0	0	1	1	0	1
20	21.0	Yes	0	0	0	0	0	2	2	0
21	22.8	Yes	0	2	0	ND	0	0	0	ND
22	20.2	Yes	0	0	0	0	0	1	1	0
23	24.2	Yes	0	1	2	0	0	0	2	0
24	21.4	No	0	0	0	0	0	1	1	1
25	21.3	Yes	0	1	0	ND	0	0	0	ND
26	22.8	Yes	0	0	1	2	0	0	1	1
27	19.9	Yes	0	0	0	0	0	0	1	1
28	22.5	Yes	0	0	0	0	0	0	1	0

82.8%(95% CI: 73.9-89.7%), 陽性適中率32.0%(95% CI: 14.9-53.5%), 陰性適中率96.5% (95% CI: 90.0-99.3%), 診断精度81.8% (95% CI: 73.3-88.5%), 陽性尤度比4.2(95% CI: 2.4-7.4), 陰性尤度比0.3(95% CI: 0.1-0.9)であった。更に, 被験者をBMIが25未満群と25以上群に2分し, 各群の感度, 特異度を比較した。喫煙群と非喫煙群でも2分し, 同様に比較した。BMI 25未満群で感度72.7% (95% CI: 39.0-94.0%), 特異度78.5% (95% CI: 67.8-86.9%), BMI 25以上群で感度は気泡検出群0例にて計算不能, 特異度100.0% (95% CI: 76.2-100.0%), 非喫煙群で感度100.0%(95% CI: 1.3-100.0%), 特異度78.9%(95%

CI: 54.4-93.9%), 喫煙群で感度70.0% (95% CI: 34.8-93.3%), 特異度83.8%(95% CI: 73.8-91.1%)であった (Table 5)。

考察

潜水研究における超音波検査利用に関する指針を示したコンセンサスガイドライン⁸⁾では, 二次元超音波検査の測定部位は心臓であることが前提となっている。減圧ストレスによる気泡形成は全身のあらゆる組織, 静脈内に起こりうるため, すべての静脈血が流入する右房を含む心臓を気泡の測定部位とすることは合理的である。一方でドップラー検査については, 前胸

Table 3. Definition of the inferior vena cava test results, assuming that the cardiac test results are correct and bifurcated into two groups: bubble detection group (bubble scale grade 1, 2 and 3) and negative group (grade 0)

Inferior vena cava	Heart	Judgement
1, 2, 3	1, 2, 3	True Positive
1, 2, 3	0	False Positive
0	1, 2, 3	False Negative
0	0	True Negative

Table 4. Cross-tabulation table of inferior vena cava and cardiac test results according to the definitions in Table 3

		Heart		
		Positive	Negative	Total
Inferior vena cava	Positive	8	17	25
	Negative	3	82	85
	Total	11	99	110

Table 5. Sensitivity (%) and specificity (%) of the inferior vena cava test results in non-obesity group (BMI < 25), obesity group (BMI ≥ 25), non-smoking group and smoking group, assuming that the cardiac test results are correct. BMI=body mass index CI = confidence interval

	Group	No.	Sensitivity (%)	95% CI	Specificity (%)	95% CI
	Total	110	72.7	39.0 to 94.0	82.8	73.9 to 89.7
BMI	< 25	90	72.7	39.0 to 94.0	78.5	67.8 to 86.9
	≥ 25	20	ND	ND	100.0	76.2 to 100.0
Smoking	No	20	100.0	1.3 to 100.0	78.9	54.4 to 93.9
	Yes	90	70.0	34.8 to 93.3	83.8	73.8 to 91.1

部での検査を基本としながら、鎖骨下静脈での評価も補助的に認めている⁸⁾が、これは鎖骨下静脈が腋窩静脈、外頸静脈を起始とするにとどまり、頭蓋内、下肢、腹部臓器由来の気泡は検知できないためである。

