

Investigation of thermal stress in racing kart athletes

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/27776

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

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

Investigation of Thermal Stress in Racing Kart Athletes

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

Abstract Motor racing drivers may be exposed to thermal stress, which can influence their performance and put them at risk of heat stroke. The aim of the work described here was to monitor core body temperature and other physiological and environmental variables continuously in racing kart drivers and to investigate the relationship between core body temperature and lap-time/lap-time-variability, the latter being an indication of driver performance. As an indication of core temperature we used the eardrum temperature, T_{eardrum} , measured with a modified, extremely-compact radiation thermometer. We also measured instantaneous heart rate, the vector magnitude of acceleration, G , sweat weight, ambient temperature and relative humidity in the racing suit and full-face helmet, $T_{\text{a(suit)}}$ / RH_{suit} / $T_{\text{a(met)}}$ / RH_{met} , road temperature, and lap-time. The measuring instruments functioned satisfactorily during karting performed on a racing circuit. In all participants ($n = 15$: 30.9 ± 6.4 S.D. yrs) during driving, we found that T_{eardrum} gradually increased from 36.8°C to 38.2°C . It is suggested that the observed rise in T_{eardrum} could be due to the G stresses to which the driver's were subjected, as heat production of the body was increased due to the increased muscle activity against G during driving. In addition, we found that the degradation of the local environment around the body ($T_{\text{a(suit)/max}} = 41.0^{\circ}\text{C}$, $RH_{\text{suit/max}} = 96.6\%$, $T_{\text{a(met)/max}} = 41.0^{\circ}\text{C}$, $RH_{\text{met/max}} = 93.5\%$) could be also be one of the major factors. We also found a statistically significant correlation between T_{eardrum} and lap-time/lap-time-variability. These results suggest that monitoring of T_{eardrum} could be of considerable importance in protecting racing driver's from heat stroke and assessing their performance during motor racing.

Keywords : core body temperature, eardrum temperature, heat stroke, motor sports, thermal stress, racing kart.

1. は じ め に

モータースポーツ競技には、オープンコックピットおよびクローズドコックピットと呼ばれるカテゴリーがある。前者は Formula 1TM をはじめとする 4 本のタイヤが剥き

出しの状態屋根のない一人乗り車両で、後者はドライバーおよびタイヤがボディーに覆われている箱型の車両でレースを行う。後者のカテゴリーのレースは、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)

2010 年 2 月 25 日受付, 2010 年 4 月 7 日改訂
Received February 25, 2010; revised April 7, 2010.

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

^{**} 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

^{***} 千葉大学大学院工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Chiba
University

[†] 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

^{†††} Oxford BioHorizons Ltd.

[‡] Department of Automatic Measurement and Control,
Harbin Institute of Technology

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ル・マンシリーズなどに代表される. 近年, モータースポーツは技術面でも構造面においても, より高度に複雑になってきており, 車両側の安全性は確保されてきているが, 競技ドライバー自身に起因する安全対策はかなり立ち遅れている. 例えば, 高温条件下でのクローズドコックピットのレースでは, 車内温度が 60℃を超える場合があり, ドライバーは深部体温, 心拍数の上昇, 多量の発汗を引き起こし, 熱中症・脱水症の危険が潜む[1, 2]. S-GT は, このドライバーの熱中症対策に真剣に取り組んでいる唯一のカテゴリーである. なお, この熱中症発症機序は深部体温上昇由来であり, 体内で処理しきれないほどの過剰の熱産生や熱放散過程に何らかの障害が起こった場合に, 深部体温が異常に上昇し熱中症を発症する. また熱中症とは, 高温・高熱の条件でエネルギー消費量の多い労働や運動をすると, 循環系や水分・塩分の代謝系に失調が生じて発症する熱虚脱症, 熱痙攣症, 熱疲労, 熱射病の急性障害を総称して呼ぶ[3]. 一般に深部体温 39℃で医療介入の必要が生じ, 40℃を超えると緊急性の高い状態(意識障害や痙攣)になると言われている.

