

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（230401-01）

令和5年度～令和7年度 総合研究報告書

令和8年3月

研究代表者 望月 徹
東京慈恵会医科大学環境保健医学講座

目 次

I．総合研究報告

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A：養殖事業者を対象としたアンケート調査

-----	9
-------	---

資料1：アンケート調査票	----- 33
--------------	----------

III．研究B：水産養殖場における潜水業務の現地調査と減圧症リスクの分析

-----	39
-------	----

IV．研究C：yo-yo潜水用プロトコールの作成とその検証

-----	105
-------	-----

研究成果の刊行に関する一覧表	-----143
----------------	----------

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 (230401-01)

研究代表者 望月 徹
研究分担者 須賀万智、山内貴史、島崎崇史、森松嘉孝、石竹達也

1. 研究の目的及び概要

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士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。

数分程度の短時間潜水を短期間に繰り返して行う潜水方法は、頻繁に上下動作を繰り返す様が玩具の yo-yo (ヨーヨー) の動きに似ていることから yo-yo 潜水とも呼ばれている。この潜水方法は、海女などの素潜り潜水漁等で用いられてきたが、近年では主に水産養殖場での潜水作業等に利用されている。

水産養殖では、過剰な給餌による海域の富栄養化等の環境面への影響や養殖施設損傷による脱走養殖魚による海域生態系への影響などが懸念されることから、頻繁な養殖施設の点検が必要となる。また、死魚が発生した場合、その放置は他の養殖魚への感染源となるため、迅速な除去が求められている。これら一連の作業は、潜水土士による潜水作業が中心となっており、作業の特性上 yo-yo 潜水が用いられている。我々が2022年に実施した宮崎県内の水産養殖場での調査で、1回の作業で1～2分程度の潜水を短期間に20～30回行う yo-yo 潜水が用いられていることを確認している(図1)。

潜水に特有の障害である減圧症は、潜水中の不活性ガス溶解蓄積によるものと考えられおり、その蓄積量は、潜水深度

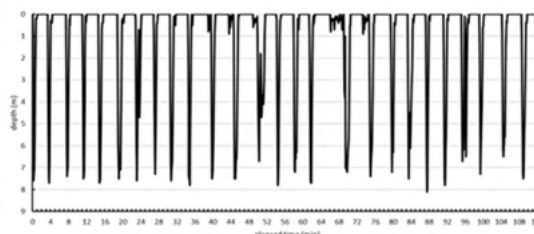


図1.水産養殖場での潜水プロファイルの一例

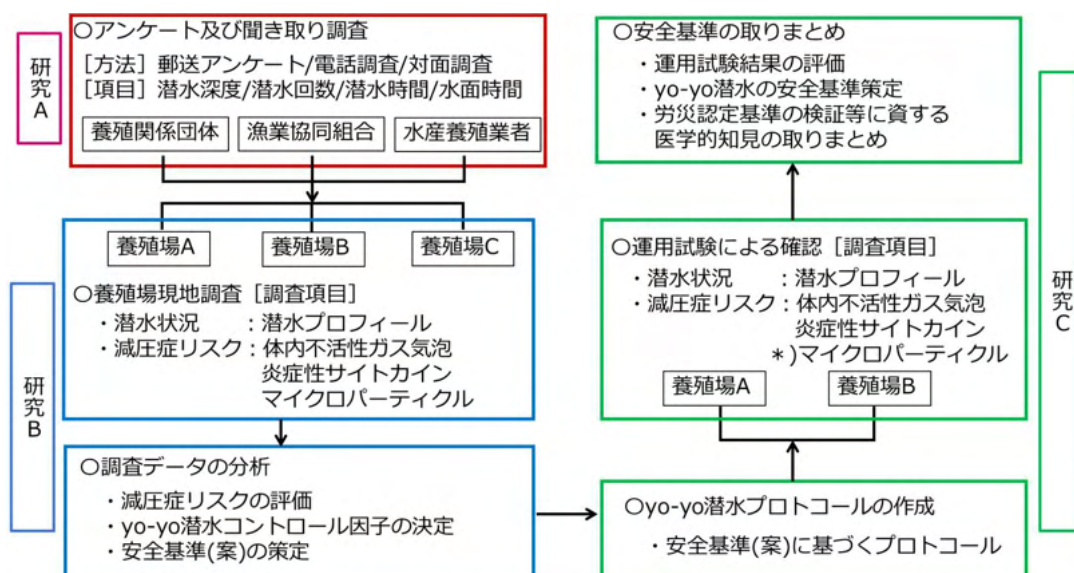
と時間によって決定される。したがって、従来の考えによれば、yo-yo 潜水における単回の潜水は極短時間であることから、不活性ガス蓄積量は僅かであり、浮上時に減圧停止を必要としない(無減圧限界内)ため、回数を重ねても安全に問題を生じないことになる。同様の潜水作業は、諸外国の養殖場でも行われているが、特に問題はないとする報告がある一方で^{1,2)}、重篤な中枢神経系の減圧症事例も報告されている^{3,4)}。また、動物実験においても、yo-yo 潜水は中枢神経系の障害を伴う重篤な減圧症を引き起こす可能性があることが示唆されており⁵⁾、yo-yo 潜水の安全に関する評価は定まっていない。しかしながら、重篤な減圧症は後遺症の可能性が高く、被災者の社会復帰やQOLに大きく影響することから、yo-yo 潜水による減圧症リスクを評価し、養殖場での潜水作業を安全に実施するための基準の策定が必要である。

我が国には、養殖場での潜水作業に関する研究報告はほとんどなく、その実態についても不明な部分が多い。今後拡大が見込まれる我が国の水産養殖において、その要となる作業に従事する潜水土士の安全性の確保は不可欠である。そこで、現在水産養殖の現場で行われている潜水作業の実態を調査し、そこに潜在する不安定要因を特定、低減することによ

って、水産養殖での潜水作業に適した安全で効率的な潜水方法を構築することが必要であり、これらを実現するために、3年計画で調査研究を実施した。

研究の概要を図2に示す。研究初年次（研究A）は、水産養殖場における潜水作業の全体像を明らかにすることを目的とした。国内で海面養殖に携わる漁業協同組合並びに事業者等を調査対象とし、郵送アンケートもしくは電話等で聞き取り調査を実施し、水産養殖場における潜水作業の実態について把握を試みた。研究2年次（研究B）は、アンケート調査結果から調査対象とする養殖場を選定し、現場での作業に従事する潜水士から潜水プロフィール並びに減圧症リスクに関するデータを採取した。減圧症リスクの指標として血中不活性ガス気泡、高圧ばく露によって生ずる生化学的反応を調査した。これらの結果を総合的に検討し、減圧症リスクの程度を評価した。研究3年次（研究C）は、調査によって得られた減圧症発症リスク評価結果と潜水

プロフィールから、yo-yo潜水におけるコントロール要因（浮上速度、潜水回数、潜水時間、水面休息時間等）を確定し、それらを調整することで、減圧症リスクが許容範囲内となるような安全基準の策定を試みた。この基準を用いて潜水プロトコルを作成し、実際の作業現場での運によって得られたデータを評価することで、安全基準の有効性を確認するとともに、労災認定基準の検証等に資する医学的知見とする。



2. 研究A：養殖事業者を対象としたアンケート及び聞き取り調査

【背景】短時間の潜水を高頻度で繰り返し行う yo-yo 潜水は、海士等による素潜り漁などで多く行われている。高頻度で繰り返し行われるものの、潜水時間は短時間であり、また潜水深度も比較的浅いことから減圧症リスクが軽視されがちであるが、実際には、重篤な減圧症例が多く報告されていることから、リスクの高い潜水と考えられている。素潜り漁以外にも水産養殖場での潜水業務やダイビングインストラクターの業務、水中映像撮影業務などで yo-yo 潜水が用いられているが、その実態は明らかではない。そこで我々は、yo-yo 潜水の実態を知るために、潜水業務量が比較的多い水産養殖事業者を対象としてアンケート調査を実施した。

【方法】養殖場における潜水業務の全体像を把握するために、養殖事業者並びに潜水管理者を対象としてアンケート調査票を作成した。主な調査項目は、1) 回答者属性（担当業務、業務経験年数、所属組織形態等）、2) 事業所属性（潜水作業数、養殖魚種等）、3) 潜水業務属性（実施潜水パターン、業務日数、業務時間等）とした。回答は選択式とし、必要に応じて一部記述式を追加した。回答に要する時間は10分程度とした。調査票の配布回収には郵送方式を用いた。調査結果はPCに入力して単純集計とクロス集計を行い、有意差検定はカイ二乗検定を用いて評価を実施した。

【結果】調査対象者を特定するために、研究者間ネットワークや養殖関連の展示会等に参加するとともに、インターネット検索等を利用して養殖業者の情報を収集した。これらの結果、養殖関連の漁業協同組合として115団体、養殖事業者として228事業所合計343団体を調査対象とした。アンケート調査は2024年2月から3月に実施し、112(32.3%)から回答を得た。

回答のうち、92(92/112 82.1%)から潜水業務を実施しているとの回答を得た(図3)。そこで、これらを対象に結果分析を行った。潜水業務従事者は5人以下が63%と最も多かったが、21人以上とするものも5.4%あった(図4)。潜水業務における潜水パターンは、箱型が43.7%、yo-yo型が44.8%とほぼ同程度であった(図5)。業務日数や時間は時期によって異なるが、繁忙期では、業務日数は16-20日との回答が最も多く(19.6%)、次いで6-10日が多かった(17.4%)。ほぼ毎日に相当する26日以上との回答も12%あった。潜水業務時間は、1時間以上2時間未満が最も多く(27.2%)、次いで1時間未満が多かった(20.7%)。5時間以上との回答も7.6%あった。

【考察】今回の調査結果から、水産養殖場の多くでは潜水業務が行われていることが明らかとなった。養殖場での潜水業務の主な目的は、斃死魚の回収と生簀網の保守点検であり、そのため生簀数が多いほど潜水業務量も増加することになる。今回の調査においても yo-yo 潜水を用いる事業者で潜水業務者数が多い傾向にあった。また、それらでは潜水業務日数や業務時間も多かった。農林水産省の2018年漁業センサスによれば、生簀数が100を超える大規模養殖業者は全体の5%に留まるものの、生産量は全体の約40%を占めるため就業者数も多く、また水産物の安定供給のため養殖場の集約化・大規模化が進められていることから、それにかかわる潜水従事者も増加することが予想される。yo-yo 潜水の安全性に関する知見は多くないため、労働災害防止の観点から、それを多用する養殖場での潜水業務に関しては、今後リスク評価と安全対策を検討する必要がある。

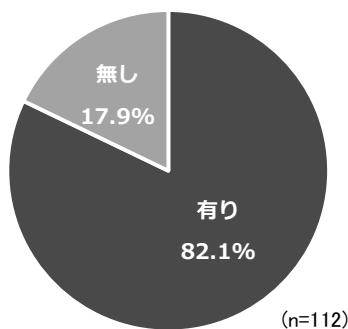


図-3. 潜水作業の有無

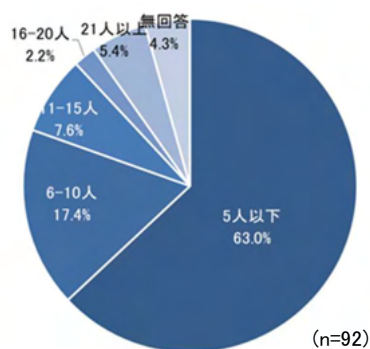


図-4. 所属する潜水業務従事者数

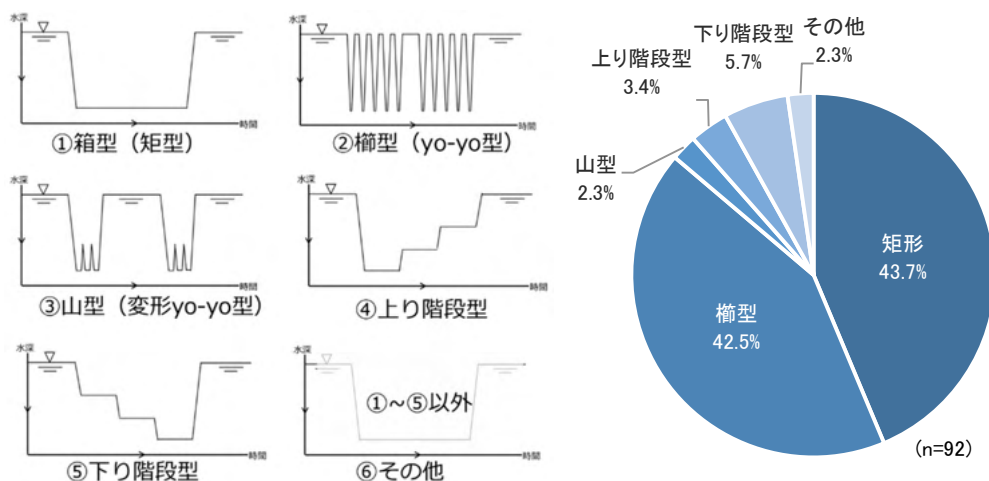


図-5. 水産養殖場における潜水パターン

3. 研究B：水産養殖場での現地調査

【目的】研究Aによるアンケート調査の結果、水産養殖場では年間を通じて潜水業務が行われており、yo-yo 潜水を用いた業務が比較的多いことが分かった。しかしながら、アンケート調査結果からは、潜水深度や潜水時間、yo-yo 潜水回数などの詳細については知ることができなかった。また、行われている yo-yo 潜水業務における減圧症リスクについても明らかにする必要があった。水産養殖場での潜水業務に関する先行研究や知見の蓄積もない

ことから、実際の水産養殖場での潜水業務の現場に赴き、潜水業務の実態とそれに伴う減圧症リスクについて評価検討することとした。

【方法】アンケート調査に回答した水産養殖場事業者に現地調査への協力を依頼し、応諾を得られた養殖場を調査対象として。調査に際しては、どのような潜水が行われているのかを知るために、潜水業務従事者に小型の潜水記録計を携行させて潜水プロフィールを記録した。我々は、

潜水に伴う減圧症リスク増加の機序として①頻繁な潜降浮上による曝露圧力、呼吸ガス分圧等の変化により刺激された血管内皮細胞から微小な細胞片（微小膜胞体 Micro-particle: MP）が放出され、②それを核として不活性ガス気泡が形成され、③それらの気泡が組織や血管内皮を機械的に傷害すること炎症が生じ、これら一連の結果として減圧症が発症するという仮説を立てた。この仮説を検証するために、潜水前後に唾液と血液検体を採取し、それらから得られた微小膜胞体（MP）と炎症性サイトカイン発現量を評価した。また、潜水後に前胸部超音波ドップラー体内気泡検知を行い、体内に形成された不活性ガス気泡の程度を評価した。

【結果】調査は令和6年10月から令和7年11月に実施し、延べ12カ所の養殖場において、書面によって調査参加への意思を確認した52名の潜水業務従事者を被験者とした。調査期間中には都合79回の潜水業務が行われ、内46回でyo-yo潜水が、29回で箱型潜水が、4回で階段型潜水が行われた。全ての被験者で減圧症の症状は認められなかった。yo-yo潜水とそれ以外の潜水（非yo-yo潜水）を比較すると、潜水深度はyo-yo潜水で 16.2 ± 7.2 m（平均 $\pm$ SD）、潜水時間は 75.5 ± 57.1 分であった。非yo-yo潜水のそれらは、 17.7 ± 6.2 m、 33.2 ± 31.7 分で、潜水深度はあまり変わらないものの、潜水時間はyo-yo潜水で長かった（表1）。潜水前後におけるMP発現量の変化は、非yo-yo潜水に比べyo-yo潜水で統計的に有意に高く（図6）、炎症性サイトカイン（IL-1 β ）発現量に関してもyo-yo潜水で高かった（図7）。体内不活性ガス気泡は調査対象とした51名中14名（27.5%）で検知された（図8）。14名中8名（57.1%）はyo-yo潜水を行っていた。また、14名中9名（64.3%）は潜水業務を1日に複数回行う繰り返し潜水（repetitive-diving）を行っていた。

【考察】今回の調査においてリスクの指標として用いたMP及び炎症性サイトカイン発現量は、潜水前に比べ潜水後で高値を示した。これらは、潜水曝露の影響によるものと考えられることから、我々の仮説はほぼ正しいものと評価できる。調査対象とした被験者に潜水後の異常を訴えたものはなく、減圧症の症状も認められなかった。また、不活性ガス気泡が検知されて割合も27.5%と半数以下であった。潜水後に実施したVAS法による自覚的疲労感の調査では、平均VAS値は48mmと比較的低く、また多くの被験者が「普通」の潜水業務であったとしている。これらのことから、今回調査を実施した潜水業務は、水産養殖の現場において通常の範囲内で行われているものであり、それらにおける減圧症発症リスクは概ね許容範囲内であると考えられる。

今回の調査では、減圧症リスクの指標としたMP及び炎症性サイトカイン発現量は非yo-yo潜水に比べyo-yo潜水で高かったことから、yo-yo潜水にはリスクが潜在している可能性がある。また、MP発現量はyo-yo潜水回数との間に相関が認められたことから、これにも留意する必要がある。yo-yo潜水では潜水時間が長くなる傾向が認められたが、yo-yo潜水回数は潜水業務時間に関係していることから、潜水時間を十分に管理することも必要であると思われた。

今回の調査結果から、yo-yo潜水における減圧症リスクの閾値を明確にすることは困難であるが、得られたデータからは、潜水業務時間で2時間程度、yo-yo潜水回数で40回程度が目安になると考えられる。これらを大幅に超過するような場合は、減圧症リスクに対して何らかの予防対策を講じる必要がある。また、yo-yo潜水を繰返し行うような場合にも、減圧症リスクが増大する可能性があるため注が必要である。

表-1. 非 yo-yo 潜水と yo-yo 潜水の比較

	非 yo-yo 潜水	yo-yo 潜水
潜水深度 (m)	17.7±6.2m (4.5-26.7m)	16.2±7.2m (5.1-26.8m)
潜水時間 (分)	33.2±31.7 分 (5-123 分)	75.5±57.1 分 (15-233 分)
ばく露指数 (Q)	13.5±4.8 (6.1-23.4)	20.6±8.1 (7.1-46.9)

* 数値: 平均±SD(最小-最大値)

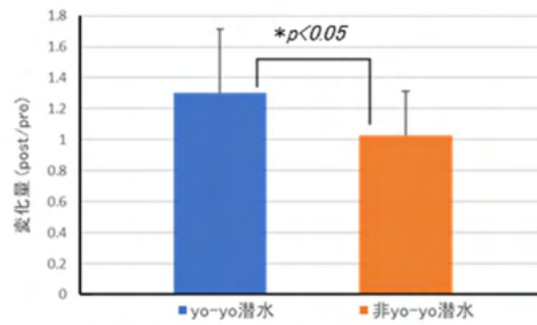


図-6. 微小膜胞体(MP)放出量の比較

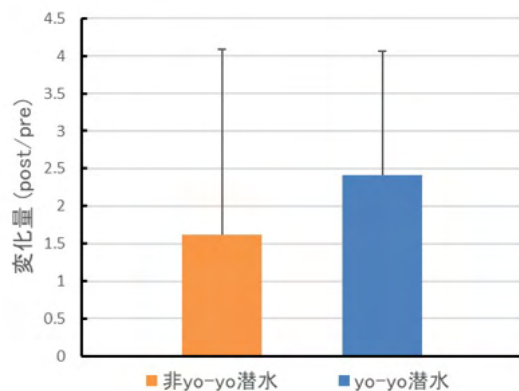


図-7. 炎症性サイトカイン(IL-1β)発現量の比較

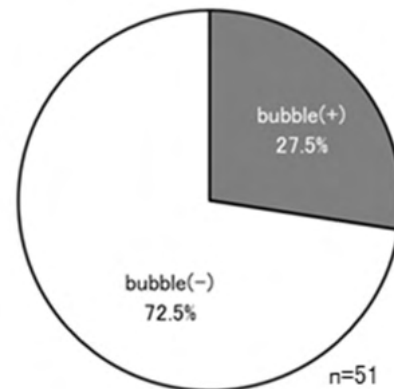


図-16. ドップラー気泡検知結果

図-8. 不活性ガス気泡検知結果

4. 研究C : yo-yo 潜水プロトコール作成とその検証

【目的】研究Bによる調査の結果、養殖場での潜水業務で用いられる yo-yo 潜水は、yo-yo 潜水以外（非 yo-yo 潜水）に比べ、生体への負荷が高く、それらが過度になった場合には、減圧症が発症する可能性がある。負荷を高める要因としては、潜水業務時間や yo-yo 潜水回数のほか、yo-yo 潜水による業務を繰り返して行うことがある。これらが日常的に行われることはほぼないが、養殖魚育成の過程においては繰り返し潜水を要する業務があり、短期間ではあるものの定期的に実施されてい

る。また、これ以外にも赤潮の発生や台風の直撃等の自然災害からの復旧時など緊急対応の際にも、同様に長時間の yo-yo 潜水が繰り返し行われる場合がある。このような場合に備え、減圧症リスク低減を目的とした潜水プロトコールの構築が必要であり、どの有効性についても確認しておくことが求められる。

【方法】業務の必要性から yo-yo 潜水を繰り返し行う潜水業務を対象とした。潜水回数や潜水時間などの潜水条件に関する閾値が明らかになっていないことから、

業務の現場に混乱が生じることを防ぐために潜水条件に制限を設けるのではなく、潜水後に酸素呼吸を行うことで、減圧症リスクの低減を図ることとした。潜水後に船上で酸素呼吸を行うことは、減圧症の予防に効果的であることが先行研究によって報告されている。今回は、潜水業務を終了して浮上した後、可能な限り早急に船上で10分間以上酸素呼吸を行うというプロトコルを作成し、実施した(図9)。高い吸気酸素濃度を確保するために、リザーバー付き酸素マスクを利用することとした。酸素流量は毎分7Lとした。プロトコルの効果を評価するために、潜水前後に採血を行い、フローサイトメトリー法にて血管内皮由来の微小膜胞体(MP)の発現量を計測した。また、潜水後の被験者に超音波ドップラー式体内気泡検知を実施し、不活性ガス気泡形成の状態を評価した。被験者が従事した潜水業務に関しては、潜水記録計で潜水プロファイルを記録するとともに、VAS法をもちいて潜水後の自覚的疲労感を調査した。

【結果】調査には12名の潜水業務従事者が参加した。全ての被験者がyo-yo潜水を2回繰り返して行った。2回目の潜水業務終了後、船上にて10分間以上の酸素呼吸を実施した。調査した24回の潜水における潜水深度は $16.8 \pm 3.8\text{m}$ (平均 $\pm$ SD)、潜水時間は 67.7 ± 16.6 分であった。内皮由来MPの発現量は、潜水前： 92.2 ± 41.0 count/ μl 、潜水後： 115.0 ± 64.0 count/ μl であり、変化率は1.27であった。不活性ガス気泡は12人中5名(41.7%)から検知されたが(図10)、いずれも等級Iであった。潜水業務終了後に異常を訴えた

被験者を認めなかった。

【考察】研究Bにおける減圧症リスク評価は概ね許容範囲内と評価されたことから、これらと比較することで、今回実施したプロトコルの評価を試みた。今回調査対象とした潜水業務は全て一連のyo-yo潜水を2回行う繰返し潜水であった。2回目の潜水には前回の潜水業務による影響が残余するが、その程度は潜水時間と見做して評価することが多い。これらの見做し時間は計算によって求めることができないため、もっぱら経験に基づいて策定される。今回はカナダDCIEM減圧表による見做し時間を用いて評価した。その結果、潜水曝露の程度を示す曝露指数(Q値)は研究Cで 30.9 ± 4.4 となり、研究Bにおける 22.5 ± 8.4 を大きく上回った(図11)。先行研究では、減圧症リスクに対するQ値の閾値は25とされていることから、研究Cでの潜水業務における減圧症リスクは高かったと推測できる。潜水業務後の被験者の自覚的疲労感を示すVAS値は、研究Bの 47.7 ± 11.3 mmに対し研究Cのそれは 64.7 ± 11.3 mmであり、研究Cで有意に高かったことも、今回の潜水業務の激しさを裏付けている。一方潜水前後におけるMPの変化率は、研究Bの 1.34 ± 0.41 に対し研究Cでは 1.27 ± 0.40 であり、統計的な有意差を認めなかった(図12)。また、不活性ガス気泡が検知された被験者数は、研究Cで12名中5名(42%)であり、研究Bでyo-yo潜水を行った36名中9名(25%)よりも高い割合となったが、全て等級Iと低いものであり、気泡検知者数も全体の半数以下であったことから、大きなリスク要因ではな

かったと考えられる。

このようなことから、研究Cで対象とした潜水業務は、潜水に伴う負荷が高く、減圧症リスクが懸念されるものであったが、実施した酸素呼吸プロトコールが有効に機能し、許容範囲内のリスクに抑えることができたと考える。今回用いたプロトコールは、潜水業務内容に直接影響を及ぼすものではなく、潜水業務終了後に実施するものであるため、特に作業効率を低下させることなく、リスク低減が可能であることから、業務内容や災害復旧などの高い負荷が想定される潜水業務においては積極的に導入を図るべきと考える。

謝辞

研究A、B、Cにご協力いただいた関係者の皆様、養殖場現場での調査の機会を与えていただいた事業者の皆様ならびに調査に参加いただいた潜水業務従事者の皆様に深謝いたします。

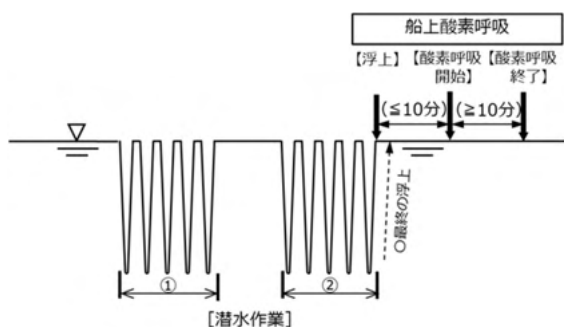


図-9. 船上酸素呼吸プロトコール

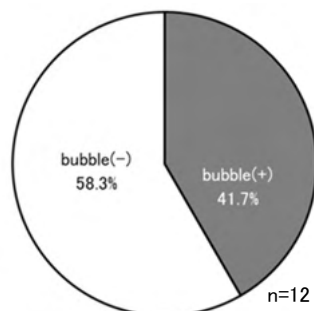


図-10. ドップラー気泡検知結果

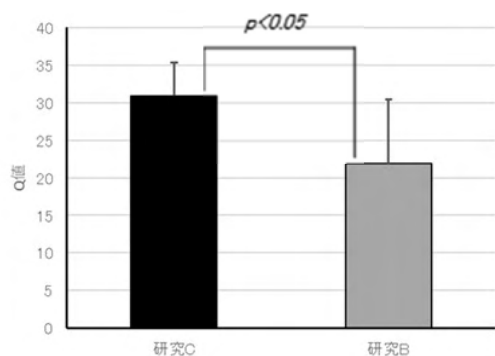


図-11. 研究 B、C における Q 値の比較

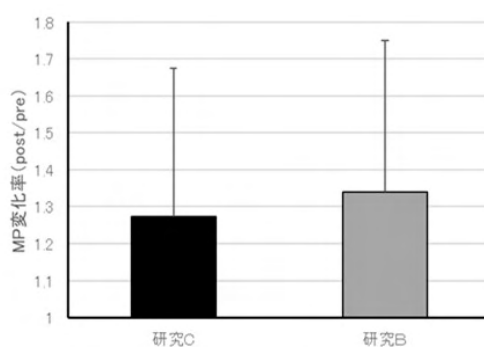


図-12. 研究 B、C における MP 値変化率の比較

Ⅱ. 研究A：養殖事業者を対象としたアンケート調査

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、その様が玩具の yo-yo の動きに似ていることから yo-yo 潜水とも呼ばれており、水産養殖場での潜水業務で利用されている。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、養殖場における潜水作業の全体像を明らかにすることを目的とし、国内で海面養殖に携わる漁業協同組合並びに事業者等を調査対象にアンケート調査を実施した。調査の結果、多くの養殖場では潜水業務が行われており、特に従事する潜水土作業者が6人以上となる中～大規模の養殖場で yo-yo 潜水が実施されていることが分かった。養殖魚では、マグロやカンパチの養殖で yo-yo 潜水が利用される割合が高かった。潜水業務は1年を通して行われるが、春季から夏季の繁忙期には、潜水業務日数と業務時間が増加する傾向が認められた。養殖の現場では、潜水業務に対して特に安全対策を講じている事業所は少なかったが、yo-yo 潜水実施事業所では、何らかの安全対策を講じている割合が高かった。

1. 研究目的

研究Aにおける調査研究は、養殖場における潜水作業の実態を明らかにすることを目的とした。我が国における養殖業生産高は、水産生産高全体の約25%を占めている（農林水産省、令和4年漁業・養殖業生産統計）。水産養殖は国連のSDGs（持続的開発目標）に選定されたことから、今後さらなる発展が期待されている。そのため、養殖生産工程の自動化や省力化、養殖魚の加工保存方法や鮮度を維持した輸送手段など様々な研究が行われているが、水産養殖の現場における労働衛

生に関する研究はほとんどない。我々が令和4年に実施した養殖現場での予備調査で、水産養殖場では頻繁に潜水作業が行われており、それには yo-yo 潜水が用いられていることを確認している。しかしながら調査対象は1カ所のみであり、他の多くの養殖場においても同様であるかは明らかでない。そこで、養殖場における潜水業について、アンケート調査と対面での聞き取り調査を行うこととした。これにより、養殖場における潜水業務の頻度や時間、また yo-yo 潜水が用いられる条件等、潜水作業の実態を明らかにす

ることを目的とした。

2. 方法

養殖場における潜水作業の実態を明らかにするために、潜水作業に関するアンケート調査を行い、そのフォローアップとして聞き取り調査を行うこととした。これにより、養殖場での潜水作業での yo-yo 潜水の利用度や yo-yo 潜水による作業時間や実施頻度等その実態の把握を試みた。

2-1. 調査対象者の選定

現在さまざまな水産物が養殖されているが、海藻類や貝類の養殖には潜水作業があまり用いられていない。また、ウナギやフグなど内水面（陸上）で行われる養殖では、養殖イケスの水深が浅く、潜水作業も頻繁ではないことから、これらを対象から除外した。

現在、海面養殖における魚種は多種に及んでいる。農林水産省の令和3年度漁業養殖業生産統計によると、ブリ類、カンパチ、マダイ、クロマグロで養殖業生産高の約88%を占めており、養殖業者数を多いことから、これらの魚種の養殖業者を対象とした。

2-2. アンケート調査票

潜水作業の全体像を把握するために、調査対象を養殖事業者並びに潜水作業管理者を対象としてアンケート調査票を作成した。調査票作成に当っては、以下の項目について設問を設定した。回答は選択式とし、必要に応じて一部記述式を追加した。なお作成したアンケート調査票に

ついては、添付資料1を参照されたい。

[調査項目]

1) 回答者の属性

・担当業務 ・業務経験年数 ・所属する組織形態

2) 事業所の属性

・従事する潜水土の人数 ・養殖魚種

3) 潜水業務の属性

・実施する潜水パターン（複数回答）
・最も多く使用する潜水パターン
・1か月あたりの潜水業務日数
・1日あたりの潜水業務時間

4) 繁忙期の潜水業務の属性

・繁忙期と感じる時期（月）
・繁忙期における1か月あたりの潜水業務日数
・繁忙期における1日あたりの潜水作業時間

5) 潜水業務の安全管理の属性

・潜水業務もしくは潜水土に対する安全管理事項

6) 今後の調査研究への協力の可否

2-3. 調査方法

アンケート調査票は郵送により配布、回収した

2-4. 統計的評価

有意差検定はカイ二乗検定で行い、 $p < 0.05$ を有意差ありとした。

2-5. 倫理面への配慮

倫理面への配慮から、調査に際しては以下の除外基準を設定した。

[除外基準]

①アンケート調査は、自発的調査であり、

無記名式のため除外基準は特にない

②聞き取り調査は、本調査に同意を得られなかった養殖業者及びその関係団体

③聞き取り調査時に未成年のもの

3. 結果

3-1. 調査対象者の選定

調査対象者を選定するために水産庁、全国漁業協同組合連合会、日本海水養魚協会等の関連団体に情報の提供を求めたが、部外者には個々の情報は公開不可のため協力を得られなかった。そこで、知己の研究者のネットワークを利用して養殖に関係する研究者に連絡し、養殖業者等の情報を得た。さらに養殖関連の展示会（シーフードショー、国際養殖技術展等）に参加し、養殖業者の情報を収集した。これらの結果、養殖業界には横断的な団体がなく、調査対象者の選定に会員名簿等を利用できないことが分かった。そこで、以下の方法で調査対象者の選定を行った。

①海面養殖を行うことができる海域は、農林水産省の定める漁業法と水産庁による海区漁場計画及び内水面漁場計画によって定められる。これらの海域については、海上保安庁による海洋情報表示システム（海しる：<https://www.msil.go.jp>）で公開されているため、web 上でそれらを確認した。

②海域の利用権は各都道府県知事が有しており、そこから各漁業協同組合（一部は漁業事業者）に移管され、その後実際に養殖を営む事業者に貸与される。

③海しるで確認した海域からその沿岸域の漁業協同組合をインターネット等で調査した。その際、今回の調査対象とした魚

種の養殖北限が三重県であることから、それ以西の地域を対象とした。

④漁業権には、定置漁業権、区画漁業権並びに共同漁業権の 3 種類があるが、養殖の場合は区画漁業権が必要なため、それが設定されている海域を対象とした。

⑤各自治体の水産課並びに漁業協同組合のホームページ等から、漁業権を有する事業者を特定し、調査対象とした。事業者の特定が困難な場合は、権利を有する漁業協同組合を対象とした。

これらの結果、養殖関連の団体として漁業協同組合 115 及び養殖事業者 228 の合計 343 団体を調査対象とした。

3-2. アンケート調査の結果の概要

アンケート調査票は、343 の養殖事業所および漁業協同組合に 2 月初旬に郵送を開始し、3 月 10 日を締め切りとした。その結果、112 事業所から回答を得ることができた（回答率：32.3%）。回答のあった事業所の内、「現在養殖は行っていない」、「潜水業務は実施していない」と回答した事業所が 20 あった。そこで、潜水業務を実施していると回答した 92 事業所を対象に分析を行った（有効回答率：82.1%）。

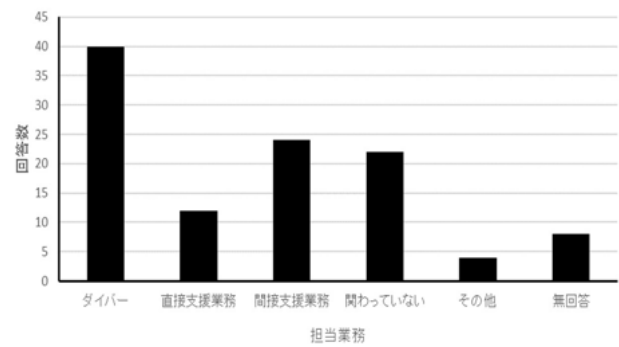
3-3. アンケート調査集計結果

3-3-1. 回答者の属性

アンケート回答者の 83%がダイバーもしくは潜水業務支援に関わっていた。51%が 11 年以上の業務経験を有しており、89%が法人企業もしくは漁業組合に所属していた。これらのことから、今回のアンケート調査結果は、養殖場における潜水業務の全般的な傾向を示していると考え

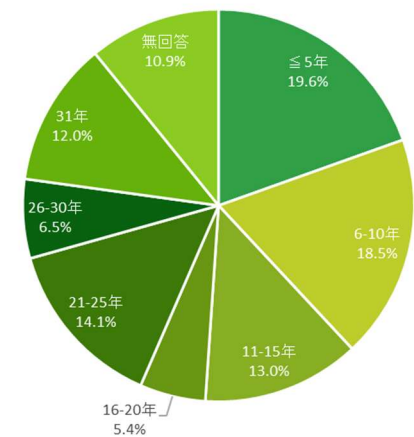
られる。回答者の属性に関する調査結果を図表1から3に示す。

Q8. 担当する業務		
	回答数	%
1. ダイバー	40	43.5
2. 直接支援業務	12	13.0
3. 間接的支援業務	24	26.1
4. 潜水に関わらない	22	23.9
5. その他	4	4.3
無回答	8	8.7



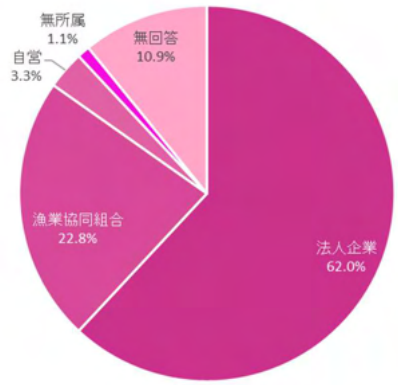
図表-1. 回答者の担当する業務

Q9. 担当業務の経験年数		
	回答数	%
1. 5 年以下	18	19.6
2. 6-10 年	17	18.5
3. 11-15 年	12	13.0
4. 16-20 年	5	5.4
5. 21-25 年	13	14.1
6. 26-30 年	6	6.5
7. 31 年以上	11	12.0
無回答	10	10.9



図表-2. 回答者の業務経験年数

Q10. 所属する組織の形態		
	回答数	%
1. 法人企業	57	62.0
2. 漁業協同組合	21	22.8
3. 自営	3	3.3
4. 無所属（アルバイト等）	1	1.1
5. その他	0	0.0
無回答	10	10.9



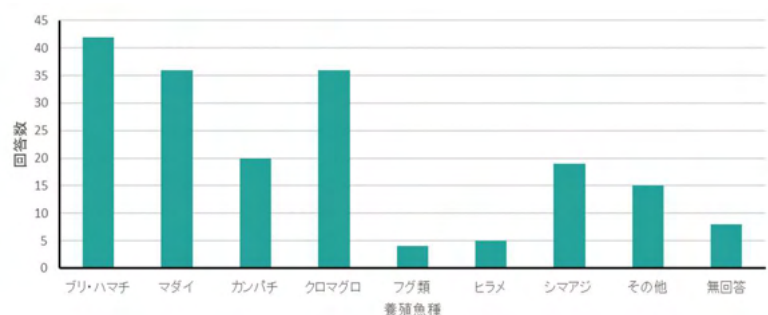
図表-3. 回答者の所属する組織

3-3-2. 養殖事業所の属性

今回のアンケート調査では、ブリ類、マダイ、カンパチ、マグロの養殖業者を対象として事業所を選定したことから、これらを養殖しているとの回答が多かった。また、フグ類やシマアジ、ヒラメ以外に、「その他」としてエビ、イサキ、クエ、スギ、スズキ、サバ、スマ、ヒラマサ、サケ、アジ、ハタを養殖しているとの回答があった。これらから、複数の魚種を養殖する事業所が少なくないことが示唆された。

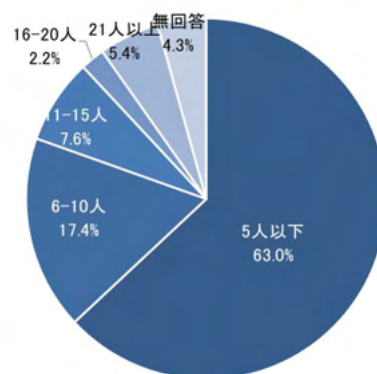
(図表-4)

Q7. 養殖魚種（複数回答）	
	回答数
1. ブリ・ハマチ	42
2. マダイ	36
3. カンパチ	20
4. クロマグロ	36
5. フグ類	4
6. ヒラメ	5
7. シマアジ	19
8. その他	15
無回答	8



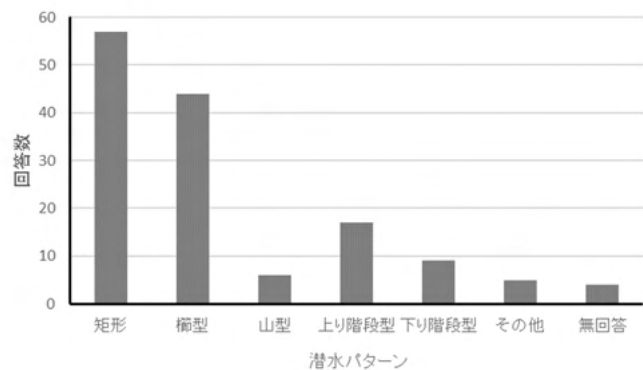
図表-4. 回答者が携わる養殖魚種

Q1. 所属する潜水作業者の人数		
	回答数	%
1. 5人以下	58	63.0
2. 6-10人	16	17.4
3. 11-15人	7	7.6
4. 16-20人	2	2.2
5. 21人以上	5	5.4
無回答	4	4.3



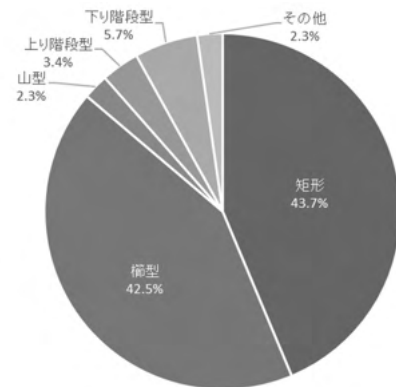
図表-5. 所属する潜水作業者数

Q5. 潜水業務の潜水パターン (複数回答)	
	回答数
1. 矩形 (箱型)	57
2. 櫛型 (yo-yo 型)	44
3. 山型 (変形 yo-yo 型)	6
4. 上り階段型	17
5. 下り階段型	9
6. その他	5
無回答	4



図表-6. 潜水業務で使用する潜水パターン

Q6. 最も多い潜水パターン		
	回答数	%
1. 矩形 (箱型)	38	43.7
2. 櫛型 (yo-yo 型)	37	42.5
3. 山型 (変形 yo-yo 型)	2	2.3
4. 上り階段型	3	3.4
5. 下り階段型	5	5.7
6. その他	2	2.3



図表-7. 最も使用頻度の高い潜水パターン

3-3-3. 潜水業務の属性

養殖場における潜水業務は 1 年を通して行われるが、季節ごとまたは月ごとによって稼働状況は異なっている。それらは養殖魚種によって差異はあるものの、概ね 6 月から 10 月までの間が繁忙期となっている。潜水業務の主な目的の一つは斃死魚の回収であるが、この時期は海水温が高く、斃死魚が増加するため、業務量が増加する。また、赤潮や台風などの自然災害の発生もこの時期に多い傾向があり、それらによって斃死魚が多く発生することも業務の負担増の要因となっている。

12 月は、斃死魚は少ないものの、年末年始に向けて出荷量が拡大するため、それに伴う業務が多くなる。一方、特に繁忙期はないとの回答も 14 あった。(図表-8)

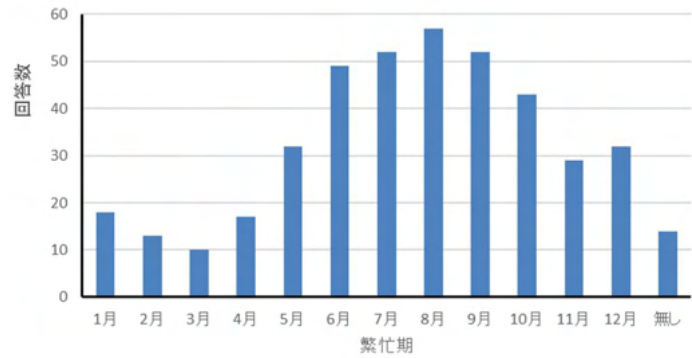
繁忙期の業務日数は 16-20 日との回答が最も多く (19.6%)、次いで 6-10 日が多かった (17.4%)。ほぼ毎日に相当する 26 日以上との回答も 12% あった。潜水業務時間は、1 時間以上 2 時間未満が最も多く (27.2%)、次いで 1 時間未満が多かった (20.7%)。5 時間以上との回答も 7.6% あった。(図表-9)

通常時の業務日数として最も多かったの

は5日以下（29.3％）で、次いで6-10日が多かった（18.5％）。26日以上は3.3％であった。潜水業務時間は、1時間以下が最も多く（29.3％）、次いで1時間以上2時間未満が多かった（28.3％）。5時間以上との回答は少なかった（1.1％）。

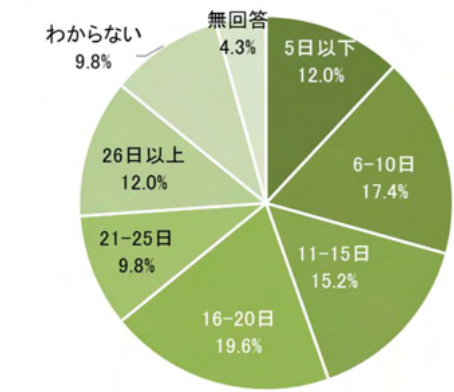
（図表-11、図表-12）

Q2. 潜水業務の繁忙期について（複数回答）													
1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	無し	
18	13	10	17	32	49	52	57	52	43	29	32	14	



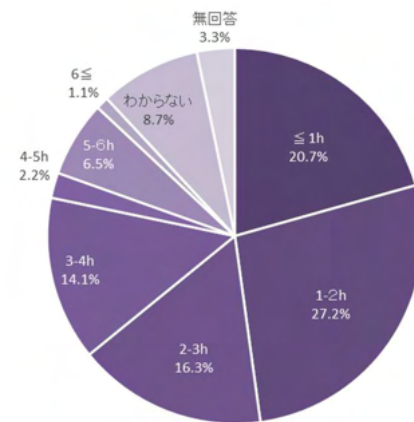
図表-8. 潜水業務繁忙期

Q3-1. 繁忙期の潜水業務日数		
	回答数	%
1. 5 日以下	11	12.0
2. 6-10 日	16	17.4
3. 11-15 日	14	15.2
4. 16-20 日	18	19.6
5. 21-25 日	9	9.8
6. 26 日以上	11	12.0
7. わからない	9	9.8
無回答	4	4.3



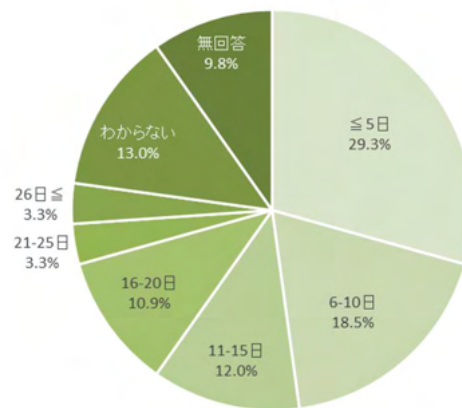
図表-9. 潜水業務繁忙期の潜水業務日数

Q3-2. 繁忙期の潜水業務時間		
	回答数	%
1. 1 時間以下	19	20.7
2. 1 時間以上 2 時間未満	25	27.2
3. 2 時間以上 3 時間未満	15	16.3
4. 3 時間以上 4 時間未満	13	14.1
5. 4 時間以上 5 時間未満	2	2.2
6. 5 時間以上 6 時間未満	6	6.5
7. 6 時間以上	1	1.1
8. 分からない	8	8.7
無回答	3	3.3



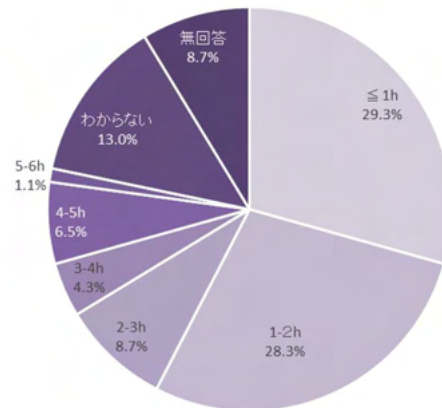
図表-10. 繁忙期の潜水業務時間

Q4-1. 通常期の潜水業務日数		
	回答数	%
1. 5 日以下	27	29.3
2. 6-10 日	17	18.5
3. 11-15 日	11	12.0
4. 16-20 日	10	10.9
5. 21-25 日	3	3.3
6. 26 日以上	3	3.3
7. 分からない	12	13.0
無回答	9	9.8



図表-11. 通常期の潜水業務日数

Q4-2. 通常期の潜水業務時間		
	回答数	%
1. 1 時間以下	27	29.3
2. 1 時間以上 2 時間未満	26	28.3
3. 2 時間以上 3 時間未満	8	8.7
4. 3 時間以上 4 時間未満	4	4.3
5. 4 時間以上 5 時間未満	6	6.5
6. 5 時間以上 6 時間未満	1	1.1
7. 6 時間以上	0	0.0
8. 分からない	12	13.0
無回答	8	8.7



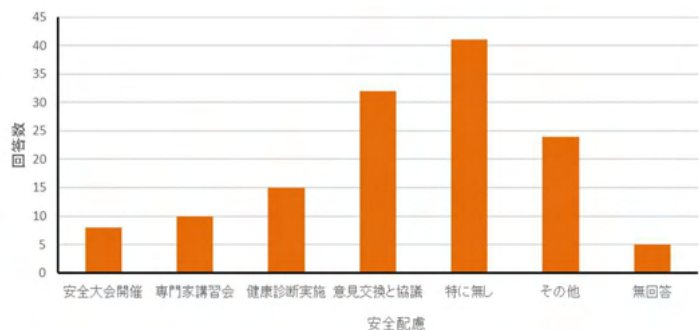
図表-12. 通常期の潜水業務時間

3-3-4. 潜水業務への安全配慮

養殖場における潜水業務に対する安全配慮に関しては、「特に何もしていない」との回答が最も多かった（回答数：41）。次に多かったのは、「潜水作業から要望のあったときに意見交換を行い、問題点と対策を協議している」（回答数：32）であった。「定期的に安全大会を開催し、テーマの一つに潜水を取り上げている」（回答数：8）、「専門家を招いて潜水作業の安全

に関する講習会を開催している」（回答数：10）は少なかった。これらのことから、潜水業務の安全に対してはあまり積極的ではない傾向が示唆された。潜水作業に対する一般および特殊健康診断の定期的な受診は規則によって定められているが、「組合主導で潜水作業者の健康診断を実施している」との回答は15にとどまった。（図表-13）

Q11. 安全に対する取り組み (複数回答)	
	回答数
1. 定期の安全大会	8
2. 専門家による講習会	10
3. 健康診断の実施	15
4. 意見交換会の実施	32
5. 特に無し	41
6. その他	24
無回答	5

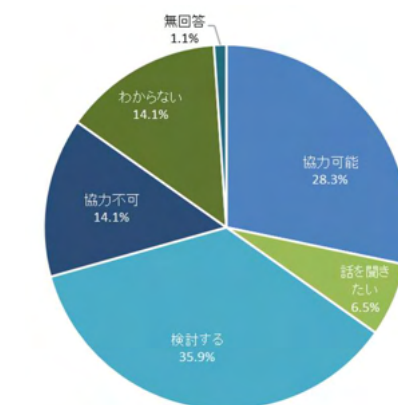


図表-13. 潜水業務に対する安全配慮

3-3-5. 本調査研究への協力可否について

今回のアンケート調査では、今後実施を予定している養殖現場での現地調査を踏まえ、それらへの協力の可否についても調査を行った。その結果、「調査に協力できる」(28.3%)並びに「もう少し詳しく話を聞きたい」(6.5%)の調査研究に対する好意的な回答が約35%あった。また、「検討のうえ回答したい」との中立的な回答は36%と最多であった。一方、「調査に協力することは難しい」との否定的な回答は約14%であった。(図表-14)

Q12. 本調査研究への協力可否		
	回答数	%
1. 協力可能	26	28.3
2. 詳しい話聞きたい	6	6.5
3. 検討する	33	35.9
4. 協力不可	13	14.1
5. 分からない	13	14.1
無回答	1	1.1



図表-14. 調査研究への協力の可否

3-4. クロス集計結果

我々は令和4年度に実施した予備的な調査において、水産養殖場では極短時間の潜水を高頻度で繰り返すyo-yo潜水が行われていることを確認した。そこで、今回のアンケート調査結果から、yo-yo潜水の背景や実施条件等を知るために、yo-yo潜水実施の有無とその他の変数についてクロス集計を行い、関連性を検討した。なお本調査では、yo-yo潜水実施事業所の特徴を明らかにすることを目的としているため、実施している潜水パターンが不明な4事業所を除外し、88事業所を分析対象とした。

3-4-1. yo-yo潜水実施の有無と潜水作業者数との関係 (図表-15)

yo-yo潜水実施の有無と従事する潜水作業者数の関係について分析した結果を表に示す。表からも明らかなように、yo-yo潜水は、潜水作業者数が6人以上の事業所で行われる割合が高かった。

