

イヤホン組込型深部体温連続計測装置の開発と 安全支援を目指した GT ドライバーへの応用

山越 健弘^{*}・田中 直登^{**}・山越 康弘^{***}
松村 健太[†]・Peter ROLFE^{††, †††}・廣 瀬 元[‡]・高橋 規一^{‡‡}

Development of a Core Body Thermometer with Built-in Earphone for Continuous Monitoring in GT Car Racing Athletes

Takehiro YAMAKOSHI,^{*} Naoto TANAKA,^{**} Yasuhiro YAMAKOSHI,^{***}
Kenta MATSUMURA,[†] Peter ROLFE,^{††, †††} Hajime HIROSE,[‡] Kiichi TAKAHASHI^{‡‡}

Abstract Motor racing athletes in the closed-cockpit category are always facing life-threatening situations caused by heat stroke, especially in hot weather. We report here the development of a novel infrared-radiation-type eardrum thermometer, with a built-in earphone, which can be used for continuous measurement in GT car racing. We examined the accuracy of the system for core body temperature monitoring in 10 healthy volunteers (21.8 ± 1.0 (S.D.) yrs) using a temperature controlled water bath. In addition, we assessed the usefulness of the system under real racing conditions with 2 professional drivers in the practice session of 2010 SUPER GT International Series Round 4 MALAYSIA being held at the Sepang International Circuit. To examine accuracy two thermistor probes, one inserted into the ear canal and the other beneath the tongue, were used for measurements of eardrum and sublingual temperatures respectively. An infrared eardrum thermometer was inserted into the contra-lateral ear canal. The measured temperatures were recorded at 30-s intervals. The results showed good correlation between the infrared eardrum temperature and both the direct eardrum temperature ($r = 0.994$, $n = 1119$, $p < 0.001$) and the sublingual temperature ($r = 0.972$, $n = 1119$, $p < 0.001$). The mean difference between these temperatures was $+ 0.09$ °C, $- 0.08$ °C, and 1.96 S.D. was 0.21 °C, 0.44 °C, respectively. As for the field test, the system functioned satisfactorily during real racing conditions performed on the racing circuit. These results suggest that our new system can be used in a race setting as a reliable core temperature monitor and could help to improve safety of motor sports.

Keywords : continuous monitoring, core body thermometer, eardrum temperature, heat stroke, motor sports.

1. は じ め に

モータースポーツの本質は、レースで誰よりも“速く”かつ“無事に”サーキットを走り抜け「ゴールに辿り着く」ことである。

前者と後者のキーワード共にレーシングマシン以外の要

因のドライバースキル、すなわち、ドライバーの技量が絡んでいることは間違いないが、後者はモータースポーツの場合、生命に関わる問題でもあり、これに関する「ドライ

2010 年 7 月 29 日受付, 2010 年 9 月 2 日改訂
Received July 29, 2010; revised September 2, 2010.

^{*} 金沢大学大学院自然科学研究科
Graduate School of Natural Science and Technology,
Kanazawa University

^{**} 金沢大学理工研究域機械工学系
College of Science and Engineering, Kanazawa University

^{***} 株式会社ユーシス
yu.sys Corporation

[†] 国立精神・神経医療研究センター 精神保健研究所 成人精神保健研究部

Department of Adult Mental Health, National Institute of Mental Health, National Center of Neurology and Psychiatry

^{††} Oxford BioHorizons Ltd.

^{†††} Department of Automatic Measurement and Control, Harbin Institute of Technology

[‡] 金城大学短期大学部ビジネス実務学科

Department of Business Administration, Kinjo College

^{‡‡} 医療法人西台整形外科

Medical Corporation of Nishidai Orthopedic

バーの技量ではどうすることもできない考え得る可能な限りの対策」は最優先に担保されているべきである。

近年のクルマの技術開発は目覚ましく、レーシングマシンの性能向上は留まるところを知らない。タイヤ性能や空力性能が年々上がり、それと比例してコーナリングやブレーキ時の G によるドライバーへの身体の負担が益々上がる。そもそもドライバーは想像を絶する肉体活動を強いられていることが、最近の各種生体情報計測・解析的研究により既に明らかにされている[1-5]。一方で、クローズドコックピットカテゴリー*のレースカーでは空力性能を追求することで車内密閉性が上がり、高性能なブレーキによる熱がキャビンを熱することで車内環境が益々悪化する。オーストラリアで最も人気の高いモータースポーツである V8 supercar レースでは、異常な高温条件下で車内温度は約 70℃ まで上昇したと報告される[6]。この車内環境で、火災やクラッシュに備えてフルフェイスヘルメット、HANS (head and neck support)、レーシングスーツ、アンダーウェア、グローブ、そしてシューズという皮膚の露出が殆ど無い完全防備でドライバーはレースに挑むのである。このような状況で戦うドライバーは、体温の調節機能が破綻して体の熱収支バランスが“熱吸収”の方向となっており[7]、深部体温の上昇による熱中症のリスクがつきまとう[4, 8-10]。そして体温上昇に起因した多量の発汗促進[11, 12]により身体の水分が不足してくると、脱水症状や循環不全を伴って深部体温の上昇が更に進行し、最終的には深部体温が 42℃ を超えた状態が数分続くと細胞に不可逆的な変化が起こり、体内の多くの臓器が変性・破壊へと進んで行き多臓器不全に陥る。特に、中枢神経系への深刻な障害は死を招く。また、神経症状の後遺症は回復が困難な場合が多い[13]。これはもはやタフなドライバーであっても、根性・気力・気合で対応できるレベルの話では無い状況である。以上のように、キャビン内のドライバーの深部体温は危険なレベルへ向かわざるを得ない。これが最新のモータースポーツの実状であり、一昔の状況よりも過酷になってきている。

さて、熱中症で自らの肉体を危険な状況に陥れるとともに、やはり一番の問題はレース中にそれを発症することによって、周囲にも危険を及ぼす潜在的な事故の可能性の上昇である。モーターレーシングはチームスポーツであり、チームとしてのレースを守るため、ドライバーは肉体的に非常に厳しい状態でもコース上に留まらざるを得ないという意識が強く働く。つまりモーターレーシングは、様々な側面で危険と隣り合わせのスポーツ、しかし、「理屈を超えた憧れや全世界的に熱狂を生んでいる現代的スポーツ」、であるからこそ“安全性”に関しては最優先に担保されていなければならないと考えられる。

プロレーシングドライバーは、フィジカルトレーニングで肉体的に鍛え上げられ、暑熱順化もしており、一般的

なスポーツ選手やアマチュアドライバーよりも暑さに強いと言われる[8]。しかし、モータースポーツ中は、温熱生理学的に深部体温は上昇せざるを得ない状況であり、熱中症に陥る深部体温の絶対基準値も揺るがないので、暑さに強いドライバーとはいえ、これを客観的にモニターしておく重要性は高い[4]。そこで、本研究では、モーターレース中に深部体温を連続計測してリアルタイム警報表示（異常判定モニタリング）できる新たな装置を開発した。深部体温指標としては、鼓膜温、直腸温、肺動脈温、鼻咽頭温、膀胱温、食道温、腋窩温、口腔温（舌下温）などが挙げられるが、モータースポーツ中に非侵襲的かつ連続的に測定可能であり、なおかつ深部体温指標としての信頼性が高い鼓膜温[14, 15]に着目した。近年、臨床の現場でも術中に鼓膜温を計測すること（従来からは麻酔下における食道温計測が一般的）の重要性・必要性が高まっており、術中体温モニターとしての連続体温計が開発されている[16]。しかし、筆者らの開発した装置は、モーターレーシング環境下という極めて過酷な現場で適用できるシステムを想定しており、その装置開発としての新規性は高い。また、モーターレーシング独特の無線交信も可能なシステムが必須条件であり、それを具現化した従来にない「レーシングドライバー用イヤホン組込型深部体温連続計測装置[17]」の試作開発を行い、その装置の精度評価と有用性について検討したので報告する。