モータースポーツはごく一般的なスポーツと異なり, 競技中の安全性確保のためにフルフェイスヘルメット, レーシングスーツ(+二重三重の防火服)/グローブ/シューズの着用が FIA (国際自動車連盟: *Federation Internationale del' Automobile*) で義務化されており, これによ

り皮膚表面からの体熱放散が大幅に制限されてしまう. また, マレーシア(セパン)で開催された S-GT のレースでは, 車内温度は 60℃以上に達することがあり, レーシングスーツ内湿度は 100%にも上昇すると報告される[1]. その温熱環境下で, オープンコックピットの車両と比べてクローズドコックピットの GT 車両は約 500 kg 重いため, 「止まらない」, 「曲がらない」, 「滑りだしたら飛んで行く」といった過酷な条件をドライバーに要求し, ドライバーに与える精神的負担が過剰に大きく, それに伴い自己発熱量もオープンコックピットより大きいと報告されている[4]. 実際, マレーシア(セパン)で開催された S-GT レースでは表 1 に示すように, 毎年多数のドライバーが重症及び軽症の熱中症を発症していることが判る. また, 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℃, 高温条件下で走行直後の深部体温が約 39℃まで上昇したとの報告もある[5].

運転中にドライバーが熱中症を発症すると意識喪失やクラッシュの危険性が高いと言われているが, モーターレース救急医療の第一人者であり, 現 S-GT メディカルデレゲートである高橋規一医師によると, 車両の挙動やラップタイムのばらつき具合からドライバーの異常を主観的に判断しているのが実情であり[6], その判断基準に不安が残る. これは運転中のドライバー深部体温をリアルタイムにモニターできれば, ドライバー状態を定量的に把握できると考えられる. しかしながら, レーシングドライバーの深部体温反応を離散的に(運転前後のみ)捉えた報告は存在

表 1 クローズドコックピットカテゴリーのマレーシア戦(セパンサーキット)における熱中症患者数

Table 1 Number of heat stroke injuries in Malaysia Grand Prix (Sepang International Circuit).

	Severe heat stroke (driver*)	Mild heat stroke (driver*)
2000 All Star	4	15
2001 All Star	3	6
2002 JGTC	4	10
2003 JGTC	Cancelled	
2004 JGTC	5	9
2005 S-GT	11	12
Note: Rush of dehydration from diarrhea		
2006 S-GT	4	8
2007 S-GT	2	6
Note: Dehydration from diarrhea in 4 mechanics		
2008 S-GT	0	2
2009 S-GT	1	1

JGTC: Japan GT Championship, S-GT: SUPER GT

*Approximately, 33 teams participated in the race every year.

する[5, 7, 8]が、それを連続的に捉えた定量的データの報告は、その計測の技術的な難題から皆無であった。そこで、本研究では、その計測上の問題を解決し、既報[7, 8]のような温熱ストレスの低い環境とは異なった結果が得られると期待できる暑熱環境下におけるモータースポーツ時の連続深部体温計測に焦点を当て、これを含む生体情報反応の明確化を目的とした実験を行った。また、既報[7, 8]で課題に挙げた深部体温とラップタイム（運転パフォーマンスの指標）の関連性に関して、高橋医師の言う運転パフォーマンスの低下からドライバーの異常（鬱熱状態）を判断することの妥当性も検証したので報告する。なお、その実験の持つ危険性を考慮し、モータースポーツの中では比較的安全であるオープンコックピットカテゴリーのレーシングカート走行を対象とした。

2. 装置及び方法

2.1 装置と計測対象量

実験は愛知県豊田市石野町に所在する石野サーキット（参考 URL : <http://www.ishino-circuit.com/>）を利用した。サーキットの見取図を図 1 に示す。実験システムは既報[7]とほぼ同様に、2 サイクルエンジン搭載のレーシングカート車体、生体計測用装置一式、環境要素計測用装置一式、データ解析・記録用ノート PC (Vostro1200, (株)デル, 東京) から構成される。本実験における計測対象量と使用した装置概要を下に列記する。

- ・深部体温としての鼓膜温 (eardrum temperature ; $T_{\text{eardrum}}^{\circ}\text{C}$) : 小型鼓膜温度記録計 (DBTL-1, ワイマチック(株), 東京) を、狭いフルフェイスヘルメット内

計測に適した形に改良したものを使用した。図 2 に示すように、温度センサには赤外放射式の超小型サーモパイル ($\phi 5\text{ mm}$) が用いられ、極めて狭いヘルメット内においても不快感無く計測できるように、センサ部のみを延長させ、処理・記録部の間は 50 cm とした。この改良により、ヘルメット装着中における鼓膜温を連続的かつ長時間の記録可能な装置となった。分解能は 0.01°C 、測定範囲は $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ 、処理・記録部の寸法は $13.0\text{ W} \times 25\text{ H} \times 4.0\text{ D mm}$ 、絶対測定精度は $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ であった。