3-4-2. 潜水実施の有無と繁忙期潜水業務との関係

1) yo-yo潜水と繁忙期の関係 (図表-16)

3-3-3項に示したように、繁忙期と感じる月は概ね6月から10月である。yo-yo潜水の有無を月別に比較すると1月、5月から8月、10月から12月でyo-yo潜水有の割合が高く、特に繁忙期と感じると回答があった月でその傾向が大きかった。また、特に繁忙期はないと回答した事業所のうち、yo-yo潜水無しが30%

であるのに対し、yo-yo 潜水在りは2.2%であった。これらのことから、潜水業務量は yo-yo 潜水実施の要因の一つであると考えられる。

2) yo-yo 潜水と繁忙期潜水業務日数との関係 (図表-17)

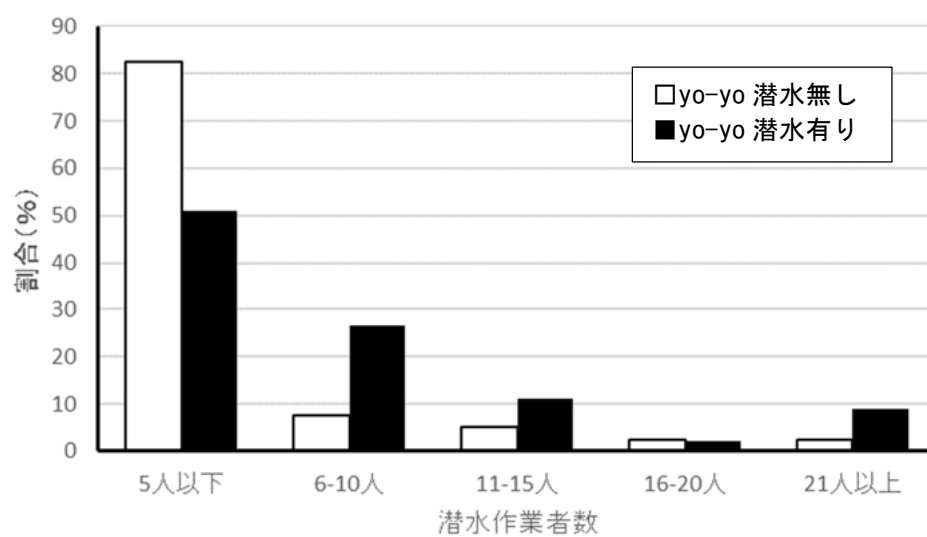
有意差は認められないものの、繁忙期における潜水業務日数は、yo-yo 潜水有りの事業者で、11-15 日、16-20 日、および21-25 日の割合が高い。ただし、これらはカテゴリを見直せば有意に異なる可能性がある。

3) yo-yo 潜水と繁忙期潜水業務時間の関係 (図表-18)

有意差は認められないものの、yo-yo 潜水有りの事業所における繁忙期の潜水業務時間は、1-2 時間、2-3 時間、5-6 時間で割合が高かった。

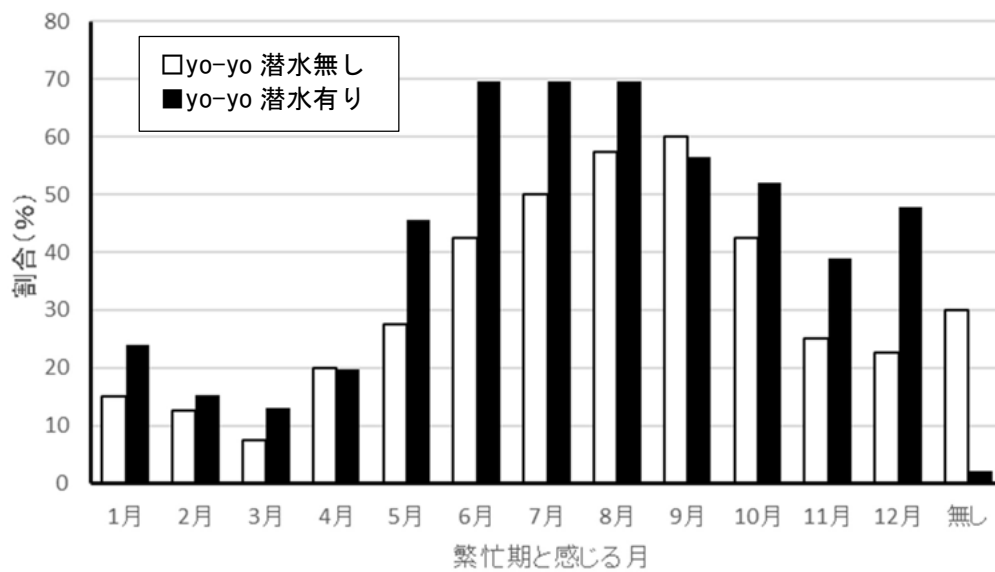
		yo-yo 潜水					
		無し	有り	χ^2	df	p	$Cramer' V$
潜水作業者数							
5 人以下	n	33	23	10.0	4	0.04	0.34
	%	82.5	51.1				
	調整済み残差	3.0	-3.0				
6-10 人	n	3	12				
	%	7.5	26.7				
	調整済み残差	-2.3	2.3				
11-15 人	n	2	5				
	%	5.0	11.1				
	調整済み残差	-1.0	1.0				
16-20 人	n	1	1				
	%	2.5	2.2				
	調整済み残差	0.1	-0.1				
21 人以上	n	1	4				
	%	2.5	8.9				
	調整済み残差	-1.2	1.2				

* 注意) 「わからない」と回答した事業所を除外して分析した。



図表-15. yo-yo 潜水と潜水作業者数の関係

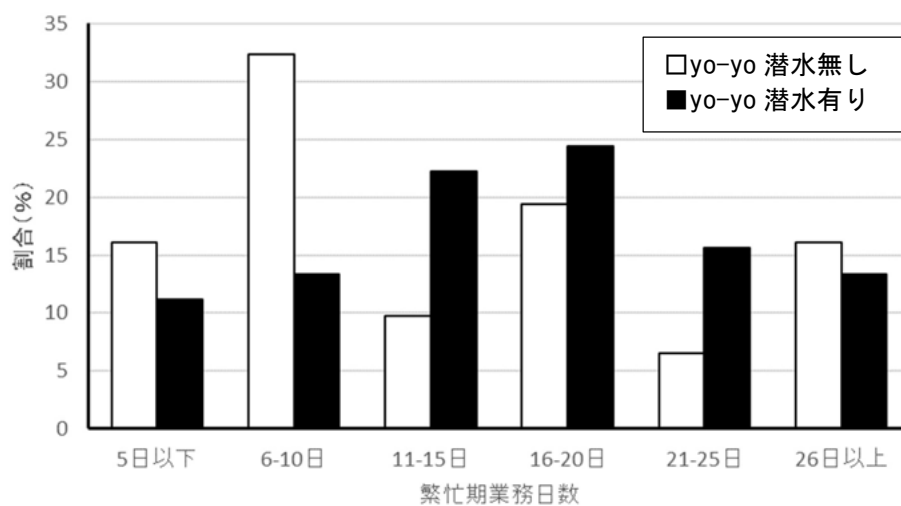
		yo-yo 潜水				yo-yo 潜水	
繁忙月		有り	繁忙月	繁忙月		有り	無し
1 月	n	6	11	7 月	n	20	31
	%	15.0	23.9		%	50.0	69.6
2 月	n	5	7	8 月	n	23	32
	%	12.5	15.2		%	57.5	69.6
3 月	n	3	6	9 月	n	24	26
	%	7.5	13.0		%	60.0	56.5
4 月	n	8	9	10 月	n	17	24
	%	20.0	19.6		%	42.5	52.2
5 月	n	11	21	11 月	n	10	18
	%	27.5	45.7		%	25.0	39.1
6 月	n	17	32	12 月	n	9	22
	%	42.5	69.6		%	22.5	47.8
				無し	n	12	1
					%	30.0	2.2



図表-16. yo-yo 潜水と繁忙期潜水業務の関係

		yo-yo 潜水					
		無し	有り	χ^2	df	p	Cramer' V
潜水業務日数							
5 日以下	n	5	5	6.8	5	0.24	0.30
	%	16.1	11.1				
	調整済み残差	0.6	-0.6				
6-10 日	n	10	6				
	%	32.3	13.3				
	調整済み残差	2	-2				
11-15 日	n	3	10				
	%	9.7	22.2				
	調整済み残差	-1.4	1.4				
16-20 日	n	6	11				
	%	19.4	24.4				
	調整済み残差	-0.5	0.5				
21-25 日	n	2	7				
	%	6.5	15.6				
	調整済み残差	-1.2	1.2				
26 日以上	n	5	6				
	%	16.1	13.3				
	調整済み残差	0.3	-0.3				

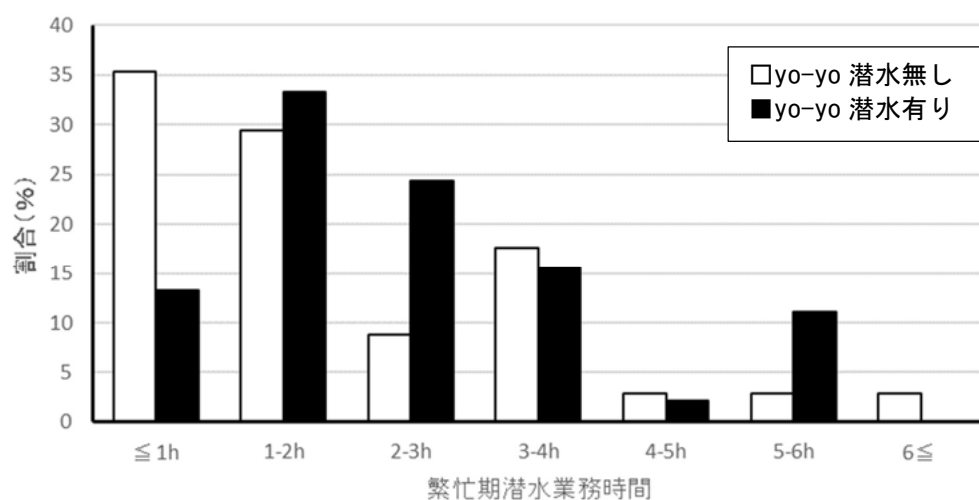
* 注) 「わからない」と回答した事業所を除外して分析した。



図表-17. yo-yo 潜水と繁忙期潜水業務日数の関係

		yo-yo 潜水					
		無し	有り	X^2	df	p	Cramer' V
潜水業務時間							
1 時間以下	n	12	6	10.0	6	0.13	0.36
	%	35.3	13.3				
	調整済み残差	2.3	-2.3				
1 時間以上 2 時間未満	n	10	15				
	%	29.4	33.3				
	調整済み残差	-0.4	0.4				
2 時間以上 3 時間未満	n	3	11				
	%	8.8	24.4				
	調整済み残差	-1.8	1.8				
3 時間以上 4 時間未満	n	6	7				
	%	17.6	15.6				
	調整済み残差	0.2	-0.2				
4 時間以上 5 時間未満	n	1	1				
	%	2.9	2.2				
	調整済み残差	0.2	-0.2				
5 時間以上 6 時間未満	n	1	5				
	%	2.9	11.1				
	調整済み残差	-1.4	1.4				
6 時間以上	n	1	0				
	%	2.9	0				
	調整済み残差	1.2	-1.2				

* 注意) 「わからない」と回答した事業所を除外して分析した。



図表-18. yo-yo 潜水と繁忙期潜水業務時間の関係

3-4-3. yo-yo 潜水と通常時潜水業務の関係

1) yo-yo 潜水と通常時潜水業務日数の関係 (図表-19)

潜水業務日数が5日以下の場合に、yo-yo 潜水を実施する事業所が有意に少なかった。また、11-15日ではyo-yo 潜水を実施する事業所が有意に多く、16-20日でも多い傾向にあった。これらのことから、通常時に潜水業務日数が多い事業所では、yo-yo 潜水が利用される傾向にあることが示唆された。

2) yo-yo 潜水と通常時潜水業務時間の関係 (図表-20)

有意差は認められないものの、通常時の線宇井業務時間が1時間以下の場合は、yo-yo 潜水の利用が少なく、1時間以上2時間未満では利用が多い傾向があった。

3-4-4. yo-yo 潜水と養殖魚種の関係 (図表-21)

yo-yo 潜水と養殖魚種の関係では、カンパチ、マグロ、スギの養殖でyo-yo 潜水が行われる傾向が認められた。なお表中イサキ以降は「その他」回答に記された魚種を示す。

3-4-5. yo-yo 潜水と潜水業務の安全配慮 (図表-22)

潜水業務に対して何らかの安全配慮を行っている事業所では、行っていない事業所と比較して、yo-yo 潜水が行われている割合が高かった。

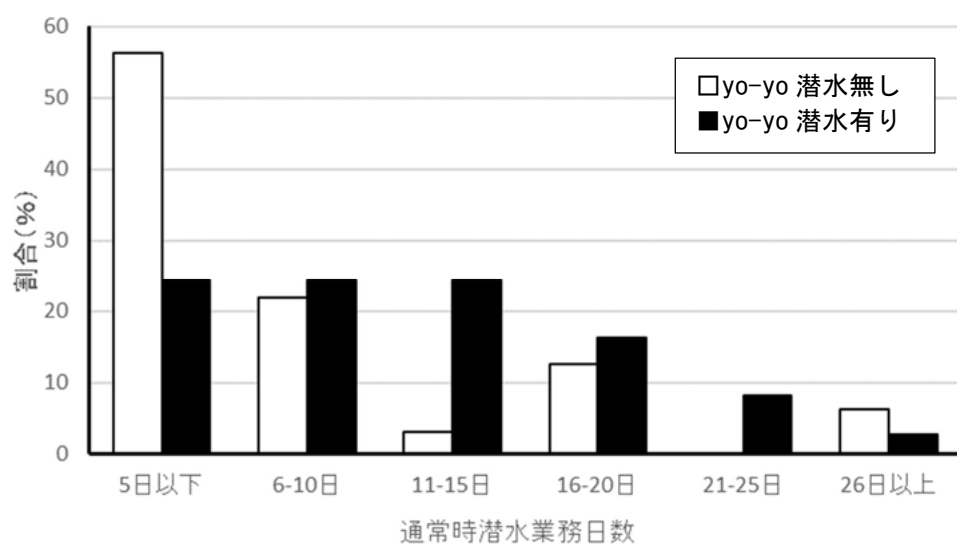
yo-yo 潜水を実施している事業所では、安全配慮として、定期的に安全大会開催、専

門家による講習会実施、健康診断の実施、潜水作業者との対策協議を実施している割合が高い。

yo-yo 潜水を実施していない事業所では、安全配慮を特に行っていない事業所の割合が高い(57.5%)が、yo-yo 潜水を実施している事業所でも33%が安全配慮を何も実施していなかった。

		yo-yo 潜水					
		無し	有り	χ^2	df	p	Cramer' V
潜水業務日数							
5 日以下	n	18	9	13.1	5	0.02	0.44
	%	56.3	24.3				
	調整済み残差	2.7	-2.7				
6-10 日	n	7	9				
	%	21.9	24.3				
	調整済み残差	-2.5	2.5				
11-15 日	n	1	9				
	%	3.1	24.3				
	調整済み残差	-0.4	0.4				
16-20 日	n	4	6				
	%	12.5	16.2				
	調整済み残差	-0.4	0.4				
21-25 日	n	0	3				
	%	0	8.1				
	調整済み残差	-1.6	1.6				
26 日以上	n	2	1				
	%	6.3	2.7				
	調整済み残差	0.7	-0.7				

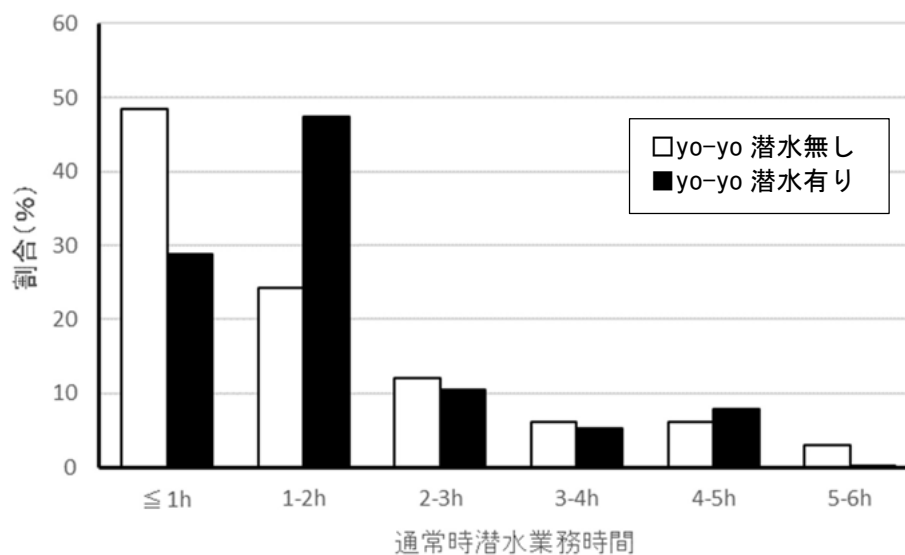
* 注意)「わからない」と回答した事業所を除外して分析した。



図表-19. yo-yo 潜水と通常期潜水業務日数の関係

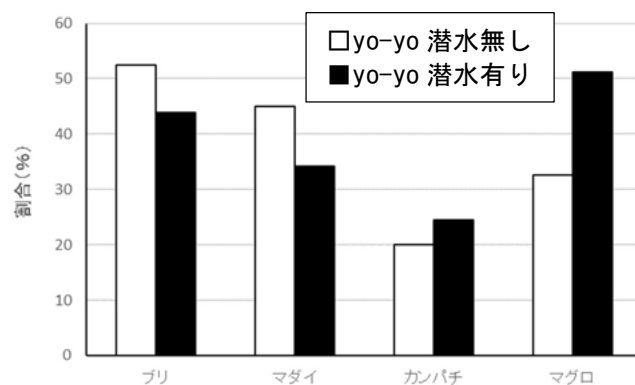
		yo-yo 潜水					
		無し	有り	χ^2	df	p	Cramer' V
潜水業務時間							
1 時間以下	n	16	11	5.6	5	0.34	0.28
	%	48.5	28.9				
	調整済み残差	1.69	-1.69				
1 時間以上 2 時間未満	n	8	18				
	%	24.24	47.38				
	調整済み残差	-2.02	2.02				
2 時間以上 3 時間未満	n	4	4				
	%	12.1	10.5				
	調整済み残差	0.21	-0.21				
3 時間以上 4 時間未満	n	2	2				
	%	6.1	5.3				
	調整済み残差	0.15	-0.15				
4 時間以上 5 時間未満	n	2	3				
	%	6.1	7.9				
	調整済み残差	-0.30	0.30				
5 時間以上 6 時間未満	n	1	0				
	%	3.0	0.3				
	調整済み残差	1.08	-1.08				

* 注意)「わからない」と回答した事業所を除外して分析した。



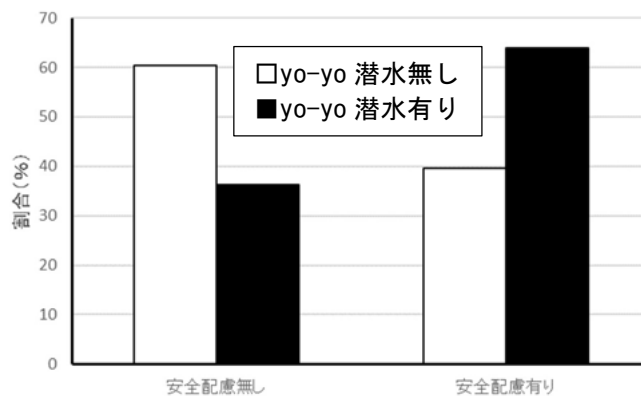
図表-20. yo-yo 潜水と通常期潜水業務時間の関係

養殖魚種		yo-yo 潜水		養殖魚種		yo-yo 潜水	
		無し	有り			無し	有り
ブリ	n	21	18	エビ	n	4	0
	%	52.5	43.9		%	10.0	0
マダイ	n	18	14	サケ	n	1	0
	%	45.0	34.1		%	2.5	0
カンパチ	n	8	10	スギ	n	0	2
	%	20.0	24.4		%	0	4.9
マグロ	n	13	21	スズキ	n	2	0
	%	32.5	51.2		%	5.0	0
フグ	n	2	2	アジ	n	1	0
	%	5.0	4.9		%	2.5	0
ヒラメ	n	3	2	サバ	n	2	0
	%	7.5	4.9		%	5.0	0
シマアジ	n	10	7	ハタ	n	1	0
	%	25.0	17.1		%	2.5	0
イサキ	n	2	0	スマ	n	1	1
	%	5.0	0		%	2.5	2.4
クエ	n	1	1	ヒラマサ	n	2	0
	%	2.5	2.4		%	5.0	0



図表-21. yo-yo 潜水と養殖魚種の関係

		yo-yo 潜水					
		無し	有り	X^2	df	p	Cramer' V
潜水業務の安全配慮							
安全配慮無し	n	23	17	5.0	1	0.03	0.24
	%	60.3	36.2				
	調整済み残差	2.2	-2.2				
安全配慮有り	n	15	30				
	%	39.5	63.8				
	調整済み残差	-2.2	2.2				



安全配慮事項		yo-yo 潜水		安全配慮事項		yo-yo 潜水	
		無し	有り			無し	有り
定期的に安全大会開催	n	1	7	体調管理	n	0	1
	%	2.5	15.6		%	0	2.2
専門家による講習会	n	1	10	作業時の体調確認	n	1	1
	%	2.5	22.2		%	2.5	2.2
健康診断の実施	n	6	11	作業計画の確認	n	0	1
	%	15.0	24.4		%	0	2.2
潜水作業者と対策協議	n	11	20	作業中の監視	n	0	1
	%	27.5	44.4		%	0	2.2
特になし	n	23	15	潜水作業減少取り組み	n	1	0
	%	57.5	33.3		%	2.5	0
業者に依頼	n	0	1	就業時の実技訓練	n	0	1
	%	0	2.2		%	0	2.2
高気圧健診の受診	n	2	2	ダイブコンピュータの使用	n	1	0
	%	5.0	4.4		%	2.5	0
定期的な訓練	n	0	1	昇降階段の設置	n	1	0
	%	0	2.2		%	2.5	0
外部機関の訓練参加	n	0	5	複数作業員で業務集中回避	n	1	0
	%	0	11.1		%	2.5	0
器具の点検整備	n	0	1				
	%	0	2.2				

図表-22. yo-yo 潜水と安全配慮の関係

4. 考 察

養殖による漁業生産は、現在我が国の全漁業生産の約 25%（農林水産省、令和 4 年漁業・養殖業生産統計）を占めており、特に刺身文化の中心となるマダイ、ブリ類、クロマグロ等の生産量は、養殖魚が天然魚を上回っている。これらは、養殖技術や保管、輸送方法の進化ならびに養殖漁場環境の管理改善等の結果によるものであり、現在も研究開発が進められている。それらの成果については、多くの報告が行われているが、水産養殖に関する労働衛生についてはほとんど報告がない。養殖漁場の管理には、潜水業務は必要であるが、その実態は明らかではなく、安全か否かの評価も行われていない。厚生労働省が公表する労働死亡災害データベース（<https://anzeninfo@mhlw.go.jp>）によれば、潜水業務による死亡災害は平成 24 年から令和 3 年までの 10 年間で 35 件あり、内訳は、水産漁業関連が 16 件、工事作業関連が 16 件、その他が 3 件となっている。水産漁業関連の内、養殖に係るものは 6 件であった。一方、工事作業関連で代表的な港湾整備工事におけるそれは 4 件であった。これらから直ちに、養殖業での潜水業務は危険であると評価することはできないが、養殖業における潜水業務には何らかのリスクが潜在することが伺われる。我々は令和 4 年に実施した予備的調査で、養殖場での潜水業務で yo-yo 潜水が行われていることを確認している。yo-yo 潜水を用いる海士や潜水漁業者に重篤な減圧障害の発症例が報告されており、また、動物実験においても yo-yo 潜水のリスクが指摘されている。このよう

なことから、養殖場での潜水業務において、yo-yo 潜水がどの程度行われているのか等を知る必要がある。アンケート調査は、養殖業を営む 343 事業者・団体を対象として実施し、112 事業者から回答を得た。無回答 4 を含む 20 事業所では潜水業務は行っていないとのことであったが、92 事業者（82.1%）は潜水業務を行っていると回答があったことから、養殖場の多くでは潜水作業が行われていると考えられた。

潜水業務における最も多い潜水パターンは何かという質問に対しては、yo-yo 潜水（楡型及び山形）との回答が最も多く（44.8%）、リスクの高い潜水パターンである下り階段型（5.7%）を加えれば、約半数（50.5%）でこれらの潜水が行われていることが分かった。矩形（箱型）潜水パターンは、港湾潜水作業等、多くの潜水作業で用いられている一般的な潜水パターンであり、減圧浮上方法などの安全基準もこの潜水パターンを前提としたものが多い。したがって、養殖場における潜水業務のリスク評価と安全対策を検討するために、yo-yo 潜水に着目することが必要である。

今回の調査では、yo-yo 潜水の背景や条件等の一端が明らかとなった。クロス集計の結果、yo-yo 潜水は、潜水作業者が 5 名以下の事業所では実施の割合は低く、6 名以上の事業所で多いことが分かった。実際に小規模の養殖場における養殖イケスは小型であり、その数も少なく、また、イケスの水深も浅いため、潜水業務の必要性はあまり高くない。一方 yo-yo 潜水が行われている割合が高い 6 名以上の潜

水作業者が所属する中〜大規模の事業所では、使用するイケスの数が多く、またイケス自体も大きく、深いものとなっている。これらの業務環境が、yo-yo 潜水を使用する要因の一つと考えられる。

養殖魚の生産期間は複数年にわたり、その間に飼育資料や設備費用の高騰に加え、突発的な魚病、赤潮、台風被害など生産コストは一定しない現状がある。また、出荷時点での需要に合わせて供給を調整できるものではないことから、見込み養殖の形態を取らざるを得ない。出荷時の価格変動に対応するには、生産コストをできるだけ抑える必要があり、そのためには、大量生産方式が最も効率が良いと考えられる。近年水産養殖業には大手水産会社の進出が急であり、養殖施設が大型化する傾向にあることから、yo-yo 潜水による潜水業務は今後増加することが予想される。

yo-yo 潜水は、特に潜水繁忙期に行われる割合が高かった。潜水業務の主な目的に斃死魚の回収がある。斃死魚を放置すると腐敗により感染症が発生する可能性がある。また、斃死の原因を早急に確認することで、新たに生じた問題や障害に対しても速やかな対策が可能となる。そのためには、日々の斃死魚回収が必要であり、斃死魚が増加する時期が潜水業務繁忙期となる。斃死の原因は主に水温の上昇によるもので、イケス内という閉鎖環境下では水温が上昇しても低水温域に移動することができないため、環境ストレスから斃死に至る場合が多い。近年、地球温暖化に伴う海水温の上昇が報告されており、今後さらに繁忙期が増える可能性

があることから、yo-yo 潜水の実施も増加することが予想される。

潜水業務日数は、繁忙期、通常期のいずれも yo-yo 潜水を実施している事業所で多かった。先に示したように、yo-yo 潜水を実施する事業者は養殖施設が大きい傾向にあり、そのため業務量も多くなる。人件費は生産コストに直接影響するため、必要最小限の人数で潜水業務を行う必要があるが、これらは各潜水作業者に大きな負荷となる可能性がある。適正な作業量と適切な人員配置の観点からも、養殖場における yo-yo 潜水のリスク調査は不可欠である。

中規模以上の養殖場では、潜水業務は必要な業務となっているが、その安全に対する取り組みは十分ではない可能性がある。アンケート調査で潜水業務の安全に対する取り組みについて尋ねたところ、「特に何もしていない」との回答が最も多かった。その割合は、yo-yo 潜水を実施していない事業所で高く、実施している事業所では何らかの安全配慮が行われている割合が高かった。その内容は、事業所によってさまざまであるが、経験的に yo-yo 潜水のリスクを認識しているものと考えられる。これは、本調査研究への協力可否についての回答からも裏付けられる。得られた回答の内、約 35%が調査研究への協力に前向きであったことも、養殖現場での潜水業務の安全性に不安があり、そのリスク評価が十分行えていない現状を示唆している。

我が国の養殖産業は、個人事業者による小規模養殖から、経済性に優れた大規模養殖に移行しつつある。一方日本文化

の和食の重要な素材としての魚介類は、一尾一尾大切に育てることが求められている。今後、養殖業においても機械化省力化が進められることは否めないが、潜水作業者によるきめ細かな対応は不可欠であり、潜水業務を安全に行うためには、そのリスクを客観的に把握し、効果的な対策を講じていくことが今後求められる。

資料－１

I. 貴社または貴漁業協同組合が携わる養殖場での潜水業務についてお尋ねします。

Q1 貴社又は貴組合に所属する養殖場では何人のダイバーが潜水業務に従事していますか？

- 1 5人以下
- 2 6-10人
- 3 11-15人
- 4 16-20人
- 5 21人以上

Q2 貴社又は貴組合に所属する養殖場で潜水業務の繁忙期はいつですか？繁忙期だと感じる月すべてに○をつけてください。

1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	繁忙期 無し

Q3 潜水業務の「繁忙期」についてお聞きします

Q3-1 繁忙期には一ヶ月あたりの何日くらい潜水業務が行われますか？

- 1 5日以下（週1回位）
- 2 6-10日間
- 3 11-15日間
- 4 16-20日間
- 5 21-25日間
- 6 26日以上（ほぼ毎日）
- 7 わからない

Q3-2 繁忙期には1日あたりの何時間くらい潜水業務が行われますか？

- 1 1時間以下
- 2 1時間以上2時間未満
- 3 2時間以上3時間未満
- 4 3時間以上4時間未満
- 5 4時間以上5時間未満
- 6 5時間以上6時間未満
- 7 6時間以上
- 8 わからない

Q4 繁忙期ではない「通常」の潜水業務のについてお聞きします

Q4-1 通常は一ヶ月あたりの何日くらい潜水業務が行われますか？

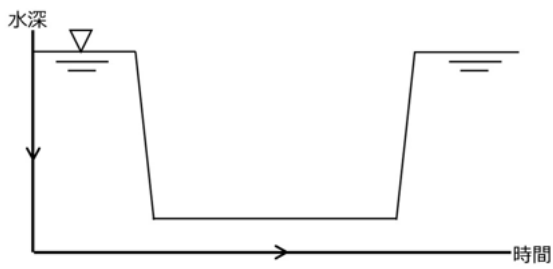
- 1 5日以下（週1回位）
- 2 6-10日間
- 3 11-15日間
- 4 16-20日間
- 5 21-25日間
- 6 26日以上（ほぼ毎日）
- 7 わからない

Q4-2 通常は1日あたりの何時間くらい潜水業務が行われますか？

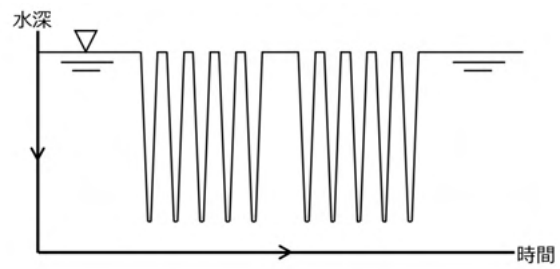
- 1 1時間以下
- 2 1時間以上2時間未満
- 3 2時間以上3時間未満
- 4 3時間以上4時間未満
- 5 4時間以上5時間未満
- 6 5時間以上6時間未満
- 7 6時間以上
- 8 わからない

Q5 貴社又は貴組合に所属する養殖場で行われる潜水業務は、どのような潜水パターンで行われていますか？当てはまるものを次の図から選んでください（減圧停止や安全停止は除きます）。

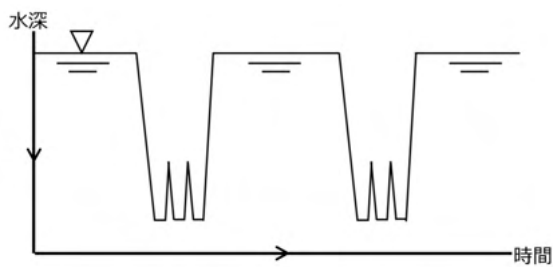
- 1 矩形（箱型）
- 2 楕型（ヨーヨー型）
- 3 山型（変形ヨーヨー型）
- 4 上り階段型
- 5 下り階段型
- 6 その他



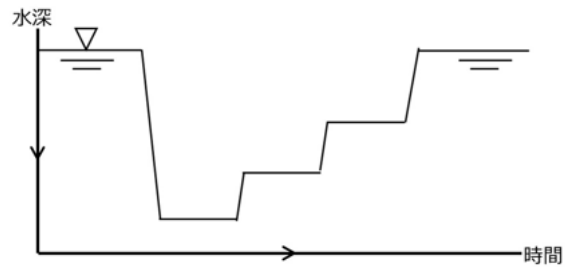
1 矩形（箱型）



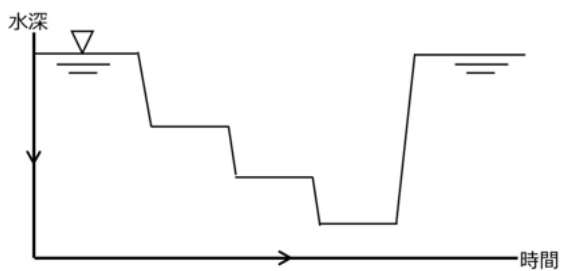
2 櫛型（ヨーヨー型）



3 山型（変形ヨーヨー型）



4 上り階段型



5 下り階段型

Q6 前問で複数回答した方にお尋ねします。回答の中で最も多く行われている潜水パターンはどれですか？

- 1 矩形（箱型）
- 2 櫛型（ヨーヨー型）
- 3 山型（変形ヨーヨー型）
- 4 上り階段型
- 5 下り階段型
- 6 その他

Q7 貴社又は貴組合に所属する養殖場で主に生産している魚種は何ですか？該当するもの全てに印を付けてください。

- 1 ブリ・ハマチ
- 2 マダイ
- 3 カンパチ
- 4 クロマグロ
- 5 フグ類
- 6 ヒラメ
- 7 シマアジ
- 8 その他（魚種名は： ）

II. あなたご自身のことについて伺います。

Q8 潜水作業に関してあなたが担当する業務は何ですか？

- 1 潜水作業に従事するダイバー
- 2 ダイバーを直接支援する業務（支援員、船長、潜水監督など）
- 3 ダイバーを間接的に支援する業務（安全管理者、潜水計画管理者など）
- 4 潜水作業には関わっていない
- 5 その他（ ）

Q9 現在の業務にたずさわるようになってどのくらいですか？

- 1 5 年以下
- 2 6-10 年
- 3 11-15 年
- 4 16-20 年
- 5 21-25 年
- 6 26-30 年
- 7 31 年以上

Q10 あなたが所属する組織名はなんですか？

- 1 法人企業〔会社名： 〕
- 2 漁業協同組合〔漁協名： 〕
- 3 自営（自分または家族が経営する会社）
- 4 無所属（アルバイトやパートタイマーなど）
- 5 その他〔組織団体名： 〕

Q11 潜水作業の安全に関してなにか取り組みを行っていますか？

- 1 定期的に安全大会を開催し、テーマの一つに潜水を取り上げている
- 2 専門家を招いて潜水作業の安全に関する講習会を開催している
- 3 組合主導で潜水作業者の健康診断を実施している
- 4 潜水作業から要望のあったときに意見交換を行い、問題点と対策を協議している
- 5 特に何も実施していない
- 6 その他 ()

Q12 今後潜水作業のガイドラインを策定する際には、養殖現場の実際の作業について詳しく調査する必要があります。この現地調査にご協力をお願いしますでしょうか？

- 1 調査に協力できる [ご連絡先：]
- 2 もう少し詳しい話を聞きたい [ご連絡先：]
- 3 検討のうえ回答したい
- 4 調査に協力することは難しい
- 5 わからない

以上です。ご協力いただき誠にありがとうございました。ご意見等がございましたら、以下に記載してください。

[ご意見等]

Ⅲ．研究B：水産養殖場における潜水業務の現地調査と減圧症リスクの分析

研究要旨

研究Aによるアンケート調査から、水産養殖場では yo-yo 潜水が多く行われていることが明らかとなった。そこで本調査研究（研究B）では、実際に水産養殖の現場で行われている潜水業務を対象に調査を実施し、潜水の詳細について明らかにするとともに、その減圧症リスクに関しても知見の収集を試みた。調査対象とした 79 例の潜水業務のうち約 60% で yo-yo 潜水が行われていた。減圧症リスクの評価指標とした血管内皮微小膜胞体（Micro-Particle：MP）ならびに炎症性サイトカインの発現量は潜水後で高く、また yo-yo 潜水と非 yo-yo 潜水の比較では yo-yo 潜水で高かった。潜水等に特有な体内不活性ガス気泡の形成は yo-yo 潜水と繰り返し潜水時で多く検知された。この結果から、これらは減圧症リスク要因になり得ると考えられた。調査期間中には、軽微なものを含め減圧症の発症を認めなかった。潜水後の MP と炎症性サイトカイン発現量も過大ではなく、検知された不活性ガス気泡も低等級であったことから、今回調査対象とした潜水業務における減圧症リスクは概ね許容範囲内であると考えられた。しかしながら、今回の調査はごく一部の潜水業務を対象としたものであり、より厳しい条件下での業務もあることから、今後さらに調査を進めていく必要がある。

1．研究目的

本調査研究は、水産養殖の現場で実際に行われている潜水業務を観察し、それらの業務に従事する潜水者に対していくつかの調査を行うことで、減圧症リスクの程度を評価するとともに、そのリスク要因について明らかにすることを目的とした。研究Aで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、水産養殖場では、比較的高頻度で潜水業務が行われており、潜水パターンとしては箱型（矩形）潜水パターンのほか、短時間の潜水を繰り返して行う yo-yo（楕型）潜水が多く用いられていることが分かった。yo-yo 潜水は潜水漁業者や海士で多く用いられており、重篤な脳型や中枢神経系

の減圧症事例が報告されている^{1,2,3)}。養殖業の盛んな欧米では養殖場における yo-yo 潜水で潜水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⁾。

我が国においても、水産養殖場での減圧症発症事例に関する報告⁵⁾はあるものの、症例数は少なく、知見の蓄積も乏しい。しかしながら、欧米諸国と同様に yo-yo 潜水が多用されているのであれば、それに起因するリスクの顕在化や重篤化の恐れがあり、十分な予防対策を講じていく必要がある。そのためには、養殖場における潜水業務の実態を把握するとともに、yo-yo 潜水に伴う減圧症リスクの程度やその

要因について明らかにする必要がある。そこで、本研究では水産養殖の現場で実際に行われている潜水業務を観察するとともに、潜水記録計を用いて潜水の時系列的な変化(潜水プロファイル)を調査し、yo-yo 潜水の実態を把握した。また、それらの潜水が生体に及ぼす影響についても調査を行った。近年の研究では、減圧症症状のびまん性を説明し得ることから、血管内皮障害が減圧症発症要因に影響する可能性が示唆されている⁶⁾。本研究においても、yo-yo 潜水によって血管内皮損傷が生ずるとし、その機序として、潜水による様々な刺激によって内皮細胞から微小膜小胞体(microparticle: MP)が産生され、それを核として不活性ガス気泡が形成され、内皮への機械的な刺激を生じること、炎症応答が亢進すると仮定する。これらのことを確認するために、潜水前後の被験者から血液や唾液等の検体を採取し、それらを分析するとともに、潜水後の被験者に超音波を用いた体内気泡検知を行い、気泡形成の有無やその程度を調査した。これら一連の調査結果を評価することで、水産養殖場における yo-yo 潜水の実態とその減圧症リスクの程度、並びにリスクに関わる要因について明らかにすることを目的とした。

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。調査プロトコールを図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計画し、東京慈恵会医科大学倫理委員会による承認

を受けた。

[調査項目]

- ①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
- ②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
- ③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
- ④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
- ⑤潜水後の Visual analogue scale (VAS) による自覚的疲労感の評価

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士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。

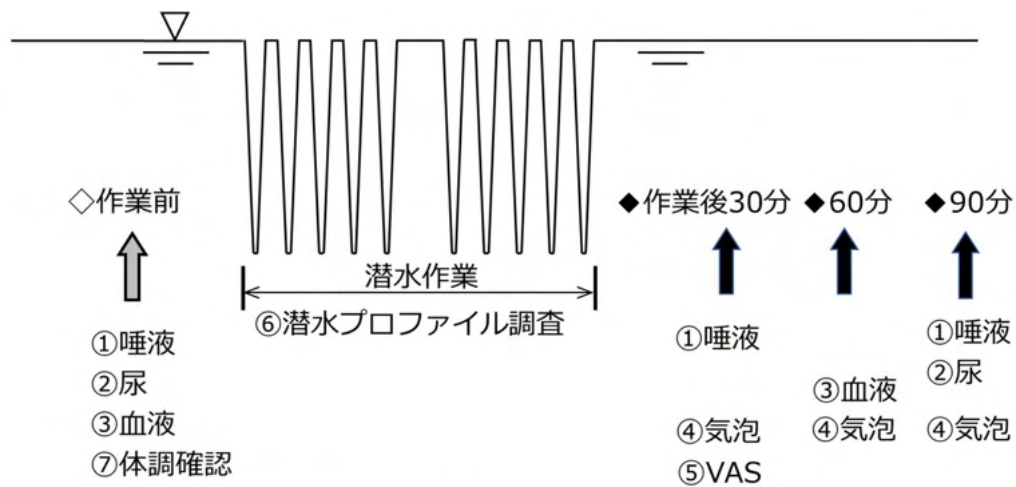


図-1. 調査プロトコール

2-2. 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、図 2 参照）を携行させ、潜降開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、潜水業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の特定を試みた。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。潜水プロファイルデータのサンプリングは 5 秒毎とし、記録したデータは、専用のインターフェースを介してコンピュータに転送した後、解析を行った。



図-2 ReefNet Sensus Ultra Dive Logger

2-3. 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、図 3 参照）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不

活性ガス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。



図-3 超音波ドップラー気泡検知機

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。

2-4. 唾液中の各バイオマーカーの定量

減圧症の発症原因は明らかではない。減圧症症状はびまん性を有することから、不活性ガス気泡等による塞栓や血流障害のほか血管内皮障害が発症ならびに症状進展要因であり、特に血管内皮障害による影響が大きいと考えられている⁷⁾。そこで、血管内皮障害の有無を知るために、潜水業務前後における炎症性サイトカインの発現量を調査する。そこで、唾液中に含まれる炎症性サイトカインを標的として調査を実施するために、潜水業務の前後で唾液の採取を行った。採取には米国 Salimetrics 社の流涎式唾液採取用器具（Saliva Collection Aid、図 4）を用いた。採取の際には、唾液採取用器具のストロー部分を口に含み、内部に唾液を流し



図-4. 流涎式唾液採取用器具

込みながら約 2ml 採取した。採取後は直ちにドライシッパー内に収容し、その後冷凍庫内にて-80℃で凍結保存した。サイトカインの定量と分析は、Salimetrics 社の SalivaLab (Carlsbad, CA) に依頼し、

ドライアイスを利用して発送した。唾液検体中の c 反応性蛋白 (CRP) および分泌性免疫グロブリン A (SIgA) は、Salimetrics Salivary Assay Kits for C-Reactive Protein (CRP; Cat. No. 1-2,102), Secretory Immunoglobulin A (SIgA; Cat. No.1-1,602) を用いて SalivaLab で二重に測定された。インターロイキン 1β (IL- 1β)、6 (IL-6)、8 (IL-8)、腫瘍壊死因子 α (TNF- α) を SalivaLab のプロトコール (Salimetrics Cytokine Panel) にしたがって二重に測定を実施した。

2-5. 微小膜小胞体 (MP) の調査

減圧症の臨床症状に関する検討から、発症には血管内皮障害の影響が強く疑われている⁸⁻¹¹⁾。近年、血管内皮障害のマーカーとして微小膜小胞体 (micro-particle: MP) が注目されている。MP は、アポトーシス細胞や活性化細胞から生じるサブミクロン小胞体 (直径 $0.1 \pm 1.0 \mu\text{m}$) であり、細胞表面蛋白質、細胞質および核成分を保有し、親細胞に特異な表面マーカーを発現している。血管内皮は、損傷による活性化やリモデリング時に MP を産生することが知られている。これらのことから、血管内皮由来の MP とその発現マーカーは内皮の状態を示していると考えられている。ただし、血管内皮 MP は通常の生理環境下でも発現するため、循環中にはある程度の MP が存在する。MP が低値であれば有害ではないが、何らかの刺激等により MP が急激に上昇すると病理学的障害につながる可能性がある。

今回の調査研究において減圧症リスク

の指標として血管内皮 MP の発現量を用いることとした。内皮細胞のアポトーシスによって産生される MP には CD31⁺ (PECAM-1 抗原) Annexin V⁺ と CD144⁺ (VE-Cadherin 抗原) が報告されていることから¹²⁾、検体の分析に際してはこの 2 種類について調査を実施することとした。

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 (~5mL) 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 4~8 日以内に分析を実施した。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。プロトコールの照査を以下に記す。

2-5-1 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。

2-5-2 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。

2-5-3 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、遮光にて室温で、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、遮光にて室温で、

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

2-5-4 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。

2-5-5 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。

2-5-6 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。

2-5-7 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。

2-5-8 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。

2-6. 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¹³⁾。

2-7. 統計的解析

調査で得られたデータは平均値±標準偏差 (SD) として示した。比較可能な 2 群間の統計的優位性を評価するために、ウェルチの t 検定 (Welch's t-test) を用い、p 値が 0.05 未満の場合を統計的に有意とした。相関に関しては、ピアソンの積率相関係数 (Pearson correlation coefficient, PCC) を用いた。

3. 結果

現地調査は養殖業務繁忙期となる令和 6 年夏季から実施する予定であったが、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、台風の発生数が例年よりも多く、またそれらが夏季以降も収束することなく 10 月後半まで続いたことから、現地調査の開始が予定より大幅に遅れることとなった。そのため令和 7 年度にも継続して調査を実施した。

調査は延べ 12 カ所の養殖場で実施し、内訳はブリ類養殖場×6、クロマグロ養殖場×4、スギ養殖場×1、モズク養殖場×1 であった。全てで日常的に潜水業務が行われていた。調査を実施した潜水業務の主な目的は、感染症防止のための斃死魚の排除、生け簀網の状態確認、養殖魚の捕獲、生け簀網の交換、別生け簀への養殖魚の移動など様々であり、潜水装備や潜水方式 (送気式 or SCUBA)、潜水管理方法等も養殖事業所によって異なっていたことから、潜水条件や潜水作業負荷についても様々であった。調査を実施した潜水業務の状況を図 5 に示す。



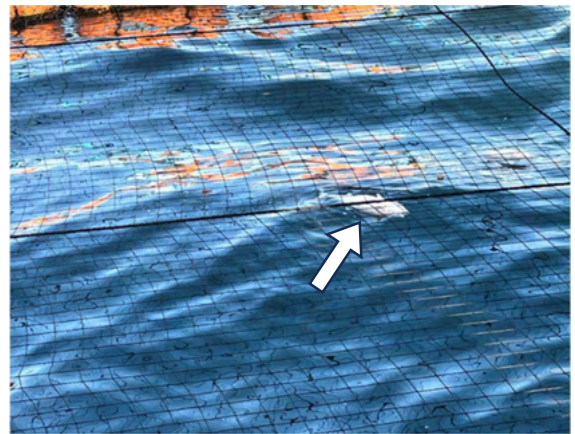
養殖生け簀(全景)



養殖生け簀(設置状況)



養殖生け簀の状況



斃死魚の回収



送気式潜水



OSCUBA 潜水

図-5. 調査時の潜水作業状況

3-1. 被験者

令和 5 年度に実施したアンケート調査（研究 A）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 52 名女性 1 名の計 53 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 52 名を対象に調査を実施し、50 名から検体を採取した。被験者の年齢は、 32.7 ± 9.5 歳（範囲：22-66 歳）で、身長は 171.2 ± 6.1 cm（範囲：158-189cm）、体重は 74.9 ± 14.3 kg（範囲：50-104kg）、BMI は 25.5 ± 4.6 （範囲：17.7-36.8）であった。被験者の年齢及び BMI の

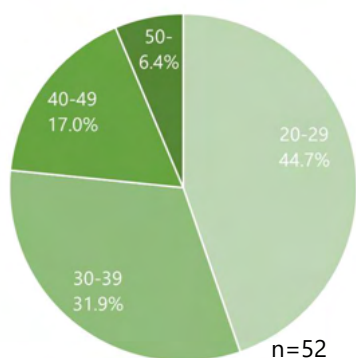


図-6. 被験者の年齢構成

状況を図 6 および図 7 に示す。図からも明らかなように被験者の中心年齢は 20 代と 30 代であった。BMI 値は 2017 年度厚生労働省国民健康栄養調査に基づく年代別 BMI の分布と比較してほぼ同様の傾向であったことから、今回の被験者は平均的な健康状態にあったと考えられる。

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ではなく、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。

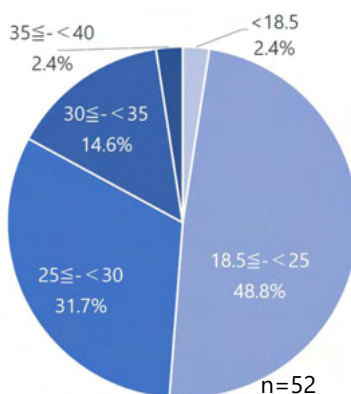


図-7. 被験者の BMI 状況

3-2. 潜水プロフィール

延べ 79 回の潜水業務について調査を実施した。潜水プロフィールの調査結果を表 2 並びに図 10-1～10-76 に示す。図表からも明らかなように、今回の調査では様々な潜水パターンが確認された。これらは、調査した事業所における養殖魚種が異なっていたことや同じ魚種においても事業所毎に養殖方法に差異があったこ

とによるものである。また、養殖魚の育成過程において潜水作業の目的が異なっていたことも影響している。すなわち、今回の調査においても、潜水業務の目的が斃死魚の回収や生け簀の点検等のほかに、養殖魚の水揚げ、生け簀の交換など多岐にわたるものであった。

調査した潜水プロフィールのうち、潜水業務中に潜水深度がほぼ一定である海

藻類養殖における潜水業務を除いては、ほぼ全ての潜水業務において複数回の潜水が繰返し行われていた。しかしながら、その様子は異なるものであり、例えば次の潜水までの時間（インターバル）が数分程度のものから数時間ともなる例が認められた。yo-yo 潜水は「短時間の潜水を高頻度で繰り返し行う潜水様式」であるが、具体的に定義されたものはない。そこで、今回の調査研究においては、yo-yo 潜水を以下のように定義した。①潜降浮上を伴う 1 回ごとの潜水が全て無減圧限界内のものであり、②水面までの浮上もしくは水深 3 m 程度以上の潜降浮上を頻繁に行い、③次回潜水開始までの時間（インターバル）が 20 分以内であることを yo-yo-潜水の条件とした。これらの条件に合致しない場合は、別の潜水が再び行われたものとし、それらは「繰り返し潜水（repetitive diving）」と評価した。なお yo-yo 潜水条件策定に際しては、信頼性が高く評価されているカナダ DCIEM 減圧表¹⁴⁾を参考とした。

潜水パターンに関しては図 8 に示す 4 パターンに分類して評価した。これらにより、調査した 79 回の潜水業務のうち、46 回で yo-yo 潜水（図 8-①）、29 回で箱型潜水（図 8-②）、4 回で階段型潜水（図 8-③）をそれぞれ認めた。yo-yo 潜水以外の非 yo-yo 潜水では、箱型潜水パターンが多く、研究 A におけるアンケート調査結果と同様の傾向が認められた。また、一定時間経過後に再び潜水業務を行う繰返し潜水（図 8-④）は、48 回行われた。繰返し回数は平均 2.3 回であり、最大 4 回の繰返し潜水が行われた例もあった。

表 2 に示した「yo-yo 潜水回数」は、一連の yo-yo 潜水において行われた潜水の回数を示しており、「繰返し潜水」には実施された繰返し潜水回数を示している。

