

【原著】

深深度（45ATA）飽和潜水における筋力発揮能力と sLORETA 脳内電流密度

岩川孝志, 澤村岳人
海上自衛隊 潜水医学実験隊

【要約】

背景：飽和潜水は、サルベージや潜水艦救難など深深度の潜水作業を安全に行う潜水技法である。呼気ガスに使用される Heliox は不活性ガス麻酔が起きにくいとされているが、深深度飽和潜水における加圧環境が与える筋力発揮能力への影響についての研究はまだ十分になされていない。今回我々は、深深度 45 気圧 (atmosphere absolute : ATA) Heliox 飽和潜水における最大筋力と筋力維持の安定性、および筋力維持に伴う脳活動の変化について研究することとした。

方法：参加者は 10 名の海上自衛隊飽和潜水員 (平均年齢 : 35.8 ± 5.1 [SD] 歳)。全員男性で右利き。45ATA の Heliox 飽和潜水 (ドライ) 訓練に参加し、1ATA と 45ATA で最大筋力計測 (Maximal force : MAX) と筋力の変動係数計測 (Constant force : CONST) の掌握運動テストを実施した。最大筋力計測では右手握力の最大筋力を計測した。筋力の変動係数計測では筋力モニターを見ながら最大筋力の 20% に相当する右手握力を維持した際の筋力の変動係数を計測した。筋力の変動係数計測時に脳波を計測し、脳波データから脳内電流密度を標準化低解像度脳電磁トモグラフィ (standardized low resolution electromagnetic tomography : sLORETA) を用いて算出した。

結果：最大筋力値は 45ATA では 26.7 ± 7.2 (SD) kg で、1ATA の 31.6 ± 8.6 kg より有意に低下した ($p < 0.05$)。筋力の変動係数は 45ATA で $8.7 \pm 4.4\%$ となり、1ATA の $4.8 \pm 2.0\%$ より有意に増加した ($p < 0.05$)。脳内電流密度について、有意な差は認めなかった。

結論：本研究の結果から、深深度 45ATA Heliox 飽和潜水時に最大筋力は低下し、筋力維持の安定性も低下することがわかった。一方、脳内電流密度分布では差を認めなかった。深深度飽和潜水 (45ATA) では筋力発揮能力が低下し、潜水作業に影響が生じる可能性が示唆され、注意喚起と更なる研究が必要と考えられる。

キーワード

飽和潜水, 高圧環境, 加圧ストレス, 筋力発揮能力, sLORETA

【Original】

The effect of hyperbaric exposure on muscular exertion and brain current density by sLORETA during the simulated 440 meters sea waters 45ATA saturation diving

Takashi Iwakawa, Takehito Sawamura

Undersea Medical Center, Japan Maritime Self-Defense Force

【abstract】

Background: Saturation diving (SD) is a useful diving technique for safe deep-sea operations such as salvage or submarine rescue. As a breathing gas, heliox is considered less likely to cause gas narcosis during SD. There have been few studies on diver muscular performance under hyperbaric conditions such as SD. Therefore, we evaluated diver muscular exertion abilities to develop maximal force (MAX) and stabilize constant force (CONST), as well as brain activities

in CONST during 45 atmosphere absolute (ATA) Heliox SD.

Methods: Participants included ten male saturation divers from the Japan Maritime Self-Defense Force (JMSDF) (age; 35.8 ± 5.1 [SD] years) who had completed 45ATA Heliox SD (dry) training and had undergone two handgrip exercise tests: The maximum force (MAX) development and the coefficient of variance in the grip strength (20% of the maximum force) (CONST) at 1ATA and 45ATA. MAX evaluated the maximum force development of the right hand. CONST evaluated the coefficient of variance (CV) in grip strength while monitoring real-time force. In terms of brain activity, we examined electroencephalograms in CONST and calculated brain current densities using standardized low resolution electromagnetic tomography (sLORETA).

Results: MAX maximum grip strength at 45ATA (26.7 ± 7.2 kg) was significantly lower than at 1ATA (31.6 ± 8.6 kg). CONST CV at 45ATA ($8.7 \pm 4.4\%$) was significantly higher than at 1ATA ($4.8 \pm 2.0\%$). There were no differences in brain current densities between 1 ATA and 45ATA in sLORETA.

Conclusion: Our results showed that the muscular abilities to develop maximal force and stabilize force were impaired during 45ATA deep heliox SD. However, we did not find any differences in brain current densities for 1ATA and 45ATA, which suggests that deep SD impairs muscular exertion abilities and interferes with diving operations.

