

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号：37112

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24680063

研究課題名(和文)熱中症対策・健康管理を目指した生体情報スマートイヤーマニターの先駆的開発研究

研究課題名(英文)Developments of human support ear monitoring system for daily life and heat illness

研究代表者

山越 健弘 (Yamakoshi, Takehiro)

福岡工業大学・情報工学部・准教授

研究者番号：70444205

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円

研究成果の概要(和文)：本課題は、近年大きな社会問題となっている熱中症や日常活動中の健康管理等に焦点を当て、深部体温(鼓膜温)・心拍などを「耳介密閉型耳栓」から取得し、スマートフォンと連携させて「熱中症対策や自己健康管理」に利用でき、イヤホンとしても共用可能な「スマートイヤーマニター」の開発を目標とした研究である。研究期間では、熱中症発症による事故が深刻な問題となっている条件下においてそれを検知・警告できるような新たな深部体温計測システムを考案・開発・検証、心機能情報を計測するための外耳道における適切な計測部位の検討、体動の検討、およびiPhone用アプリ(iPhysioMeter)の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：The final goal of this study was to develop a smart ear monitor for detecting heat illness and/or stress in daily life. In order to accomplish this study, First, we have developed a new methodology for detecting heat illness based on continuous tympanic thermometry in serious hot condition. Second, we have searched for the appropriate part of ear-canal to obtain cardiac beating and normalized pulse volume as a indicator of sympathetic nerve activity. Third, we have developed a new smartphone application named "iPhysioMeter: <http://iphysiometer.com/app/>", which can measure and easily monitor the physiological variables. These results can yield to the smart ear monitor in the near future.

研究分野：生体情報計測

キーワード：生体情報計測 生体情報解析 健康・福祉工学 スマートセンサ情報システム 電子デバイス・機器

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化も一因とされる世界規模の異常気象が年々深刻化してきている。特に、夏季期間中の異常高温気象は「熱中症」という新たな社会問題を引き起こしている。平成 23 年 10 月の総務省消防庁の報道資料によれば、平成 23 年 6 月～9 月に熱中症傷病者として救急搬送された人は 46,505 人(死亡・重傷: 2.6%, 中症: 32.8%)と、年々増加してきており、早急な対策が叫ばれている。また、この熱波による熱中症傷病患者は、日本のみならず、世界規模レベルで増加してきている (<http://www.emdat.be/>)。

一方、このような社会情勢の中、スポーツセンターでの運動訓練中やレクリエーションでの運動中などで熱中症により倒れる人は日常活動時よりも遥かに多く、特に自動車競技中の熱中症傷病は深刻な問題となっている(高橋規一, *自動車技術*, **63**(10), 90-95, 2009)。そこで申請者は、まず、この自動車競技中における各種生体情報反応を精査し(T. Yamakoshi *et al.*, *Eur J Sport Sci*, Vol.10, No.6, 397-406, 2010)、特に深部体温計測の重要性を主張してきた(山越健弘ら, *生体医工学*, Vol.48, No.3, 269-280, 2010)。

以上のように、申請者は熱中症対策と自己体調管理の問題に対して技術的解決策を提案し、深部体温指標としての“鼓膜温”を「連続的にモニタリング」+「無線交信(会話双方向通信)」,そして「リアルタイム警報表示(非常事態通信)」可能な新たなプロトタイプを開発してきた(山越健弘ら, *生体医工学*, Vol.48, No.5, 494-504, 2010)。そして、実際の自動車競技現場でも装置の有用性を検証し、本研究支援を受けてレース本番でも使用可能なシステムを開発することに注力してきた。この様な極めて過酷な環境下で、プロレーサーの集中力やレースマネージメントを損なうこと無く、スマートに鼓膜温をモニターできる技術を開発してきたことは、本研究課題の大きな基盤技術となった。

本研究は、これを一般スポーツ中、さらに日常活動中にも適用できる先駆的かつ実用的な「スマートイヤーマニター」の技術開発を行うことを目指した学術的にも類例のない先導的研究である。これが具現化できれば、例えば“心拍数による運動強度”や“心拍ゆらぎ解析による自律神経活動”をトレーニーやトレーナーに対してその場で、実時間で提供することができ、スポーツ科学などの研究分野にも有用と考えられる。

2. 研究の目的

本課題は、最近大きな社会問題となっている熱中症や日常活動中の体調管理等に焦点を当て、深部体温(鼓膜温に着目)・心拍(耳部光電容積脈波に着目)・呼吸を「内耳:外耳道密閉型耳栓(イヤープース)」から、さ