「開始時刻」は一連の潜水のうち最初の潜降を開始した時刻を、また「終了時刻」は、最終の潜水を終了して水面に浮上した時刻を示している。「業務時間」は開始時刻から終了時刻までの経過時間を示したもので、これには潜水時間の他水面インターバルも含まれている。「潜水方式」は、当該潜水業務に用いられた潜水方式を示しており、船上に設置したコンプレッサー（空気圧縮機）から送気ホースを介して空気が送気されるものを「送気式」とし、潜水者が空気を高圧充填したボンベを携帯して潜水したものを「SCUBA」とした。

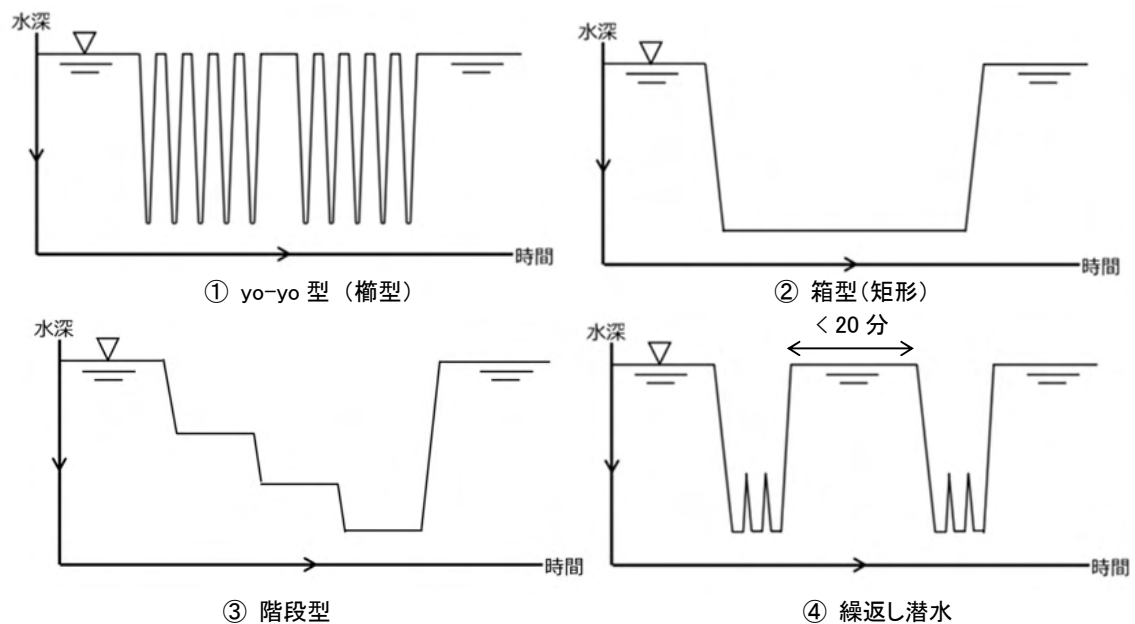


図-8. 潜水パターン(型)の分類

表 2 から明らかなように、潜水深度や時間は様々であり、一定の評価基準を設けることが難しい。そこで、当該潜水曝露が及ぼす影響については、exposure index (曝露指数) と呼ばれる Hempleman のルートモデルに基づく Q 値 ($Q = P\sqrt{t}$: P = 曝露圧力、 t = 曝露時間) を指標とした^{14, 15)}。これは潜水に伴う不活性ガス溶解排出動態に関する単一組織拡散理論に基づく減圧計算モデルの一つで、体内への不活性ガスは拡散によって血液から組織、あるいは組織から血液へと移行すると仮定するものである。減圧計算以外にも、Q 値は減圧症に至った多くの潜水事例との間に相関が認められたことから、潜水曝露の程度を評価する際に利用されている。すなわち、Q 値が 20 以下であれば減圧症リスクは低く、25 を超える場合には減圧症リスクが高いと評価されている^{16, 17)}。

今回調査した全ての潜水業務における、平均の最大潜水深度は 16.8 ± 6.5 m (範囲 : 4.5-26.3 m)、潜水業務時間は 58.4 ± 52.4 分 (範囲 : 5-233 分)、Q 値は 17.7 ± 7.7 (範囲 : 6.1-46.9) であった。今回の調査中に行われた潜水業務は通常行われる業務範囲のものであったことから、養殖場で行われる平均的な潜水業務の状況を示しているものと考えられる。yo-yo 潜水は 46 回行われ、その平均最大潜水深度は 16.2 ± 7.2 m (範囲 : 5.1-26.8 m)、潜水業務時間は 75.5 ± 57.1 分 (範囲 : 15-233 分)、yo-yo 潜水回数は 11.6 ± 12.0 回 (範囲 : 2-50 回)、Q 値は 20.6 ± 8.1 (範囲 : 7.1-46.9) であった。一方、非 yo-yo 潜水におけるそれらは、平均最大潜水深度 17.7 ± 6.2 m (範囲 : 4.5-26.7 m)、潜水業務時間は 33.2 ± 31.7 分 (範囲 : 5-123 分)、Q 値は 13.5 ± 4.8 (範囲 : 6.1-23.4)

であった。yo-yo 潜水と非 yo-yo 潜水では、潜水深度は非 yo-yo 潜水で深いものの、潜水業務時間では大きく異なり、yo-yo 潜水で長時間となる傾向が認められた。また、曝露指数の比較においても yo-yo 潜水で有意に高く（図 9）、総じて yo-yo 潜水で厳しい潜水条件となる傾向にあった。

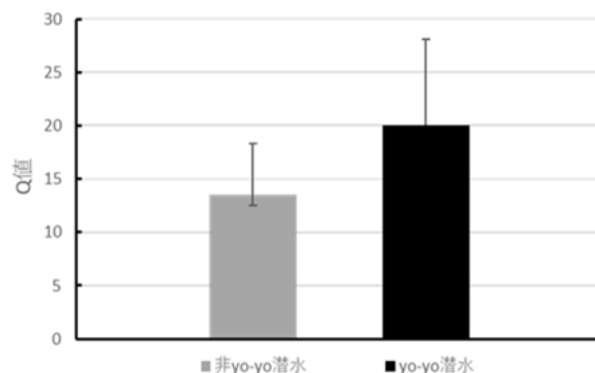
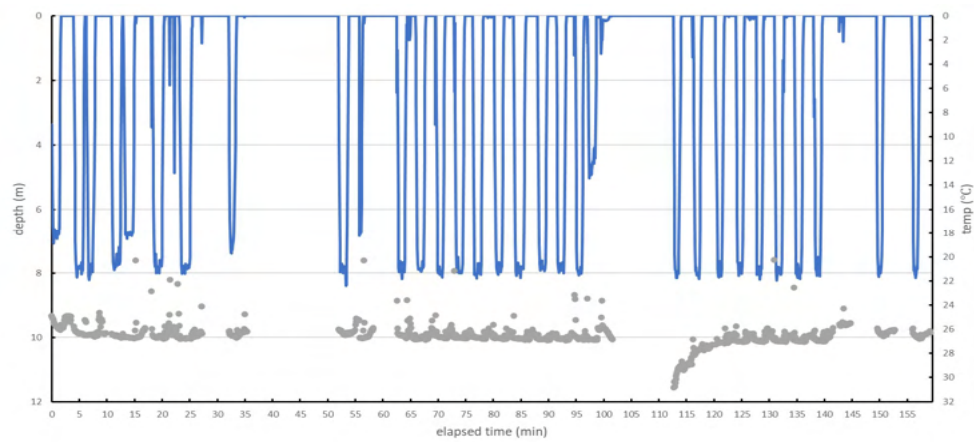


図-9. 非 yo-yo 潜水と yo-yo 潜水における Q 値

表-2. 潜水プロファイル

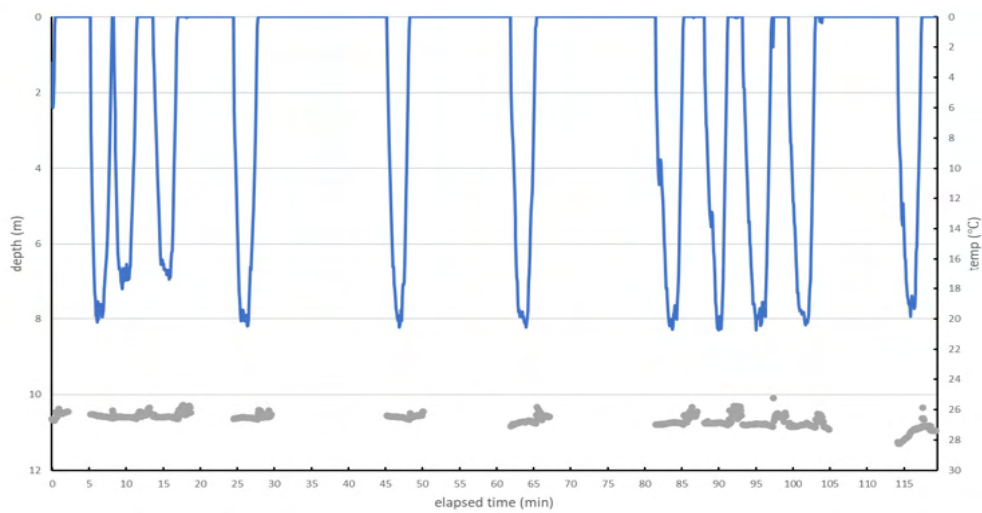
no	ID	潜水の型	yo-yo潜水回数	繰返し潜水	潜水方式	開始時刻	終了時刻	潜水業務時間(分)	最大深度(m)	Q 値
1	A-001	yo-yo	31		送気式	7:18	9:55	157	8.4	23.06
2	A-002	yo-yo	11		送気式	9:28	11:20	112	8.3	19.37
3	B-001	yo-yo	6		送気式	8:12	8:31	19	8	7.85
4	B-002	yo-yo	2		送気式	7:21	8:25	64	26.28	29.02
5	B-003	yo-yo	4		送気式	7:54	8:14	20	7.9	8.01
6	B-004	箱型		1	送気式	6:56	7:22	26	25.79	18.25
7		箱型		2	送気式	7:53	8:07	14	25.72	13.37
8	B-005	yo-yo	22		送気式	7:01	9:56	175	8.02	23.84
9	B-006	yo-yo	2		送気式	7:24	7:58	34	26.18	21.10
10	B-007	yo-yo	21		送気式	7:32	9:25	113	8.35	19.51
11	C-001	yo-yo	36		SCUBA	8:41	10:32	111	10.4	21.49
12	C-002	yo-yo	23		SCUBA	8:47	9:34	47	5.11	10.36
13	C-003	yo-yo	41		SCUBA	8:51	10:32	101	13.02	23.13
14	C-004	yo-yo	50		SCUBA	8:57	10:29	92	12.5	21.58
15	D-001	yo-yo	8		送気式	6:55	9:36	161	15.48	32.33
16	D-002	yo-yo	4		送気式	7:22	11:15	233	8.69	28.53
17	D-003	箱型			送気式	7:17	7:42	25	14.35	12.18
18	E-001	箱型		1	SCUBA	10:01	10:37	36	16.71	16.03
19		yo-yo	2	2	SCUBA	11:35	12:15	40	20.05	19.01
20	E-002	yo-yo	2	1	SCUBA	9:59	10:42	43	15.05	16.43
21		箱型		2	SCUBA	11:33	12:13	40	16.82	16.96
22	E-003	yo-yo	6	1	SCUBA	10:13	10:34	21	10.62	9.45
23		箱型		2	SCUBA	11:25	12:33	68	16.83	22.12
24	E-004	箱型			SCUBA	12:02	12:37	35	19.7	17.57
25	E-005	箱型		1	SCUBA	10:12	10:32	20	23.5	14.98
26		箱型		2	SCUBA	11:19	11:24	5	16.04	7.08
27	E-006	箱型		1	SCUBA	10:13	10:35	22	24.17	16.03
28		箱型		2	SCUBA	11:19	11:24	5	21.74	7.10
29	E-007	yo-yo	5		SCUBA	10:38	11:33	55	22.79	24.32
30	E-008	yo-yo	5		SCUBA	10:38	11:33	55	23.34	24.73
31	F-001	箱型		1	SCUBA	9:47	10:02	15	23.34	12.91
32		階段型		2	SCUBA	15:51	16:04	13	19.29	10.56
33	F-002	箱型		1	SCUBA	9:50	10:01	11	14.88	8.25

34		階段型		2	SCUBA	15:55	16:05	10	18.44	8.99
35	F-003	箱型		1	SCUBA	8:44	9:01	17	9.32	7.97
36		階段型		2	SCUBA	10:30	10:46	16	15.93	10.37
37		箱型		3	SCUBA	14:18	14:31	13	2:24	10.85
38	F-004	箱型		1	SCUBA	8:51	9:09	18	19.13	12.36
39		階段型		2	SCUBA	10:37	10:58	21	19.57	13.55
40		箱型		3	SCUBA	14:18	14:31	13	0:43	10.83
41	G-001	箱型		1	送気式	8:19	9:21	62	4.49	11.41
42		箱型		2	送気式	10:35	12:30	115	5.67	16.80
43	G-002	箱型		1	送気式	8:59	10:33	94	5.43	14.96
44		箱型		2	送気式	11:11	12:33	82	6.97	15.37
45		箱型		3	送気式	13:13	15:15	122	20:52	17.53
46	H-001	yo-yo	11		送気式	6:45	7:39	54	5.87	11.66
47	H-002	yo-yo	7		送気式	9:25	10:11	46	11.49	14.58
48	K-001	yo-yo	11		送気式	7:19	8:12	53	8.43	13.42
49	K-002	yo-yo	19		送気式	7:06	9:48	162	9.2	24.44
50	L-001	箱型		1	送気式	8:29	8:48	19	22.18	14.03
51		yo-yo	7	2	送気式	10:20	10:53	33	20.3	17.41
52	L-002	yo-yo	5	1	送気式	8:20	8:55	35	21.64	18.72
53		yo-yo	6	2	送気式	10:18	10:47	29	7.79	9.58
54	L-003	yo-yo	4	1	送気式	8:16	8:55	39	20.69	19.17
55		yo-yo	4	2	送気式	10:20	10:54	34	20.32	17.68
56	L-004	yo-yo	5		送気式	7:23	7:51	28	20.39	16.08
57	L-005	yo-yo	6		送気式	7:14	8:37	83	22.29	29.42
58	L-006	yo-yo	4		送気式	7:24	7:51	27	20.39	15.79
59	M-001	yo-yo	31		送気式	7:30	10:25	175	10.82	27.54
60	M-002	yo-yo	11		送気式	7:47	10:31	164	26.66	46.95
61	M-003	yo-yo	8	1	送気式	7:38	9:35	117	26.76	39.76
62		箱型		2	送気式	10:02	10:30	28	26.73	19.44
63	M-004	yo-yo	31		送気式	7:28	10:29	181	7.69	23.80
64	M-005	yo-yo	7		送気式	7:32	9:22	110	26.75	38.54
65	M-006	yo-yo	34		送気式	7:52	10:43	171	8.26	23.88
66	N-001	箱型		1	SCUBA	9:27	9:33	6	21.03	7.60
67		yo-yo	4	2	SCUBA	10:00	10:57	57	23:31	24.14
68	N-002	yo-yo			SCUBA	11:11	12:10	59	24.33	26.37
69	N-003	箱型		1	SCUBA	8:55	9:01	6	14.91	6.10
70		yo-yo	2	2	SCUBA	9:32	9:53	21	23.42	15.31
71		yo-yo	4	3	SCUBA	10:30	10:55	25	24.58	17.29
72		yo-yo	2	4	SCUBA	14:30	15:05	35	21.52	18.65
73	N-004	箱型		1	SCUBA	8:54	9:02	8	14.76	7.00
74		箱型		2	SCUBA	9:45	9:51	6	23.23	8.14
75		箱型		3	SCUBA	14:32	14:56	24	13.26	11.40
76	N-005	yo-yo	5	1	SCUBA	9:03	9:52	49	23.1	23.17
77		yo-yo	3	2	SCUBA	10:13	10:36	23	22.67	15.67
78	N-006	yo-yo	6	1	SCUBA	8:54	9:41	47	21.15	21.36
79		yo-yo	3	2	SCUBA	10:11	10:26	15	24.01	13.17
mean			11.58					57.47	16.87	17.53
SD			12.17					53.10	6.84	7.89



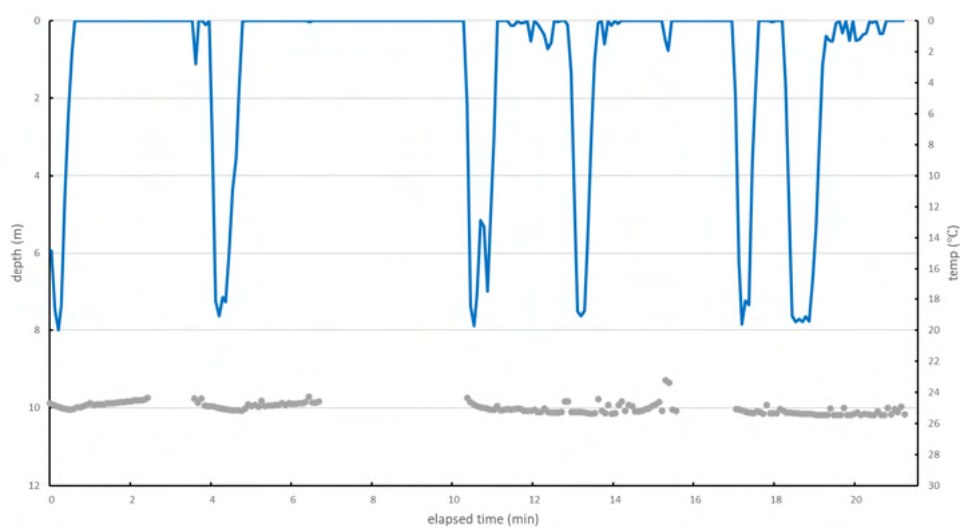
yo-yo

図 10-1
潜水プロ
ファイル
(A-001)



yo-yo

図 10-2
潜水プロ
ファイル
(A-002)



yo-yo

図 10-3
潜水プロ
ファイル
(B-001)

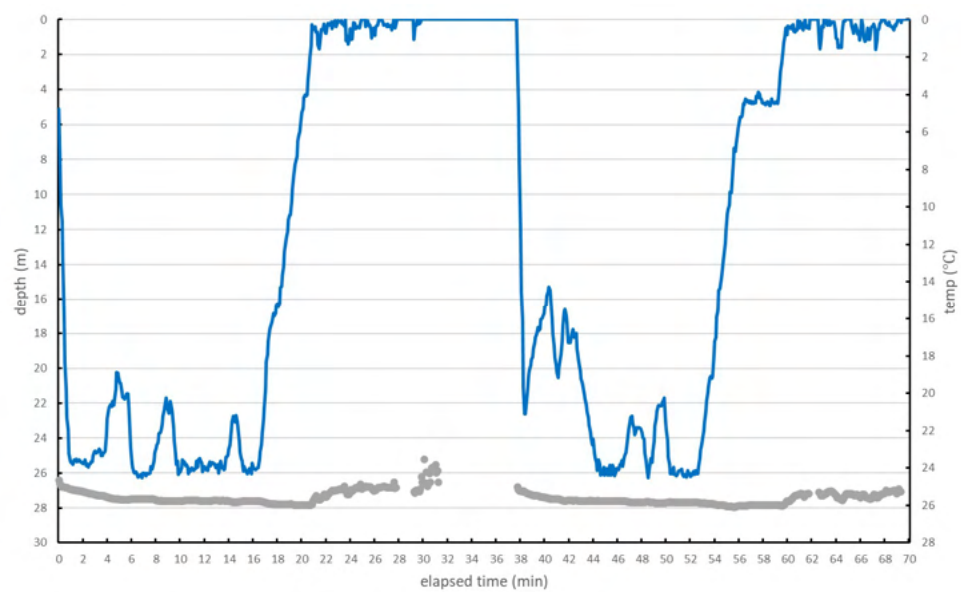


図 10-4
潜水プロ
ファイル
(B-002)

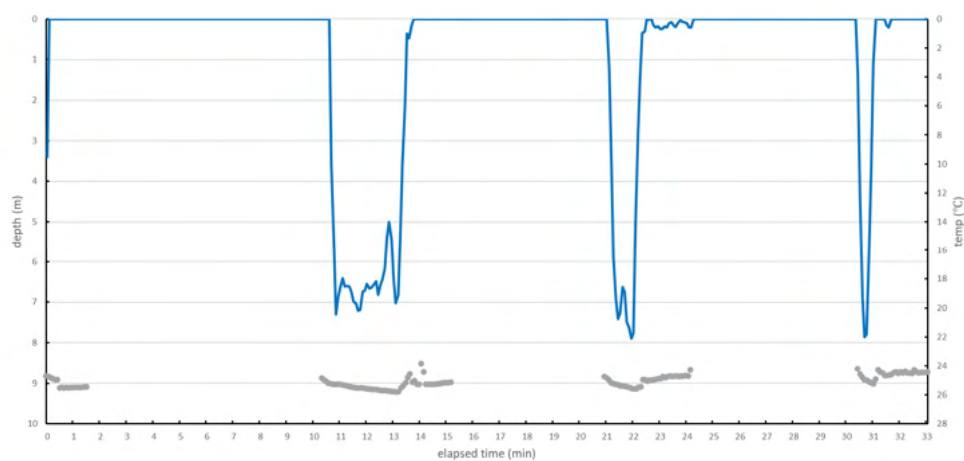


図 10-5
潜水プロ
ファイル
(B-003)

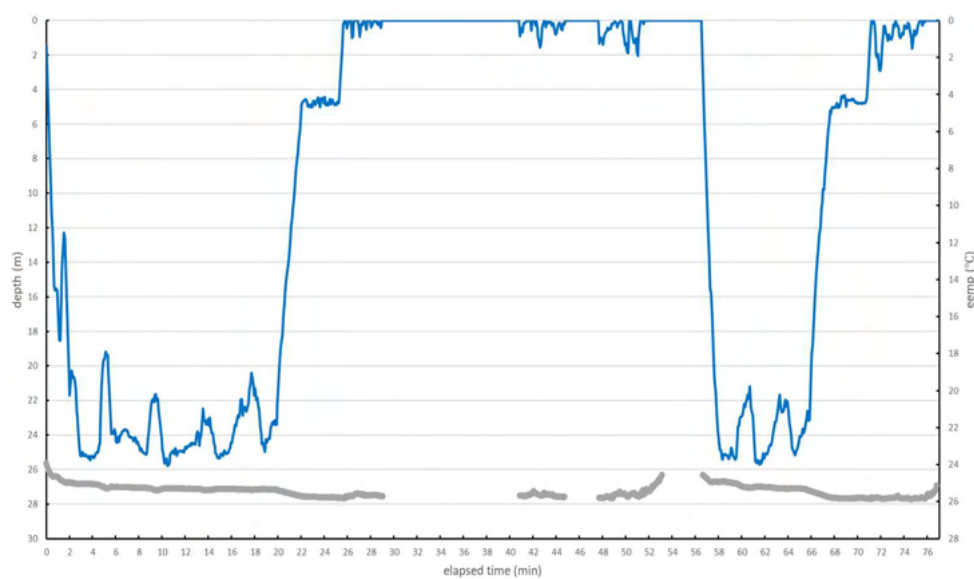
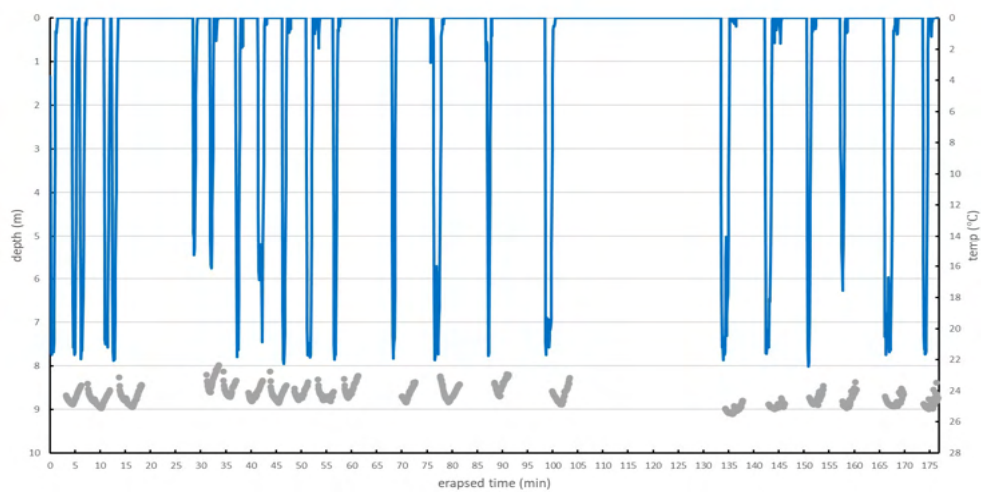


図 10-6
潜水プロ
ファイル
(B-004)



yo-yo

図 10-7
潜水プロ
ファイル
(B-005)

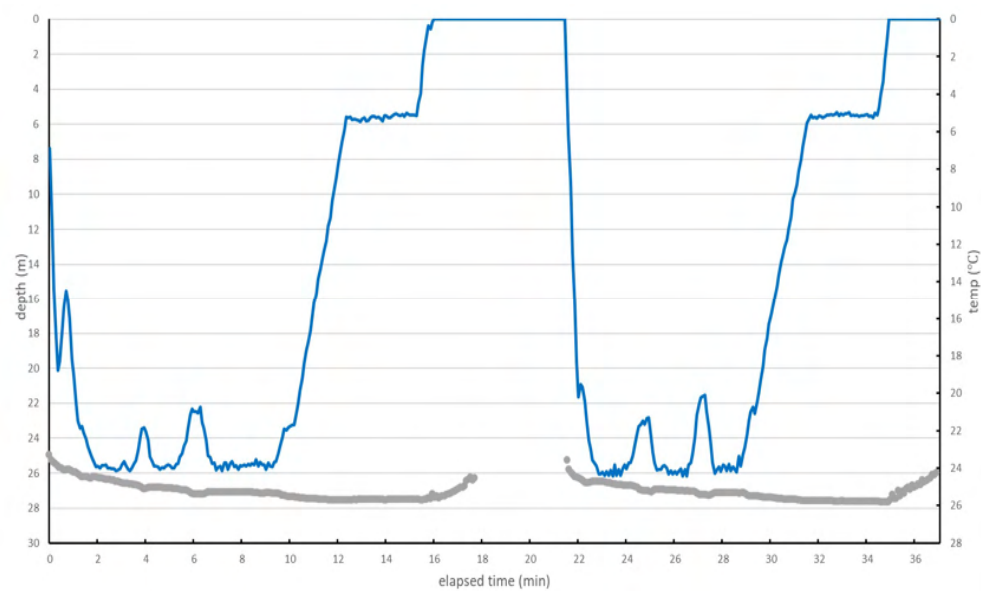
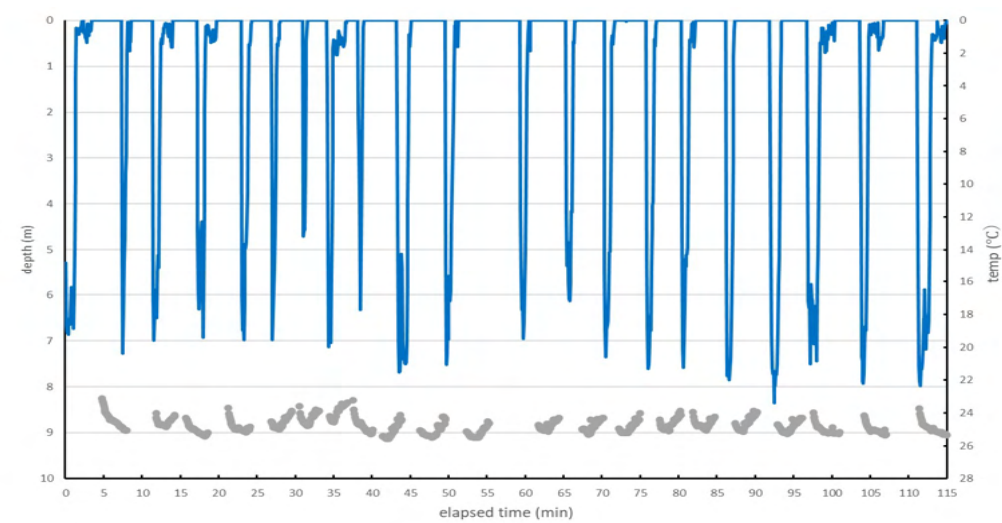
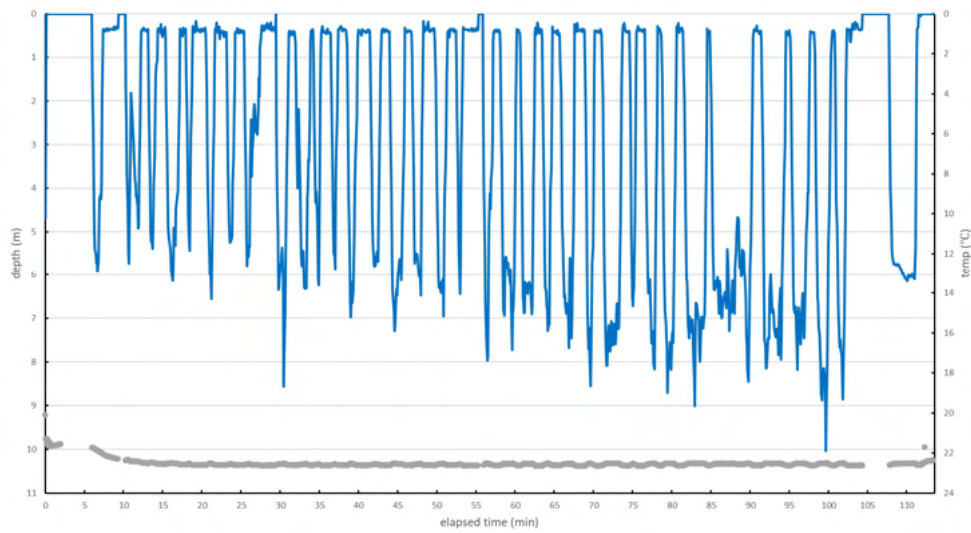


図 10-8
潜水プロ
ファイル
(B-006)



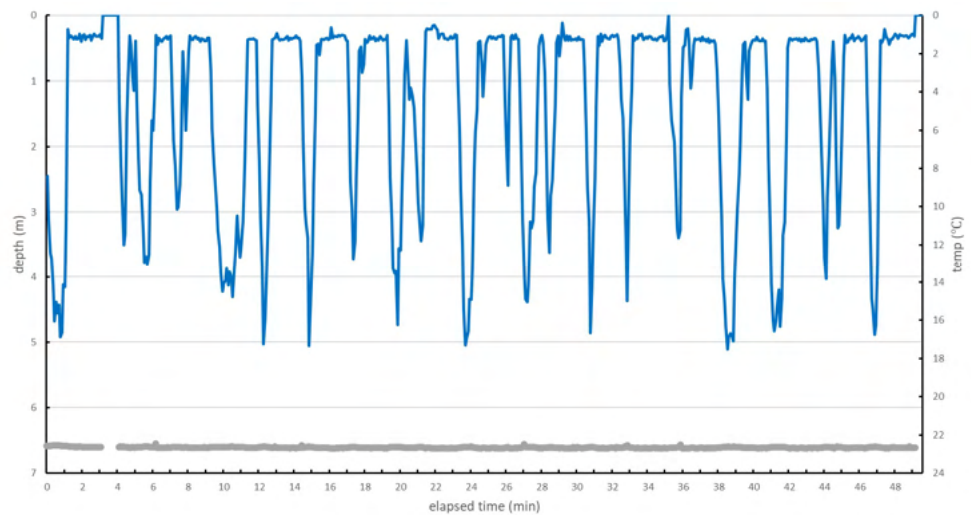
yo-yo

図 10-9
潜水プロ
ファイル
(B-007)



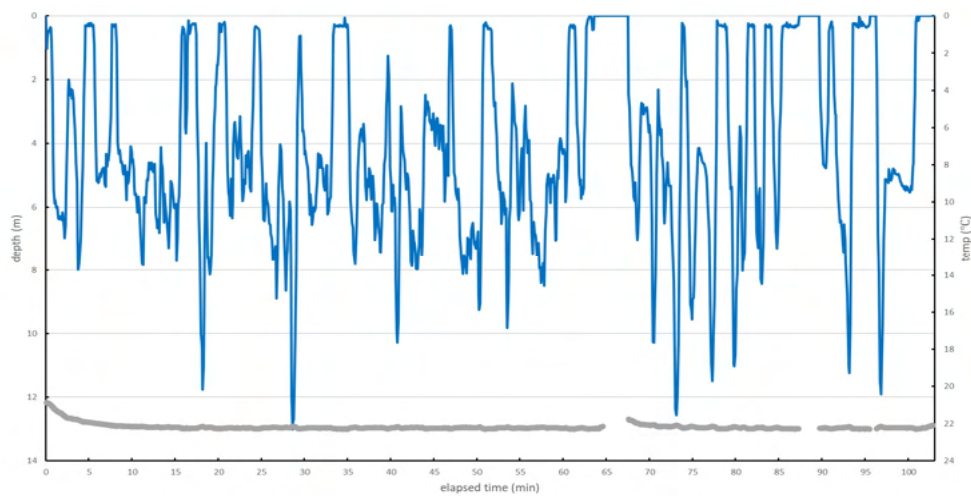
yo-yo

図 10-10
潜水プロ
ファイル
(C-001)



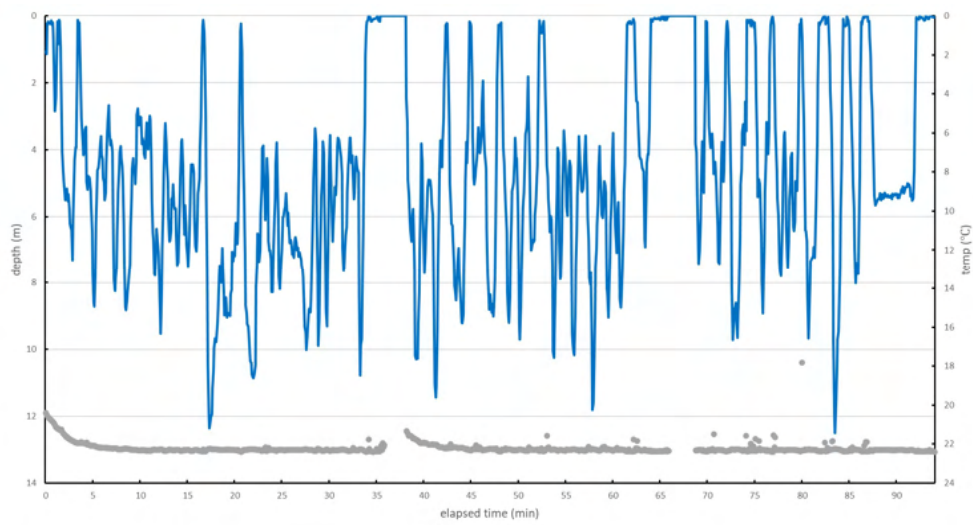
yo-yo

図 10-11
潜水プロ
ファイル
(C-002)



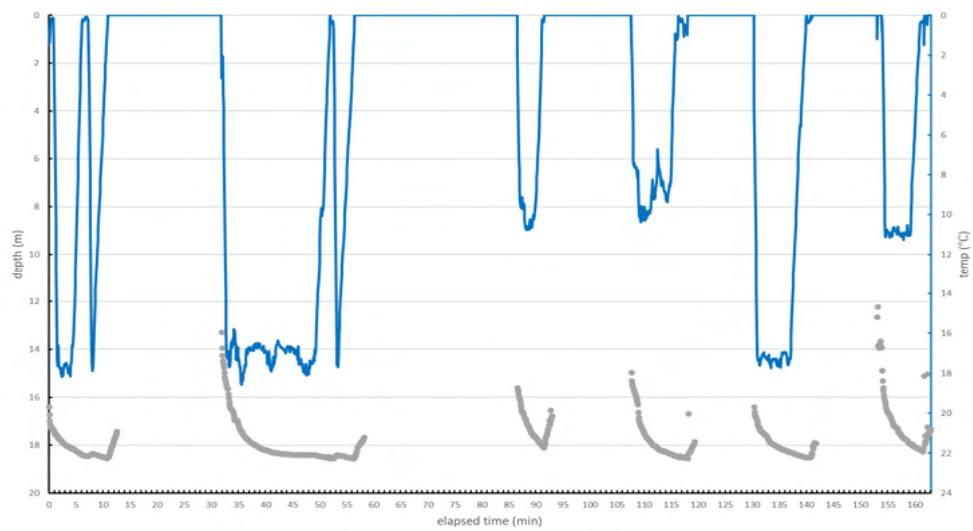
yo-yo

図 10-12
潜水プロ
ファイル
(C-003)



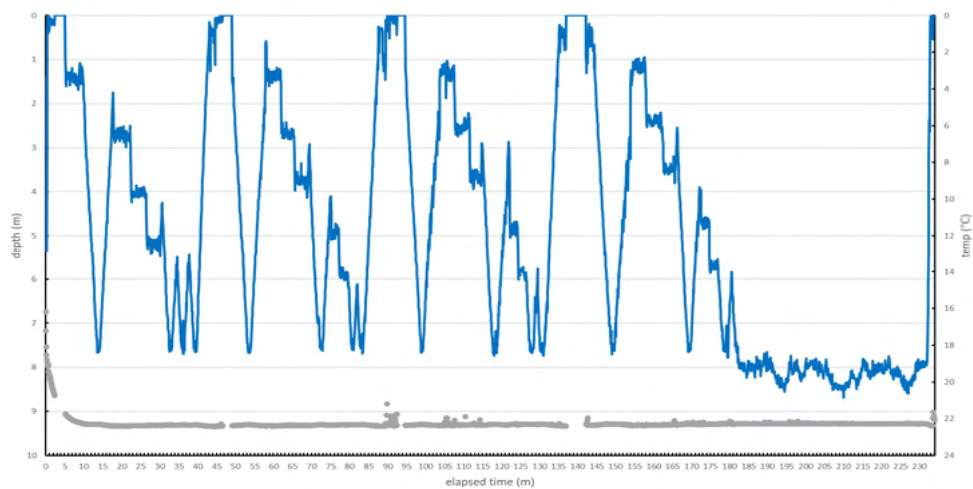
yo-yo

図 10-13
潜水プロ
ファイル
(C-004)



yo-yo

図 10-14
潜水プロ
ファイル
(D-001)



yo-yo

図 10-15
潜水プロ
ファイル
(D-002)

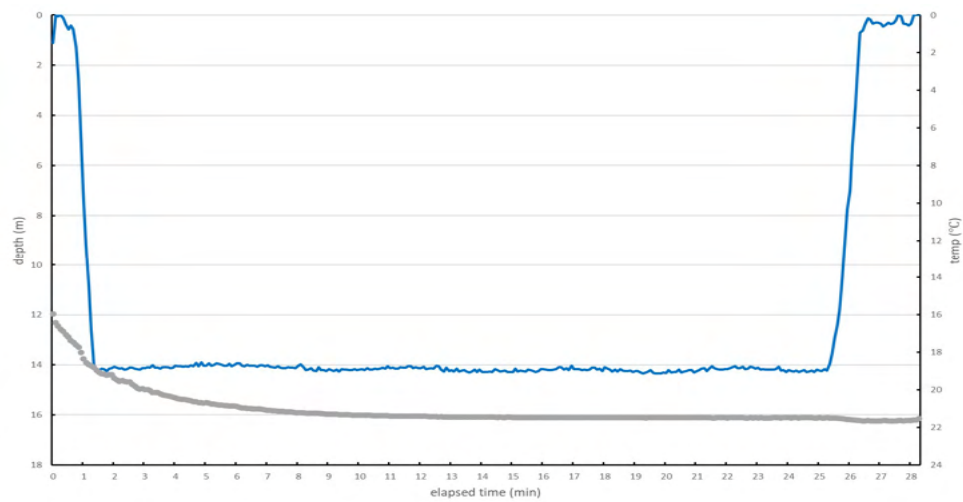


図 10-16
潜水プロ
ファイル
(D-003)

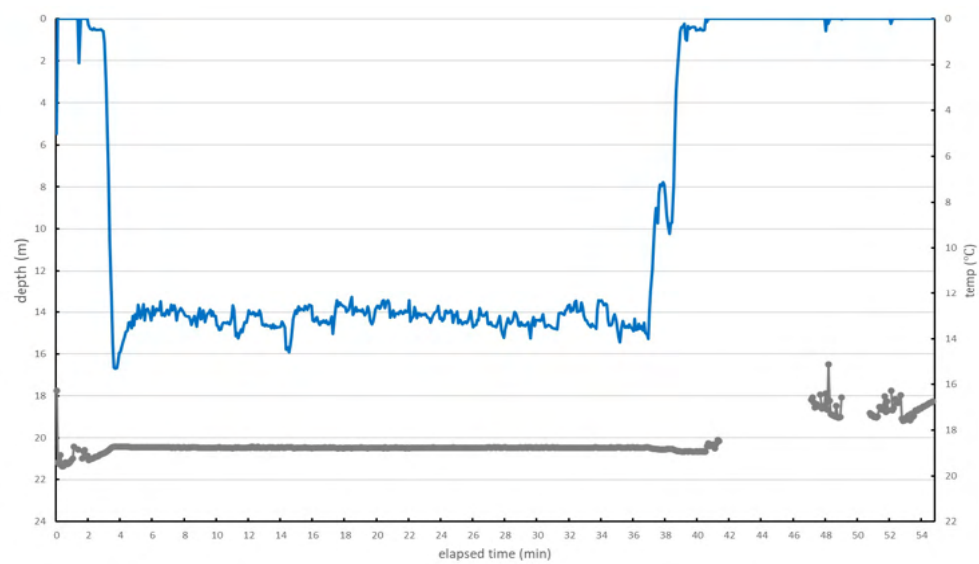


図 10-17
潜水プロ
ファイル
(E-001)

①

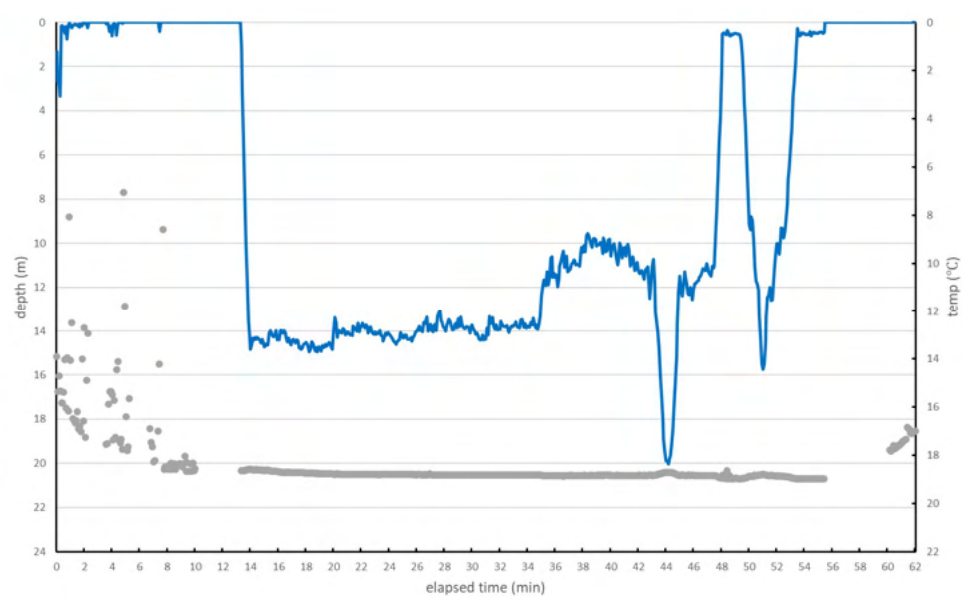


図 10-18
潜水プロ
ファイル
(E-001)

②

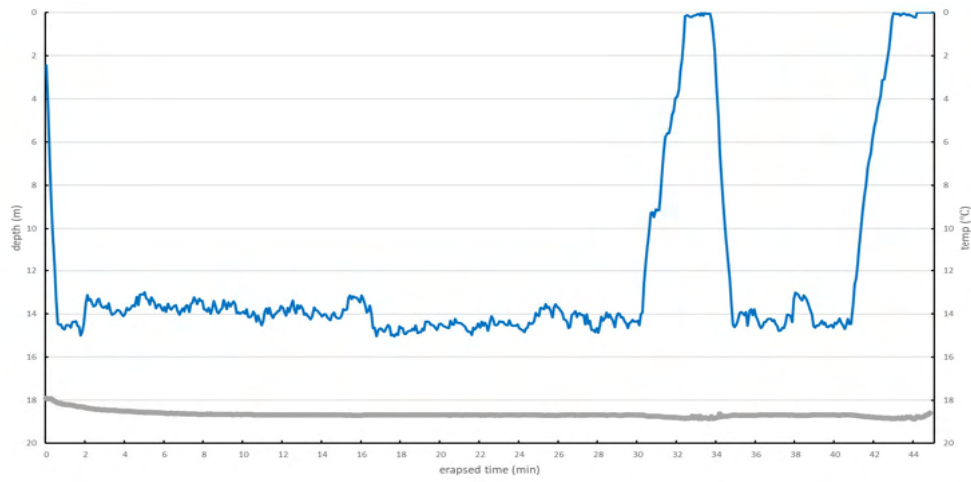


図 10-19
潜水プロ
ファイル
(E-002)
①

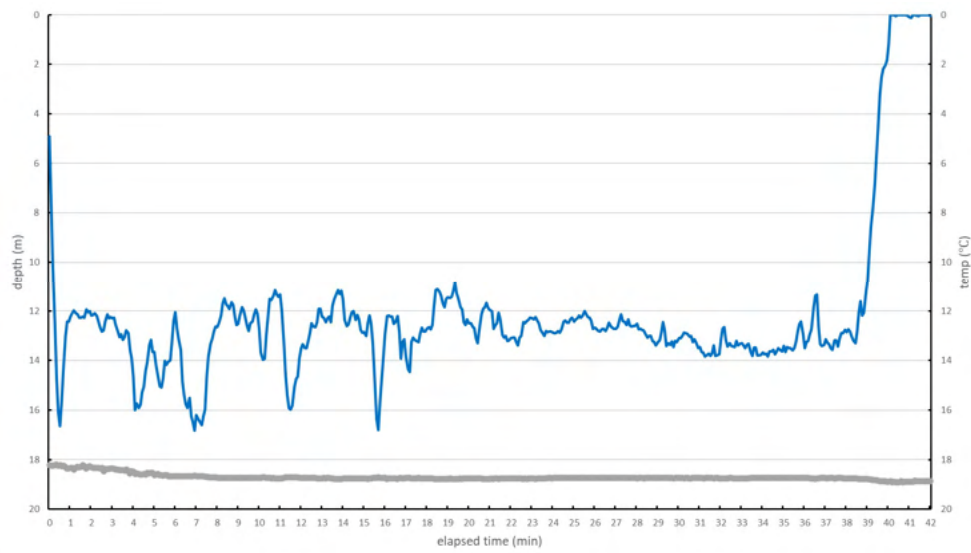


図 10-20
潜水プロ
ファイル
(E-002)
②

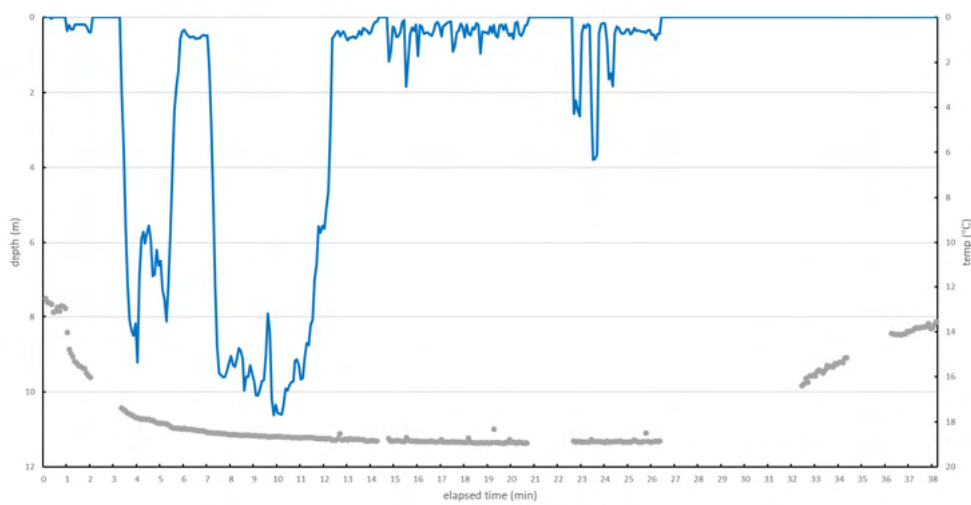


図 10-21
潜水プロ
ファイル
(E-003)
①

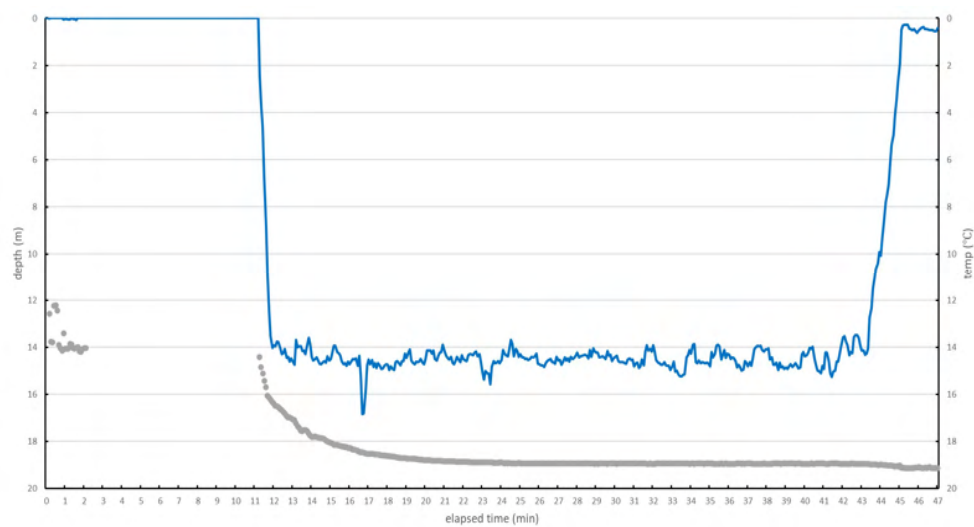


図 10-22
潜水プロ
ファイル
(E-003)
②

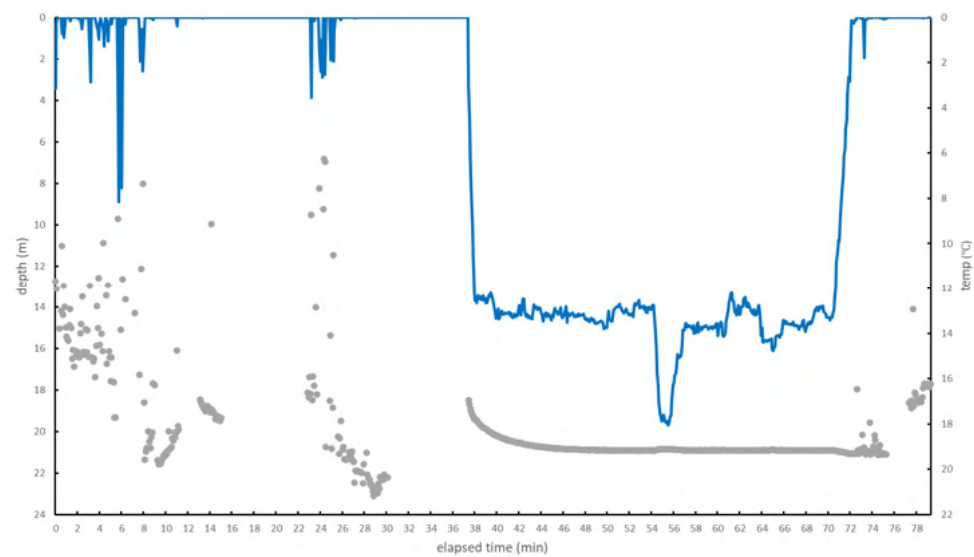


図 10-23
潜水プロ
ファイル
(E-004)