Keywords

saturation diving, hyperbaric condition, compression stress, muscular exertion, sLORETA

【背景・目的】

飽和潜水は不活性ガスが組織に飽和した状態を維持する潜水技術であり、サルベージや海底油田の開発、潜水艦救難などの深深度潜水作業に用いられる¹⁾。海上自衛隊における飽和潜水は、主として潜水艦救難を目的に研究・訓練がなされている。潜水医学実験隊の深海潜水シミュレーター(ドライ)では1987年に深度300m圧、1991年に深度400m圧、1992年には深度450m圧を達成した。1988年から実海面での実働8件、1987年から連続してのドライ環境下での訓練を行っているが、事故はなく、高圧神経症候群も発生せず、減圧症の発症も極少数に抑制できており^{2,3)}、安全に深深度飽和潜水を運営している。当隊では飽和潜水に対してヘリウムと酸素の混合気 Heliox を用いている。当隊の Heliox による飽和潜水450m深度は世界でも最も深い深度の一つである。Heliox による飽和潜水で450mより以深での連続した報告はなく⁴⁾、より深深度については分子量の少ない水素が用いられており⁵⁾、気道抵抗性を含め生理

的に Heliox 環境下で許容される最深と考えられる。飽和潜水を用いた各種作業では、ダイバーには閉鎖空間での生活などの環境ストレスや、圧の負荷、そして運動負荷がかかる。こうした深深度の加圧環境下でダイバーは潜水作業に応じた筋力発揮を行うことが求められる。潜水作業など筋力を発揮する際には最大筋力と筋力の安定性が重要となる^{6,7)}。

最大筋力の大きさは高度なスポーツパフォーマンスから、単純な日常動作の能力にまで関係していることが知られている。一般に最大筋力が大きいほど、短距離走⁸⁾や走り幅跳びなどの跳躍系競技⁹⁾のパフォーマンスは高くなる。逆に最大筋力が低いと、歩行¹⁰⁾や立ち座り動作¹¹⁾の能力が低下する。飽和潜水における最大筋力は、Vaernesら¹²⁾の研究で、Helioxを使用した31気圧(atmosphere absolute: ATA)下で低下することが報告されている。しかし、この報告はわずか3名のダイバーの筋力観察に留まり、統計処理は行われず、Heliox 飽和潜水における最大筋力の

変化が明らかにされたとは言い難い。

筋力の安定性は、一定の筋力を発揮した際にその変動係数が小さいほど安定している^{13,14)}。スポーツパフォーマンス¹⁵⁾から、立位姿勢⁷⁾、手指の協調運動¹⁶⁾のような日常における動作効率や円滑さに至るまで筋力の安定性が関与することが報告されている。しかしながら、我々の知る限り、潜水加圧の筋力の安定性への影響について、これまで報告は認められず、Helioxを用いた深深度飽和潜水加圧下の最大筋力と筋力の安定性の変化についての研究が求められていた。

筋力発揮に関する中枢神経の役割については、機能的磁気共鳴画像(Functional magnetic resonance imaging : fMRI)を用い、Mayhewら¹⁷⁾が非加圧下で、筋力の安定性と脳の一次運動野や視覚野の活動性に関連があることを報告している。一方、狭い空間で高圧環境となる飽和潜水では、使用できる計測機器に制限があり、fMRIを用いることは困難である。高圧下でも脳波や心電図のような電気生理学的計測は可能であり、これまでに脳波では31ATA下で徐波が増加することが報告されている¹⁸⁾。Pascual-Marqui¹⁹⁾によって開発された標準化低解像度脳電磁トモグラフィ解析(Standardized low resolution brain electromagnetic tomography : sLORETA)は頭皮上脳波データから、脳内神経活動の電流密度を全頭において算出する手法である。sLORETAソフトウェアは、頭皮上脳波データから、5mm立方の解像度でモントリオール神経研究所の標準脳モデル(MNI 152²⁰⁾)の灰白質上に配された6,239ボクセルの電流密度を算出することが可能である。sLORETAとfMRIを比較すると、認知課題²¹⁾、と運動課題²²⁾における神経活動の変化領域は、両者間では差がなく、同等の算出力があるものと考えられている。sLORETAは三次元的な脳神経活動画像を描出でき、二次元脳電図より詳細な脳領域の活動情報を得ることができる。そして、通常 of 脳波測定同様に加圧と空間的制限のある飽和潜水中も測定が可能である。深深度 Heliox 飽和潜水中の sLORETA を用いた脳波解析の報告も我々