- ・瞬時心拍数 (heart rate ; HR bpm) と 3 軸合成加速度 (G) : 瞬時心拍数は小型アクティブトレーサー (AC-301A, (株)ジー・エム・エス, 東京) を使用した。これは心電図 (ECG) の生体微弱電気信号増幅装置で、モーションアーチファクトの大きい活動下の心拍間隔時間 (RR 間隔) を高精度で記録可能であった。また、この装置には 3 軸加速度センサも内蔵されており、合成加速度 G の計測も可能であった。HR の分解能は 1 ms 、G のそれは 0.002 G 、サンプリング周波数と測定範囲はそれぞれ 1 kHz 、 $200\sim 4096\text{ ms}$ 、また G のそれは 1 Hz 、 $0\sim 4.0\text{ G}$ であり、寸法は $80.0\text{ W} \times 52.0\text{ H} \times 17.0\text{ D mm}$ 、重量は 72 g (バッテリーの重量を含む) であった。
- ・発汗量 : 高精度デジタル台はかり (FG-150KBM, (株)エーアンドディー, 東京) を利用し、運転前後の裸体重偏差 (走行直後は全身の汗を拭き取り後) から発汗量を算出した。分解能は 20 g 、ひょう量は 150 kg 、寸法は $380\text{ W} \times 118\text{ H} \times 464\text{ D mm}$ 、質量は 9.7 kg であった。
- ・体脂肪率 : 体脂肪計 (HBF-306, オムロンヘルスケア(株), 京都) を利用し、運転前の安静時に計測した。分解能は、 0.1% 、測定範囲は、 $5\sim 50\%$ であった。
- ・レーシングスーツ/ヘルメット内温湿度 ($T_{\text{a(suit)}} \cdot T_{\text{a(met)}}^{\circ}\text{C}$, $\text{RH}_{\text{suit}} \cdot \text{RH}_{\text{met}}\%$) : 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), 大阪) を使用した。分解能は、温度 : 0.5°C 、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 : $-20\sim 70^{\circ}\text{C}$ 、湿度 : $0\sim 95\%$ RH

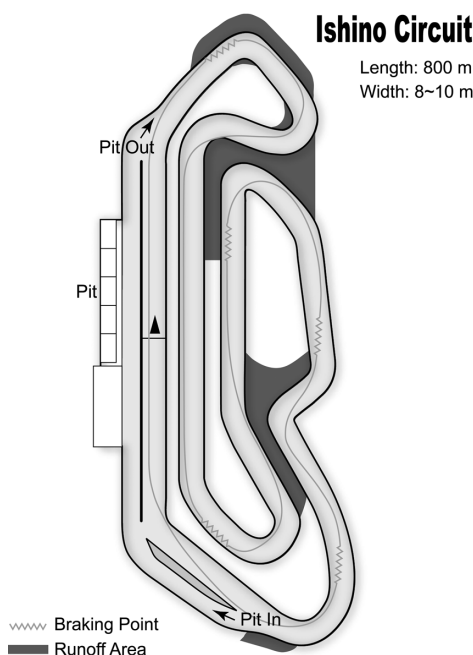


図 1 実験で利用したサーキットの見取図
Fig. 1 Schematic layout of the circuit.

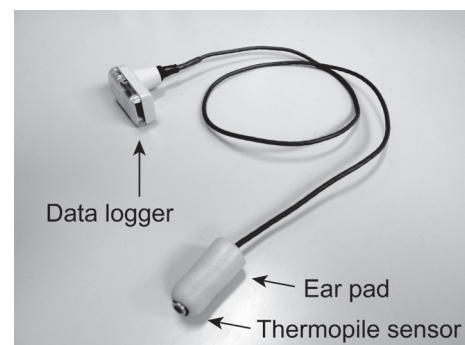


図 2 ヘルメット内計測に適した形に改良した連続鼓膜温度計
Fig. 2 Modified eardrum thermometer.

($0^{\circ}\text{C} \leq \text{温度} \leq 50^{\circ}\text{C}$ の時), 測定精度は, 温度; $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ (温度が $-5 \sim 50^{\circ}\text{C}$ の範囲), 湿度; $\pm 5\% \text{ RH}$ (温度 25°C で湿度 $20 \sim 80\% \text{ RH}$ の場合), 測定間隔は $1 \text{ s} \sim 130 \text{ min}$, 寸法は $17 \phi \times 6 \text{ H mm}$, 質量は 3.3 g であった. なお, 本計測パラメータは, 図 5 に示す Sub.13 のみの被験者を対象とし, 装置はスーツの脇腹部とヘルメットの頭頂部に固定された.

