

平成29年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「発汗計を搭載した世界初のウェアラブル型熱中症予兆チェッカーの
開発」

研究開発成果等報告書

平成30年3月

担当局	中部経済産業局
補助事業者	公益財団法人富山県新世紀産業機構
間接補助事業者	ライフケア技研株式会社 関電プラント株式会社 国立大学法人富山大学

目 次

第1章 研究開発の概要

1－1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1－2 研究体制

(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

1－3 成果概要

1－4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

2－1 補助事業の具体的研究内容

2－2 研究成果等

最終章 全体総括

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究開発の背景

近年、地球温暖化の影響等により、異常高温の発生頻度が多くなり、これに伴って作業中に熱中症を発症して医療機関に搬送される事例が急増している。その発生件数は平成25年6月から9月の夏季4ヵ月間に医療機関を受診し熱中症関連の診断を受けた症例は407,948人であり、入院数35,571人、死者数は550人にのぼり、更に年々増加する傾向を示しており、平成26年度には6万件を超える救急搬送が報告されている。現在、建設業などで行われている熱中症対策の現状はWBGT値（黒球温度・気温・湿度）による環境測定と作業前や休憩時の体温測定や自己申告等を行っているが、作業員個々の発汗量などの生体計測等の個別の予防対策は行われていないのが現状である。

熱中症発生のメカニズムは、①筋運動による発熱や②体内代謝による発熱により、体温が上昇する。③体温がさらに上昇すると皮膚血管が拡張して皮膚への血流循環量を増やし、皮膚からの放熱により体温の上昇を抑制する。④さらに体温が上昇すると皮膚の汗腺が作動し、汗の蒸散による気化熱によって体温の上昇を抑制する。⑤さらに体温が上昇すると皮膚の血液循環量を増やすために心拍数が増加する。この時、同時に脳や腎臓などの主要臓器や筋肉への血液供給を確保する必要があるため、皮膚への血液循環量増加には限界があり、運動を継続する場合には主要臓器への循環血液量確保を生体メカニズムとして優先され、発汗による体温調節機能も失われると、一気に体温が上昇し熱中症に至る。

生体内において水分は血液中にあっては身体の各部への栄養素を運び、老廃物を集めて尿として体外に排出する。血液として体内を循環する時、全身の体温を一定に保ち、暑い場合には血液中の水分が汗として発散することによって気化熱で身体を冷却して恒温化させる重要な働きがある。

また、スポーツ業界でも、熱中症だけでなく身体の各部位の発汗量が運動機能の継続と重要な関わりがあり、発汗量の連続的な測定が出来る機器の開発には強い要望がある。（株式会社ゴールドウィンテクニカルセンター等のニーズ）

ライフケア技研株式会社では平成 22 年に発汗チェッカー（特許 5281848 号、看護研究誌「前腕の皮膚水分喪失量簡易計測パッチによる全身発汗量の推定」）を開発し販売を開始した。この製品は前腕に貼付し、貼付部位の局所発汗量をパッチ内部の吸着材にクロマトグラフの原理で吸着・浸透させる。この時、吸着材に塗布した発色剤を溶かしながら吸着量に比例して発色することによって発汗量を目視することができる。本特許は平成 27 年 11 月、富山県発明とくふう展において文部科学大臣賞を受賞した。

一方、関電プラント株式会社では関西電力の発電所の作業員の熱中症が多発し、防止対策を研究しており、平成 24 年夏からライフケア技研株式会社の発汗チェッカーを購入し、作業員に使用して熱中症予兆のチェックに使用していた。ライフケア技研株式会社では、平成 25 年末にこのパッチを改良して熱中症予兆チェッカーとして一定発汗量で作業者に警報で知らせるウェアラブル機器として開発することを関電プラント株式会社から相談を受け、平成 26 年 1 月に共同研究契約を締結した。ライフケア技研株式会社では関電プラント株式会社からの要望もあり、熱中症が発汗・脈拍・深部体温の変化が重要な指標であることから、発汗センサの他に脈拍センサと皮膚温の 3 項目のセンサを搭載したウェアラブル機器の開発に取り組んだ。しかし皮膚温はサーミスター温度計を用いてバラック機を試作した結果、環境温度の影響が大きく、深部体温との間に相関性が認められなかったため、発汗センサと脈拍センサの搭載に絞って検討を進めた。ライフケア技研株式会社では発汗チェッカーに電極を設け、吸着材に吸着する汗の量と電圧や抵抗等の電気容量を調べることができる試作品を作成し、平成 26 年 7 月に特許「発汗監視装置及び発汗監視方法」（特開 2016-15996 号）を、更に平成 27 年 7 月に特許「発汗量測定用パッチと発汗量測定装置」（特願 2015-145102 号）を共同出願した。

この間、国立大学法人富山大学 工学部の中島教授がオムツの濡れを静電容量で測定する電子回路を研究していることが分かり、平成 26 年 12 月にライフケア技研株式会社と同大学は委託研究契約を締結し、ライフケア技研株式会社の研究員を派遣して電子回路についての指導を受け、発汗量を測定出来るバラック機を作成した。

平成 27 年 3 月の展示会 HOSPEX JAPAN（東京ビッグサイト）においてライフケア技研株式会社が出展し、試作品を展示していたところ、株式会社東芝のウェアラブル担当の研究者がブースを来訪し、同社でも類似の研究をしていることから秘密保持契約（NDA）を締結し、試作品をお互いに貸与してそれぞれ評価することとした。その結果、株式会社東芝の試作品は皮膚に直接電極を接触するため皮膚表面の微量の水分を測定する場合は高い精度で測定できるが、多量の発汗や連続的な測定は出来ないこと、一方ライフケア技研株式会で開発している試作機は吸着材を用いるため、大量発汗量と長時間の連続的な測定が可能であることを両社で確認した。この時のライフケア技研株式会社の試作機は静電容量の値を表示し、この値から発汗量を算出していたが、株式会社東芝からのアドバイスで「静電容量ではリード線や他のデバイスの影響を受けて変化するので、電極の傍で静電容量を周波数に変更する回路を設けた方が良い」とのアドバイスを受け、改良した実証試験用試作機（写真 1、図 1）を作成し、平成 27 年 9 月に国立大学法人富山大学医学部において 30 名の男女学生を被験者としてエアロバイクによる運動で発汗試験を行った結果、図 2 に示すとおり発汗量を連続的に測定できることを確認し、平成 28 年 3 月に介護研究誌に論文「前腕の電気式発汗量計測による全身発汗量の推定及び熱中症予兆の推定」を投稿した。

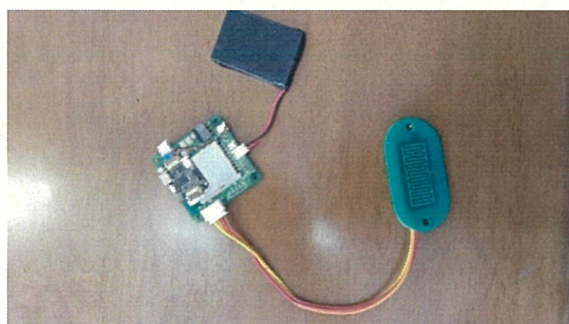


写真 1 電子回路、電極、バッテリー

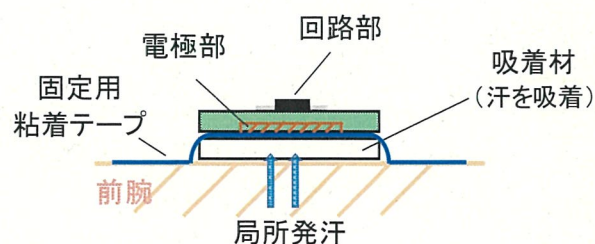


図 1 発汗計の構造

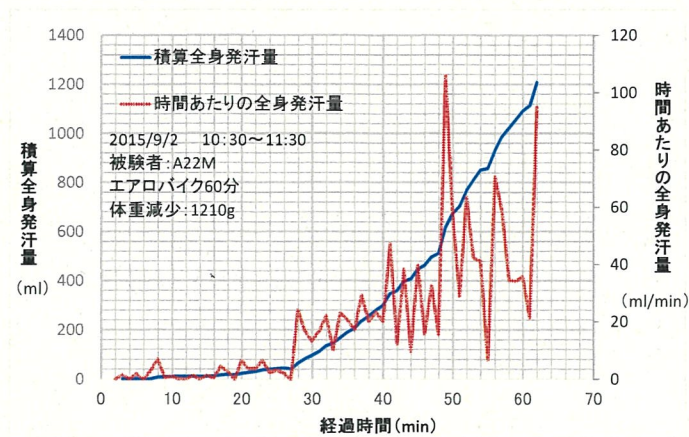


図2 実証試験機で測定した積算発汗量と時間あたり発汗量の時間変化

その後、ライフケア技研株式会社のバラック機で試作した脈拍センサは動作が不安定だったため、この改良についても株式会社東芝にアドバイスを求めたところ、同社が開発を進めている脈拍センサ搭載のリストバンドにライフケア技研株式会社の発汗センサを搭載することを提案され、現在両社は共同研究契約を締結して共同研究を行っている。

(2) 研究目的及び目標

本事業で開発するウェアラブル型熱中症予兆チェッカーは全身発汗量と脈拍の連続測定が出来、この生体情報から熱中症の予兆をチェックし、ブザーや液晶ディスプレイ (LCD) 表示によって注意喚起する機能があり、作業者が自身の生体情報をセルフチェックできる。また通信機能で管理監督者がタブレットやパソコンにより情報共有できる。将来的には IoT 化、クラウドサービスによって、より確実に熱中症の予防をすることを目標とする。

【研究テーマと目標値】

【1. ウェアラブル発汗計開発の課題への対応】

【1-1】発汗計と電極の設計・作成

発汗センサ部がセパレート型となる旧タイプにおいては、発汗計は 50mm×30mm 程度の大きさとし、それに見合った対電極および電子回路部を設計・作成することを目標とした。

本体裏側に発汗センサ部と脈拍センサ部を内蔵した新タイプでは、使い勝手や防水性を大

幅に改善するとともに、発汗センサ電極部のサイズは 35 mm×20 mm程度、吸着材シートのサイズは 45 mm×25 mm程度を目標とする。

【1-2】吸着材シートの設計・評価試験・試作機の設計・作成

旧タイプにおいては、吸着材シートのサイズの目標値は 80mm×50mm 程度を目標としたが、新タイプはセパレート型から一体型となるため、サイズの縮小化が求められたため、45 mm×25 mm程度を目標とした。また旧タイプ、新タイプともに、全身発汗量換算で 2,000ml 程度の発汗まで吸着可能であることを目標とした。また、吸着材シート製作用試作機に関しては、50～100 枚/時程度の製造能力を目標とした。

【2. 熱中症予兆チェッカーの開発】

【2-1】検量線の作成及び動作テスト、発汗量の測定精度の調査

フィールドテスト前に行う加水試験および発汗試験での動作テストにおける測定誤差は、本格的な検証を始める前段階なので±30%程度を目標とする。検量線の作成においても±30%程度の誤差までは許容範囲とする。

新タイプ（一体型）での動作テストおよび測定精度の調査は、旧タイプでの測定データを活用するため、前腕部と手首部の発汗量の相関を調べつつ、±20%程度の測定誤差を目標とする。

【2-2】熱中症予兆チェッカー試作機による予備試験（フィールドテスト・エアロバイク運動テスト）

ライフケア技研株式会社においてフィールドテスト用プロトコルの作成を行い、関電プラント株式会社で1つの作業チーム（作業員 5 名、監督者 1 名）で装着し、発電所内で実作業によるフィールドテストを実施する。また、国立大学法人富山大学では男女学生 20-30 名で温度と湿度を一定にした恒温室内でエアロバイク運動テストを実施する。測定誤差に関しては、【2-1】同様±20%程度を目標とする。

【2-3】アルゴリズムの作成

ISO では作業中の1分間の最高心拍数は $185 - 0.65 \times (\text{年齢})$ 、また持続心拍数は $180 - (\text{年齢})$ を超えてはならないとしている (ISO9886 : Ergonomics of the thermal environment :Evaluation of thermal strain by physiological measurements)。健康人の脈拍数は日常生活では 60~120 の範囲とされ、運動や作業によっては 160~180 程度に上昇するので、本事業ではフィールドテストの測定結果を精査し、ISO の基準を参考にしてアルゴリズムを作成する。発汗センサと脈拍センサの測定値から熱中症の予兆を調べるアルゴリズム式を作成するが、脈拍に関しては ISO の基準を参考にして作成することを目標とする。