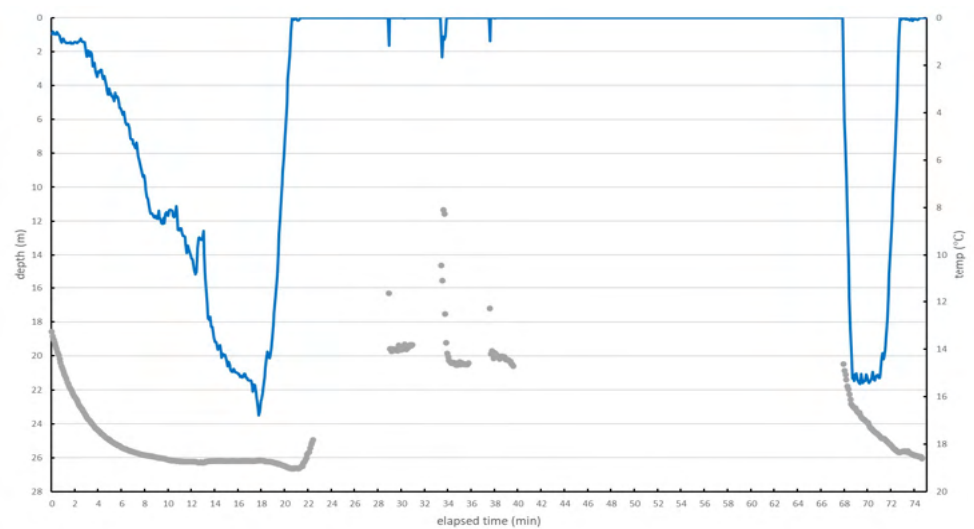


図 10-24
潜水プロ
ファイル
(E-005)

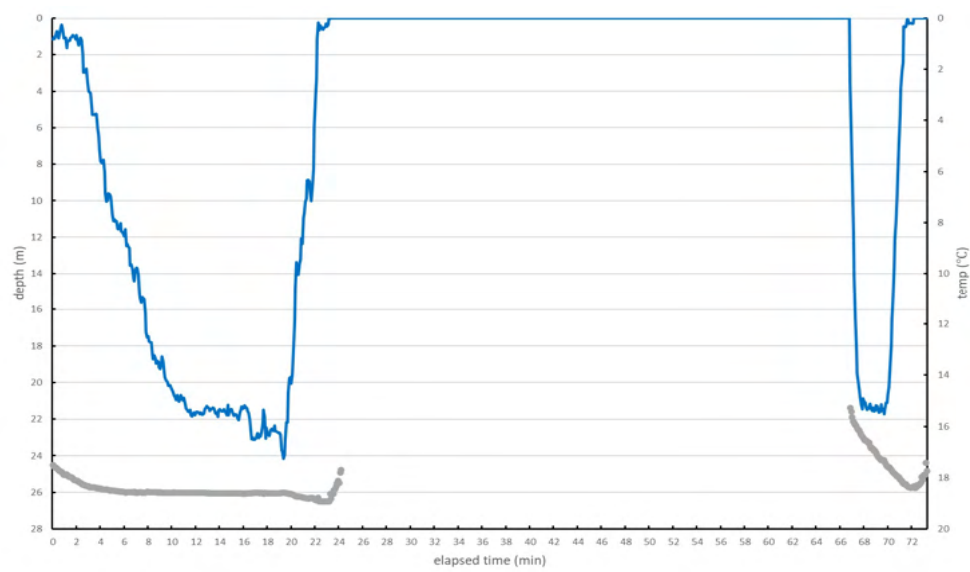
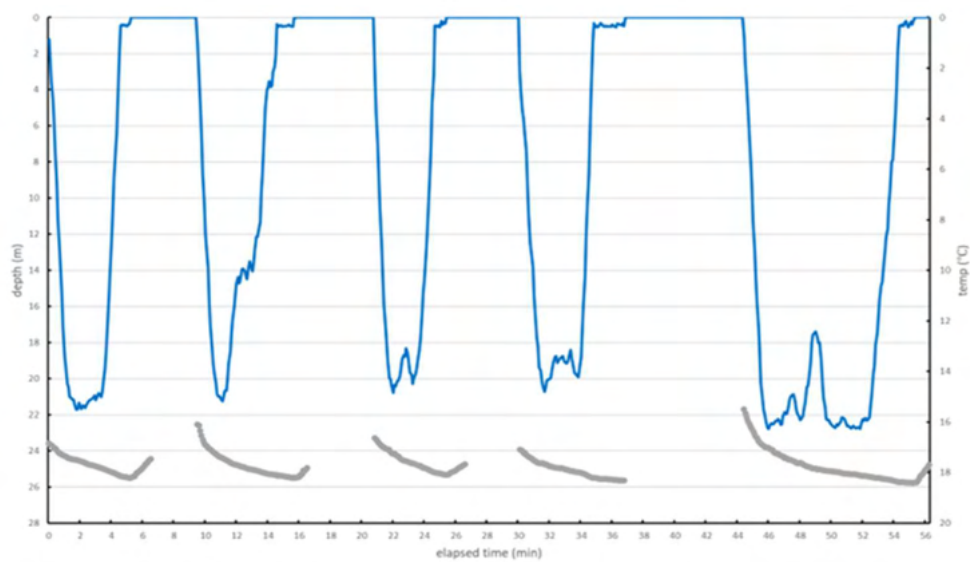
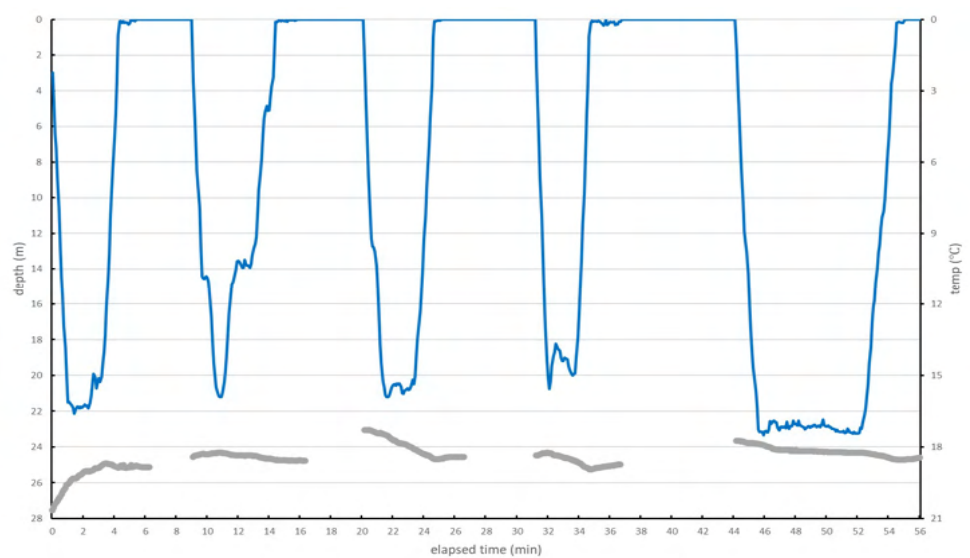


図 10-25
潜水プロ
ファイル
(E-006)



yo-yo

図 10-26
潜水プロ
ファイル
(E-007)



yo-yo

図 10-27
潜水プロ
ファイル
(E-008)

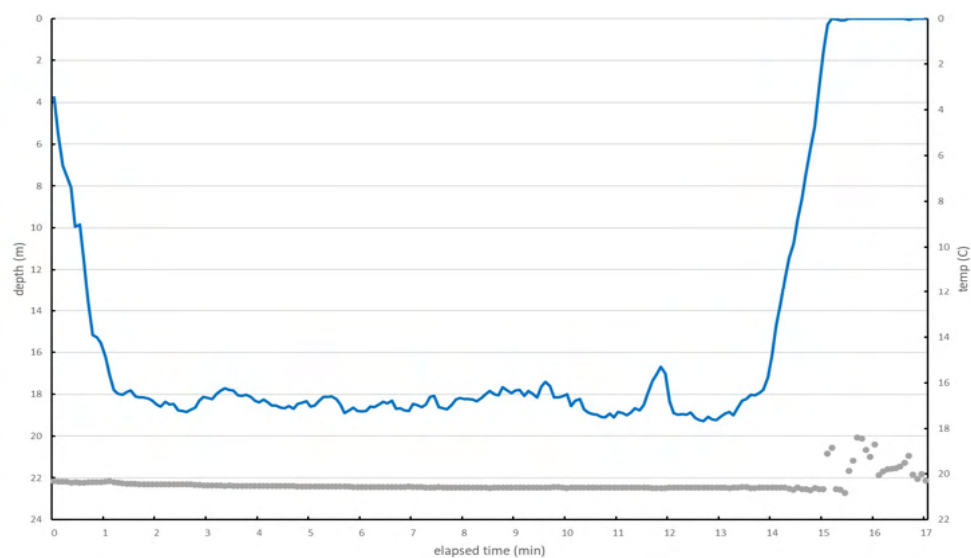


図 10-28
潜水プロ
ファイル
(F-001)
①

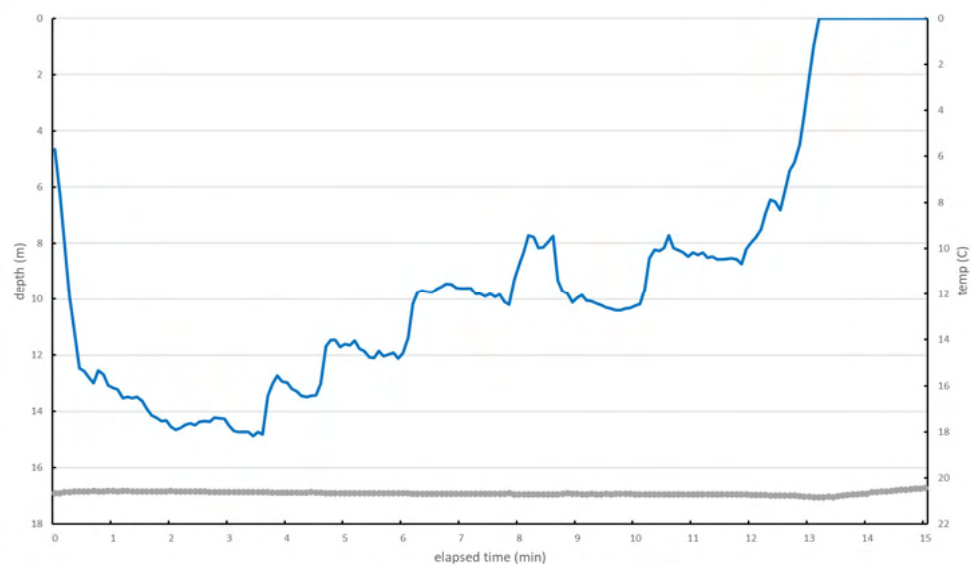


図 10-29
潜水プロ
ファイル
(F-001)
②

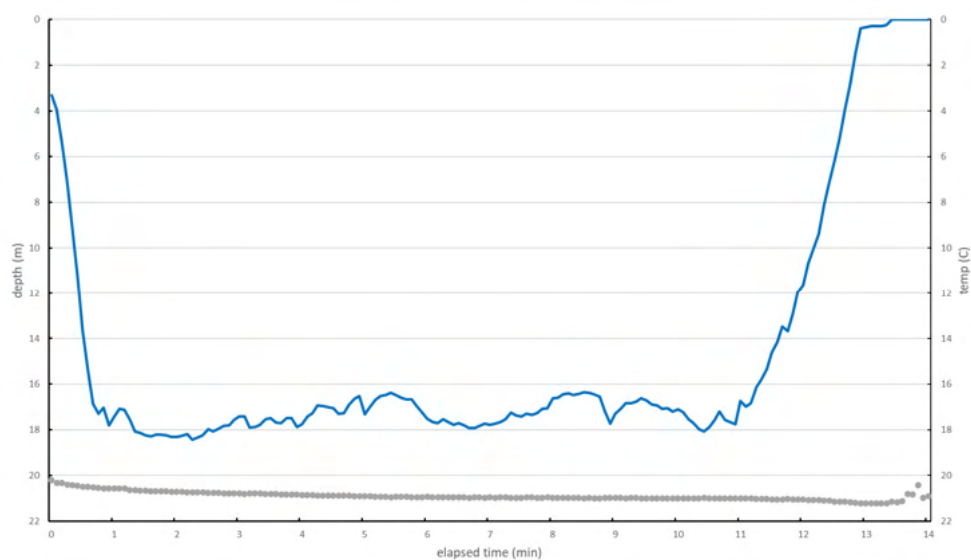


図 10-30
潜水プロ
ファイル
(F-002)
①

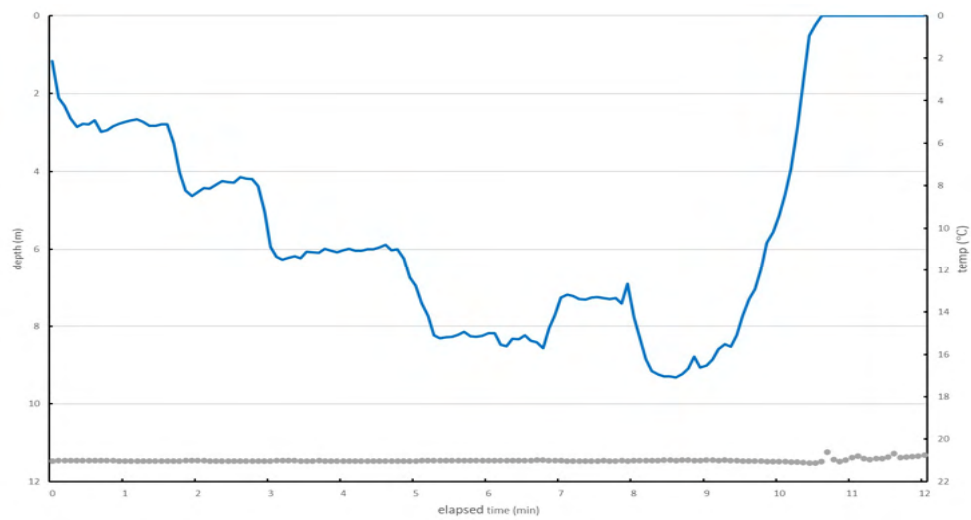


図 10-31
潜水プロ
ファイル
(F-002)
②

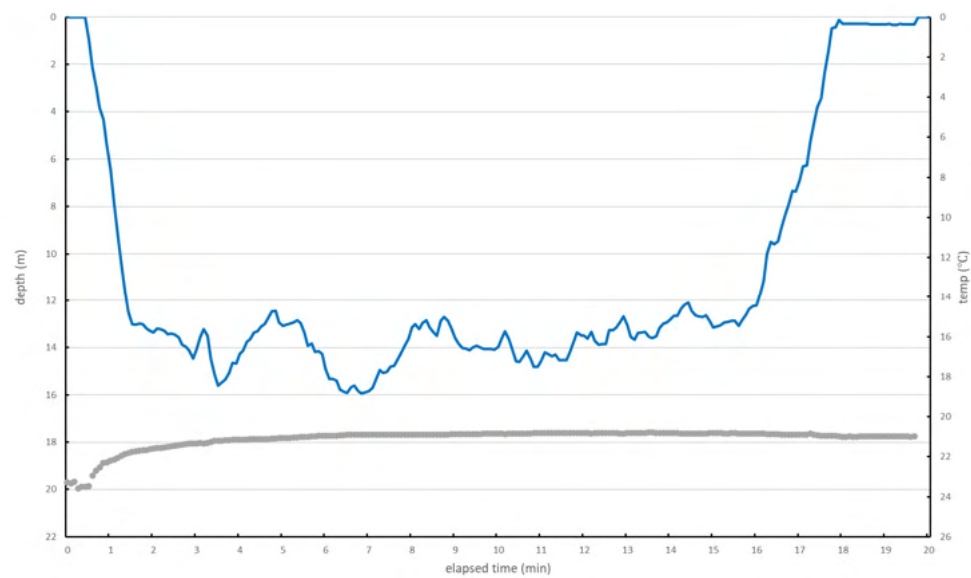


図 10-32
潜水プロ
ファイル
(F-003)
①

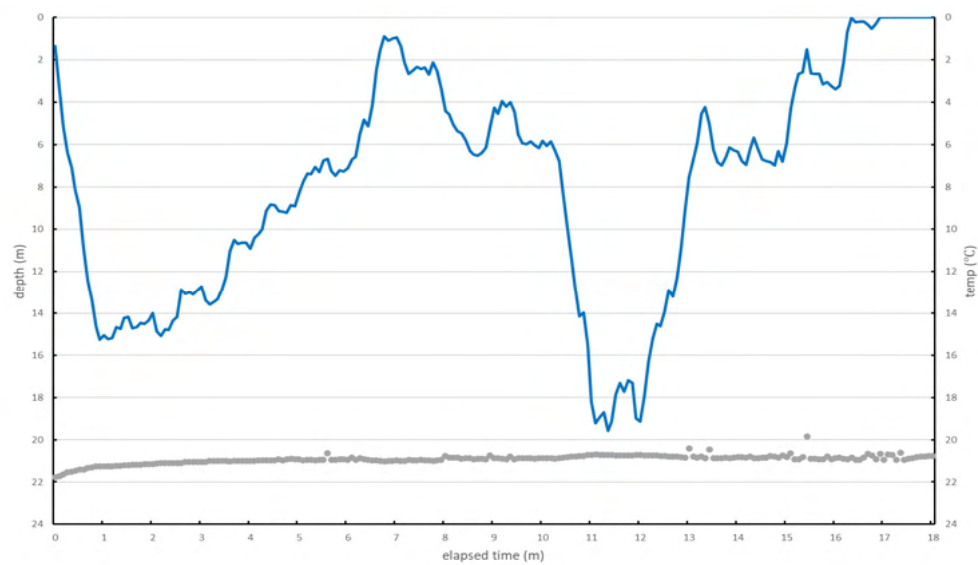


図 10-33
潜水プロ
ファイル
(F-003)
②

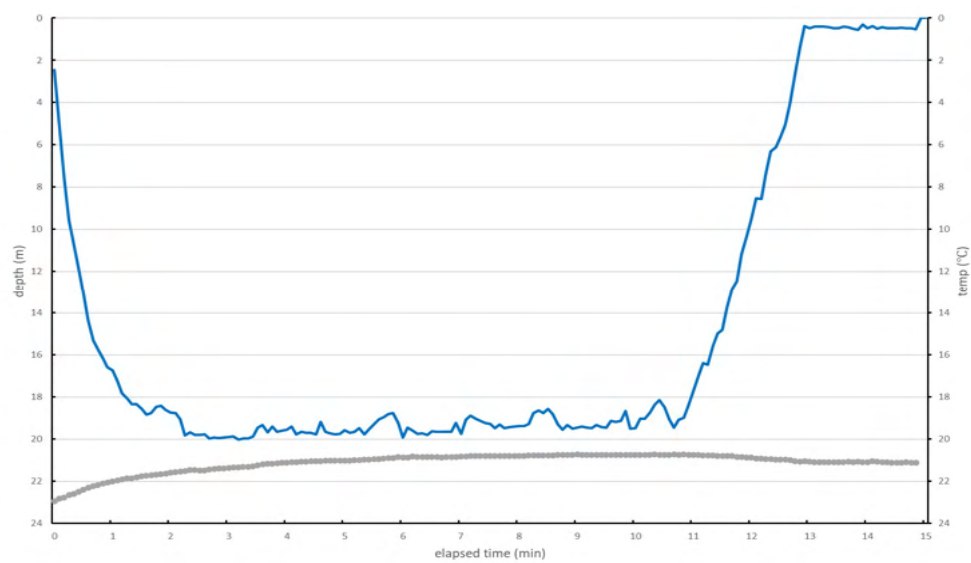


図 10-34
潜水プロ
ファイル
(F-003)
③

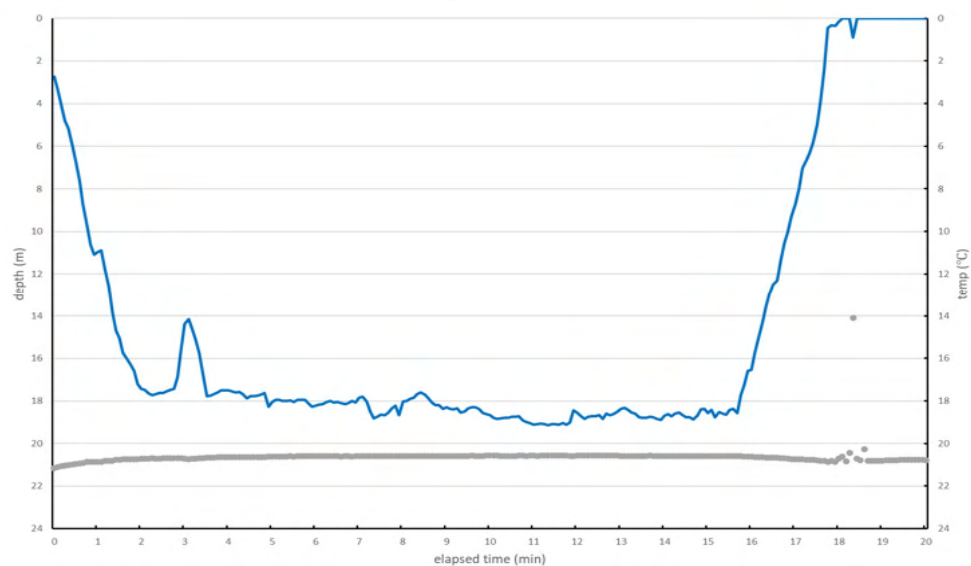


図 10-35
潜水プロ
ファイル
(F-004)
①

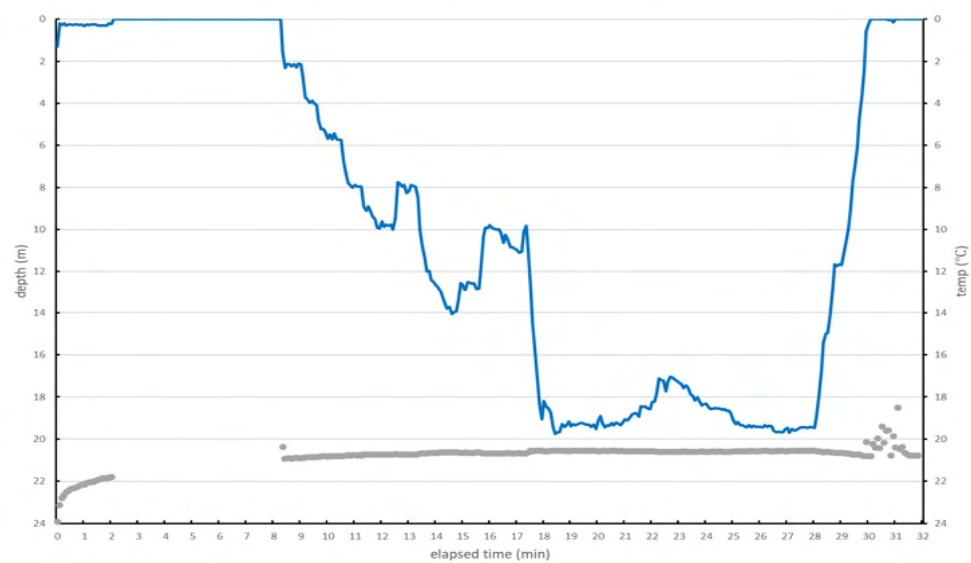


図 10-36
潜水プロ
ファイル
(F-004)
②

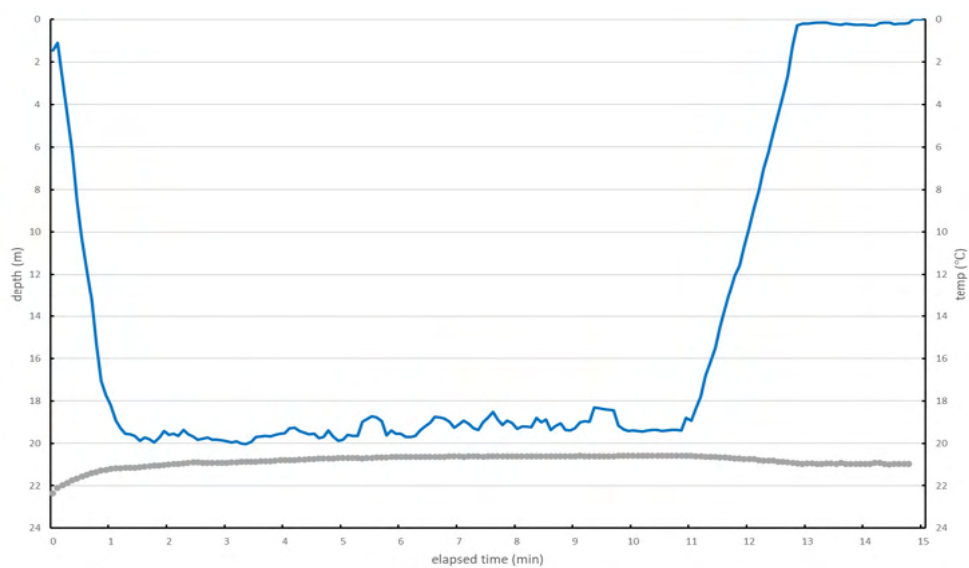


図 10-37
潜水プロ
ファイル
(F-004)
③

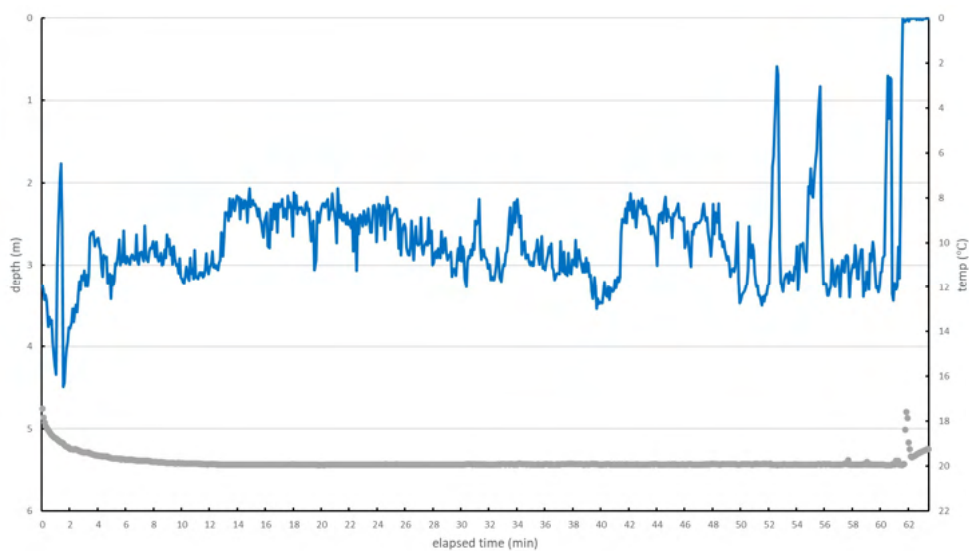


図 10-38
潜水プロ
ファイル
(G-001)
①

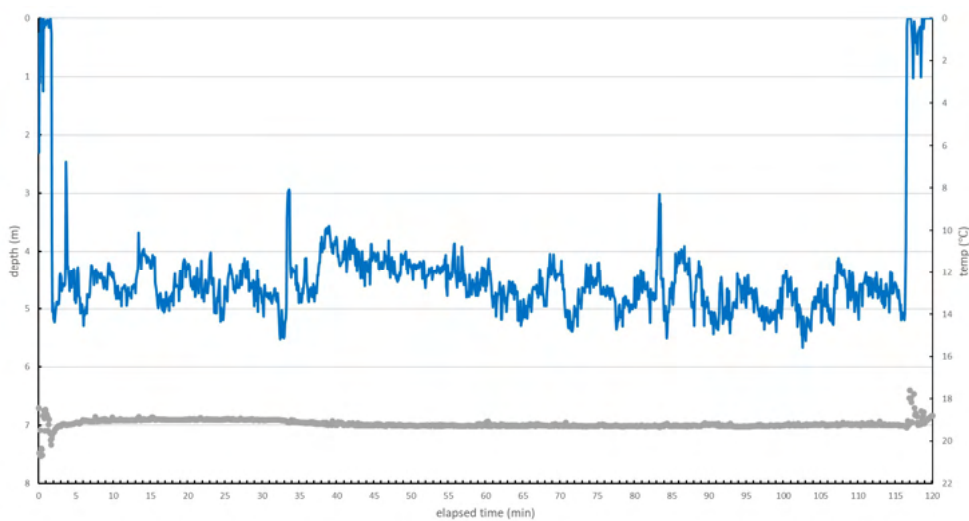


図 10-39
潜水プロ
ファイル
(G-001)
②

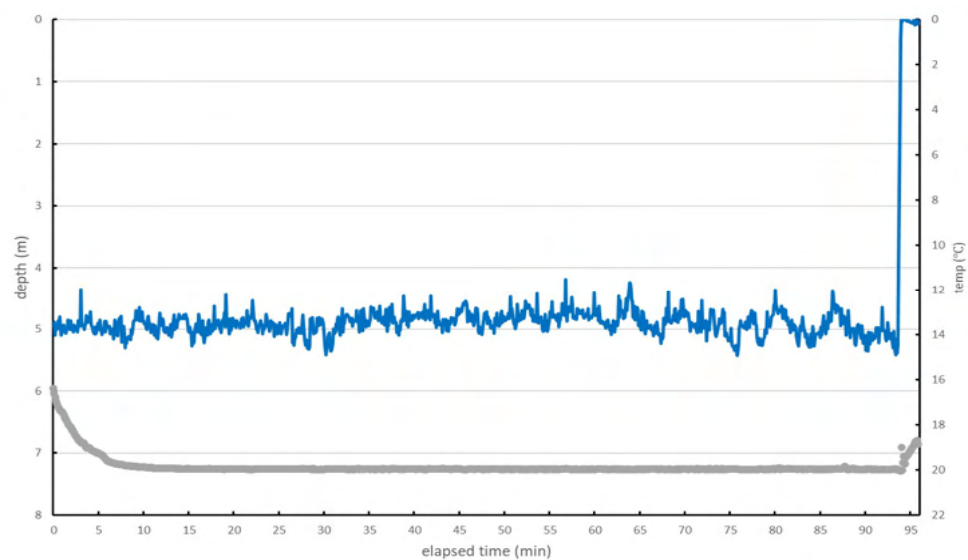


図 10-40
潜水プロ
ファイル
(G-002)
①

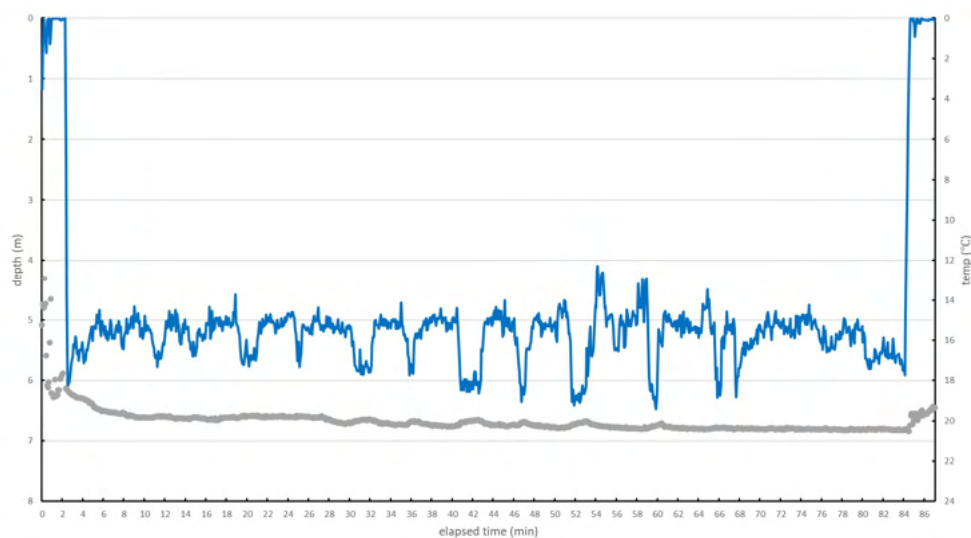


図 10-41
潜水プロ
ファイル
(G-002)
②

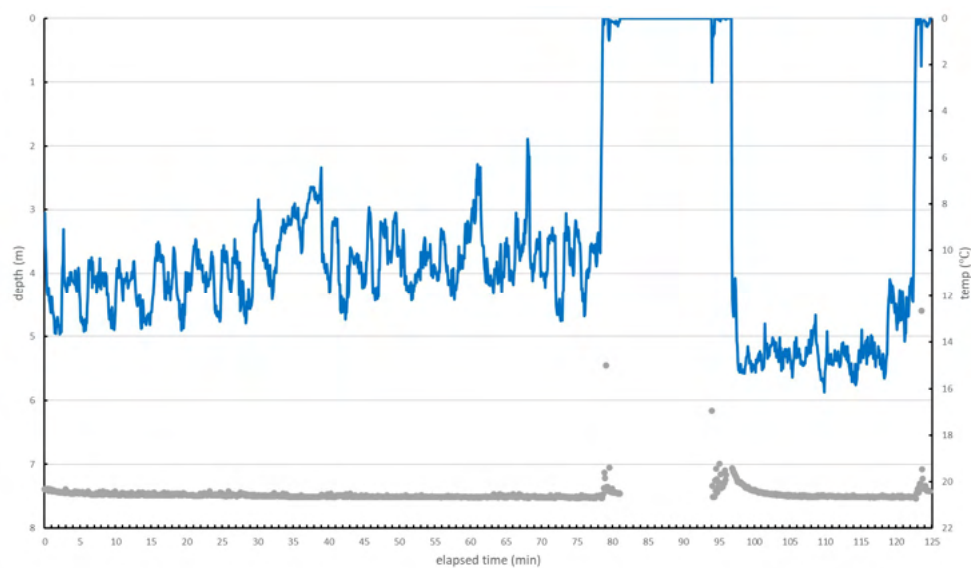


図 10-42
潜水プロ
ファイル
(G-002)
③

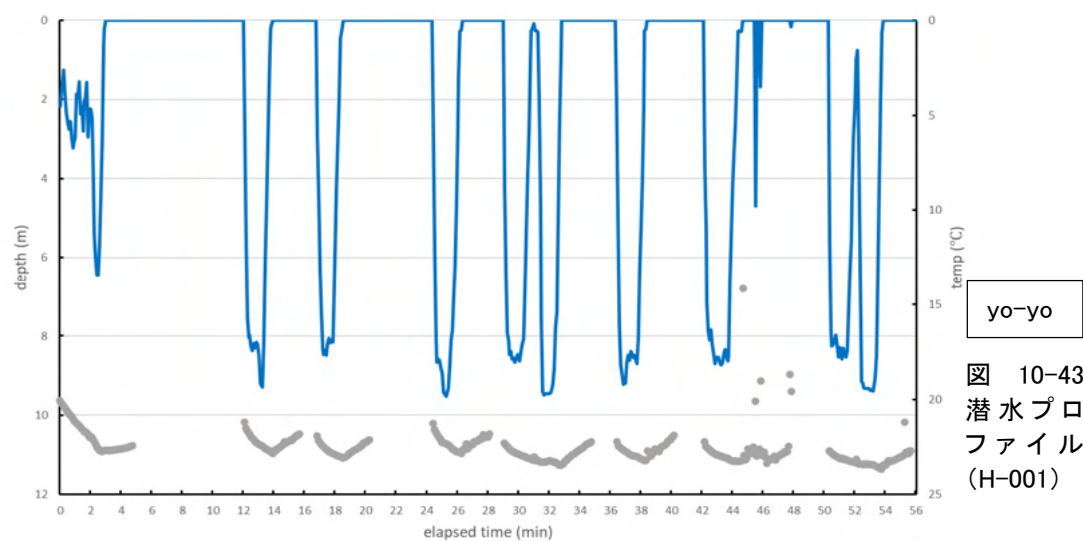


図 10-43
潜水プロ
ファイル
(H-001)

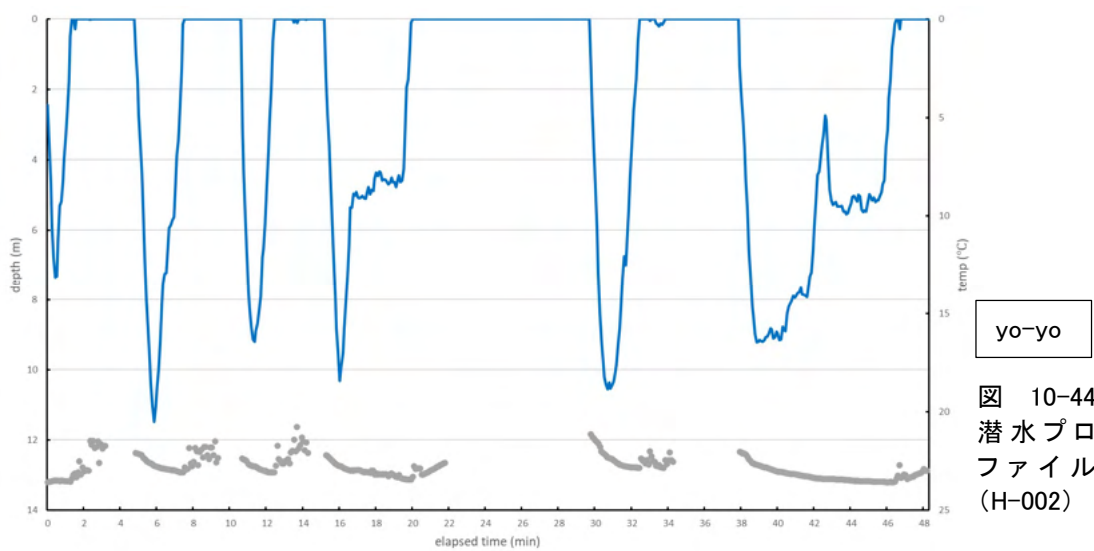


図 10-44
潜水プロ
ファイル
(H-002)

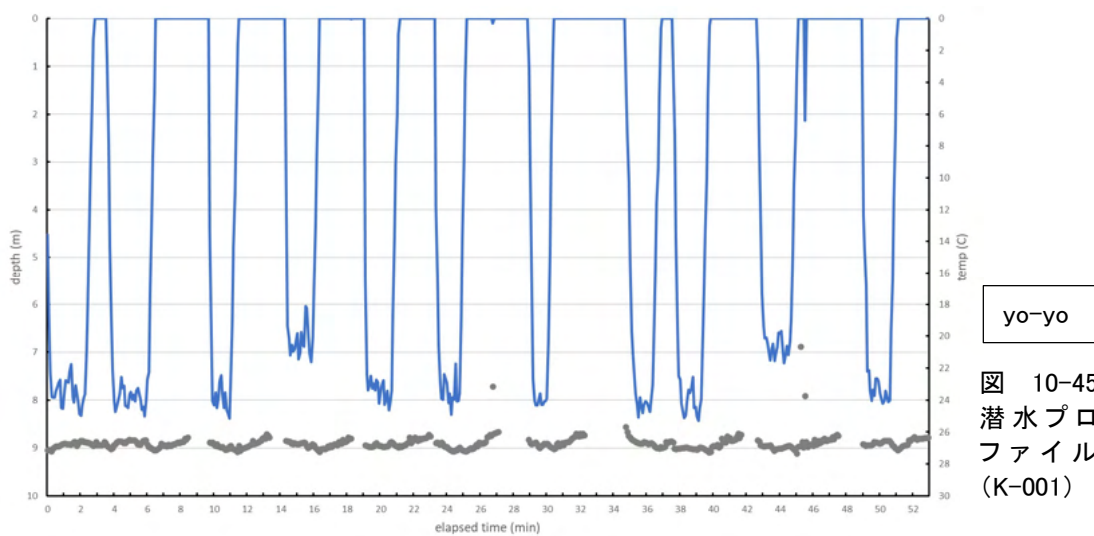


図 10-45
潜水プロ
ファイル
(K-001)

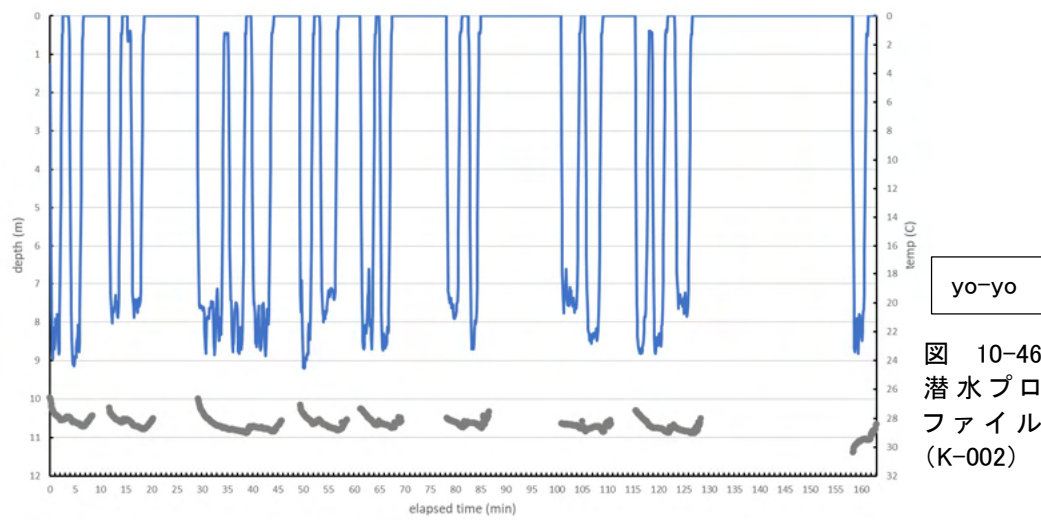


図 10-46
潜水プロ
ファイル
(K-002)

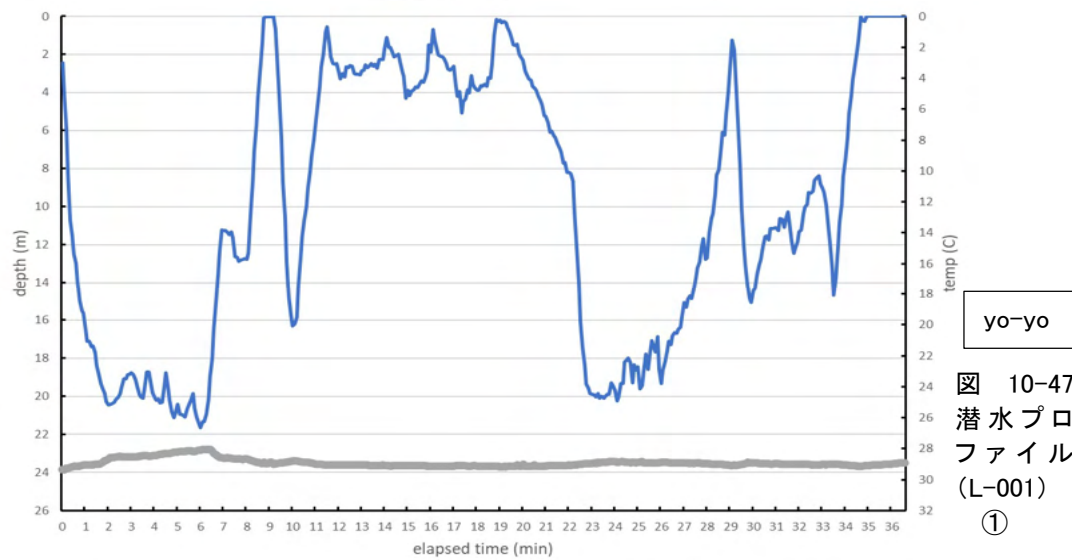


図 10-47
潜水プロ
ファイル
(L-001)
①

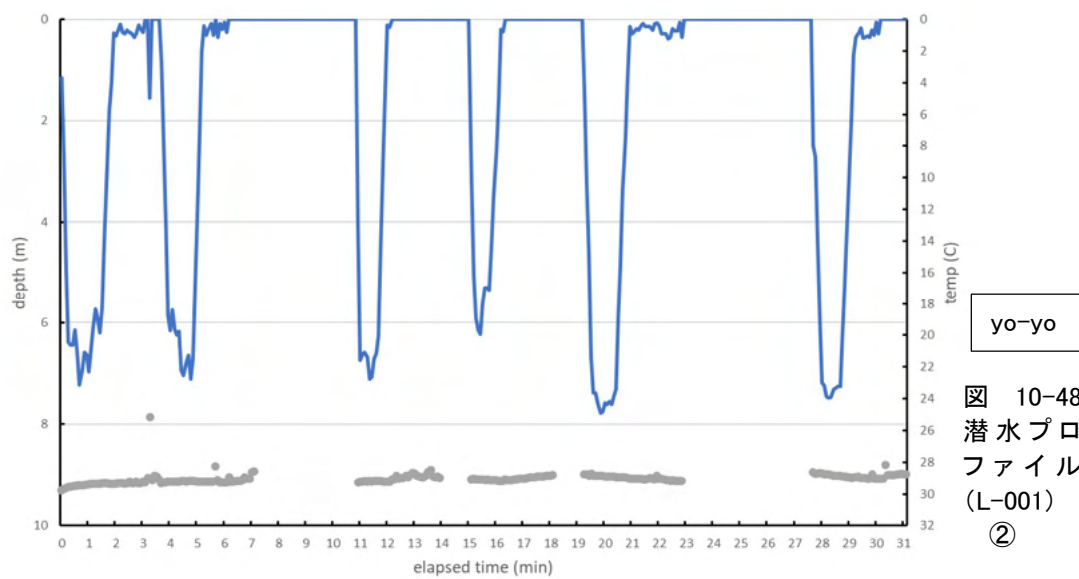


図 10-48
潜水プロ
ファイル
(L-001)
②

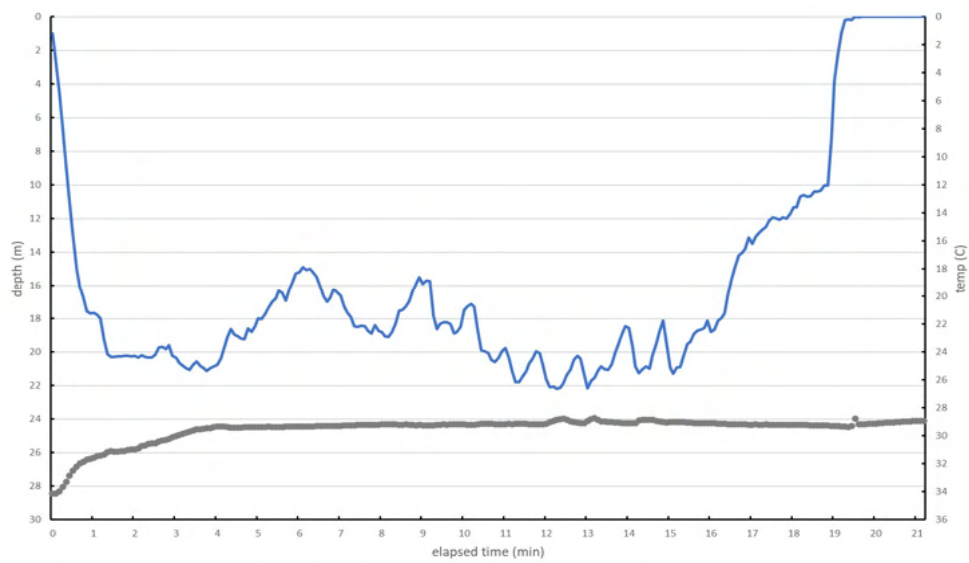
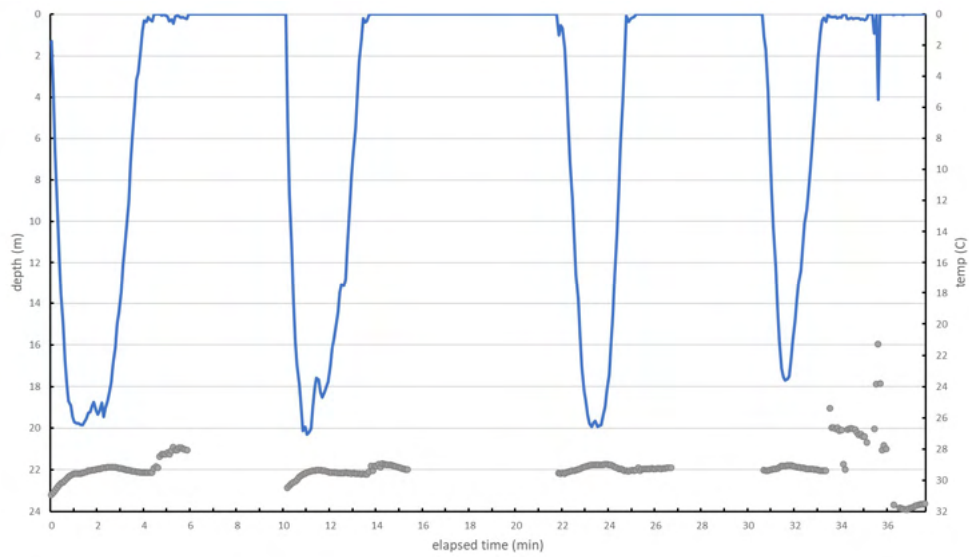


図 10-49
潜水プロ
ファイル
(L-002)
①



yo-yo

図 10-50
潜水プロ
ファイル
(L-002)
②

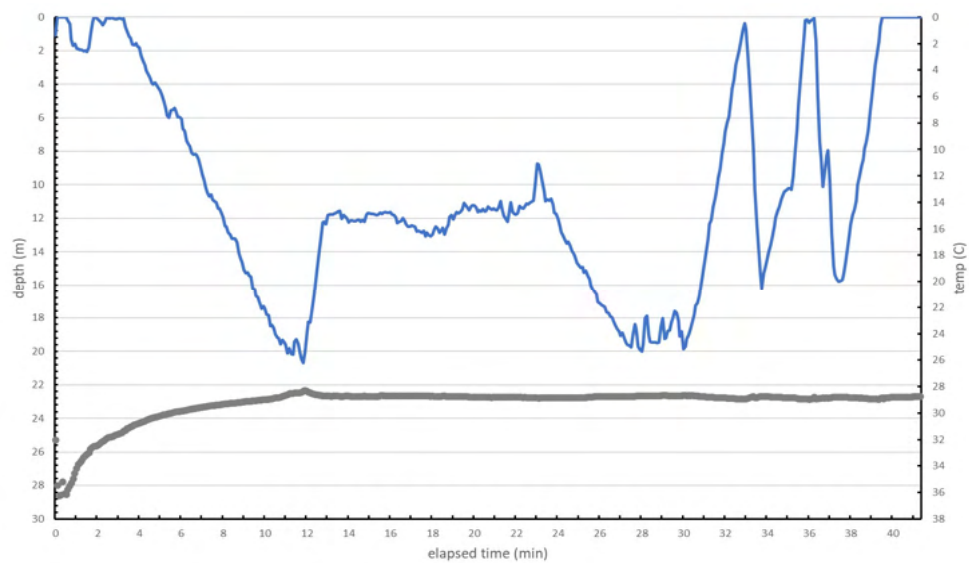
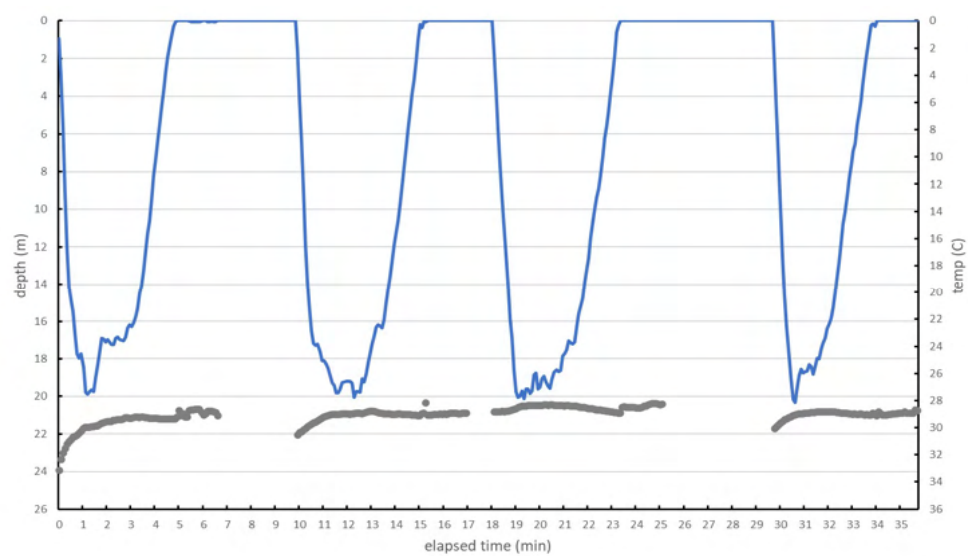


