

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

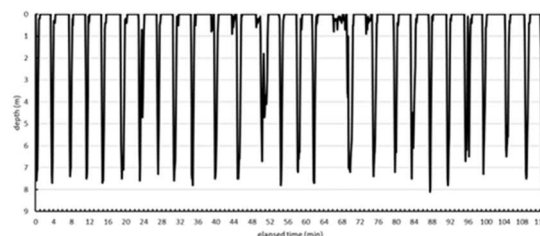


図1.水産養殖場での潜水プロファイルの一例

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、重篤な中枢神経系の減圧症事例も報告されている。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、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。

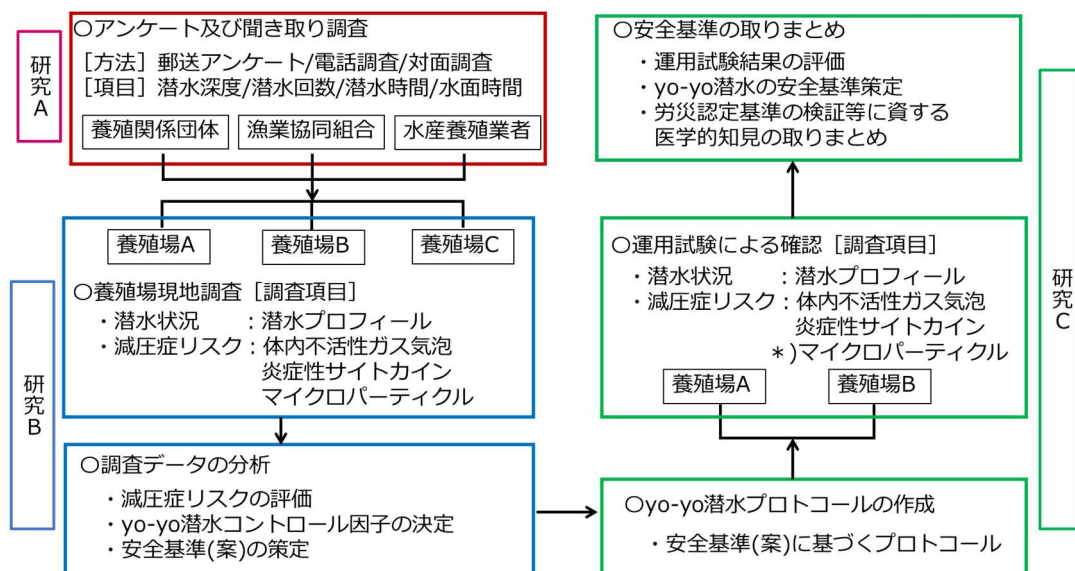


図2.調査研究の流れの概要

2. 研究A（令和5年度）：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。

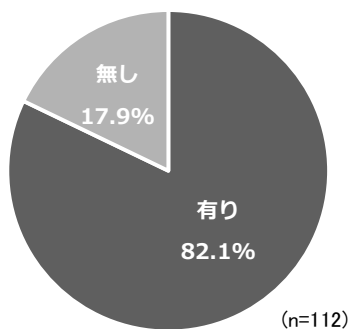


図-3. 潜水作業の有無

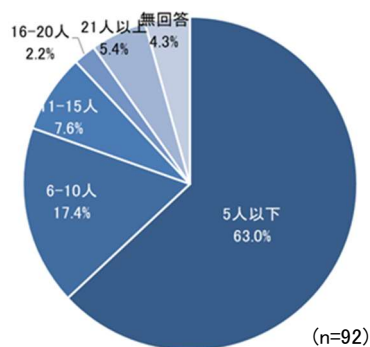


図-4. 所属する潜水業務従事者数

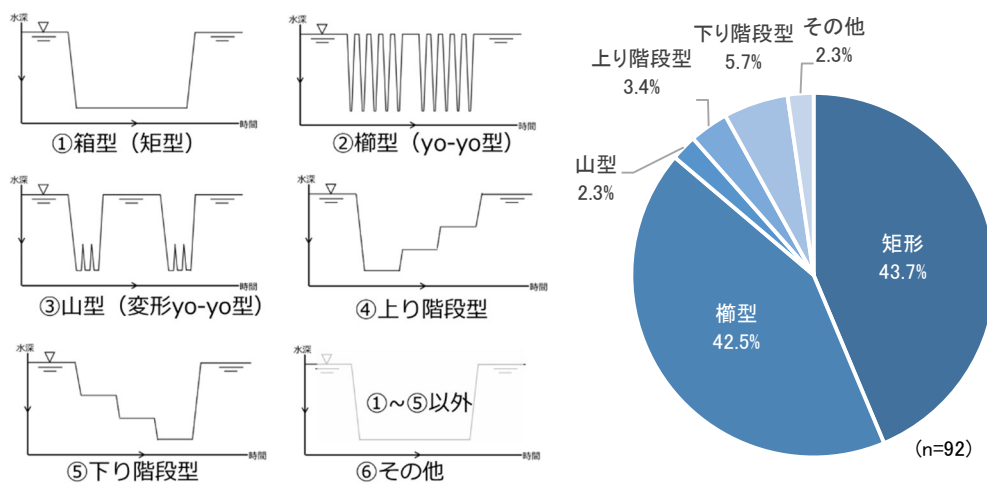


図-5. 水産養殖場における潜水パターン

3. 研究B（令和6年度）：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)