【2-4】マーケティング調査

展示会の出展を 4 回実施する。幅広い分野の異業種展示会と、専門的なウェアラブル機器の展示会を計画する。各展示会の出展において、来場者との名刺交換数は 100 枚以上を目指す。また、開発中試作機の展示により改善点を集め、商品開発に反映する。

【3. 評価試験】

【3-1】発電所での長期間の使用試験、スポーツでの使用試験

発電所およびスポーツ施設での使用において、測定誤差 $\pm 10\%$ を目標とする。また、測定データを解析し、アルゴリズムの検証および改良を行い、熱中症予兆チェックシステムを構築する。

【3-2】測定データの解析及びアルゴリズムの検証

【3-1】で得られたデータを解析し、これまでより正確な検量線を作成し、アルゴリズムの検証を行う。検量線に関しては測定誤差 $\pm 10\%$ 程度を目標とする。

【3-3】開発品による熱中症予兆チェックシステムの構築

【3-2】で検証したアルゴリズムを元に熱中症予兆チェックシステムをデバイスに組み込む。さらに熱中症予兆チェッカーとして作業者のセルフチェックと管理監督者への情報の共有を想定しており、IoT システムとして環境情報のセンシング、さらにクラウドサービスまで組み込んだシステムの構築を目標とする。

（3）実施結果等

【1-1】発汗計と電極の設計・作成

発汗センサ部がセパレート型となる旧タイプにおいては、発汗計および電極の設計・作成を行い、基本的な動作を検討し、計測することができた。その後計画内容の変更に伴い、リストバンドの裏面に脈拍センサと発汗センサを内蔵させた“新タイプ”を、東芝と協力し開発し、試作機を作製した。同時に、電極の構造検討をしつつ再設計を行い、30 mm×20 mmの電極の作製を行った。（目標達成率 100%）

【1-2】吸着材シートの設計・評価試験・試作機の設計・作成

吸着材シートに関しては、構造の改善やサイズ等を検討し、最終的に 36 mm×25 mmで作製した。また、吸着材シート製作用試作機に関しては、前年度製作したものを一部改良し、現行の吸着材シートが作製できるようにし、製造能力は 600 枚/時となった。（目標達成率 100%）

【2-1】検量線の作成及び動作テスト、発汗量の測定精度の調査

セパレート型の旧タイプ試作機で、動作テストおよび測定精度の調査を行った。その後計画変更に伴い、一体型の新タイプでも動作テストおよび測定精度の調査を行った。（目標達成率 100%）

【2-2】熱中症予兆チェッカー試作機による予備試験（フィールドテスト・エアロバイク運動テスト）

関電プラントおよび富山大学にてフィールドテストおよびエアロバイク運動テストを行ったが、防水機能が不完全だったため、故障する機器が多発した。問題なく取得できたデータに関しては、測定誤差±20%程度だった。（目標達成率 100%）

【2-3】アルゴリズムの作成

平成 28 年度に富山大学とも協議して、おおまかなプログラムフローチャートを作成し、そのフローチャートに平成 29 年度の実証試験で取得した有用なデータから詳細な数値等を入力した。（目標達成率 100%）

【2-4】マーケティング調査

新価値創造展 2016（平成 28 年 10 月）、第 3 回ウェアラブル EXPO（平成 29 年 1 月）、第 3 回猛暑対策展（平成 29 年 7 月）、第 4 回ウェアラブル EXPO（平成 30 年 1 月）に出展し、来場者から試作機に関する様々な意見を聞いた。また、名刺交換数は新価値創造展では 90 枚だったが、第 3 回ウェアラブル EXPO では 400 枚以上、他 2 つの展示会ではそれぞれ 150 枚を超えた。（目標達成率 100%）

【3-1】発電所での長期間の使用試験、スポーツでの使用試験

平成 28 年度事業計画書では関電プラントおよびゴールドウインにて行う予定となっていたが、その他に大林組や中部電力、積水化学等の企業から試作機の貸出依頼があり、それらの企業で使用試験を行った。その使用試験から具体的な問題点を抽出した後、関電プラントのみで短期間の使用試験を行った。（目標達成率 80%）

【3-2】測定データの解析及びアルゴリズムの検証

【3-1】で得られたデータを解析し、これまでより正確な検量線を作成した。全データ

から導き出した検量線で $\pm 20\%$ ほどの誤差だったが、個人差を考慮し、個人ごとの検量線を作成すると、誤差は $\pm 10\%$ 程度となった。アルゴリズムの検証に関しては、今回の実験中にはアラートが鳴ることはなく、被験者が体調不良を訴えることもなかったため、熱中症のリスクが低い領域においては問題なく動作したといえるが、熱中症のリスクが高い領域でどうなるかは未確認で、その確認方法も含めて検討中である。（目標達成率 80%）

【3-3】開発品による熱中症予兆チェックシステムの構築

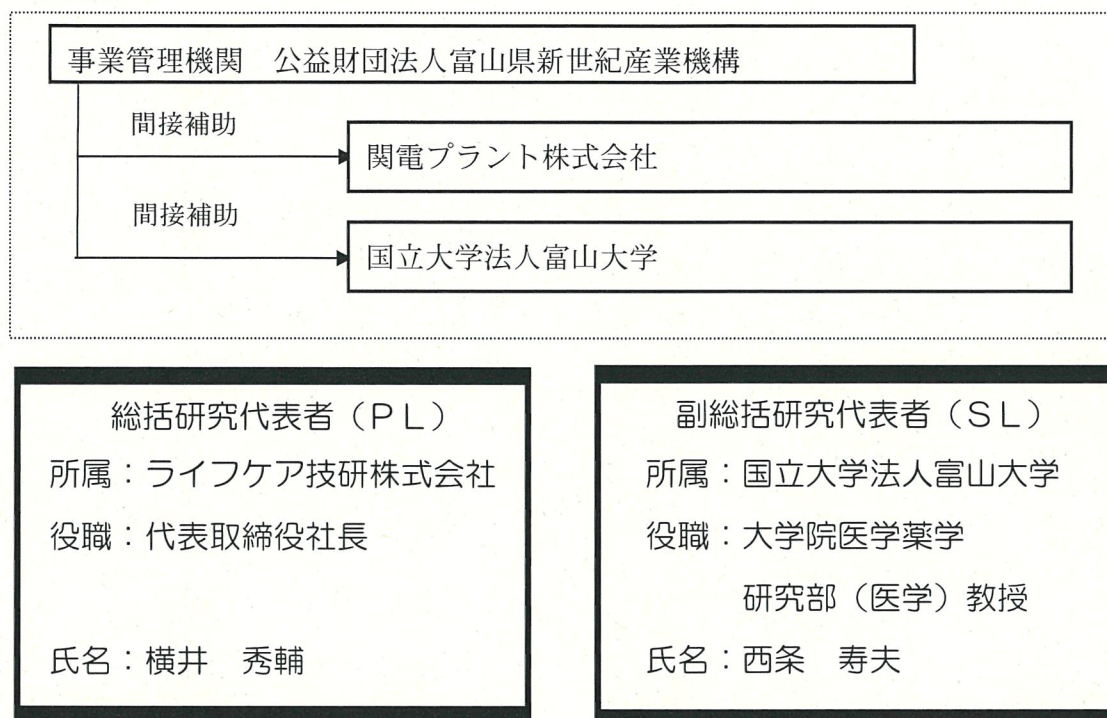
【3-2】で検証したアルゴリズムを元に熱中症予兆チェックシステムをデバイスに組み込んだ。さらに熱中症予兆チェッカーとして作業者のセルフチェックと監督者にも情報が共有できるようにシステム構築したが、管理者への情報共有、IoT システムとして環境情報のセンシング、クラウドサービスについては、ユーザーのニーズに合わせて対応することとした。（目標達成率 80%）

