

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：84510

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00291

研究課題名(和文)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

研究課題名(英文)Oral Cavity Sensing System for Safety of Diver

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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：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。そこで、本研究ではダイビング用マウスピースに各種センサを組み込み、センサから得られる情報から生体監視を行うシステムの開発を試みた。我々はまず、光電センサを用いた歯茎での脈波測定について検討した。その結果、歯茎に光電センサの投受光面がフラットに接触する位置に距離0mm～0.4mmに配置すれば脈波測定が可能であることがわかった。そして、これを踏まえて実際のダイビング用マウスピースに光電センサ、呼吸検出および体温測定用温度センサ、舌入力インタフェース用加速度センサを組み込んだ口腔内センシングシステムを試作した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
ダイバーが非常に危険な環境で作業することは以前より認識されていたが、ダイビング用バイタルサイン計測を行うための装置は開発されていない。陸上で使用されている装置を防水しても、実際のダイビング作業の妨げになるため、本研究はダイビング用マウスピースに組み込むことで実用を考慮したシステムとした。また、口腔内でのバイタルサイン計測が見出すことができたため、ダイバー用のみならず陸上用としても新たなセンシングデバイスを提案できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Divers work underwater, which is completely different from working on land, so, they need to be more careful than if they were working onshore in safety. To meet that need, a system that uses various sensors fitted in a diver's mouthpiece for monitoring the vital signs from the information obtained by the sensors was developed. We first examined the measurement of pulse waves generated in the examinee's gums using a photoelectric sensor. The results of the measurement show that the pulse waves can be measured if the photoelectric sensor is placed flatly on the gums at a distance of 0 mm to 0.4 mm from the gums. In consideration of the finding, the intraoral sensing system was prototyped by embedded a photoelectric sensor, a temperature sensor for detecting respiration and measuring body temperature, and an acceleration sensor for the tongue-input interface into a diving mouthpiece.

研究分野：ヒューマンインタフェース

キーワード：ダイビング 生体計測 脈波 呼吸 体温 舌入力 口腔

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 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。このようなことから、1970年代半ばにダイバーの安全確保のため、潜水下でのダイバーの生体監視が注目され、研究が始められている[1]。例えば、国外において、1989年に実験用プールでの長時間におけるダイバーのバイタルサインの計測が行われ[2]、国内においては1980年に加圧チャンバーにより潜水深度を調整して数百メートル相当の深海でのダイバーのバイタルサインの計測が行われた[3][4]。これらの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、当時の装置は大がかりで空間的な制約がある。このため、国内国外問わず実際の海洋でのバイタルサイン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。

(2) 我々の先行研究

近年、MEMS(微小電気機械システム)技術や半導体集積回路技術が急激に進歩し、超小型のセンサが販売され、これらセンサとマイコンで小型の計測システムが簡単に構成できるようになった。一方、日本では、核家族化に伴い独居の高齢者が増加し、孤独死が社会問題になっている。そこで、我々の先行研究では、高齢者の健康を見守るシステムが要求され、我々は2009年ごろより超小型のセンサを内蔵した義歯による高齢者モニタリングシステムについて検討し、その有用性を明らかにした。具体的には、高齢者が日常的に義歯(入れ歯)の装着が多いことから、義歯を想定したマウスピースに加速度センサ[5][6]、筋電センサ[7]、温度センサ[8]を取り付け、被験者の各種行動観測を行った。その結果、被験者のバイタルサインである呼吸のみならず、食事や発話の検出ができることがわかった。

2. 研究の目的

これらの背景を鑑み、ダイバーの安全監視について考えると、研究開始当初の時点では、高齢者モニタリング用の義歯と同様に、ボンベからの空気供給用マウスピースに各種センサを取り付けることで、様々なバイタルデータが取得できる可能性があることが見込まれた。

我々の先行研究から陸上では呼吸(呼気と吸気の温度差)の検出が可能であるが、ダイバーの安全監視に必要な脈拍や体温等のバイタルサインの検出まで至っていない。更に、ダイバーの安全を考える上において、バディ(水中で共に行動するパートナー)等の他者へのコミュニケーションも重要と考えられるが、これまで意思伝達デバイスについては検討していない。

そこで、先行研究で行った温度センサを用いた呼吸計測の他、光電センサを用いた脈波計測、温度センサを用いた体温計測、加速度センサを用いた舌入力インタフェースについて検討を行い、ダイバーの安全監視のための総合的な口腔内センシングシステムの開発を目指す。