図 10-51
潜水プロ
ファイル
(L-003)
①



yo-yo

図 10-52
潜水プロ
ファイル
(L-003)
②

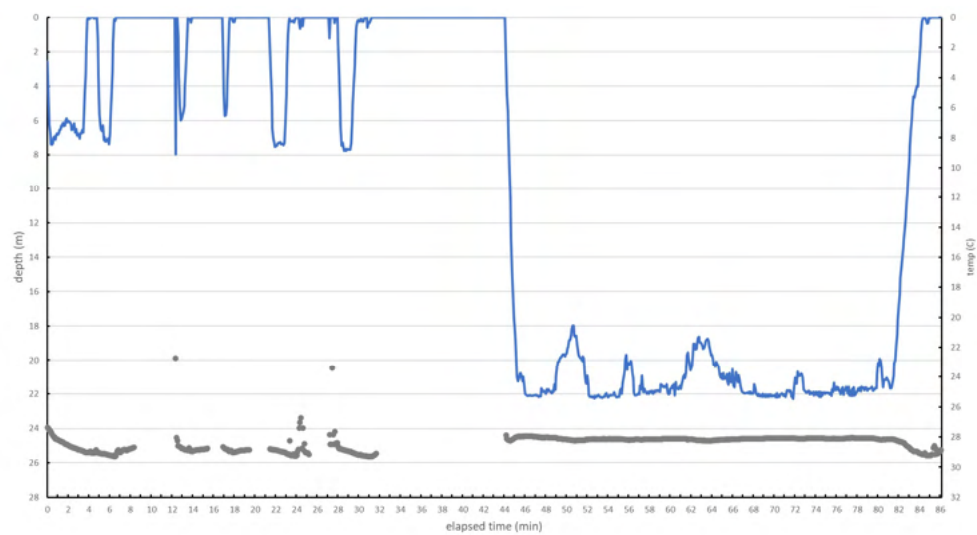
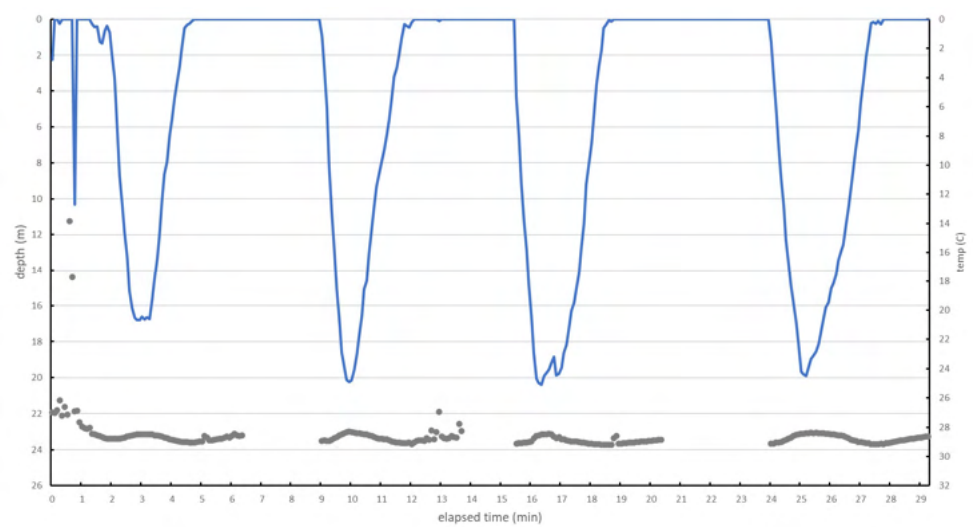
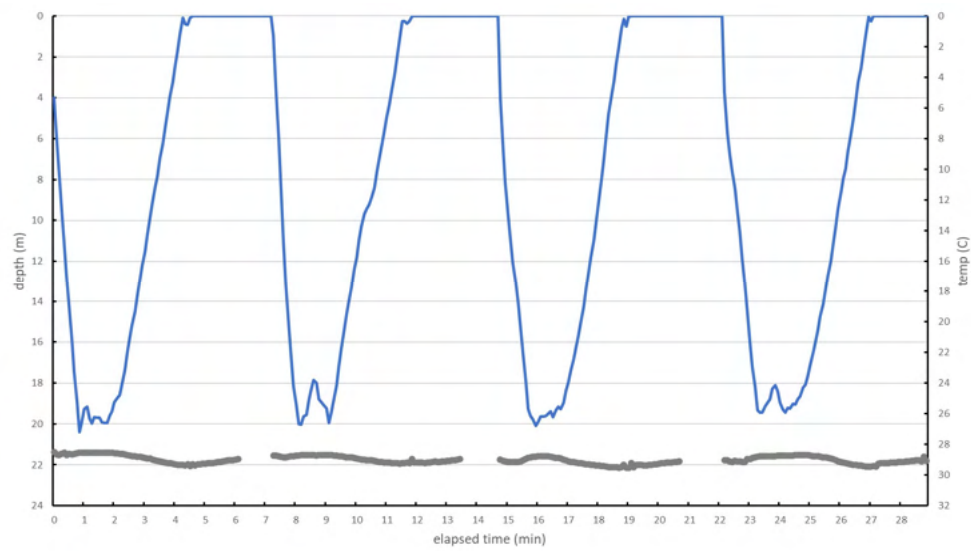


図 10-53
潜水プロ
ファイル
(L-004)



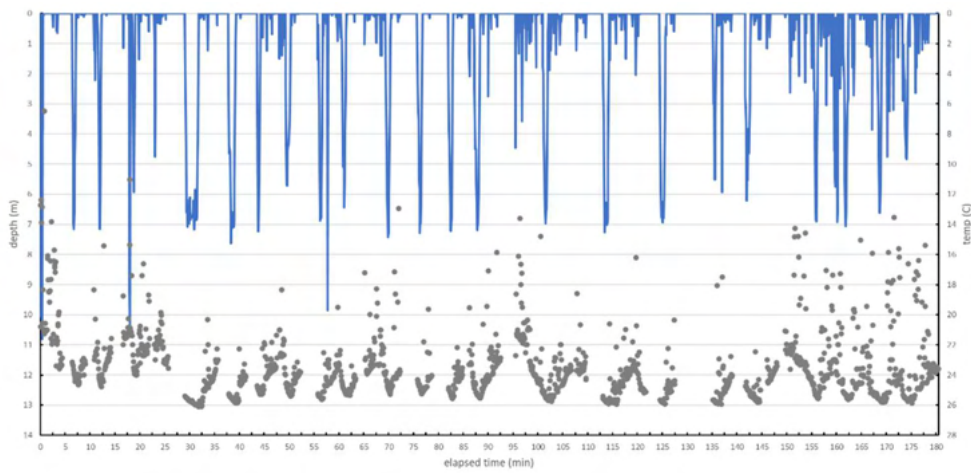
yo-yo

図 10-54
潜水プロ
ファイル
(L-005)



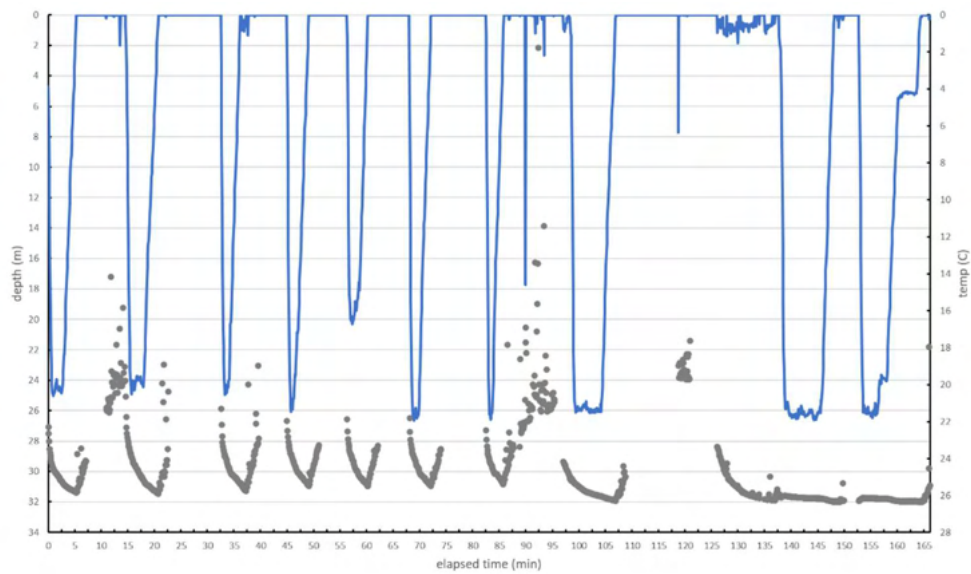
yo-yo

図 10-55
潜水プロ
ファイル
(L-006)



yo-yo

図 10-56
潜水プロ
ファイル
(M-001)



yo-yo

図 10-57
潜水プロ
ファイル
(M-002)

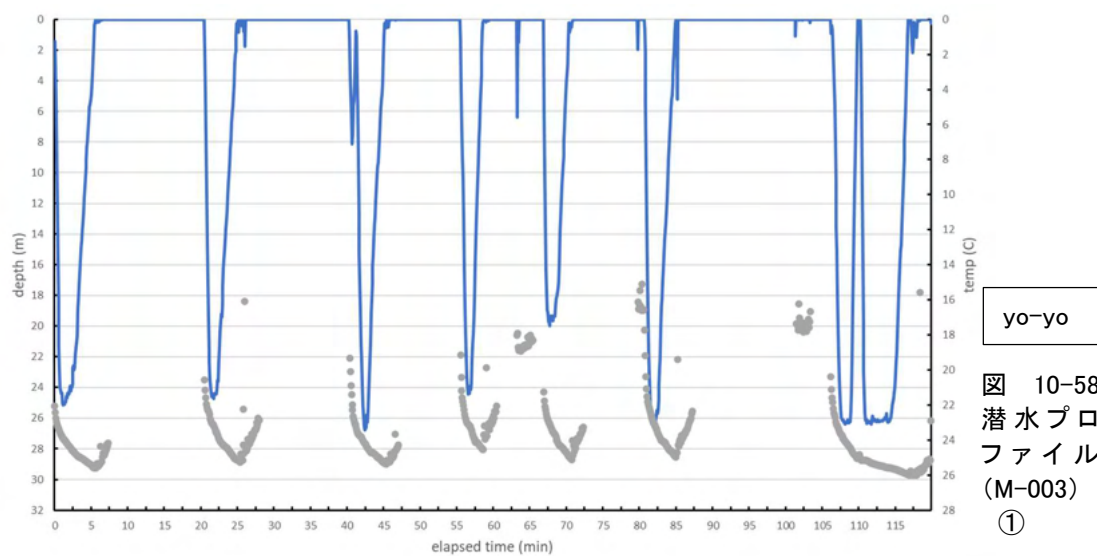


図 10-58
潜水プロ
ファイル
(M-003)
①

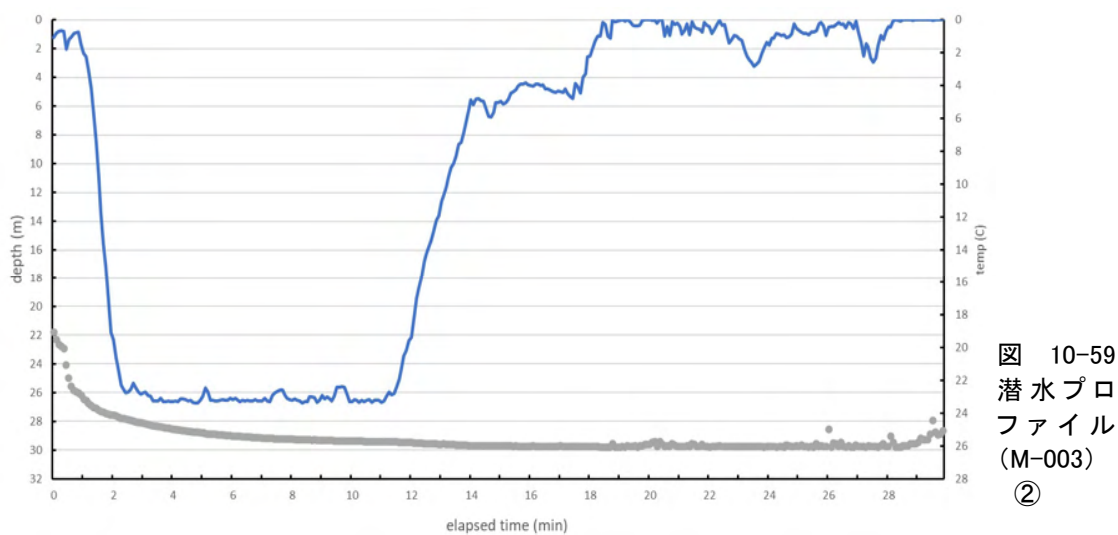


図 10-59
潜水プロ
ファイル
(M-003)
②

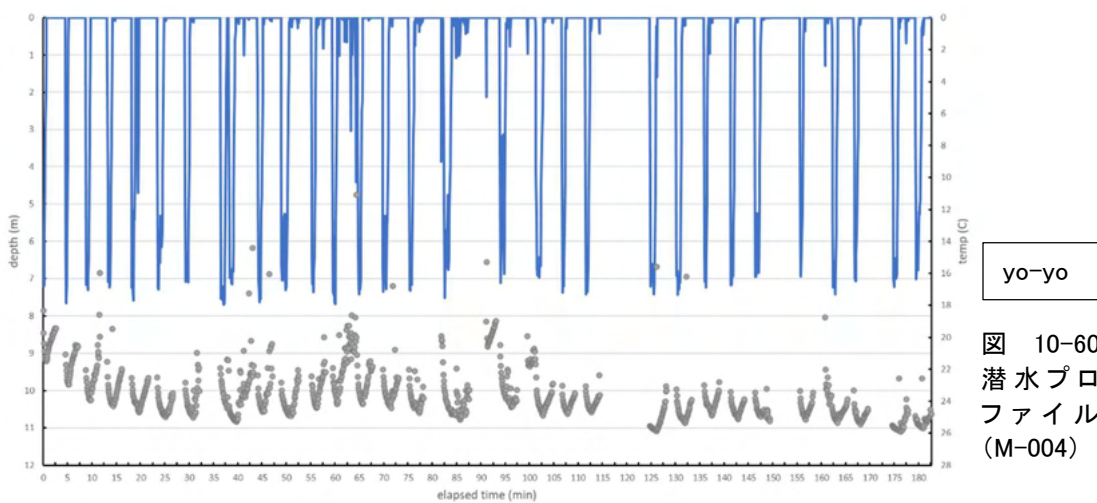
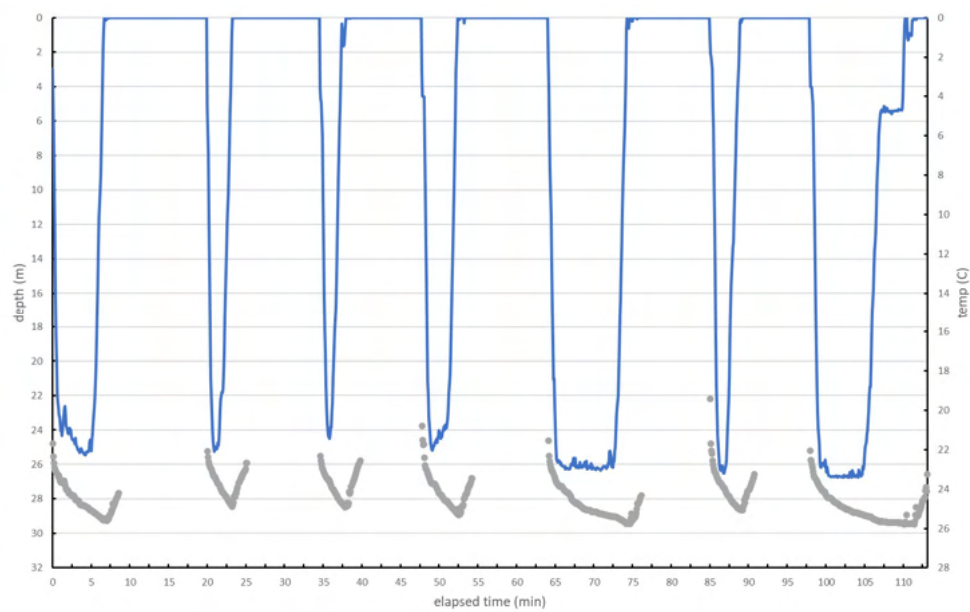
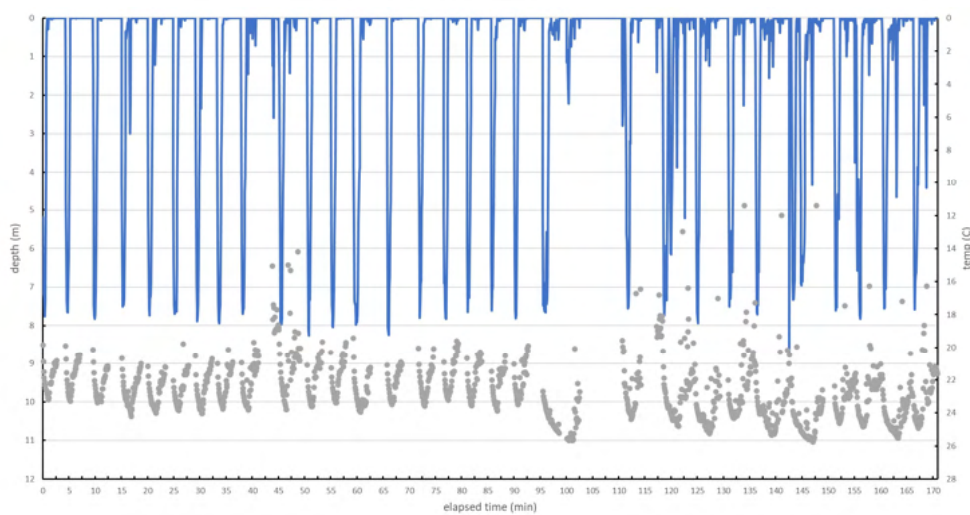


図 10-60
潜水プロ
ファイル
(M-004)



yo-yo

図 10-61
潜水プロ
ファイル
(M-005)



yo-yo

図 10-62
潜水プロ
ファイル
(M-006)

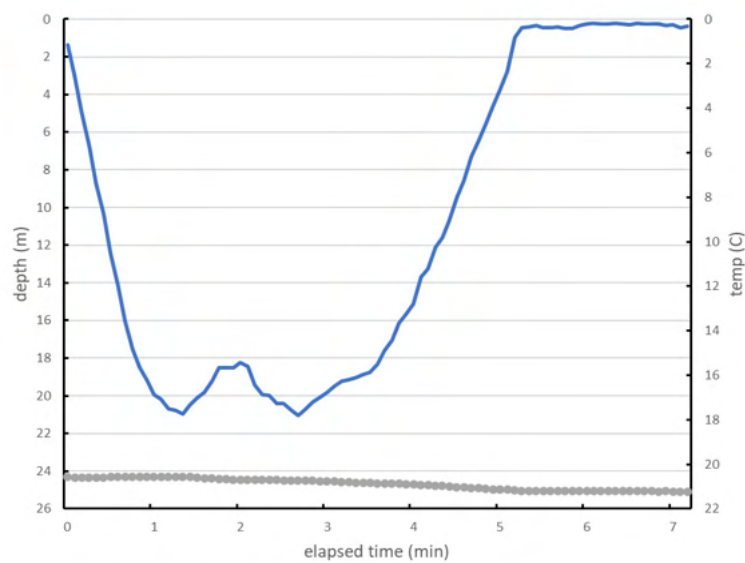
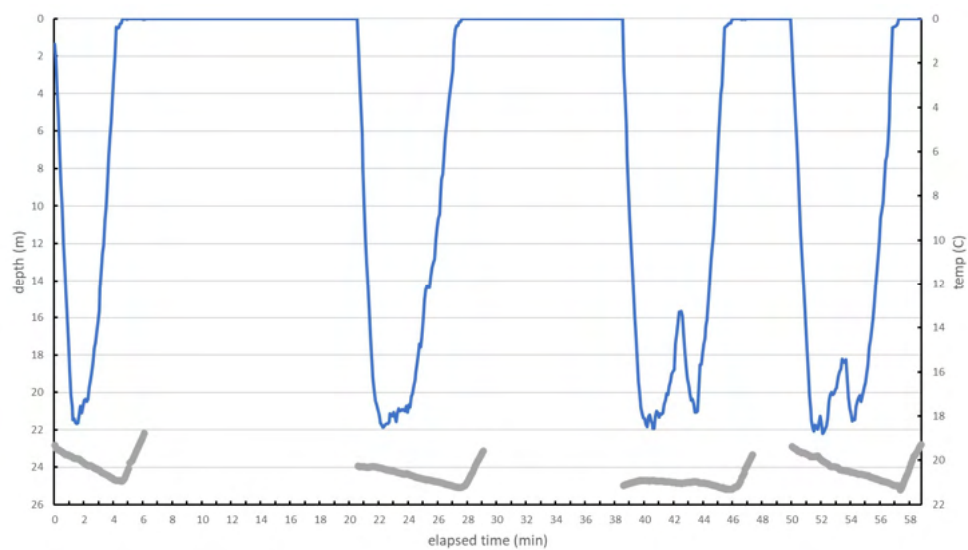


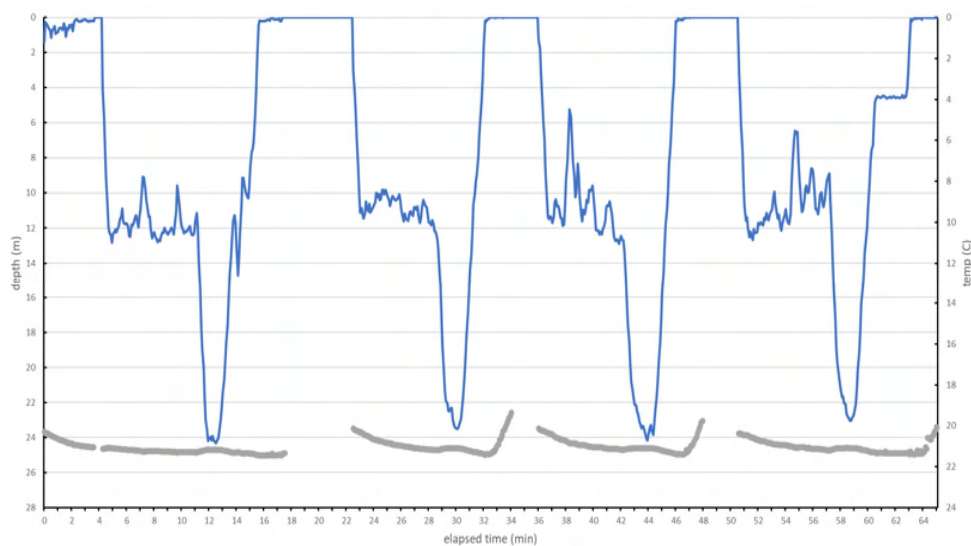
図 10-63
潜水プロ
ファイル
(N-001)

①



yo-yo

図 10-64
潜水プロ
ファイル
(N-001)
②



yo-yo

図 10-65
潜水プロ
ファイル
(N-002)

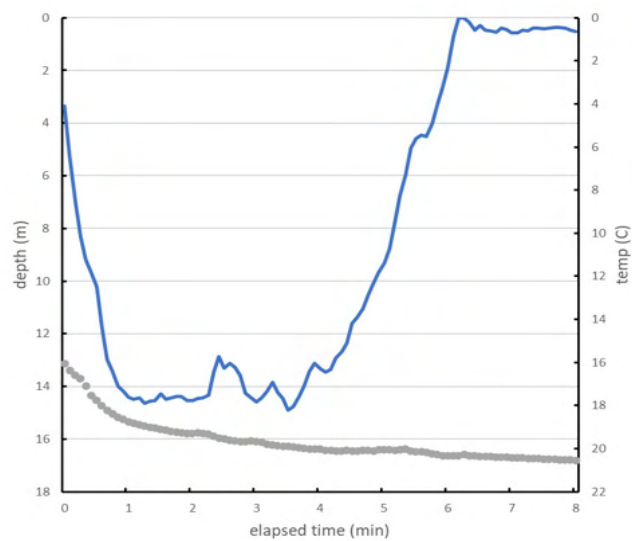
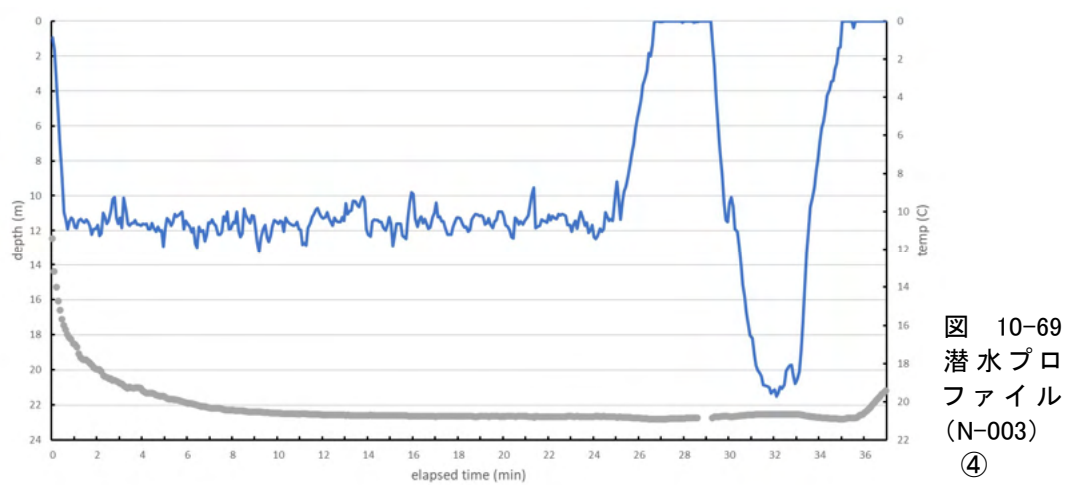
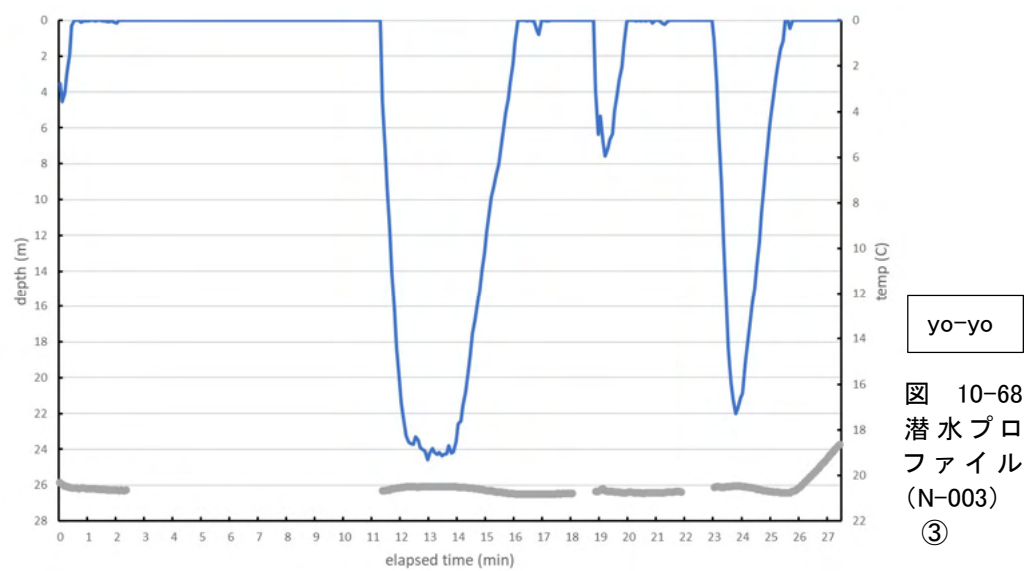
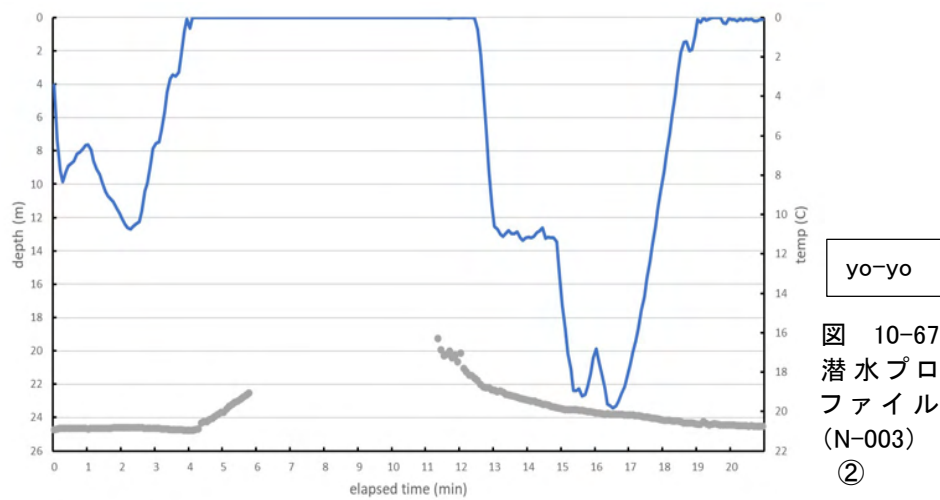


図 10-66
潜水プロ
ファイル
(N-003)
①



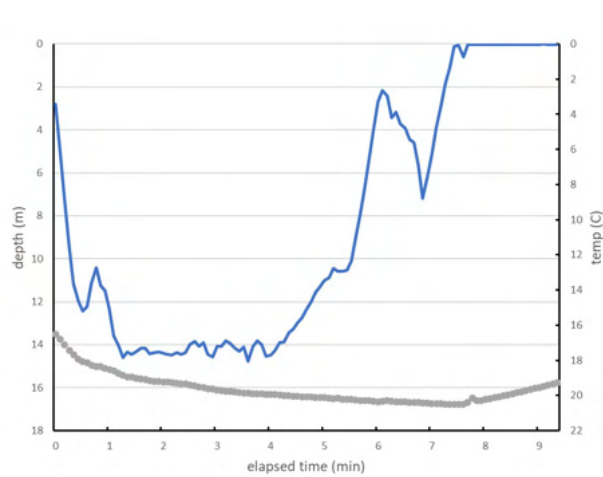


図 10-70 潜水プロファイル (N-004)

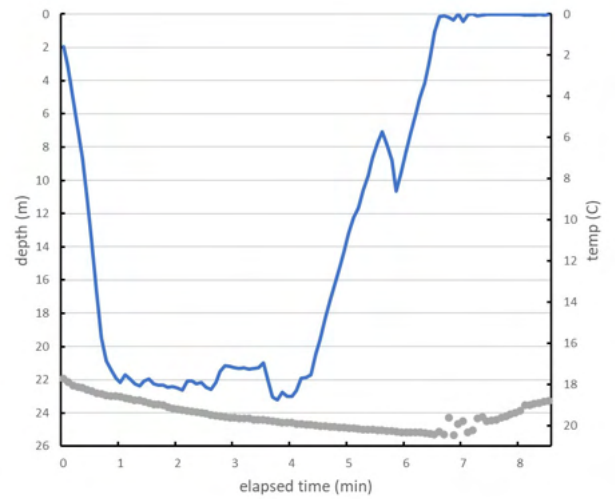


図 10-71 潜水プロファイル (N-004) ②

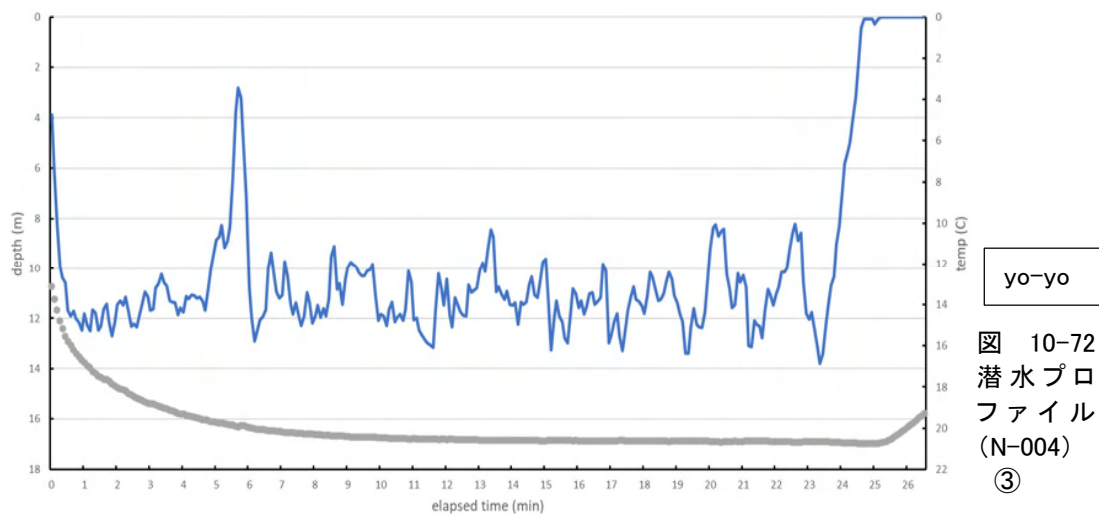


図 10-72
潜水プロ
ファイル
(N-004)
③

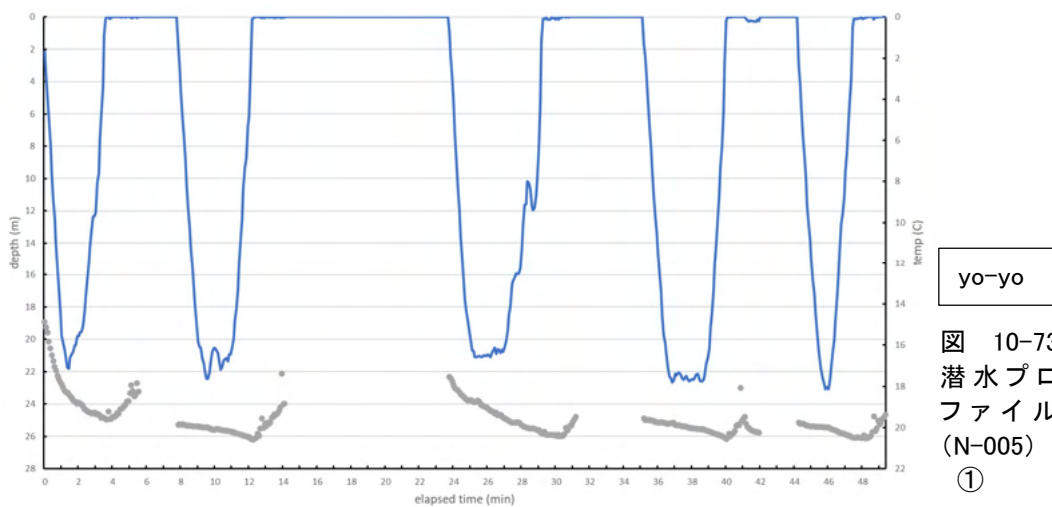


図 10-73
潜水プロ
ファイル
(N-005)
①

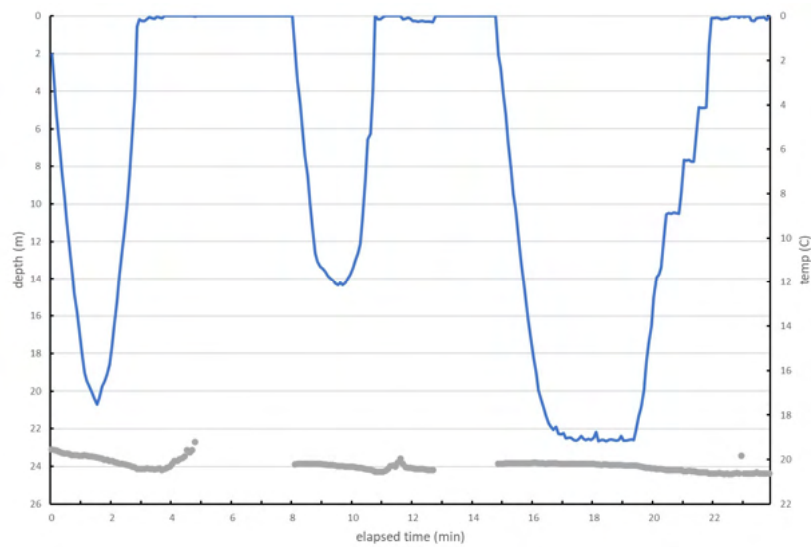


図 10-74
潜水プロ
ファイル
(N-005)
②

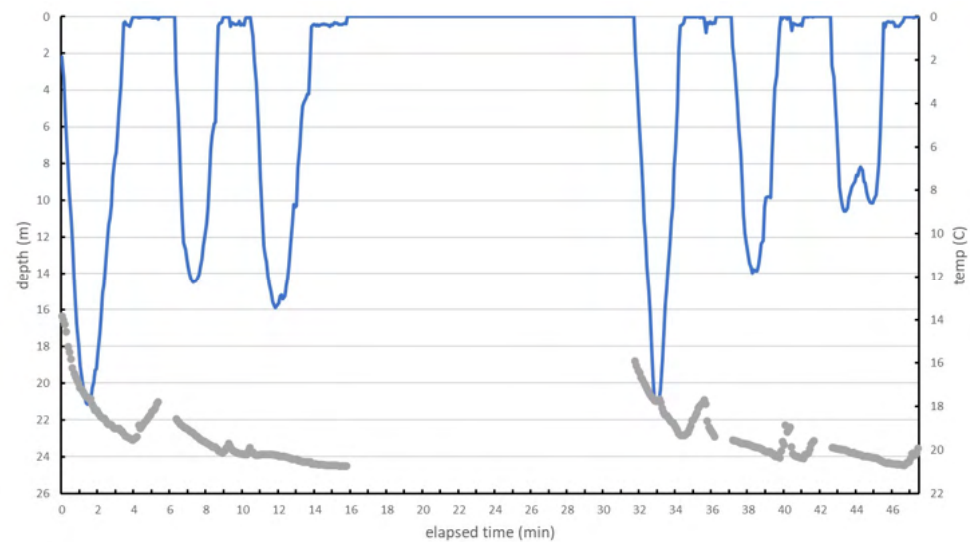


図 10-75
潜水プロ
ファイル
(N-006)
①

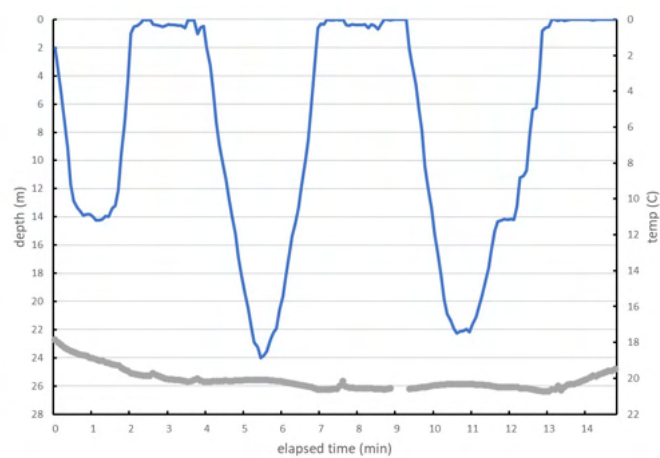


図 10-76
潜水プロ
ファイル
(N-006)
②

3-3. 微小膜小胞体 (MP) の調査

微小膜小胞体 (MP) の調査結果を表 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 : 151.18 ± 89.63 (範囲 : 37-416)、post : 170.18 ± 84.95 (範囲 : 43-396)、CD31+/AV+/CD42b- 群で pre : 2144.75 ± 2137.7 (範囲 : 150-8201)、post : 2423.55 ± 2465.02 (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。これらのことから、MP 変化量は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 11)、CD31+/AV+/CD42b- では有意差を認めなかった (図 12)。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¹⁸⁾。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ことが考えられる。一方、CD144 は、血管内皮細胞内に特異な膜透過型蛋白の VE-カドヘリン (VE-cadherin) の抗体であり、血管内皮細胞由来の MP にのみ発現するとの報告がある¹⁹⁾。これらのことから、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 数変化量を yo-yo 潜水群と非 yo-yo 潜水群で比較したところ、yo-yo 潜水群で有意に高かった (図 13)。

yo-yo 潜水における潜水前後の EDMP 数変化量に関し、Q 値との相関は認められなかったが (図 14)、yo-yo 潜水回数とは弱い正の相関 ($r=0.23$) が認められた (図 15)。

表-3. MP 数測定値

no	ID	yo-yo 潜水有無	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
4	B-002	○	140	359	2.56	172	1998	11.62
5	B-003	○	140	144	1.03	1612	2663	1.65
6	B-004	○	115	180	1.57	4743	942	0.20
7	B-005	○	123	138	1.12	920	126	0.14
8	B-006	○	147	137	0.93	2048	1239	0.60
9	B-007	○	107	226	2.11	874	1258	1.44
10	C-001	○	247	156	0.63	8201	6496	0.79

11	C-002	○	73	99	1.36	1699	2402	1.41
12	C-003	○	100	119	1.19	2801	1781	0.64
13	C-004	○	77	139	1.81	1390	1438	1.03
14	D-001	○	109	125	1.15	603	422	0.70
15	D-002	○	114	119	1.04	7522	10872	1.45
16	D-003	—	110	117	1.06	5385	4592	0.85
17	E-001	—	331	346	1.05	1612	4233	2.63
18	E-002	—	349	396	1.13	4710	5670	1.20
19	E-003	—	416	378	0.91	518	4794	9.25
20	E-004	—	372	271	0.73	927	1763	1.90
21	E-005	—	284	285	1.00	947	1487	1.57
22	E-006	—	390	275	0.71	335	269	0.80
23	E-007	○	265	282	1.06	2862	2576	0.90
24	E-008	○	251	262	1.04	7370	10262	1.39
25	F-001	—	202	167	0.83	384	695	1.81
26	F-002	—	170	106	0.62	1577	526	0.33
27	F-003	—	133	106	0.80	1418	722	0.51
28	F-004	—	105	173	1.65	3094	2748	0.89
29	G-001	—	88	139	1.58	2131	7776	3.65
30	G-002	—	116	147	1.27	4640	2984	0.64
31	G-003	—	116	121	1.04	6192	1446	0.23
32	K-001	○	113	112	0.99	1152	2238	1.94
33	K-002	○	111	102	0.92	532	548	1.03
34	L-001	○	71	121	1.70	1404	1155	0.82
35	L-002	○	100	114	1.14	1625	1214	0.75
36	L-003	○	110	145	1.32	1210	1507	1.25
37	L-004	○	116	102	0.88	614	486	0.79
38	L-005	○	113	167	1.48	914	853	0.93
39	L-006	○	101	129	1.28	635	903	1.42
40	M-001	○	37	49	1.32	150	1090	7.27
41	M-002	○	43	43	1.00	955	301	0.32
42	M-003	○	40	57	1.43	358	604	1.69
43	M-004	○	86	93	1.08	1315	2305	1.75
44	M-005	○	59	69	1.17	763	1985	2.60
45	M-006	○	113	303	2.68	1529	2968	1.94
46	N-001	○	116	129	1.11	4333	5044	1.16
47	N-002	○	147	168	1.14	7176	7357	1.03
48	N-003	○	115	154	1.34	902	3383	3.75
49	N-004	—	199	202	1.02	849	584	0.69
50	N-005	○	124	182	1.47	3790	1048	0.28
51	N-006	○	174	182	1.05	713	241	0.34
mean			151.18	170.18	1.22	2144.75	2423.59	1.75
SD			89.63	84.95	0.41	2137.70	2465.02	2.19

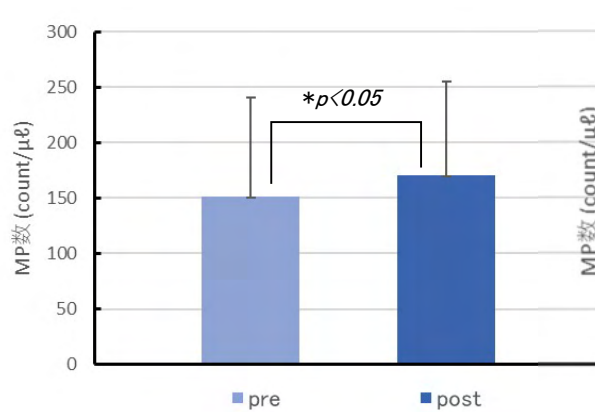


図-11. 潜水前後の MP 数(CD144+/CD42b-)

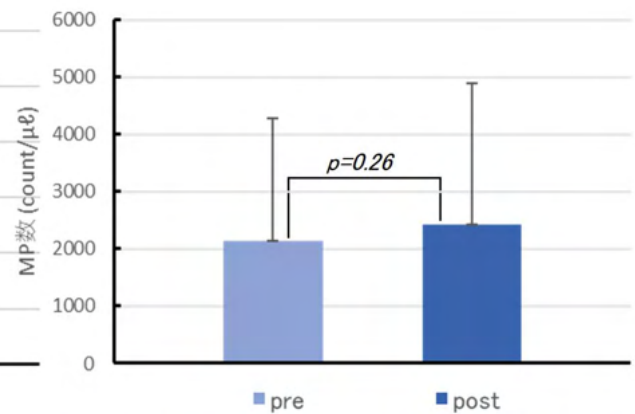


図-12. 潜水前後の MP 数(CD31+/AV+/CD42b-)

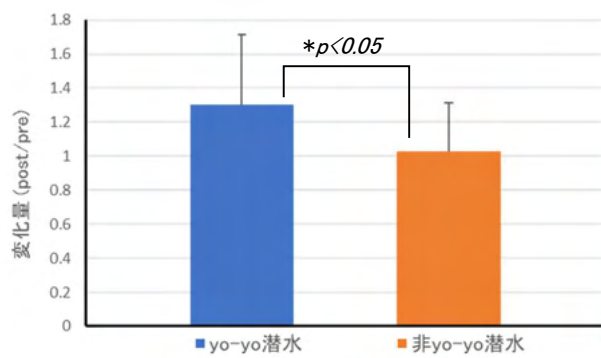


図-13. EDMP 値変化量
(yo-yo vs. 非 yo-yo)

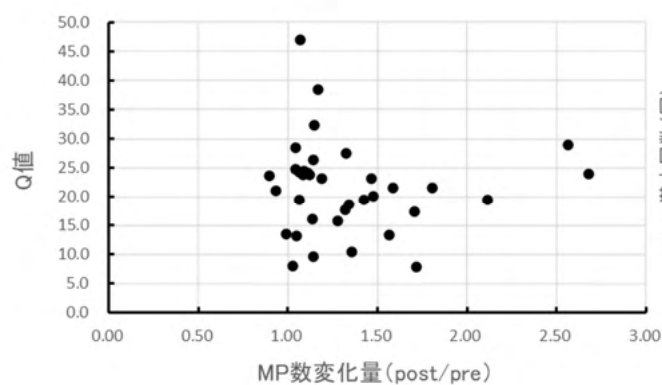


図-14. yo-yo 潜水の Q 値と EDPM 変化量(post/pre)

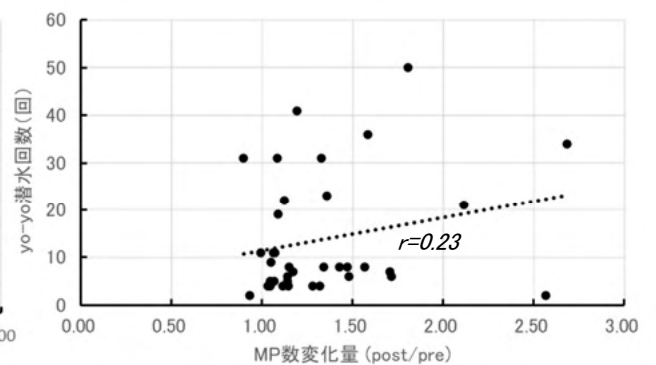


図-15. yo-yo 潜水回数と EDPM 変化量(post/pre)

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。気泡検知は 51 名の被験者を対象に実施し、14 名から気泡を検知した (14/51、27.5% 図 16)。検知された気泡等級はいずれも等級 1 もしくは 2 であり、気泡が検知された被験者に減圧症等による異常は認められなかった。これらのことから、今回の潜水業務における潜水ストレスは軽～中等度であったと評価できる。

不活性ガス気泡検知結果と潜水プロフィールの関係をみると、yo-yo 潜水が関係したものは 8 例 (8/14、57.1%) であり、繰り返し潜水 (repetitive diving) を行ったものは 9 例 (9/14、64.3%) であった。yo-yo 潜水を繰り返して行った例は 3

例あり、その内 2 例 (2/3、66.7%) で気泡が認められた。潜水後に体内に形成される不活性ガス気泡は、減圧症発症要因の一つと考えられている。今回の調査結果からは、yo-yo 潜水と繰り返し潜水は気泡形成に影響を及ぼす可能性があることから注意が必要であり、yo-yo 潜水を繰り返して行うことは可能な限り控えるべきと考える。

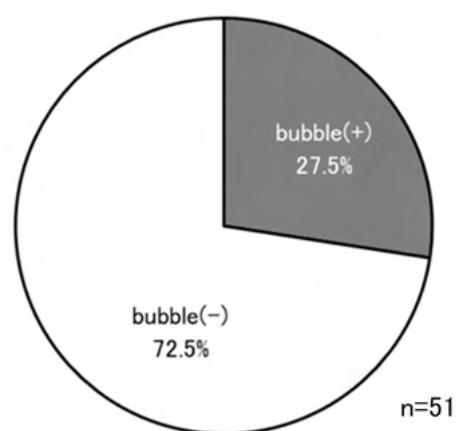


図-16. ドップラー気泡検知結果

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		最大気泡等級
		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	0	0
26	F-002	0	0	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	0	0
32	K-001	0	0	0	0	0	0	0
33	K-002	0	0	0	0	0	0	0
34	L-001	0	0	0	0	0	0	0
35	L-002	0	0	0	0	0	0	0
36	L-003	0	0	0	0	0	0	0
37	L-004	0	0	0	0	0	0	0
38	L-005	0	0	0	0	0	0	0
39	L-006	0	1	0	1	0	0	1
40	M-001	0	0	0	0	0	0	0
41	M-002	0	1	0	1	0	0	1
42	M-003	0	0	0	2	0	1	2
43	M-004	0	0	0	0	0	0	0
44	M-005	0	0	0	0	0	0	0
45	M-006	0	0	0	0	0	0	0
46	N-001	0	0	0	0	1	1	1
47	N-002	0	0	0	0	0	0	0
48	N-003	0	0	0	0	0	1	1
49	N-004	1	1	1	1	0	1	1
50	N-005	0	0	0	0	0	0	0
51	N-006	0	1	0	0	0	0	1

3-5. VAS 調査

VAS 調査の結果を表 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。51 名の被験者から得た VAS 値の平均は、 48.38 ± 11.69 mm であった。yo-yo 潜水と非 yo-yo 潜水では、それぞれ 47.67 ± 11.35 mm(範囲:21.3-78.7)および 49.05

± 12.0 mm(範囲:30.1-76.8)であり、両者間に有意差は認められなかった(図 17)。

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あり、

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 18 に示す。調査した被験者 51 名のうち、「軽い」と回答したものは 8 名 (15.7%)、「普通」は 25 名 (49.0%)、「やや重い」は 15 名 (29.4%)、「重作業」は 3 名 (5.9%) であった。これらのことから、今回の調査結果は概ね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 倍程度であり、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。これらは特にアクシデントによるものではなく、通常の養殖工程において発生する業務であるとのことであった。これ以外にも、近年では大型台風の接近や赤潮等が発生した際には、養殖魚に大きなダメージが生じるため、その復旧の際に重激な業務が発生する可能性があるとのことであった。

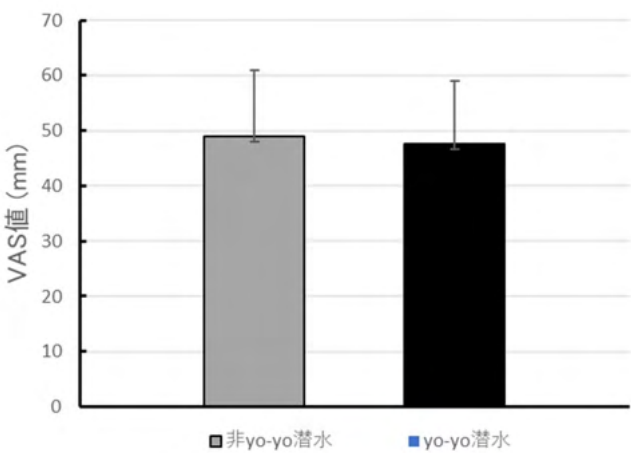


図-17. VAS 値の比較
(非 yo-yo 潜水 vs. yo-yo 潜水)

