

労災疾病臨床研究事業費補助金

短時間に繰り返し行われる潜水作業従事者に発症する減圧症に
係る調査と減圧症予防のためのプロトコール作成

令和6年度 総括研究年度報告書

研究代表者

東京慈恵会医科大学環境保健医学講座

望月 徹

令和7年3月

目 次

I．総括研究年度終了報告

短時間に繰り返し行われる潜水作業従事者に発症する減圧症に係る調査と減圧症予防のためのプロトコール作成	-----	1
--	-------	---

II．研究成果の刊行に関する一覧表	-----	24
-------------------	-------	----

労災疾病臨床研究事業費補助金
総括研究年度終了報告書

短時間に繰り返し行われる潜水作業従事者に発症する減圧症に
係る調査と減圧症予防のためのプロトコール作成

研究代表者 東京慈恵会医科大学環境保健医学講座
非常勤講師 望月 徹

研究要旨

本研究は、短期間に繰り返し行われる潜水に関し、当該潜水方法を用いて作業に従事する潜水土の減圧症リスクについて調査研究を行い、労災認定基準の検証等に資する医学的知見の収集を行うことを主たる目的とする。短期間に繰り返し行われる潜水はyo-yo潜水とも呼ばれており、水産養殖場での潜水業務に多く見られる。yo-yo潜水は特異な潜水パターンを用いるため、その安全性については明らかになっていない。yo-yo潜水を行う海士や潜水漁業者の調査や動物実験では、重篤な減圧症の発生が確認されていることから、そのリスクが懸念されている。

養殖場における潜水業務について労働衛生の観点から報告された例はなく、知見の蓄積もほとんどない。そこで、実際に養殖の現場で潜水業務に従事する潜水作業者を対象に、潜水プロフィール並びに検体を採取し、それらを分析することで減圧症リスクの評価を試みた。yo-yo潜水では、潜水深度は浅いものの高頻度に潜降浮上を繰り返すことから、この頻繁な環境圧力の変化が末梢血管系を刺激し、それによって産生される炎症性サイトカインや内皮由来微小膜小胞体(microparticle: MP)が減圧症リスクの指標(マーカー)になると仮定した。併せて、従来から減圧症リスク指標として用いられる不活性ガス気泡についても調査を行った。調査期間中に43回の潜水が行われその内yo-yo潜水は22回であった。いずれの潜水においても減圧症の発症は認められなかった。一定の深度で潜水業務を実施する箱型潜水に対してyo-yo潜水ではMP産生量が有意に高かった。不活性ガス気泡は7例で検知されたがいずれも低等級(等級1)であり、気泡を検知した被験者は比較的強い疲労感を訴えていたことから、自覚的疲労感が減圧症リスク評価に利用できる可能性が示唆された。

1. 本年度の研究目的

令和 6 年度の調査研究は、養殖場での潜水業務におけるリスク要因を明らかにすることを目的とした。令和 5 年度に実施した養殖場での潜水業務に関するアンケート調査により、養殖場では、感染症拡大防止のための斃死魚の即時回収、周辺海域の生態系へ影響を及ぼす養殖魚の脱走を防ぐための生け簀網の点検保守等を主な目的として、多くの養殖場で潜水業務が行われていること。生け簀を多く有する比較的に規模の大きな養殖場で潜水業務量が大きいこと。また、これらの潜水業務は、極短時間の潜水を高頻度で繰り返す所謂 yo-yo 潜水が用いられていること、が明らかとなった。特に養殖イケスを多く有する比較的規模の大きな養殖場で yo-yo 潜水が多く行われる傾向にあった。

yo-yo 潜水は潜水漁業者や海士に多いが、重篤な脳型や中枢神経系の減圧症事例が多数報告されている^{1,2,3)}。養殖場においても yo-yo 潜水に起因する障害の発生が認められており、Douglas らは” new occupational hazard” として何らかの対策が必要であると報告している⁴⁾。

潜水に特有な疾病である減圧症は、潜水中に体内に溶解蓄積した不活性ガスが組織内で過飽和状態になった後に起こる全身性の病態生理学的プロセスと考えられている。呼吸によって吸気された不活性ガスは、周囲の圧力に比例して組織内に取り込まれ、圧力が低下すると、この不活性ガスの一部が気泡化して組織から放出される。この気泡が、減圧症の誘因とし

て中心的な役割を果たすことは現在広く受け入れられている。気泡は物理的な条件によってその大きさは約 20 μm 以上と考えられている⁵⁾。この大きさでは肺胞の毛細血管を通過できないため、動脈系に気泡が達することはほとんどなく、そのため動脈塞栓によって生ずる脳型や中枢神経型の減圧症発症率は低い。

一方、yo-yo 潜水では脳型や中枢神経型の減圧症が多く発症する傾向にある。潜水深度が浅くかつ短時間であることから、潜水中の不活性ガス溶解蓄積量は多くなく、気泡の形成や影響も限定的なものと考えられる。気泡以外で組織傷害を媒介する病態生理学的反応は不明である。

近年の研究で潜水によって微小膜胞体 (microparticle: MP) が産生され、動物や人による模擬潜水実験や実海域実験で潜水によって増加することが認められており^{6,7,8)}、気泡形成の基となるガス核の可能性も示唆されている⁹⁾。MP は直径 0.1 ~ 1.0 μm の膜脂質二重層に包まれた小胞と定義され、酸化ストレス、アポトーシス、物理的な刺激等によって細胞表面から排出され、親細胞由来の抗原マーカーの発現によって特徴づけられる¹⁰⁾。MP であれば肺胞毛細血管を容易に通過することが可能である。さらにガス核として機能するのであれば、動脈内で気泡化し脳型や中枢神経系の減圧症の発症要因となりえる。

そこで、令和 6 年度の調査研究では、養殖場において行われる yo-yo 潜水に注目し、そのリスクについて評価検討を行

うこととした。yo-yo 潜水では潜降浮上が高頻度で繰り返されることから、末梢血管の内皮細胞がその刺激により MP を生成すると仮定し、潜水前後の血管内皮由来の MP 生成量を比較することで、潜水ストレスの大きさを評価することとした。また、併せて従来より減圧ストレスの指標とされている不活性ガス気泡の調査も実施した。これらを補完する目的で、唾液中の炎症性サイトカインと尿中の酸化ストレスマーカーの発現量を調査した。海藻類の養殖では、頻繁な潜降浮上を行わず、一定の深度で長時間の潜水作業が行われていることから、これをコントロールとした。また、潜水深度や繰り返し潜水回数、浮上速度の影響等についても検討を行い、リスク要因の評価を実施した。

2. 方法

養殖場での潜水業務におけるリスク評価のため、以下の項目について調査を行

うこととした。調査プロトコルを図1に示す。なお今回の調査研究における全ての手順はヘルシンキ宣言に従って実施し、東京慈恵会医科大学倫理委員会によって承認された。

[調査項目]

- ① 唾液中の存在するストレスマーカーとして sIgA、CRP 並びに炎症性サイトカイン (TNF- α 、IL-1 β 、IL-6、IL-8) の定量
- ② 高分圧酸素ばく露による酸化ストレスマーカーとして尿中 8-OHdG 等の定量。
- ③ 高分圧酸素ばく露に伴う血管内皮損傷による影響を評価する内皮由来MPの定量
- ④ 潜水後の超音波ドップラー気泡検知法による気泡の検知と評価
- ⑤ 潜水後の Visual analogue scale (VAS) による自覚的疲労感の評価
- ⑥ 経時的な圧力変化を記録するため潜水記録計による潜水プロファイル調査

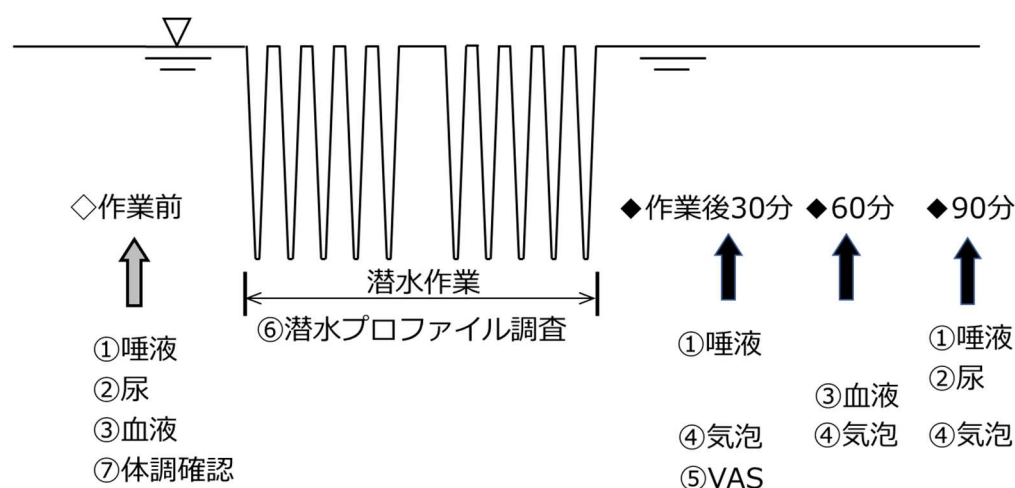


図-1. 調査プロトコル

2-1. 被験者

被験者は養殖場での潜水業務に従事する労働者とした。選定に際しては、潜水業務への就業に必要な潜水土士の資格を有していること、定期的な健康診断を受診し、潜水業務への適性が確認されていること、本研究への参加にあたり十分な説明を受けた後、理解の上、本人の自由意思による文書同意が得られた労働者とした。