1-2 研究体制

(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

(1) 研究組織・管理体制

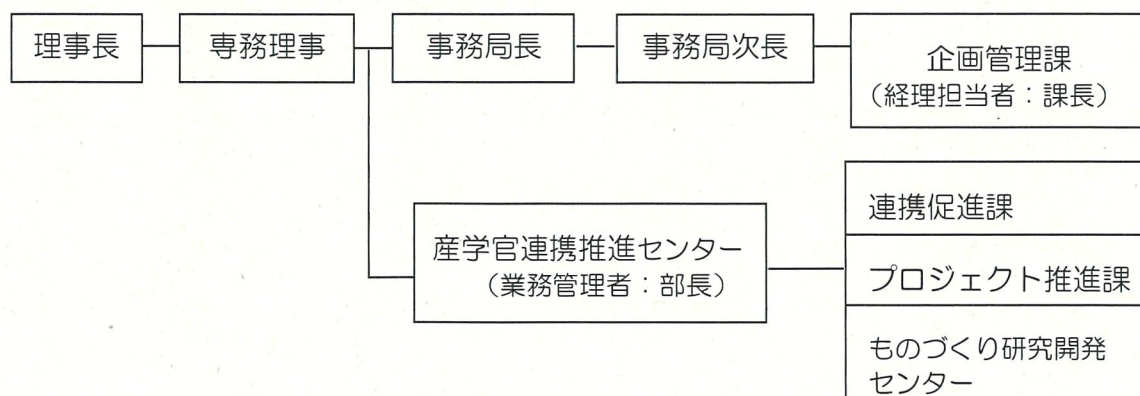
①研究組織



②管理体制

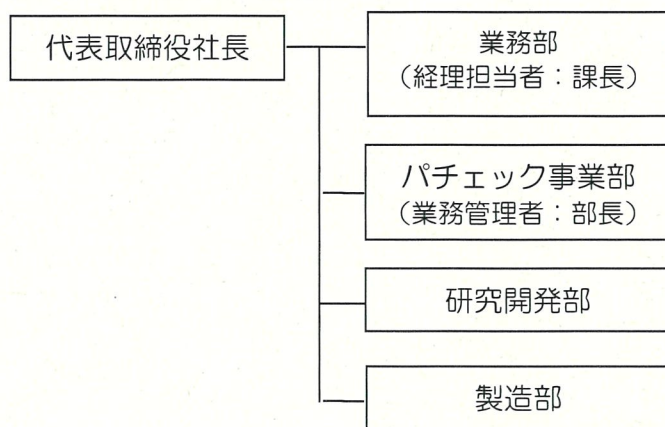
②-1 事業管理機関

・公益財団法人富山県新世紀産業機構

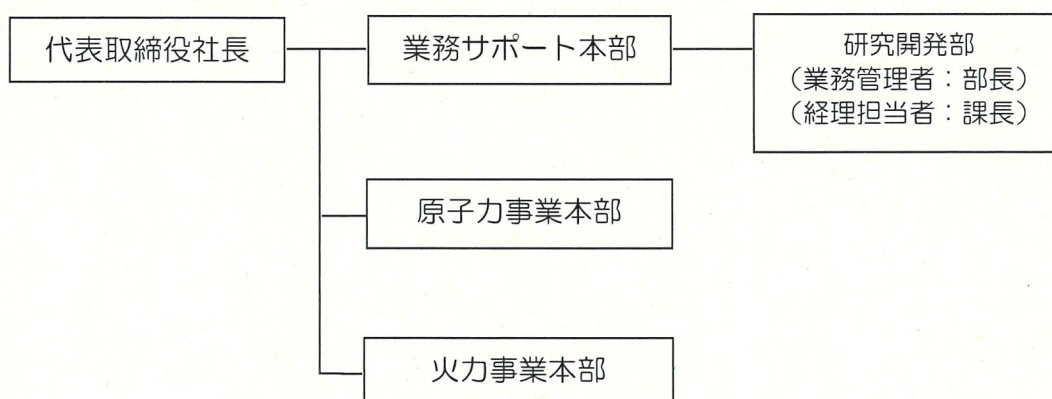


②—2 研究開発機関

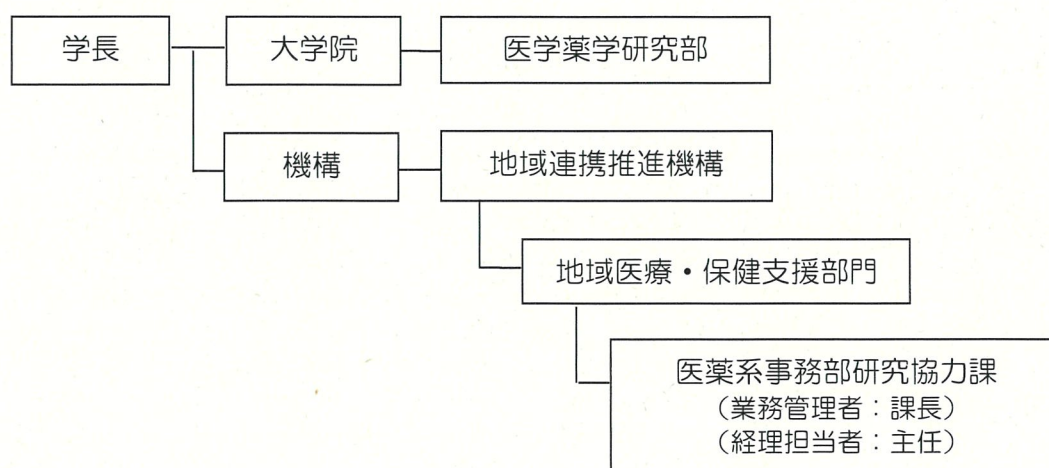
・ライフケア技研株式会社



・関電プラント株式会社



・国立大学法人富山大学



(2) 研究者氏名、協力者

【事業管理機関】

- ・公益財団法人富山県新世紀産業機構

管理員

氏 名	所属・役職
角崎 雅博	産学官連携推進センター 部長
土肥 義治	産学官連携推進センター 次長
駒城 真人	産学官連携推進センター プロジェクト推進課長補佐
市田 聡	産学官連携推進センター プロジェクト推進課 主任
片桐 寛之	産学官連携推進センター プロジェクト推進課 主事

【研究開発機関】

- ・ライフケア技研株式会社

研究員

氏 名	所属・役職
横井 秀輔	代表取締役 社長
広川 諭	取締役 パッケージ事業部 部長
濱出 絵理子	取締役 研究開発部 課長
日出嶋 宗一	研究開発部 係長
能村 幸太郎	研究開発部
城戸 良介	研究開発部

- ・関電プラント技研株式会社

研究員

氏 名	所属・役職
部谷 裕輔	業務サポート本部 研究開発部 部長
福井 雅司	業務サポート本部 研究開発部 担当課長
山本 宏之	業務サポート本部 研究開発部 担当課長

- ・国立大学法人富山大学

研究員

氏 名	所属・役職
西条 寿夫	医学薬学研究部（医学） 教授
西丸 広史	医学薬学研究部（医学） 准教授
高村 雄策	医学薬学研究部（医学） 助教
Ha Trong Dinh	医学薬学研究部（医学） 外国人客員研究員

- ・協力者（アドバイザー）

氏 名	所属・役職
中村 研二	株式会社ゴールドウィンテクニカルセンター 開発部 部長

1-3 成果概要

発汗計を搭載した世界初のウェアラブル型熱中症予兆チェッカーの試作機を用いて、実証試験および臨床試験を行い、それらを通して本機器の有用性を示すことができた。

しかしながら、防水性や装着性、本体の小型化等の課題が残っているため、それらをクリアし製品化を目指す。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

（1）事業管理者

法人名	公益財団法人富山県新世紀産業機構 （代表者 理事長 山崎 康至）
住所	〒930-0866 富山県富山市高田 529 番地
連絡担当者、所属役職名	角崎 雅博 産学官連携推進センター部長
TEL・FAX	TEL：(076)444-5691 FAX：(076)444-4207
e-mail	kado@tonio.or.jp

(2) 総括研究代表者 (PL)

氏名	横井 秀輔
組織名	ライフケア技研株式会社
所属役職名	代表取締役社長
TEL・FAX	TEL : (076)411-0201 FAX : (076)451-2610
e-mail	yokoi@lifecare-giken.co.jp

(3) 副総括研究代表者 (SL)

氏名	西条 寿夫
組織名	国立大学法人富山大学
所属役職名	大学院医学薬学研究部 (医学) 教授
TEL・FAX	TEL : (076)434-7215 FAX : (076)434-5012
e-mail	nishijo@med.u-toyama.ac.jp

(4) 研究実施者

研究実施機関	代表者役職 氏名	連絡先
ライフケア技研株式会社	代表取締役社長 横井 秀輔	〒930-0834 富山県富山市問屋町 2-4-15 TEL : (076)411-0201 FAX : (076)451-2610
関電プラント株式会社	代表取締役 岩谷 全啓	〒531-8502 大阪府大阪市北区本庄東 2-9-18 TEL : (06)6259-7640 FAX : (06)6359-7432
国立大学法人富山大学	学長 遠藤 俊郎	〒930-0194 富山県富山市杉谷 2630 TEL : (076)464-7682 FAX : (076)464-4656

第2章 本論

2-1 補助事業の具体的研究内容

【1. ウェアラブル発汗計開発の課題への対応】

【1-1】発汗計と電極の設計・作成

平成 28 年度においては、発汗センサ部をライフケア技研株式会社が主体となってウェアラブル可能な形態として開発し、株式会社東芝で開発中のリストバンド（脈拍センサと通信モジュール・LCD・充電式バッテリーを搭載）をリード線で繋ぐ方向で製品化を進めた。

水分量計測器（ライフケア技研製）



図3 ライフケア技研株式会社が試作中の
水分量計測器（発汗センサ）
＜旧タイプ＞

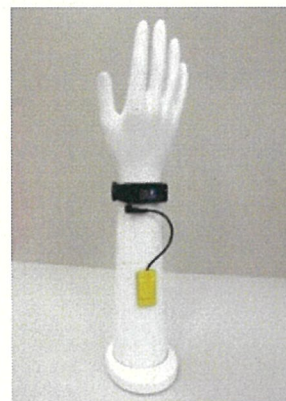


図4 発汗センサと株式会社東芝で
開発中のリストバンドと
繋いだ評価用実証機

平成 29 年度においては、発汗センサがリストバンド本体（脈拍センサと通信モジュール・LCD・充電式バッテリーを搭載）と一体型の試作機を作製するために、パルテック株式会社に外注し、平成 29 年 4 月末に先行試作機が出来上がった。その後ライフケア技研で社内実験を行い、修正点等を抽出して、細部の調整および修正を施した試作機 25 台が平成 29 年 6 月末に完成した。

【1-2】吸着材シートの設計・評価試験・試作機の設計・作成

平成 28 年度においては、セパレート型の電極サイズに合わせ、吸着材シートを設計・作成した。平成 29 年度においては、一体型への変更に伴い、サイズおよび構造の変更を検討した。また、その変更した仕様での吸着材シートの小規模量産が可能となるよう、吸着材シート作製用試作機のカスタマイズを行った。

【2. 熱中症予兆チェッカーの開発】

【2-1】検量線の作成及び動作テスト、発汗量の測定精度の調査

【1-1】で作製したセパレート型および一体型試作機を用いて、ライフケア内で加水試験および発汗運動試験を行い、測定制度を調べそれと並行して検量線を作成した。

【2-2】熱中症予兆チェッカー試作機による予備試験（フィールドテスト・エアロバイク運動テスト）

ライフケア技研株式会社においてフィールドテスト用プロトコルの作成を行い、関電プラント株式会社で1つの作業チーム（作業員 10 名、監督者 1 名）で装着し、発電所内で実作業によるフィールドテストを実施する。また、国立大学法人富山大学では男女学生 30 名で温度と湿度を一定にした恒温室でエアロバイク運動テストを実施した。

【2-3】アルゴリズムの作成

前年度得られたデータおよび【2-1】で得られたデータを解析し、前年度作成したプログラムフローチャート内で未決定となっていた閾値に当てはめた。

【2-4】マーケティング調査

新価値創造展 2016（平成 28 年 10 月）、第 3 回ウェアラブル EXPO（平成 29 年 1 月）、第 3 回猛暑対策展（平成 29 年 7 月）、第 4 回ウェアラブル EXPO（平成 30 年 1 月）に出展し、来場者から試作機に関する様々な意見を聞いた。

【3-1】発電所での長期間の使用試験、スポーツでの使用試験

当初の予定では、関電プラントおよびゴールドウインにて行う予定だったが、当初の予定であった 7 月時点では、まだ試作機のソフトの調整中だったため、延期となった。関電プラントでの実験は現場との兼ね合いもあり、10 月に行うこととなり、それまでの間は大林組や中部電力にて行うこととなった。大林組では 3 名、中部電力では 8 名、関電プラント

では 2 名が被験者となって実作業内での実証試験を実施した。作業前に管理者又は監督者が、デバイスへ各作業者の氏名・社員番号・体重・身長等の情報を入力し、積算全身発汗量・時間当たりの全身発汗量・平均脈拍数等のデータを取得した。

【3-2】測定データの解析及びアルゴリズムの検証

【3-1】で得られたデータを解析し、【2-1】終了時点より正確な検量線を作成した。また、個人差を考慮し、個人ごとに補正がかかるような検量線も作成した。

【3-3】開発品による熱中症予兆チェックシステムの構築

【3-2】で検証したアルゴリズムを元に熱中症予兆チェックシステムをデバイスに組み込んだ。さらに熱中症予兆チェッカーとして作業者のセルフチェックと、監督者にも BLE 通信でリアルタイムに情報が共有できるように Android 端末のアプリ上で確認できるようなシステムを構築した。また、閾値を超えた場合にアラートとして、試作機自体と BLE 通信中の Android 端末がバイブレーションするようなシステム構築も行った。

