

令和 5 年 4 月 10 日現在

機関番号：84510

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12614

研究課題名（和文）ダイバーのための海水を利用した独創的な生体電気計測手法の確立とシステム開発

研究課題名（英文）Establishment of original bioelectrical measurement method using seawater for divers and development its system

研究代表者

瀧澤 由佳子（Takizawa, Yukako）

兵庫県立工業技術センター・その他部局等・上席研究員

研究者番号：20470255

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：我々はW. Einthovenが塩水の入った容器に手と足を浸けて心電図を測定したことをヒントに、生体全体を包む海水を巨大な一つの電極として利用する独創的な非侵襲的生体電気計測手法を提案した。そして、本研究で本提案手法を実証するためのラボ実験用システムを構築し、これにより心電図と筋電図が計測手法を確立した。更に、このシステムを小型化することでフィールド実験で利用可能なシステムを構築し、これを用いて実海域でのダイビング時の心電図と筋電図計測に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々が提案した非侵襲的生体電気計測手法は、生体全体を包む海水を巨大な一つの電極として利用することで、各測定部には隔離電極1つのみを設置して生体電気信号を測定できる今までに類を見ない学術的価値を有する方法である。そして、本提案手法のこれら生体電極をスキューバダイビングのウェットスーツに実装することにより、陸上とは全く異なった海中での作業を行うダイバーの安全監視を心電図および筋電図を行うことが可能となる。このため、海で囲まれファンのみならず職業ダイバーも多い日本においては、社会的な意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：Inspired by W. Einthoven's electrocardiogram (ECG) measurement by immersing hands and feet in a container of salt water, we proposed an original non-invasive bioelectrical measurement method by using seawater surrounding an entire organism as one huge electrode. In this study, we constructed a laboratory experiment system to demonstrate the proposed method, and established the measurement method for ECG and EMG (electromyogram) by using the system. Furthermore, by miniaturizing the system we constructed an advanced system that can be used in field experiments, and successfully measured ECG and EMG when diving in actual sea.

研究分野：生体計測

キーワード：筋電図 心電図 安全監視 海水 スキューバダイビング

1. 研究開始当初の背景

ダイバーは、陸上とは全く異なった海中での作業を行うため、安全には陸上以上の注意が必要となる。例えば、深海で長時間の作業をしたダイバーが陸に上がったときには、海中との圧力差により体の中で気泡が発生し機能障害が起こる。このような観点から、1970年代半より潜水下でのダイバーの生体監視の研究が始められている[1]-[4]。しかしながら、これらの研究で用いられた計測システムはセンサ部と記録部を有線で繋ぐ方式であり、装置は大がかりで空間的な制約がある。このため、バイタルサインの実海域でのフィールド計測は行われておらず、ダイバーの安全確保に必要なデータ蓄積は未だ不十分であった。このような背景から、我々は、2017～2019年の基盤研究(C)「ダイバー(潜水者)のための次世代口腔内センシングシステムの開発」で実海域フィールドでのバイタルサインの計測を想定し、各種のMEMS(Micro Electro Mechanical System)デバイスを組み込んだ図1に示すダイバーマウスピースを試作した。そして、これを用いて、口腔内でのバイタルサイン(体温、脈拍[5]、呼吸数)の測定に成功した。しかしながら、精神的ストレス指標にも利用される脈拍計測においては、ダイビング中に口腔内でマウスピース位置が微妙に変動し、光を利用した方式では安定的に測定できないという課題も残っていた。



図1 著者らが製作したバイタルサインモニタリング用のダイバーマウスピース

2. 研究の目的

総合的でハイレベルのダイバーの生体監視について考えると、バイタルサインだけではなくダイバーの行動計測も必要であることが予想される。なぜなら、行動計測はパニック行動時のバディ(他者)への通知や、ダイバーの過負荷動作の防止等に利用できるからである。そこで、本研究では、ウェットスーツに生体電極を工夫して埋め込むことで、身体行動を筋電図より把握できるシステムの構築を目指す。なお、本システムでは心電図も測定できるようになるため、上記のMEMSセンサ実装のダイバーマウスピースでは困難であった脈拍測定を心拍測定として代用することも可能となる。

3. 研究の方法

本研究では、ウェットスーツに組み込む生体電極を少なくするため、我々はW. Einthovenが塩水の入った容器に手と足を浸けて心電図を測定したことをヒントに、生体全体を包む海水を巨大な一つの電極(以後、海水電極という)として利用する新規の非侵襲的生体電気計測手法を提案した[6]。具体的には、生体の測定部位に一つの小さな海水と隔離した電極(以後、隔離電極という)を設置し、海水電極とこの電極間に生じる電圧信号を計測する(図2参照)。このため、本提案手法は、海水電極を共通とすることで、各測定部には隔離電極1つのみを設置して生体電気信号を測定できる。