2-2. 唾液中の各バイオマーカーの定量

唾液採取用の専用の綿を口に含み、唾液を約 2ml 採取する。遠心機を用いて、綿から唾液を回収し、ドライシッパー内で -80°C に凍結保存する。唾液を解凍精製した後、ELISA 法により炎症性サイトカイン ($\text{TNF-}\alpha$ 、 $\text{IL-1}\beta$ 、 IL-6 、 IL 等) を定量する。これらの潜水作業前後の変化量と超音波ドップラー気泡検知結果を比較し、潜水によるストレスについて評価する。なお本研究では、ヒトゲノム由来の DNA は評価の対象としない。

2-3. 尿中の酸化ストレスマーカーの定量

尿は滅菌ハルンカップに採取し、10ml のエッペンドルフチューブに移した後、 -80°C で輸送用液体窒素容器ドライシッパー内に凍結保存し、共同研究機関へ輸送する。採取した尿から EIA 法等により酸化ストレスマーカー (8-OHdG 並びに 8-isoprostane 等) を定量する。これらの潜水前後の変化量から酸化ストレスの程度を評価する。なお評価に際しては、日内変動の影響を抑制するために、クレアチニ

ン補正を行う。

2-4. 微小膜小胞体 (MP) の測定

微小膜小胞体 (micro-particle: MP) を調査するために潜水業務前後 (Pre および Post) の被験者から血液 ($\sim 5\text{mL}$) を独自の防腐剤を含む Cyto-Chex BCT 採血管に採血した。検体は常温で保管し、採血後 4 $\sim$ 8 日以内に分析が行われた。分析は、まずヒト末梢血から乏血小板血漿 (PPP) を調製し、PPP 中の MP を FCM (フローサイトメトリー) により測定した。先行研究では血管内皮由来の MP の定義として、CD31 陽性-CD42 b 陰性を用いているものと CD144 陽性-CD42 b 陰性を用いているものがある。今回はこの二種類の抗体を用いて測定を行い、血管内皮由来 MP の評価に適した測定方法についても検討を行った。測定には CD42b 陰性集団の中から、CD144 陽性粒子数 (=血管内皮細胞由来 MP: EDMP) および CD31 陽性かつ Annexin V 陽性粒子数をカウントした。なお FCM 測定に際しては、当該測定に豊富な経験を有する株式会社鎌倉テクノサイエンスに依頼し、測定プロトコールの詳細に関しては、担当者との協議の上決定した。

2.4.1 PPP の調整

採血管をゆっくりと転倒混和して血餅等血液の凝固がないことを確認し、血餅が見られた血液検体は、できる限り血餅を取り除いて使用した。検体は付番した 15 mL チューブにそれぞれ移し替え、室温で $2,000\times g$ で 15 分間遠心後、上清を付番した 1.5mL チューブに 1 mL ずつ採取し

た。さらに室温で $2,500\times g$ で 15 分間遠心し、新しい 1.5mL チューブに PPP を 350 μ L ずつ採取した。測定に使用するまで室温にて保存し、全てのサンプルを採取した当日に FCM 測定を実施した。残余 PPP サンプルは、1.5mL チューブに分注して凍結 (-70°C 以下) 保管し、試験終了後にオートクレーブ滅菌し廃棄した。

2.4.2 抗体の調製

1) 単染色用抗体の調製

Compensation (蛍光漏れ込み補正) に用いる単染色サンプルには、1 サンプル (混合 PPP 50 μ L) につき 1 種類の抗体を添加した。1 テスト当たりの抗体容量は、CD31 抗体 5 μ L、CD42b 抗体 4 μ L、CD144 抗体 1 μ L とし、それぞれ Brilliant Stain Buffer を添加して 45 μ L/test とした。調製した抗体は、使用まで遮光して冷蔵または氷上で保管した。

2) 抗体カクテルの調製

解析用サンプルでは、1 サンプル (PPP 50 μ L) につき抗体カクテルを 45 μ L 調製した。1 テスト当たりの抗体 (CD31 抗体 5 μ L、CD42b 抗体 4 μ L、CD144 抗体 1 μ L) を全て混合したものに、Brilliant Stain Buffer 35 μ L を添加して 45 μ L/test とした。調製した抗体は、使用まで遮光して冷蔵または氷上で保管した。

Isotype Control 用では、1 サンプル (混合 PPP 50 μ L) につき IC 抗体カクテルを 45 μ L 調製した。1 テスト当たりの IC 抗体 (PE IC 抗体 2.5 μ L、APC IC 抗体 4 μ L、BV421 IC 抗体 0.25 μ L) を混合したものに、Brilliant Stain Buffer 38.25 μ L を添加

して 45 μ L/test とした。調製した IC 抗体は、使用まで遮光して冷蔵または氷上で保管した。

2.4.3 抗体染色

1) 未染色

FACS チューブあるいは Trucount Tube に抗体カクテル 1 サンプル分と同量 (45 μ L/test) の Brilliant Stain Buffer を添加した。次に、調製した混合 PPP を 50 μ L 添加した。緩やかに Vortex で攪拌後、遮光にて室温で、15 分間反応させた。

2) 単染色 (Compensation 用)

FACS チューブに対象の標識抗体と Brilliant Stain Buffer を容量で計 45 μ L になるよう添加した。次に、調製した混合 PPP をそれぞれ 50 μ L 添加した。緩やかに Vortex で攪拌後、遮光にて室温で、15 分間反応させた。

3) 抗体染色 (Isotype Control 用)

FACS チューブおよび Trucount Tube に調製した Isotype Control 用抗体カクテルを 45 μ L/test 添加した。次に、混合 PPP を 50 μ L 添加した。緩やかに Vortex で攪拌後、遮光にて室温、15 分間反応させた。

4) 抗体染色 (Compensation 用 Pre/Post)

FACS チューブに調製した解析用抗体カクテルをそれぞれ 45 μ L/test 添加した。次に、Compensation 用 Pre-Mix および Post-Mix PPP をそれぞれ 50 μ L 添加した。緩やかに Vortex で攪拌後、遮光にて室温、15 分間反応させた。

5) 抗体染色 (解析用)

検体数分の Trucount Tube に解析用抗体カクテルをそれぞれ 45 μ L/test 添加し

た。次に、各検体 PPP を 50 μ L 添加した。緩やかに Vortex で攪拌後、遮光にて室温、15 分間反応させた

2.4.4 Annexin V の添加

Annexin V は 1 $\times$ Annexin V Binding Buffer を等量混合 (2 倍希釈) して使用した。対象の単染色、解析用、Compensation 用 Pre/Post の FACS チューブまたは Trucount Tube に、2 倍希釈した Annexin V を 5 μ L 添加した。その他のサンプルチューブには 1 $\times$ Annexin V Binding Buffer のみを 5 μ L ずつ添加した。緩やかに Vortex で攪拌後、遮光にて室温、15 分間反応させた。

2.4.5 Buffer の添加

未染色を含むすべてのサンプルに 400 μ L の 1 $\times$ Annexin V Binding Buffer を添加した。測定 3 回目以降は 900 μ L の Buffer を添加した。穏やかに Vortex で攪拌し、速やかに測定を開始した。

2.4.6 FCM を用いた測定

フローサイトメトリー (FCM) は、BD Cytometer Setup and Tracking Beads (Becton, Dickinson and Company) を用いた精度管理後、測定条件の最適化を行った。その後、サンプルを測定した。

1) MPs ゲートの確認

All Events から FSC-A/SSC-A プロットを展開し、5 つのサイズ Beads 位置を確認した。3.3 μ m ビーズを含む大きいサイズの粒子は遠心で分離できなかった血小板等と判断し、3.3 μ m より小さいサイズで一次ゲートを設定した (P1 ゲート)。0.29 μ m ビーズを含み、かつ 1.32 μ m ビーズを含む

位置でゲートを設定し、ゲート内の微粒子を末梢血中マイクロパーティクルと定義した (MP ゲート)。Trucount Beads を流し、プロット位置を確認してゲーティングした (Count Beads ゲート)。