2-2 研究成果等

【1-1】発汗計と電極の設計・作成

平成 28 年度に行った、楕形電極のパターン検討実験を行った結果を以下に示す。

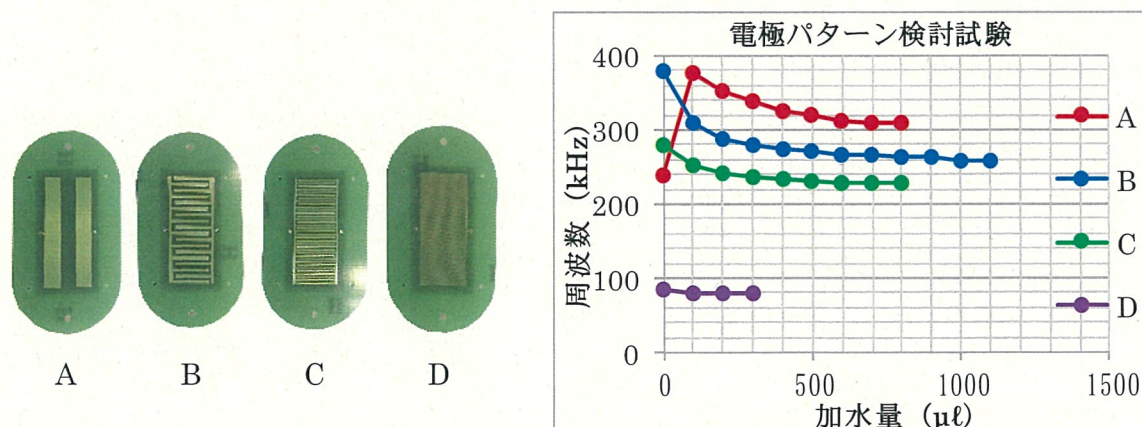


図5 電極パターンA～Dおよび電極パターン検討試験結果

加水試験を行った結果、最も周波数変化が大きかった B の電極を選定し、セパレート型

の旧タイプの発汗センサ部に使用した。

また、平成 29 年度に作製した試作機を写真 2 に示す。

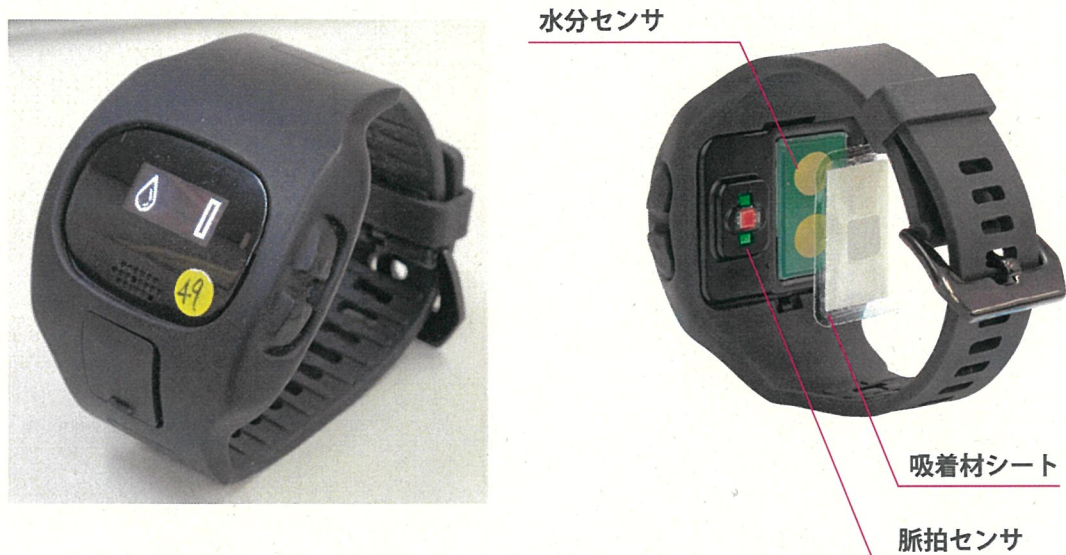


写真 2 ウェアラブル型熱中症予兆チェッカー試作機（一体型）

【1－2】吸着材シートの設計・評価試験・試作機の設計・作成

平成 28 年度においては、構造・厚さ・吸着量などの異なる吸着シートを用いて比較検討実験を行い、最も変化量の大きい B を選定した。（図 6 参照）

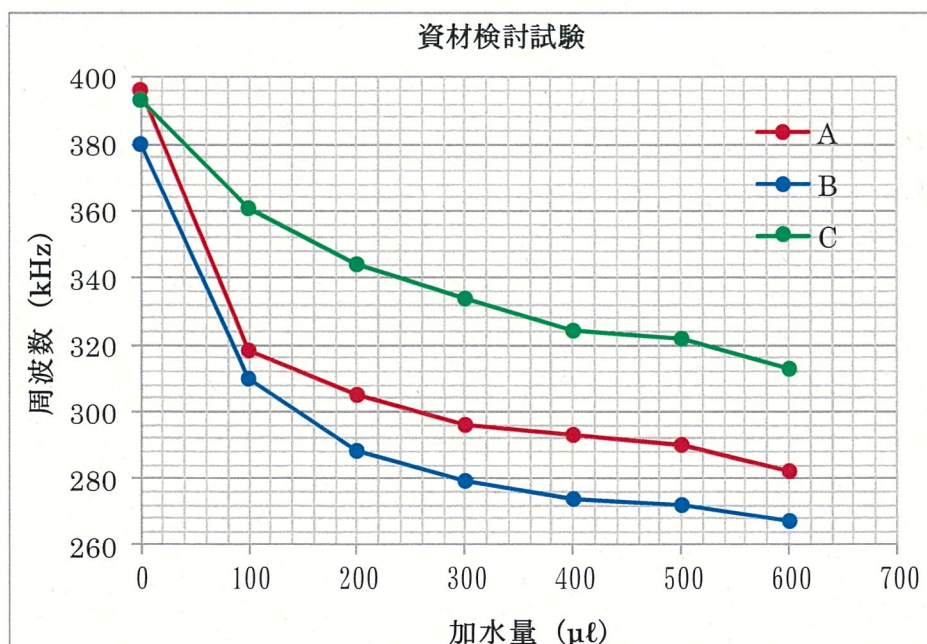


図 6 資材検討試験結果

平成 29 年度においては、一体型筐体に収まるようなサイズに変更する必要があったため、昨年度の吸着材シートとは違い両面とも全面粘着とした。また、サイズは 36mm×25mm とし、電極貼付面には中央にスリットが入っており、セパレータを剥がしやすいようにした。



写真 3 吸着材シート

【2-1】検量線の作成及び動作テスト、発汗量の測定精度の調査

平成 28 年度のセパレート型試作機においては、パッチサイズの検討および運動時の発汗量の測定精度を調べた結果、506Hz 以上の場合、 $y = -3.103x + 2370$ 、506Hz 未満の場合、 $y = -32.008x + 16,996$ という 2 本の検量線を作成した。（図 7 参照）

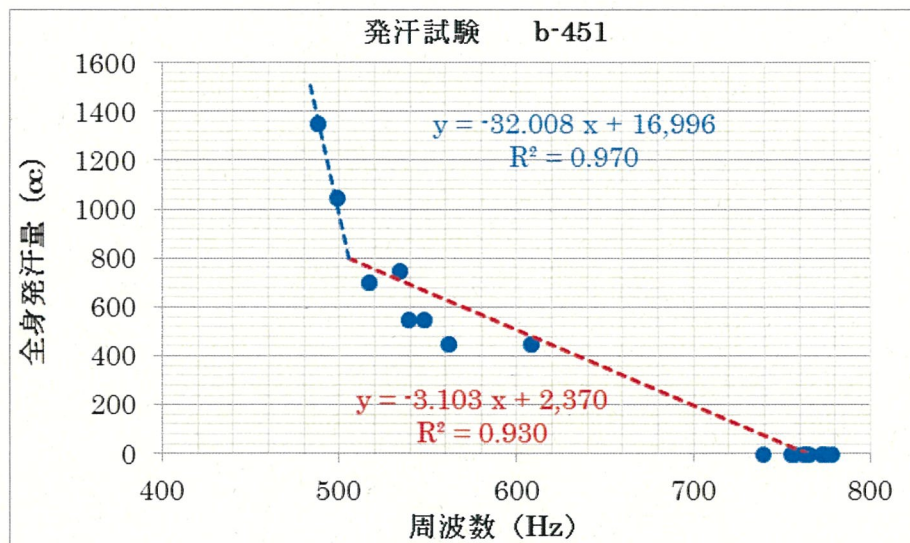


図 7 平成 28 年度の発汗運動実験結果および検量線

平成 29 年度においては一体型試作機および吸着材シート用いて、ライフケア社内での予備実験として、エアロバイク運動による発汗試験を行い、全身発汗量（体重減少量）と周期変化量との関係性から作成した検量線を図 8 に示す。

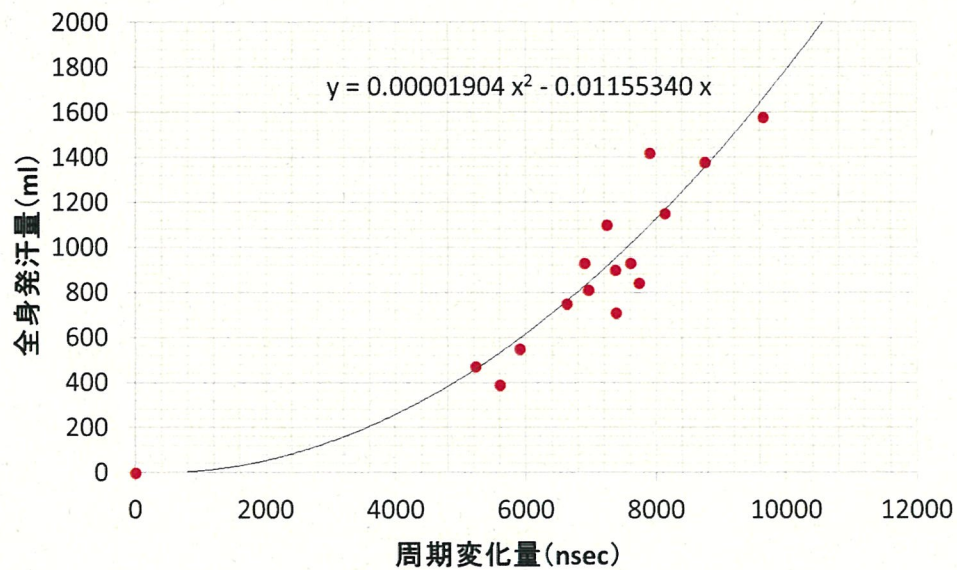


図 8 平成 29 年度の発汗運動実験結果および検量線

【2-2】熱中症予兆チェッカー試作機による予備試験（フィールドテスト・エアロバイク運動テスト）

以下に平成 28 年度に関電プラントで行ったフィールドテストにおける代表的な結果を図 9 に示す。

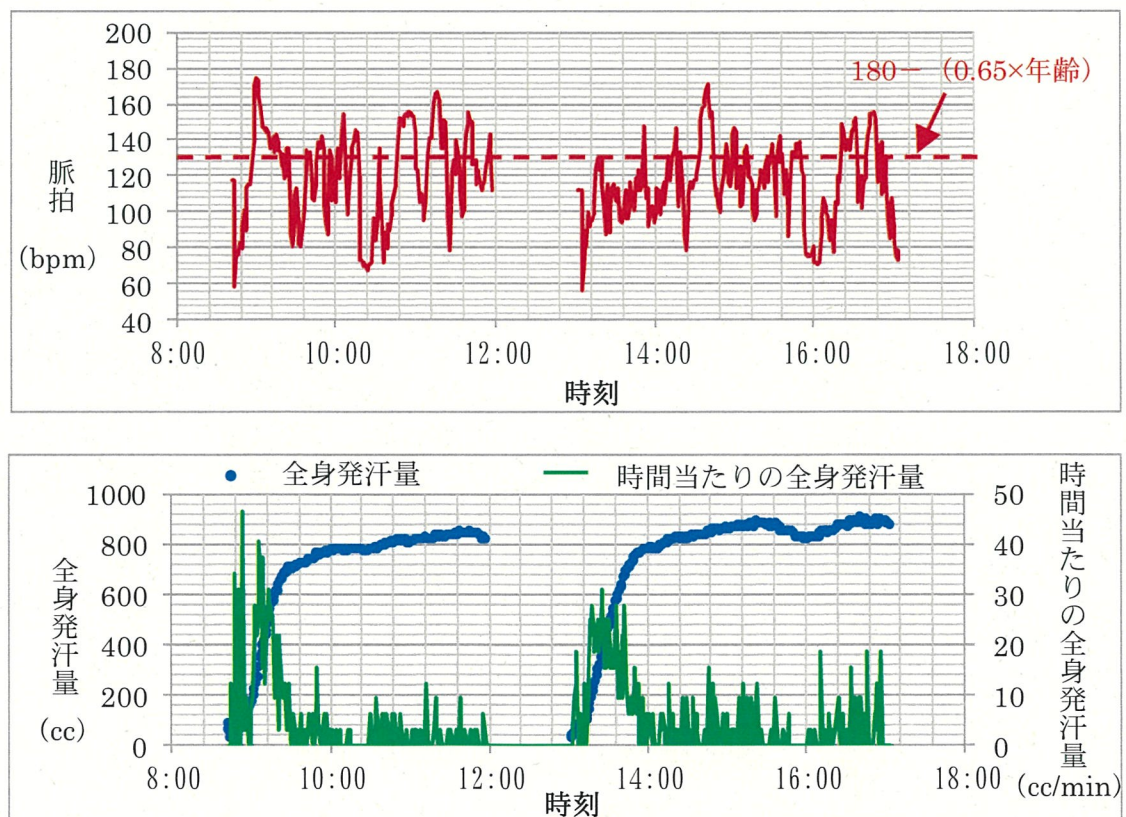


図 9 平成 28 年度に関電プラントでのフィールドテスト測定例

このように、リストバンドから取得できる周期変化量と全身発汗量の間に相関があることは分かったが、リストバンドの防水性、耐久性に問題があったため、フリーズすることもしばしばあり、試作機として欠陥があることがわかった。また、リストバンド本体と発汗センサを繋ぐケーブルがわずらわしいという声もあり、関係各社で協議した結果、セパレート型から一体型へと変更する必要があるとの結論に至った。