の知る限り、現時点では認めない。

本研究では、初めて Heliox を用いた深深度(45ATA)飽和潜水加圧の最大筋力と筋力の安定性への影響を測定するとともに、sLORETAを用いて筋力発揮中の脳内電流密度を測定し、深深度加圧の筋と中枢神経への影響を明らかにすることを企図する。

【方法】

1. 研究参加者等

海上自衛隊潜水医学実験隊では2019年9月、2020年9月の2回、約30日間にわたる Heliox による深深度440m飽和潜水(45ATA)訓練を実施した。研究参加者は2019年が5名、2020年が5名、計10名の成人男性だった(平均年齢 35.8 ± 5.1 [SD]歳)。全て海上自衛隊の男性飽和潜水員であり、研究参加までに飽和潜水についての教育・訓練を十分に受けていた。全例が右利きだった。研究参加者には研究の目的と意義、測定方法と起こり得る危険性、および研究に参加しない場合も不利益が生じないこと等について説明し、研究に参加する同意を書面で得た後に研究を開始した。本研究は自衛隊横須賀病院医学研究倫理審査委員会の承認(横病医倫第R1-07号)を得て行った。

2. 飽和潜水プロフィールと筋力発揮測定時期(図1)

飽和潜水は当隊深海潜水シミュレーター(ドライ環境)で行われ、潜水員は減圧室(居住区画:長さ7.1m×直径2.1m)内で生活し、加減圧を受けた。深度440m(45ATA)への加圧は、これまで行われた潜水医学実験隊の飽和潜水研究で、安全が確立された加圧法に従って行った²³⁾。まず空気添加により深度10mまで加圧して、酸素分圧を0.42ATAに上昇させ、その後ヘリウムを添加し深度440m(45ATA)まで加圧し、保圧した。食事時間および睡眠時間を考慮し、中途保圧時間を確保し、深度440m(45ATA)には第4日に到達した。深度440m(45ATA)を第4日から第11日まで維持する間、潜水作業訓練を第7日と第8日に2日間実施した。第12日に Bennet と Schafstall²⁴⁾による飽和潜水減圧表に基づき減圧

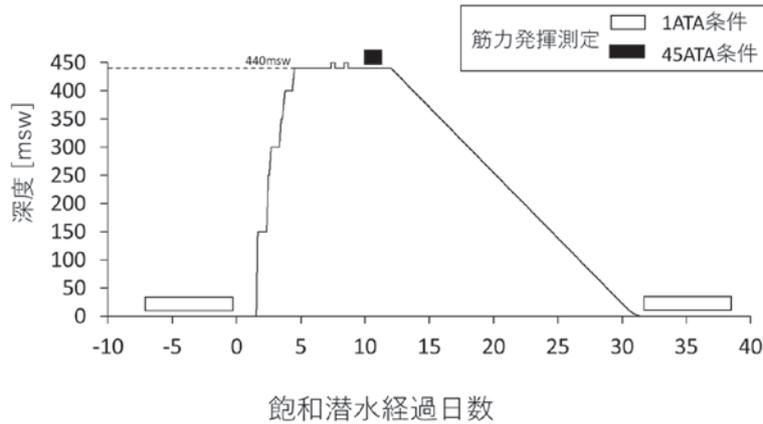


図1：飽和潜水プロフィールと筋力発揮測定実施時期
1ATA条件では研究参加者の半数が飽和潜水開始前，半数が飽和潜水終了後に筋力発揮測定を行った。

を開始し，第31日に大気圧へ戻り，研究対象者はシミュレーター外に復帰した。

1ATAと45ATA下で筋力測定を行った(図1)。運動プロトコールに対する慣れの影響を除去するため，1ATAの検査の実施は，参加者を半数ずつにわけ，加圧開始前1週間(5名)と，減圧終了後1週間(5名)の期間に行った。45ATAでの測定は第10日と第11日に実施した。

3. 筋力発揮測定プロトコール

本研究では1ATA，および45ATAにおいてa)最大筋力，b)筋力の変動係数，の順に筋力発揮計測を行った。

a) 最大筋力計測

参加者に対し，座位姿勢で右手に握力用フォーストランスデューサー(MLT-003/D, AD Instruments社製，ニューサウスウェールズ州，オーストラリア)を保持させ，最大筋力を3秒間発揮させた。これを3分間の休息を挟んで2回実施した。

b) 筋力の変動係数計測

参加者に対し，座位姿勢で右手に握力用フォーストランスデューサーを保持させ，最大筋力の20%に相当する強度で3分間，筋力発揮を維持させた。参加者には最大筋力の20%に相当する筋力値を事前に指示し，筋力値がリアルタイムに表示されるモニター(PVM-190, SONY製，東京，日本)を見ながら20%に相当する筋力値を発揮させ