2) Compensation (蛍光漏れ込み補正)

染色サンプルを 1 本ずつ測定し、陰性および陽性粒子を確認した。各蛍光について対比させた Dot Plot を展開し、本来陰性であるにも関わらず別の蛍光へ擬陽性として検出されている粒子集団を漏れ込みとし、これが陰性となるように機器条件を調整した。

2.4.7 解析サンプルの測定

MP ゲート内の粒子集団をカウントした。取り込み event 数は、MP ゲート内を 50,000 events 以上に設定した。なお、下層の解析集団の検出が少ない場合は、さらにサンプルを取り込み、データを追加した。

2.4.8 データ解析

1) MP 中の CD144 陽性粒子集団

取り込んだ粒子集団より SSC-A/CD42b-A プロットを展開し、CD42b 陰性集団をゲートした (CD42b ゲート)。CD42b ゲート内の粒子集団より SSC-A/CD144-A プロットを展開し、CD144 陽性集団を血管内皮細胞由来 MP と定義し (EDMP ゲート)、ゲート内の粒子数をカウントした。

2) MP 中の CD31 陽性粒子および Annexin V 陽性粒子

CD42b ゲート内の粒子集団より CD31-A/Annexin V-A プロットを展開し、CD31+/Annexin V+ の粒子数をカウントした。

2-5. 超音波ドップラー気泡検知法による不活性ガス気泡の検出と評価

潜水終了後から 90 分後まで、30 分毎に超音波ドップラー気泡検知器（Techno Scientific 社製 DBM9008 型）を用い、2.5MHz プローブによって肺動脈起始部を標的部位として超音波による減圧性気泡の検知を実施した。気泡検知のプロトコ

ールは、まず調査対象者を立位安静状態とし約 1 分間ドップラー気泡信号の聴取を行い、次に深い屈伸運動を 1 回実施し、再度 1 分間気泡信号を聴取し、これを 1 セットとした。ドップラー気泡音は、Spencer Scale（表 1）にて気泡等級を評価し、後の解析及び確認のために IC レコーダー（ICD-U60、SONY 社製）に記録した。

表-1. Spencer Scale による気泡等級

気泡等級	特 徴
0	気泡信号が全く認められない
I	心拍信号と識別できる気泡信号が時々出現する。
II	心拍期間の半分以下で気泡信号が単独もしくはグループで認められる。
III	心拍期間の全てで気泡信号のシャワーを含むが心拍信号を消すほどでは無い。
IV	全ての心拍の収縮期および拡張期を通じ連続的に聞き取れ、気泡信号が心拍信号を消すほど多く認められる。

2-6. Visual analogue scale (VAS)による自覚的疲労感の評価

潜水後の疲労感は、減圧症発症リスクの程度と関連する可能性が考えられる、潜水業務従事者が自覚する疲労感の程度の調査には、VAS(Visual Analogue Scale)法を用いた。今回、VAS の自己評価スコアは 100 mm の線分とし、左端(0)が「疲労感まったくなし」状態、右端(100)が、「経験しうる最大の疲労感」状態と教示し、今の状態がどこに位置するか、その線分上に印を記入させた。なお VAS 調査方法並びに調査票は、日本疲労学会のガイドライン（抗疲労臨床評価における疲労感の評価方法）に依った。

始から浮上完了までの経時的な水深の変化（潜水プロファイル）を調査した。潜水が潜水土の生体に及ぼす影響には、水深の変化や深度下で時間以外にも、潜降並びに浮上の速度、潜水間のインターバル等も大きく影響することが考えられる。そこで、yo-yo 潜水における個々の潜水プロファイルを計測、記録し、それらを比較することで減圧症発症リスク因子を特定する。当該潜水記録計は内蔵するセンサーによって潜水開始と同時に自動的に記録が開始されるため、潜水土に特に操作を求めない。記録した潜水プロファイルは、コンピュータに転送した後、解析に用いた。

2-7. 潜水プロファイル調査

潜水業務従事者に潜水記録計（Reefnet 社製 Sensus Ultra）を携行させ、潜降開

3. 結果

現地調査は令和 6 年 10 月から令和 7 年 3 月に実施した。当初の計画では、春から

夏にかけての時期は潜水業務が比較的少なくなると予想されたことから、9月から11月の潜水業務繁忙期に調査を実施できるよう調整を行った。しかしながら、世界的な異常気象により海水温の高い状態が続いたため、台風の発生が夏季以降も収束することなく10月後半まで続いたため、現地調査の開始が大幅に遅れることとなった。

3-1. 被験者

令和5年度に実施したアンケート調査で現地調査への協力が可能との回答があった養殖業者を対象とした。被験者は全員、その養殖場に属する潜水業務従事者であった。現地調査には男性33名女性1名の計34名が参加した。海象条件悪化のため潜水業務が直前に中止となった1名を除く33名を対象に調査を実施し、31名から検体を採取した。被験者の年齢は、 33.4 ± 9.5 歳（範囲：22-66歳）で、身長は 170.9 ± 5.9 cm（範囲：158-189cm）、体重は 74.5 ± 15.1 kg（範囲：50-104kg）であった。調査開始前に全ての被験者から、書面によるインフォームド・コンセントを得た。調査前後に体調不良を訴えたものはなく、軽微なものを含め減圧症の症状を認めたものは無かった。また、採血等の侵襲による異常も認めなかった。

3-2. 潜水プロフィール

調査期間中に合計43回の潜水業務が行われた。業務内容は、斃死魚の回収やイケスの点検等から、養殖魚の水揚げ、イケスの交換など様々であった。潜水プロフィールの調査結果を表2に示す。表中「開

始時刻」は潜水業務従事者が水中に入った時刻であり、必ずしも潜降を開始した時刻ではない。また「終了時刻」も水面に浮上し、次の潜水が行われなかった時点の時刻を示す。滞底時間は深度下で潜水業務に要した時間であり、水面を含み水中に滞在した時間とは異なる。潜水回数は、潜降浮上を繰り返した回数を示す。表からも明らかなように、潜水深度や時間も様々であることから、潜水曝露が及ぼす生体への影響については、exposure index (曝露指数) ととも呼ばれる Hempleman のルートモデルによる Q 値 ($Q = P \sqrt{t}$: $P =$ 曝露圧力、 $t =$ 曝露時間) を指標とした^{11, 12)}。これは減圧症に至った多くの潜水履歴から求められたものであり、Q 値が20程度以下であれば減圧症リスクは低く、25を超える場合と減圧症リスクが高いと評価されている¹³⁾。

今回調査した潜水業務は、潜水深度は 14.2 ± 6.5 m（範囲：4.5-26.3m）、滞底時間は 39.9 ± 37.1 分（範囲：5.5-199分）であった。これらのうち、潜水中に繰り返し水面まで移動したもの、水深3m程度の潜降浮上を繰り返したもの、潜水間の間隔（インターバル）が15分以下のものを yo-yo 潜水とした。調査した43回の潜水のうち yo-yo 潜水が行われたものは22回であった。yo-yo 潜水に限ると、潜水深度は平均値 $\pm$ SD で 14.0 ± 6.9 m（範囲：5.1-26.3m）、滞底時間は 41.5 ± 40.5 分（範囲：5.5-199分）、繰返し潜水回数は 14.0 ± 14.2 回（範囲：2-50回）であった。Q 値は 11.8 ± 4.2 （範囲：3.9-21.9）であった。