らに活動情報を携帯型記録機器に内蔵の加速度センサから取得し、「熱中症対策や自己健康管理」に利用でき、イヤホンとしても共用可能な「スマートイヤーマニター」の開発を目指した先駆的開発研究である。その具現化には以下に示す解決すべき数々の学術的・技術的課題が含まれる。本研究を通してこのような装置が実現されれば、スポーツ科学をはじめ、基礎・臨床研究分野、さらに超高齢社会を見据えた新たな自己健康管理法としても応用可能と考えられる。

- (1) イヤープース式鼓膜温計測の妥当性検討。
- (2) 本法による鼓膜温計測の適用範囲の学術検証。例えば、運動中、特殊温熱環境条件にて。
- (3) イヤープース内に体温センサ・脈波センサ・スピーカーを埋め込む方法の技術的検討。
- (4) スマートフォンなど小型端末デバイス機器と連携させる方法の検討、スマートフォンで生体情報を表示させる方法。

3. 研究の方法

被験者試験に関しては、金沢大学医学部倫理委員会の承認を得た後、十分な実験主旨説明を受け、所定の同意書にサインした健常者を対象とした。

- (1) 新たな鼓膜温計測法の精度評価試験の方法: 深部体温の絶対基準値(本試験では接触式鼓膜温と飲み込み式胃腸温度とした)と深部体温計測装置(非接触赤外放射式鼓膜温)から得られた値の対比試験を、健常成人男性(21.8 ± 1.0 歳)を対象に行った。体温管理は、鼓膜温で平熱(約 36.5)から 39 程度までの上昇(鼓膜温を上げる系)と 36 程度までの下降(鼓膜温を下げる系)を 1 ルーティンとする入浴による湯温制御で行った。但し、本評価法は非定常状態(ステップ応答ではない)での対比試験となる。
- (2) 実高温熱環境での方法: 本システムが、熱中症が問題となっている実際の環境で有効に働くか、2 名の健常成人男性(プロレーサー)に対して検討した。なお、本非接触式鼓膜温に加えて被験者を取り巻く温熱環境(コース内気温湿度、ピット内温湿度、車内温湿度、レーシングスーツ内温湿度も取得した)。
- (3) 各種センサをイヤープースに組み込む方法: 現時点で入手可能な φ5 のサーモパイル(非接触赤外放射式)センサと共に埋め込む LED(light emitting diode)と PD(photo diode)の耳介・外耳道の適切な配置を実験的に検討した。
- (4) スマートフォンとの連携方法: まずはス

スマートフォン（本研究では iPhone を使用）単体，すなわち本体に備わっている CMOS カメラと LED フラッシュを利用して生体情報を取得させる方法を開発し，その精度評価を行った．

4. 研究成果

- (1) 新しい鼓膜温計測法の精度評価試験：胃腸温との相関係数は $\gamma = 0.932$ ($n = 1400$, $p < 0.001$)，*Bland-Altman* 分析では，両者の差の平均が $+0.27$ と，絶対誤差が小さい値で推移した．胃腸温の方が若干高く測定される傾向であったが，バラツキは 0.58 と小さかった．比例誤差もなかった．一方，直接鼓膜温との相関係数は $\gamma = 0.985$ ($n = 1400$, $p < 0.001$)，*Bland-Altman* 分析では両者の差の平均が $+0.01$ であり，バラツキは 0.27 であり，実用に供する精度あることが判った (T. Yamakoshi *et al.*, *Aviat Space Environ Med*, Vol.84, No.7, 692-700, 2013：雑誌論文欄；J. Lee *et al.*, In: *Proc of the IFMBE - World Cong Med Phys Biomed*, Vol.39, 1724-1727, 2013：学会発表欄)．
- (2) 実高温熱環境での結果：深部体温計測システムをレース本番での使用に耐えるよう，トライ・アンド・エラーを繰り返して，特に生体とのインターフェースとなるイヤープースは，耳の型取りから始め，装着者の違和感なく成形してセンサの埋め込みに成功した (図 1)．深部体温の異常は車のフロントガラス右上の赤色 LED で配信，その異常を本人はもちろん，走行映像やグランドスタンドから肉眼でも確認できた (T. Yamakoshi *et al.*, *Aviat Space Environ Med*, Vol.84, No.7, 692-700, 2013：雑誌論文欄)．
- (3) 各種センサをイヤープースに組み込む方法：深部体温計測のための赤外放射型のセンサ (サーモパイルセンサ) は図 1 の