た。a)最大筋力計測とb)筋力の変動係数計測の間には3分間の休息をとった。

4. 筋力発揮能力と脳内電流密度測定の実施時期

参加者がフォーストランスデューサーに加えた筋力は，A/D変換装置(PowerLab/8s, AD Instruments社製ニューサウスウェールズ州，オーストラリア)を介し，パーソナルコンピュータ(Vostro 15, Dell社製，テキサス州，アメリカ)に1kHzの頻度で記録した。1ATAおよび45ATAで行った最大筋力発揮中に記録された2回の最大筋力値を平均し，それぞれの最大筋力とした²⁵⁾。次に，1ATAおよび45ATAで行った筋力発揮維持中に記録された筋力の変動係数を算出した^{13,14)}。

脳内電流密度の測定は，まず電極帽(Electro-Cap, Electro-Cap社製，南ホラント州，オランダ)上に配置されたスズ電極を用い，国際10-20法²⁶⁾に基づく頭皮上19箇所(Fp1, Fp2, F7, F8, F3, F4, Fz, T3, T4, C3, C4, Cz, T5, T6, P3, P4, Pz, O1, O2)から両耳朶平均電位を基準として脳波を導出した。デジタル脳波計(EEG-1214, 日本光電社製，東京，日本)を用い，1kHzの頻度で記録した。筋力の変動係数計測時に記録された脳波データをsLORETAに入力し，3分間の筋力発揮中の平均脳内電流密度を算出した。

5. 統計

a) 筋力発揮能力

最大筋力と、筋力の変動係数について SPSS 11.0J (SPSS 社) を用い、対応のある t 検定を行った。有意水準を 5% とした。

b) 脳内電流密度

sLORETA に内蔵されている統計計算プログラム Statistical non-parametric mapping (SnPM) を用い、1ATA および 45ATA の電流密度の差についてボクセル単位でのランダム化比較を 5,000 回のパーミュテーションを用いて実施した²⁷⁾。SnPM で全てのボクセルの t 値を算出し、有意水準を 5% とした。

【結果】

1. 筋力発揮能力

1ATA と 45ATA (440msw) における筋力発揮能力を表 1 に示す。最大筋力は 1ATA では 31.6 ± 8.6 (SD) kg であったが、45ATA では 26.7 ± 7.2 kg と、有意に低下した ($t=2.71$, $df=9$, $p<0.05$)。

表 1. 深深度飽和潜水 (45ATA : 440msw) と大気圧下における筋力発揮能力の比較

	1ATA	45ATA
最大筋力(kg)	31.6 ± 8.6	$26.7 \pm 7.2^*$
筋力の変動係数(%)	4.8 ± 2.0	$8.7 \pm 4.4^*$

*: $p < 0.05$

筋力の変動係数は 1ATA $4.8 \pm 2.0\%$ であったが、45ATA では $8.7 \pm 4.4\%$ と有意に増加した ($t=2.54$, $df=9$, $p<0.05$)。

2. 脳内電流密度

1ATA と 45ATA を比較したパーミュテーションテストの結果、5% 水準で有意となる t 値の閾値は -5.612 および 5.612 であった。全ボクセルの t 値分布を図 2 に示す。t 値の最大は 2.580 (MNI 座標: $X=0$, $Y=-85$, $Z=20$)、最少は 0.092 (MNI 座標: $X=35$, $Y=-1$, $Z=20$) であり、有意となるボクセルは存在しなかった。

【考察】

今回我々は、Heliox を用いた 45ATA での深深度飽和潜水 (ドライ) の、筋力発揮能力の一つである最大筋力および筋力の変動係数への影響を、初めて評価することができた。45ATA では 1ATA と比較して最大筋力が低下し、筋力の変動係数は増加した。筋力の変動係数が大きくなることは、筋力の安定性が低下することを示し^{13,14)}、Heliox を用いた 45ATA での深深度飽和潜水では、筋力発揮能力が低下することがわかった。本研究では飽和潜水訓練中に測定を行っているが、筋力測定は潜水作業実施の翌日であり、疲労などの影響は少ないと考えられる。