- ・気温 ($T_{\text{a}}^{\circ}\text{C}$)/湿度 ($\text{RH}\%$): 温湿度記録計おんどり (TR-72 U, (株) エーアンドディー, 東京) を使用した. 分解能は, 温度; 0.1°C , 湿度; $1\% \text{ RH}$, 測定精度は, 温度; $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$, 湿度; $\pm 5\% \text{ RH}$ であった.
- ・路面温度 ($T_{\text{road}}^{\circ}\text{C}$): ハンディ型放射温度計 (IR-TAF, チノー (株), 東京) を使用し, 図 1 に示すピット前方の本コース路面温を代表温として計測した. 分解能は 0.1°C , 測定精度は $\pm 1\%$ または $\pm 2^{\circ}\text{C}$ であった.
- ・ラップタイム: サーキット数カ所に埋め込まれた磁気を感じて計測可能な高精度タイム計測器 (PRO V2 A-105, ALFANO S.A., Italy) で車載計測された. これは, $1/100$ 秒単位で計測された.

2.2 被験者

実験の被験者は, 金沢大学医学部倫理委員会の承認を得た後, 所定の同意書にサインし, 十分な実験主旨説明を受けた健康男性 15 名 (年齢: 30.9 ± 6.4 (S.D.) 歳, 身長: 167.5 ± 5.6 (S.D.) cm, 体重: 58.0 ± 7.1 (S.D.) kg) であった. また, 安全性を考慮して, SL カートライセンス (SL: Sport & Leisure の略) を保有したレーシングカート走行暦 1 年以上のレース経験者の協力を得た. 走行に際しては, レーシングスーツ, フルフェイスヘルメット, グローブ及びシューズの着用を義務化した. アンダーウェアに関しては, 各被験者に同一の吸水性の高いものを支給し, 実験前に着用して貰った.

2.3 実験条件

実験は, 晴天の気温 30°C 以上の真夏に実施された. 走行時間は 40 分間 (チェッカーフラッグで終了サインを受けてからピットに戻る時間を考慮して多少の時間延長あり) とし, マシントラブルによる停止, 体力の限界となるような特別な事態が発生しない限り, 自己最速ラップを目指し常に全力で走行して貰うように, 事前に被験者に教示した. また, 操作ミスによりスピニアウトした場合は, 可能な限り速やかにコースへ復帰して貰った. なお, 実験車両は 2 サイクルピストンバルブ形式であり, 世界中で最もスタンダードなカートエンジン (KT100SD, ヤマハ発動機 (株), 静岡) を搭載された車両 (被験者の所有物) で実験を遂行した. また実験車両一台のみによる単独サーキット走行とした.

2.4 実験手順

被験者は空調の効いた休憩室に入室し, 十分な水分補給をした後, センサ類を装着して椅子に着座した. 15 分間

の安静休息ベースライン, 40 分前後の全力カート走行, 30 分間の安静回復が一連の実験の流れであった. 実験開始 10 分後に休憩室からカート傍に移動し, 走行準備を整えた. そして 40 分間の走行から戻ってきた後, 直ぐに空調の効いた休憩室に戻って椅座安静にもらった. 2/58 (走行 3 分後)/85 (走行 30 分後) 分に体重測定, および瞬時心拍数と鼓膜温 (サンプリング 5 秒) は実験の 85 分間連続測定であった. また, 実験中は 10 分間隔で気温・湿度・路面温度の手記計測, およびレーシングスーツ・ヘルメット内温湿度をサンプリング 5 秒で自動計測した. さらに, 走行中は自動周回ラップ計測も行われた.

2.5 データ解析

時間周波数解析

一心拍毎の心拍間隔時間 (RR) のデータには, 自律神経系 (迷走神経—交感神経) を介した循環調節機能が内含されているため, 実験で得られた一心拍毎の RR (HR) の時系列データに対して最大エントロピー法 (maximum entropy method; MEM) により時間周波数解析を行った. 64 拍分を解析データセット数 (64 拍/1 エポック) として, $1/4$ エポックずつ移動させながら時間スペクトル解析を行った. RR のパワースペクトル密度のうち, 高周波数帯域 (high frequency band; HF: $0.15 \sim 0.4 \text{ Hz}$) のパワー値 HF は心臓迷走神経活動をよく反映する指標 [9, 10], 低周波数帯域 (low frequency band; LF: $0.04 \sim 0.12 \text{ Hz}$) と高周波数帯域のパワー値の比 LF/HF は, 心臓交感神経活動をよく反映する指標 [11] として, 提唱されている. 利用した解析プログラムは多用途生体情報解析ソフト (BIMUTUS. II, キッセイコムテック (株), 長野) であった.