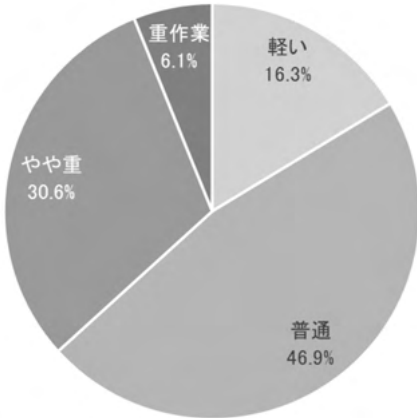


図-18. 自覚労作強度の回答

表-13. VAS 値

no	ID	VAS (mm)	自覚労作強度	no	ID	VAS (mm)	自覚労作強度
1	A-001	53.0	普通	27	F-003	60.2	やや重
2	A-002	54.9	普通	28	F-004	47.0	普通
3	B-001	32.6	軽い	29	G-001	52.3	やや重
4	B-002	40.5	普通	30	G-002	50.2	普通
5	B-003	42.2	普通	31	G-003	48.5	普通
6	B-004	47.5	普通	32	K-001	43.6	軽い

7	B-005	57.9	普通	33	K-002	59.3	普通
8	B-006	63.6	やや重	34	L-001	51.4	やや重
9	B-007	36.8	軽い	35	L-002	53.8	やや重
10	C-001	21.3	軽い	36	L-003	54.3	やや重
11	C-002	29.0	普通	37	L-004	41.2	軽い
12	C-003	49.8	普通	38	L-005	36.7	軽い
13	C-004	39.2	普通	39	L-006	39.4	軽い
14	D-001	42.2	やや重	40	M-001	37.7	普通
15	D-002	51.0	やや重	41	M-002	44.5	やや重
16	D-003	56.3	普通	42	M-003	44.5	やや重
17	E-001	58.9	重作業	43	M-004	64.2	やや重
18	E-002	53.4	普通	44	M-005	60.7	やや重
19	E-003	41.0	普通	45	M-006	52.8	普通
20	E-004	30.1	普通	46	N-001	50.5	やや重
21	E-005	32.1	軽い	47	N-002	55.7	やや重
22	E-006	34.1	普通	48	N-003	78.7	重作業
23	E-007	32.8	普通	49	N-004	76.8	重作業
24	E-008	38.1	普通	50	N-005	56.2	普通
25	F-001	39.1	普通	51	N-006	58.6	普通
26	F-002	55.7	やや重	mean		48.08	

3-6. 唾液中の炎症性サイトカイン調査

潜水業務前後の被験者から唾液を採取し、それらに含まれる c 反応蛋白 (CRP) および分泌性免疫グロブリン A (SIgA)、炎症性サイトカイン (IL-1 β 、IL-6、IL-8、TNF- α) の発現量を定量した。それらの結果を以下に示す。なお定量に際しては、唾液検体中に異物の混入が認められた検体や採取した唾液量が十分でなかったもの等があり、いくつかの検体では十分な分析が困難であった。潜水中には乾燥した圧縮空気を呼吸することに加え、口呼吸となることからドライマウス状態となりやすい。そのため、唾液分泌量が少なくなったことが影響していると考えられる。

潜水前後の発現量を比較すると、CRP、IL-1 β 、IL-6、IL-8、TNF- α は、IL-8 以外には有意差はなかったものの、増加す

る傾向にあった。yo-yo 潜水と非 yo-yo 潜水との比較では、IL-1 β 、IL-8、TNF- α で潜水後の変化量が大きかった。これらのことから、今回調査した潜水作業者は、一般的なストレス反応ではなく、全身性の炎症に伴う二次的な交感神経の亢進によるものと考えられる。IL-6 には変化が認められなかったが、IL-6 は身体運動に反応して血漿中で増加することが知られており²⁰⁾、今回の調査では労作強度が軽～中等度と比較的身体運動量が低いものであったことが影響していると考えられる。

3-6-1. C 反応性蛋白（CRP）の調査

CRP の調査結果を表 6 に示す。CRP は、潜水後に上昇が認められたが、有意差は無かった ($p=0.07$ 、図 19)。また、yo-yo

潜水と非 yo-yo 潜水における潜水前後の CRP 発現量の変化の比較では、有意差は認められなかったが、yo-yo 潜水で低かった (図 20)。

表-6 CRP 調査結果 (pg/mL)

No	ID	pre	post	post/pre	yo-yo
1	A-001	38.85	67.14	1.73	○
2	A-002	982.27	1564.49	1.59	○
3	B-001	558.42	234.19	0.42	○
4	B-002	169.38	174.14	1.03	○
5	B-003	2162.03	3969.24	1.84	○
6	B-004	3087.58	4977.86	1.61	—
7	B-005	564.28	655.49	1.16	○
8	B-006	130.76	150.82	1.15	○
9	B-007	156.49	413.01	2.64	○
10	C-001	32.23	44.58	1.38	○
11	C-002	11.31	63.90	5.65	○
12	C-003	49.86	73.54	1.48	○
13	C-004	82.73	73.54	0.89	○
14	D-001	155.18	274.45	1.77	○
15	D-002	95.84	77.04	0.80	○
16	D-003	354.79	398.88	1.12	—
17	E-001	159.54	237.25	1.49	○
18	E-002	45.69	163.47	3.58	○
19	E-003	164.68	156.86	0.95	○
20	E-004	116.91	149.97	1.28	—
21	E-005	119.67	93.97	0.79	—
22	E-006	304.28	546.76	1.80	—
23	E-007	1002.66	878.02	0.88	○
24	E-008	1283.42	530.50	0.41	○
25	F-001	123.34	59.97	0.49	—
26	F-002	36.00	61.35	1.70	—
27	F-003	110.03	127.93	1.16	—
28	F-004	119.86	578.42	4.83	—
29	G-001	146.30	184.00	1.26	—
30	G-002	659.13	4210.55	6.39	—
31	G-003	50.76	123.34	2.43	—
mean		421.75	687.57	1.80	
SD		679.68	1277.01	1.44	

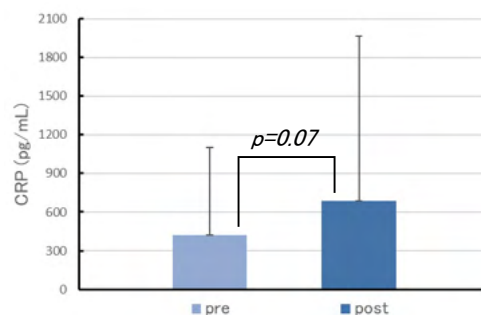


図-19. 潜水前後での CRP 発現量(n=31)

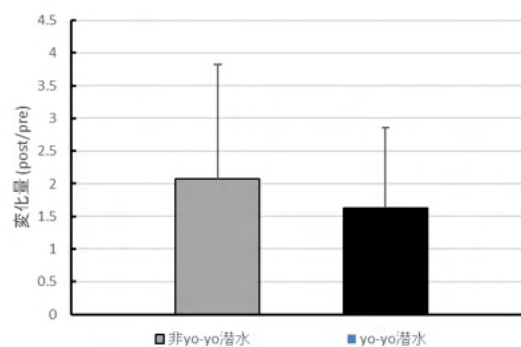


図-20. CRP 変化量 (post/pre) 比較
(非 yo-yo 潜水 vs. yo-yo 潜水)

3-6-2. IL-1 β の調査

IL-1 β の調査結果を表 7 に示す。潜水前後の IL-1 β 発現量を比較すると潜水後で高い傾向にあったが有意差は認めなかった ($p=0.055$ 、図 21)。yo-yo 潜水と非

yo-yo 潜水における潜水前後の IL-1 β 発現量を比較すると、yo-yo 潜水で高値を示す傾向にあったが有意差を認めなかった (図 22)。

表-7 IL-1 β 調査結果 (pg/mL)

No	ID	pre	post	post/pre	yo-yo
1	A-001	88.16	433.93	4.92	○
2	A-002	82.11	290.74	3.54	○
3	B-001	161.86	377.29	2.33	○
4	B-002	13.60	83.12	6.11	○
5	B-003	123.54	125.34	1.01	○
6	B-004	96.48	86.25	0.89	-
7	B-005	3.91	3.51	0.90	○
8	B-006	258.48	188.79	0.73	○
9	B-007	145.97	93.07	0.64	○
10	C-001	62.80	52.51	0.84	○
11	C-002	6.04	22.51	3.73	○
12	C-003	108.05	158.71	1.47	○
13	C-004	71.05	89.35	1.26	○
14	D-001	35.64	131.41	3.69	○
15	D-002	192.82	1012.01	5.25	○
16	D-003	413.93	447.05	1.08	-
17	E-001	25.66	49.93	1.95	○
18	E-002	55.42	116.37	2.10	○
19	E-003	14.92	39.92	2.68	○
20	E-004	399.13	176.38	0.44	-
21	E-005	48.39	37.95	0.78	-
22	E-006	20.06	19.11	0.95	-
23	E-007	212.15	466.95	2.20	○
24	E-008	162.38	69.98	0.43	○
25	F-001	8.26	10.90	1.32	-
26	F-002	7.17	2.07	0.29	-
27	F-003	120.18	99.65	0.83	-
28	F-004	11.72	15.34	1.31	-
29	G-001	98.28	79.25	0.81	-
30	G-002	31.63	308.68	9.76	-
31	G-003	29.49	29.22	0.99	-
mean		100.30	165.07	2.10	
SD		104.08	205.47	2.05	

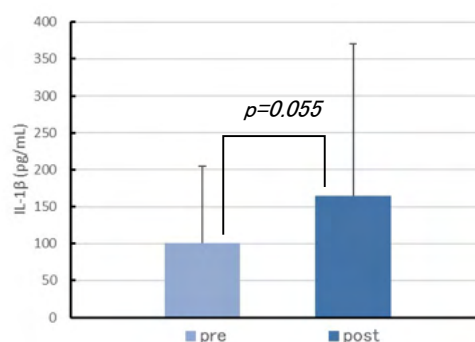


図-21. 潜水前後での IL-1 β 発現量(n=31)

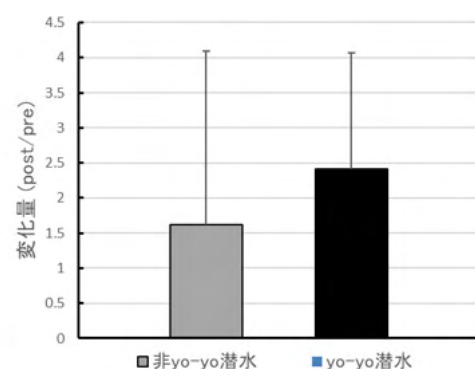


図-22. IL-1 β 変化量 (post/pre) 比較
(非 yo-yo 潜水 vs. yo-yo 潜水)

3-6-3. IL-6 の調査

IL-6 の調査結果を表 8 に示す。潜水前後の IL-6 発現量を比較すると潜水後で高い傾向にあったが有意差は認めなかった ($p=0.094$ 、図 23)。

潜水における潜水前後の IL-6 発現量を比較すると、yo-yo 潜水で僅かに低値を示す傾向にあったが有意差を認めなかった ($p=0.75$ 、図 24)。

表-8 IL-6 調査結果 (pg/mL)

no	ID	pre	post	post/pre	yo-yo
1	A-001	6.63	5.69	0.86	○
2	A-002	10.83	12.47	1.15	○
3	B-001	2.45	2.39	0.98	○
4	B-002	2.11	4.24	2.01	○
5	B-003	1.21	2.51	2.07	○
6	B-004	8.77	14.21	1.62	-
7	B-005	0.75	1.43	1.90	○
8	B-006	7.96	9.16	1.15	○
9	B-007	11.24	15.95	1.42	○
10	C-001	0.92	1.17	1.27	○
11	C-003	0.49	1.44	2.91	○
12	C-004	2.88	2.94	1.02	○
13	D-001	1.91	2.09	1.09	○
14	D-002	4.63	3.83	0.83	○
15	D-003	12.15	13.92	1.15	-
16	E-001	0.64	1.79	2.80	○
17	E-002	1.10	3.79	3.46	○
18	E-003	1.25	1.38	1.11	○
19	E-004	2.65	1.75	0.66	-
20	E-005	1.35	1.09	0.80	-
21	E-006	0.76	1.65	2.17	-
22	E-007	6.69	6.44	0.96	○
23	E-008	4.24	4.28	1.01	○
24	F-001	0.86	2.25	2.62	-
25	F-002	3.68	3.65	0.99	-
26	F-003	2.12	2.71	1.28	-
27	F-004	11.48	11.50	1.00	-
28	G-001	11.42	6.64	0.58	-
29	G-002	10.68	40.09	3.75	-
30	G-003	1.59	5.52	3.48	-
mean		4.51	6.27	1.60	
SD		4.08	7.73	0.91	

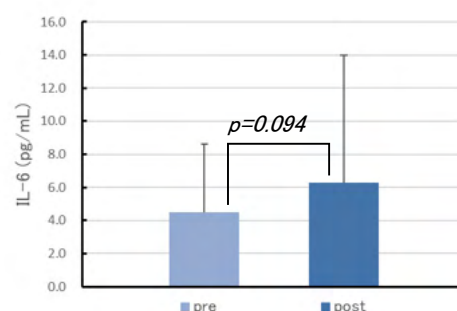


図-23. 潜水前後での IL-6 発現量(n=30)

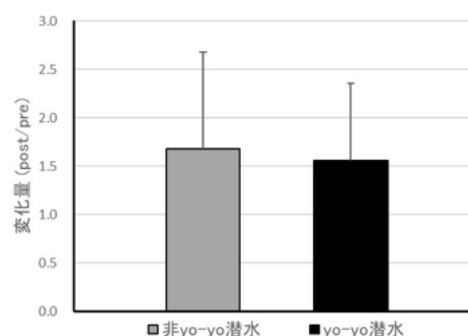


図-24. IL-6 変化量(post/pre)比較
(非 yo-yo 潜水 vs. yo-yo 潜水)

3-6-4. IL-8 の調査

IL-8 の調査結果を表 9 に示す。潜水前後の IL-8 発現量は潜水後で有意に高値であった ($p=0.003$ 、図 25)。yo-yo 潜水と非

yo-yo 潜水における潜水前後の IL-8 発現量を比較すると、yo-yo 潜水で僅かに高値を示す傾向にあったが有意差を認めなかった ($p=0.29$ 、図 26)。

表-9 IL-8 調査結果 (pg/mL)

No	ID	pre	post	post/pre	yo-yo
1	A-001	576.41	1197.48	2.08	○
2	A-002	593.38	653.90	1.10	○
3	B-001	493.70	900.81	1.82	○
4	B-002	223.87	729.18	3.26	○
5	B-003	938.89	1914.34	2.04	○
6	B-004	583.87	587.02	1.01	—
7	B-005	133.42	129.73	0.97	○
8	B-006	1333.53	1303.22	0.98	○
9	B-007	224.46	497.37	2.22	○
10	C-001	318.88	278.84	0.87	○
11	C-002	156.20	145.67	0.93	○
12	C-003	273.66	640.44	2.34	○
13	C-004	348.46	636.60	1.83	○
14	D-001	237.29	450.42	1.90	○
15	D-002	1853.83	989.76	0.53	○
16	D-003	925.40	1061.82	1.15	—
17	E-001	169.55	492.33	2.90	○
18	E-002	138.02	298.22	2.16	○
19	E-003	336.02	661.72	1.97	○
20	E-004	509.35	402.71	0.79	—
21	E-005	260.29	204.89	0.79	—
22	E-006	188.49	291.36	1.55	—
23	E-007	654.98	993.53	1.52	○
24	E-008	284.10	418.27	1.47	○
25	F-001	151.41	186.81	1.23	—
26	F-002	291.70	80.69	0.28	—
27	F-003	505.98	528.26	1.04	—
28	F-004	207.64	378.48	1.82	—
29	G-001	397.72	652.90	1.64	—
30	G-002	289.81	1313.66	4.53	—
31	G-003	185.43	271.80	1.47	—
mean		444.70	622.33	1.62	
SD		378.82	420.50	0.86	

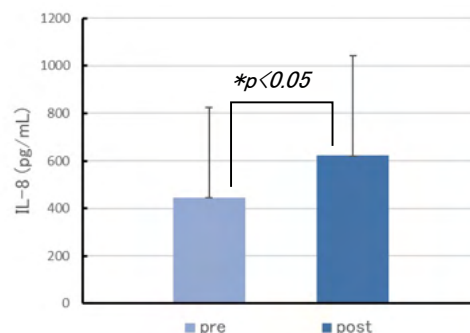


図-25. 潜水前後での IL-8 発現量(n=31)

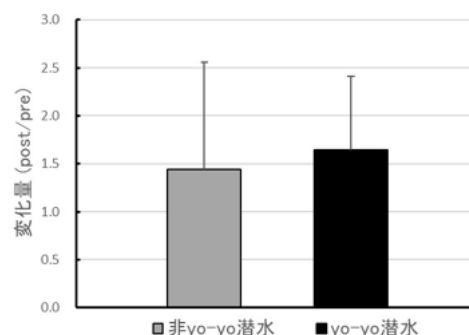


図-26. IL-8 変化量 (post/pre) 比較 (非 yo-yo 潜水 vs. yo-yo 潜水)

3-6-5. TFN- α の調査

TFN- α の調査結果を表 10 に示す。潜水前後の TFN- α 発現量を比較すると潜水後に僅かに高い傾向にあったが有意差は認めなかった ($p=0.72$ 、図 27)。yo-yo 潜水

と非 yo-yo 潜水における潜水前後の TFN- α 発現量を比較すると、yo-yo 潜水で僅かに高値を示す傾向にあったが有意差を認めなかった ($p=0.73$ 、図 28)。

表-10 TNF- α 調査結果 (pg/mL)

No	ID	pre	post	post/pre	yo-yo
1	A-001	5.84	15.60	2.67	○
2	A-002	1.30	1.95	1.51	○
3	B-001	4.47	9.21	2.06	○
4	B-003	2.15	6.30	2.93	○
5	B-004	1.55	1.18	0.76	-
6	B-006	17.16	7.02	0.41	○
7	B-007	2.37	3.34	1.40	○
8	C-003	1.20	1.69	1.41	○
9	C-004	2.87	3.25	1.13	○
10	D-001	0.18	1.02	5.66	○
11	D-002	13.01	3.86	0.30	○
12	D-003	3.59	6.52	1.82	-
13	E-001	0.13	0.58	4.55	○
14	E-003	0.30	0.42	1.41	○
15	E-004	1.57	0.75	0.47	-
16	E-005	0.27	0.44	1.63	-
17	E-007	3.67	2.93	0.80	○
18	E-008	1.27	0.48	0.38	○
19	F-003	2.10	1.13	0.54	-
20	G-001	0.50	0.83	1.65	-
21	G-002	1.10	4.59	4.16	-
22	G-003	0.20	0.49	2.48	-
mean		3.04	3.34	1.82	
SD		4.23	3.73	1.44	

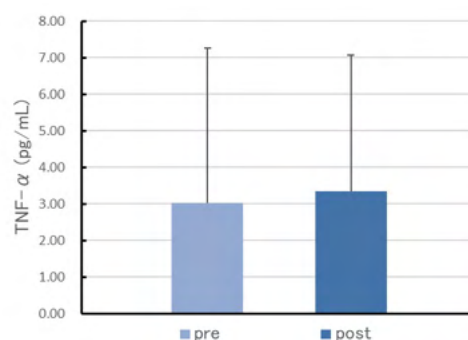


図-27. 潜水前後での TNF- α 発現量($n=22$)

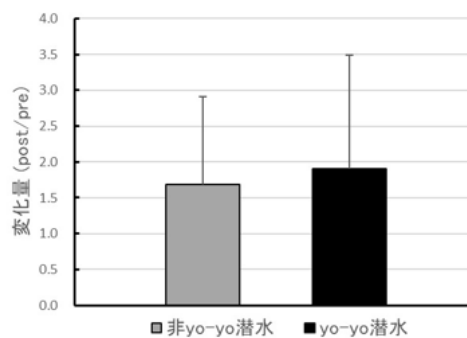


図-28. TNF- α 変化量(post/pre)比較
(非 yo-yo 潜水 vs. yo-yo 潜水)

3-6-7. SIgA（分泌型免疫グロブリンA）の調査

SIgA の調査結果を表 11 に示す。潜水前後の SIgA 発現量を比較すると潜水後で有意に高かった（ $p=0.01$ 、図 29）。yo-yo 潜水と非 yo-yo 潜水における潜水前後の SIgA 発現量を比較すると、yo-yo 潜水で僅かに高値を示す傾向にあったが有意差

を認めなかった（ $p=0.07$ 、図 30）。SIgA 発現量はサーカディアンリズムの影響を受け、起床時に高くなることが知られている。また、SIgA は唾液量によって定量値が大きく変化することから²¹⁾、今回の調査結果には、これらが影響しているものと思われる。

表-11 SIgA 調査結果（pg/mL）

No	ID	pre	post	post/pre	yo-yo
1	A-001	487.85	218.21	0.45	○
2	A-002	178.39	140.73	0.79	○
3	B-001	211.07	163.20	0.77	○
4	B-002	123.59	152.96	1.24	○
5	B-003	189.51	184.56	0.97	○
6	B-004	99.29	103.84	1.05	-
7	B-005	146.10	79.71	0.55	○
8	B-006	224.95	220.80	0.98	○
9	B-007	369.64	382.32	1.03	○
10	C-001	122.09	102.08	0.84	○
11	C-002	169.03	43.80	0.26	○
12	C-003	214.94	248.11	1.15	○
13	C-004	244.00	178.77	0.73	○
14	D-001	249.26	319.39	1.28	○
15	D-002	403.35	92.90	0.23	○
16	D-003	319.42	325.89	1.02	-
17	E-001	205.29	143.62	0.70	○
18	E-002	135.09	125.14	0.93	○
19	E-003	78.49	79.81	1.02	○
20	E-004	435.95	124.83	0.29	-
21	E-005	108.64	102.52	0.94	-
22	E-006	101.82	144.07	1.41	-
23	E-007	492.68	292.02	0.59	○
24	E-008	431.31	145.45	0.34	○
25	F-001	55.93	166.30	2.97	-
26	F-002	130.58	28.63	0.22	-
27	F-003	170.02	178.43	1.05	-
28	F-004	182.60	91.83	0.50	-
29	G-001	201.43	157.27	0.78	-
30	G-002	100.28	203.30	2.03	-
31	G-003	80.01	124.94	1.56	-
mean		214.92	163.40	0.92	
SD		121.85	80.03	0.54	

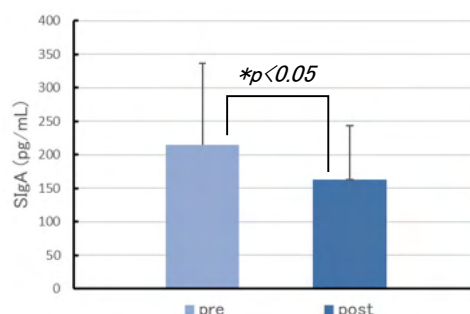


図-29. 潜水前後での SIgA 発現量(n=31)

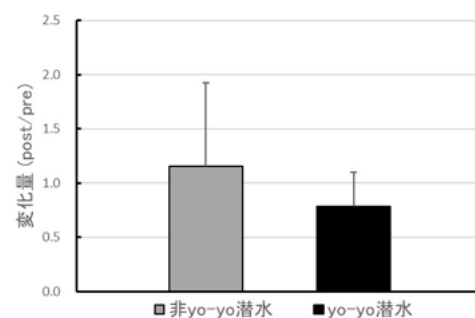


図-30. SIgA 変化量(post/pre)比較
(非 yo-yo 潜水 vs. yo-yo 潜水)

4. 考察

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士の減圧症リスクについて調査研究することを目的とした。短期間に高頻度で浮上と潜降を繰り返し行う潜水は、その様から yo-yo 潜水とも呼ばれている。yo-yo 潜水は古くから海女などの素潜り潜水漁業者に用いられてきた。当初は素潜りでは減圧症は発症しないと考えられてきたが、ポリネシアのトゥアモトウ (Tuamotu) 諸島の素潜り漁師に多く見られた Taravana Syndrome と呼ばれる高次脳機能障害や中枢神経障害は減圧症によるものであり、yo-yo 潜水に影響が大きいことが Cross らによって初めて報告された²²⁾。現在では、素潜り漁師を含め潜水業務従事者に yo-yo 潜水によると考えられる一過性の脳卒中症状や多幸症、めまい、吐き気といった減圧症症状が報告されている²³⁾。

このように yo-yo 潜水には減圧症リスクが潜在していることは明らかである。潜水業務の現場で yo-yo 潜水が用いられているものとしては、水産養殖場における潜水業務のほか、ダイビングインストラクターの業務、水中映像撮影に伴う業務、海底地形調査や海洋生物調査に伴う潜水調査業務等がある。これらのうち、今回は水産養殖場における潜水業務を対象として、調査研究を実施した。以下に調査結果について考察する。

4-1. 潜水業務

今回の調査研究では、調査への協力が得られた延べ12カ所の養殖場での潜水業

務を対象とした。調査実施に際しては一部日程等の調整に難渋した。養殖場側と調査班側のスケジュールが合わない場合や気象海象状況の急な変化によってスケジュールが直前にキャンセルとなった場合があった。また、調査班側から調査対象としたい潜水パターンや潜水業務を指定することは困難であった。そのため、選択的に yo-yo 潜水による業務を対象とすることはせず、実際に調査を行った際の潜水業務を対象とすることになったが、これらは養殖場における潜水業務の実態を示しているということもできる。

調査期間中には延べ79回の潜水業務が行われ、その内46回が yo-yo 潜水であった。yo-yo 潜水以外の非 yo-yo 潜水では、箱型潜水パターンならびにその類似型が多かったことから、yo-yo 潜水と非 yo-yo 潜水による調査結果を比較することで、養殖場で行われる yo-yo 潜水の特長について知見を得ることができた。養殖場で多く行われる潜水業務は、斃死魚の回収除去、養殖生け簀網の点検、養殖魚の水揚げなどであった。これらの業務で yo-yo 潜水が行われる状況を図31に示す。図は主にブリ類の養殖場を示したもので、標準的な養殖生け簀の大きさは10×10mで、生け簀網は深さ方向も10mの大きさを有するが、底部を閉じて錐状にすることから、深さは概ね8~9m程度になる。斃死魚は生け簀網の底部に沈んでいるため、そこまで生け簀の状態を目視点検しながら潜水し、回収後に隣の生け簀に移動して、再び潜水を行うことになる。したがって、管理する生け簀の数が多いほど、yo-yo 潜水の回数は増えることになり、また

業務日数や業務時間も多くなる。これら ている
は研究Aによるアンケート結果を裏付け

。

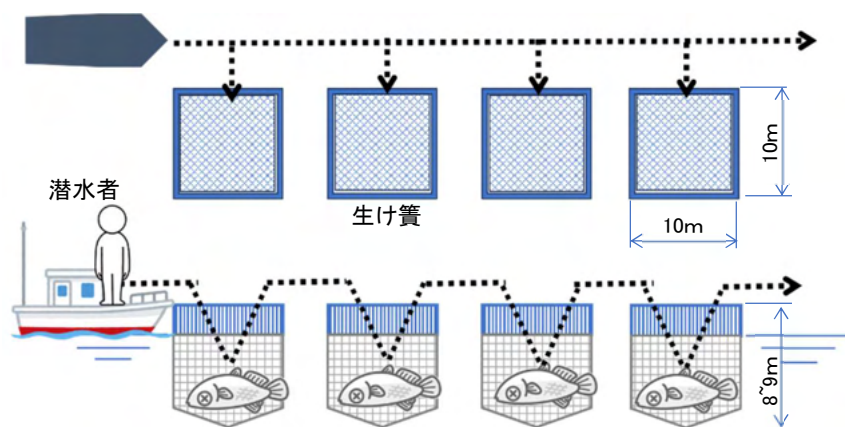


図-31. 養殖場における yo-yo 潜水の状況(ブリ類養殖場の例)

生け簀の管理は個人事業者では10～20基程度が限界と考えられている。平均的な生け簀の大きさは1基当たり100m²となるので、管理できる生け簀面積は2,000m²となる。2023年の漁業センサス²⁴⁾によれば、主にブリ類を養殖する事業者は979あり、その内管理する生け簀面積が2,000m²以下は425(43.4%)であった。一方管理する生け簀の面積が10,000m²を超える、すなわち、生け簀数が100基を超える大規模事業者は214(21.9%)に達しており、今後増加する傾向にあることから、yo-yo潜水を必要とする業務もさらに増加することが予想される。

4-2. 減圧症リスクの評価

減圧症の発症には、浮上後の体内に形成される不活性ガス気泡(以下、気泡)が大きく影響していると考えられている。気泡は血流を塞栓するほか、血管内皮に障害することで生体に様々な影響を及ぼ

すことになる。これらは減圧症の症状に特異的なものは無く、症状が全身に及ぶことを説明し得る。気泡は、潜水中の体内への不活性ガス溶解蓄積量が多いほど形成されやすくなる。不活性ガスの溶解蓄積は、曝露圧力(水深)と曝露時間(潜水時間)によるため、深くて長い潜水は減圧症リスクを高める要因とされている。一方yo-yo潜水は、多数の潜水が繰り返して行われるものの、1回あたりの潜水は数分程度の短時間であり、潜水深度も比較的浅いことから、不活性ガスの溶解蓄積量が過度となる可能性は低い。したがって、不活性ガス溶解量による減圧症リスク評価だけでは、yo-yo潜水におけるリスクを十分には評価することは難しい。そこで我々は、yo-yo潜水が減圧症リスクに及ぼす影響について以下のような機序を仮定した。すなわち、頻繁に繰り返される加圧(潜降)及び減圧(浮上)に伴う圧力変化によって刺激を受けた血管内皮細

胞が活性化し、微小膜胞体（micro-particle：MP）を産生し、それらが気泡核として気泡形成に寄与する。形成された気泡は、さらに血管内皮を刺激するため、炎症反応を引き起こすことになり、これらが総じて減圧症リスクを高めることになる。

今回の調査結果からは、MP は潜水前に比べ潜水後に増加し、その変化量は非 yo-yo 潜水に比べ yo-yo 潜水で大きいことが認められた。また炎症性サイトカインの発現量も同様に潜水後に高く、また yo-yo 潜水で多い傾向が認められた。これらの結果は、我々の仮説が有効である可能性を示唆するものである。潜水後に気泡が検知された例は 14 例あり、その内 yo-yo 潜水に関係するものは 8 例であったことから、特に yo-yo 潜水で多いとは認められなかった。また検知された気泡は等級（Grade）1 が 13 例、等級 2 が 1 例であった。気泡等級の評価においては、等級 1 は軽～中等度のリスク、等級 2 は中等度のリスクと考えられており、等級 2 以上の気泡が被験者の半数以上に認められた場合には、リスクが高い可能性があるとして潜水方法の変更を行うべきとしている²⁵⁾。今回の調査では気泡が検知された例は全体の半数以下（27.5%）であり、気泡等級も 1 が多かったことから、減圧症リスクは高くないと評価することができる。VAS 法による自覚的疲労度調査では、潜水後の VAS 値の平均は 48.1mm であった。減圧症の症状として強い疲労感を訴えることがあるが、VAS 値が 70mm を超えるような場合に「強い疲労感」と評価されることから、今回の VAS 値の結果からは潜水後

の疲労感は中等度であり、減圧症によるものではないと評価できる。VAS 調査の際に実施した潜水業務の労作強度を尋ねたところ、「普通」との回答が多かったことから、今回調査した潜水業務は一連の養殖業務に係る潜水業務において中等度の労作強度であったと考えられる。

これらのことから、今回の調査対象とした「普通」の潜水業務においては、減圧症リスクは過度ではなく、許容範囲内にあると考える。しかしながら、注意が必要な点もいくつか明らかとなった。

4-3. 減圧症リスク評価の指標としての MP

減圧症のリスク評価に利用できるバイオマーカーは明らかになっていない。潜水などの後に体内で不活性ガス気泡が検知されたことから、当初は不活性ガス気泡が減圧症発症の原因と考えられていた。しかしながら、気泡が検知されても減圧症の発症が認められない無症候性の気泡（silent bubble）の存在が確認されたことから、減圧症発症に関わる気泡の影響は限定的と考えられている。そのため、不活性ガス気泡に変わる減圧症のバイオマーカーが求められている。

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）が減圧症リスクのバイオ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²⁶⁾、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 $0.1\sim1.5\ \mu\text{m}$ 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²⁷⁾。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²⁸⁾。

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 が産生されることが考えられてきた²⁹⁾。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⁹⁾。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、曝露量が小さく、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。yo-yo 潜水では、頻繁な潜降浮上に伴う圧力刺激が血管に作用することで、血管内皮細胞も影響を受けると仮定した。

今回我々は、血管内皮細胞に特異的な

VE-カドヘリン (Vascular Endothelial cadherin) に着目し、その抗体である CD144 における潜水前後の変化量を調査した。カドヘリンは細胞方に特異的なカルシウム依存性の膜貫通型接着蛋白質で、細胞の接着結合部に存在し、同種親和性の結合を強固にする役割を有している。CD144 は 2 型糖尿病や腎不全などにより血管内皮障害を生じた患者で多量に検出されていることから、血管内皮の状態を評価する指標として有用と考えられている²⁴⁾。今回非 yo-yo 潜水に比べ yo-yo 潜水で潜水前後の MP 変化量が大きかったことは、yo-yo 潜水が血管内皮細胞に及ぼす影響が一般的な潜水に比べ高いことを示唆している。また、MP 変化量は yo-yo 潜水回数との相関が認められたことから、過度の yo-yo 潜水は生体への影響が大きくなり、減圧症へのリスク要因となりえる。これらのことから、血管内皮細胞 MP は、減圧症リスクのバイオマーカーとして利用できる可能性がある。

yo-yo 潜水を特徴づける繰り返し潜水回数と潜水後の MP 変化量には正の相関 ($r=0.23$) が認められた。一方、潜水深度、滞底時間 (bottom time)、平均水面時間 (surface interval) と MP 変化量には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。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、疲労感が大幅に高くなるとの意見が多くあった。激しい潜水業務では、潜水ストレスも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³⁰⁾。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（以下、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、51例中14例で気泡が検知された。いずれも等級1もしくは2の軽～中等度なものであり、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³¹⁾、今回の調査においても、気泡が検知された14例のうち9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。

4-5. 減圧症リスク評価の指標としての炎症性サイトカイン

高気圧曝露からの減圧の結果として生じる不活性ガス気泡は、血液やリンパの循環を阻害し、血管を伸展させ、血管作動性物質の放出を引き起こすことで、機械的外傷を引き起こすことが知られている。これら一連の作用に炎症応答が生じると考えられており、ラットを用いた研究では、減圧後に炎症性サイトカインの活性化や細胞接着分子の発現が認められている³²⁾。また、ヒトを対象とした研究においても、減圧後に炎症性サイトカインの有意な増大が認められており、体内気泡検知結果と関係があることが報告されている³³⁾。

今回我々も潜水によるストレスの指標として炎症性サイトカインの調査を実施した。先行研究において、減圧ストレスに伴う炎症性サイトカインの評価に唾液を用いた事例が報告³⁴⁾されていることから、本調査に際しても唾液を検体として用いることとした。唾液は非侵襲で採取可能であり、また採取自体も比較的容易でもあることから、本研究成果の社会実装を考える際に有効なものとなる。

今回の調査においては、潜水後に CPR、IL-1 β 、IL-6、IL-8、TFN- α の値はいずれも増加を示した。これらは先行研究による結果とも一致する³⁴⁾。また、IL-1 β 、IL-8 及び TFN- α については、非 yo-yo 潜水に比べ yo-yo 潜水で増加した。潜水後の炎症性サイトカイン発現量の変化は、潜水による様々な生体への影響によるものと考えられることから、唾液検体から得られる炎症性サイトカインの発現量は、

減圧症のバイオマーカーとして利用できる可能性がある。

一方 SIgA は潜水後に減少した。SIgA は唾液量によって濃度が大きく変化することが知られているが²¹⁾、今回の調査で採取した検体には、唾液量が少なかったものがあつた。また、SIgA 濃度はサーカディアンリズムによって変化するが、業務の特性上、潜水開始前の唾液採取は早朝で、潜水業務終了は昼頃で、その後に採取を実施したことから、サーカディアンリズムの影響があつた可能性がある。冷水負荷などのストレスによっても SIgA 濃度が低下するとの報告³⁵⁾もあることから、今回の結果はこれらの要因によるものと考えられる。

唾液の採取は非侵襲であり、特に専門的なスキルを必要としない。また、検体は採取後可能な限り早い時間に冷凍することが望ましいが、物質によっては室温で保存してもある程度の期間は濃度が大きく変化しない。これらは血液等の検体とは大きく異なる点であり、唾液検体の一つの利点である。このようなことから、潜水の現場での利用も可能と考える。ただし、今回の調査においては十分な唾液採取が行えなかった事例があつた。また、検体採取前の飲食や喫煙などについても十分な管理が行えなかった。今後唾液検体を利用する際には、採取に関する基本的なルール等を作成し、それらを事前に周知するとともに、被験者には唾液採取方法について事前トレーニングを実施する必要がある。

4-6. 減圧理論からのリスク評価

現在減圧症予防対策として最も有効で、かつ広く利用されているものは「減圧表」である。減圧表は、減圧理論に基づいた不活性ガス動態モデルを用いて、高気圧曝露時の生体に対する不活性ガスの溶解と排出をトレースし、排出の過程でその深度で(減圧症リスクが低いとして)許容される最大の不活性ガス分圧値(M値)に達した時、次の深度まで浮上できるというものである。同様の仕組みは、ダイビングコンピューターにも搭載され、多くの潜水業務で利用されている。

このように、水面に浮上した時点では体内に溶解蓄積した不活性ガス分圧は高い状態にある。そのため、減圧表では不活性ガス分圧を下げるために、所定の時間水面に留まることを求めている。これらの水面休止時間を不活性ガス動態モデルから求めることは難しく、過去の事例や経験によって決定されることが多い。我が国においても旧高気圧作業安全衛生規則における別表第一および第二減圧表には「業務間ガス圧減少時間」として水面休止時間が定められていた。潜水土テキストでは、この業務間ガス圧減少時間について、前回の潜水によって体内に溶解蓄積した不活性ガス(主に窒素)を、ある程度排出しておき、次の潜水において体内に溶解する不活性ガスと合わせてもその量が過大にならないようするために必要な休止時間であり、この間に激しい運動や重作業を行うことは減圧症発症の誘因となる、と説明している³⁶⁾。

多くの減圧表では、この水面休止時間を十分とることなく再度潜水を行った場

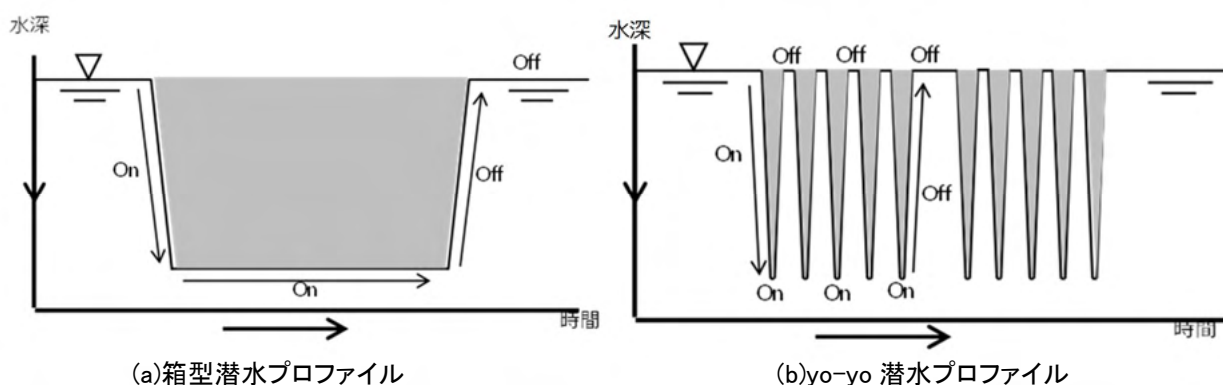
合には、浮上せずに潜水を継続したと見なし、同様の潜降浮上を何度行っても「1回」の潜水として浮上方法を決定することとしている。これを yo-yo 潜水に当てはめれば、1 回目の潜水から最終の潜水までの時間と最大深度から、浮上に必要な要件が決定されることになる。

カナダ DCIEM 減圧表は信頼性が高いと評価されていることから、当該減圧表を用いて必要な yo-yo 潜水における浮上条件の有無を確認した。今回調査対象とした 79 回の潜水プロファイルのうち、繰り返し潜水ではなく yo-yo 潜水が 1 回行われた 29 例の潜水プロファイルを対象としたところ、16 例で減圧停止が必要であり、特に潜水深度が深いほどその傾向が高かった。例えば、被験者 ID が K-002 (図 10-44) では、最大水深 9.2m で 19 回の yo-yo 潜水が行われ、潜水業務時間は 162 分となったが、このとき DCIEM 減圧表では水深 3m で 5 分間の減圧停止が必要となる。また、M-005 (図 10-59) では、最大水深 26.75m で 7 回の yo-yo 潜水がおこなわれ、潜水業務時間は 110 分となったが、この場合には、水深 9m で 7 分間、6m で 26 分間、3m で 82 分間もの減圧が必要となる。なお、実際には yo-yo 潜水からの浮上時には減圧停止はほとんど行われていなかった。必要な減圧停止を省略することは、不活性ガス気泡の形成を促進し、減圧症の発症を引き起こすことになる。しかしながら、今回の調査期間中に減圧症の発症は認められず、不活性ガス気泡が検知された件数も少なかった。その理由について検討する。

現在の減圧理論は箱型潜水プロファイ

ルを対象としている。この場合、不活性ガスの動態は、潜降の際と滞底時には体内へ溶解 (On gassing) することになり、浮上の際と水面到着後には体内から排出 (Off gassing) に転じることになる。yo-yo 潜水においても同様に潜降-滞底時には溶解、浮上-水面時には排出となるが、この一連の過程が短時間であるため、最

終的な不活性ガスの溶解量は少なくなる。これらを図 32 に示す。図中灰色の部分の不活性ガスの溶解-排出に関わる部分であるが、図からも明らかなように、yo-yo 潜水では灰色部の面積が小さくなる。これは箱型潜水に比べ yo-yo 潜水では不活性ガスの溶解量が少ないことを意味している。



* On: 不活性ガス溶解 (On gassing) Off: 不活性ガス排出 (Off gassing)

図-32. 潜水プロファイルにおける不活性ガス動態 (溶解-排出)

また、減圧症の発症には不活性ガス気泡が大きく影響していると考えられている。今回の調査では、潜水後に不活性ガス気泡が検知された例は少なく、また検知されたものも低等級であった。これには yo-yo 潜水の特徴が関係していると考えられる。すなわち yo-yo 潜水では、浮上後に短時間の水面時間後すぐに潜水を開始することで圧曝露を受けることになるため、最終回の浮上後までの間には、気泡が成長するための十分な時間がなかったことが要因と考えられる。このことから、従来の減圧理論に基づく不活性ガス動態モデルでは、yo-yo 潜水によるリスクを説明できない可能性がある。

減圧理論に研究者からは、yo-yo 潜水では、水深変化が非常に速く繰り返され、1

～5 分程度で素早く浮上・潜降を繰り返すため、従来の灌流モデルに基づく標準的な減圧理論やダイブコンピューターでは、ダイバー内の不活性ガス負荷の変化を追跡できなくなる、との意見もある (Salm A. ResearchGate, 2021)。

これらのことから、yo-yo 潜水における減圧症予防に関しては、従来より用いられてきた減圧表やダイビングコンピューターでは不十分であり、yo-yo 潜水に応じた安全基準を設けることが必要と考えられる。

5. まとめ

今回の調査研究は、業務の現場において、短時間に繰り返し行われる潜水 (yo-yo 潜水) を用いて潜水業務に従事する潜

水作業者に発症する減圧症に係る調査を目的として。我が国で初めて実施された本格的な労働衛生研究である。yo-yo 潜水による業務としては、ダイビングインストラクターによる業務や水中映像撮影に係る業務などがあるが、業務が通年で行われ、また業務量も比較的多いことから、水産養殖場における潜水業務を対象とした。調査の結果、水産養殖場では様々な作業が行われており、作業内容に応じて異なる潜水様式が用いられていた。今回調査対象として 79 回の潜水のうち約 58% で yo-yo 潜水が行われており、37% が箱型潜水であった。これらは研究 A におけるアンケート調査結果とほぼ符合する。

潜水業務における減圧症リスク評価に関して、従来は、浮上後の体内に形成される不活性ガス気泡がリスクの指標として用いられており、気泡形成の誘因となる体内への不活性ガス溶解量を決定する潜水深度と潜水時間が減圧症のリスク要因と考えられてきた。しかしながら、yo-yo 潜水は潜水深度が比較的浅く、潜水時間も短いことから不活性ガス溶解量も低いと考えられることから、yo-yo 潜水の評価に際しては、従来とは異なる評価指標が必要であった。減圧症の臨床症例から、発症要因として血管内皮障害が考えられていることから、内皮障害の指標として内皮細胞から産生された微小膜胞体 (microparticle: MP) 発現量を指標として用いることとした。また、内皮障害に伴い炎症応答が生じる可能性があることから、唾液検体を用いて炎症性サイトカインの発現量を調査した。従来から減圧症リスク評価に用いられている不活性ガス

気泡検知も併せて実施した。

調査の結果、MP 並びに炎症性サイトカインの発現量は潜水前に比べ潜水後に高値を示す傾向が認められた。また、yo-yo 潜水と yo-yo 潜水以外 (非 yo-yo 潜水) との比較においても、これらはいずれも yo-yo 潜水で高い傾向にあった。これらのことから、今回減圧症リスクの指標として用いた MP 並びに炎症性サイトカイン発現量はリスク評価指標として有用と考えられる。

今回の調査期間中には、軽微なものを含め、減圧症の症状が認められなかった。また従来減圧症リスクの指標として用いられてきた不活性ガス気泡の調査結果は、検知された被験者数は全体の 28%にとどまり、検知気泡等級はいずれも低かった。今回新たに指標として用いた MP の潜水前後での変化量は 1.22 であり、炎症性サイトカインのうち例えば IL-8 のそれは 1.62 であった。これらの値は、許容範囲内のリスクの程度を示したものと考えることができる。VAS 値の平均は 48.08mm であり、労作強度に関する被験者の回答も「軽い」から「普通」が多かった。これらのことから、今回調査対象とした日常的な潜水業務の範囲内では、減圧症のリスクは許容できる範囲内のレベルにあると考えられる。

一方今回の調査結果から、減圧症発症のリスクとなり得る要因についても知ることができた。前述のように yo-yo 潜水では非 yo-yo 潜水に比べ潜水後の MP 変化量が大きかったが、これは yo-yo 回数と相関している可能性があることから、yo-yo 回数が過度な場合は減圧症リスクを高

める可能性がある。yo-yo 回数の増加は、結果的に長時間の潜水業務を招くことになるため、潜水時間を管理することで減圧症リスクを低減できる可能性がある。また、一定時間以上の水面時間後に潜水を再開する所謂繰返し潜水は、それ以外と比較して潜水後のMP 変化が大きかった。これは、繰返し潜水は減圧症リスク要因となり得ることを示しており、特に 1 日に複数回の yo-yo 潜水を行うような場合には注意が必要であると考ええる。

研究Aによるアンケート調査結果からは、水産養殖における潜水業務は通年で行われるが、その労作強度には濃淡がある。特に水温の急上昇により斃死魚が増える夏季（6-9 月）や出荷量が増大する年末（12 月）は繁忙期となり、作業量が増大するため潜水回数や潜水時間が大きくなり労作強度も激しくなる。また、台風の接近や赤潮の発生などの自然災害が発生した場合には、短期間で復旧作業を終える必要があることから、作業量が増大する。それに対応するためには、yo-yo 回数の増加や繰返し潜水の実施などが必要となることは容易に想像される。今回の調査結果からは、これらは減圧症リスクを増大させる可能性があるが、単に制限を設けるだけでは根本的な解決には至らない。リスクがあることを明らかにし、許容範囲を超えることにならないように具体的な対策を示すことが有効な方策と考える。

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考ええる。

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) 中村 裕, 村瀬邦彦, 野口難司, 俵 正幸 他. 養殖生簀の潜水後に発症した減圧症の 1 例. *長崎医学会雑誌* 2013; 88: 181-186
- 6) Brubakk AO, Duplancic D, Valic Z, Palada I, et al. A single air dive reduce arterial endothelial function in man. *J Physiol.* 2005; 566:901-906
- 7) Brubakk AO, Møllerløkken A. The role of intra-vascular bubbles and the vascular endothelium in decompression sickness. *DHMJ.* 2009; 39:162-169
- 8) 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
- 9) 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
- 10) Brett KD, Nugent NZ, Fraser NK, et al. Microparticle and interleukin-1 β production with human simulated compressed air diving. *SCIENTIFIC REPORTS.* 2019.
- 11) Madden LA, Laden G. Endothelin microparticle in vascular disease and as a potential maker of decompression illness. *DHMJ.* 2007; 37:156-161
- 12) 野村昌作. 血球由来マイクロパーティクルと血管病変. *血栓止血誌*. 2011; 22:24-32
- 13) 疲労感 VAS 検査方法. 日本疲労学会. <https://j.fatigue/wp-content/uploads/2024/02/VAS.pdf>
- 13) DCIEM DIVING MANUAL Air decompression procedures and tables. Department of national defence - Canada. 1992
- 14) 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
- 15) 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
- 16) Shields TG, Duff PM, Willcock SE. Decompression Sickness from Commercial Offshore Air-Diving Operations on the UK Continental Shelf during 1987. OTO 89 029. Health and Safety Executive; 1989
- 17) 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
- 18) 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
- 19) Koga H, Sugiyama S, Kugiyama K, et al. Elevated level of VE-cadherin-positive endothelial microparticles in patients with type 2 diabetes melitus and coronary atery disease. *J Am Coll Cardiol.* 2005; 45:1622-1630
- 20) 石渡智子, 森藤雅史, 石島寿道, 青山友子, 他. 運動による自覚的疲労度とストレスホルモン・サイトカインとの関連性. *日本補完代替医療学会誌.* 2011; 8:67-73
- 21) 井澤修平, 城月健太郎, 菅谷 渚, 他. 唾液を用いたストレス評価. *日本保管代替医療学会誌.* 2007; 4:91-101
- 22) Cross ER. Taravana diving syndrome in the Tuamotu diver. In *Physiology of breath hold diving and the Ama of Japan.* National Academy of Sciences. 1965; 205-219
- 23) Tamaki H, Koshi K, Ishitake T, et al. A survey of neurological decompression illness in commercial breath-hold divers (Ama) of Japan. *Undersea Hyperb Med.* 2010; 37:209-217
- 24) 2023年漁業センサス調査結果. 農林水産省. <https://www.maff.go.jp/tokei/census/fc/2023fc/2023fc.html>
- 25) Nishi RY. Doppler and ultrasonic bubble detection. In *The physiology and medicine of diving*, 4th ed, pp 433-453
- 26) Wolf P. The nature and significance of platelet products in human plasma. *Br Haematol.* 1967; 13: 269-288
- 27) 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
- 28) Thom SR, Yang M, Bhopale VM, et al. Intra-microparticle nitrogen dioxide is a bubble nucleation site leading to decompression induced neutrophil activation and vascular injury. *J Appl Physiol.* 2013; 114:550-558
- 29) Yu X, Xu J, Huang G, et al. Bubble-Induced Endothelial Microparticles Promote Endothelial Dysfunction. *PLOS ONE.* 2017
- 30) Distler JH, Akhmetshina A, Dees C, et al. Induction of apoptosis in circulating angiogenic cells by microparticles. *Arthritis Rheum.* 2011; 63:2067-2077
- 31) 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
- 32) Ersson A, Linder C, Ohlsson K, Ekholm A. Cytokine response after acute hyperbaric exposure in rat. *Undersea Hyperb Med.* 1998; 25:217-221
- 33) McLellan TM, Wright HE, Rhind SG, Cameron BA, Eaton DJ. Hyperbaric stress in divers and non-divers: neuroendocrine and psychomotor responses. *Undersea Hyperb Med.* 2010; 37:219-231
- 34) Monnoyer R, Lautridou J, Deb S, Hjeld A, et al. Using salivary biomarkers for stress assessment in offshore saturation diving: A pilot study. *Frontiers in Physiology.* 2021;