特に、光電センサを用いて口腔内において脈波計測を行った事例はないため、まず、(1)口腔内における脈波計測の可能性の検討を行う。そして、(2)ダイビング用マウスピースをベースにした口腔内センシングシステムの構築と海中での評価実験を行う。

3. 研究の方法

(1) 口腔内における脈波計測の可能性の検討[9]

本研究では、まず口腔内において脈波計測について検討を行う。呼吸用マウスピースへの光電センサの組み込みを想定した場合、歯でマウスピースを噛むことから毛細血管の通っている歯茎で脈拍を検出することが妥当であると考えられる。そこで、歯茎上での光電センサの最適な設置位置を歯茎形状から検討した。

光電センサの設置位置を歯茎形状から検討するため、被験者の下顎の石膏歯型を歯科医院で製作して貰った。そして、この歯型を非接触三次元計測装置(Breuckmann製, Opto TOP-HE)で測定し、約10万点の表面位置データを得た。次に、これら表面位置データを基に、光電センサを埋め込む直径6mmの円平面が添い易いと考えられる平坦度が良い歯茎位置をパーソナルコンピュータにより数値解析し調べた。具体的には、この平坦度を或る1点のデータの3次元位置から直線で3mm以下の距離に3次元位置が存在する全てのデータを抽出する。そして、これら抽出されたデータの3次元位置から最小二乗平面を求め、これら最短距離の標準偏差を計算し、これを或るデータの3次元位置における平坦度とした。得られた平坦度を図1に示す。この図から、奥歯(第1大臼歯と第2小臼歯)下の歯茎において平坦度が良いことが見て取れる[10]。そこで、この歯茎位置に光電センサを取り付け、脈波を測定することとした。

次に、この計算結果から得られる位置に光電センサを配置するために、歯矯正用マウスピースを用いた実験ジグを作製する。作製した実験ジグを図2に示す。この奥歯下の歯茎位置で脈波を測定するため、被験者の歯型を基に製作した歯矯正用マウスピース(PET樹脂シート、約0.5mm厚)にPCB基板(6mm^φ×1.25mm^t)上に実装した光電センサ(新日本無線製NJL5501R、サイズ:1.9mm^l×2.6mm^w×0.8mm^h)を納めた円筒ケース(PMMA樹脂、7.6mm^φ×9mm^h)を固定した。光電センサを取めた円筒ケースの断面の概略図を図3に示す。円筒ケースの下部に設置された光電センサはPCB基板(6mm^φ×1.25mm^t)の上に実装配線され、光電センサの歯茎への片当たりを防ぐためにセンサ周りにEP樹脂を盛って突起部を無くしている。円筒ケー

スの上部にはネジ (M2) があり, 回すことで歯茎と光電センサ面を平行に保って, それらの距離 D を調整できる. 更に, 円筒ケースには圧力センサ (共和電業製 PS-05KC, $6\text{mm} \phi \times 0.6\text{mm} \text{t}$) も収納され, 光電センサの歯茎押し当て時の圧力も計測可能である.

実験では, 光電センサが取り付けられた歯科用マウスピースを椅子に座った被験者 1 名 (47 歳, 女性) に装着し, 歯茎と光電センサ面との距離 D を変え, 定格 5V 印加時の光電センサの出力電圧を測定した. 一般的に, 出力電圧の増加は歯茎からの反射光の増加, つまり血流量の減少を表す. なお, 本実験では, 著者本人が被験者を行ったため, 倫理委員会の承認は得ていない.

次に, このマウスピースを用いて歯茎における脈波計測実験を行った.

奥歯の歯茎における光電センサの出力電圧波形の例を図 4 に示す. ここで, $D=0.4\text{mm}$ であり, 光電センサと歯茎には若干の隙間が存在する. この図を見ると, この電圧波形には脈波に相当する約 0.7 秒毎の 0.04V 程度の増減変化があることがわかり, 歯茎において脈波が検出可能であることが明らかになった.