ここで、最大筋力が低下した原因について検討

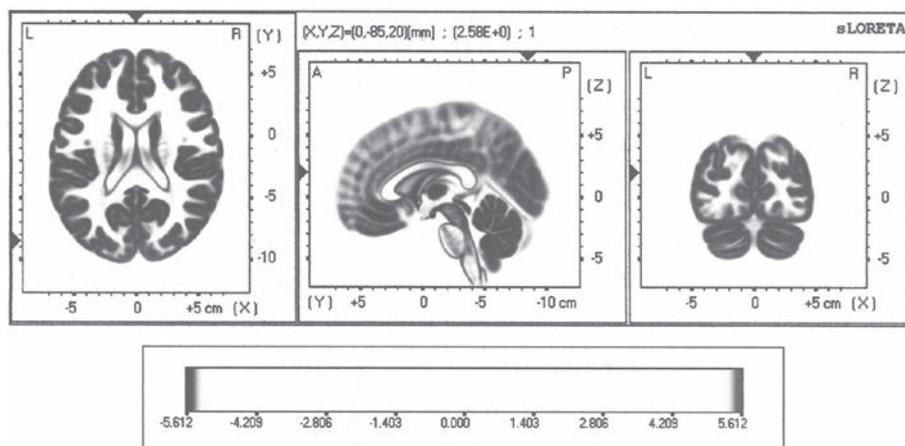


図 2 : 1ATA と 45ATA における筋力の変動係数計測中の脳内電流密度の測定結果
SnPM の結果は図の通りであり、有意差を認める部位は存在しなかった。

したい。最大筋力は筋性要因²⁸⁾と神経性要因²⁹⁾によって規定される³⁰⁾。まず、筋線維の太さが減ずる等の筋性要因について考えると、深深度飽和潜水では、参加者は円筒状の減圧室内で31日間居住し、室外へ出ることができず、運動量の低下の影響があげられる。ベッドレストのように運動量が極端に制限された状態が長期間続けば、抗重力筋や下肢筋は細くなる³¹⁾。一方で、上肢に注目すると14日間のベッドレスト³²⁾や、42日間の下半身ギプス固定³³⁾による活動制限では、前腕の筋群に最大筋力の低下は生じないことがわかっている。本研究では前腕の筋群を計測に用い、45ATAでの計測は減圧室入室後第10日、第11日に行っており、短期間で筋の萎縮が生じたとは考えにくい。また、参加者の1ATAでの計測は不活動の影響が相殺されるよう飽和潜水の前後に半数ずつに分けて実施しており、本研究における筋力発揮能力低下への筋性要因の影響は少ないものと考えられる。

次に、神経性の要因を検討する。Ikaiら²⁹⁾は、被験者の最大努力で筋力発揮を行わせた場合の筋力よりも、筋に直接電気刺激を与えて生じる筋力の方が大きいことを報告している。これは中枢神経性の抑制によるものと考えられ、ヒトが随意に発揮できる筋力には限界があることを示している。中枢神経性の抑制の評価法として、最大筋力を発揮している間に筋に電気刺激を加えた筋力と、電気刺激を加えない筋力とを比較するTwitch Interpolation法がある³⁴⁾。Twitch Interpolation法を用いた研究では、空気による6ATA潜水(ドライ)で、最大筋力が低下し、中枢神経性の抑制が大きくなることが観察されている³⁵⁾。中枢神経性の抑制が大きくなる要因のひとつに、窒素分圧の上昇による影響、いわゆる窒素麻酔が考えられ、Behmら³⁵⁾の研究では窒素分圧は4.68ATAまで上昇していた。本研究の深深度飽和潜水では窒素分圧は1.58ATAにとどまり、窒素麻酔の影響は限定的であるが、環境圧は45ATAと高く、環境圧の直接的な神経への影響が示唆された。深深度飽和潜水では高い環境圧が、神経活動に影響を

及ぼす^{36,37)}。深深度飽和潜水では振戦の発生³⁸⁾や協調運動機能の低下³⁹⁾など運動機能の低下が報告され、環境圧の上昇に伴う神経機能の変化に起因すると考えられている。本研究における最大筋力の低下も、環境圧の上昇に伴う、神経機能の低下の影響が大きいと考えられた。

筋力の変動係数は小さいほど筋力の動揺性が少なく、安定した筋力発揮が可能となり、筋力の変動係数は歩行⁴⁰⁾や手指の協調運動^{16,41)}などの日常動作から、スポーツパフォーマンス¹⁵⁾まで関連する筋力発揮能力の指標の一つである。本研究では、45ATAで筋力の変動係数が増加し、深深度飽和潜水では筋力発揮の安定性が低下することが示唆された。要因としては、最大筋力の低下と同様、神経性の要因によるものと考えられる。