次に平成 28 年度に富山大学で行った、エアロバイク運動テストにおける代表的な測定例を図 10 に示す。

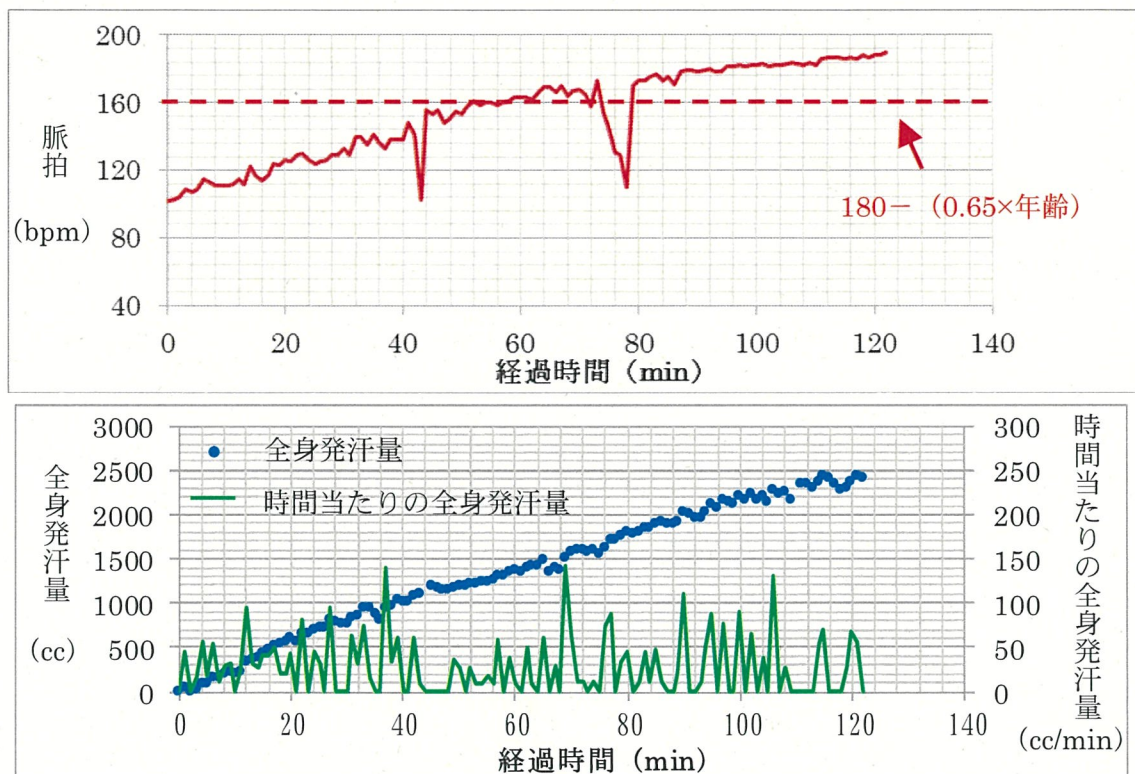


図 10 平成 28 年度の富山大学でのエアロバイク運動テスト測定例

上記のように、記録が良好であった例では、リストバンドから取得できる周期変化量と全身発汗量の間に相関があることが判明した。しかし、リストバンドの防水性、耐久性に問題があったため、機器作動がフリーズすることもしばしば認められ、試作機として欠陥があることが判明した。また、リストバンド本体と発汗センサを繋ぐケーブルがわずらわしいという被験者の感想もあり、関係各社と協議した結果、セパレート型から一体型へと変更する必要があるとの結論に至った。

次に記録が比較的良好であった被験者 6 例について、全身発汗量と開発機器で計測した前腕発汗量との関係を解析した（図 11）。全身発汗量は、エアロバイク運動前後における体重減少から算出した。また、前腕発汗量は、前腕に添付した汗吸収用パッチの静電容量を用いた。パッチ静電容量は、汗が吸収されるに従い静電容量が増加し、開発機器はこの静電容量を計測している。以上を解析した結果、前腕発汗量と全身発汗量との間に正の相関関係が認められた。以上のことから、本機器を用いて全身発汗量を推定することが可能と推測される。

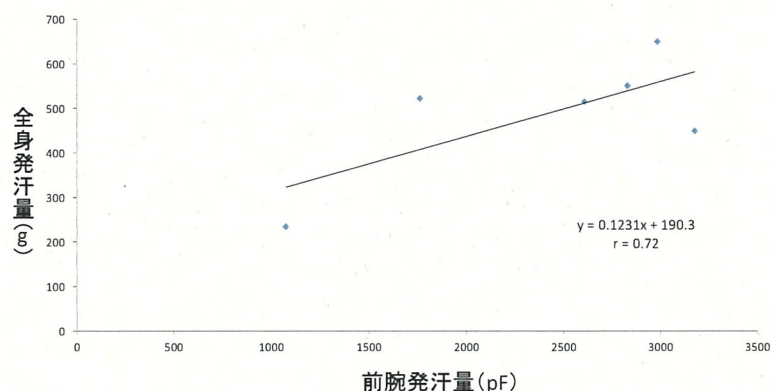


図 11 全身発汗量と前腕発汗量との相関

また、運動中の深部体温（鼓膜温）と飲水量及び全身発汗との関係を解析した。下記の図 12 は運動前後の鼓膜温を計測したものである。その結果、男性及び女性ともに鼓膜温が運動後に上昇した。また、全身発汗量と鼓膜温の上昇は有意な正相関の関係にあることが明らかになった（図 13）。しかし、相関の計算式からの変位の幅が大きく、体重減少量のみから鼓膜温を推定することは危険であると考えられる。

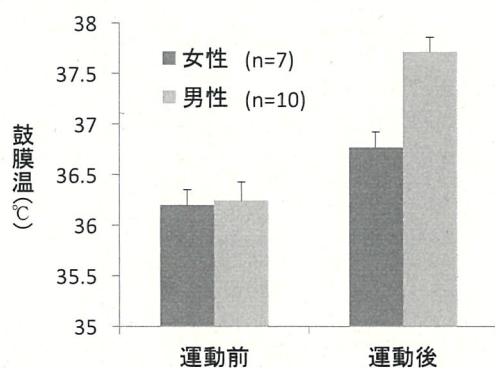


図 12 運動による深部体温の変化

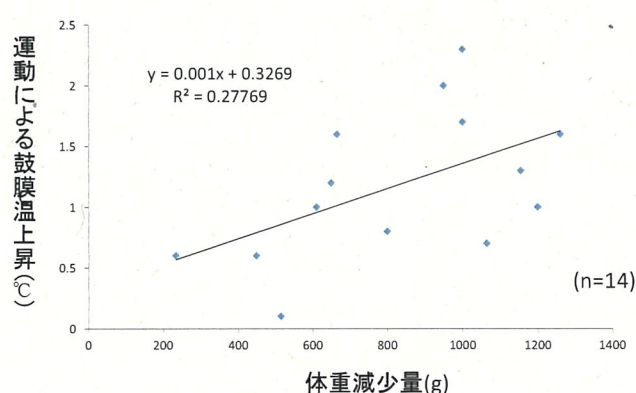


図 13 深部体温（鼓膜温）上昇と全身発汗量（体重減少量）の関係

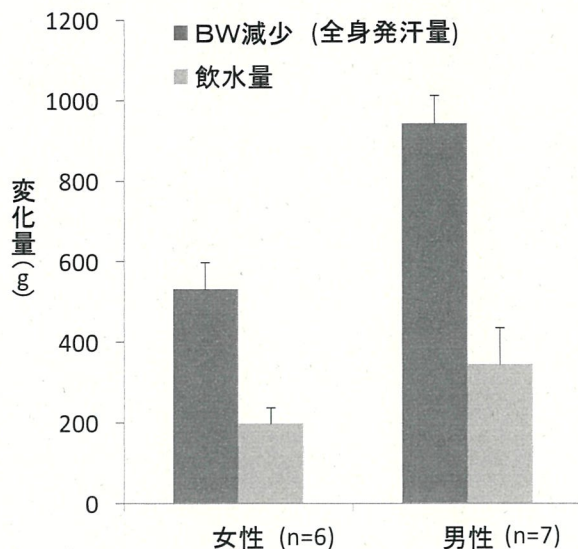


図 14 全身発汗量と飲水量の関係

一方、全身発汗量（体重減少量）と自発的飲水量との関係を解析した結果、発汗量に比較して飲水量が少なく、自発的脱水の状態にあることが判明した（図 14）。以上から、運動により発汗し、それにつれて深部体温が増大するが、飲水量が少なく、自発的脱水の状態にあることが判明した。これらのことから、開発機器等により発汗状態を推測し、指示飲水を行うことが熱中症の予防に重要であると考えられる。尚、深部体温が 39 °C、あるいは 40 °C 以上を熱中症で最も重症度が高い III 度（熱射病）とする考え方もあるが、深部体温がこれより低くても熱射病などの症状を呈することが知られており、深部体温のみで判定することは危険であると考えられる。

また、運動前後において、皮膚局所水分率および全身の体水分率をそれぞれ肌水分計（モイスチャーチェッカーMY-808S）および体組成計（InnerScan DUAL, タニタ）を用いて計測した。その結果、皮膚水分率は運動後に増大した（図 15）。この結果は、運動による皮膚血管の拡張によるものと推測された。一方、全身の体水分率も運動後に増大した（図 16）。これは、本体組成計の測定原理が生体電気インピーダンス法によるものであり、皮膚血流量等の影響を受けるからであると推測される。以上から、現時点において簡便に利用可能な肌水分計や体組成計では、測定結果が皮膚局所血流等に影響されるため、発汗による体水分量の低下を評価することはできないと結論された。

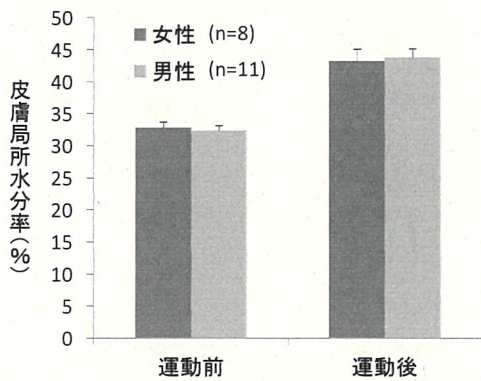


図 15 前腕部における皮膚局所水分率の運動による変化

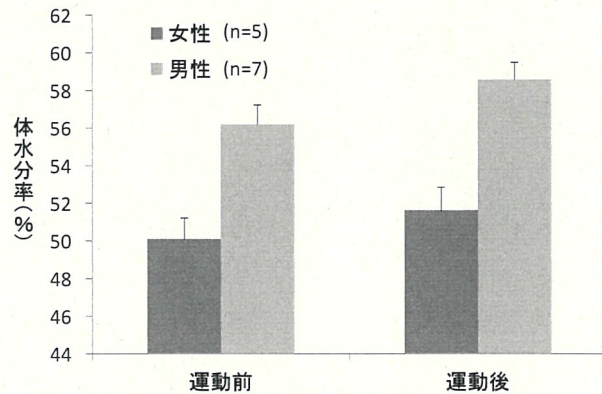


図 16 全身の体水分率の運動による変化

【2-3】アルゴリズムの作成

平成 28 年度においては、予備実験の結果を鑑み、一定累積発汗量ごとに水分補給を促す表示を行うこととした。また、脈拍値は ISO の連続作業における負荷計算式『 $180 - 0.65 \times \text{年齢}$ 』を閾値とし、それ以上になった累積時間（分）をカウントしてスコア化し、一定スコア以上かつ大量発汗後に時間当たり発汗量の減少があった場合に、熱中症を警告する表示を出すこととした。図 17 にそのフローチャートを示す。