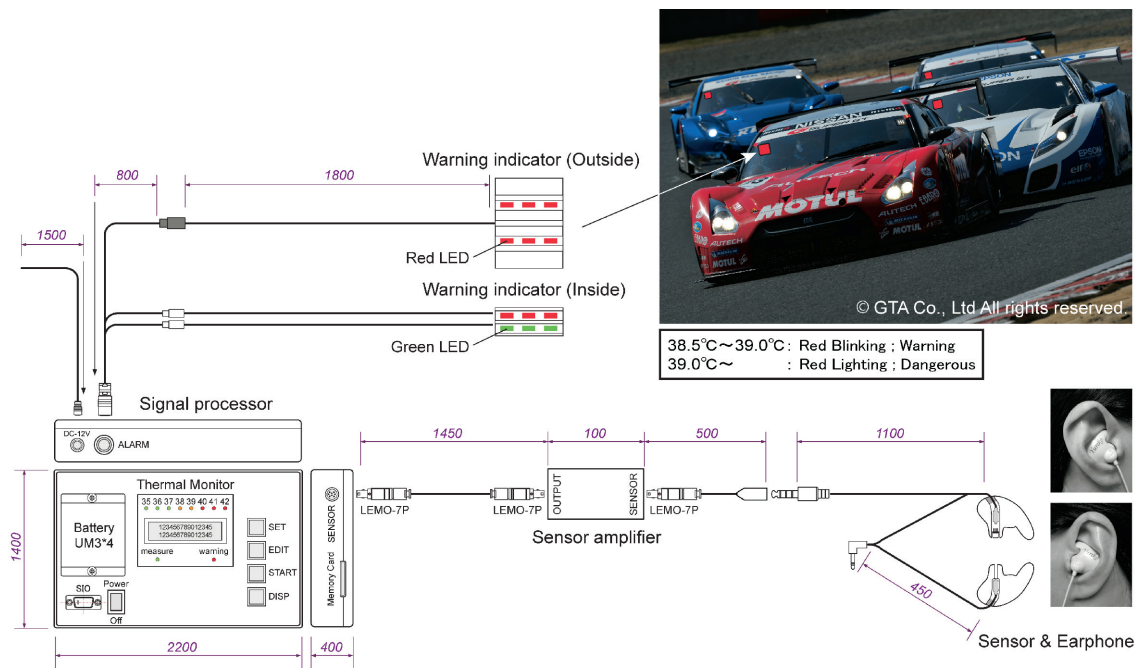
*市販のスポーツカー、スポーティーカーを改造し、現在は国内およびマレーシアでレースを開催している SUPER GT (S-GT) シリーズ、2010 年から世界選手権としてレースを行う FIA-GT シリーズ、そしてレース用に造られたスポーツカーで 24 時間耐久レースを行うウル・マンシリーズなどに代表される。

2. 装置と実験方法

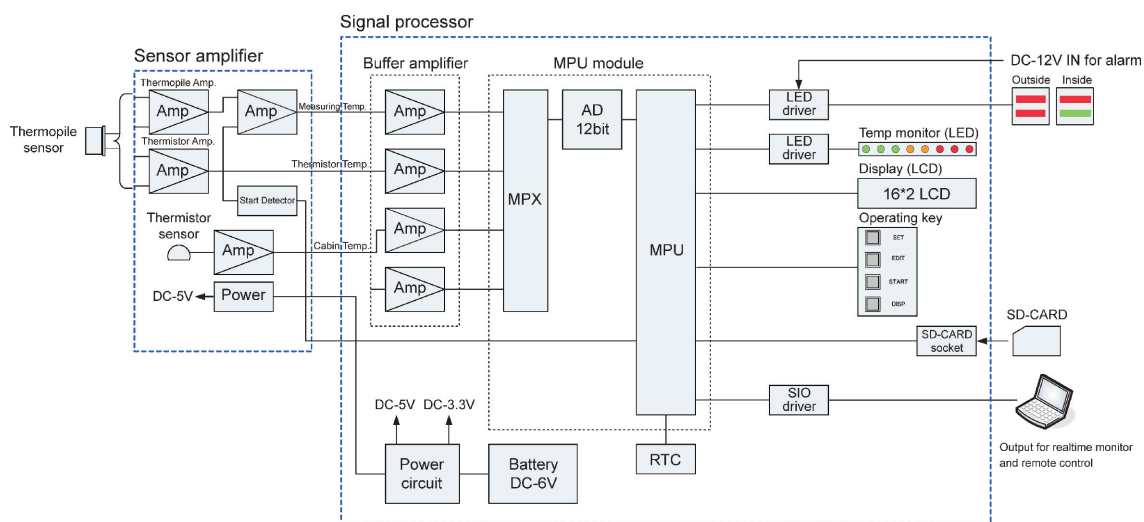
2.1 装置の概要

図 1 にドライバー用イヤホン組込型深部体温連続計測システムの構成(a)と装置のブロック線図(b)を示す。図 1(a)に示すように、システムは、センサ部、センサアンプ部、信号処理部、そして警報表示部から成る。ドライバーが装着するイヤーマールドカスタム型のイヤホンに小型赤外放射式鼓膜温度測定センサ（サーモパイルセンサ）を内蔵し、運転中のドライバーの鼓膜温を計測し、設定された温度閾値を超えた事をフロントウインドウに配置した警告ランプで知らせるシステムを開発した。また、計測値は装置に内蔵された SD メモリカードにも記録され、別途取り出して解析を行う事が出来る。レース現場で使用する事を前提にした装置であることから、下記のような基本仕様とした。

- ・レースでは両耳での無線交信（片耳だけでは外来ノイズで聞こえないため）が必須であるため、片側の鼓膜温センサは、個人適合耳型のイヤーマールド部にレース専用



(a) Outline of the system



(b) Schematic block diagram of the sensor amplifier and signal processor

図1 イヤホン組込型深部体温連続計測システムの構成とブロック線図。上段右の写真は、株式会社GTアソシエーションより提供。

Fig. 1 Outline of a whole system for the measurement of core body temperature built-in earphone (a), and schematic block diagram of the sensor amplifier and signal processor (b). The inserted photo in the upper right part is provided by GTA Co., Ltd.