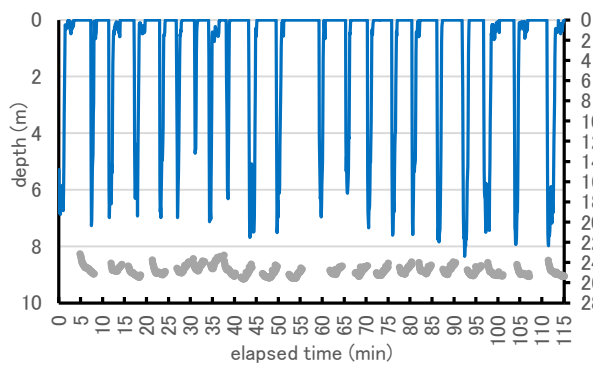
潜水プロフィールの調査結果を表2に示す。また、各潜水プロフィールのうち、

yo-yo 潜水として評価したもの、評価しな ロファイルの一例を図 2～4 に示す。
 かったもの並びにコントロールとしたプ

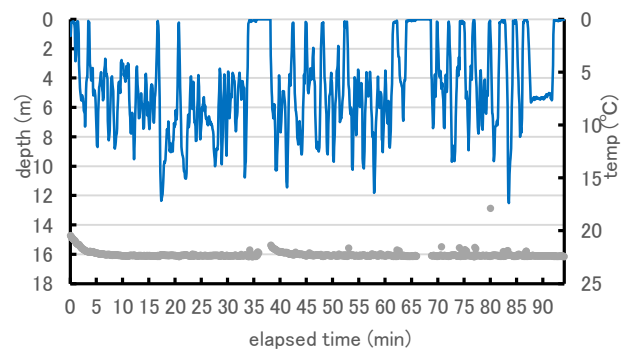
表-2. 潜水プロファイル

no	ID	yo-yo	開始時刻	終了時刻	滞 底 時 間(分)	最大潜水 深度(m)	潜水回数	Q 値
1	A-001	○	7:18	9:56	55.4	8.4	31	13.31
2	A-002	○	9:23	11:20	36.3	8.3	11	10.83
3	B-001	○	8:12	8:33	6.2	8	6	4.43
4	B-002	○	7:21	8:26	42.9	26.28	2	20.17
5	B-003	○	7:43	8:15	5.5	7.9	4	3.90
6	B-004	○	6:56	8:09	40.2	25.79	2	18.41
7	B-005	○	7:01	9:56	24.1	8.02	22	8.60
8	B-006	○	7:24	7:59	16.8	26.18	2	14.27
9	B-007	○	7:32	9:25	24.0	8.35	21	8.41
10	C-001	○	8:41	10:33	57.1	10.4	36	13.45
11	C-002	○	8:47	9:35	19.8	5.11	23	6.19
12	C-003	○	8:51	10:33	77.5	13.02	41	15.87
13	C-004	○	8:57	10:30	74.5	12.5	50	15.86
14	D-001	○	6:55	9:36	44.3	15.48	8	14.71
15	D-002	○	7:22	11:15	199.1	8.69	4	21.88
16	D-003	—	7:17	7:43	24.3	14.35	1	11.92
17	E-001	—	10:01	10:38	33.5	16.71	1	14.08
18	E-001-2	○	11:35	12:15	36.4	20.05	2	13.93
19	E-002	○	9:59	10:42	36.0	15.05	2	14.47
20	E-002-2	—	11:33	12:13	38.2	16.82	1	14.22
21	E-003	○	10:10	10:35	6.8	10.62	6	4.65
22	E-003-2	—	11:25	12:33	32.3	16.83	1	13.87
23	E-004	—	12:02	12:37	33.2	19.7	1	14.22
24	E-005	—	10:11	10:32	10.6	23.5	1	8.73
25	E-006	—	10:13	11:24	21.6	24.17	2	13.09
26	E-007	○	10:38	11:32	17.4	22.79	5	12.55
27	E-008	○	10:38	11:33	17.5	23.34	5	12.77
28	F-001	—	9:47	10:02	12.9	19.29	1	10.19
29	F-001-2	—	15:51	16:05	12.2	14.88	1	7.34
30	F-002	—	9:50	10:01	11.4	18.44	1	9.16
31	F-002-2	—	15:55	16:05	9.4	9.32	1	5.03
32	F-003	—	8:44	9:01	14.6	15.93	1	9.07
33	F-003-2	—	10:30	10:46	15.2	19.56	1	7.33
34	F-004	—	12:02	12:37	33.2	19.7	1	14.22
35	G-001	—	8:19	9:21	61.5	4.49	1	10.01
36	G-001-2	—	10:34	12:30	114.6	5.67	1	15.63
37	G-002	—	8:59	10:33	93.7	5.43	1	14.43
38	G-002-2	—	11:09	12:33	81.7	6.47	1	13.79
39	G-002-3	—	13:13	15:16	103.8	5.87	2	14.47
40	G-003*)	—	9:16	13:20	—	—	—	—
41	J-001	○	6:45	7:39	20.9	11.49	6	7.70
42	J-002	○	9:25	10:11	14.8	9.53	10	6.66

*) G-003 は計測器不良のため測定不良であったが、G-001 及び 002 と同様の水深での業務とのことであった。

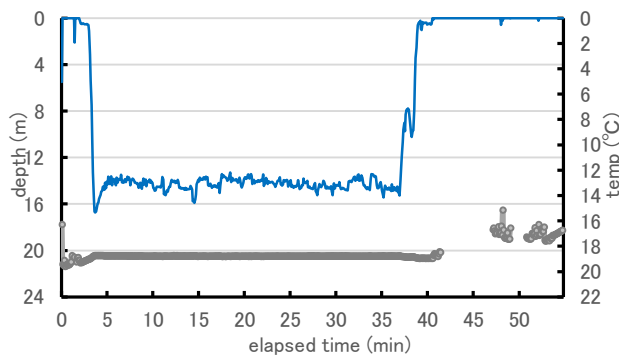


① 潜水平面プロファイル (B-007)

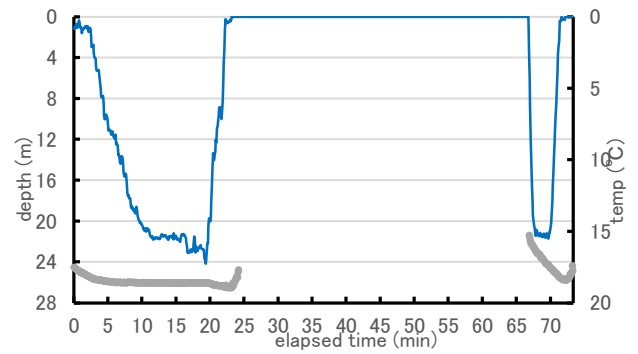


② 潜水平面プロファイル (C-004)

図-2. yo-yo 潜水平面プロファイルの一例

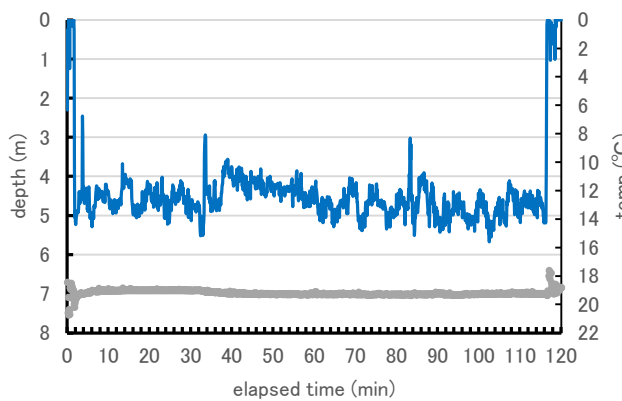


① 潜水平面プロファイル (E-001)
* 水深の変化が小さい ($\leq 3\text{m}$)

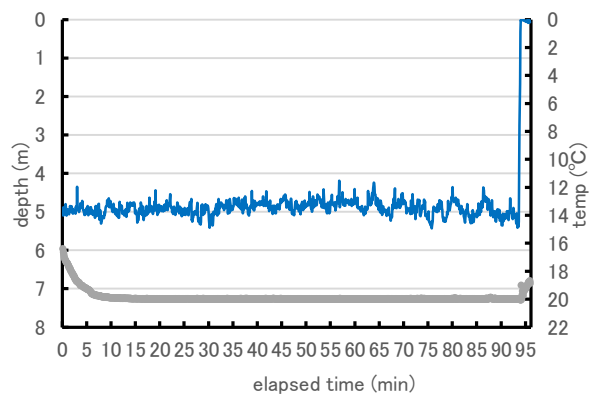


② 潜水平面プロファイル (E-005)
* 水面時間が長い (15 分 <)

図-3. 非 yo-yo 潜水平面プロファイルの一例



① 潜水平面プロファイル (G-001)



② 潜水平面プロファイル (G-002)

図-4. コントロール潜水平面プロファイルの一例

3-3. 微小膜小胞体 (MP)

微小膜小胞体 (MP) の測定結果を表 3 に示す。表中「pre」は潜水業務前、「post」は潜水業務後の測定値を、また「post/pre」は潜水前後における測定値の変化量を示す。MP 値 (count/ μl) は CD144+/CD42b- 群で pre : 182.35 ± 98.68 (範囲 : 73-416)、post : 194.35 ± 89.97 (範囲 : 99-396)、CD31+/AV+/CD42b- 群で pre : 2623.42 ± 2292.54 (範囲 : 172-8201)、post : 2831.90 ± 2761.86 (範囲 : 126-10872) であり、いずれの群でも post で高値の傾向にあったことから、潜水曝露による影響の程度を示している可能性がある。pre と post を比較すると CD144+/CD42b- 群では有意差を認めたが (図 5)、CD31+/AV+/CD42b- では有意差を認めなかった (図 6)。また、CD31+/AV+/CD42b- 群では測定値に大きなバラツキが認められた。CD31 は、Platelet Endothelial Cell Adhesion Molecule 1 (PECAM-1) とも呼ばれる、免疫グロブリンスーパーファミリーに属するタンパク質で、主に血管内皮細胞で発現が認められるが、一部の血球や血小板にも発現することが知られている。先行研究では、CD31 を用いた血管内皮 MP の測定では、血球や血小板由来の MP によるコンタミネーションを否定することができないとしているものもある¹⁵⁾。血小板由来の MP は高血圧症や糖尿病によって有意に増加することが報告されており、内皮細胞に特異的なマーカーとはなりえない可能性があることから、今回のバラツキにもそれらが影響している可能性がある。一方、CD144 は血管内皮細胞由来の MP にのみ発現すると