12:1-7. Doi: 10.3389/fphys.2021.791525

35) Ring C, Harrison LK, Winzer A, et al. Secretory immunoglobulin A and cardiovascular reaction to mental arithmetic, cold pressor, and exercise: effects of alfa-adrenergic blockade. *Psychophysiology*. 2000; 37:634-643

36) 梨本一郎他. 新・潜潜水士テキスト. 中央労働災害防止協会. 平成 8 年; 168-169

IV. 研究C：yo-yo 潜水用プロトコルの作成とその検証

研究要旨

研究Bによる調査の結果、短時間に繰り返し行われる潜水（yo-yo 潜水）において、長時間の潜水業務で潜降浮上回数が過度な場合や一連の yo-yo 潜水を複数回繰り返して行うことが減圧症リスクを高める要因であることが分かった。そこで、本調査研究（研究C）では、yo-yo 潜水を繰り返して行い、潜水業務従事者から「厳しい業務」と評価される潜水業務を対象として調査を行うこととした。当該潜水業務では、減圧症リスクが懸念されたことから、安全予防対策として潜水業務終了後に船上で酸素を呼吸するプロトコルを策定し、実施することとした。高濃度の酸素を呼吸することによって肺内の酸素濃度を上昇させることで、体内に溶解蓄積した不活性ガス排出が促進され、微小膜胞体（MP）や不活性ガス気泡の低減が期待できる。実際にこのプロトコルを用いたところ、潜水による曝露指数（Q 値）が、減圧症リスクの閾値とされる 25 を大きく超える 31 であったにも関わらず、MP 発現量や不活性ガス気泡の形成は低く、減圧症リスクは許容範囲内と考えられた。これらのことから、今回我々が策定した船上酸素呼吸プロトコルは、yo-yo 潜水における減圧症予防対策として有効であり、台風などの自然災害復旧時などを含め、厳しい潜水業務が予想される場合には、船上酸素呼吸プロトコルを積極的に活用すべきと考えられた。

1. 研究目的

研究Cにおける調査研究は、研究Bによる調査結果を踏まえて、養殖場での潜水業務における減圧症リスク低減を目的としたプロトコルを作成し、それを実作業で運用評価することで、プロトコルの有効性を評価することを目的とした。研究Bによる調査で、養殖場における潜水業務は養殖魚の育成過程に応じて様々であり、養殖業者や養殖海域によっても異なることが明らかとなった。また、調査した潜水業務では軽微なものを含め減圧症の発症事例はなく、調査結果からも直ちに減圧症発症を招く恐れのあるような

リスクを認めなかった。これは、調査対象の潜水作業が、軽～中等度の作業強度であったことが要因と考えられる。そのため、yo-yo 潜水回数や潜水時間を一律に制限することは難しく、また養殖業は営利を目的としているため、作業効率の低下を招く恐れのある措置は受入れが困難であると考えられた。

そこで、潜水業務終了直後に船上で酸素吸入を行うプロトコルを策定した。減圧症は潜水後ある程度時間が経過した後に発症することが知られている。減圧症発症時間に関するアメリカ海軍の調査では、浮上後から減圧症発症までの時間

が、1 時間以内であった例は 42%、3 時間以内は 60%であったことが報告されている（表 1）。これらのことから、潜水終了後短時間の措置であれば、減圧症発症リスクを低減できると考えられる。また大気圧下での酸素吸入は、体内への酸素溶解量が増大することから不活性ガスの排出を促進することにくわえ、MP（micro-particle）による微小気泡の除去にも有用と考えられる。そこで、潜水作業を終了し船上に復帰した潜水作業者に酸素投与を行うこととした。浮上後から投与までの時間は、極力短時間とすることとし、投与時間は最低 10 分間とした。その後検体等の採取を行い、それらの分析結果を研究 B のよるものと比較することで、プロトコールの有用性を評価した。研究 B の結果から、潜水回数の多い yo-yo 潜水と繰り返し潜水（repetitive diving）で生体への影響が大きい傾向が認められたことから、yo-yo 潜水を繰り返して行う潜水業務を対象とした。また、当該潜水業務は、潜水作業から「重激な作業」と評価されているものであったことから、安全の観点から酸素投与は全ての潜水作業者とし、酸素投与の有無による評価は行わなかった。

表-1. 減圧症発症までの時間	
1 時間以内	42%
3 時間以内	60%
8 時間以内	83%
24 時間以内	98%
US Navy Diving Manual 2011	

2. 方法

2-1. 船上酸素呼吸プロトコール

今回調査対象とした潜水業務は、作業の都合上 yo-yo 潜水を繰り返して行うことが予定されていた。そのため、潜水業務時間が比較的長時間となることも考えられた。研究 B の調査結果から、yo-yo 潜水を繰り返して行うことや yo-yo 潜水回数が増加する長時間の潜水業務では微小膜胞体（microparticle: MP）や炎症性サイトカイン発現量、不活性ガス気泡形成の増大が予想され、これらは減圧症発症リスクに対する懸念を高めるものとなる。潜水業務時間の短縮や yo-yo 潜水回数の制限など、潜水業務内容に直接介入することは容易でないことから、減圧症発症リスク低減のために、潜水業務終了後に船上で酸素呼吸を実施することとした。減圧症発症リスクに強く影響する要因として、潜水に伴う不活性ガス（窒素）の溶解排出動態がある。すなわち、水深下での環境圧曝露による不活性ガスの溶解に対し、浮上減圧時の不活性ガス排出を効率よく行うことで、減圧症発症リスクを低減できると考えられる。ガス動態のエンジンは分圧較差によることから、酸素呼吸によって体内の酸素分圧を高めて不活性ガス分圧を下げることで、不活性ガスの排出を促進することができる。また、減圧時に形成された不活性ガス気泡の消失にも効果を発揮する。MP にはガス分子（N2O2）が含まれていることが報告されていることから¹⁾、MP の抑制も期待でき

る。

船上酸素呼吸プロトコルを図 1 に示す。船上酸素呼吸は当日の潜水業務における最終の浮上後に実施する。浮上後は速やかに酸素呼吸を開始することが好ましいが、潜水装備の脱着等に時間が必要

であることから、浮上後 10 以内に酸素呼吸を開始することとした。酸素呼吸時間は最低 10 分間とし、潜水後に何らかの違和感や体調変化等を感じた場合には、それらが消失するまで 10 分を超えても酸素呼吸を継続することとした。

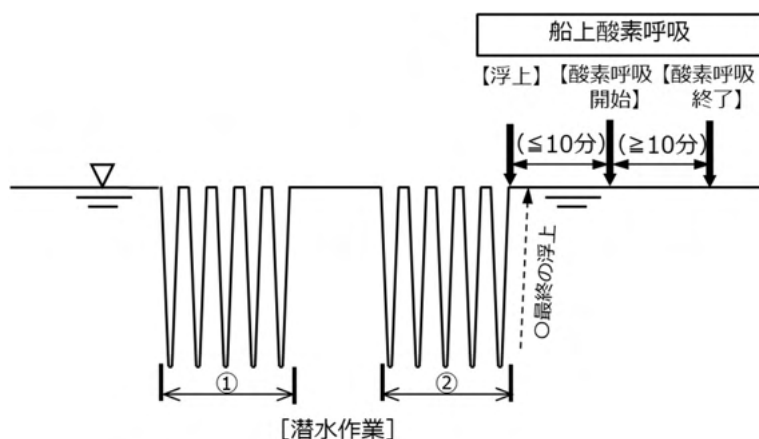


図-1. 船上酸素呼吸プロトコル

酸素呼吸はリザーバーバック付酸素マスクを用いて実施した（図-2）。小型のボンベに充填した医療用酸素は、このマスクを介して被験者に供給された。供給圧力と流量の調整は酸素用流量調整器（小池メディカル製、フロージェントルプラスG型）を使用した。供給流量はボンベ容量を考慮して 7L/分とした。



図-2. リザーバーバック付酸素マスク

2-2. 調査項目

研究Cにおいて実施した調査項目を以下に、調査プロトコルを図 3 に示す。調査は研究Bに準じて実施した。実施時期が 12 月であり、3 月の研究終了時期までの時間が限られていたため、一部検体分析および評価を省略した。なお今回の調査研究における全ての手順はヘルシンキ

宣言に従って計画し、東京慈恵会医科大学倫理委員会による承認を受けた。

[調査項目]

- ① 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
- ② 潜水後の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知と評価
- ③ 血管内皮損傷による影響を評価するための内皮由来微小膜胞体 (MP) の定量
- ④ 潜水後の Visual analogue scale (VAS)による自覚的疲労感の評価

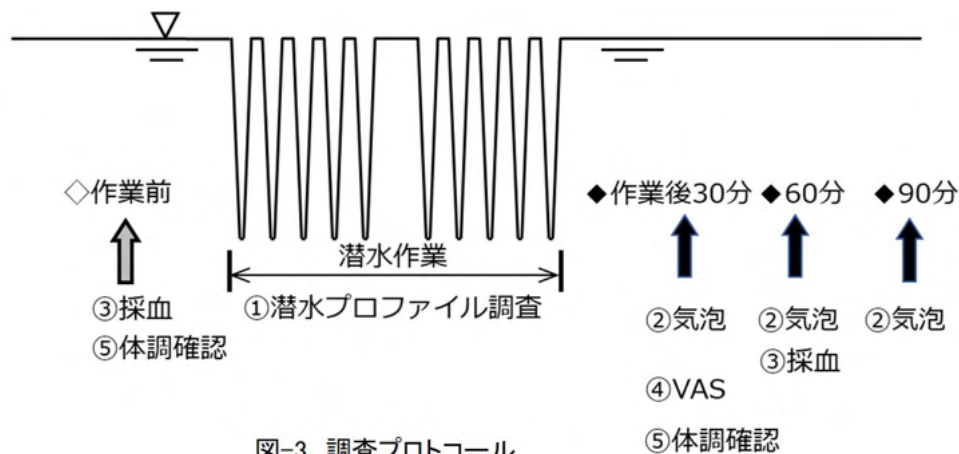


図-3. 調査プロトコール

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同意が文書によって得られた労働者とした。

2-2. 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 Dive Data Recorder、図4参照）を携行させ、潜降開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。潜水が潜水士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、潜水業務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



図-4. 潜水記録計
[ReefNet社 Sensus Ultra Dive Data Recorder]

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。潜水プロファイルデータのサンプリングは 5 秒後とし、記録したデータは、専用のインターフェースを介してコンピュータに転送した後、解析を行った。

2-3. 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、図 5 参照）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 2）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。



図-5 超音波ドップラー気泡検知機

表-2. 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。

2-5. 微小膜小胞体（MP）の測定

微小膜胞体 (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（～5mL）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 ～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、測定プロトコルの詳細に関しては、担当者との協議の上決定した。プロトコルの照査を以下に記す。

2.5.1 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 1.5 mL 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 1.5 mL 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、1.5 mL 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。

2.5.2 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。

2.5.3 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。

2.5.4 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。

2.3.5 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。

2.5.6 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。

2.5.7 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。

2.5.8 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。

2-6. 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。調査に使用した VAS 調査票を資料 1 に示す

2.7 統計的解析

データ群間の比較については、Welch の t 検定を用い、 $p < 0.05$ の場合を統計学的に有意とした。相関に関してはスピアマン (Spearman) 順位相関検定を用い、危険率 5%で検定した。

3. 結果

現地調査は養殖業務繁忙期となる令和7年12月に一カ所の養殖事業所において実施した。調査結果を以下に示す。

3-1. 被験者

被験者は、男性潜水者12名で、全てその養殖場に属する潜水業務従事者であった。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ではなく、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。なお調査側のマンパワー不足のため、検体の採取は6名の被験者に留まった。

被験者の年齢は、 26.8 ± 4.9 歳（範囲：

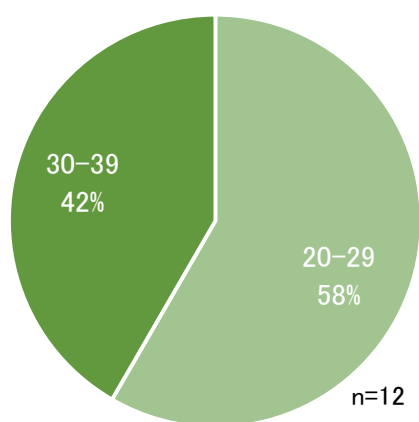


図-6. 被験者の年齢構成

3-2. 酸素呼吸

12名の被験者は全員潜水業務終了後に船上で酸素呼吸を行った。酸素呼吸開始は、潜水業務を終了し船上に復帰した後10分以内を目安位に速やかに実施すること、並びに酸素呼吸時間は最低10分間を目安とし、口呼吸でゆっくりと呼吸する

21-36歳）で（図6）、身長は 172.5 ± 3.3 cm（範囲：168-179cm）、体重は 66.2 ± 9.6 kg（範囲：54-90kg）、BMI は 22.3 ± 3.4 kg/m²（範囲：18.8-31.1 kg/m²）であった（図7）。

研究Bにおける被験者52名のうち、yo-yo 潜水を実施したものは40名あり、それらの年齢及び身体状況は、年齢 32.6 ± 11.1 歳（範囲：20-66歳）、身長 170.9 ± 5.6 cm（範囲：158-188cm）、体重 74.5 ± 15.3 kg（範囲：20-105kg）、BMI 25.5 ± 5.1 kg/m²（範囲：17.7-36.8 kg/m²）であった。

被験者を比較すると研究Cの被験者は研究Bにおける被験者に比べ、年齢が若く BMI 値も低かった

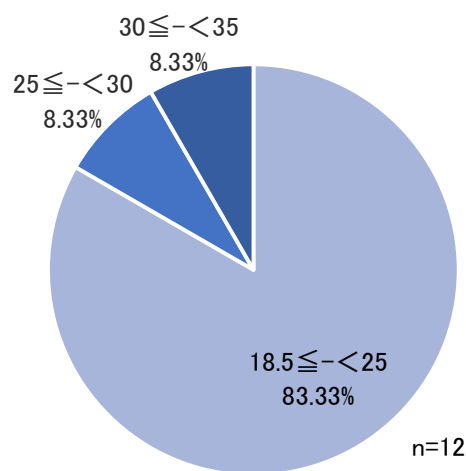


図-7. 被験者の BMI 状況

ことを指示した。潜水業務は複数回行われたが、酸素呼吸はその日の最終の潜水業務後に実施した。酸素呼吸を開始するまでの時間や酸素呼吸時間の管理は被験者自身で行った。酸素呼吸の状況を図8に示す。酸素呼吸後に体調不良等の異常を訴えた被験者はいなかった。酸素呼吸の

効果として、被験者から「潜水後の疲労が少ない」や「潜水後にときに生じる皮膚のピリピリ感が生じない」などの声があり、

被験者自身が酸素呼吸の有効性を感じていることが分かった。



◇酸素呼吸設備



◇酸素呼吸実施状況

◇図-8. 潜水業務後の酸素呼吸実施状況

3-2. 潜水プロフィール

調査した潜水業務は全て yo-yo 潜水であり、それら一連の潜水を 2 回行う繰り返し潜水であった。潜水プロフィールの調査結果を表 2 並びに図 9-1～12 に示す。今回の調査した潜水プロフィールは研究 B によるものとは異なるものであった。これは作業目的の違いによるものであるが、今回の事例は特別なものではなく、養殖魚育成の過程で必要な潜水作業であり、定期的実施されるもので、重激な作業であるとのことであった。

今回調査した全ての潜水業務における、平均の最大潜水深度(平均値±SD)は $16.8 \pm 3.8\text{m}$ (範囲: 8.3-22.7m)、潜水業務時間は 67.7 ± 16.6 分 (範囲: 36-91 分)、yo-yo 潜水回数は 12.3 ± 2.9 回 (範囲: 8-22 回)、Q 値は 21.9 ± 4.5 (範囲: 12.7-30.7)

であった。研究 B における yo-yo 潜水は 46 回行われ、平均最大潜水深度は $16.2 \pm 7.2\text{m}$ (範囲: 5.1-26.8m)、潜水業務時間は 75.5 ± 57.1 分 (範囲: 15-233 分)、yo-yo 潜水回数は 11.6 ± 12.0 回 (範囲: 2-50 回)、Q 値は 20.6 ± 8.1 (範囲: 7.1-46.9) であった。これらに大きな違いは認められないが、潜水プロフィールのグラフを比較すると、研究 C では研究 B に比べ、連続して休みなく潜降浮上が行われている様子が認められている。このことから、潜水業務における運動強度は研究 B 調査時に比べ、研究 C で大きいことが推測できる。潜水中の運動強度増大は呼吸量や血流量の増加を招き、それに伴って体内への不活性ガス溶解量が増えることから、減圧症リスクを高める要因と考えられている。

表-3. 潜水プロファイル

no	ID	潜水の 型	yo-yo 潜 水回数	繰返し 潜水	潜水方 式	開始 時刻	終了 時刻	業務時間 (分)	最大深 度(m)	Q 値
1	P-001	yo-yo	12	1	送気式	9:00	9:48	48	17.62	19.14
2		yo-yo	17	2	送気式	10:24	11:54	90	17.07	25.68
3	P-002	yo-yo	12	1	送気式	9:00	9:48	48	8.3	12.68
4		yo-yo	17	2	送気式	10:23	11:54	91	19.22	27.87
5	P-003	yo-yo	12	1	送気式	8:25	9:23	58	19.71	22.63
6		yo-yo	12	2	送気式	9:56	11:05	69	20.23	25.11
7	P-004	yo-yo	10	1	送気式	8:29	9:13	44	19	19.24
8		yo-yo	12	2	送気式	9:55	11:06	71	14.89	20.97
9	P-005	yo-yo	11	1	送気式	8:13	9:32	79	22.65	29.02
10		yo-yo	15	2	送気式	10:12	11:36	84	14.79	22.72
11	P-006	yo-yo	12	1	送気式	8:33	9:35	62	13.54	18.54
12		yo-yo	11	2	送気式	10:22	11:37	75	10.32	17.60
13	P-007	yo-yo	14	1	送気式	8:38	9:54	76	22.16	28.04
14		yo-yo	8	2	送気式	10:24	11:54	90	16.78	25.41
15	P-008	yo-yo	8	1	送気式	8:52	9:47	55	17.47	20.37
16		yo-yo	11	2	送気式	10:30	11:45	75	17.02	23.40
17	P-009	yo-yo	11	1	送気式	8:34	9:10	36	13.97	14.38
18		yo-yo	12	2	送気式	9:57	11:04	67	16.62	21.79
19	P-010	yo-yo	11	1	送気式	8:33	9:11	38	16.85	16.55
20		yo-yo	11	2	送気式	9:57	11:05	68	15.76	21.24
21	P-011	yo-yo	13	1	送気式	8:29	9:34	65	11.78	17.56
22		yo-yo	11	2	送気式	10:15	11:36	81	22.14	28.93
23	P-012	yo-yo	11	1	送気式	8:04	9:33	89	22.47	30.63
24		yo-yo	22	2	送気式	10:12	11:39	87	12.69	21.16
mean			12.33					67.7	16.79	21.94
SD			2.92					16.6	3.76	4.50

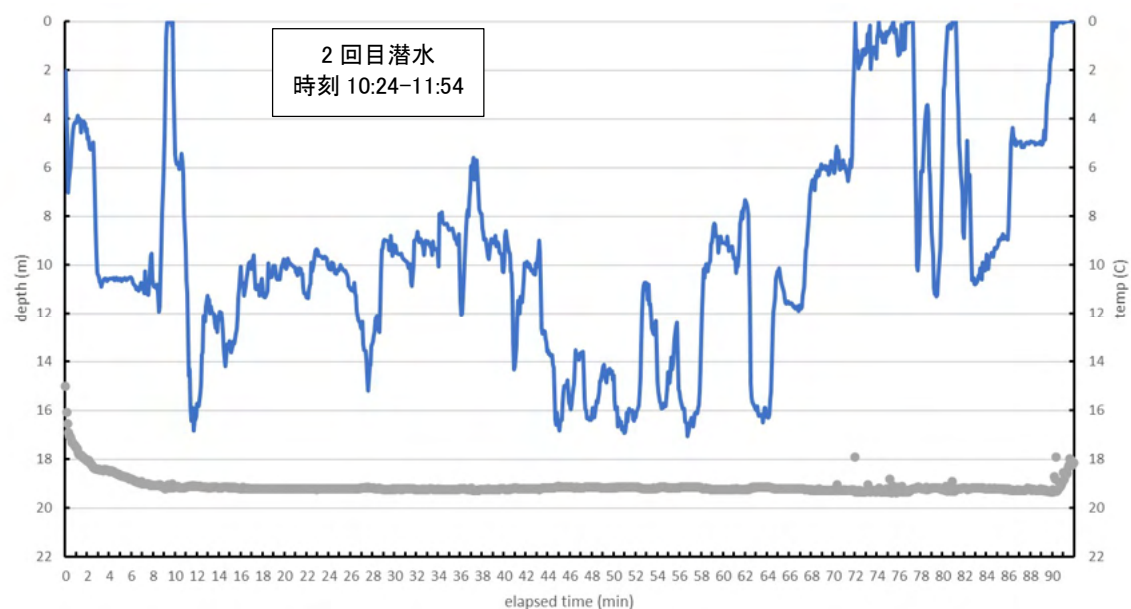
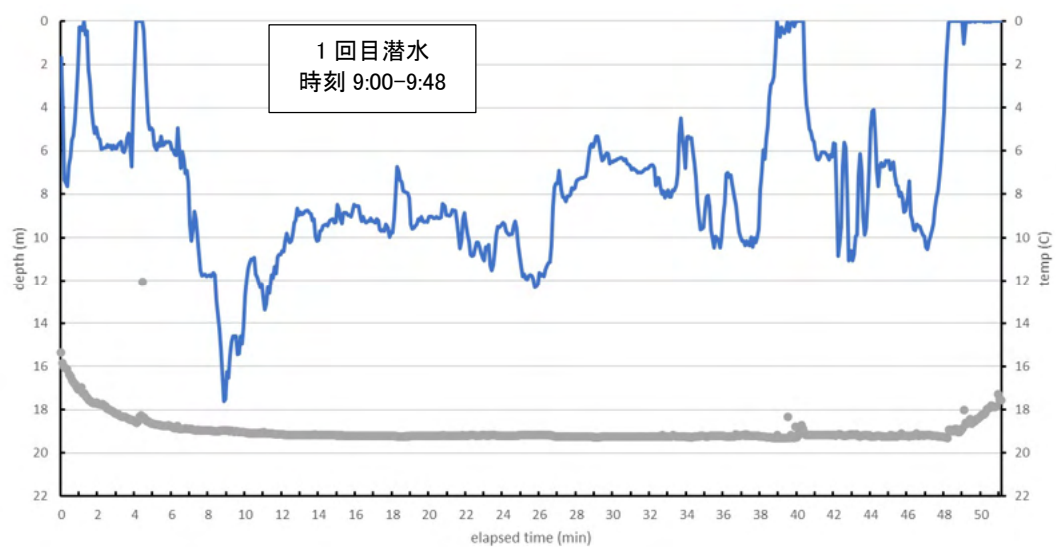


図-9-1. 被験者 p-001 の潜水プロフィール

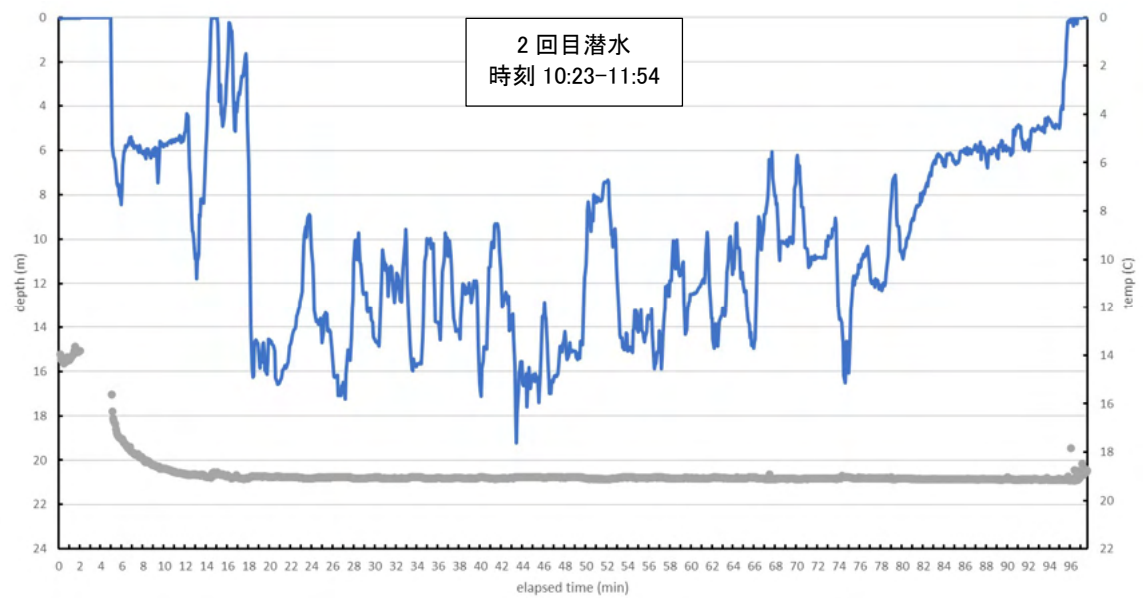
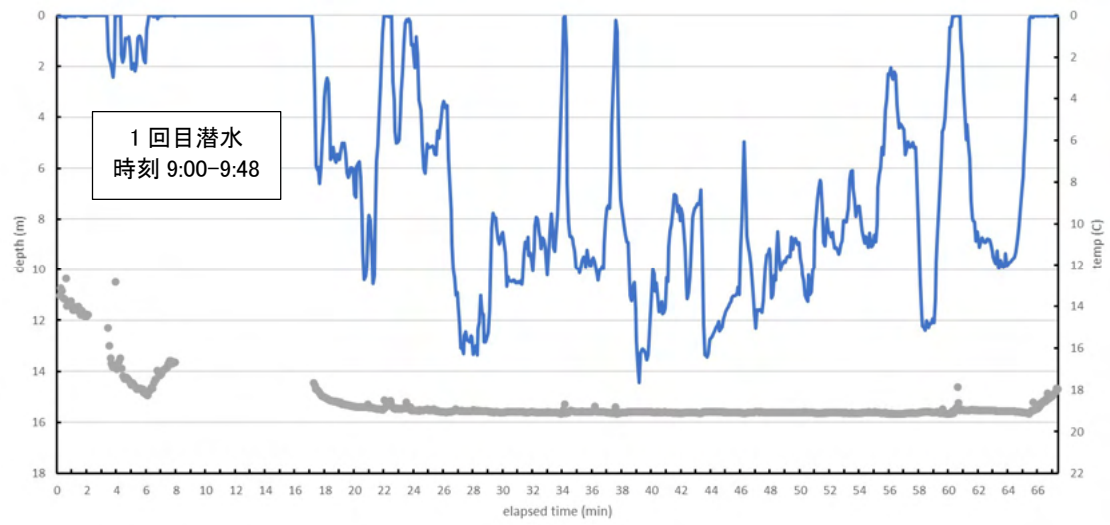


図-9-2. 被験者 p-002 の潜水プロフィール

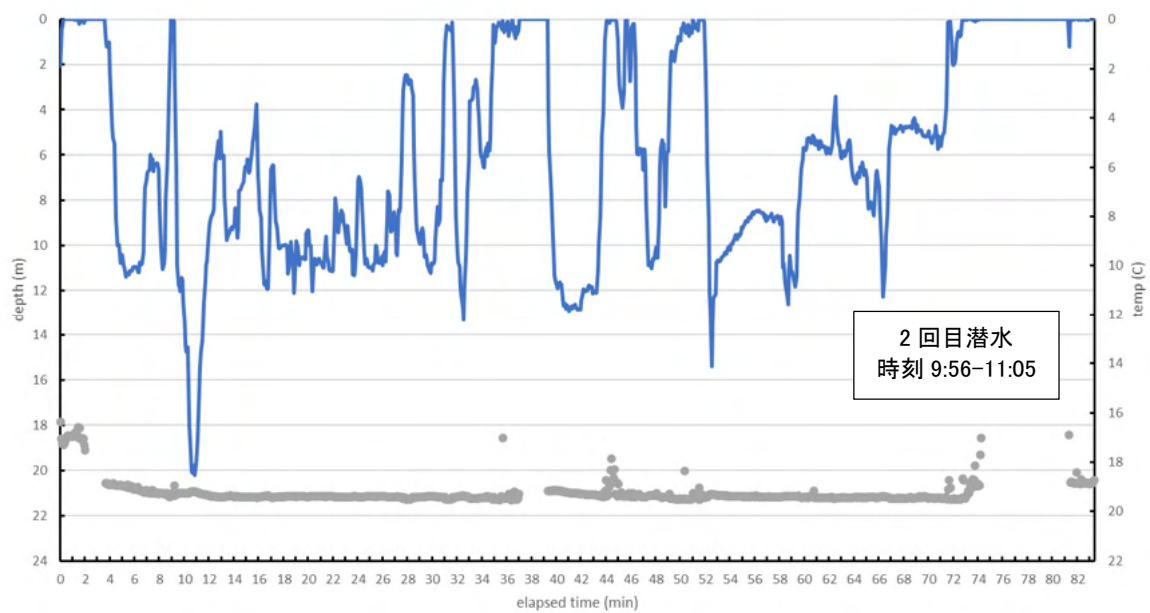
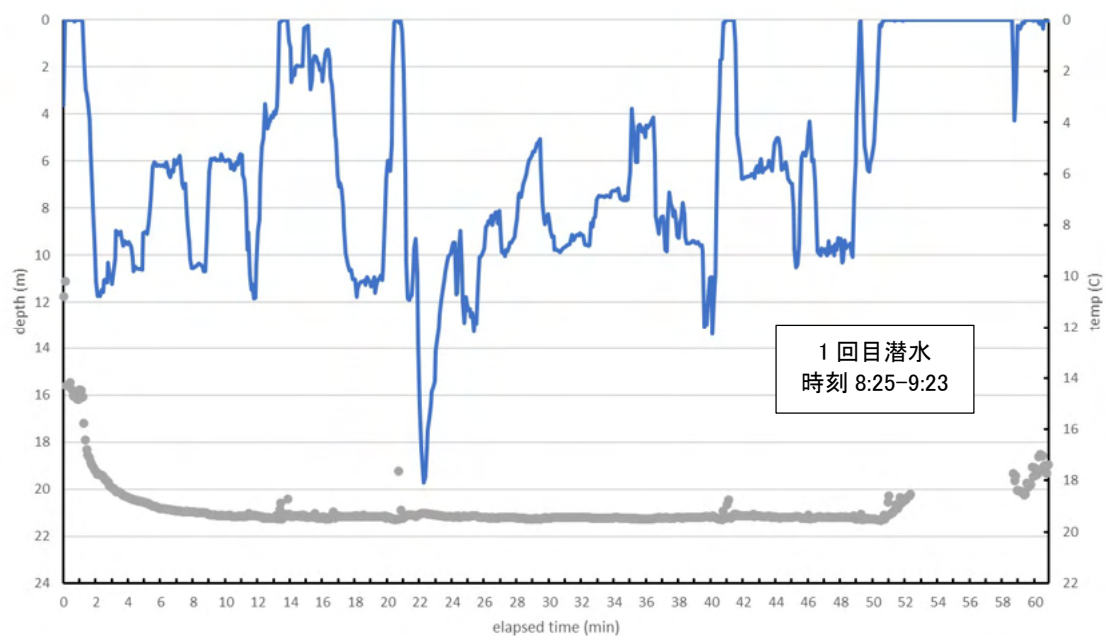


図-9-3. 被験者 p-003 の潜水プロフィール

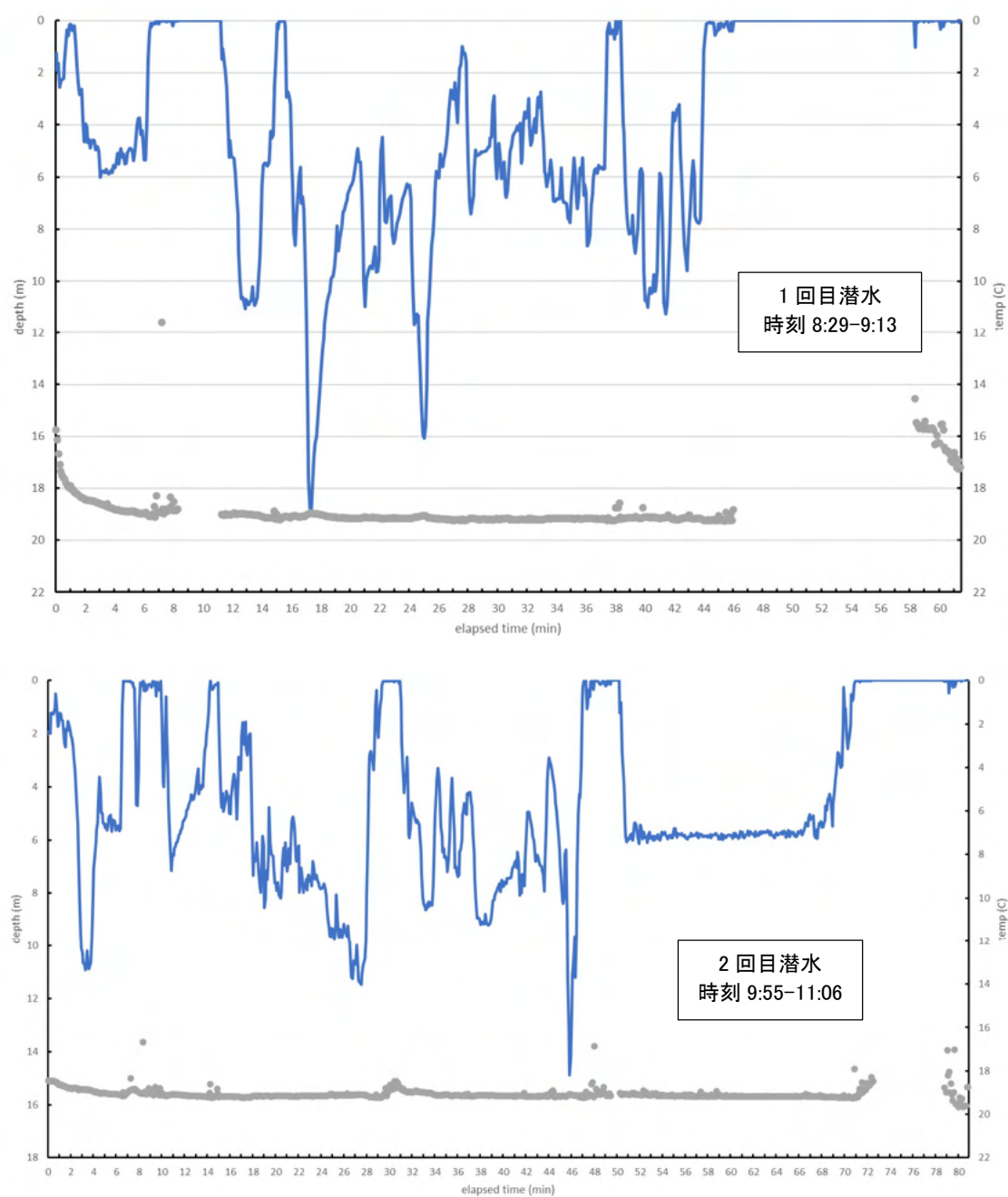


図-9-4. 被験者 p-004 の潜水プロフィール

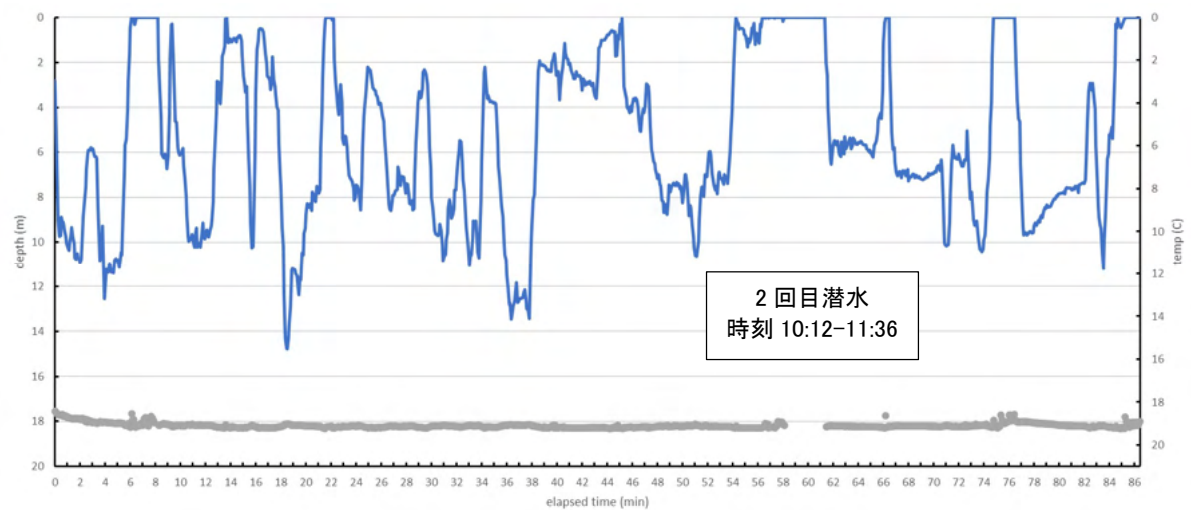
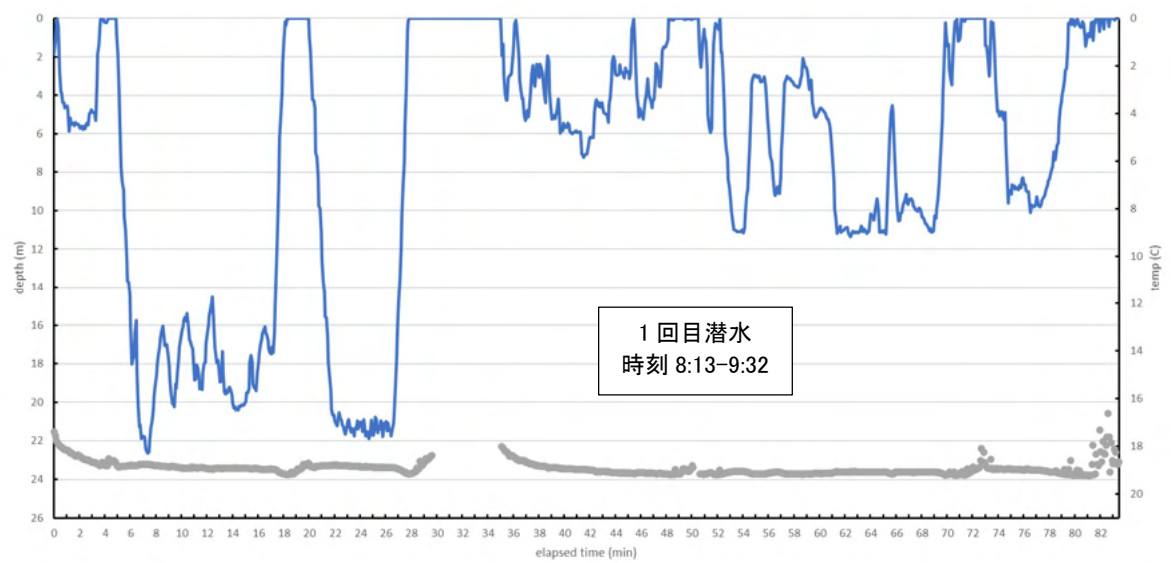


図-9-5. 被験者 p-005 の潜水プロフィール

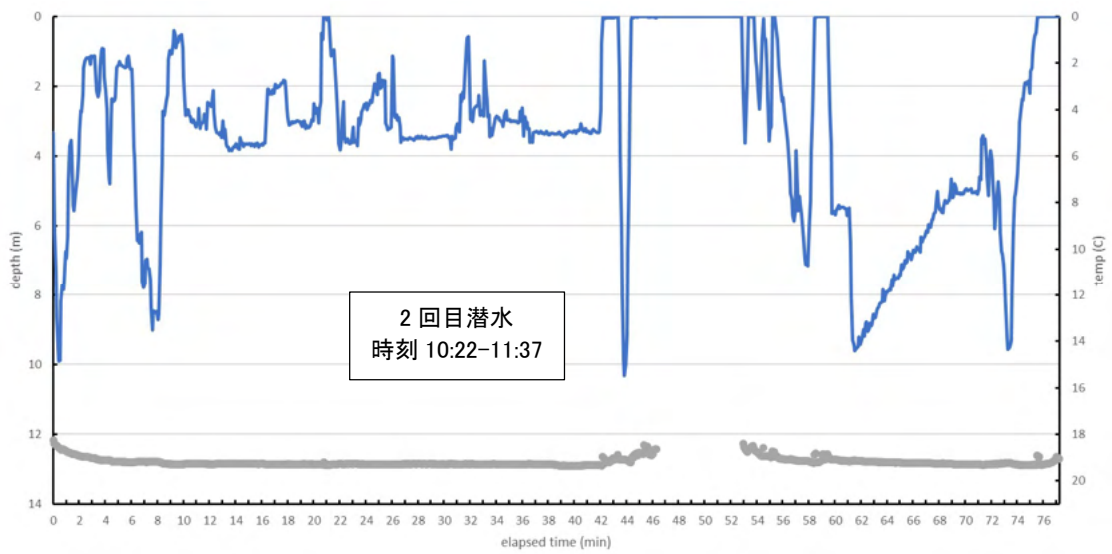
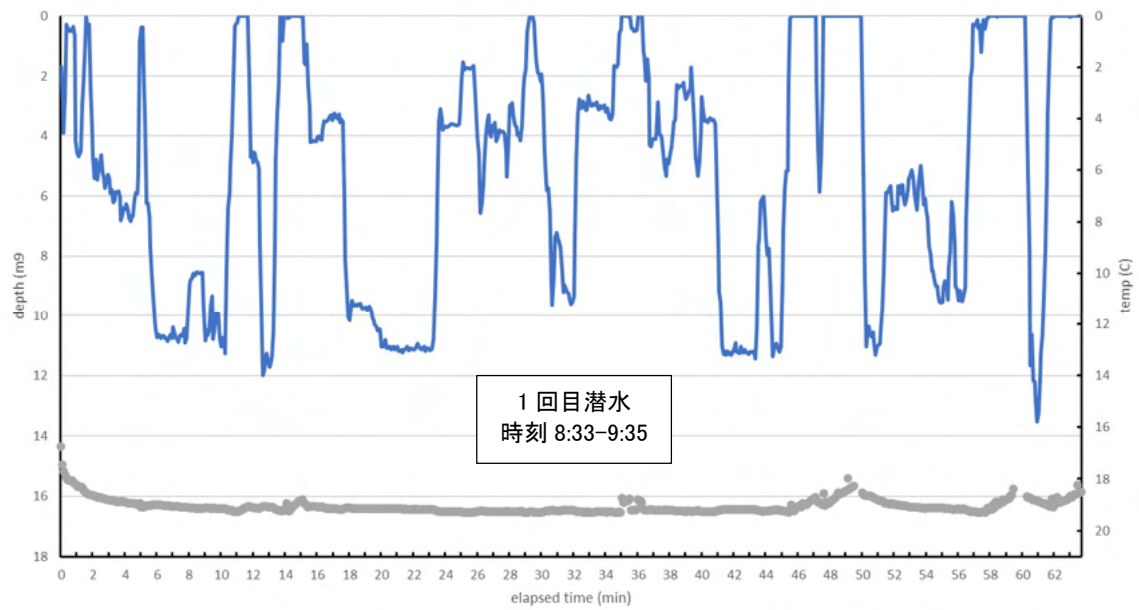


図-9-6. 被験者 p-006 の潜水プロフィール

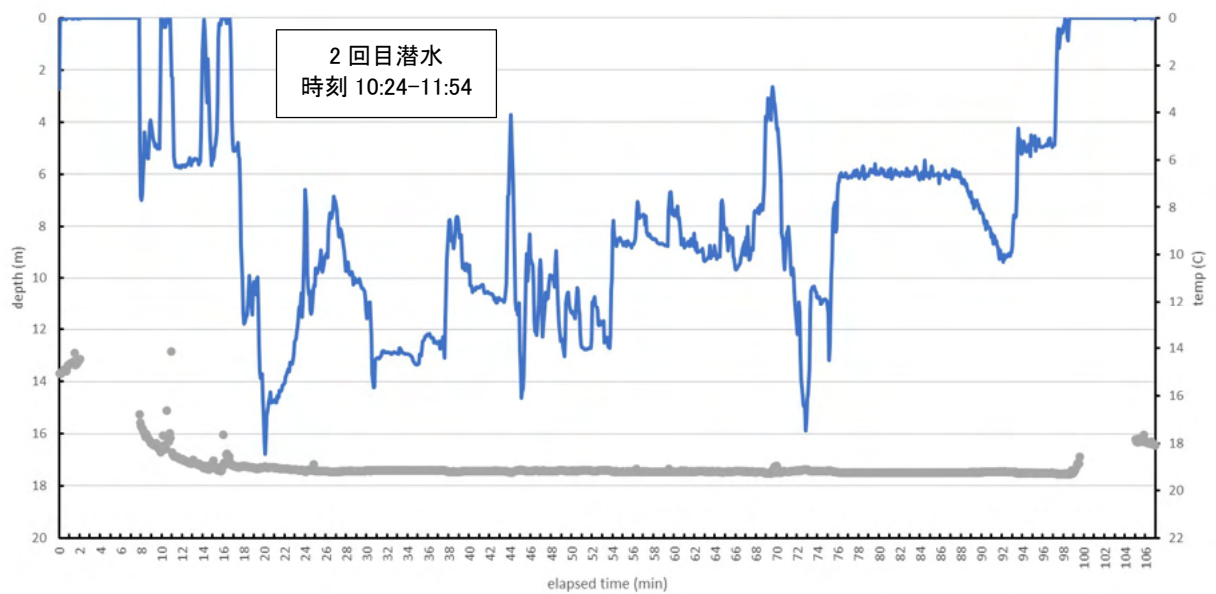
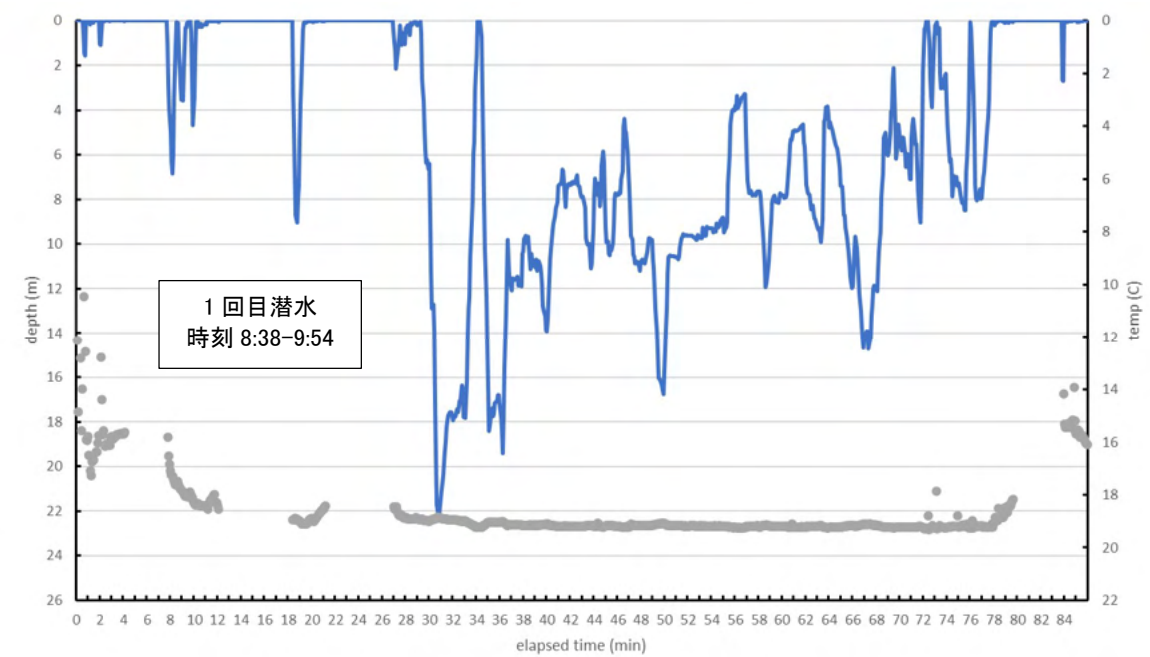


図-9-7. 被験者 p-007 の潜水プロフィール

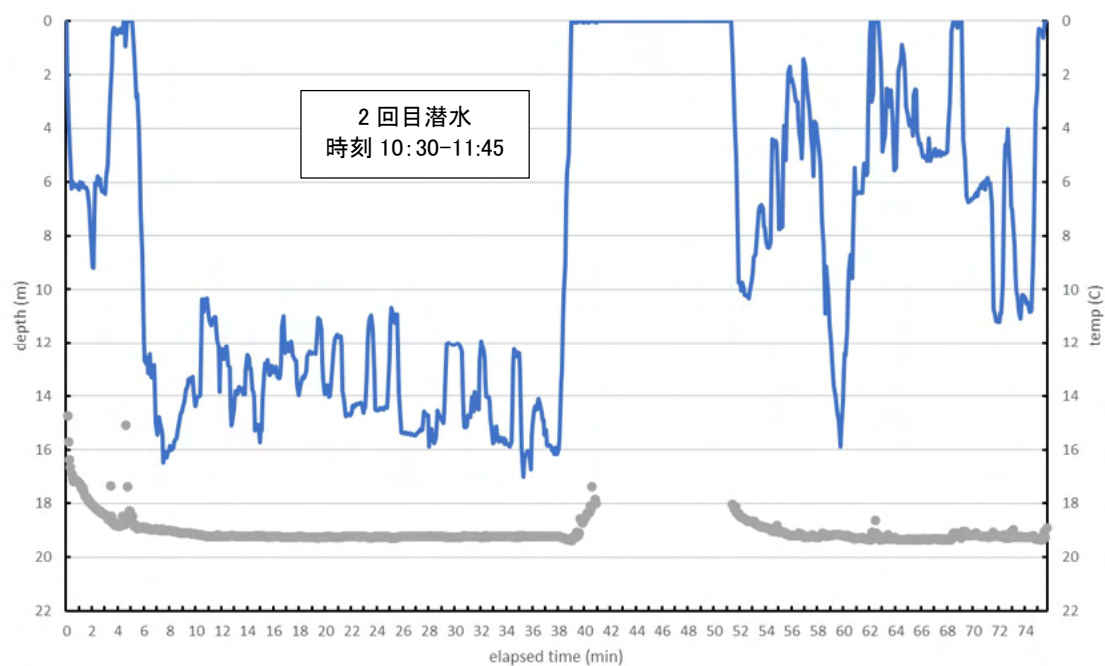
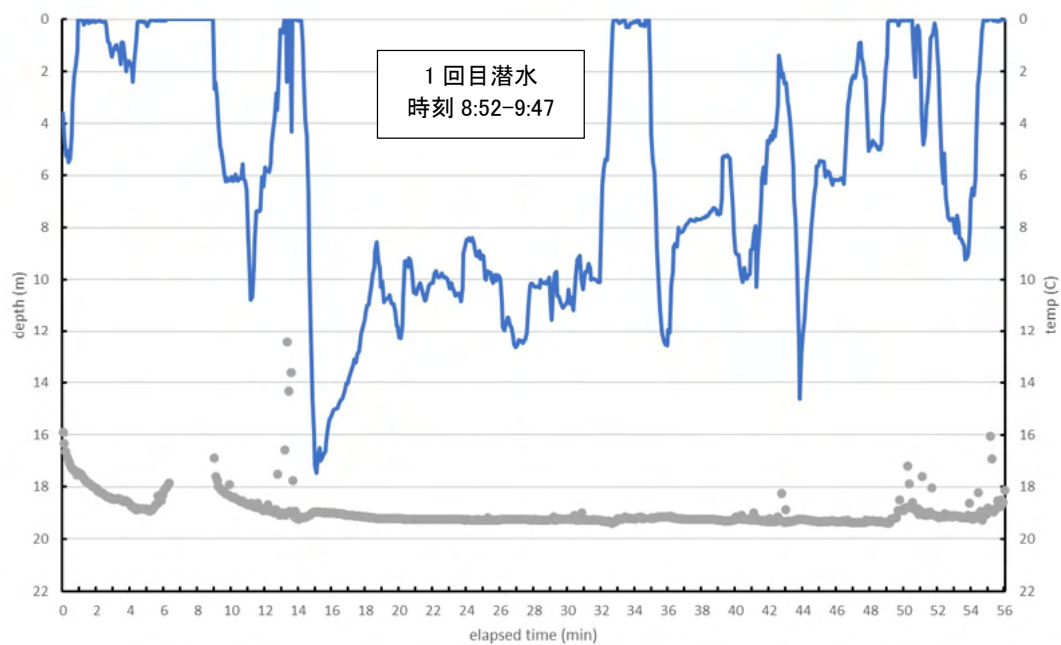