統計解析

MEM 解析における時間経過の条件差の分析では, 対応区間のパワーの平均値を使用した. 15 名の平均値の有意性検定には, パワー値 (HF と LF/HF) の素値に対して時間経過を要因とする 1 要因分散分析を行った. そして, この下位分析としては, ベースラインを基準とする Dunnett 検定を行い, 有意水準は 5% と 1% を使用した. また, 鼓膜温とラップタイムの相関分析には Spearman 順位相関係数を用いてその係数の有意性検定も行った. なお, ラップタイムの素値には個人差が含まれるため, 各被験者 ($n = 15$) の総ラップタイムの平均値と 5 ラップ毎の平均値との偏差 “ $\Delta \text{Lap-time}$ ” を “ラップタイムの指標” として, また 5 ラップ毎の標準偏差 “ Lap-time S.D. ” を “ラップタイムのばらつきの指標” として使用した. ただし, コース OUT ラップと IN ラップは解析から除外し, 身体がウォームアップし, 走行が安定する 10 ラップ以降を解析対象とした. 使用した統計解析ソフトは SPSS (SPSS Release 18.0J, SPSS Japan Inc., Japan) であった.

3. 結 果

実験中の走行イベントに関して、Sub.08 は走行開始 1 分に途中スピンしたが、直ぐにコースへ復帰した。他のドライバーに関しては問題なく実験が遂行され、レーシングカート走行中の各種データを得ることに成功した。

図 3 に各被験者の鼓膜温と、1 分毎の鼓膜温 T_{eardrum} 変

化を平均化し全被験者の平均 $\pm$ 標準偏差 (S.D.) で整理したグラフを示す。なお、10~15 分に見られる鼓膜温の乱れはヘルメット装着によるセンサ由来のノイズであるので留意されたい。 T_{eardrum} は約 36.8℃ から過渡的な緩やかな上昇応答を示し、走行開始 35 分付近から休憩室に移動するまで約 15 分の間、約 38.2℃ の定常状態が続いた。また、ベースライン値まで回復するには 30 分程度必要であるこ