の報告があることから¹⁶⁾、我々の研究においても CD144+/CD42b- に反応する MP を血管内皮 MP (以下、EDMP と示す) として評価に用いることとする。

潜水業務後の EDMP を yo-yo 潜水群とコントロール群で比較したところ、yo-yo 潜水群で有意に高かった (図 7)。潜水曝露の指標とした Q 値は、yo-yo 潜水群で 12.7 ± 5.3 、コントロール群で 13.7 ± 1.9 であり、これらの間に有意差を認めなかったことから (図 8)、EDMP 値の差は、潜水方法による影響が大きいと考えられる

EDMP の潜水前後の変化量に関し、yo-yo 潜水における潜水回数、潜水深度、滞底時間、水面時間 (surface interval) の関係を調べたが、いずれの要因とも相関を認めなかった (図 9-12)。

表-3. MP 測定値

no	ID	CD144+/CD42b-			CD31+/AV+/CD42b-		
		pre	post	post/pre	pre	post	post/pre
1	A-001	135	121	0.90	567	407	0.72
2	A-002	132	140	1.06	782	787	1.01
3	B-001	165	283	1.72	427	2415	5.66
5	B-003	140	359	2.56	172	1998	11.62
6	B-004	140	144	1.03	1612	2663	1.65
7	B-005	115	180	1.57	4743	942	0.20
8	B-006	123	138	1.12	920	126	0.14
9	B-007	147	137	0.93	2048	1239	0.60
10	B-008	107	226	2.11	874	1258	1.44
11	C-001	247	156	0.63	8201	6496	0.79
12	C-002	73	99	1.36	1699	2402	1.41
13	C-003	100	119	1.19	2801	1781	0.64
14	C-004	77	139	1.81	1390	1438	1.03
15	D-001	109	125	1.15	603	422	0.70
16	D-002	114	119	1.04	7522	10872	1.45
17	D-003	110	117	1.06	5385	4592	0.85
18	E-001	331	346	1.05	1612	4233	2.63
19	E-002	349	396	1.13	4710	5670	1.20
20	E-003	416	378	0.91	518	4794	9.25
21	E-004	372	271	0.73	927	1763	1.90
22	E-005	284	285	1.00	947	1487	1.57
23	E-006	390	275	0.71	3353	269	0.08
24	E-007	265	282	1.06	2862	2576	0.90
25	E-008	251	262	1.04	7370	10262	1.39
26	F-001	202	167	0.83	384	695	1.81
27	F-002	170	106	0.62	1577	526	0.33
28	F-003	133	106	0.80	1418	722	0.51
29	F-004	105	173	1.65	3094	2748	0.89
30	G-001	88	139	1.58	2131	7776	3.65
31	G-002	147	116	0.79	4640	2984	0.64
32	G-003	116	121	1.04	6192	1446	0.23

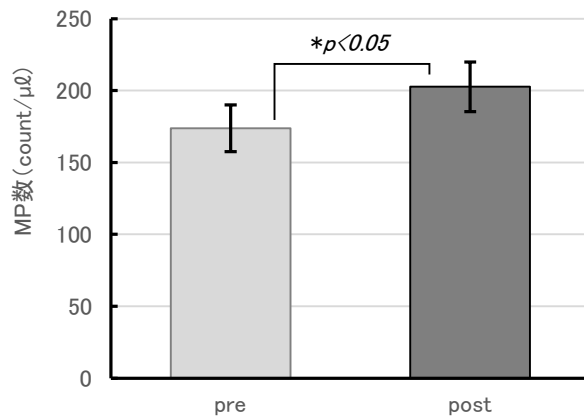


図-5. 潜水前後の MP (CD144+/CD42b-)

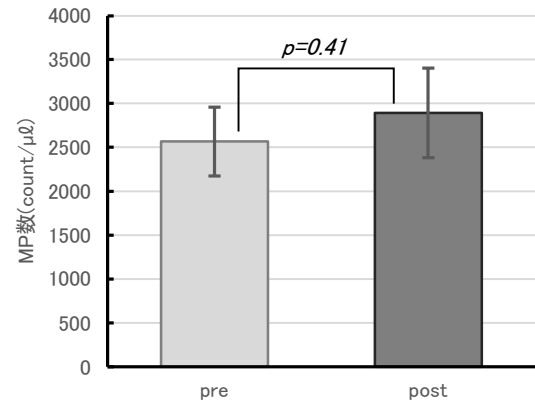


図-6. 潜水前後の MP (CD31+/AV+/CD42b-)

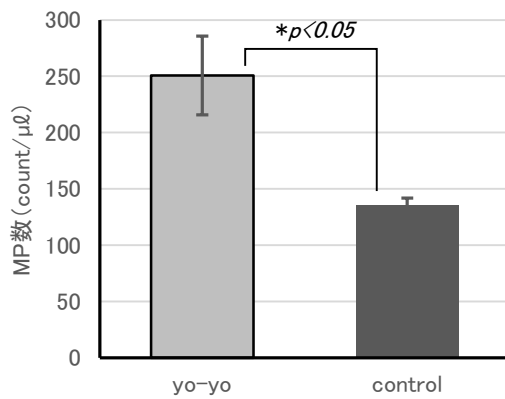


図-7. 潜水後の EDMP 値
(yo-yo vs. control)

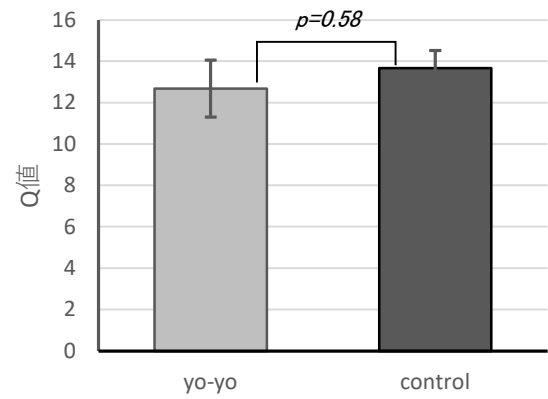


図-8. 曝露指数 Q 値
(yo-yo vs. control)

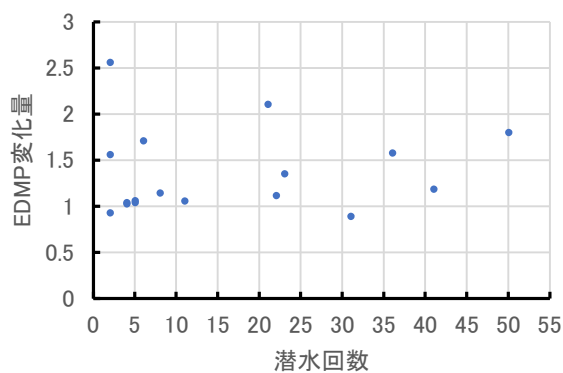


図-9. yo-yo 潜水回数と EDMP
変化量(post/pre)

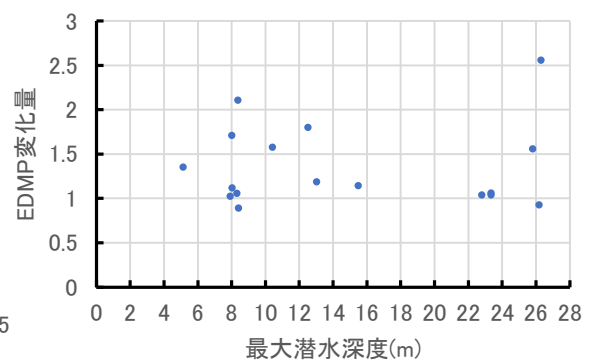


図-10. yo-yo 潜水の最大潜水深度と
EDMP 変化量(post/pre)

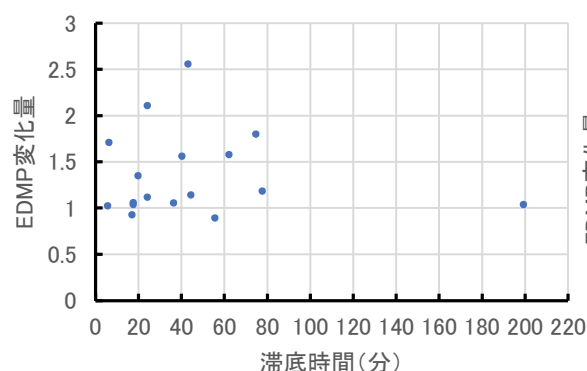


図-11. yo-yo 潜水の滞底時間と
EDPM 変化量(post/pre)