神経性要因の評価について見ると、Mayhewら¹⁷⁾がfMRIを用いて、筋力の安定性が脳の一次運動野や視覚野の活動性と関連することを報告している。これは大気圧下での知見であり、fMRIを加圧下の深海潜水シミュレーターの狭隘な空間で測定するのは困難である。本研究では高圧下でも測定可能な頭皮上脳波データから脳内電流密度を算出するsLORETA¹⁹⁾を用いて、筋力発揮中の脳内電流密度を比較したが、1ATAと45ATAとの間に差を認めなかった。本研究において、認められた筋力安定性の低下に伴う中枢神経性の変化はsLORETAによって算出可能な灰白質上には少なくとも認められなかった。算出可能な範囲外について解析はされておらず、中枢性の影響を全て否定できるものではない。筋力の変動には中枢性の脳活動以外にも、末梢で運動に動員されている運動単位の発火頻度の変動⁴²⁾、協働筋群間での動員割合の変動⁴³⁾、感覚運動領域に相当する脳皮質と筋の神経活動の同期性⁴⁴⁾など筋同士、または筋と神経、中枢神経と末梢神経との関連が影響することが報告されている。これらの筋間、神経筋間、神経間の関連性の変化が今回確認された筋力発揮へ影響している可能性があり、今後更なる研究が期待される。

本研究の限界

脱水が筋力低下を引き起こすことは臨床的に

知られており^{45,46)}、飽和潜水では尿量の増加、高圧利尿が発生する⁴⁷⁾。尿量は深度176mで1日2,600ml⁴⁸⁾、深度300mで1日に約2,000ml⁴⁹⁾まで増加することが確認されている。本研究でも高圧利尿による脱水傾向が、最大筋力の低下に影響した可能性があるが、尿量等、高圧利尿と脱水については評価されていない。

次に、視覚情報処理の低下の影響があげられる。筋力の変動係数の計測で被験者は、筋力値がリアルタイムに表示されるモニターを見ながら指示された筋力値の発揮を維持した。発揮した筋力と目標となる筋力との乖離が少なくなるように被験者は自ら視覚的に修正を行った。Kinneyら⁵⁰⁾によると、1,600フィート(約487.7m)のHeliox飽和潜水(ドライ)において、視覚誘発電位は大気圧と比較して潜時が延長するという。この高圧下での視覚情報の脳皮質への伝達の遅れが、筋力維持の不安定化と関連した可能性が考えられる。今後、視覚情報処理能力をあわせて評価するなどの工夫が必要と考えられる。

【結語】

本研究では、45ATAのHeliox飽和潜水(ドライ)では最大筋力が低下し、筋力の変動係数が増加することを初めて明らかにした。深深度(45ATA)では筋力発揮機能が低下することが示唆される一方、sLORETAで計算された脳内電流密度には大気圧と45ATAの間に差が見出せなかった。飽和潜水を含めた加圧と筋力発揮について更なる研究が期待される。

【謝辞】

研究参加者である海上自衛隊飽和潜水員を始めとして、本研究には潜水医学実験隊、潜水艦救難艦ちよだ、同ちはや、海上幕僚監部の各位から多大なる協力、支援を頂いた。深く感謝申し上げます。

本論文の発表に関し、開示すべき利益相反関連事項はない。

本論文の一部は第55回日本高気圧環境・潜水医学会学術総会で発表された。なお、本論文で表明された意見等は著者らの個人的見解であり、海上自衛隊、防衛省の公式見解ではない。

参考文献

- 1) 池田知純：潜水医学入門 安全に潜るために。東京：大修館書店。1995；pp. 22-27.
- 2) 小澤浩二：世界の飽和潜水の現状。潜水医学実験隊報告2012；28：18-40.
- 3) Domoto H, Iwaya K, Ikomi F, et al.: Up-regulation of antioxidant proteins in the plasma proteome during saturation diving: unique coincidence under hypobaric hypoxia. *PRoS One* 2016；11：e0163804.
- 4) Hou G, Zhang Y, Zhao N, et al.: Mental abilities and performance efficacy under a simulated 480-m helium-oxygen saturation diving. *Front Psychol*；6：919.
- 5) Lafay V, Barthelemy P, Comet B, Frances Y, Jammes Y: ECG changes during the experimental human dive HYDRA 10 (71atm/7200kPa). *Undersea Hyperb Med* 1995；22：51-60.
- 6) 大築立志：筋出力の随意調節。In：大築立志，鈴木三央，柳原大（編）. 筋力発揮の脳・神経科学—その基礎から臨床まで—。東京：市村出版。2017；pp. 17-33.
- 7) 廣野哲也：足関節底屈筋力調節能力と姿勢制御機能との関連。基礎理学療法学2022；25：56-60.
- 8) 渡邊信晃，榎本好孝，大山下圭吾，他：スプリンターの股関節筋力とスプリント走パフォーマンスの関係。体育学研究2000；45：520-529.
- 9) 稲岡純史，村木征人，国土将平：コントロールテストからみた跳躍競技の種目特性および競技パフォーマンスとの関係。スポーツ方法学研究1993；6：41-48.
- 10) Buchner DM, Larson EB, Wagner EH, Koepsell TD, Lateur DE: Evidence for a non-linear relationship between leg strength and gait speed. *Age Ageing* 1996；25：386-391.
- 11) Load SR, Murray SM, Chapman K, Munro B, Tiedemann A: Sit-to-stand performance depends on sensation, speed, balance, and psychological status in addition to strength in older people. *J Gerontol Med Sci* 2002；57A：M539-M543.
- 12) Vaernes R, Bennet PB, Hammerborg, D, et al.: Central nervous system reactions during heiox and trimix dives to 31 ATA. *Undersea Hyperbaric Med* 1982；9：1-14.
- 13) Galganski ME, Fuglevadnd AJ, Enoka RM: Reduced control of motor output in a human hand muscle of elderly subjects during submaximal contractions. *J Neurophysiol* 1993；69：2108-2115.