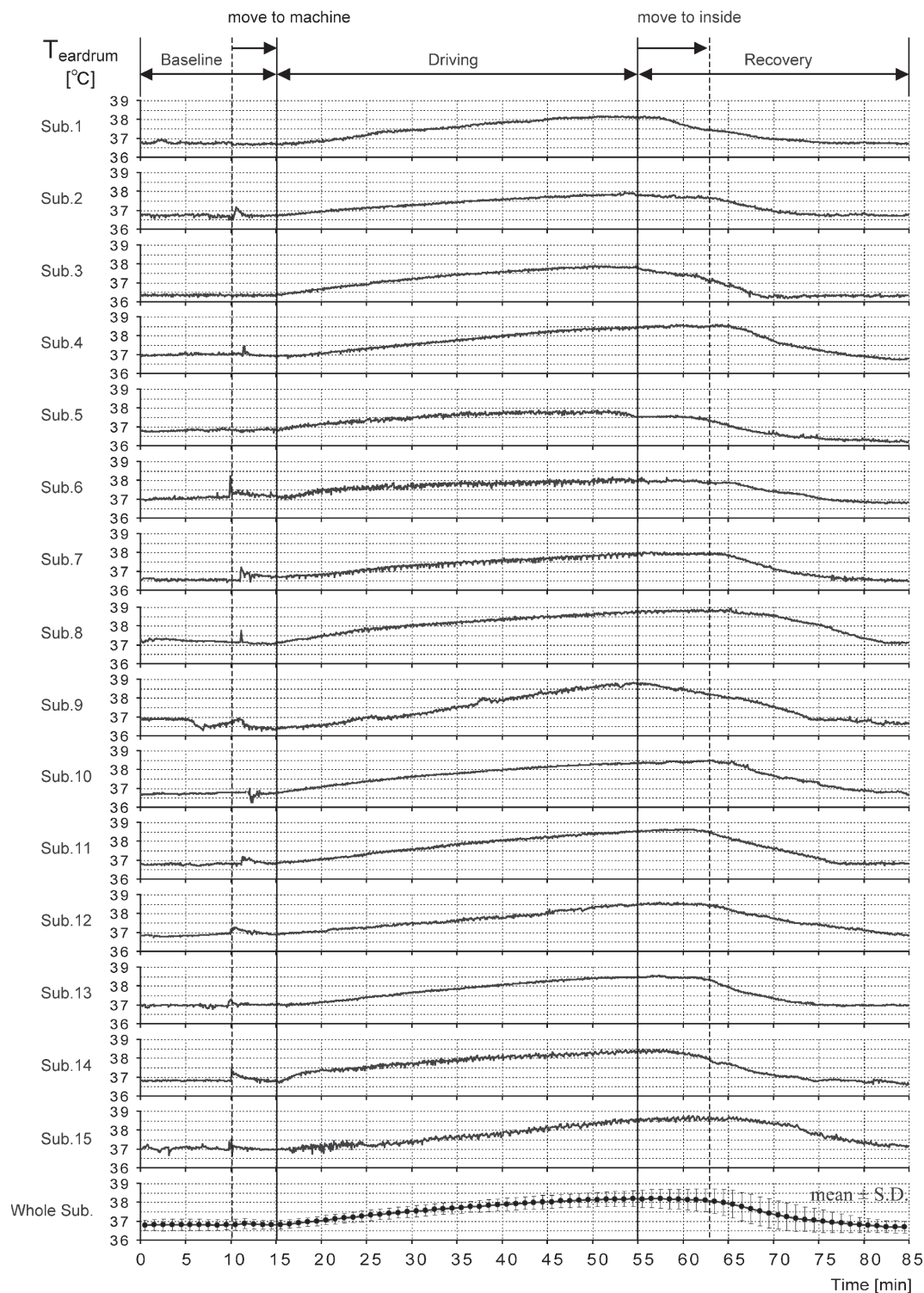


図 3 各被験者の鼓膜温と平均鼓膜温 $\pm$ 標準偏差 (S.D.) の時系列変化

Fig. 3 Time course T_{eardrum} changes between each subject and whole subject (means $\pm$ S.Ds).

表 2 各被験者の身長・体重・体脂肪と鼓膜温が 38℃ に達するまでの時間
Table 2 Time for reaching at 38℃ in eardrum temperature between individuals together with body height, weight, and fat.

Subject No.	Height [cm]	Weight [kg]	Fat [%]	Time for reaching at 38℃ [min]
Sub. 01	170	55.5	10.7	29.7
Sub. 02	173	66.4	19.2	—
Sub. 03	163	58.6	18.8	—
Sub. 04	163	58.9	19.7	23.2
Sub. 05	162	46.5	12.3	—
Sub. 06	165	61.9	23.0	35.3
Sub. 07	162	46.1	11.3	40.1
Sub. 08	168	61.5	9.6	11.9
Sub. 09	163	59.5	19.7	22.3
Sub. 10	178	71.9	14.5	31.2
Sub. 11	162	48.4	11.6	23.8
Sub. 12	171	61.8	11.1	29.8
Sub. 13	164	59.0	19.2	22.8
Sub. 14	173	53.4	8.9	20.9
Sub. 15	176	59.9	10.7	25.3
Mean	167.5	58.0	14.7	
S.D.	5.6	7.1	4.7	

とが判る。さらに鼓膜温の回復過程では、ばらつき幅（個人差）が大きかった。表 2 は、鼓膜温が 38℃ に到達するまでの時間と各被験者の身長・体重・体脂肪率をまとめたものである。その到達時間も個人差が大きかった。

図 4(a) は各被験者 ($n = 15$) の総ラップタイムの平均値と 5 ラップ毎の平均値との偏差 (Δ Lap-time) と、その 5 ラップに対応する期間の鼓膜温の平均値 (T_{eardrum}) との関係、同 (b) は 5 ラップ毎の標準偏差 (Lap-time S.D.) と、その 5 ラップに対応する期間の鼓膜温の平均値 (T_{eardrum}) との関係の解析結果を示す。ラップタイム Δ Lap-time と T_{eardrum} には統計有意な弱い相関 ($r = 0.34$, $p < 0.001$) が確認された。同様にラップタイムのばらつき Lap-time S.D. と T_{eardrum} にも統計有意な弱い相関 ($r = 0.24$, $p < 0.01$) が確認された。