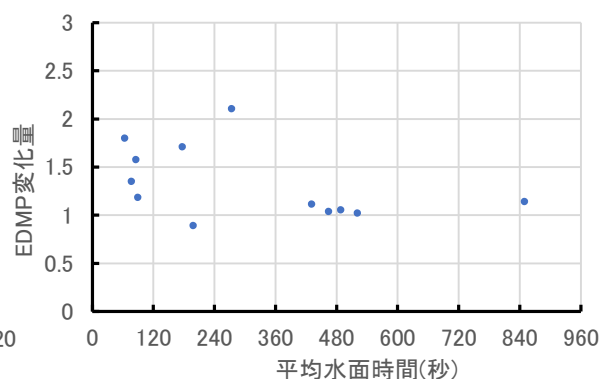


図-12. yo-yo 潜水の平均水面時間と
EDPM 変化量(post/pre)

3-4. 不活性ガス気泡検知

超音波ドップラー法による不活性ガス気泡の調査結果を表 4 に示す。気泡調査は潜水終了後 30 分、60 分、90 分の 3 回実施し、それぞれ安静時 (rest) と深い膝屈伸を伴う運動時 (exerc) に測定を実施した。気泡は 31 名の被験者中 7 名 (7/31, 22.6%) から検知した。これらのうち、yo-yo 潜水が関係したものは 2 例であった。検知された気泡等級はいずれも等級 1 であり、気泡調査結果からは、今回の潜水業務における潜水ストレスは軽～中等度であると評価できる。

3-5. VAS 値

VAS 値の測定結果を表 5 に示す。VAS 値の計測は 150mm ノギス (最小読取值: 0.05mm) を用いて行い、確認のため計測は 3 回実施した。表に示す「労作強度」は、VAS 調査実施後の被験者に、当日の作業について聞き取りした結果である。表中に「普通」とあるのは、当該潜水業務従事者が所属する事業所において、日常的に従事する業務との比較を示した相対的なも

ので、必ずしも客観的に中等度の労作強度を示すものではない。すなわち、当該事業所で常時行われている業務と同等の負荷であれば「普通」、いつもより軽ければ「軽い」、いつもより負荷が大きいと感じれば「やや重い」もしくは「重作業」となる。回答の内訳を図 13 に示す。調査した 31 例のうち、「軽い」は 3 例 (9.7%)、「普通」は 21 例 (67.7%)、「やや重い」と「重作業」は 7 例 (22.6%) であることから、今回の調査結果は日常的な業務の状態を示していると考えられる。調査の際、重激作業の有無を尋ねたところ、全ての被験者から「有り」との回答を得た。その際の負荷は、通常時の 1.5～2 倍であり、年に数回ほどで、期間は 1 回あたり数日から 1～2 週間程度となる。特に出荷量が多い時期が該当するが、近年では大型の台風や赤潮等が発生した際にも、その復旧のため重激な作業が必要となるとのことであった。

表-4. 超音波ドップラー気泡検知結果(気泡等級)

no	ID	30 min		60 min		90 min		max
		rest	exerc	rest	exerc	rest	exerc	
1	A-001	0	0	0	0	0	0	0
2	A-002	0	0	0	0	0	0	0
3	B-001	0	0	0	0	0	0	0
4	B-002	0	0	0	0	0	0	0
5	B-003	0	0	0	0	0	0	0
6	B-004	0	0	0	0	0	0	0
7	B-005	0	0	0	0	0	0	0
8	B-006	0	0	0	0	0	0	0
9	B-007	1	1	1	1	0	0	1
10	C-001	0	0	0	0	0	0	0
11	C-002	0	0	0	0	0	0	0
12	C-003	0	0	0	0	0	0	0
13	C-004	0	0	0	0	0	0	0
14	D-001	0	1	0	1	0	0	1
15	D-002	0	0	0	0	0	0	0
16	D-003	0	0	0	0	0	0	0
17	E-001	0	0	1	1	0	1	1
18	E-002	0	0	0	0	0	0	0
19	E-003	0	0	0	1	0	0	1
20	E-004	0	0	0	0	0	0	0
21	E-005	0	0	0	0	0	0	0
22	E-006	0	0	0	0	0	0	0
23	E-007	0	0	0	0	0	0	0
24	E-008	0	0	0	0	0	0	0
25	F-001	0	0	0	0	—	—	0
26	F-002	0	0	0	0	—	—	0
27	F-003	0	0	0	0	1	0	1
28	F-004	0	0	0	0	1	0	1
29	G-001	1	0	0	0	0	0	1
30	G-002	0	0	0	0	0	0	0
31	G-003	0	0	0	0	—	—	0

表-5. VAS 測定結果

no	ID	VAS 値	労作強度	no	ID	VAS 値	労作強度
1	A-001	53	普通	17	E-001	58.9	重作業
2	A-002	54.9	普通	18	E-002	53.4	普通
3	B-001	32.6	軽い	19	E-003	41	普通
4	B-002	40.5	普通	20	E-004	30.1	普通
5	B-003	42.6	普通	21	E-005	32.1	軽い
6	B-004	47.5	普通	22	E-006	34.1	普通
7	B-005	57.9	普通	23	E-007	32.8	普通
8	B-006	63.6	やや重い	24	E-008	38.1	普通
9	B-007	36.8	軽い	25	F-001	39.1	普通
10	C-001	21.3	普通	26	F-002	55.7	やや重い
11	C-002	29	普通	27	F-003	60.2	やや重い
12	C-003	49.8	普通	28	F-004	47	普通
13	C-004	47.3	普通	29	G-001	52.3	やや重い
14	D-001	42.2	やや重い	30	G-002	50.2	普通
15	D-002	51	やや重い	31	G-003	48.5	普通
16	D-003	56.3	普通				

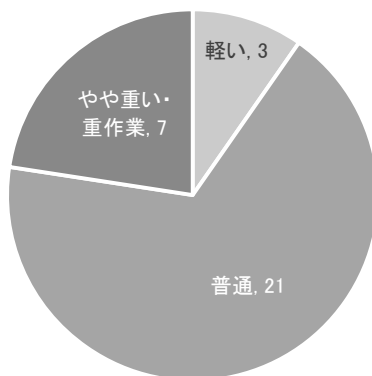


図-13. 自覚的労作強度の回答

3-6. 尿および唾液の調査

告書にて明らかにする。

現地調査が3月にまで及び、またMPの評価を優先したため、尿および唾液の分析は現在実施中である。結果は次年度報

4. 考察

今回の調査研究では、養殖場で行われることの多い yo-yo 潜水を主な対象とした。yo-yo 潜水は海女や潜水漁業者に多く見られ、重篤な減圧障害の報告も少なくないことから、リスクの高い潜水と認識されている。しかしながら、そのリスク要因や制御方法も明らかになっていない。我々は yo-yo 潜水におけるリスク要因とその程度を明らかにするべく、養殖場での現地調査を実施した。リスク評価方法として、従来からの不活性ガス気泡検知に加え、血管内皮由来の微小膜胞体 (microparticle: MP) の産生量を指標として用いた。また、養殖場での潜水業務がどのように行われているのかを知るために、潜水プロフィールについても調査を行った。これらの調査結果について以下のように考察する。

4-1. 被験者

今回の調査研究に参加した被験者の平均年齢は 33 歳であった。我々は令和 2 年度に潜水工事従事者並びにダイビングインストラクターを対象としてアンケート調査を実施したが、潜水工事従事者は 50 代が多く、またダイビングインストラクターでは 40 代が中心であった¹⁶⁾。これらと比較すれば、被験者の年齢層は若い傾向にあった。一方漁業や農業などの第一次産業では労働者の高齢化と後継者不足が以前より指摘されており、今回の被験者の年齢層とは差異がある。潜水業務における減圧障害のリスクには、個人差や体調が影響するが、一般的には高齢者ほどリスクが高いと考えられている。被験

者の年齢層が、養殖場における潜水業務従事者のそれと乖離している場合、調査研究の結果に影響を及ぼす可能性がある。そこで、本調査研究の妥当性を検討するために、この点について考察する。

今回現地調査を実施した養殖場は 8 事業場であり、その内個人経営の事業場が 1 カ所、漁業協同組合による事業場が 2 カ所であり、5 事業場は企業が経営母体となっていた。養殖業は、以前は家族経営を主体とした個人事業者によるものが多かったが、近年では企業を経営母体とする事業場が増加する傾向にある。農林水産省による 2018 年度漁業センサスによれば、ブリの養殖では、企業を母体とする大規模事業場は、経営体数比では全体の約 7% に過ぎないものの、販売金額では 37% を占めるに至っている。また、クロマグロ養殖では、大規模事業場は経営体数比で全体の約 9% に留まるものの、販売金額では全体の 56% を生み出している¹⁷⁾。このように、現在養殖業では構造変化が進んでおり、特に魚類養殖では大規模化と企業化の動きが活発である。給餌を必要とする養殖では、規模拡大が生産性向上に大きな意味を持ち、競争力確保のためには規模拡大が必須となっている。他方、これまで主な担い手であった中小の個人事業場は淘汰されつつあり、この傾向は今後とも継続することが予測されている¹⁸⁾。