- 14) Nakanishi T, Kobayashi H, Obata H, Nakagawa K, Nakazawa K: Remarkable hand grip steadiness in individuals with complete spinal injury. *Exp Brain Res* 2019 ; 237 : 3175-3183.
- 15) Salonikidis K, Amiridis IG, Oxyzoglu N, et al.: Force variability during isometric wrist flexion in highly skilled and sedentary individuals. *Eur J Appl Physiol* 2009 ; 107 : 715-722.
- 16) Kornatz KW, Christou EA, Enoka RM: Practice reduces motor unit discharge variability in a hand muscle and improves manual dexterity in old adults. *J Appl Physiol* 2005 ; 98 : 2072-2080.
- 17) Mayhew SD, Porcaro C, Tecchio F, Bagshaw AP: fMRI characterization of widespread brain networks relevant for behavioral variability in fine and motor control with and without visual feedback. *Neuroimage* 2017 ; 148 : 330-342.
- 18) 小沢浩二, 大岩弘典, 辰濃治郎: 31 絶対気圧ヘリウム酸素飽和潜水時における二次元脳電図の変化. *日本高気圧環境・潜水医学会雑誌* 1990 ; 25 : 97-106.
- 19) Pascual-Marqui RD: Satanized low resolution brain electromagnetic tomography (sLORETA): technical details. *Methods Find Exp Clin Pharmacol* 2002 ; 24 Suppl D : 5-12.
- 20) Mazziotta J, Toga A, Evans A, et al.: A probabilistic atlas and reference system for the human brain: International consortium for brain mapping (ICBM). *Phil Trans R Soc Lond B* 2001 ; 356 : 1293-1322.
- 21) Brem S, Halder P, Bucher K, et al.: Tuning of the visual word processing system: Distinct developmental ERP and fMRI effects. *Hum Brain Mapp* 2009 ; 30 : 1833-1844.
- 22) Karpil I, Drzaga Z: Comparison between ERP (sLORETA) and fMRI of somatosensory cortex for healthy group. *Acta Physica Polonica B. Proceed Sup* 2020 ; 13 : s923-s930.
- 23) 小沢浩二: 高圧ヘリウム・酸素混合ガス環境 (440 msw) が短潜時及び中潜時体性感覚誘発電位に及ぼす影響. *日本高気圧環境・潜水医学会雑誌* 2017 ; 52 : 1-11.
- 24) Bennet PB, Schafstall H: Scope and design of the GUSI international research program, *Undersea Biomed Res* 1992 ; 19 : 231-241.
- 25) 音部雄平, 平木幸浩, 堀田千晴, 他.: 保存期慢性腎臓病患者における筋力値および健常者平均値との比較. *理学療法学* 2017 ; 44 : 401-407.
- 26) Jasper HH: The ten twenty electrode system of the international federation. *Electroenceleograph Clin Neurophysiol* 1958 ; 10 : 371-375.
- 27) Nichols TE, Holmes AP: Nonparametric permutation tests for functional neuroimaging: A primer with examples. *Hum Brain Mapp* 2001 ; 15 : 1-25.
- 28) 福永哲夫: ヒトの絶対筋力—超音波による体肢組成・筋力の分析. 東京; 杏林書院. 1978 ; pp. 1-252.
- 29) Ikai M, Yabe K, Ishii K: Muskelkraft und muskuläre Ermüdung bei willkürlicher Anpassung und elektrischer Reizung des Muskels. *Sportarzt und Sportmedizin* 1967 ; 5 : 197-201.
- 30) 福永哲夫: ヒトの骨格筋の筋力トレーニング—筋線維動態から関節の動きまで. In: 山田茂, 福永哲夫 (編). *生化学, 生理学からみた骨格筋に対するトレーニング効果*. 東京: NAP. 1996 ; pp. 1-26.
- 31) LeBlanc A, Gogia P, Schneider V, et al.: Calf muscle area and strength changes 5 weeks of horizontal bed rest. *Am J Sports Med* 1988 ; 16 : 624-629.
- 32) Kamiya A, Michikami D, Shiozawa T, et al.: Bed rest attenuates sympathetic and pressure responses to isometric exercise in antigravity muscles in humans. *Am J Physiol* 2004 ; 286 : R844-R850.
- 33) Detrick JE, Whedon GD: Effects of immobilization upon various metabolic and physiologic functions of normal men. *Am J Med* 1948 ; 4 : 3-36.
- 34) Belanger AY, McComas AJ: Extent of motor unit activation during effort. *J Appl Physiol* 1981 ; 51 : 1131-1135.
- 35) Behm D, Power K, White M, et al.: Effects of hyperbaric (6ATA) pressure on voluntary and evoked skeletal muscle contractile properties. *Undersea Hyperb Med* 2003 ; 30 : 103-115.
- 36) Baruer RW, Way RO: Relative narcotic potencies of hydrogen, helium, and their mixtures. *J Appl Physiol* 1970 ; 29 : 23-31.
- 37) Talplar AE, Grossman Y: CNS manifestations of HPNS - revised. *Undersea Hyperb Med* 2006 ; 33 : 205-210.
- 38) 関 邦博, 岩崎麻理子, 桑原信之, 他.: 31ATA, He-O₂ 環境下のダイバーの姿勢振戦の発現. *海洋科学技術センター試験研究報告* 1984 ; 13 : 121-131.
- 39) 他谷 康, 永嶋秀敏, 毛利元彦: ヘリオックス及びナイトロックス飽和潜水時のダイバーの自覚疲労と手腕作業効率. *海洋科学技術センター試験研究報告* 1997 ; 36 : 119-127.
- 40) Almklass AM, Davis L, Hamilton LD, Vieira TM, Enoka RM: Motor unit discharge characteristics and walking performance of individuals with multiple sclerosis. *J Neurophysiol* 2018 ; 119 : 1273-1282.
- 41) Almklass AM, Price RC, Gould JR, Enoka RM: Force steadiness as a predictor of time to complete a