小型スピーカー (KT556-S, KTEL (株)) と共に内蔵した。図2にイヤーマールド部のハウジング構造を示す。図2(a)のようにセンサ側は、サーモパイルの背後にスピーカーを配置し、音響ガイド溝を通して交信できるような工夫を施した。なお、イヤーマールドは個々人の耳オス型をベースに3次元光造形機 (uPrint 3D Printer, Stratasys Inc.) にて作製した。

・緊急時にドライバーが脱出する際の妨げにならないように、センサ部と本体部を分割させ、センサアンプ部を中

継点として容易に着脱できるコネクタで接続できるようにした (ケーブルの途中一カ所は一定以上の張力がかれば外れる構造)。また、運転席に乗り込んでからセンサジャックとインターカムコネクタを接続する事により計測が開始されるように設計されており、特別な操作を一切必要とせず、自動的に計測が行われる仕組みを実現している。

・鼓膜温表示ユニット (警報表示部) は、車外と車内からも点灯確認できるようにした。また、注意域が赤点滅、

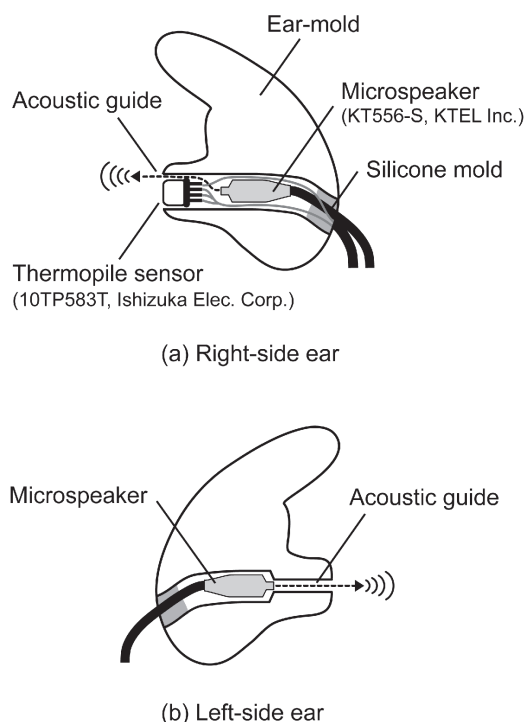


図2 イヤーモールド部のハウジング構造

Fig. 2 Schematic drawing of the ear-mold housing made of ABS resin material.

危険域が赤点灯とした。それ以外は消灯である。サーキットでは每周必ずピット前のコントロールラインをマシンが通過する。またサーキットの随所に中継カメラが配置されるため、ピットウォールやテレビ画面を通して目視で警報表示をモニタリング可能であることから、本試作装置ではこのような簡易システムとした。また、スタッフを含めた全ての関係者が確認できるところにも大きなメリットがある。

- ・センサアンプ部に車内温度のセンサを実装した。
- ・各ユニットは難燃性材料を利用した。また、耐振動性、耐強度にも考慮した。
- ・計測結果は本体に装着したSDメモリーカードに記録されるが、同時にシリアル回線を通してサンプリング毎に出力されており、別途無線通信インターフェース等を追加すれば、レース中の体温情報をリアルタイムに計測することが可能なように設計した。
- ・小型軽量化が要求されるため、単電源回路とした。また、装置の駆動電源は車載バッテリーから供給する事も可能ではあるが、車載システムとは独立して稼働可能なようにバッテリーを内蔵した。なお、警報LEDには、高輝度LEDを採用しているため、常時車載バッテリーからの電力で駆動されるように設計した。

本システムにおける温度演算は、図1(b)に示すように、サーモパイル素子(10TP583T, (株)石塚電子:φ5mm, 時定数15ms), センサアンプ, マイクロプロセッサモジュール(MPU: dsPIC30F5011-30I, マイクロチッ

プテクノロジージャパン(株))にて実行される。サーモパイル素子の信号は、センサアンプにて、サーモパイルによる出力値、サーミスタ出力値に変換され、センサアンプ内に実装された車内温度センサ(LM35, ナショナルセミコンダクタージャパン(株))の出力値とともに信号処理部へ送られる。センサアンプからの信号は、信号処理ユニット内で、バッファアンプを介してMPUモジュールに入力され、MPU内蔵のAD変換器(12bit)によりデジタル値に変換、内蔵のソフトウェアにより校正処理を行った後、サーモパイルによる温度計測値、サーミスタ温度計測値、および車内温度が計測時刻データとともに、本体に内蔵のSDメモリーカードに保存され、同時にシリアル回線にも同データが出力される。

計測は、センサアンプ内でサーミスタ温度信号の変化によりセンサーケーブルが接続された事を検知し、MPUに計測開始信号が送られる事で開始され、予め設定された測定間隔で計測が実行される。計測が開始されると、計測中を示すLEDが点灯すると共に、LCDに時刻とサーモパイルによる温度計測値、車内温度が表示され、温度モニターLEDの対応したLEDを点灯させる。計測中に鼓膜温が予め設定された警報レベルLowを超えた時は警報LEDが点滅、警報レベルHiを超えたときは警報LEDが点灯し、同時にフロントガラスに設けられた警報表示を駆動する。

サーモパイル(熱電堆)は複数の熱電対を直列接続し、それを車輪のスポークのような形にして、その車軸に当たる位置に温接点を集中させ、それを感熱部分としたものである。一方、冷接点はサーモパイル素子内に組み込まれたサーミスタで計測されたセンサ自身の温度である。このように感熱部分とセンサ自身の温度差を利用して、鼓膜温は「サーミスタの温度計測値とサーモパイルの温度計測値の和」で求められる。本システムにおける鼓膜温センサは、センサ自身が耳穴内に装着されるため、体温上昇あるいは外気温の上昇と共にセンサ自身の温度も上昇する。よって、仮に「鼓膜温<センサ自身温」になった場合でも正しく計測する事ができる様に工夫を施した。すなわち、具体的な回路構成は、まず、サーモパイルの感度とサーミスタの感度が同一になる様に回路ゲインを設定する。その上でサーモパイル温度計測回路の基準電圧にサーミスタ温度計測値を適用すると、鼓膜温を、サーミスタの温度計測値とサーモパイルの温度計測値の和として得る事が出来る。なお、本システムに利用されているサーモパイルは、その原理上、サーミスタとサーモパイル(熱電対)の2種類の内蔵センサについて温度校正をする必要がある。この温度校正に関しては、黒体炉(Thermometer comparator, Elec. Temp. Instruments Ltd.)と標準温度計(Reference thermometer, Elec. Temp. Instruments Ltd.)を利用して、得られたA/D値(鼓膜温度とサーミスタ温度)から校正直線の係数(34℃から44℃の間を2℃ピッチで計測)を