海水中で生体電気計測を行うシステム(図3参照)は、生体内で発生した電気信号検出用の生体電極(海水電極と隔離電極)、その生体電気信号を増幅するための生体アンプ、その増幅された生体電気信号を記録するためのデータレコーダーの3つで構成される。

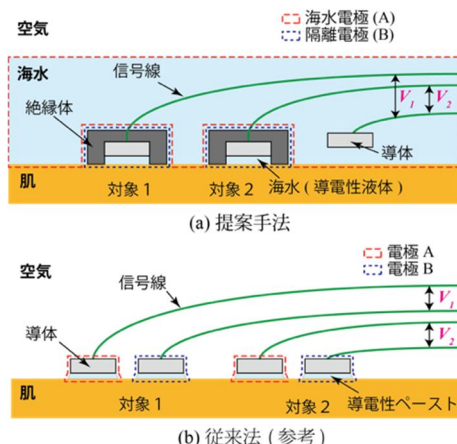


図2 新規の海水中での非侵襲式生体電気計測法

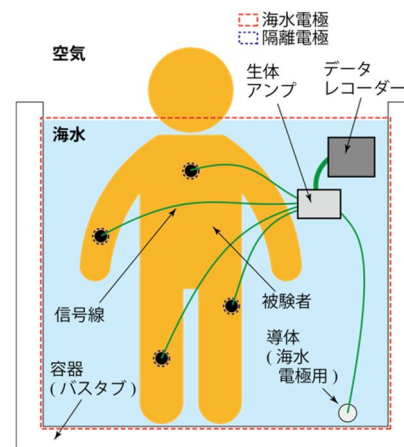


図3 海水中の生体電気計測システム

海水電極は、浴槽（長さ 134cm×幅 69cm×深さ 50cm）の約 300L の模擬海水（電気伝導率 5.3S/m）に真鍮製の板（長さ 100mm×幅 50mm×高さ 5mm）を沈めることで、構築した。一方、隔離電極は、アクリル構造物の上に円環形のクロロプレンスポンジゴム（外径 20mm, 内径 7mm, 厚み 5mm, CSC2 硬度：39）をシリコン系伸縮性接着剤で取り付け、スポンジゴム中空部に市販の銀/塩化銀皿電極（ユニークメディカル製 EPA-12, 直径 6mm, 厚み 3mm）を埋め込み、エポキシ系接着剤（ニチバン製、アラルダイト ラピッド）により固定し製作した（図 4 参照）。この隔離電極はアクリル構造物の穴に通した手芸用織ゴム（幅 20mm）により海水中で被験者に装着する。このため、皿電極前のキャビティ（空隙）には海水が満たされ、この海水は外部のそれとは隔離電極と肌により隔離、絶縁される。ちなみに、このキャビティ内の海水は従来手法での生体電極と皮膚との接触抵抗を小さくするための導電性ペーストと同じ役目をする（図 2 参照）。

水中で使用可能な 4 チャンネル生体アンプを設計し製作した（図 5 参照）。水中に沈めるために、この生体アンプの電子回路を防水のポリカーボネイトボックス（タカチ電機工業製、SPCP131806T、幅 125mm×長さ 175mm×高さ 60mm）に納めている。この生体アンプは、海水電極と各隔離電極から入力された生体電気信号を電気回路基板上の計測アンプ（アナログデバイス製、LT1167）で 6 倍に差動増幅する。次に、動的アーチファクト等による基線変動を少なくするため、RC ハイパスフィルターで差動増幅された信号の 1Hz 以下の周波数成分を減衰させる。最後に、高精度オペアンプ（アナログデバイス製、LT1122）で増幅と周波数処理させた信号を更に 200 倍に増幅する。すなわち、我々が製作した生体アンプを用いれば、生体で発生した 1Hz 以上の生体電気信号を 1200 倍に増幅することができる。しかし、金属製シールドケースやローパスとノッチフィルター回路を採用していないので、本生体アンプは市販のそれに比べて外部ノイズに対して非常に弱い。このため、本生体アンプを海水中に設置することで、海水による電氣的シールド効果を利用した。また、本生体アンプは内部ノイズの発生抑制と被験者の安全性を考慮して電池（±9V）で駆動させている。故障時において、電池の電圧以上は被験者の身体に印加されず、体内に流れる電流は電気回路基板上に実装された安全抵抗 2kΩ によって抑制され減少する。