次に, 光電センサと歯茎間の距離と出力電圧波形の振幅平均の関係を図 5 に示す. ここで, 振幅平均とは 5 波分の最大と最小出力電圧の差の平均値であり, D が負のときは光電センサが歯茎にめり込んだ状態である. この図を見ると, D を大きくするに従って振幅平均も大きくなり, $D=0\text{mm}$ を境に小さくなっていることがわかる. この原因としては, 光電センサによる歯茎の圧迫による血流の堰き止め ($D<0\text{mm}$) と, 光路増加に伴う逆 2 乗法則による光の減衰 ($D>0\text{mm}$) が考えられる.

以上から, $D=0\text{mm}$ 付近, つまり光電センサを歯茎に接触するかしないかの位置に設置することが良いことが明らかになった.

(2) ダイビング用マウスピースをベースにした口腔内センシングシステムの構築と海中での評価実験

次に, ダイバーの安全監視のための口腔内センシングシステムとして, ダイビング用マウスピース (SCUBAPRO スーパーコンフォート) をベースに各種センサを組み込み, プロトタイプを試作する. 組込んだセンサは, 脈波計測用光電センサ, 呼吸検出用温度センサ, 体温検出用温度センサ, 舌入力インタフェース用加速度センサである. これらのセンサを組込んだダイビング用マウスピースの外観を図 6 に示す.

脈波計測用光電センサについては, (1) で得られた知見から, 歯茎における脈波計測の可能性が高いことがわかった. しかし, 被験者の歯茎形状のうち, 光電センサの投受光面に対して, 平行である位置に, 投受光面と歯茎との距離 $0\text{mm} \sim 0.4\text{mm}$ に正確に配置する必要があることがわかった. このことから, 歯で軽くかんで使用するマウスピースに光電センサを直接取り付けただのでは, 動作時には脈波を計測することが難しいと予想された. そこで, ダイバー用マウスピースに光電センサ (新日本無線製, NJL5501R) を組み込む場合にも, (1) の実験時と同様に, 光電センサを円筒ケースに収め, 歯矯正用マウスピースを用いた.

呼吸検出用温度センサについては, 先行研究において, 陸上では, 上口蓋に接触するように設置した温度センサにより, 呼気, 吸気の温度変化から呼吸が検出できる可能性が高いことがわかっていった. ダイビングマウスピースにおいては, 呼気, 吸気の通る開口部の中空に温度センサ (TEXAS INSTRUMENTS 製, LM35) 設置した. これにより, 直接, 海水, 身体と接触しないように考慮した. 一方, 体温計測用温度センサについては, 呼吸検出用温度センサと同種のセンサを図 6 (a) に示すようにセンサが左頬の奥に接触するようにダイビングマウスピースに取り付けた. なお, これらの温度センサは防水のために EP 樹脂でセンサの金属部分をコーティングして用いている. ちなみに, 実験時には, この状態での温度センサで予め温度と検出回路の出力電圧の関係を実測した値を基に温度を求めた.

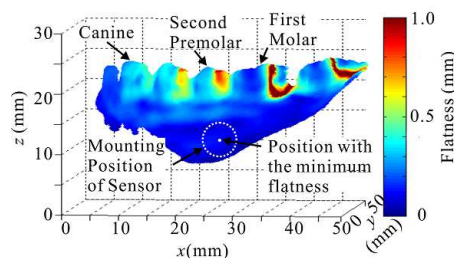
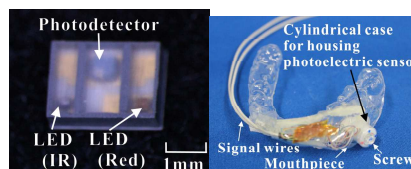


図 1 歯茎形状における平坦度の計算結果



(a) 光電センサ (b) 実験ジグ

図 2 光電センサと実験に用いた実験ジグ

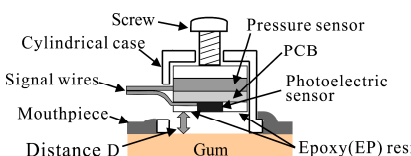


図 3 光電センサを収めた円筒ケースの断面図

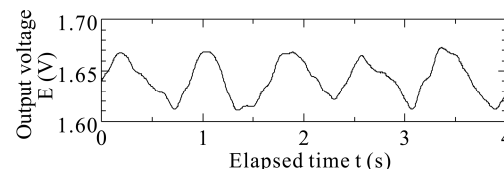


図 4 光電センサの出力電圧波形 ($D=0.4\text{mm}$).