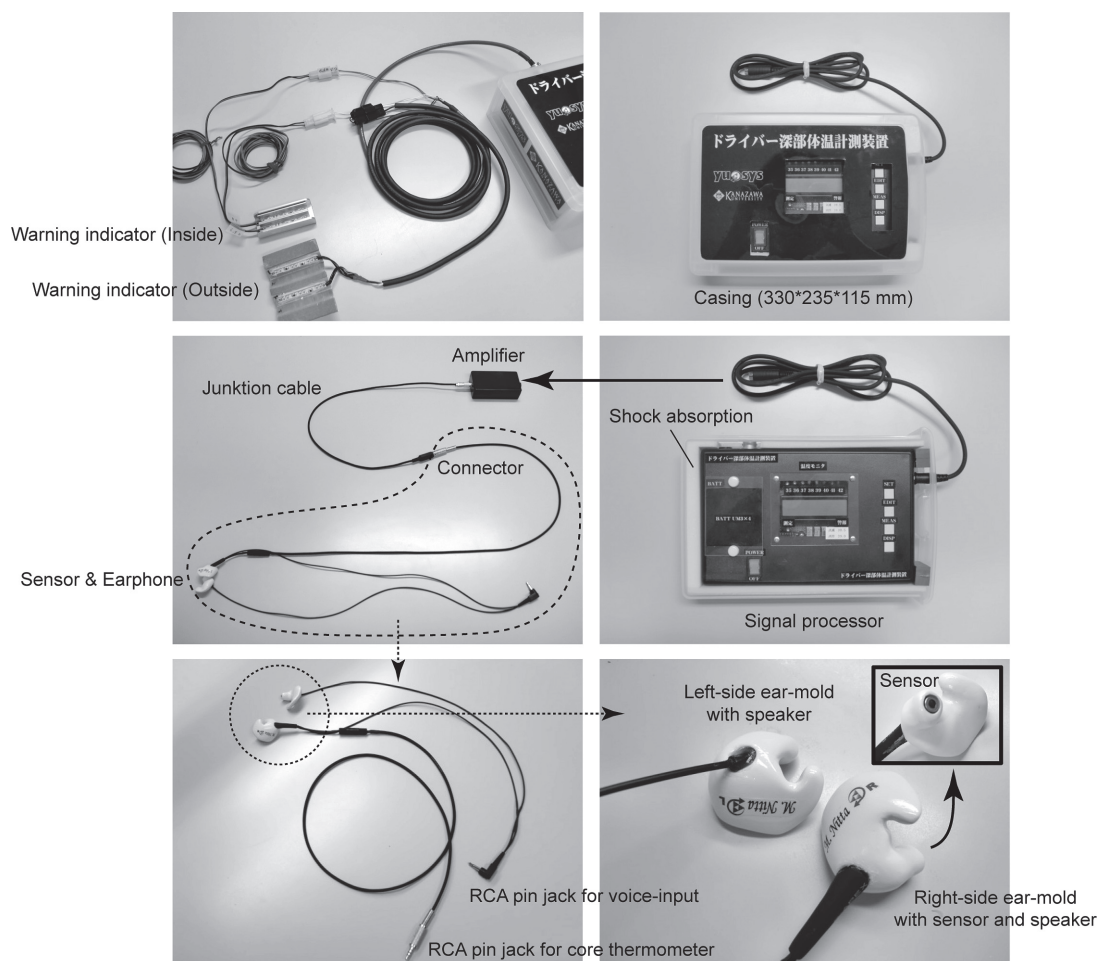


図3 ドライバー用イヤホン組込型深部体温連続計測システムの外観

Fig. 3 Overall view of the core body temperature measurement system designed for a GT driver.

定め、それを MPU に記憶させることで測定対象温度値として変換した。

以上のような設計仕様の下で試作開発されたセンサ部とシステム全体の外観を図3に示す。

2・2 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舌下温とした）とドライバー深部体温計測装置（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での対比試験となる。

被験者：実験に参加した被験者は、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康成人男性 10 名（年齢：21.8 ± 1.0 (S.D.) 歳，身長：173.0 ± 5.0 (S.D.) cm，体重：64.6 ± 7.8 (S.D.) kg）であった。

計測対象と装置：右側鼓膜温は本システム（赤外放射式）、左側鼓膜温・舌下温・湯温は接触式サーミスタ温度

計（デジタル温度センサ DS103, (株)テクノセブン：精度 ± 0.02℃，分解能 0.001℃）で計測した。サンプリング時間はそれぞれ 30 s であった。図4に鼓膜温センサの取り付け方法を示す。右耳センサ（図4(a)）は、サーモパイルを組み込んだ個々の耳型に合ったイヤーマールドタイプを、左耳センサ（図4(b)）は、スポンジクッションの中心に高感度サーミスタセンサ（SXX-67 (φ3), (株)テクノセブン，時定数 0.7~0.8 s）を仕込み、医師立ち会いの下、細心の注意を払いながら鼓膜に軽く接触させながら印象材を流し込んで固定した。さらにセンサのズレを防ぐため、両耳にオーバーヘッド型ヘッドフォン（MDR-XB700, ソニー(株)）を装着させた。センサの鼓膜への接触は、被験者本人の感覚を聞きながら慎重を期してセットアップを行ったが、確実に鼓膜に接触しているという明確な根拠はなく、鼓膜極周辺の雰囲気温を反映している可能性もある。舌下温と湯温は、同センサをそれぞれ舌下と浴槽壁に固定した。

実験手順：被験者は金沢大学自然科学研究科 3 号棟 3A624 の浴室付きのヘルスケア実験室に入室し、十分な水分補給をした後、水着に着替え、センサ類を装着して椅

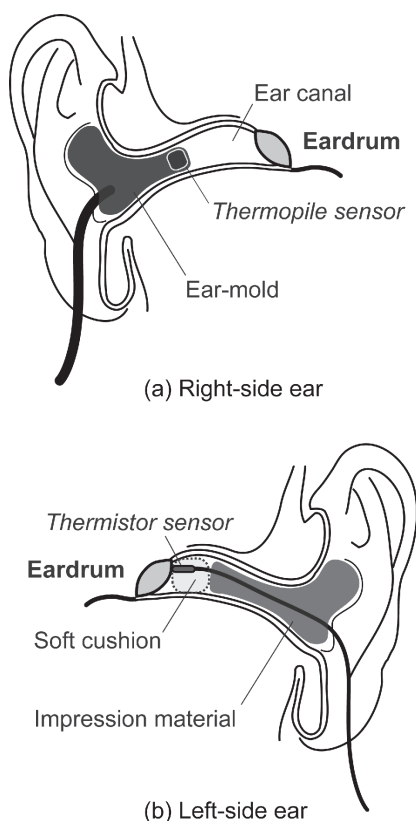


図4 精度評価試験における鼓膜温（非接触型：(a)，接触型：(b)）センサの取り付け方法

Fig. 4 Attachment configurations of the non-contact ((a): Right-side ear) and the contact ((b): Left-side ear) body temperature sensors for the comparative evaluation of accuracy.

子に着座した。その後、10分間の安静休息を経て全身浴を開始した。実験では、予め42℃に調整されたお湯に約30分入浴させ、その後浴槽に加水冷却しながら水温約27℃まで下げた。入浴時間は60分間であった。

解析：開発装置で測定した温度データは、深部体温として信頼性が高いとされる鼓膜温[14, 15]の接触計測および舌下温との相関関係ならびに *Bland-Altman* 分析[18]を用いて、比較検討した。相関分析には *Spearman* 順位相関係数を用いてその係数の有意性検定も行い、有意水準は1%と0.1%を使用した。使用した統計解析ソフトはSPSS (SPSS Release 18.0J, SPSS Japan Inc.)であった。*Bland-Altman* 分析では接触鼓膜温および舌下温との差を平均値<0.5℃、ならびにばらつき (± 1.96 S.D.) <0.5℃をもって深部体温としての信頼性が高いとした。

2.3 実車試験の方法

2010年S-GTインターナショナルシリーズ第4戦マレーシア（於：セパン国際サーキット）の練習走行セッション（現地時間：AM10:00～11:45）にて、本システムのテスト計測を行った。