図 5 に実験結果一例を示す。これらは計測対象の時系列変化、ラップタイム及び解析結果を示したものである。横軸は時間 (min)、縦軸は上から順に連続鼓膜温 T_{eardrum} (℃)、横軸は周回数であるラップタイム (s)、レーシングスーツ内温湿度 $T_{\text{a(suit)}}$ (℃)・RH_{suit} (%), ヘルメット内温湿度 $T_{\text{a(met)}}$ (℃)・RH_{met} (%), 気温 T_{a} (℃)・湿度 RH (%), 路面温度 T_{road} (℃), 合成加速度 G (mG), 瞬時心拍数 HR (bpm), 時間周波数解析から得られた迷走神経活動を反映する RR の高周波成分のパワー値 HF[(ms)²], 同様に交感神経活動を反映した RR の高周波成分と低周波成分の

パワー値の比 LF/HF(–)を示す。

鼓膜温 T_{eardrum} は走行開始から過渡的な応答を示し、ベースライン時から約 1.5℃ 上昇した。また、鼓膜温は走行開始 35 分付近から休憩室に戻るまで約 15 分の間、約 38.5℃ で一定に推移し、ベースライン付近まで回復するには走行後 20 分程度かかることが判る。

ラップタイムは 43 周まで 1 周 39.00 秒前後のタイムを保っているが、それ以後ラップタイムとばらつきが増加が確認できる。ドライバーの運転パフォーマンスを反映すると考えられるこのラップタイムの増加とそのばらつきには、環境要因（路面温度）、マシン要因（タイヤのグリップ力低下など）の他に深部体温（鼓膜温）との関連性があると考えられ、考察の章で詳述する。

レーシングスーツ内温度 $T_{\text{a(suit)}}$ は最大 41.0℃、湿度 RH_{suit} は最大 96.9%、ヘルメット内温度 $T_{\text{a(met)}}$ は最大 41.0℃、湿度 RH_{met} は 93.5% であった。また、気温 T_{a} は最大 35.2℃、湿度 RH は最大 50.0%、路面温度 T_{road} は最大 62.2℃ を記録した。走行期間中における全被験者の T_{a} , RH, および T_{road} の平均値は、それぞれ、 33.2 ± 1.9 (S.D.) °C, 56.0 ± 6.6 (S.D.) %, および 54.4 ± 5.0 (S.D.) °C であった。

同図には示されていないが、Sub.13 の発汗量は 1.49 kg, および発汗率は 2.24 kg/h であった。全被験者に対しては、それぞれ、 1.06 ± 0.28 (S.D.) kg, 1.59 ± 0.42 (S.D.)

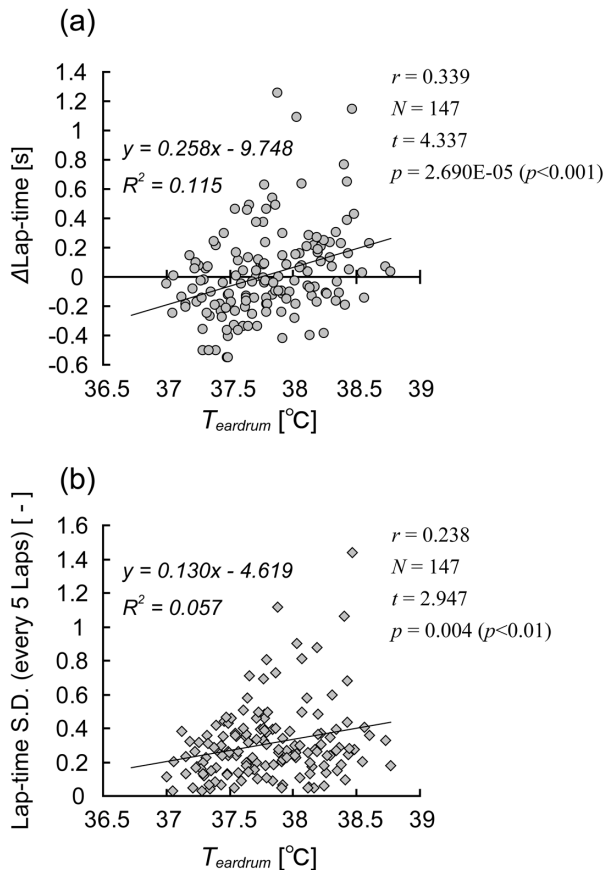


図4 (a)各被験者 ($n = 15$) の総ラップタイムの平均値と5ラップ毎の平均値との偏差 (Δ Lap-time) と、その5ラップに対応する期間の鼓膜温の平均値 ($T_{\text{ear drum}}$) の関係、(b)5ラップ毎の標準偏差 (Lap-time S.D.) と、その5ラップに対応する期間の鼓膜温の平均値 ($T_{\text{ear drum}}$) の関係。