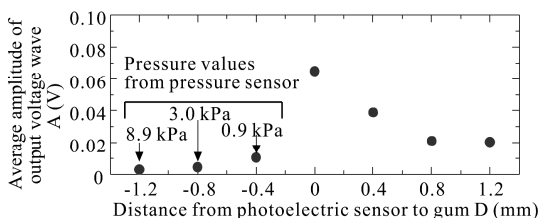


図 5 平均出力電圧と光電センサと歯茎との距離との関係.

舌入力インタフェース用加速度センサについては、舌でセンサ (ANALOG DEVICES 製 ADXL335) を押すとセンサが動いて上の歯に接触するように配置した (図 6 (c) 参照). 具体的には、この加速度センサをプリント基板 (10mm^l×10mm^w×1mm^t) に実装配線し、これを防水のため EP 樹脂で充填して四角形のチップ状 (15mm^l×15mm^w×4mm^t) にした. そして、信号線の部分をマウスピースに取り付けて固定することで、図 7 に示すようにチップ部分を信号線を起点に z 軸方向に可動するようにした.

このように各種センサを組込んだダイビング用マウスピースを被験者に装着させ、模擬海水中 (導電率 5.3S/m, 水温 23℃) を入れた水槽に顔をつけた状態で、30 秒間安静時の脈波計測、呼吸計測、体温計測を行った. また、加速度センサを舌で押す動作を意思伝達のインタフェースとする舌入力検出実験も行った. ここでは、このマウスピースはスキューバダイビングのレギュレーター (ポンベの空気圧を調節のために使用される器具) ではなく、スノーケル (キヌガワ製、GS3173) に取り付けた. このとき、気温 19℃、被験者の体温は 35.9℃であった. 本実験では、光電センサ、2つの温度センサ、加速度センサの出力を、検出回路を介して同時にオシロスコープ (Tektronix 製 MS02024) で記録した. そして、光電センサの出力電圧信号については、通常の脈波信号の周波数を考慮してカットオフ周波数 10Hz のローパスフィルタ処理、呼吸計測に用いた温度センサの出力信号については、通常の呼吸数からカットオフ周波数 10Hz のローパスフィルタ、体温計測に用いた温度センサの出力信号についてもカットオフ周波数 10Hz のローパスフィルタ処理を行った. また、加速度センサの出力信号については、商用周波数の 60Hz をカットするためのノッチフィルタ処理を行った.

4. 研究成果

安静時の各センサの計測結果を図 8 に示す. また、加速度センサによる舌入力検出実験結果を図 9 に示す. これらの結果から、以下のことがわかった.

(1) 脈波計測のための光電センサについては、被験者歯茎に対して最もフラットに接触する位置に歯茎からの距離 0~0.4mm の位置に正確な設置が必要であることがわかった. そして、この位置に設置できるように光電センサを歯矯正用のマウスピースに固定し、これをダイビング用のマウスピースと併用することで、脈波が検出できる可能性があることがわかった.

(2) 呼吸検出のための温度センサについては、マウスピースの空気の出入口に設置すれば呼気と吸気による温度変動が捉えられていることがわかった.

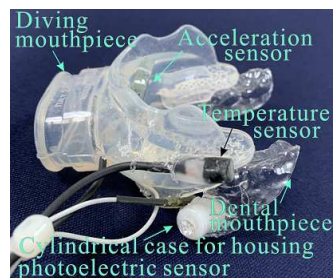
(3) 体温計測のための温度センサについては、左奥の頬の内部に接触させれば、水温よりも高い温度が観測されることがわかった. しかし、口腔内の状況 (水が入る等) によって体温相当の温度が表れるとは限らず、設置方法についてはさらに検討する必要があることがわかった.

(4) 舌入力インタフェースとしての加速度センサについては、加速度センサ部が歯と舌の間に入るように、マウスピースに半固定した. そして、加速度センサを舌で押すと、数百 sec 間に急峻な加速度の変動がみられ、本センサがダイビング中の意思伝達のための舌入力インタフェースとして利用できる可能性があることがわかった.