被験者：実験の被験者は、S-GTチームAに属する2名のプロドライバー（#01/#02）であった。両選手は日頃

からフィジカルトレーニングを積んでおり、「暑熱環境」に対しては強いと言われている。テスト計測には、両選手ともボランティアでご協力頂いた。

計測対象と装置：鼓膜温 (T_{ed} ℃) は本システムを、ドライバーを取り巻く環境温湿度、すなわちレーシングスーツ内温度 ($T_{a(suit)}$ ℃) と湿度 (RH_{suit} %), ヘルメット内温度 ($T_{a(met)}$ ℃) と湿度 (RH_{met} %), キャビン内温度 ($T_{a(cabin)}$ ℃) と湿度 (RH_{cabin} %), および外気温 (T_a ℃) と外気湿度 (RH %) は、超小型温湿度記録計ハイグロクロン (DS1923, KN ラボラトリーズ(株)) を使用した。分解能は、温度; 0.5℃, 湿度; 0.6% RH (数値補正により、表示最小単位にならない場合がある), 測定範囲は、温度; -20～70℃, 湿度; 0～95% RH (0 ≤ 温度 ≤ 50℃の時), 測定精度は、温度; ± 1.0 ℃ (温度が-5～50℃の範囲), 湿度; ± 5 % RH (温度25℃で湿度20～80% RHの場合), 測定間隔は1s～130min (本テストでは30s), 寸法は17φ×6H mm, 質量は3.3gであった。なお、ハイグロクロンの装着位置は、スーツの体幹部、ヘルメットの頭頂部、キャビン内のドライバー頭頂部付近、そしてピット内であった。ただし、ドライバーはアンダーウェアに冷却管を縫い付けたタイプ（体幹部の冷却水循環）のクールスーツユニットによるクーリング介入を行っている為、スーツ内温湿度はその影響を受けている。

試験手順：本大会練習走行セッション中の計測であった為、試験手順はチームAのレース戦略に従った。105分間の本セッションでは2名のドライバーが、1回ずつテスト走行を行い（#01:85min, #02:20min）、それぞれタイヤ交換やマシンセッティング調整のために数回ピットインした。但し、本セッションは決勝に向けたマシン調整が目的であるので、ピット回数や停止時間はチーム任意である。因みに決勝では、タイヤ交換・給油・ドライバー交替などにミスが無ければ、ピットイン静止時間は約30秒である。練習走行期間中ドライバーはマシンに乗り込んだままであり、調整が終わると直ぐにコースに戻った。上記計測諸量は全て自動的に記録された。

3. 結果

3.1 精度評価試験

図5は今回測定を行った鼓膜温（非接触式／接触式）と舌下温、および体温管理に利用した湯温の典型的な経過を辿った同時記録例である。本システムの鼓膜温は、深部体温としての接触鼓膜温と舌下温に良い追従性を示した。

図6に接触鼓膜温 $T_{ed-cont}$ および舌下温 T_{subl} の本システムで得られた非接触鼓膜温 T_{ed} に対する相関関係、ならびに *Bland-Altman* 分析の結果を示す。非接触鼓膜温 T_{ed} は、接触鼓膜温 $T_{ed-cont}$ と強い相関関係を示した ($r = 0.994$, $n = 1119$, $p < 0.001$)。 *Bland-Altman* 分析では、両者の差の平均が+0.09℃と、絶対誤差が小さい値で推

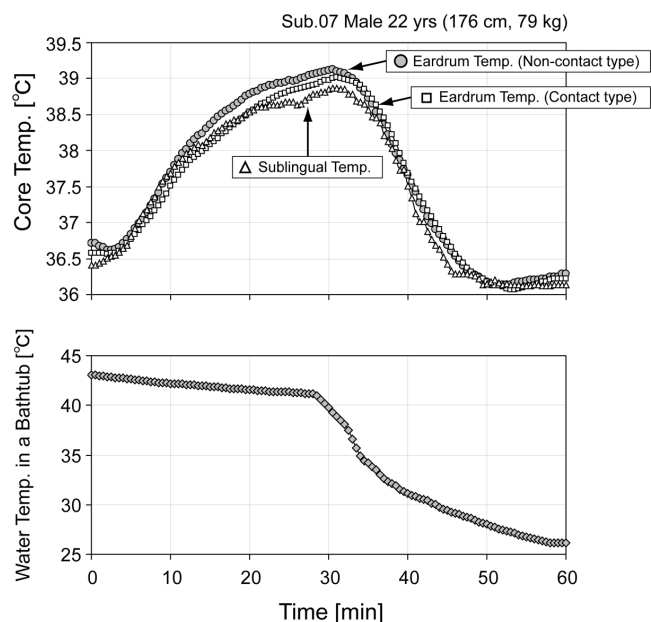


図 5 鼓膜温（非接触／接触）と舌下温（上段），および湯温（下段）の同時記録例

Fig. 5 Typical trend-charts showing simultaneous recordings of the core body temperature measured by the non-contact and the contact type temperature sensors together with the sublingual temperature sensor (upper record), and the water temperature in a bathtub (lower record).

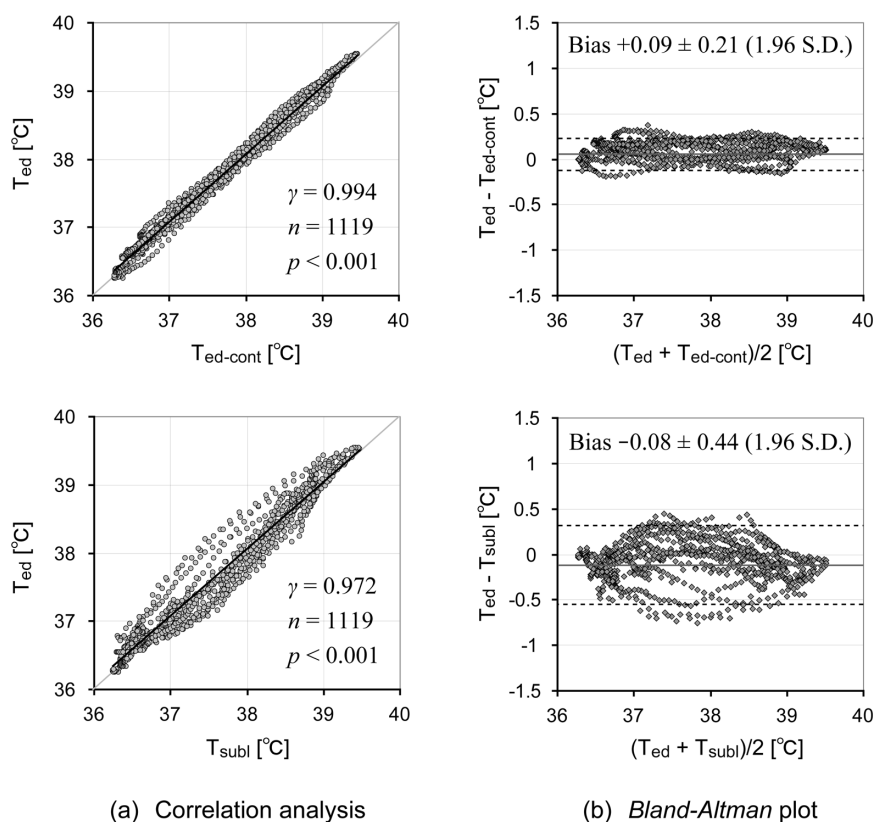


図 6 (a) 接触鼓膜温 ($T_{ed-cont}$) および舌下温 (T_{subl}) の非接触鼓膜温 (T_{ed}) に対する相関関係, (b) それぞれの Bland-Altman 分析.