本システムを用いて、動作制限下での浴槽内での実証実験、およびプールでの遊泳実験を行った。

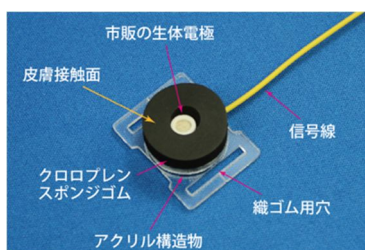


図 4 特殊な海水と隔離する電極

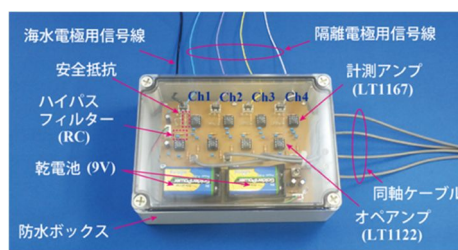


図 5 自作した 4 チャンネルの生体アンプ

4. 研究成果

4-1 動作制限下での実証実験[7]

本提案手法の実証実験では、健康な日本の被験者 3 名（A: 男性 49 歳、B: 男性 22 歳、C: 男性 22 歳）を対象として生体電気計測を行った。計測前、被験者に図 6 のように浴槽の中で半座位（ファウラー位）の動作制限下状態で $35 \pm 1^\circ\text{C}$ の模擬海水に首まで浸かってもらった。そして、隔離電極を標準 12 誘導法における V3 位置（第 4 肋間胸骨左縁(V2)と第 5 肋間と左鎖骨中線上との交点 (V4) の中点, Thorax）、左腕の上腕二頭筋(Biceps brachii: BB)、橈側手根屈筋(Flexor carpi: FC)、尺側手根伸筋(Extensor carpi: EC)の中央部上に 4 か所に取り付けた。次に、海水電極の一部である真鍮板をバスタブ底のほぼ中央、つまり被験者の太股間の下に沈めた。このとき、隔離電極が被験者の肌の上に適切に設置されていれば、つまり隔離電極内外の海水が隔離されていれば、海水電極と隔離電極間の抵抗は電極位置や被験者に依存せず数十 kΩ となる。その後、生体アンプを制作した専用の治具を用いて海水中（水面とアンプ上面間が約 10cm）に設置した。

なお、本研究の実験は大阪府立大学の倫理委員会の承認（承認期日 2019 年 3 月 5 日）を得ており、被験者からインフォームド・コンセントを書面にて取得して実験を行った。

被験者が手首を繰り返し動かした時の胸部 (V3)、上腕二頭筋 (BB)、前腕の橈側手根屈筋 (FC) と尺側手根伸筋 (EC) で得られる生体電気信号の例をそれぞれ図 7(a) - (d) に示す。ちなみに、これらは被験者 A の生体電気信号である。胸部での図(a)を見ると、R,S,T 波の心電位が明確に確認できる。そして、この R-R 間隔から被験者 A の心拍が約 60 回であることがわかる。次に、前腕での図(c)と(d)を見ると、急激な変化をする電圧が約 1 秒毎に FC と EC で交互に観測される。これらの電圧は被験者 A の手関節の掌屈と背屈動作と一致する筋電位である。このような心電位と筋電位は他の被験者 B, C においても同様に観測された。

以上のことから、各測定場所に特殊な生体電極 1 つずつを配置することで、海水中では生体電気計測が可能になったことが明らかになった。このことは、海中で行う本提案手法は気中での従来手法

の約半分の生体電極数で測定できるという大きな利点があることを示している。

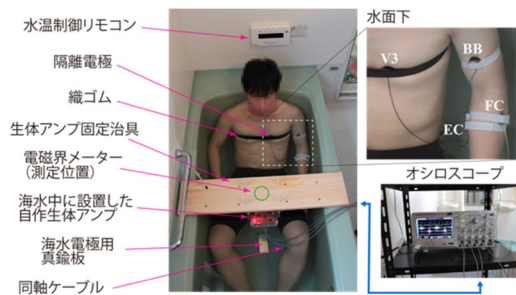


図 6 海水中での生体電気計測実験の様子と隔離電極の装着位置

4-2 遊泳実験

前節の実験結果より、手首動作時のみの動的制限下ではあるが本提案手法で心電位と筋電位が測定できることが証明された。そこで本節では、大きな動的アーチファクトが生じると考えられる遊泳時の生体電気計測における本提案手法の有用性について検討する。