- pegboard test of dexterity in young men and women. *J Appl Physiol* 2016 ; 120 : 1410-1417.
- 42) Laidlaw DH, Bilodeau M, Enoka RM: Steadiness is reduced and motor unit discharge is more variable in old adults. *Muscle & Nerve* 2000 ; 23 : 600-612.
- 43) Kouzaki M, Shinohara M: The frequency of alternate muscle activity is associated with the attenuation muscle fatigue. *J Appl Physiol* 2006 ; 101 : 715-720.
- 44) Ushiyama J, Yamada J, Liu M, Ushiba J: Individual difference in β -band corticomuscular coherence and its relation to force steadiness during isometric voluntary ankle dorsiflexion in healthy humans. *Clin Neurophysiol* 2017 ; 128 : 303-311.
- 45) Minshull C, James L: The effects of hypohydration and fatigue on neuromuscular activation performance. *Appl Physiol Nutr Metab* 38 : 2013 : 21-26.
- 46) Reece TM, Hatcher ML, Emerson DM, Herda TJ: The effects of passive dehydration on motor unit firing rates of the vastus lateralis in males. *Sport Sci Health* 19 : 2023 : 103-111.
- 47) Shiraki K, Sagawa S, Konda N, Hong SK: Hyperbaric diuresis and nocturia - A review. *Journal of university occupational and environmental health* 1985 ; 7 : 61-72.
- 48) Hong SK, Claybaugh JR, Frattali V, et al.: Hana Kai II: a 17-day dry saturation dive at 18.6 ATA. III. Body fluid balance. *Undersea Biomed Res* 1977 ; 4 : 247-265.
- 49) 竹内久美, 相楽文明, 桐ヶ谷紀昌, 中山英明: 高圧 He-O₂ 環境下の水分代謝 (第1報). *海洋科学技術センター試験研究報告* 1980 ; 5 : 211-221.
- 50) Kinney JAS, Hammond R, Gelfand R, Clark J: Visual evoked cortical potentials in men during compression and saturation in He- O₂ equivalent to 400, 800, 1200 and 1600 feet of sea water. *Electroencephalograph Clin Neurophys* 1978 ; 44 : 157-171.