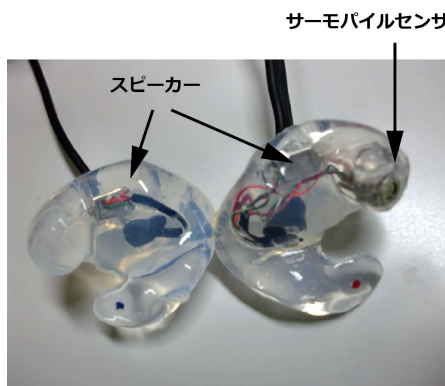


図 1 シリコン素材による耳介密閉型のイヤープース

ようであるが，光電容積脈波センサの配置は想定外に難航した．しかし，数々の予備実験を通し，その耳部位置と光の波長が重要であることが判明し，耳介・外耳道の適切部位が外耳道下面であることがわかった (J. Lee *et al.*, *Physiol Meas*, Vol.34, No.3, 359-375, 2013：雑誌論文欄)．また入射光は，近赤外光よりも可視光である緑波長 (530 nm 付近) が体動に強いこともわかった (K. Matsumura *et al.*, *Plos One*, Vol.9, No.3, e91205, 2014 雑誌論文欄；J. Lee *et al.*, In: *Proc of the 35th Ann Int Conf of IEEE Eng Med Biol Soc*, Vol.2013, 1724-1727, 2013：学会発表欄)．

- (4) スマートフォンとの連携：まず耳からの深部体温や心拍数などの生体情報を得るためのソフト側の「プラットフォーム」を構築することから始めた．すなわち指先から iPhone 内臓の CMOS カメラと LED フラッシュを利用して光電容積脈波を取得可能なアプリケーション (*iPhysioMeter*：図 2) を開発し，その精度評価を行った (K. Matsumura & Yamakoshi, *Behav Res Methods*, Vol.45, No.4, 1272-1278, 2013：雑誌論文欄)．CMOS をセンサとして利用するため，ここから得られる RGB 情報も精査し，上述と同じように緑波長が実用的であることを示した (K. Matsumura *et al.*, *Plos One*, Vol.9, No.3, e91205, 2014：雑誌論文欄；K. Matsumura *et al.*, *Methods Mol Biol: Mob Health Technol*, Springer New York, Vol.1256, 305-326, 2015：図書欄)．

以上，本研究課題から得られた成果・学術的知見を基盤として，これからも目標



図 2 開発したアプリ (*iPhysioMeter*)

とするスマートイヤーマニターを継続的に研究開発していく予定である。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

Kenta Matsumura, Peter Rolfe, Jihyoung Lee, Takehiro Yamakoshi, iPhone 4s Photoplethysmography: Which light color yields the most accurate heart rate and normalized pulse volume using the iPhysioMeter application in the presence of motion artifact?, PLOS ONE, Peer-reviewed, Vol.9, No.3, 2014, e91205
DOI:10.1371/journal.pone.0091205

松村健太、吉本健史、山越健弘、小川充洋、山越憲一、携帯型胸部電気的アドミタンス心拍出量・心電図計測装置の開発とその妥当性評価、電気学会論文誌 C(電子・情報・システム部門誌)、査読有、134巻、1号、2014、41-48
DOI:10.1541/ieejieiss.134.41

Takehiro Yamakoshi, Kenta Matsumura, Peter Rolfe, Shota Hanaki, Akira Ikarashi, Jihyoung Lee, Ken-ichi Yamakoshi, Potential for health screening using long-term cardiovascular parameters measured by finger volume-oscillometry: Pilot comparative evaluation in regular and sleep-deprived activities, IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, Peer-reviewed, Vol.18, No.1, 2014, 28-35
DOI:10.1109/JBHI.2013.2274460

Takehiro Yamakoshi, Kenta Matsumura, Peter Rolfe, Naoto Tanaka, Yasuhiro Yamakoshi, Kiichi Takahashi, A novel method to detect heat illness under severe conditions by monitoring tympanic temperature, Aviation, Space, and Environmental Medicine, Peer-reviewed, Vol.84, No.7, 2013, 692-700
DOI:10.3357/ASEM.3542.2013

Jihyoung Lee, Kenta Matsumura, Takehiro Yamakoshi, Peter Rolfe, Naoto Tanaka, Kyongho Kim, Ken-ichi Yamakoshi, Validation of normalized pulse volume in the outer ear as a simple measure of sympathetic activity using warm and cold pressor tests: Towards applications in ambulatory

monitoring, Physiological Measurement, Peer-reviewed, Vol.34, No.3, 2013, 359-375
DOI:10.1088/0967-3334/34/3/359