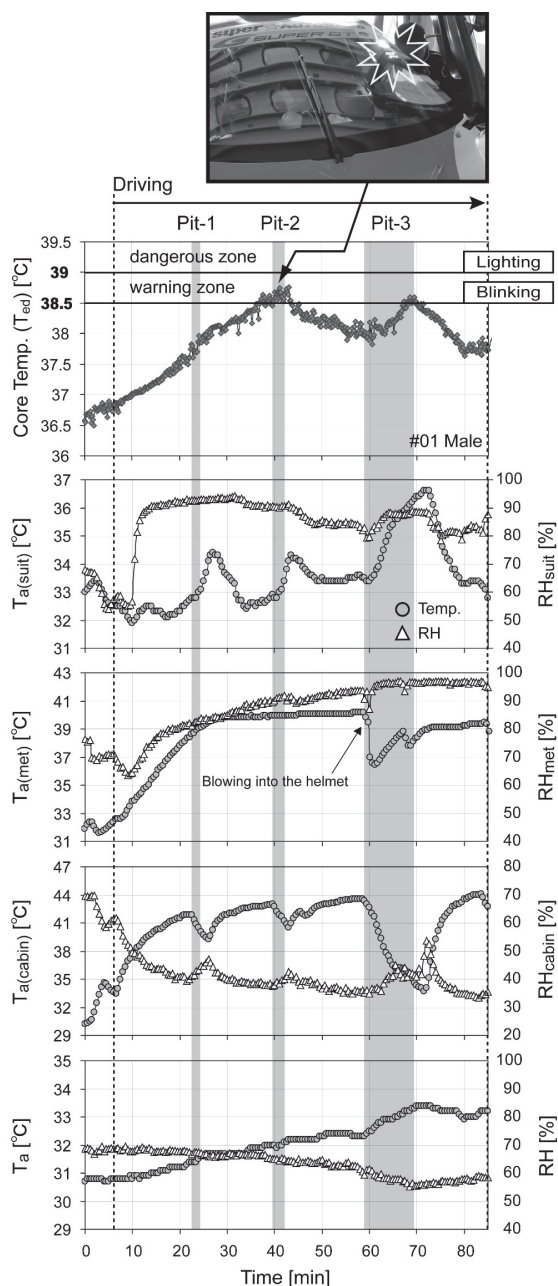
Fig. 6 (a) Relationship between the contact eardrum temperature ($T_{ed-cont}$) and the non-contact temperature (T_{ed}) (upper panel), and that between the sublingual temperature (T_{subl}) and T_{ed} (lower panel), and (b) their Bland-Altman plots.

移した。ばらつき (± 1.96 S.D.) も 0.21°C と小さかった。縦と横軸に相関がないので、比例誤差もなかった。非接触鼓膜温 T_{ed} と舌下温 T_{subl} との間にも強い相関関係が認められた ($r=0.972$, $n=1119$, $p<0.001$)。Bland-Altman 分析では、両者の差の平均が -0.08°C と、舌下温の方が高く測定される傾向があったが、ばらつきは 0.44°C と小さかった。比例誤差もなかった。

3.2 実車試験

図 7 に 2010 年シーズン S-GT 第 4 戦マレーシアグランプリ (於：セパン国際サーキット) の練習走行セッションで得られた # 01 の各種諸量の時系列変化を示す。横軸は時間 (min)，縦軸は上から順に、本システムで得られた鼓膜温 T_{ed} ，レーシングスーツ内温度 $T_{a(suit)}$ と湿度 RH_{suit} ，ヘルメット内温度 $T_{a(met)}$ と湿度 RH_{met} ，キャビン内温度 $T_{a(cabin)}$ と湿度 RH_{cabin} ，および外気温 T_a と外気湿度 RH を示したものである。

試作機は灼熱環境下の実レース状況車内で正常に動作した。また、走行中の無線交信も良好であったとの報告を受けた。鼓膜温 T_{ed} は走行開始から徐々に危険な水準 (最大 38.8°C) まで上昇し、2 度目のピット直前に警報表示 (点滅) をグランドスタンドから目視で確認できた。同図の最上段に示す写真は、同タイミングでピットに戻ってきた時に撮影されたものである。その後、鼓膜温 T_{ed} はドライ



Note: $T_{a(suit)}$ is the temperature in racing suit, and extremely compact-size thermo-hygrometer was placed on the cooling suit unit at truncal site.

図7 2010年S-GTインターナショナルシリーズ第4戦マレーシア（於：セパン国際サーキット）の練習走行セッションで得られた各種諸量の時系列変化と解析結果例。縦軸は上から順に、本システムで得られた鼓膜温 T_{ed} 、レーシングスーツ内温度 $T_{a(suit)}$ と湿度 RH_{suit} 、ヘルメット内温度 $T_{a(helmet)}$ と湿度 RH_{helmet} 、キャビン内温度 $T_{a(cabin)}$ と湿度 RH_{cabin} 、および外気温 T_a と外気湿度 RH を示す。

Fig. 7 Typical trend-charts showing simultaneous recordings of the core body temperature (T_{ed}) obtained by the present system, the ambient temperatures ($T_{a(suit)}$ and $T_{a(helmet)}$) and relative humidities (RH_{suit} and RH_{helmet}) in the racing suit and the full-face helmet, respectively, and the air temperatures ($T_{a(cabin)}$ and T_a) and relative humidities (RH_{cabin} and RH) in the cabin and pit, respectively, obtained in a professional driver in the practice session of 2010 SUPER GT International Series Round 4 MALAYSIA being held at the Sepang International Circuit.

バーを取り巻く温熱環境の変化や、自身の発汗制御（発汗量の計測を行ったわけではないが、走行直後は全身汗でびしょりであった）で体温閾値辺りをダイナミックに変化していることが判る。

レーシングスーツ内温度 $T_{a(suit)}$ はクールスーツの影響で最大 36.6°C と抑えられたが、湿度 RH_{suit} は最大 95.5% まで上昇した。ヘルメット内温度 $T_{a(helmet)}$ は最大 39.6°C 、湿度 RH_{helmet} は 95.9% であった。ピットイン3回目にはチームスタッフがヘルメット内に強制送風を行った為、急激な温度低下が見て取れる。キャビン内温度 $T_{a(cabin)}$ は最大 43.9°C 、湿度 RH_{cabin} は 69.5% から 33.3% まで低下した。また、気温 T_a は最大 33.4°C 、湿度 RH は大きな変化なく平均 63.6% であった。

4. 考 察

深部体温の異常をレース中に判定できる新たな装置を開発した。計測対象は内頸動脈温を直接反映し、深部体温として信頼性が高いとされる鼓膜温[14, 15]とし、赤外放射式のセンサをドライバーの使用するイヤーマールドに埋め込み、交信用のイヤホンと一体化した。

本システムで得られる鼓膜温の精度を評価するために、まず実験室レベルで接触式鼓膜温と舌下温との対比試験を行った。その結果、接触式鼓膜温は本装置の非接触式鼓膜温と極めて強い相関関係を認め、また *Bland-Altman* 分析により、深部体温としてのモニターとして十分信頼できるものであることが明らかとなった。この信頼性は、同時に比較検討した舌下温よりも高いものであった。これは、本システムが“鼓膜温”を正確に反映していることを意味する。