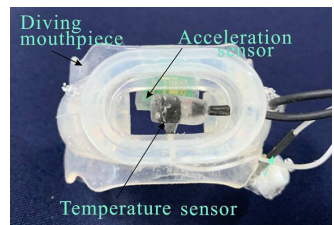
(1) の光電センサによる歯茎での脈波計測については、センサの取り付け位置の精度が検出の可否を決定するため、ダイビング中の脈波計測の困難さが伺えた. そこで、我々はこのことを鑑み、顔面での光電センサによる脈波計測[11]および、海水を電極として利用することによる独自の生体電気計測に基づいた心電図計測. 筋電図についても検討した[12-14]. さらに、この生体電気計測方法が従来の生体電気計測方法よりも生体に装着する電極数を半減でき、生体への負荷を小さくできることから、魚を対象とした生体電気計測についても検討した[15].

参考文献

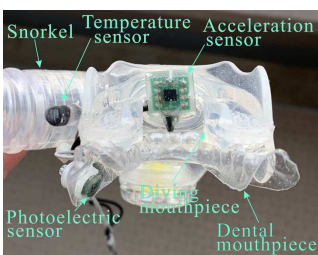
- [1] M. Schrib, R. W. Weeks: "A low cost portable physiological data acquisition system for use on deep sea divers", Biomedical Science Instrumentation, Vol.13, pp.1-7, (1977).
- [2] D. G. Forgays: "Behavioral and Physiological Responses of Stayers and Quitters in Underwater Isolation", Aviation, Space, and Environmental Medicine, Vol.60, No.10, pp.937-942, (1989).



(a) 左側面からの外観



(b) 開口部からの外観



(c) 口腔側からの外観

図 6 各種センサを組込んだダイビング用マウスピースの外観

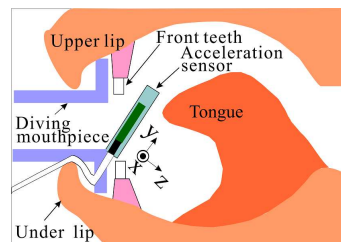
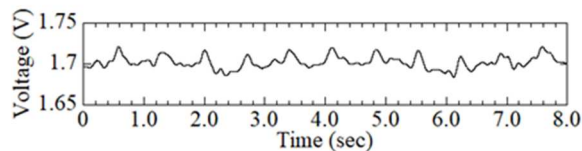
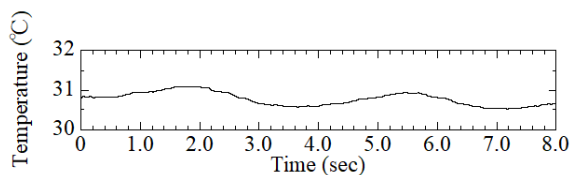


図 7 加速度センサを用いた舌入力インタフェース

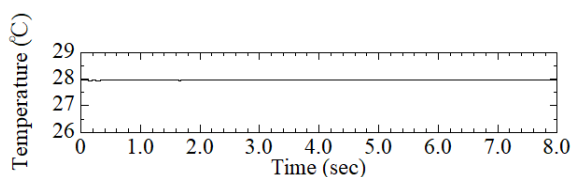
- [3] 海洋科学技術センター: “潜水作業技術の研究開発成果報告書Ⅱ 昭和 53 年度”, 潜水作業技術の研究開発 昭和 53 年度成果報告書 2/2, (1980).
- [4] 富沢儀一, 西功, 立田ルミ, 橋本昭夫, 小此木国明: “環境制御下における呼吸循環. 代謝測定のためのデータバンク. 解析システム”, 医療情報学, Vol.9, No.4, pp383-395, (1989).
- [5] 才木常正, 瀧澤由佳子, 橋詰 努, 樋口行平, 藤田孝之, 前中一介: “口腔内加速度センサを用いた発声検出”, 電気学会論文誌 C, Vol.131, No.4, pp.826-832, (2011).
- [6] 瀧澤由佳子, 樋口行平, 前中一介, 才木常正: “歯装着型加速度センサを用いた音声認識の提案”, 電学論 C, Vol.132, No.7, pp.1206-1207, (2011).
- [7] 中谷真太郎, 荒木望, 小西康夫, 前中一介, 板垣博文, 瀧澤由佳子, 才木常正: “筋電位を用いた口腔内摂食センサ”, 電気学会論文誌 C, Vol.134, No.11, pp.1678-1683, (2014).
- [8] 荒木 望, 中谷真太郎, 小西康夫, 前中一介, 板垣博文, 瀧澤由佳子, 才木常正: “口腔内温度変化による飲食動作検出”, 電気学会論文誌 C, Vol. 135, No.4, pp.462-463, (2015).
- [9] 瀧澤由佳子, 板垣賢治, 兼吉高宏, 村井康二, 有馬正和, 才木常正: “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).
- [10] 瀧澤由佳子, 村井 康二, 有馬 正和, 才木 常正: “ダイバー安全監視を想定した口腔内における脈拍計測位置の検討”, 日本人間工学会関東支部大会, (2018)
- [11] 瀧澤由佳子, ダイバーの安全監視のための顔における脈波計測の検討, 日本人間工学会東海支部 2019 年研究大会, (2019)
- [12] 才木 常正, 瀧澤由佳子, 村井 康二, 有馬 正和: “ダイビング用の水中筋電位センサ”, 電気学会論文誌 C, Vol.139, No.6, pp.719-724, (2019)
- [13] 才木 常正, 瀧澤由佳子, 村井 康二, 福造 博, 有馬 正和: “海水中での心電図計測”, 電気学会論文誌 C, Vol.139, No.6, pp.757-758, (2019)
- [14] 才木常正, 瀧澤由佳子, 有馬正和: “水中生体計測装置, 生体電極および生体計測方法”, 特願 2018-234616
- [15] 才木常正, 瀧澤由佳子, 有馬正和: “海洋生物の生理計測装置および生理計測方法”, 特願 2020-020618