実験では、ウェットスーツを着た被験者（男性、50才）に自然海水（電気伝導率 4.2S/m、水温 20.5°C）を入れたプール（幅 1m×長さ 4m×深さ 1.2m、水深 1m）内に設置した手すりに掴まってもらい、1秒間に1回の電子メトロノームから発せられる音に合わせて、身体を伸ばした状態でパタ足を行ってもらった（図 8 左）。そして、被験者の胸部の V3 位置、両太腿の大腿直筋（Rectus femoris: RF (L or R)）付近の 3 か所に 1 個ずつ取り付けた隔離電極から得られる生体電気信号を測定した（図 8 右）。

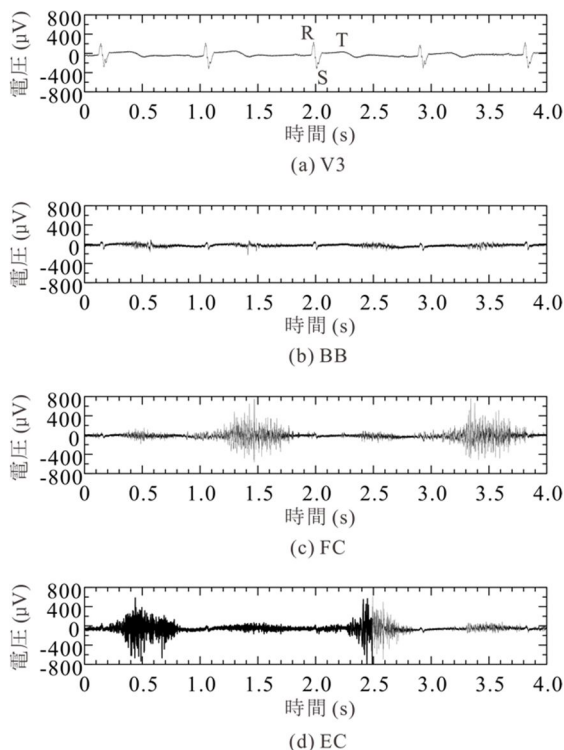


図 7 被験者が手首を繰り返し動かした時の生体電気信号

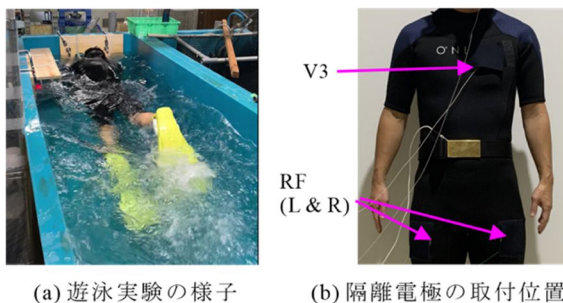


図 8 隔離電極の取り付け位置と遊泳実験の様子

その結果、図 9 を見ると、予想したように、全ての隔離電極で得られた生体電気信号から、必要なパタ足の動きと同期した 1 秒毎の大きな電位変動（動的アーチファクト）が観測されてい

る。そして、それら電位変動に加味され、隔離電極毎に ECG または EMG を観測することができる。このことは ECG の R 波や EMG の周波数成分が動的アーチファクトのそれより高いことを表しており、得られた生体電気信号を周波数処理することで遊泳時の必要な ECG および EMG のみを取り出せることを示している。

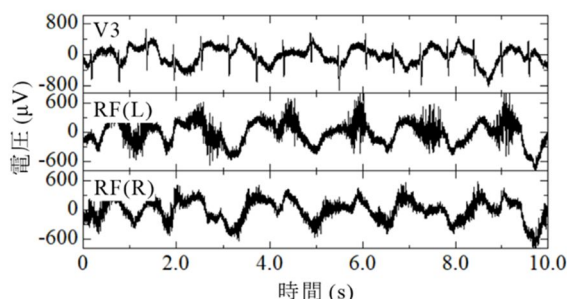


図 9 遊泳実験で得られた生体電気信号

更に、実海域での遊泳実験を実施するため、新たに耐水・耐圧性能を高めた生体電位計測ユニットを製作した(図 10)。本ユニットの外側はアクリル製の円柱容器(直径約 80 mm、高さ約 110 mm)であり、その中に生体電位ロガー (Open BCI 製、Open BCI) リチウムイオンバッテリー (400 mAh、3.7 V)、非接触で回路の電源を入切するための着磁スイッチ回路等が入っている。そして、本ユニットを用いて、海水浴場(兵庫県美方 郡新温泉町、居組県民サンビーチ)にて、被験者(50 代男性 1 名)を対象としてフィールド実験を行った。実験では、まず、被験者に、専用袋に入れた本ユニットをウェットスーツの上から腰につけてもらい、プールでの実験と同じ位置に生体電極を取り付けた(図 8(b)参照)。そして、被験者に岸から 100m 位の範囲を遊泳(スキンドайビング)してもらい、その時の ECG および EMG の生体電気信号を計測した(図 11)。なお、計測された信号は容器内のマイクロ SD カードにリアルタイムで書き込まれるので、実験終了後に PC で確認した。その結果、図 9 に示したラボ実験(プール)と同じような心電図および筋電図が実海域フィールド実験でも得られることがわかった。