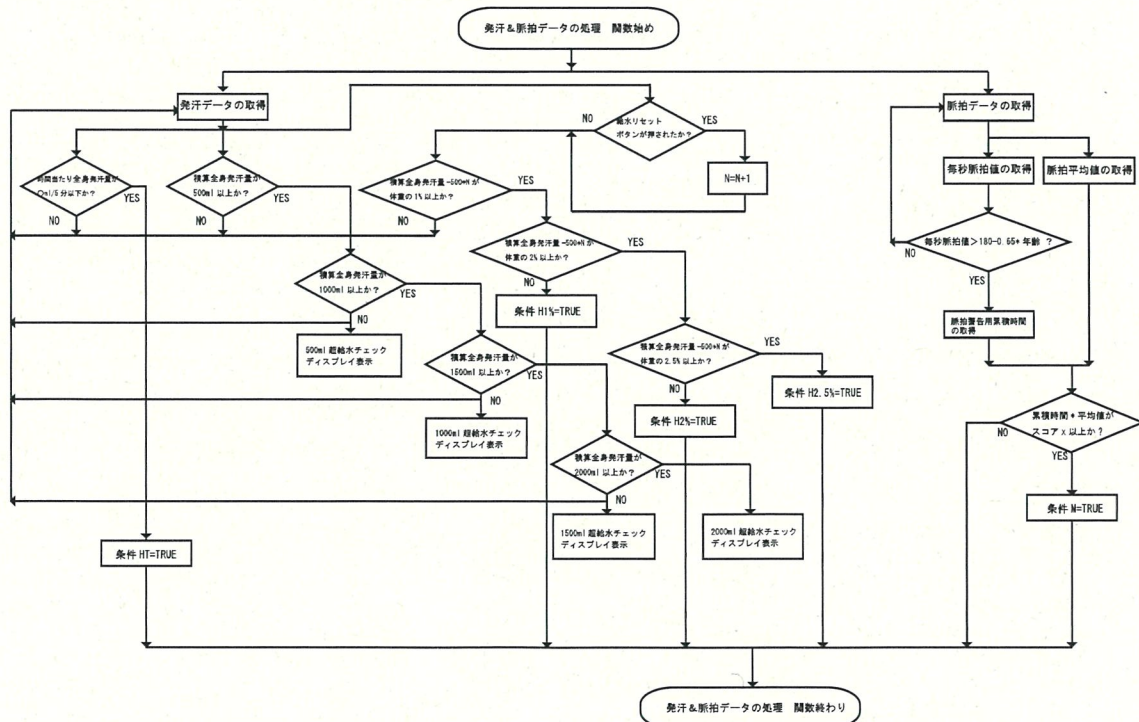


図 17 平成 28 年度におけるアルゴリズムフローチャート

平成 29 年度においては、平成 28 年度に作成したアルゴリズムをもとに、『発汗量が体重の 2%を越える』、脈拍値が $180 - 0.65 \times \text{年齢}$ を超えた累積時間が 5 分間を超える』、という 2 つの条件を満たした場合、アラートとして試作機がバイブレーションするようなアルゴリズムを作成した。図 18 にそのフローチャート図を示す。

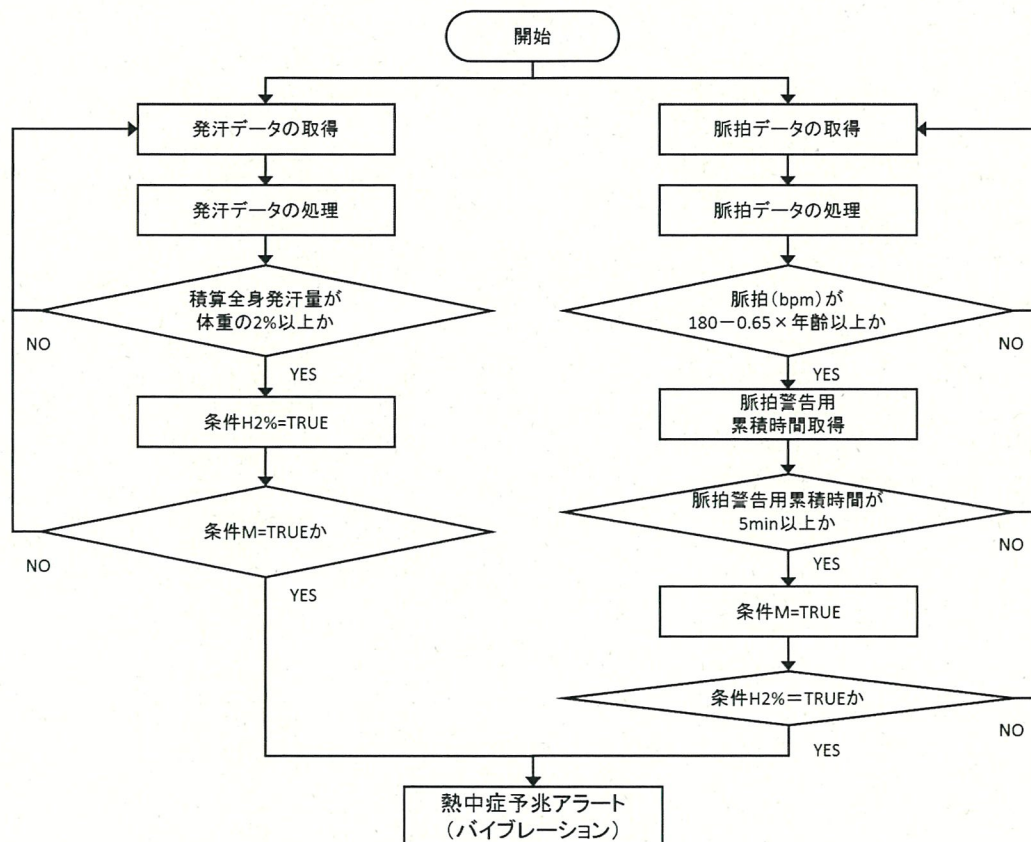


図 18 平成 29 年度におけるアルゴリズムフローチャート

【2-4】マーケティング調査

新価値創造展 2016（平成 28 年 10 月）、第 3 回ウェアラブル EXPO（平成 29 年 1 月）、第 3 回猛暑対策展（平成 29 年 7 月）、第 4 回ウェアラブル EXPO（平成 30 年 1 月）に出展した。写真 4 に新価値創造展 2016、写真 5 に第 3 回ウェアラブル EXPO、写真 6 に第 3 回猛暑対策展、写真 7 に第 4 回ウェアラブル EXPO の様子を示す。

これらの展示会で一体型試作機の PR を行い、情報収集や試作機のレンタルについて希望される企業と具体的な話をした。特に中部電力での実証試験に関しては、第 3 回猛暑対策展の際に弊社ブースにて相談されたのがきっかけで、実現へと至った。



写真 4 新価値創造展 2016



写真 5 第 3 回ウェアラブル EXPO



写真 6 第 3 回猛暑対策展



写真 7 第 4 回ウェアラブル EXPO

【3-1】発電所での長期間の使用試験、スポーツでの使用試験

平成 29 年度に行った、大林組および中部電力の測定例をそれぞれ図 19、図 20 に示す。なお図 19 の大林組の測定例では、14 時頃に吸着材シートの貼り替えを行っている。

ここに記載した測定例は問題なく取得できた例であり、両試験とも試作機筐体周辺で汗の浸入が散見され、あまり良好な結果とは言えなかった。しかしながら大林組からの評価は高く、防水対策が向上したら再度実験させてほしいとの意見をいただいた。

また、関電プラントで行った実証試験での測定例を図 21 に示す。この測定例では、午前中は溶接作業をしておらず、午後から溶接作業を行っているため、午前中の発汗量は少なく、

午後以降に多く発汗していることがわかる。また同様に脈拍も午前中は安静状態に近い値だが、午後以降は溶接作業中ということもあり、やや高めとなっていることがわかる。このように発汗量と脈拍の変化が見てとれるため、本試作機の有用性は明らかだが、その一方で使用した作業者からは、本試作機のサイズが大きいと、長袖のボタンが留めにくい、作業時に違和感がある等の意見があり、筐体サイズの見直しを検討する必要があると思われる。