図6に示すグラフからは、 36.5°C の平熱辺りと 39.5°C の部分のみ一致性が良いように見える。これに関しては、サーモパイルセンサとサーミスタセンサ自身の持つ時定数の違い（応答性）がデータとして表れた可能性がある。すなわち、図5から読み取れるように、急激な温度勾配が発生している過渡的な部分での一致性が比較的悪い。この傾向は全ての被験者に見られ、これが図6のようなデータの塊を形成していると考えられる。しかし、その時定数の影響による誤差は最大約 0.3°C 程度（接触鼓膜温との比較）であり、実用に際しては問題無いレベルと言えるであろう。

以上のように鼓膜温連続計測としての精度は、実用に供し得るレベルであった。しかし、レース中という極めて過酷な条件下で本システムが動作するかどうかはまた別の課題である。そこで、2010年S-GTインターナショナルシリーズ第4戦マレーシアにて、本システムのテスト計測を行った。その結果、本システムはレース現場でも正常に動作し、プロドライバーの貴重なデータを得ることができたと共に、本システムの更なる課題点も得られた。図7が実

際に得られたデータの一例であるが、ドライバーはクーリング介入（クールスーツとヘルメット内送風）していたのにも関わらず、鼓膜温は危険な水準まで上昇した。その後の反応は、既報[4]におけるアマチュアドライバーの鼓膜温反応と異なっているのが興味深い。アマチュアドライバーの鼓膜温は、個人差を持ちながら過渡的な上昇を示し、途中回復することなく推移した。一方、# 01 選手は暑熱順化しているようで、その水準に達し始めると多量の発汗によって深部体温の上昇を抑制していた。発汗量の定量的データは今回の実車試験では取得できなかったが、図 7 の 40~60 分の温熱環境を鑑みると、その期間の約 0.5℃の鼓膜温の下降は発汗調節によるものであることは明らかである。プロアスリートは、大方この発汗体温調節による生理機能が長けていると思われるが、個人差、水分の補給具合、体調などによっては、相変わらず熱中症の危険性は潜んでいるといえる。このプロドライバーの生理機能の解明は、例数を増やし改めて報告したい。なお、S-GT 練習走行セッション中は、タイヤ交換やマシンセッティングの微調整の為に適当なタイミングで数回ピットに戻って来るが、この時エンジンはカットするためにクールスーツユニットやヘルメット内へのブローも同時に止まってしまう。この時、ドライバーは乗車したままであるため（簡単に乗り降りできないため）、スーツ & メット内環境が悪化し、深部体温も上昇を始める。このような状況がピット時間の長かった「図 7—Pit-3」から容易に判り、本法による深部体温計測の重要性も確認できる。ピット中の車のドアは開放したままであるため、気温近くまでキャビン温は徐々に下がるが、一方でドライバー皮膚境界の環境は逆に悪化しているという訳である。特に皮膚表面の面積が広いスーツ内環境の影響が大きいことが判る。

さて、今回の実車試験を通して新たな課題も提起された。すなわち、①信号処理部（本体部）の更なる小型化、②イヤーマールド部の装着性向上、および③レース本番で使うための取り扱い易さ、が挙げられる。まず、①の小型化であるが、試作機レベルでは可能な限りの小型化は成功しているものの、今後はさらなる軽量化・小型化を図る必要がある。次に②の装着性であるが、今回の試作では ABS 樹脂を利用したため、堅さによる違和感が避けられない。今後は、より違和感のないシリコンなどの材質も検討していく予定である。最後に、③の取り扱い易さであるが、これは主にセンサ部（ドライバー側）と信号処理部（マシン側）の接続方法である。S-GT では、「レース中に少なくとも 1 回はドライバー交代をしなければならない」、「ピットストップ時に一度に作業することができるのは 5 名まで」というルールがある。よって、降車したドライバーは、次に乗り込んだドライバーの無線交信用のジャックを“素早く正確に”接続しなければならない。この状況で、本システム用の接続作業までドライバーに行わせると

いうことになる、ピット作業で 0.1 秒でも早くという緊迫した状況の中では実際問題として難しい。従って、無線交信用接続システムと一体化するなどして容易に脱着できるような改良、あるいはブルトウズなどを利用した無線化が必要不可欠と思われる。

これらの課題点をクリアし、本装置システムがレース本番に導入されれば、選手やチームの意向を問わず競技運営側が強制的にピットインの指示を与え、事故の危険を未然に防ぐことができる。これはチーム側からするとネガティブなシステムと成り得るが、「深部体温の異常な上昇は選手のドライビングパフォーマンスを低下させ、競技結果に大きな影響を与えることが示唆されている[4]」ことを鑑みると、視点を変えればレースの戦略にも利用できると考えられる。モータースポーツは、ドライバーとチームスタッフを含めたチームスポーツである。チーム全員がドライバーの状態を「定量的」に把握した上でレースをマネージメントできることは極めて大きな意味を持つのではないだろうか？“あの時にドライバー交代を指示していれば、トラブルも無くレースに勝っていたかもしれない…”ということが起こり得る可能性がある。

当然のことであるが、ドライバーへの最適なクーリング介入が熱中症予防の本質であり、現在各チームが使用しているクールスーツユニットの他に、最近ではレース用の新たな小型エアコンシステムも精力的に開発されている[9, 19]。一方、「エアコン」というだけで快適な車内空間を想像しがちだが、レーシングマシンの場合、ドライバーの深部体温を危険な水準へ向かうのをできる限り緩和させる、言わば「生命維持装置」という位置付けである。事実、図 7 で示されているように、ドライバーは冷却管をアンダーウエアに縫い付けたタイプのクーリング介入を行っているが、深部体温は危険な水準へ向かっているのが判る。もし、クーリング介入がなかったことを考えると、その危険性は想像に容易い。しかし、実際、このようなクーリングシステムはレース中に故障したとの報告も多い。従って、「ドライバークーリング+深部体温の異常判定」といった二重の安全対策が今後強く推進されていくべきであろう。

5. 結 論

ドライバー用イヤホン組込型深部体温連続計測装置を開発し、その精度評価とレース現場でのテスト計測を行った。その結果、本装置で得られた非接触式（赤外放射式）鼓膜温は、対側の接触式鼓膜温ならびに舌下温と強い相関を示し、*Bland-Altman* 分析においても深部体温のモニターとして十分信頼できるものであることが明らかとなった。また、レース現場においても本システムが正常に動作し、その有用性が実証された。今後改良の余地は残されているものの、モータースポーツ中の更なる安全性を確保する新たなシステムとして、日本初の安全技術を全世界に広

げるチャンスでもあろう。

謝辞 本研究の一部は、株式会社ユーシスの研究支援によって行われた。ここに記して謝意を表する。精度評価試験は、本学理工研究域機械工学系人間適応制御研究室内に設置されたヘルスケア実験室で実施されたものであり、同研究室スタッフ各位に感謝したい。また、同試験にご協力頂いた、金沢大学の井田孝之氏、後藤雄二郎氏、板坂優希氏、宮崎慎平氏、花木翔太氏に深謝する。また、当該装置のテスト計測にご協力頂いた Autobacs Racing Team Aguri (ARTA) と apr Racing のスタッフの皆様、そして株式会社 GT アソシエーション執行役員の皆様にもこの場をお借りして深謝する。