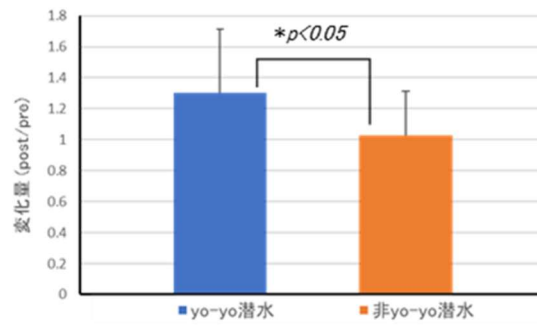


図-6. 微小膜胞体(MP)放出量の比較

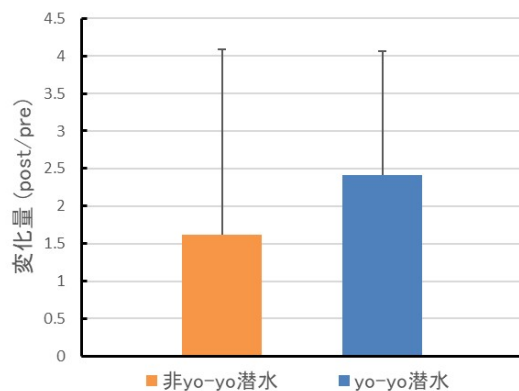


図-7. 炎症性サイトカイン(IL-1β)発現量の比較

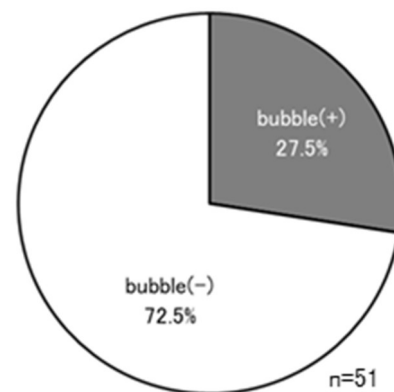


図-8. 不活性ガス気泡検知結果

4. 研究C (令和7年度): 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。

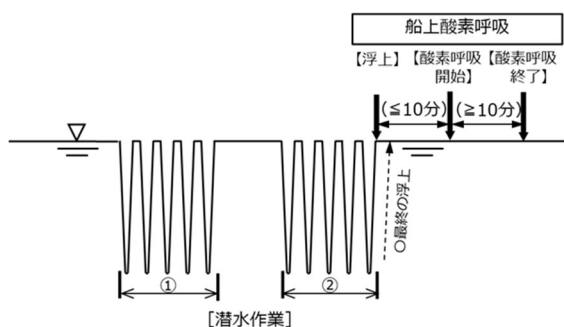


図-9. 船上酸素呼吸プロトコル

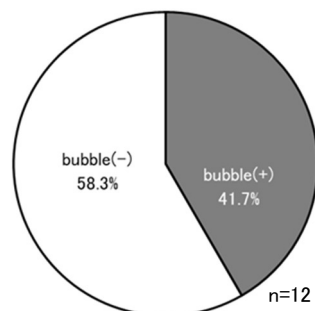


図-10. ドップラー気泡検知結果

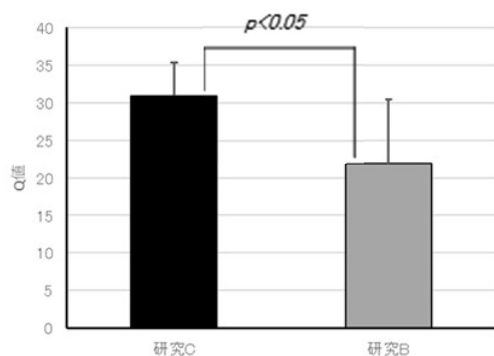


図-11. 研究 B、C における Q 値の比較

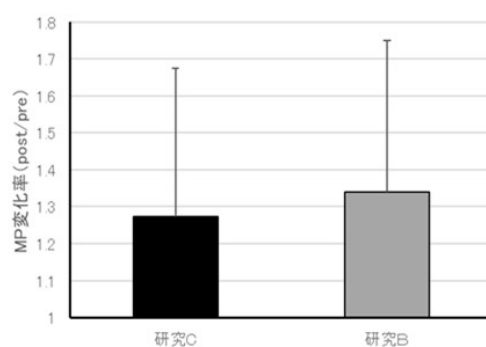


図-12. 研究 B、C における MP 値変化率の比較