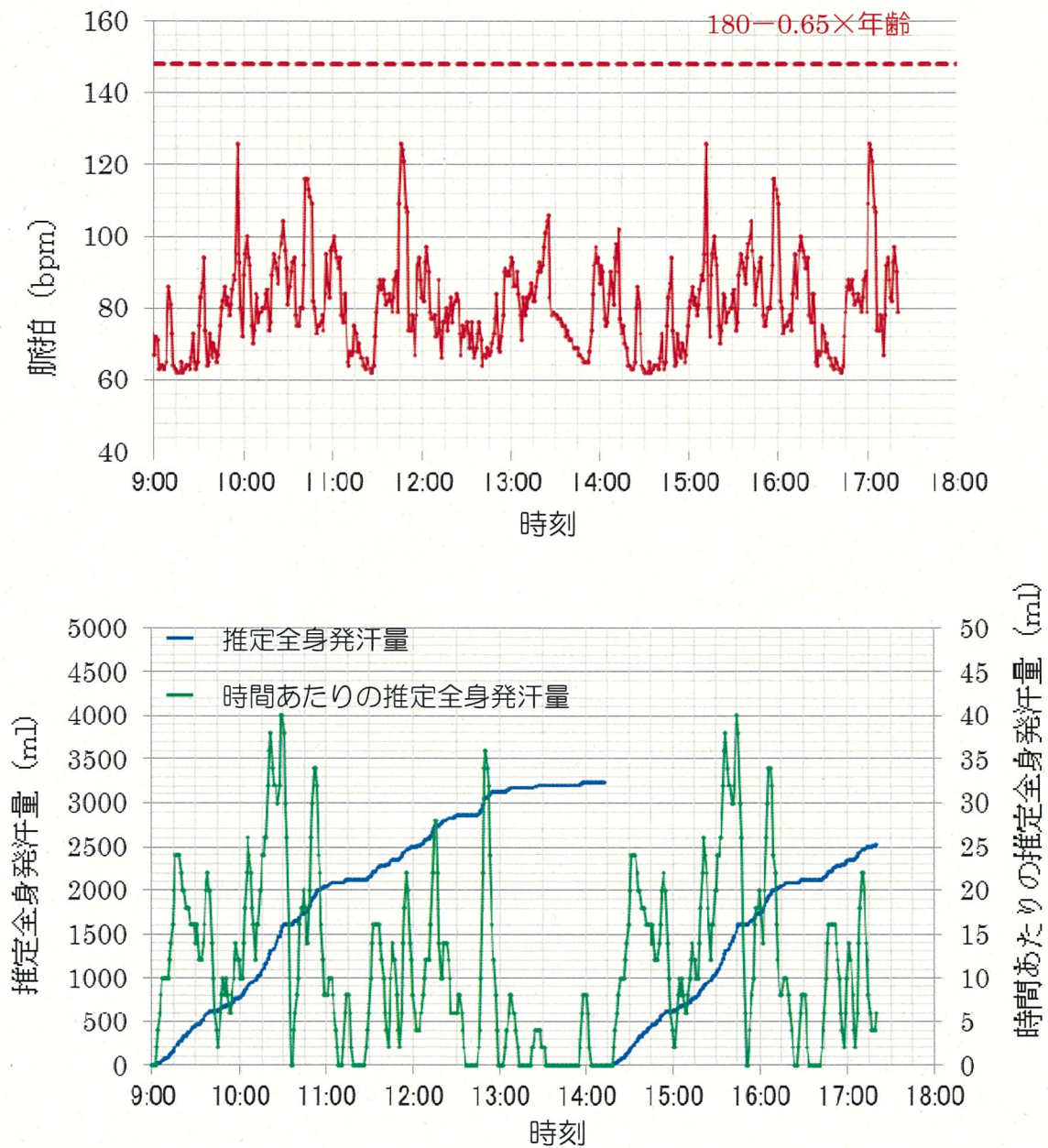


図 19 平成 29 年度の大林組での実証試験測定例

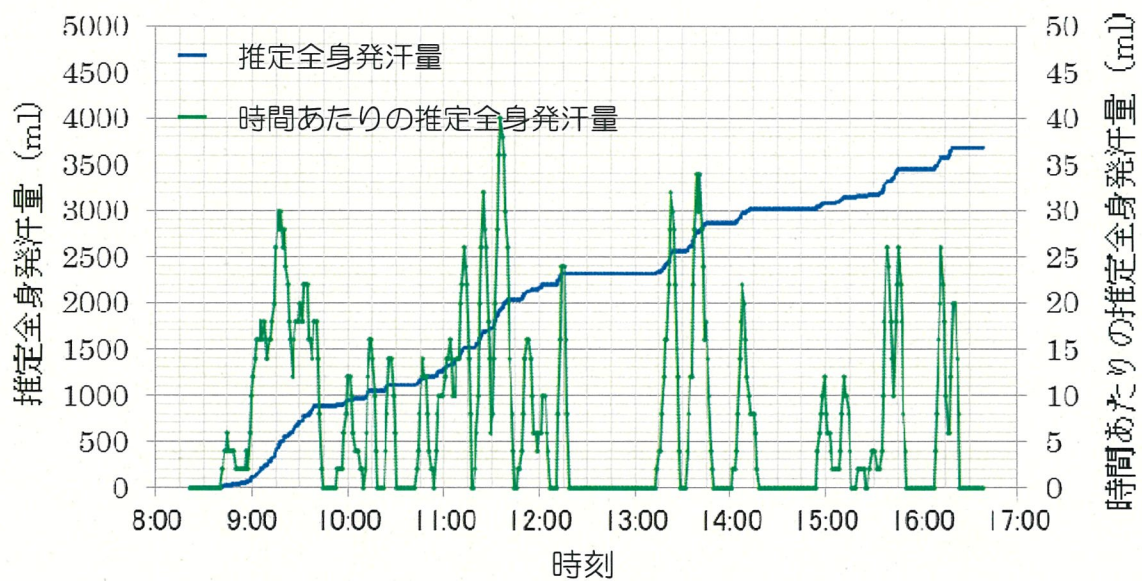
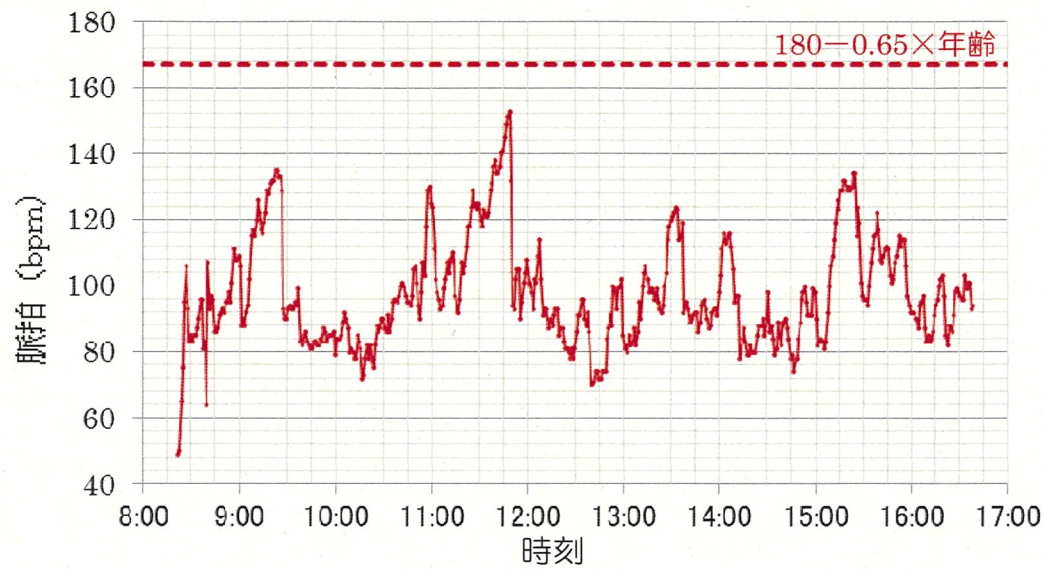
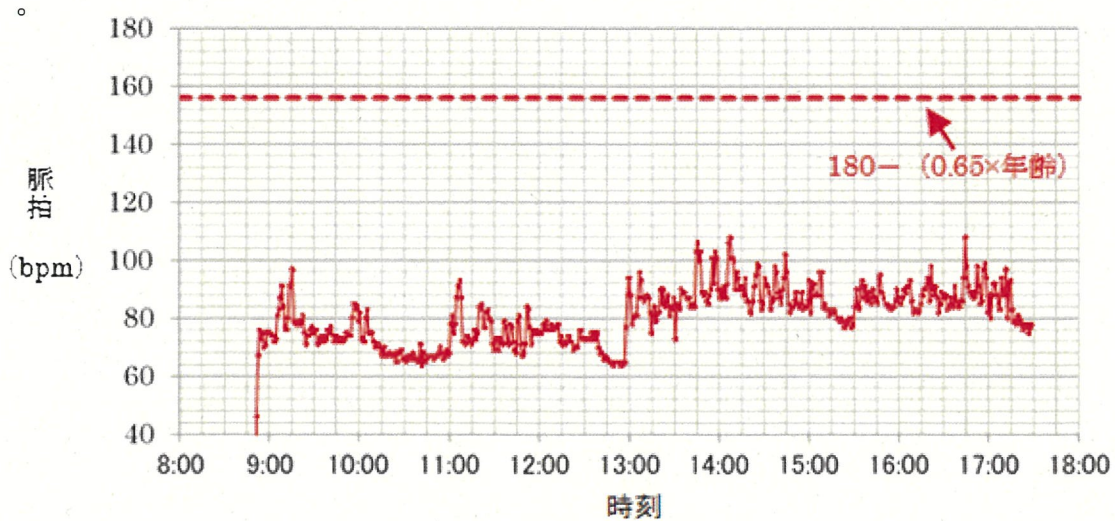


図 20 平成 29 年度の中郡電力での実証試験測定例



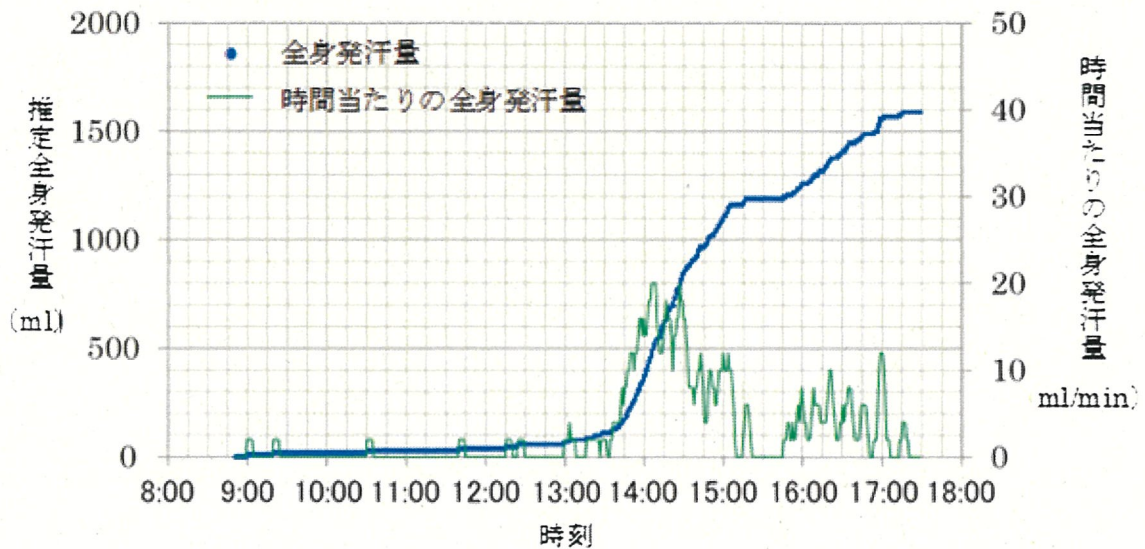


図 21 平成 29 年度の関電プラントでの実証試験測定例

【3-2】測定データの解析及びアルゴリズムの検証

【3-1】等の結果から、検量線を修正し、なおかつ年齢・身長・体重等の個人データを反映させ、補正をかけることで検量線の精度が上がったため、【2-3】で作成したアルゴリズムの検証も兼ねて大林組および富山大学にて臨床試験を行った。

大林組での臨床試験は、自社社員ではなく一般男性を対象にしたものである。実験は労働安全衛生総合研究所内にある、一定温度および湿度の恒温室内にて行われ、ヘルメットや手袋、作業着を着用した被験者が、20 分間安静後、時速 5km で 60 分間ウォーキングするという内容だった。図 22 にその測定例を示す。

この実験では【3-1】の実験から吸着材シートを改良したこともあって、汗の浸入による異常値は見られず、良好なデータが取得できたといえる。一方で、実験中にアラートが鳴ることはなく、被験者が体調不良を訴えることもなかったため、熱中症のリスクが低い領域においては問題なく動作したといえるが、熱中症のリスクが高い領域でどうなるかは未確認のため、その確認方法も含めて検討する必要がある。

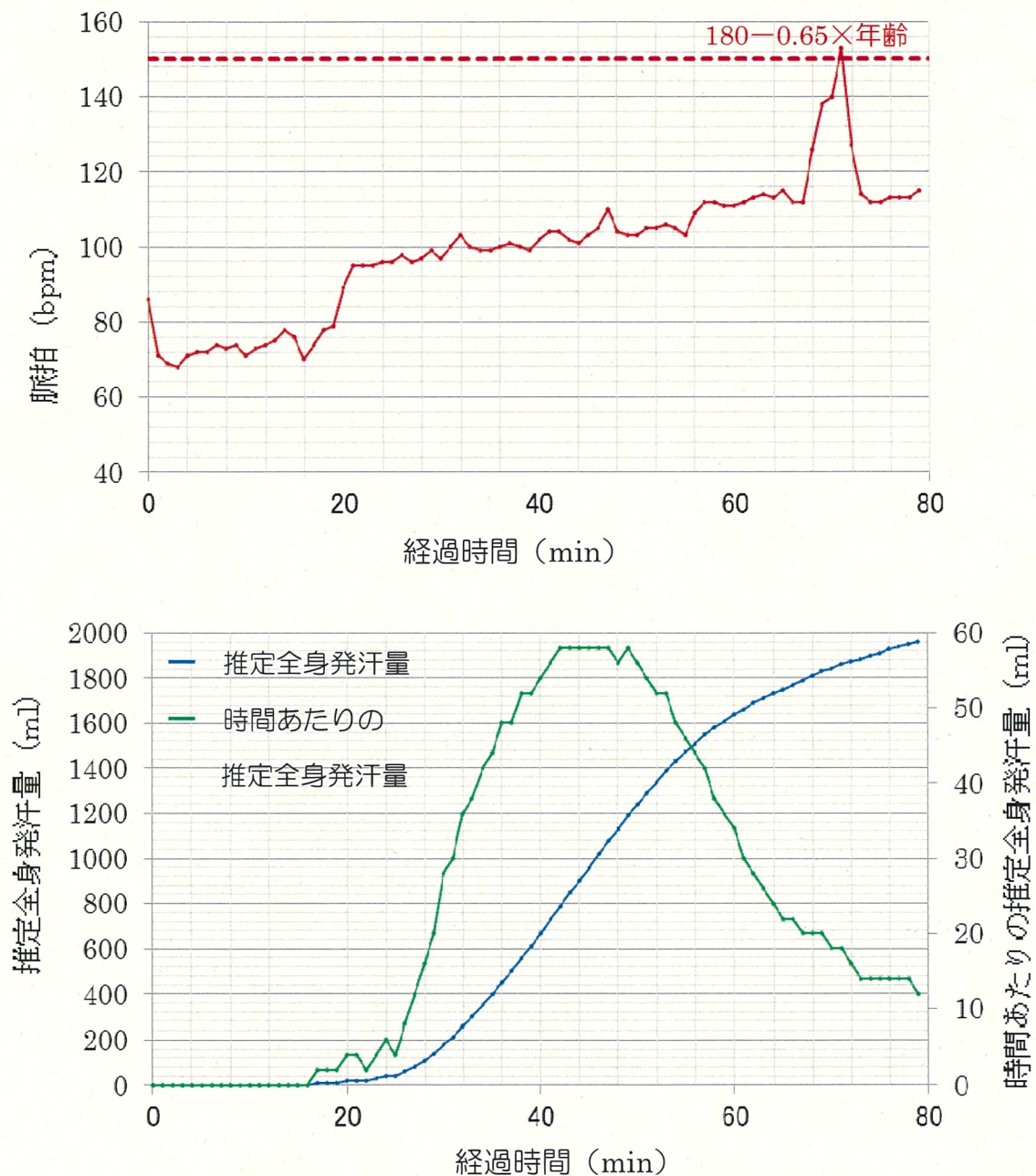


図 22 大林組（労働安全衛生総合研究所）での臨床試験測定例

次に富山大学で行った臨床試験結果について報告する。合計 36 名の被験者を用いてエアロバイク運動テストを施行した。このうち、22 名のデータは、使用機器の仕様設計に用い、パッチの大きさ等を変更したため、以下のデータ解析に用いなかった。図 23 には、一体型試作機を用い、エアロバイク運動テストにおける代表的な結果を示してある。積算全身発汗量、時間当たりの全身発汗量 (A)、および脈拍 (B) は本機器由来のデータを示してある。