下大静脈における気泡検査は下肢及び腹部臓器由来の気泡のみを検知するため、鎖骨下静脈と同様に理論上心臓評価に劣る。今回、二次元超音波検査による無減圧潜水後の下大静脈における気泡検出度は感度72.7%にとどまったが、下大静脈検査では検知できなかった上大静脈由来の気泡を心臓検査では検出できた可能性が考えられる。

しかし、ヘンブルマンの窒素ガス暴露指数Q値⁹⁾も考慮に入れた場合、前胸部に比し鎖骨下静脈でのドップラー検査の方が、気泡の量と減圧症発症との相関が強かったとの報告がある¹⁰⁾。理論と反する結果となった理由として、前胸部ではアーチファクト、ノイズが生じやすいことが指摘された。

本研究でも、下大静脈での気泡検出率(22.7%)は心臓(10.0%)よりも高く、理論と反する結果となった。症例19では潜水前の評価もグレード1であったが、実験参加前日に潜水実施は無かった。参加2日前には2本の無減圧潜水を行っていたが、2本目の潜水は12時35分に終了しており、今回の潜水前測定は最終潜

水浮上後約44時間後に行われたことになる。淡水プールでの33m潜水後気泡測定では、浮上後21分ないしは56分で気泡量は最も多くなり、126分後にはほとんど気泡を認めなくなる¹¹⁾。これより、症例19の潜水前の下大静脈のグレード1は過剰読影であった可能性が高い。実際、同時に行われた心臓測定の評価は0であった。本研究では下大静脈でグレード1の評価は20回あったが、同時に行われた心臓評価ではグレード2が1回、グレード1が5回の一方でグレード0が14回であり、下大静脈では過剰読影の傾向があり、特異度(82.8%)の低下に寄与している可能性が考えられた。二次元超音波検査では、気泡と血球との判別が困難なことがある。本研究の潜水プロトコルの窒素負荷は大きくないために、全体的に気泡の量は少量であったが、特に下大静脈において少量の気泡は血球との区別が困難となる可能性が考えられた。

二次元超音波検査では、脂肪組織が厚く介在するとエコー波は減衰しやすくなり深部にある構造物の解像度が落ちる。また、喫煙による肺の器質変化によるアーチファクト、ノイズが検査結果に影響を与える可能性が理論上考えられたため、今回、被験者をBMI値25、喫煙の有無で2分し、各群の感度、特異度を比較した。BMI 25以上群、非喫煙群のn数は少なかつ

たものの、群間で有意な差を認めず、肥満、喫煙が検査結果に影響を与えたことを確認できなかった。ただし、BMI 25以上群では、心臓検査、下大静脈検査共に気泡検出が0例であり、肥満者では気泡が検出しにくい可能性が考えられた。

正の線形相関は存在しないが、気泡発生量が多い潜水ほど、減圧症発症のリスクは高くなるとされる⁴⁾。逆に気泡が検出されない場合についての減圧症の可能性についてであるが、船外活動のための運動と酸素呼吸による脱窒素と減圧法に関する研究では、気泡が検出されない場合98%が減圧症ではなかったとの報告¹²⁾があるが、低圧曝露という大気圧からの急減圧であり潜水とは大きく条件が異なる。

本研究からは、下大静脈での気泡測定精度が心臓での評価と同等とは言えなかったが、心臓での測定に比し手技が容易で、仰臥位で行える。画像診断を専門としない診療医に活用されるには一定のトレーニングで体得が容易であることが求められており¹³⁾、下大静脈での気泡測定検査の利点は救急現場で大きく、潜水事故現場における減圧症鑑別の補助的な検査になる可能性をもっていると思われた。

本研究のプロトコールは、安全に資するものであったことより、グレードの高い気泡は殆ど見られず、減圧症を発症したダイバーもいなかった。そのため気泡の量が多い際の下大静脈と心臓検査の比較は十分に行えなかった。また、減圧症発症と気泡の量の相関の比較も行えなかった。