今回調査を実施した企業経営の 5 事業場では、潜水業務従事者は全員その企業に属する社員であった。また、以前には潜水経験が無く、入社後に潜水土士の資格を取得して、業務に従事しているとのことであった。管理者に確認したところ、入社

した新人には、特に適正や体調等に問題がなければ、全員潜水土としての教育を実施しているとのことであった。このような人材育成を継続することで、事業規模拡大や作業量の変化に応じて、適宜潜水業務従事者を充足することができるように配慮している。潜水作業従事者にとっても、企業に属することで安定した収入を得ることができ、休日の取得や福利厚生充実など自身に有益な部分も多く、所謂 win-win の関係にあることから、今後もこの形態が継続すると思われる。

潜水工事の場合には、全国の工事現場に出張することを余儀なくされるうえ、従事する現場によってリスクが異なり、また工事日程に合わせた潜水作業の実施が求められる。またダイビングインストラクターは、仕事量に大きな季節変動があることから、収入が安定しないという経済的なデメリットがある。

企業を母体とする養殖場での潜水業務には、前述のようなデメリットが少ないことから、今後も若年者が参画することが予想される。このようなことから、今回の被験者は、現在の養殖業における潜水業務事業者の実態を示していると考えられる。

4-2. 潜水プロフィール

今回の調査では、34 名を被験者として調査を行い、6 名が複数回の潜水を行ったため合計 43 回の潜水プロフィールを調査記録した。これらのうち、22 回が yo-yo 潜水、15 回が非 yo-yo 潜水、6 回は潜水作業深度に変化がないことからコントロール潜水とした。

養殖場によって設置された生け簀の大きさや設置数、構造、配置、保守点検方法等が異なるため、必然的に潜水作業の詳細も異なることになる。また、養殖魚の種類や水揚げ方法によっても差異が生じる。今回の現地調査においても、yo-yo 潜水と非 yo-yo 潜水が混在していた養殖場があった。令和 5 年度に実施したアンケート調査の結果によれば、主な潜水方式として yo-yo 潜水が 42.5%、矩形（箱型）潜水が 43.7%とほぼ 2 分されており、今回の調査結果もそれを裏付けるものとなった。養殖場における潜水業務の実態を把握するためには、さらに多くの現地調査を実施し、データを収集する必要がある。

養殖場における yo-yo 潜水は、主に斃死魚の回収と養殖魚水揚げの際に行われることが多い。これらの作業には季節的な変動が存在する。すなわち斃死魚の発生は海水温が上昇する夏季に増加する傾向があり、また水揚げ作業は出荷量が多くなる年末年始時に増加する。これは、潜水業務の繁忙期が概ね 6 月から 10 月と 12 月という令和 5 年度のアンケート調査結果とも符合する。今回の調査は、この繁忙期外の時期に実施したものであり、潜水業務による負荷が大きくなることが予想される繁忙期についても、今後調査を検討する予定である。ただし、繁忙期は養殖場側も業務量が増大することから、そのような状況下で円滑に調査を実施するためには、事前の調整に加え調査方法自体にも工夫が必要である。

4-3. 微小膜胞体（MP）による減圧症リスクの評価

今回我々は活性化した細胞から産生される微小膜胞体 (MP) が減圧症リスクのマーカーとして活用できるか検討を行った。MP は 1967 年に Wolf によって血小板から産生される「血小板ダスト」として初めて報告され¹⁹⁾、その後の研究によって単球、白血球、赤血球などの循環血球や内皮細胞からも産生されることが明らかとなった。MP は活性化あるいは障害、アポトーシスを起こした際にそれぞれの細胞から産生、放出される 0.1~1.5 μm の細胞膜に由来する小胞体で、正常血漿では低濃度で存在し、血小板活性化や直接的な血管内皮損傷などによって増加する。また、MP は、凝固促進要因や催炎症性作用など多様な効果を有しており、その放出様式からある種の情報伝達作用もあると考えられている¹⁰⁾。また、MP 内に二酸化窒素分子が確認されたことから、MP が気泡形成の基となるガス核 (gas nuclei) として作用する可能性も指摘されている²⁰⁾。

潜水などの高気圧曝露によって MP 産生量が増加することが、チャンバーを用いた模擬潜水や実海域での潜水によって確認されている。以前は、減圧時に形成された不活性ガス気泡の機械的な作用によって血管内皮が刺激され、MP が産生されと考えられてきた²¹⁾。しかしながら、近年の研究では、加圧中に MP の増加が認められたことや圧曝露の程度が低く、不活性ガス気泡の形成に乏しい水深 5m 程度の潜水後にも MP の増加が確認されている⁷⁾。MP の産生は主に好中球の活性化と関連があることから、潜水曝露に伴う酸化ストレスが影響していると考えられている。yo-yo 潜水では、曝露量が大きくなく、酸

化ストレスの影響も小さいと考えられることから、他の影響が考えられる。潜水して身体に水圧がかかると、潜水反射により末梢血管が収縮し、血流の再分配 (blood shift) されることが知られている。今回の MP 増加も、この潜水反射に類似した圧力刺激による影響が考えられる。

我々が調査した結果においても、これらの先行研究と同様の結果を得た。今回の調査では、全ての潜水を対象とした潜水前後の比較で、潜水後に MP の有意な増加を認めた。これは、潜水曝露による影響を示していると考えられる。潜水深度や潜水時間等は潜水毎にさまざまであったことから、これらの評価には曝露指数 (exposure index) を用いた。これは、潜水深度 (曝露圧力) と潜水時間 (曝露時間) から得られる指数値であり、Q 値として示される。Q 値が高いほど曝露の影響が大きいとされており、値が 20 を超えるような場合は減圧症のリスクが非常に高く、20~15 はリスク高、15~10 は中等度のリスク、10 以下はリスクは小さいとされている。今回調査した潜水のうち yo-yo 潜水における Q 値の平均は 12.7 であった。一方コントロール潜水では 14.6 であり、Q 値の観点からは yo-yo 潜水の方が潜水曝露の程度は低いと考えられる。しかしながら、潜水後の MP 数は、コントロール潜水に比べ yo-yo 潜水で有意に高かった。これは、Q 値の観点とは異なる結果である。yo-yo 潜水がコントロール潜水と異なる点は、潜降浮上が高頻度で繰り返し行われるという点であり、yo-yo 潜水における減圧症リスクを評価する際には、この点を考慮する必要があることを示唆してい

る。

yo-yo 潜水を特徴づける繰り返し潜水回数と潜水後の MP 変化量には相関が認められなかった。同様に、潜水深度、滞底時間 (bottom time)、平均水面時間 (surface interval) と MP 変化量に相関を認めなかった。この結果にはいくつかの要因が考えられる。まず、高い潜水ストレスを生じるような潜水を行っていなかった可能性がある。被験者の多くは養殖事業場に努める社員潜水者であり、事業者の定める手順に従うことが求められる。したがって、事業場が定めた安全方策が有効に機能していたことが考えられた。また、被験者として研究に参加することで自分の潜水がモニターされることを知り、より慎重になったかもしれない。今回の調査で被験者が行った一連の yo-yo 潜水シリーズは 1 回であり、例えば午前と午後に分けて 2 回以上の yo-yo 潜水シリーズを行った例はなかった。潜水業務後に行った疲労感の調査では、繁忙期には今回のような通常期に比べ、作業量や作業時間が 2 倍になるとの意見があった。その場合には複数回の yo-yo 潜水シリーズが行われることが考えられ、それによる潜水ストレスは過大となる可能性がある。養殖場における潜水業務の減圧症リスクを評価するためには、繁忙期を含め更なる調査が必要である。

今回の調査では MP の値にバラツキが認められ、潜水前よりも潜水後に低下した例もあった。調査は各事業場で行われている潜水業務を対象に実施しており、調査開始前の被験者の行動に制限等は設けなかった。そのため、調査日までにどの程

度潜水業務に従事したのか、労作強度はどの程度であったかは管理できておらず、それらにより蓄積した疲労や潜水曝露等のストレスフルな事象が MP の産生に影響している可能性がある。また、被験者の健康状態は問診によって確認したのみであり、MP の産生に強く影響すると考えられている動脈硬化症や糖尿病、高血圧等の状態に関して十分に把握できていない。血液循環中の MP は、これらの疾患状態によってその数が増加することが報告されている。