Kenta Matsumura, Takehiro Yamakoshi, iPhysioMeter: A new approach for measuring heart rate and normalized pulse volume using only a smartphone, Behavior Research Methods, Peer-reviewed, Vol.45, No.4, 2013, 1272-1278
DOI:10.3758/s13428-012-0312-z

[学会発表](計9件)

山越康弘、松村健太、山越健弘、ピーター・ロルフ、田中直登、李知炯、山越憲一、非侵襲血中成分計測を目指した積分球型高感度光電容積脈波検出法の検討、第54回日本生体医工学会大会(愛知県・名古屋市)、53巻、1号、2015年5月、228

清原大樹、松村健太、山越健弘、田中直登、李知炯、ピーター・ロルフ、清水孝一、山越憲一、非侵襲血中成分計測を目指した積分球型高感度光電容積脈波検出法の検討、第54回日本生体医工学会大会(宮城県・仙台市)、52巻、1号、2015年5月、03-23-1

Kenta Matsumura, Peter Rolfe, Jihyoung Lee, Takehiro Yamakoshi, Evaluation of the accuracy of the iPhysioMeter app for measuring heart rate and normalized pulse volume using only a smartphone, In: Short Papers of the 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (Osaka; Japan), July 2013, No.3149

Jihyoung Lee, Kenta Matsumura, Ken-ichi Yamakoshi, Peter Rolfe, Shinobu Tanaka, Takehiro Yamakoshi, Comparison between red, green and blue light reflection photoplethysmography for heart rate monitoring during motion, In: Proceedings of the 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (Osaka; Japan), Vol.2013, July 2013, CD-ROM 1724-1727
DOI:10.1109/EMBC.2013.6609852

松村健太、山越健弘、iPhysioMeter: スマートフォン本体のみを用いた心拍・基準化容積脈波の測定、第31回日本生理心理学会大会(福井県・福井市)、2013年

5月

Jihyoung Lee, Kenta Matsumura, Ken-ichi Yamakoshi, Peter Rolfe, Naoto Tanaka, Yasuhiro Yamakoshi, Kiichi Takahashi, Kyongho Kim, Hajime Hirose, Takehiro Yamakoshi, Development of a novel tympanic temperature monitoring system for GT car racing athletes, In: Proceedings of the IFMBE - World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering (Beijing; China), Vol.39, May 2012, CD-ROM 2062-2065 DOI:10.1007/978-3-642-29305-4_541

Takehiro Yamakoshi, Kenta Matsumura, Shota Hanaki, Akira Ikarashi, Peter Rolfe, Jihyoung Lee, Yasuhiro Yamakoshi, Hajime Hirose, Kyongho Kim, Ken-ichi Yamakoshi, Development of an in-car health screening system based on the simultaneous measurement of cardiovascular variables, In: Abstracts of the IFMBE - World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering (Beijing; China), Vol.39, May 2012, TH.17/04.3P-03

Mitsuhiro Ogawa, Takehiro Yamakoshi, Kosuke Motoi, Kenta Matsumura, Shinobu Tanaka, Ken-ichi Yamakoshi, Non-invasive continuous blood pressure measurement with using partial pressurization cuff and automatic servo gain tuning technique, In: Abstracts of the IFMBE - World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering (Beijing; China), Vol.39, May 2012, TH.17/01.5P-13

李知炯、松村健太、山越憲一、ピーター・ロルフ、田中直登、金敬昊、山越健弘、寒冷・温水昇圧課題を用いた外耳道における基準化容積脈波の妥当性検証、第51回日本生体医工学会大会(福岡県・福岡市) 50巻、1号、2012年5月、P1-03-3

〔図書〕(計1件)

Kenta Matsumura, Peter Rolfe, Takehiro Yamakoshi, iPhysioMeter: A smartphone photoplethysmograph for measuring various physiological indices, Springer New York, Methods in Molecular Biology: Mobile Health Technologies, Peer-reviewed, Vol.1256, 2015, 305-326 DOI:10.1007/978-1-4939-2172-0_21

〔その他〕
ホームページ等
<http://iphysiometer.com/app/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

山越 健弘 (YAMAKOSHI, Takehiro)
福岡工業大学・情報工学部情報システム工
学科・准教授
研究者番号：70444205

(2)研究協力者

松村 健太 (MATSUMURA, Kenta)
李 知炯 (LEE, Jihyoung)
田中 直登 (TANAKA, Naoto)
清原 大樹 (KIYOHARA, Daiki)
柿本 眞徳 (KAKIMOTO, Masanori)