結語

心臓検査が正しいと仮定した場合の無減圧潜水後下大静脈における二次元超音波気泡検査の精度は、感度72.7%、特異度82.8%であった。下大静脈における二次元超音波気泡検査は、潜水事故現場で減圧症鑑別の補助的な検査となる可能性をもっていると思われた。

謝辞

久保田優斗氏(済生会日田病院臨床検査科)、大坪仁氏(済生会日田病院副院長)には本論文の二次元超音波検査実施・評価について、苜部徹氏(アンダー

ウオータースキルアップアカデミー)、小林秀樹氏(ダイビングスクール エンジェルマリン)、矢部拓氏(エムズダイビングアドベンチャー)には被験者の募集、研究当日の被験者管理にご協力をいただいた。石山純三氏(静岡済生会総合病院病院長)には研究当日に救急待機していただいた。柿沼俊光氏(株式会社オルトメディコ統計解析課)には、本論文の統計部分についてご指導をいただいた。更に研究場を提供していただいた獅子浜ダイビングサービス、最後に被験者として本研究にご協力いただいた皆様に、この場をお借りして深く感謝申し上げます。

利益相反

無し。

参考文献

- 1) Moon RE, Mitchell SJ: Decompression Sickness. In: Moon RE, ed. Hyperbaric Oxygen Therapy Indications, 14th ed. North Palm Beach FL; Best Publishing Company. 2019; pp.153-162.
- 2) Nishi RY, Brubakk AO, Eftedal OS: Bubble detection. In: Brubakk AO, Neuman TS, eds. Bennett and Elliott's physiology and medicine of diving, 5th ed. Edinburgh; Saunders. 2003; pp.501-529.
- 3) Eftedal OS, Lydersen S, Brubakk AO: The relationship between venous gas bubbles and adverse effects of decompression after air dives. Undersea Hyperbaric Med 2007; 34: 99-105.
- 4) Doolette DJ: Venous gas emboli detected by two-dimensional echocardiography are an imperfect surrogate endpoint for decompression sickness. Diving Hyperb Med 2016; 46: 4-10.
- 5) Yanagawa Y, Omori K, Takeuchi I, et al.: The on-site differential diagnosis of decompression sickness from endogenous cerebral ischaemia in an elderly Ama diver using ultrasound. Diving Hyperbaric Med 2018; 48: 262-263.
- 6) 森松嘉孝, 村田幸雄, 合志清隆, 他.: インストラクターダイバーの唾液中コルチゾールを用いたストレス評価. 九州高気圧環境医学会誌 2020; 20: 7-14.
- 7) Doolette DJ, Gault KA, Gutvik CR: Sample size requirement for comparison of decompression outcomes using ultrasonically detected venous gas emboli (VGE): power calculations using Monte Carlo resampling from real data. Diving Hyperbaric Med

- 2014; 44: 14-19.
- 8) Møllerløkken A, Blogg SL, Doolette DJ, Nishi RY, Pollock NW: Consensus guidelines for the use of ultrasound for diving research. *Diving Hyperbaric Med* 2016; 46: 26-32.
- 9) Hempleman HV: History of decompression procedures. In: Bennett PB, Elliott DH, eds. *Physiology and Medicine of Diving*, 4th ed. London; W.B. Saunders, 1993; pp.361-375.
- 10) Hugon J, Metelkina A, Barbaud A, et al.: Reliability of venous gas embolism detection in the subclavian area for decompression stress assessment following scuba diving. *Diving Hyperbaric Med* 2018; 48: 132-140.
- 11) Papadopoulou V, Germonpré P, Cosgrove D, et al.: Variability in circulating gas emboli after a same scuba diving exposure. *Eur J Appl Physiol* 2018; 118: 1255-1264.
- 12) Conkin J, Powell MR, Foster PP, Waligora JM: Information about venous gas emboli improves prediction of hypobaric decompression sickness. *Aviat Space Environ Med* 1998; 69: 8-16.
- 13) 亀田徹, 谷口信行: 急性期診療における point-of-care ultrasonography. *日本救急医学会雑誌* 2015; 26: 91-104.