文 献

1. Watkins ES: The physiology and pathology of Formula One grand prix motor racing. *Clin Neurosurg.* **53**: 145-152, 2006.
2. 高橋規一: GT ドライバの生理. *自動車技術.* **63**(10): 90-95, 2009.
3. 山越健弘, 山越康弘, 松村健太, 廣瀬元: モータースポーツ時の生体情報反応-レーシングカート走行による基礎的検討-. *生体医工学.* **47**(2): 154-165, 2009.
4. 山越健弘, 松村健太, 山越康弘, 廣瀬元, 高橋規一, Peter Rolfe: 高温熱ストレス環境下におけるレーシングドライバー深部体温の連続計測と解析. *生体医工学.* **48**(3): 269-280, 2010.
5. Yamakoshi T, Matsumura K, Yamakoshi Y, Hirose H, Rolfe P: Physiological measurements and analyses in motor sports: a preliminary study in racing kart athletes. *Eur J Sport Sci.* **10**(6): 397-406, 2010.
6. Brearley MB, Finn JP: Responses of motor-sport athletes to V8 supercar racing in hot conditions. *Int J Sports Physiol and Performance.* **2**: 182-191, 2007.
7. 窪田英樹, 山越健弘, 鎌田紀彦, 朝比奈亮, 浜田博之, 若松伸司: 暑熱環境における無効発汗を考慮した人体平均皮膚表面温度の予測. *日本建築学会環境系論文集.* **575**: 127-136, 2004.
8. 高橋規一: GT ドライバーを熱中症から守る取組み. *月刊消防.* **12**(5): 1-9, 2008.
9. 高橋規一: 熱中症対策 Reports. <<http://supergt.net/jp/>> (URL)
10. Jareño A, Serna JL, Cercas A, Lobato A, Uyá A: Heat stroke in motor car racing drivers. *Br J Sports Med.* **21**: 48, 1987.
11. 窪田英樹, 山越健弘, 松尾朋浩, 朝比奈亮, 浜田博之: 暑熱環境における人体内部温度の予測. *日本建築学会大会学術講演会梗概集(中国).* **D-2**: 367-368, 1999.
12. Robinson S, Turrell ES, Gerking SD: Physiologically equivalent conditions air temperature and humidity. *Am J Physiol.* **143**: 21-32, 1945.
13. Dematte JE, O'Mara K, Buescher J, Whitney CG, Forsythe S, McNamee T, Adiga RB, Ndukwu M: Near-fatal heat stroke during the 1995 heat wave in Chicago. *Ann Intern Med.* **129**: 173-181, 1998.
14. Sessler DI: A proposal for new temperature monitoring and thermal management guidelines. *Anesthesiology.* **90**: 1298-1300, 1998.
15. Moran DS, Mendal L: Core Temperature measurement. Methods and current insights. *Sports Med.* **32**: 879-885, 2002.
16. 早瀬知, 山藤道明, 木谷友洋, 佐藤順一, 並木昭義: 術中体温モニターとしてのイヤホン型赤外線式持続鼓膜温度測定の有効性. *麻酔.* **56**(4): 459-463, 2007.
17. 山越康弘: 特願 2010-175161, 2010.
18. Bland JM, Altman DG: Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet.* **Feb 8**: 307-310, 1986.
19. 鈴木豊, 竹崎大輔, 高橋規一: エアコンを使用したレースカー用ドライバクーリングシステムの開発. *自動車技術.* **63**(10): 84-89, 2009.

山越 健弘 (ヤマコシ タケヒロ)

2006 年福井大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士 (工学)。2006 年金沢大学大学院自然科学研究科システム創成科学専攻信頼性システム工学講座 (寄附講座) 特任准教授に就任。現在に至る。生体情報の無侵襲・無拘束計測と解析, 信頼性工学, 健康・福祉科学, スポーツ科学, 安全科学, 心理生理学, 温熱生理学に関する研究に従事。

日本生体医工学会, 計測自動制御学会, 日本自動車技術会, IEEE Engineering in Medicine & Biology Society などに所属。



田中 直登 (タナカ ナオト)

1976 年大阪電気通信大学電子工学科卒業。1976 年北斗電子工業株式会社に入社。一貫して特注計測関連装置の開発, 設計に従事。2009 年金沢大学理工研究域機械工学系技術補佐員に就任。現在に至る。非破壊検査装置の研究開発, 無侵襲生体計測, 在宅ヘルスケアモニタ等の研究開発, 関連機器の開発等。

日本生体医工学会などに所属。



山越 康弘 (ヤマコシ ヤスヒロ)

2010 年千葉大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士 (工学)。2004 年 TYT 技研株式会社に研究員として入社, 2007 年株式会社ユーシス代表取締役, 現在に至る。無侵襲生体計測機器, 健康・福祉機器, スポーツ機器に関する研究開発に従事。

日本生体医工学会, IEEE Engineering in Medicine & Biology Society などに所属。



松村 健太 (マツムラ ケンタ)

2007 年北海道大学大学院文学研究科博士後期課程修了。博士 (文学)。2006 年日本学術振興会特別研究員 DC2, 2007 年同 PD, 2008 年国立精神・神経医療研究センター精神保健研究所流動研究員, 現在に至る。ストレス負荷時の心理生理的反応, 精神疾患 (PTSD) のバイオマーカー, スポーツ時の心理生理的反応, 運転適性を測定するソフトウェア開発, 生体計測機器の開発に関する研究に従事。

日本心理学会, 日本生理心理学会, 日本健康心理学会, 日本トラウマティック・ストレス学会などに所属。



Peter Rolfe (ピーター ロルフ)

Final affiliated college: 1975. PhD; Royal Postgraduate Medical School, University of London. 1980. MA status, Green College, Oxford University.

Career summary: Professor Rolfe has held professorial positions in the UK, Italy, and China. Whilst founding Director of the Biomedical Engineering Centre at Oxford University. He also set up two spin-out companies. He has been Editor-in-Chief of two international biomedical journals, has for many years acted as a consultant to the World Health Organization, been the Director of a WHO Collaborating Centre, and currently acts as an assessor for EU research programmes.

Special field of study: Physiological measurement, micro and nano sensors, cellular engineering, tissue engineering, perinatal technology, environmental monitoring.

Society Memberships: Fellow Royal Society of Medicine; Member IEEE; Founding Fellow International Academy of Medical & Biological Engineering.



廣瀬 元 (ヒロセ ハジメ)

2003 年東北大学大学院博士後期課程修了。博士 (工学)。1998 年金城短期大学短期学部秘書学科専任講師, 同大学共同研究センター専任講師, 2006 年金城大学短期大学部ビジネス実務学科准教授, 現在に至る。X 線材料強度学に関する研究に従事。

日本機械学会, 日本材料学会などに所属。



高橋 規一 (タカハシ キイチ)

1978 年帝京大学医学部卒。西台整形外科理事長。専門は救急・外傷外科。1998 年まで S-GT (当時は JTTC) GT300 クラスに参戦。参戦中から「GT 専属レース・ドクター」の必要性を訴え続け, 1998 年シーズン終了とともに GTA 専属ドクター。以来 GT レースやテストに常に帯同し, GT ドライバーの安全対策とレース・メディカルやレース・レスキューシステムなどの統一性の構築などをアピールしてきた。本人はレースから引退したつもりは全く無く, S-GT のシーズンオフには現在でもチームからお誘いがあれば Daytona24 時間などの長距離レースには時々参戦している。

日本自動車技術会などに所属。