また、鼓膜温計を用いて深部体温として 5 分毎に鼓膜温を計測した (C)。本例では、運動開始 3 分後から脈拍が増大し、続いて 10 分後から発汗が増大した。一方、鼓膜温は非常に緩徐に増大した。深部体温は、一定環境下では、酸素摂取量に依存することが報告されており、運動増大による酸素摂取量増大を反映したものであると考えられる。

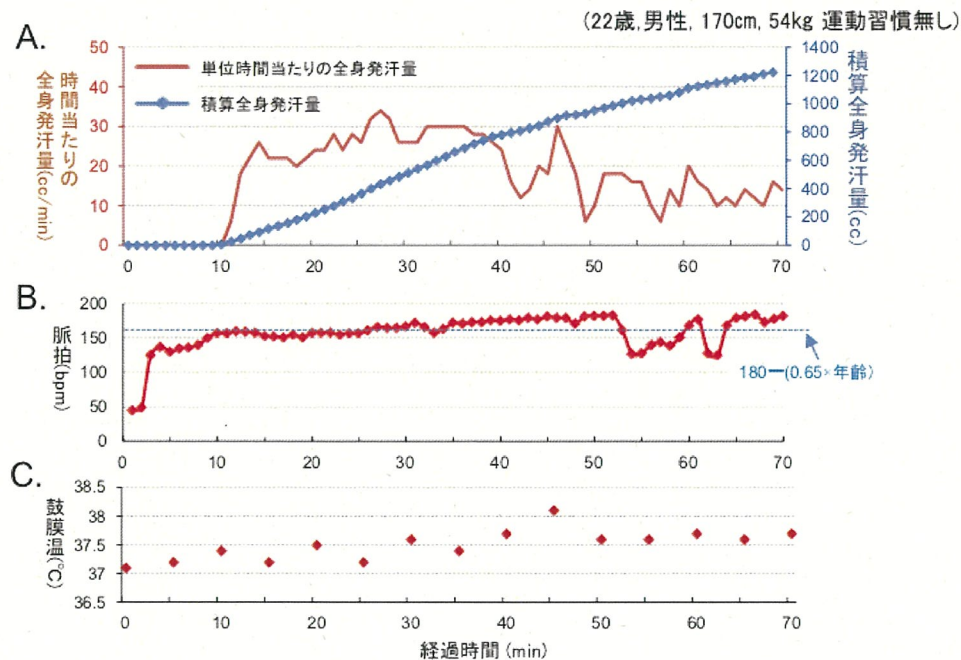


図 23 平成 29 年度の富山大学における臨床試験の測定例

次いで、被験者 14 例について、全身発汗量と開発機器で計測した前腕発汗量との関係を解析した (図 24)。全身発汗量は、エアロバイク運動前後における体重減少から算出した。また、前腕発汗量の計測には、前腕に添付した汗吸収用パッチの静電容量を用いた。パッチ静電容量は、汗が吸収されるに従い静電容量が増加するが、開発機器はこの静電容量を計測し、パルス幅に変換している。以上を解析した結果、前腕発汗量 (パルス幅変化量) と全身発汗量 (体重減少量) との間に正の相関関係が認められた。以上のことから、本機器を用いて全身発汗量を推定することが可能と推測される。

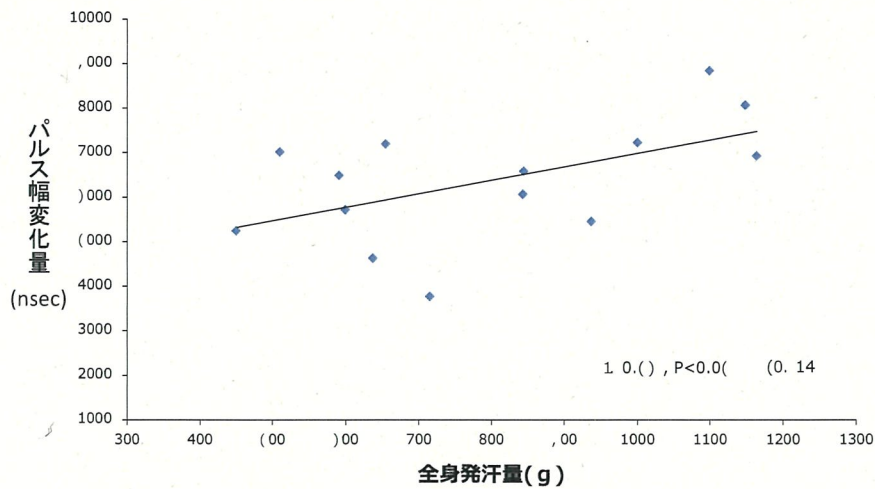


図 24 パルス幅変化量と全身発汗量（体重減少量）間の相関。

また、運動中の深部体温（鼓膜温）と飲水量及び全身発汗との関係についても解析を行った。図 25 には運動中の鼓膜温の経時変化を示してある。鼓膜温は運動とともに次第に上昇し、60 分後にやや低下している（多くの被験者では、運動のクールダウンを 60 分後に設定しているため）。図 26 には運動前後の鼓膜温の変化を示してある。その結果、運動により鼓膜温が運動後に有意に上昇した。さらに、鼓膜温の上昇量は、全身発汗量（体重減少量）（図 27）および開発機器により推定した発汗量（パルス幅変化量）（図 28）と有意な正相関の関係にあることが明らかになった。しかし、相関の計算式からの変位の幅が大きく、体重減少量のみから鼓膜温を推定することは危険であると考えられる。一方、全身発汗量と飲水量との関係を解析した結果、全身発汗量より飲水量が少なく、生理学的に「自発的脱水」と言われている現象が認められた。

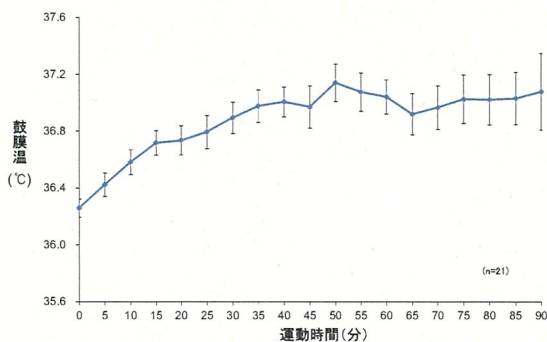


図 25 深部体温（鼓膜温）の経時変化。

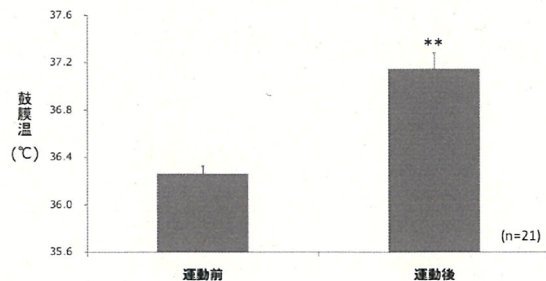


図 26 運動による鼓膜温の変化。

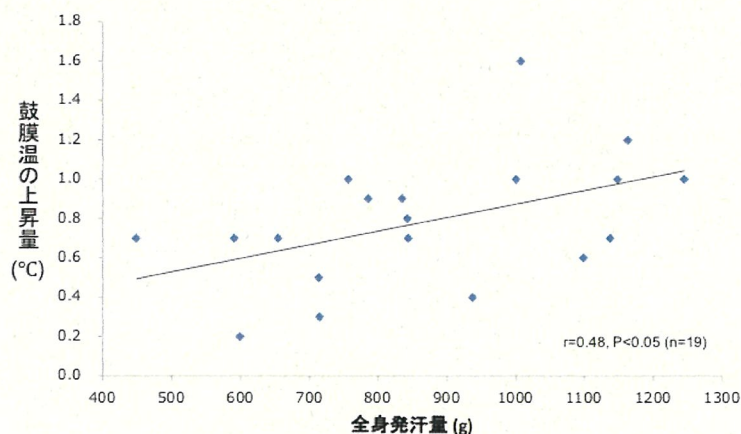


図 27 深部体温(鼓膜温)と全身発汗量(体重減少量)との相関。

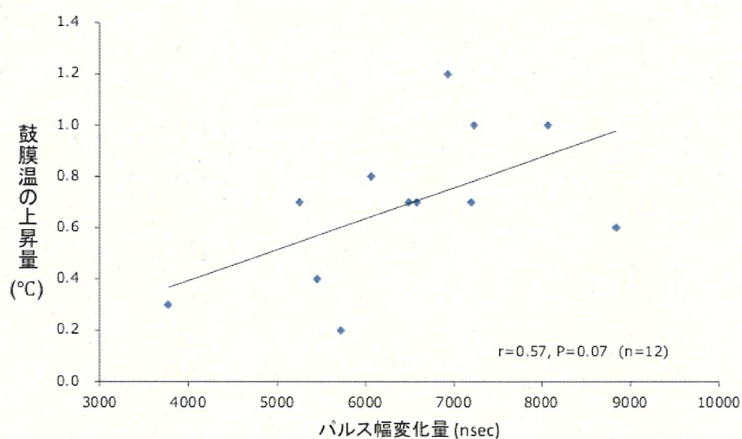


図 28 パルス幅変化量と深部体温（鼓膜温）との相関

【3-3】開発品による熱中症予兆チェックシステムの構築

【3-2】で検証したアルゴリズムを元に熱中症予兆チェックシステムをデバイスに組み込んだ。さらに熱中症予兆チェッカーとして作業者のセルフチェックと、監督者にも BLE 通信でリアルタイムに情報が共有できるように Android 端末のアプリ上で確認できるようなシステムを構築した。実際のアプリ画像を図 29 に示す。

画面左下にある熱中症危険度という部分は、【2-3】で述べた条件を満たすことで、『安全』から『危険』に変わる。この際、デバイス側はもちろんのこと、Android 端末側もバイブレーションするため、装着者および監督者は画面を見ていなくとも気付くことができる。

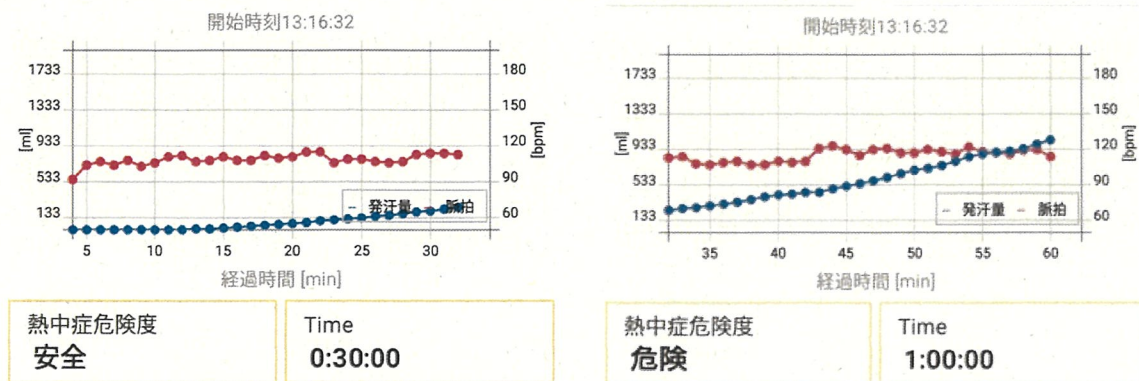


図 29 監督者確認用アプリ（左側の 30 分後が右側）

最終章 全体総括

・研究開発成果

前腕局所発汗量と全身発汗量の間に線型性が認められ、前腕局所発汗量から全身発汗量が推定可能であることがわかった。よって本機器を用いて全身発汗量および時間あたりの全身発汗量が推定できるため、運動や作業の経過における発汗量の増減を確認することが可能となり、水分補給の目安のみではなく、熱中症の発症の危険性を察知することが可能になると考えられる。またその情報を被験者本人だけではなく、BLE 通信範囲内の監督者も知ることができるため、給水や休憩の指示によって装着者の熱中症リスクを著しく軽減できると考えられる。

・研究開発後の課題・事業化展開

筐体本体のサイズ縮小化、装着性の向上、通信距離の拡大等の課題はあるが、それらは製品化の時点ですべて解決する予定である。平成 30 年度 6 月ごろまでに、最終試作機を用いた実証実験を終え、微修正等を加えた後、平成 30 年度夏頃を目標に販売を開始する予定である。