産生された MP の除去は貪食細胞によることが *in vivo* で確認されている²²⁾。MP 除去のメカニズムは完全に解明されたわけではないが、潜水曝露による刺激によって好中球やマクロファージが活性化し、これらが MP 数の減少メカニズムの一部である可能性があり、今回の MP のバラツキにも関与していると考えられる。

4-4. 不活性ガス気泡調査による減圧症ストレスの評価

主に静脈血流中に認められる不活性ガス気泡は、高気圧曝露から大気圧への減圧時に特異的に生じる事象であり、減圧症を誘引する病態生理学的反応に役割を果たすと考えられている。今回の調査では、32 例中 7 例で気泡が検知された。いずれも等級 1 の軽度なものであり、MP 変化量との相関は認められなかった。

減圧後に生じる不活性ガス気泡と MP の関係については、組織内から循環内に放出された気泡が血管内皮を刺激することによって MP が産生されるという考えの他に、MP は気泡形成の基となるガス核とし

て作用するという意見もある。気泡形成が先か、MP の産生が先か、あるいはこれらが並行して起こるのかはまだ明らかではない。しかしながら、今回の調査研究結果からは、ヘンリーの法則に従って不活性ガスを取り込み、体内組織から放出するという従来の視点に加え、高気圧曝露中やそこからの減圧の過程で発生する生理学的な事象についても考慮する可能性があること示唆していると思われる。

我々は、気泡と自覚的疲労感には何らかの関係があることを示唆したが²³⁾、今回の調査においても、気泡が検知された7例のうち5例では当日の労作強度に関する問診で「やや重い」もしくは「重作業」と回答しており、自覚的疲労感が気泡及び減圧症リスクの簡便な指標として利用できる可能性がある。

5. まとめ

今回の調査研究は、我々の知る限り養殖場での業務に従事する潜水業務従事者を対象とした我が国で初めての本格的な労働衛生研究である。また、yo-yo 潜水のリスク評価に微小膜胞体 (microparticle: MP) の産生量を用いた最初の研究でもある。減圧症は潜水に特有の疾病であり、その原因は減圧後の体内で形成された不活性ガス気泡による血流の塞栓によるものと考えられてきた。そのため、減圧症のリスク評価には、超音波ドップラー法等で検知された静脈内不活性ガス気泡が用いられてきた。しかしながら、不活性ガス気泡の減圧症発症に対する感度と特異性に関する理解は不十分であり、気泡が検知されなかった、ある

いは気泡等級の低い潜水者が減圧症を発症する例や、高い気泡等級ながら潜水者は無症状であったという報告が数多くある。

組織や血流内で形成される不活性ガス気泡は、潜水中に潜水者の体内に溶解蓄積した不活性ガス量によると考えられている。yo-yo 潜水は、高頻度に潜降浮上を繰り返すものの、毎回の潜水は深度が浅くまた短時間の潜水であることから、不活性ガスが過大に溶解蓄積することは考えにくく、気泡検知によるリスク評価は困難であると思われる。したがって、不活性ガス気泡に代わり、yo-yo 潜水による曝露の影響を評価できるバイオマーカーが明らかになれば、リスク予測や環境誘発性障害の診断にも有用であると考えられる。また、これらは、養殖場や他の潜水業務の現場における労働衛生環境モニタリングにも利用できる可能性がある。

食糧生産を目的とした水産養殖は世界中で盛んに行われており、現在では全漁業生産量の50%を占めている。効率的に養殖を行うためには、斃死魚を減らし、養殖魚の成長と健康を維持することが必要となる。そのための重要な業務の一つが潜水業務である。養殖産業の成長に伴い、潜水業務量も増大する傾向にある。海外では養殖における潜水業務の危険性について様々な検討が行われているが、我が国では今までそのような取り組みは行われてこなかった。養殖場で多く見られるyo-yo 潜水については知見が少なく、どのようなリスクがあり、どのように安全を確保するのかも明らかではない。実際のフィールドで行われる潜水業務は、実験

や模擬潜水では再現することができない部分があることから、今回のような養殖場の現場での現地調査は非常に大きな意味を持つと考えられる。今後さらに調査研究を進めることで、潜水業務全般の安全性向上に寄与できるものとする。

参考文献

- 1) Westin AA, Asvall J, Idrovo G, Denoble P, Brubakk AO. Diving behaviour and decompression sickness among Galapagos underwater harvesters. *Undersea Hyperb Med.* 2005;32:175-184
- 2) Barratt DM, Van Meter K. Decompression sickness in Miskito Indian lobster divers: review of 229 cases. *Aviat Space Environ Med.* 2004;75:350-353
- 3) 合志清隆, Wong RM, 奥寺利男. 職業性素潜りダイバー(あま)の中樞神経障害. *日職災医誌*, 2001;49:543-549
- 4) Douglas JDM, Milne AH. Decompression sickness in fish farm workers: a new occupational hazard. *BMJ.* 1991;302:1244-1245
- 5) Vann RD. Decompression Theory and Applications. In Bennet PB, Elliot DH, eds. *Physiology and Medicine of Diving*, 3rd ed. Best Publishing Company. San Pedro, CA. 1982, 352-382
- 6) Thom SR, Bennet M, Banham ND, Chin W, et al. Association of microparticles and neutrophil activation with decompression sickness. *J Appl Physiol.* 2015;119:427-434
- 7) Tohm SR, Milovanova TN, Bogush M, Bhopale VM, et al. Microparticle production, neutrophil activation, and intravascular bubbles following open-water SCUBA diving. *J Apply Physiol.* 2011;112:1268-1278
- 8) Brett KD, Nugent NZ, Fraser NK, et al. Microparticle and interleukin-1 β production with human simulated compressed air diving. *SCIENTIFIC REPORTS.* 2019.
- 9) Madden LA, Laden G. Endothelin microparticle in vascular disease and as a potential maker of decompression illness. *DHMJ.* 2007;37:156-161
- 10) 野崎俊光、杉山正悟、小川久雄. 血中血管内皮機能マーカー(血管内皮細胞由来微小粒子)を用いた心血管疾患の病態評価. *日本循環器学会専門医誌.* 2012; 20: 78-86
- 11) Hempleman HV. History of decompression procedures. In: Bennett PB, Elliott DH, ed. *Physiology and Medicine of Diving*, 4th ed. London; W.B. Saunders; 1993, 361-375
- 12) 池田知純、芦田廣. 単一組織拡散モデルによる減圧理論の展開. *日本高気圧環境医学会雑誌* 2000;35:131-146
- 13) Grover I, Reed W, Neuman T. The SANDHOG criteria and its validation for the diagnosis of DCS arising from bounce diving. *Undersea Hyperb Med.* 2007;34:199-210
- 14) 古賀英信. 血管内皮細胞障害特異的・定量的マーカーとしての VE カドヘリン要請血管内皮細胞由来微小粒子の同定と臨床的意義. 熊本大学大学院 Doctor's Thesis. 2006
- 15) Koga H, Sugiyama S, Kugiyama K, et al. Elevated levels of VE-cadherin-positive endothelial microparticles in patients with type 2 diabetes melitus and coronary artery disease. *J Am Coll Cardiol.* 2005;45:1622-1630

- 16) 望月徹、鈴木信哉、和田孝次郎、他.
潜水業務等における救急処置の実態につ
いてのアンケート調査. 労災疾病臨床研究;
潜水業務における現場で出来る応急対応に
関する研究令和 2 年度-3 年度総合研究報
告書 <https://www.mhlw.go.jp//content/001114956.pdf>
- 17) 第 6 巻海面漁業に関する統計. 漁業セ
ンサス 2018. 農林水産省. <https://www.maff.go.jp//tokei/census/ft/2018>
- 18) 佐野雅昭. 海面養殖業の現状と動向.
漁業経済研究. 2022;66:89-116
- 19) Wolf P. The nature and significance of
platelet products in human plasma. Br
Haematol. 1967; 13: 269-288
- 20) Thom SR, Yang M, Bhopale VM, et al.
Intra-microparticle nitrogen dioxide is a
bubble nucleation site leading to decompre-
ssion induced neutrophil activation and
vascular injury. J Appl Physiol. 2013;114:
550-558
- 21) Yu X, Xu J, Huang G, et al. Bubble-
Induced Endothelial Microparticles Promote
Endothelial Dysfunction. PLOS ONE. 2017
- 22) Distler JH, Akhmetshina A, Dees C, et
al. Induction of apoptosis in circulating
angiogenic cells by microparticles. Arthritis
Rheum. 2011;63:2067-2077
- 23) 望月徹. 減圧ストレスと疲労の関係. 日
本高気圧環境・潜水医学会雑誌. 2015;50:
71-79

研究成果の刊行に関する一覧表

書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の	書 籍 名	出版社名	出版地	出版年	ページ
	該当なし						

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
	該当なし				