図-9-8. 被験者 p-008 の潜水プロフィール

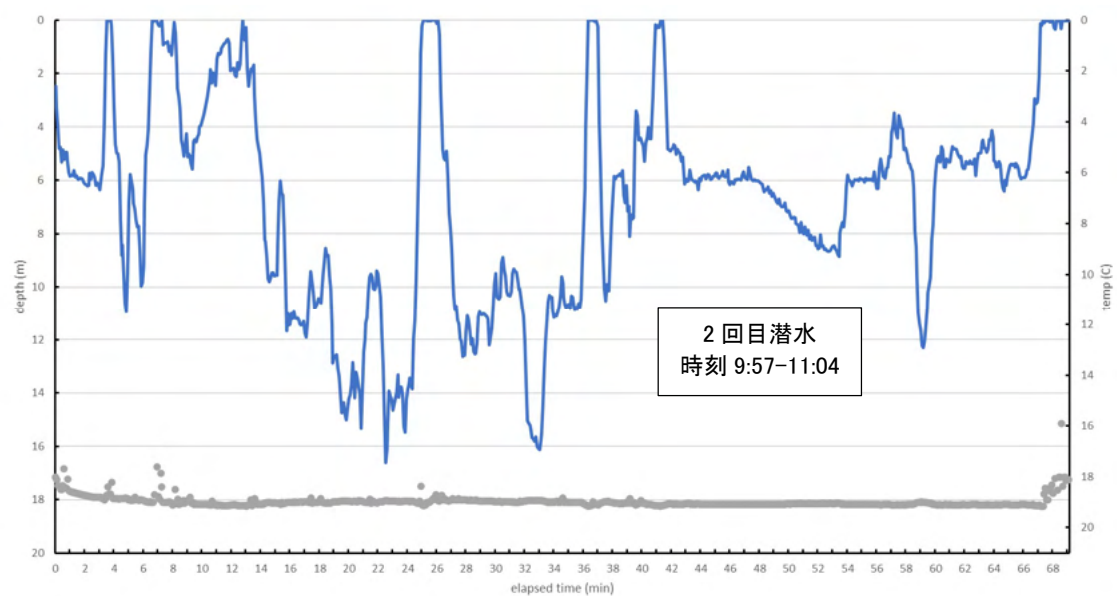
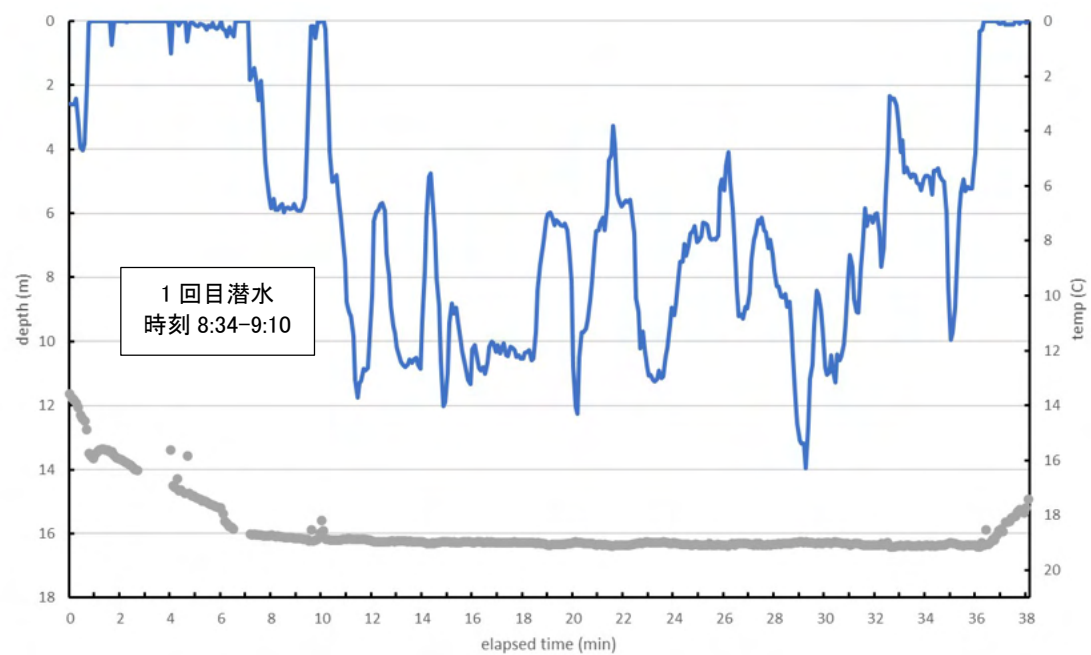


図-9-9. 被験者 p-009 の潜水プロフィール

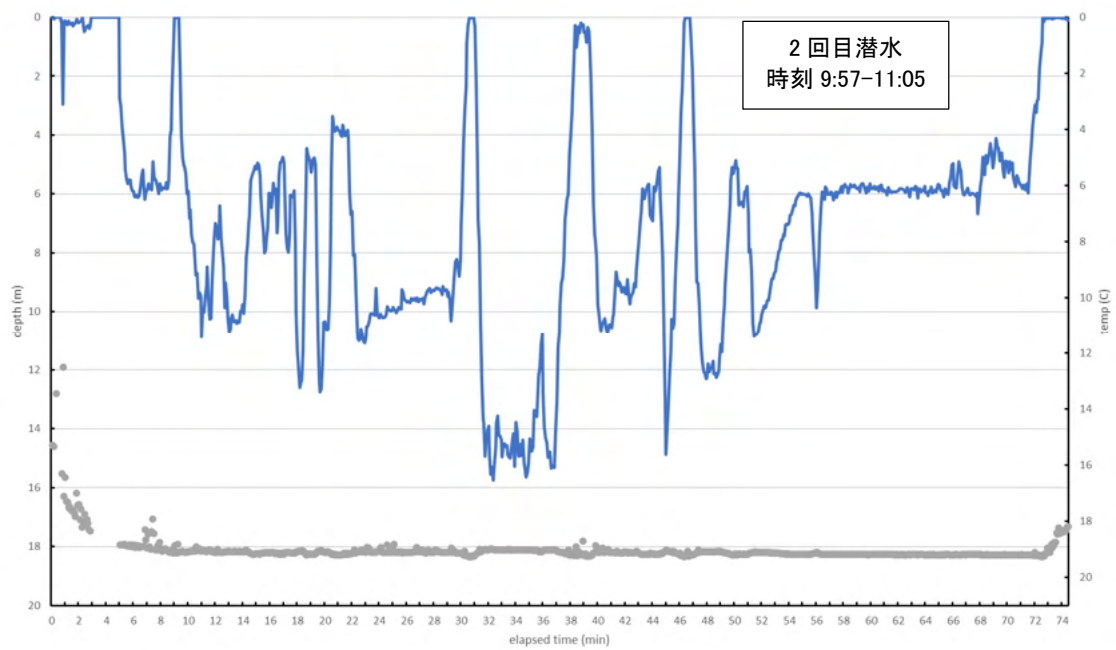
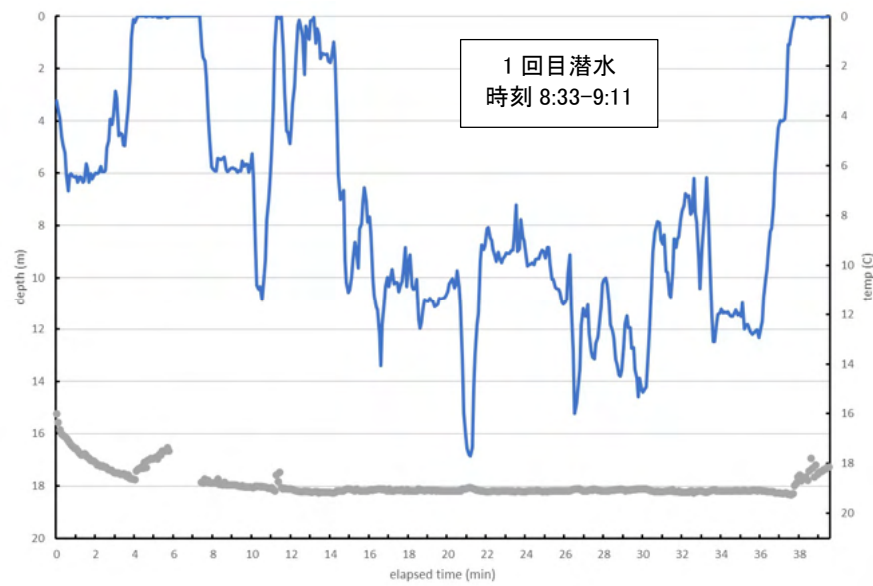


図-9-10. 被験者 p-010 の潜水プロフィール

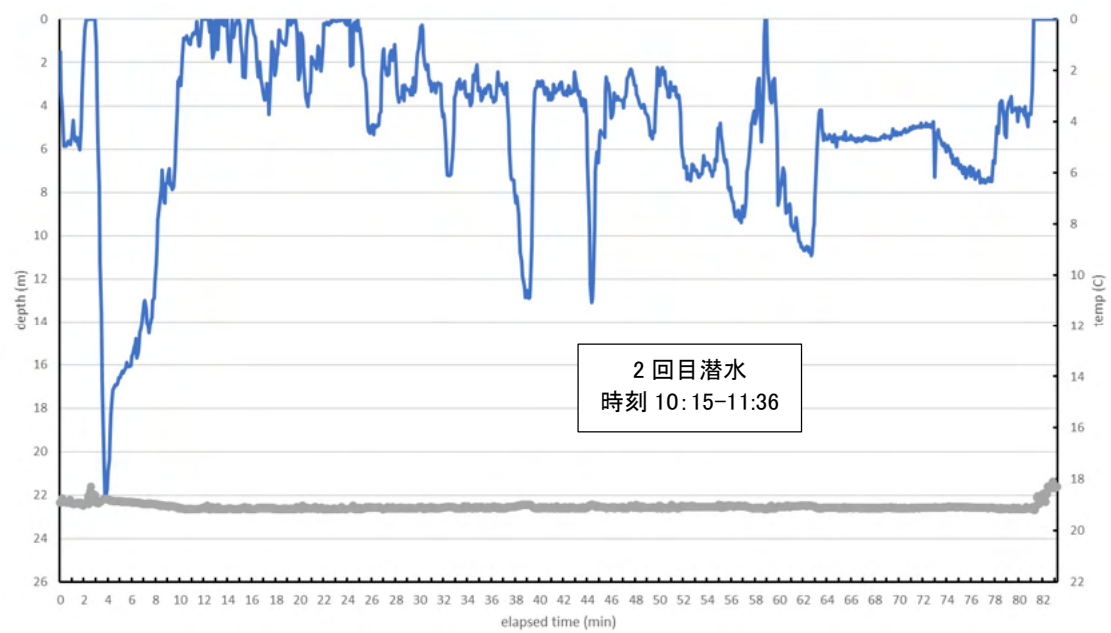
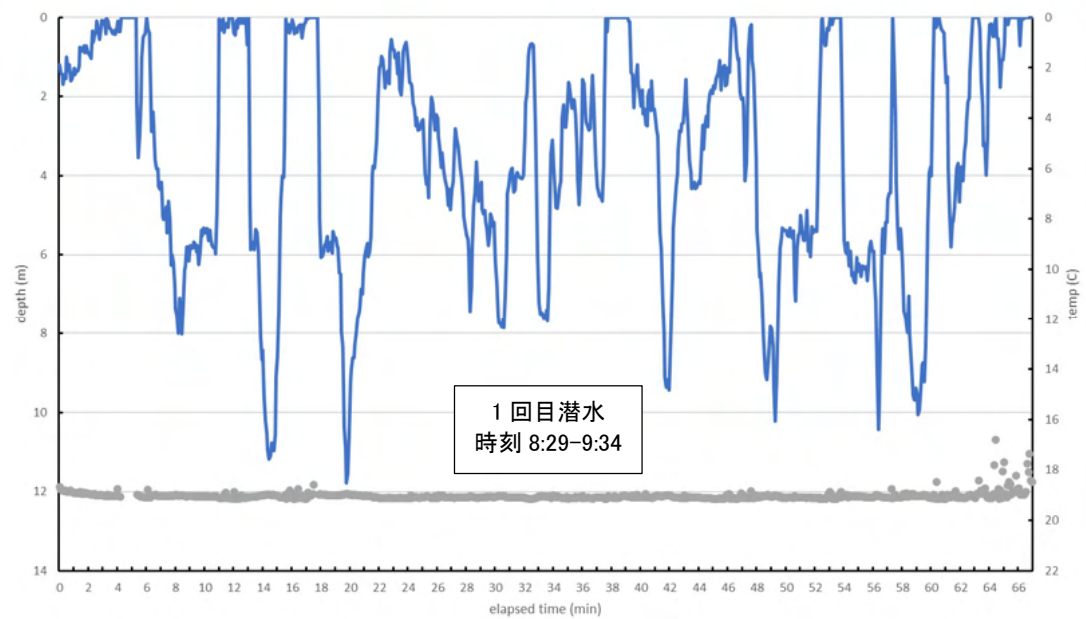


図-9-11. 被験者 p-011 の潜水プロフィール

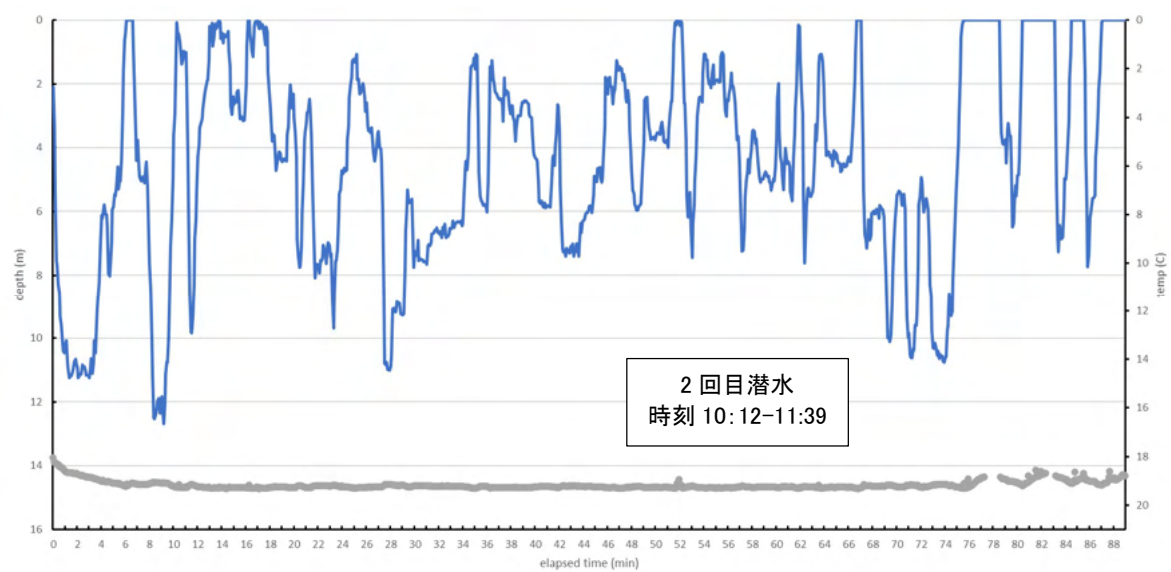
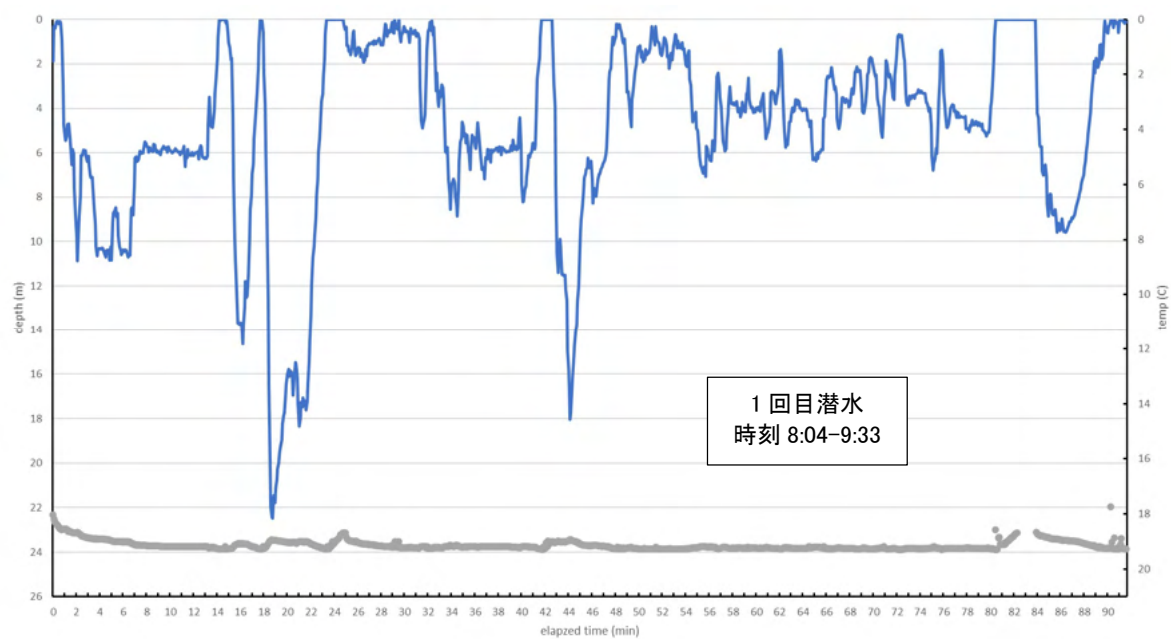


図-9-12. 被験者 p-012 の潜水プロフィール

3-3. 微小膜小胞体 (MP)

微小膜小胞体 (MP) の測定結果を表 4 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 : 92.17 $\pm$ 40.98 (範囲 : 51-150)、

post : 115.00 $\pm$ 63.97 (範囲 : 66-235)、post/pre は、1.27 $\pm$ 0.40 であった。CD31+/AV+/CD42b- 群で pre : 2502.50 $\pm$ 1096.40 (範囲 : 1214-4219)、post : 1491.67 $\pm$ 552.82 (範囲 : 650-2264)、post/pre は、0.66 $\pm$ 0.30 であった。

表-4. MP 数測定値

no	ID	yo-yo 潜水有無	CD144+/CD42b-			CD31+/AV+/CD42b-		
			pre	post	post/pre	pre	post	post/pre
1	P-001	○	51	66	1.29	4219	1912	0.45
2	P-002	○	77	75	0.97	1594	1322	0.83
3	P-003	○	60	75	1.25	2795	1426	0.51
4	P-004	○	79	134	1.70	1214	1376	1.13
5	P-005	○	136	235	1.73	3084	2264	0.73
6	P-006	○	150	105	0.70	2109	650	0.31
		mean	92.17	115.00	1.27	2502.50	1491.67	0.66
		SD	40.98	63.97	0.40	1096.40	552.82	0.30

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 12 名の被験者に対して、潜水業務終了 30 分後、90 分後、120 分後の 3 回、それぞれ安静時 (rest) と深い膝屈伸を伴う運動後 (exerc) に実施した。被験者 12 名のうち 5 名から気泡を検知した (5/12、41.7%)。検知された気泡等級はいずれも等級 1 であり、気泡が検知された被験者に減圧症等による異常は認められなかった。

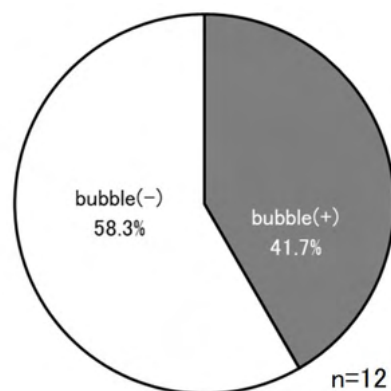


図-10. ドップラー気泡検知結果

表-5. 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		最大気泡等級
		Rest	exerc	rest	exerc	rest	exerc	
1	P-001	0	0	0	0	0	0	0
2	P-002	0	0	0	0	0	0	0
3	P-003	0	0	0	0	0	0	0
4	P-004	0	0	0	1	0	1	1
5	P-005	0	0	0	0	0	0	0
6	P-006	0	0	0	0	0	0	0
7	P-007	0	0	0	0	0	0	0
8	P-008	1	0	1	0	0	0	1
9	P-009	0	0	0	0	0	1	1
10	P-010	0	0	0	1	1	0	1
11	P-011	0	0	0	0	0	0	0
12	P-012	0	0	0	1	0	0	1

3-5. VAS 値

VAS 値の測定結果を表 6 に示す。VAS 値の計測は 150mm ノギス（最小読取値：0.05mm）を用いて行い、確認のため計測は 3 回実施した。12 名の被験者から得た VAS 値の平均は、 $64.69 \pm 11.75\text{mm}$ （範囲：39.8-77.5mm）であった。研究 B における VAS 値調査結果は、全体で $48.08 \pm 11.55\text{mm}$ であり、yo-yo 潜水に限ると $47.67 \pm 11.35\text{mm}$ であった。VAS 値の比較からは、今回の潜水業務は激しい作業であったことが推測される。同時に調査した「自覚労作強度」の調査結果を図 13 に示す。被験者 12 名のうち、労作強度を「軽い」と回答したものはなく、「普通」との回答は 5 名（41.7%）、「やや重い」は 1 名（8.3%）、「重作業」は 6 名（50.0%）であり、「やや重い」と「重作業」との回答が 58.3%と多かった。研究 B（n=51）における「重作業」の回答は 5.9%であり、「やや重い」と合わせても 35.3%に留まったことから、今回調査対

象とした潜水業務は、かなり激しいものであったものと推測された。

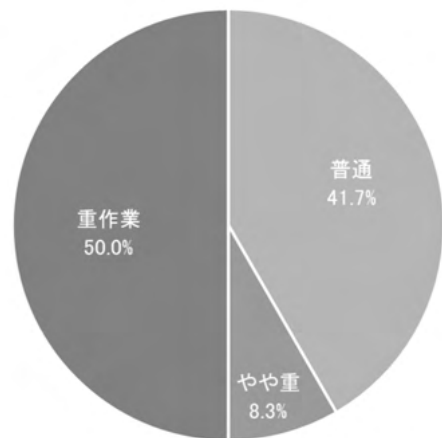


図-11. 自覚的労作強度の回答

表-6. VAS 値調査結果

no	ID	VAS 値 (mm)	自覚労作強度
1	P-001	59.6	普通
2	P-002	73.7	重作業
3	P-003	62.3	普通
4	P-004	74.5	重作業
5	P-005	39.8	普通
6	P-006	46	普通
7	P-007	69.8	重作業
8	P-008	70.2	重作業
9	P-009	75.5	重作業
10	P-010	77.5	重作業
11	P-011	63.2	普通
12	P-012	64.2	やや重
	mean	64.69	
	SD	11.75	

4. 考察

本調査研究（研究C）では養殖場における潜水業務のうち、一連の yo-yo 潜水を繰り返して実施する業務で、潜水者から「重激な作業」と評価される潜水業務を対象とした。このような潜水は研究Bの結果からも減圧症リスクが高いことが予想されたため、リスクの顕在化を防ぐために、潜水後に船上で酸素呼吸を行うプロトコルを作成し、実施した。以下に、このプロトコルに関する評価を示す。

4-1. 潜水曝露の影響

減圧症リスクには、潜水曝露の程度が大きく影響する。研究Cで対象とした潜水業務は「重激」と評価されていることから、潜水曝露の程度も大きいと考えられるが、これを客観的に評価するために、研究Bにおける潜水業務の場合と比較した。なお研究Bで調査を行った潜水業務では、

減圧症は認められず、各種測定結果にも大きな変化が認められなかったことから、減圧症リスクは許容範囲内のものと考えられた。また、被験者の評価も「普通」の潜水業務であったことから、養殖場での一般的な潜水業務における潜水曝露の程度と考えられた。これと研究Cにおける潜水曝露を比較した。

潜水曝露の程度は潜水深度と潜水時間による。すなわち潜水深度が深く、潜水時間が長いほど潜水曝露は大きいものとなる。その評価指標としては曝露指数（Q値）が用いられており、次式によって求められる。すなわち、 $Q = P\sqrt{t}$ （Pは曝露圧力、tは曝露時間を示す）となる^{2,3)}。

研究Cでは、調査対象とした全ての潜水業務で繰り返し潜水が行われた。調査は2回目の潜水業務後に実施したことから、1回目の潜水業務の影響も含めて考慮する必要がある。その方法としては、2回目の

潜水時間に 1 回目の潜水曝露を考慮した時間を追加することが一般的である。これは旧高気圧作業安全衛生規則でも用いられており⁴⁾、「修正時間」として 2 回目潜水時の潜水時間に加算することで、1 回目の潜水による影響を反映したものとなる。今回その加算する時間の算出には信頼性が高いと評価されている DCIEM 減圧表⁵⁾を用いた。これは潜水深度と潜水時間に応じて A から O までのアルファベットが「繰返し潜水記号」として割り当てられ、それぞれ 1.1 から 2.0 までの係数が与えられる。水面待機時間に応じて係数は減少し、それを用いて次回潜水時の加算時間が決定される。今回もこれらを利用して繰返し潜水時の 2 回目の潜水時間を修正し、それらから Q 値を求めた。

なお研究 C においては全て、研究 B では繰返し潜水を行った場合に潜水時間の修正（追加補正）を実施している。

研究 C における Q 値の平均は 30.9、研究 B におけるそれは 21.9 であり、研究 C で有意に高かった。このことから、潜水曝露による影響は研究 C で大きかったといえることができる。潜水業務後に実施した自覚的労作強度に関する調査では、研究 C における VAS 値の平均が 64.7mm であったのに対して、研究 B のそれは 47.7mm であり、研究 C で有意に高かった。被験者に対する問診においても「重作業」と回答したものが研究 C では 50%であったが、研究 B では僅か 2.8%に留まった。これらのことは、研究 B に比べ研究 C で潜水曝露が大きかったことを裏付けている。

英国の北海海域での潜水業務で生じた 269 例の減圧症に対する調査では、Q

値が 25 を超えた場合に減圧症の発症例が増加したことが報告されている⁶⁾。研究 C における Q 値の平均は 25 を大きく超える値であり、最大では 39.9 に達していたことから、減圧症のリスクも高かったことが推測できる。なお研究 B、C ともに調査時の被験者に減圧症の発症は認めなかった。

表-7 研究 C における潜水曝露

no	ID	潜水深度(m)	潜水時間(分)含修正	Q 値
1	P-001	17.07	153	33.48
2	P-002	19.22	127.4	32.98
3	P-003	20.23	110.4	31.76
4	P-004	14.89	99.4	24.82
5	P-005	14.79	168	32.13
6	P-006	10.32	142.5	24.26
7	P-007	16.78	180	35.93
8	P-008	17.02	142.5	32.25
9	P-009	16.62	100.5	26.69
10	P-010	15.76	108.8	26.87
11	P-011	22.14	153.9	39.87
12	P-012	12.69	174	29.93
	平均	16.46	138.37	30.91
	SD	3.06	27.54	4.44

表-8 研究 B における潜水曝露

no	ID	潜水深度(m)	潜水時間(分)含修正	Q 値
1	A-001	8.4	157	23.06
2	A-002	8.3	112	19.37
3	B-001	8	19	7.85
4	B-002	26.28	64	29.02
5	B-003	7.9	20	8.01
6	B-005	8.02	175	23.84
7	B-006	26.18	34	21.10
8	B-007	8.35	113	19.51
9	C-001	10.4	111	21.49
10	C-002	5.11	47	10.36
11	C-003	13.02	101	23.13
12	C-004	12.5	92	21.58
13	D-001	15.48	161	32.33
14	D-002	8.69	233	28.53
15	E-007	22.79	55	24.32
16	E-008	23.34	55	24.73
17	H-001	5.87	54	11.66
18	H-002	11.49	46	14.58
19	K-001	8.43	53	13.42
20	K-002	9.2	162	24.44
21	L-002	20.3	49.3	21.27
22	L-003	20.32	54.4	22.36
23	L-004	20.39	28	16.08
24	L-005	7.96	30	9.84
25	L-006	20.39	27	15.79
26	M-001	10.82	175	27.54
27	M-002	26.66	164	46.95
28	M-003	26.76	117	39.76
29	M-004	7.69	181	23.80
30	M-005	26.75	110	38.54
31	M-006	8.26	171	23.88
32	N-001	23.31	79.8	28.57
33	N-002	24.33	59	26.37
34	N-003	21.52	70	26.37
35	N-005	22.67	46	22.16
36	N-006	24.01	30	18.63
	平均	15.52	90.43	22.51
	SD	7.47	56.92	8.43

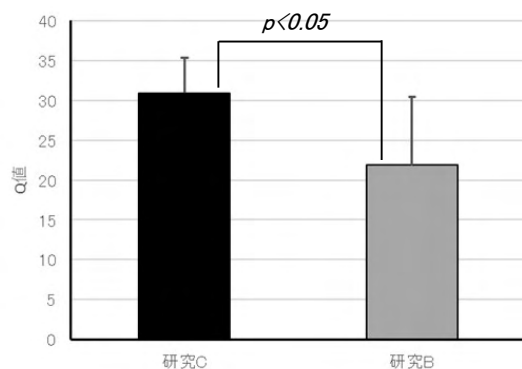


図-12. 研究 B、C における Q 値の比較

表-9. 研究 C における VAS 値

no	ID	VAS 値	自覚労作強度
1	P-001	59.6	普通
2	P-002	73.7	重作業
3	P-003	62.3	普通
4	P-004	74.5	重作業
5	P-005	39.8	普通
6	P-006	46	普通
7	P-007	69.8	重作業
8	P-008	70.2	重作業
9	P-009	75.5	重作業
10	P-010	77.5	重作業
11	P-011	63.2	普通
12	P-012	64.2	やや重
	平均	64.69	
	SD	11.25	

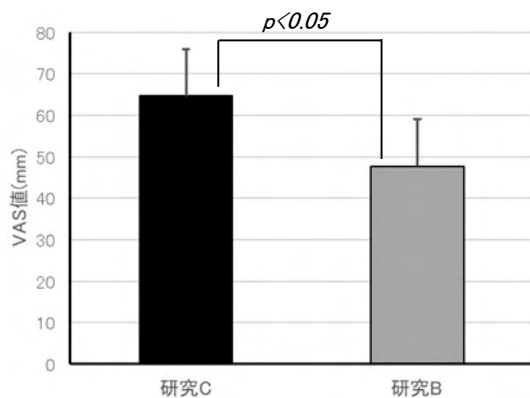


図-13. 研究 B、C における VAS 値の比較

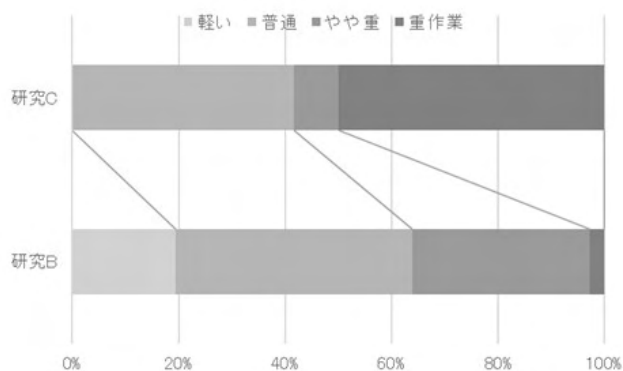


図-14. 研究 B、C における自覚的疲労感の比較

表-10. 研究 B における VAS 値

no	ID	VAS 値	自覚労作強度
1	A-001	53	普通
2	A-002	54.9	普通
3	B-001	32.6	軽い
4	B-002	40.5	普通
5	B-003	42.2	普通
6	B-004	47.5	普通
7	B-005	57.9	普通
8	B-006	63.6	やや重
9	B-007	36.8	軽い
10	C-001	21.3	軽い
11	C-002	29	普通
12	C-003	49.8	普通
13	C-004	39.2	普通
14	D-001	42.2	やや重
15	D-002	51	やや重
16	E-007	32.8	普通
17	E-008	38.1	普通
18	K-001	43.6	軽い
19	K-002	59.3	普通
20	L-001	51.4	やや重
21	L-002	53.8	やや重
22	L-003	54.3	やや重
23	L-004	41.2	軽い
24	L-005	36.7	軽い
25	L-006	39.4	軽い
26	M-001	37.7	普通
27	M-002	44.5	やや重
28	M-003	44.5	やや重
29	M-004	64.2	やや重
30	M-005	60.7	やや重
31	M-006	52.8	普通
32	N-001	50.5	やや重
33	N-002	55.7	やや重
34	N-003	78.7	重作業
35	N-005	56.2	普通
36	N-006	58.6	普通
	平均	47.67	
	SD	11.34	

4-2. 減圧症リスクの評価

今回の調査研究において、我々は yo-yo 潜水における減圧症の発症機序として、以下のような仮説を立てた。すなわち、頻繁な潜降浮上による圧刺激により血管内皮から微小膜胞体 (Micro-Particle: MP) が放出され、それを起点 (ガス微小核) として不活性ガス気泡が形成される。形成された気泡は血管内皮を機械的に刺激してさらに MP の放出を促進し、新たな気泡が形成される。これらが連鎖的に発生し、終には減圧症の発症に至ることになる。したがって、産生した MP を早期に抑制すれば、形成される不活性ガス気泡を減少することができ、その結果として減圧症発症を防ぐことが可能となる。そのためには、潜水業務終了直後の船上で酸素呼吸を実施することが効果的である。酸素曝露はガス微小核を抑制する可能性があることが動物実験によって報告されている。また、潜水後の酸素呼吸は不活性ガスの排出促進とそれに伴う気泡の消失にも有効であることが報告されている^{7,8)}。

研究 C で調査対象とした潜水業務では、yo-yo 潜水を繰り返して実施する予定であったことから、減圧症リスクが想定されたため、減圧症予防を目的に、潜水業務終了後に船上で 10 分間の酸素呼吸を取り入れたプロトコルを策定し、それを実施した。結果的に、研究 C に参加した被験者のいずれにも減圧症の発症を認めなかったことから、今回のプロトコルは一定の効果があつたと考えられる。効果の程度を客観的に評価するために、減圧症リスクの指標として用いた微小膜胞体 (MP) と不活性ガス気泡の調査結果を研

究 B のそれらと比較した。

4-2-1. MP の調査

カドヘリンは CD-144 を抗原とする血管内皮に特有な膜貫通型蛋白であることから、内皮 MP として CD-144 の産生量を調査することで、内皮への影響の程度を知ることができる⁹⁾。研究 C における CD-144 の調査結果を表 11 に、研究 B におけるそれらを表 12 に示す。研究 B 及び C ともに、CD-144 の産生は潜水後で高く、潜水前後での変化率は研究 C で 1.27、研究 B で 1.34 であった。その比較を図 15 に示す。研究 B と研究 C における CD-144 の変化量には有意差を認めなかった。研究 C では研究 B にくらべ潜水曝露 (Q 値) が有意に高かったにもかかわらず、MP の増大が少なかったことは、今回のプロトコルで採用した酸素呼吸が MP 抑制に有効であった可能性がある。研究 B における調査では、他の調査結果を含め総合的に評価した結果、減圧症リスクは許容範囲内のレベルにあるとしている。今回の研究 C においては、潜水曝露の程度は潜水 B より優位に高かったものの MP (CD-144) 産生量は研究 B とほぼ同等のレベルであったことから、減圧症リスクも過度に高いものではないと考えられる。また、研究 C のプロトコルを経験した被験者からは、「いつもより疲労感が少ない」や「潜水後にふくらはぎに違和感を覚えることがあるが、今回はそれが無い」といった意見を聴取した。これらのエピソードからも酸素呼吸を取り入れた今回のプロトコルは、潜水によるストレスの低減に効果があつたこと示唆するものと考えられる。

表-11. 研究 C における MP 値 (CD-144)

no	ID	pre	post	post/pre
1	P-001	51	66	1.29
2	P-002	77	75	0.97
3	P-003	60	75	1.25
4	P-004	79	134	1.70
5	P-005	136	235	1.73
6	P-006	150	105	0.70
	平均	92.17	115.00	1.27
	SD	40.98	63.97	0.40

表-12. 研究 B における MP 値 (CD-144)

no	ID	pre	post	post/pre
1	A-001	135	121	0.90
2	A-002	132	140	1.06
3	B-001	165	283	1.72
4	B-002	140	359	2.56
5	B-003	140	144	1.03
6	B-004	115	180	1.57
7	B-005	123	138	1.12
8	B-006	147	137	0.93
9	B-007	107	226	2.11
10	C-001	156	247	1.58
11	C-002	73	99	1.36
12	C-003	100	119	1.19
13	C-004	77	139	1.81
14	D-001	109	125	1.15
15	D-002	114	119	1.04
16	E-007	265	282	1.06
17	E-008	251	262	1.04
18	K-001	113	112	0.99
19	K-002	102	111	1.09
20	L-001	71	121	1.70
21	L-002	100	114	1.14
22	L-003	110	145	1.32
23	L-004	102	116	1.14
24	L-005	113	167	1.48
25	L-006	101	129	1.28
26	M-001	37	49	1.32
27	M-002	43	46	1.07
28	M-003	40	57	1.43
29	M-004	86	93	1.08
30	M-005	59	69	1.17
31	M-006	113	303	2.68
32	N-001	116	129	1.11
33	N-002	147	168	1.14
34	N-003	115	154	1.34
35	N-005	124	182	1.47
36	N-006	174	182	1.05
	平均	117.08	154.64	1.34
	SD	47.07	71.87	0.41

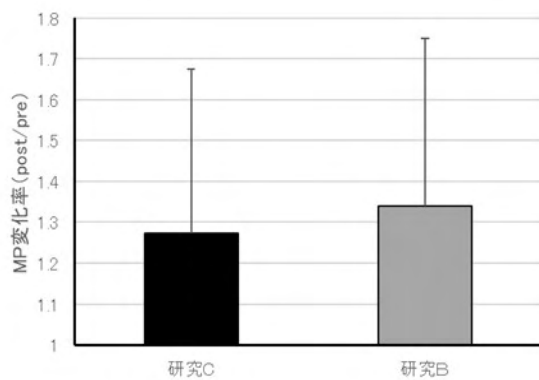


図-15. 研究 B、C における MP 値変化率の比較

4-2-2. 不活性ガス気泡の調査

減圧症と不活性ガス気泡（以下、気泡）の関係は長年検討が進められてきた。当初は気泡が減圧症の原因であるとされていたが、症状を伴わない気泡（サイレントバブル）の存在が明らかになって以降、気泡は減圧症の絶対的な原因ではなく、影響を及ぼす要因の一つと考えられている。気泡は高気圧曝露によって生じる特異な現象であり、減圧症発症にも関係していることから、減圧症リスクを評価する指標として多くの研究に用いられている。減圧症リスクに対する気泡の評価方法についてはカナダ DCIEM（現 DRDC）による研究が中心的なものとなっており、今回の調査研究においてもその評価方法を参考にした¹⁰⁾。

潜水業務後に検知された気泡は、その程度によって 0 から IV までの等級に区分される。等級 I 以上の気泡が被験者の半数に認められたときには注意が必要であり、それが等級 II 以上の気泡であった場合には、減圧症リスクが高いとして何らかの対策を導入する必要があるとしている。研究 C では被験者 12 名中 5 名 (41.7%) で気泡が検知されており、半数以下であった。研究 B では yo-yo 潜水を実施した被験者 36 名のうち気泡が検知されたものは 9 名 (25%) であった。研究 C での気泡検知の割合は研究 B より高く、これは潜水曝露がより激しかったことによるものと考えられる。しかしながら、気泡検知数は半数以下であり、許容範囲内であったと考える。このような結果が得られた要

因は、酸素呼吸を伴うプロトコールによるものであり、研究 C のような厳しい潜水条件においては有効であることを示唆している。

超音波ドップラー気泡検知法による気泡等級は、減圧症リスクの指標となりうるが、気泡等級のみを用いるだけでは、比較検討することが行うことは難しい。浮上の際に生じた不活性ガス気泡は、時間経過と共に変化することが知られている。例えば、減圧終了後 30 分、60 分、90 分の計 3 回気泡調査を行ったところ、ある被験者における気泡検知結果は（等級）III、0、0 であり、別の被験者では（等級）III、III、III であったとする。この場合、最大気泡等級はどちらも III であることから、気泡等級的には差が無いと評価されることになる。しかしながら、実際には、気泡形成が長時間持続している方が減圧ストレスの影響は大きいと考えられる。今回の調査においても、気泡等級は同じながら、調査期間中に 1 回検知された例と複数回検知されたものがあつた。そこで、このような気泡動態を評価するために、キスマン統合重症度スコア（Kisman integral severity score: KISS）を用いることとした¹¹⁾。KISS は、DCIEM において不活性ガス気泡調査結果と実際の臨床結果から導き出されたものであり、減圧後の血管内気泡活動の状態を示す統計的に処理可能な有意義な線形化指標であると仮定された。

KISS は、次式によって定義される：

$$KISS = \frac{100}{4^\alpha(t_n - t_1)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{(t_{i+1} - t_i)(d_{i+1}^\alpha + d_i^\alpha)}{2} \right)$$

ここで：

t = 減圧終了後から調査実施までの時間

d = 時間 t における超音波ドップラー気泡等級 (0～IV)

α = 気泡等級における非線形性定数 (通常は 3)

研究Cにおける KISS は 0.28 ± 0.34 (平均 $\pm$ SD) であり、研究Bにおけるそれは 0.25 ± 0.75 で、両者に有意差を認め無かった (図 16)。研究Bにおいて被験者 ID/M-003 は、気泡等級Ⅱが検知されたため、KISS も突出して高値であった。これを除けば、研究Bにおける KISS は 0.12 ± 0.26 となる。これと比較すると研究Cの KISS は2倍以上の高値となる。理由として考えられる要因の一つは、潜水曝露量の違いにある。研究Cの曝露量は非常に大きなものであったことから、それが気泡形成に影響を及ぼした可能性がある。他には船上での酸素呼吸時の酸素流量が考えられる。今回は機材の関係で毎分 7 L の流量を用いたが、この場合吸気酸素濃度は 70% 程度にとどまる。不活性ガス気泡を除去するためには可能な限り高い酸素濃度が必要であり、吸気酸素濃度を 90% 以上とするためには毎分 10 L 以上の酸素流量が求められる¹²⁾。高濃度酸素は減圧症が発症した際の応急処置用としても有用であることから、今後酸素流量に関しては毎分 10 L 以上とするよう検討が必要である。

表-13. 研究 C における気泡検知結果

no	ID	30min	60min	90min	KISS
1	P-001	0	0	0	0
2	P-002	0	0	0	0
3	P-003	0	0	0	0
4	P-004	0	1	1	0.78
5	P-005	0	0	0	0
6	P-006	0	0	0	0
7	P-007	0	0	0	0
8	P-008	1	1	0	0.78
9	P-009	0	0	1	0.52
10	P-010	0	1	1	0.78
11	P-011	0	0	0	0
12	P-012	0	1	0	0.52
				平均	0.28
				SD	0.34

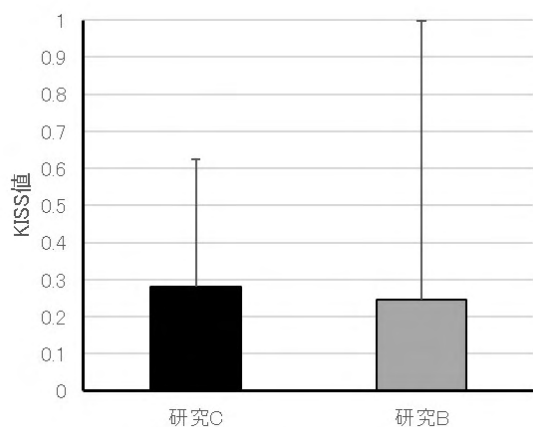


図-16. 研究 B、C における KISS 値の比較

表-14. 研究Bにおける気泡検知結果

no	ID	30 min	60 min	90 min	KISS
1	A-001	0	0	0	0
2	A-002	0	0	0	0
3	B-001	0	0	0	0
4	B-002	0	0	0	0
5	B-003	0	0	0	0
6	B-004	0	0	0	0
7	B-005	0	0	0	0
8	B-006	0	0	0	0
9	B-007	1	1	0	0.78
10	C-001	0	0	0	0
11	C-002	0	0	0	0
12	C-003	0	0	0	0
13	C-004	0	0	0	0
14	D-001	1	1	0	0.78
15	D-002	0	0	0	0
16	E-007	0	0	0	0
17	E-008	0	0	0	0
18	K-001	0	0	0	0
19	K-002	0	0	0	0
20	L-001	0	0	0	0
21	L-002	0	0	0	0
22	L-003	0	0	0	0
23	L-004	0	0	0	0
24	L-005	0	0	0	0
25	L-006	1	1	0	0.78
26	M-001	0	0	0	0
27	M-002	0	1	0	0.52
28	M-003	0	2	1	4.43
29	M-004	0	0	0	0
30	M-005	0	0	0	0
31	M-006	0	0	0	0
32	N-001	0	0	1	0.52
33	N-002	0	0	0	0
34	N-003	0	0	1	0.52
35	N-005	0	0	0	0
36	N-006	0	1	0	0.52
				平均	0.25
				SD	0.75

5. まとめ

令和5～7年度に実施した調査研究は、「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」を目的に実施した。目的達成のために調査研究を3段階に分けて行った。すなわち第一段階の研究Aでは、水産養殖場を対象にアンケート調査を実施し、潜水業務は一年を通して行われており、「短時間に繰り返し行われる潜水作業」(yo-yo潜水作業)が多く行われていることを確認した。第二段階の研究Bでは、実際に養殖場の現場に赴き、潜水業務の実態を知るとともに、それらが生体に及ぼす影響について調査を実施した。調査に際しては、養殖場における潜水が港湾工事等他の潜水業務とは異なり、比較的潜水深度が浅く、潜水時間も短いことが予想されたため、従来とは異なった視点から評価を行うこととした。我々は、yo-yo潜水による減圧症の機序として、頻繁な潜降浮上に伴う曝露圧力や呼吸ガス分圧の変化等により刺激を受けた細胞から微小な細胞片(微小膜胞体:MP)が放出され、それを核として不活性ガス気泡が形成される。不活性ガス気泡は細胞内や血管内に機械的な損傷を与えることで炎症反応を惹起する、これら一連の過程が過度な場合には減圧症が発症すると仮定した。したがって、調査に際しては潜水業務前後に検体採取を行いMPと炎症性サイトカインの発現量を比較した。また、潜水後には超音波気泡検知機を用い、不活性ガス気泡形成の有無と程度について調査を行った。調査の結果、MPと炎症性サイトカインは潜水後に有意

に増加し、その程度はyo-yo潜水と繰返し潜水で高かった。MP発現量はyo-yo潜水回数と相関があり、yo-yo潜水回数が多いほど発現量が増加する傾向にあった。潜水後に実施した不活性ガス気泡調査においてもyo-yo潜水と繰返し潜水の場合で不活性ガス気泡が多く検知された。これらのことから、我々の仮説は概ね正しいものであったと考える。また、養殖場の潜水業務においては、yo-yo潜水を繰返し行うことは負荷が大きく、また潜水業務が長時間に及ぶ場合はyo-yo潜水回数の増加を招きやすいことから注意が必要であることが分かった。

第三段階における調査研究(研究C)では、潜水業務従事者から「厳しい業務」と評価されているyo-yo潜水を繰返し行う潜水業務を対象とした。研究Bによる調査の結果から、MP並びに炎症性サイトカインの増大と不活性ガス気泡の形成が減圧症リスクに関わる可能性があることから、潜水業務の安全性を高めるためには、これらへの対策が必要と考えられた。そこで、研究Cでは、万一の場合に備えた予防対策として潜水業務終了後に船上で酸素呼吸を行うプロトコールを作成し、実施することとした。MPには二酸化窒素(N₂O₂)気体分子が含まれていることが報告されており¹⁾、不活性ガス気泡の多くは窒素(N₂)によるものであることから、酸素呼吸によって肺胞内酸素(O₂)分圧を上昇させることで、MPと不活性ガス気泡消失を促進することができる。さらに、血中に溶解した酸素(溶存酸素)は炎症の抑制に効果的と考えられた。

調査対象とした12例の潜水業務では、

いずれも yo-yo 潜水が繰り返行われた。
また潜水曝露の程度を示す曝露指数 (Q 値) の平均値は、研究 B では 22 であったが、研究 C では、減圧症リスク閾値と考えられている 25 を超える 31 であった。潜水業務従事者への問診では、通常よりも激しい業務であったとの回答が半数以上に達したこともこれを裏付けている。これらのことから今回調査対象とした潜水業務は、減圧症リスクが十分に懸念されるものであった。

減圧用リスクに対する予防対策として船上酸素呼吸を実施した。MP の発現量は潜水前後の比較で 1.27 と研究 B における値 (1.34) より低かった。潜水後に不活性ガス気泡を検知した割合は研究 B での 25% に比べ 42% と高かったが、50% 以下であり、特に減圧症リスクが高いとは評価されなかった。また、潜水後に異常を訴えたものは皆無であった。

これらのことから、減圧症リスクが懸念される繰り返行われた yo-yo 潜水業務において、今回用いた船上酸素呼吸プロトコールは有効に機能し、減圧症リスクを許容範囲内とすることができたものとする。今後、yo-yo 潜水を繰り返して行うことが必要な潜水業務や、潜水業務時間が 2 時間超であり、yo-yo 潜水回数が 40 回を大きく超えるような潜水業務の実施に際しては、船上酸素呼吸プロトコールを用いることが減圧症予防に効果的と考える。

参考文献

- 1) Thom SR, Yang M, Bhopale VM, et al. Intra-microparticle nitrogen dioxide is a bubble nucleation site leading to decompression induced neutrophil activation and vascular injury. J Appl Physiol. 2013; 114:550-558
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 労働省安全衛生部労働衛生課編. 第 2 編 送気、潜降及び浮上. 新版潜水土テキスト—送気調節業務特別教育用テキスト. 中央労働災害防止協会. 1995. pp62-124.
- 5) DCIEM DIVING MANUAL Air decompression procedures and tables. Department of national defence - Canada. 1992
- 6) ShieIds TG, Duff PM, Wllcock SE. Decompression Sickness from Commercial Offshore Air-Diving Operations on the UK Continental Shelf during 1987. OT0 89 029. Health and Safety Executive; 1989
- 7) Longphre JM, Denoble PJ, Moon RE, Vann RD, Freiburger JJ. First aid normobaric oxygen for the treatment of recreational diving injuries. Undersea Hyperb Med. 2007; 34:43-49
- 8) Blatteau JE, Pontier JM. Effect of

bubble formation in divers. *Eur J Appl Physiol.* 2009; 106:691-695

9) 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

10) Nishi RY. Doppler and ultrasonic bubble detection. In: Benett PB, Elliott DH. ed. *The Physiology and medicine of diving*, 4th ed. W. B. Saunders: 1993, 432-453.

11) Nishi RY, Brubakk AO, Eftedal OS. Bubble detection. Brubakk AO, Neuman TS. ed. *Physiology and medicine of diving*, 5th ed. Saunders: 2003, 501-529.

12) 日本呼吸ケア・リハビリテーション学会 酸素療法マニュアル作成委員会. 酸素療法マニュアル（酸素療法ガイドライン改訂版）. 日本呼吸ケア・リハビリテーション学会. 2017 ; pp144.

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
望月 徹	水産養殖場におけるyo-yo潜水作業の調査	日本高気圧環境潜水医学会雑誌	58巻4号	197	2023
望月 徹	潜水業務における安全衛生管理の現状と課題	日本高気圧環境潜水医学会雑誌	59巻2号	78	2024
森松嘉孝	養殖場でyo-yo潜水を行う職業性潜水土の生体マーカー評価	日本高気圧環境潜水医学会雑誌	59巻2号	95	2024
森松嘉孝	養殖場に従事する職業性潜水土における閉塞性肺障害	日本高気圧環境潜水医学会雑誌	60巻3号	146	2025