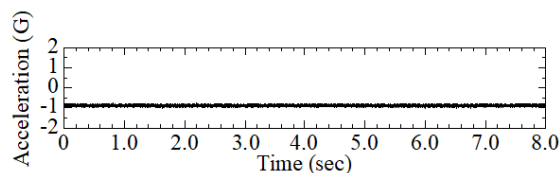
(a) 光電センサによる出力電圧結果



(b) 温度センサによる温度計測結果



(c) 温度センサによる体温計測結果



(d) 加速度センサによる加速度計測結果 (z 軸)

図 8 安静時におけるダイビング用マウスピースに組み込んだ各種センサの出力波形

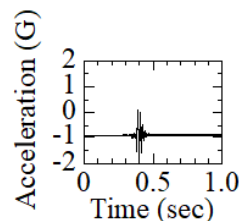


図 9 加速度センサによる舌入力検出実験結果 (z 軸)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 瀧澤由佳子、板垣賢治、兼吉高宏、村井康二、有馬正和、才木常正	4. 巻 138
2. 論文標題 歯茎での反射型光電センサを用いた脈波測定	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電気学会論文誌E	6. 最初と最後の頁 545-546
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejsmas.138.545	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 才木 常正、瀧澤由佳子、村井 康二、有馬 正和	4. 巻 139
2. 論文標題 ダイビング用の水中筋電位センサ	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気学会論文誌C	6. 最初と最後の頁 719-724
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejjeiss.139.719	査読の有無 無
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 才木 常正、瀧澤由佳子、村井 康二、福造 博、有馬 正和	4. 巻 139
2. 論文標題 海水中での心電図計測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気学会論文誌C	6. 最初と最後の頁 757-758
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejjeiss.139.719	査読の有無 無
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 -

〔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、村井康二、有馬正和、才木常正
2. 発表標題 ダイバー安全監視を想定した口腔内における脈拍計測位置の検討
3. 学会等名 2018年度一般社団法人日本人間工学会関東支部第48回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瀧澤由佳子、才木常正、有馬正和、村井康二、荒木望、前中一介
2. 発表標題 口腔内総合センシング技術による潜水者の安全確保
3. 学会等名 日本人間工学会第58回大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 瀧澤由佳子
2. 発表標題 ダイバーの安全監視のための顔における脈波計測の検討
3. 学会等名 日本人間工学会東海支部2019 年研究大会
4. 発表年 2019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システム設計
3. 学会等名 日本人間工学会関西支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 才木常正、瀧澤由佳子、村井康二、有馬正和
2. 発表標題 海水環境における新規の筋電図計測法
3. 学会等名 日本人間工学会関西支部大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2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、瀧澤由佳子	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-234616	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 海洋生物の生理計測装置および生理計測方法	発明者 有馬正和、才木常正、瀧澤由佳子	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-020618	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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 Tunemasa) (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 協 力 者	有馬 正和 (Arima Masakazu) (70264801)	大阪府立大学・教授 (24403)	