今後、本実験ユニットを用いて、実海域における様々な条件下でのダイバーの生体計測を行う予定である。

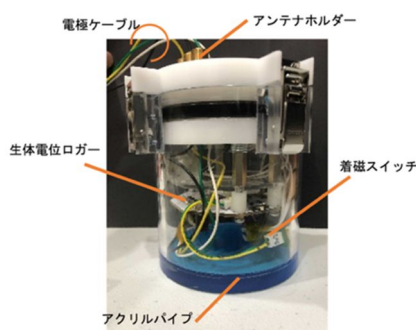


図 10 実海域実験用に製作した計測ユニット



図 11 実海域フィールド実験の様子

参考文献

- [1] M. Schrib, R. W. Weeks: "A low cost portable physiological data acquisition system for use on deep sea divers", Biomedical Science Instrumentation, Vol.13, pp.1-7, (1977)
- [2] D. G. Forgays: "Behavioral and Physiological Responses of Stayers and Quitters in Underwater Isolation", Aviation, Space, and Environmental Medicine, Vol.60, No.10, pp.937-942, (1989)
- [3] 海洋科学技術センター: "潜水作業技術の研究開発成果報告書 II 昭和 53 年度", 潜水作業技術の研究開発 昭和 53 年度成果報告書 2/2, (1980)
- [4] 富沢儀一ら: "環境制御下における呼吸・循環・代謝測定のデータバンク・解析システム", 医療情報学, Vol.9, No.4, pp383-395, (1989)
- [5] 瀧澤由佳子ら: "歯茎での反射型光電センサを用いた脈波測定", 電気学会論文誌 E, Vol.138, No.12, pp.545-546, (2018)
- [6] W. Einthoven, "Un nouveau galvanometer, Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles", 6, 625-33, (1901)
- [7] T. Saiki, et. al, "A novel method for noninvasive bioelectric measurement utilizing conductivity of seawater", Scientific Reports, DOI: 10.1038/s41598-021-86295-y (2021)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Saiki Tsunemasa, Araki Nozomu, Takizawa Yukako, Murai Koji, Arima Masakazu	4. 巻 141
2. 論文標題 Utterance and Breath Detection Using Acceleration Sensor in Underwater Breathing Equipment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 494 ~ 495
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejeiss.141.494	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Saiki Tsunemasa, Takizawa Yukako, Murai Koji, Okuno Ryuhei, Arima Masakazu	4. 巻 11
2. 論文標題 A novel method for noninvasive bioelectric measurement utilizing conductivity of seawater	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-86295-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 瀧澤由佳子, 宮原一隆, 村井康二, 奥野竜平, 有馬正和, 才木常正
2. 発表標題 生体電気計測を利用した海中での遊泳監視
3. 学会等名 日本人間工学会第62回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 才木常正, 傍島浩史, 有馬正和, 荒木望
2. 発表標題 ダイビングマスクに取り付けた加速度センサによる瞬目の検出
3. 学会等名 日本人間工学 関東支部大会第51回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本真宙, 中谷真太郎, 才木常正, 有馬正和
2. 発表標題 ダイバー潜水事故防止のための生体信号計測
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国学生会 第52回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福造博, 才木常正, 瀧澤由佳子, 有馬正和
2. 発表標題 ダイバーの安全を見守るヒューマン・モニタリングシステムの開発
3. 学会等名 2020年度日本人間工学会関西支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀧澤由佳子, 荒木望, 村井康二, 有馬正和, 才木常正
2. 発表標題 ダイビング・シュノーケルに実装した加速度センサによる発声検出
3. 学会等名 020年度一般社団法人日本人間工学会関東支部第50回大会 第26回卒業研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 水中生体計測装置、生体電極および生体計測方法	発明者 有馬正和、才木常正、下岡由佳子	権利者 公立大学法人大阪、兵庫県
産業財産権の種類、番号 特許、7165325	取得年 2022年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	才木 常正 (Saiki Tsunemasa) (80470227)	兵庫県立工業技術センター・その他部局等・上席研究員 (84510)	
研究分担者	有馬 正和 (Arima Masakazu) (70264801)	大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (24403)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関