Fig. 4 (a) Relation between Δ Lap-time and $T_{\text{ear drum}}$, (b) Relation between lap-time variability (standard deviation of every 5 Lap) and $T_{\text{ear drum}}$.

kg/hであった。

合成加速度 G は既報[7]と同様の結果が得られ、コースの特徴に合わせて周期的に変化している様子が判る。走行中の平均 G は $0.7 G$ 、最大 G は $2.5 G$ を計測した。

瞬時心拍数 HR も既報[7]と同様の傾向を示し、走行を開始すると同時に素早く上昇した。走行中は 160 bpm 付近を推移し、心拍の揺らぎも安静時に比べて抑えられていた。そして、カート降車後に休憩室に移動し安静状態になってから、徐々にベースライン付近へ回復している様子が判る。なお、全被験者にみられた傾向であるが、各所に期外収縮または心ブロックあるいはモーションアーチファクト（動作ノイズ）と思われる突発的な HR の変化がみられた（図5- HR グラフの突発的なヒゲの箇所）。既報[7]と同様に本実験でも、心電図波形の記録を行っていなかったため、それが期外収縮または心ブロックなのか、それともモーションアーチファクトなのかを判定不可能であり、生データをそのまま表示したので留意されたい。

既報[7]と同様に HF からは、走行中の明らかな迷走神経活動の抑制が判る。逆に、 LF/HF はそのミラーイメージであり、走行中は明らかに交感神経活動優位であることが判る。

図6に全被験者のベースライン期間、走行期間、回復期間（10分間毎）における推定迷走神経活動（基準化 HF ）と推定交感神経活動（基準化 LF/HF ）の平均値 $\pm$ 標準誤差 (S.E.M.) で整理した結果を示す。ただし、各被験者の実験期間中におけるパワー最大値を1として規格化を施した後の結果である。推定迷走神経活動は、条件間の主効果 ($F(4, 70) = 28.76, p < 0.01$) が有意であり、下位検定では全ての条件がベースライン期間に比べて有意に低値を示していた。一方、交感神経活動は、条件間の主効果 ($F(4, 70) = 2.76, p < 0.05$) が有意であり、下位検定では運転中が有意傾向 ($p = 0.07$) であった。

4. 考察

モータースポーツ中の深部体温計測は、ドライバーの生命保護という観点からきわめて重要な課題であり[7]、その反応性を定量的に把握・分析しておくことも重要な意味を持つと考えられる。全被験者の深部体温を整理した図3では、走行開始から過渡的に上昇し、その上昇度は約 1.2°C であった。また走行開始35分付近から走行後に休憩室へ戻るまで約15分の間、約 38.2°C で定常状態が続いた。各被験者のグラフからも同様な反応を示していることが確認できる。しかし、図3から見て取れるように鼓膜温反応には上昇や回復のスピードに個人差が存在する。鼓膜温が 38°C という基準で（当然ではあるが熱中症に陥ると言われる 39°C 付近のデータが欠損している為）、その温度に到達するまでの時間をまとめると表2のようになり、暑熱順化や体付きなどによって鼓膜温反応が異なることが判る。さて、運動中の体温上昇の機序は既に明らかにされており[12]、ある一定強度の動的運動を実施すると深部体温は運動開始から約40～50分でほぼ一定の値を示すという知見とも反応性が一致していることが判る。また、運動時における深部体温の定常値は運動強度に比例して上昇し、同一強度の運動を条件として環境温を変化させると、深部体温の上昇度は気温 $5 \sim 36^\circ\text{C}$ の間では一定であるという[12, 13]。しかし、気温が体温を上回るような、正確に言えば着衣の断熱抵抗を考慮した人体作用温度が体温（約 36°C ）を超えるような、温熱環境では、人体の熱収支的には熱吸収の方向（人体に熱が入ってくる方向）となり、深部体温は運動による上昇に加えて、当該温度で熱的平衡状態になるまで更に上昇せざるを得ない。さらに、人体作用温度が体温より高くなる 36°C 以上における環境での外界への熱放散は、ほとんど発汗による蒸発に依存する[14]にも拘わらず、その蒸散が妨げられる環境ともなるとなおさらである。本実験におけるレーシングスーツ・ヘルメット内温度

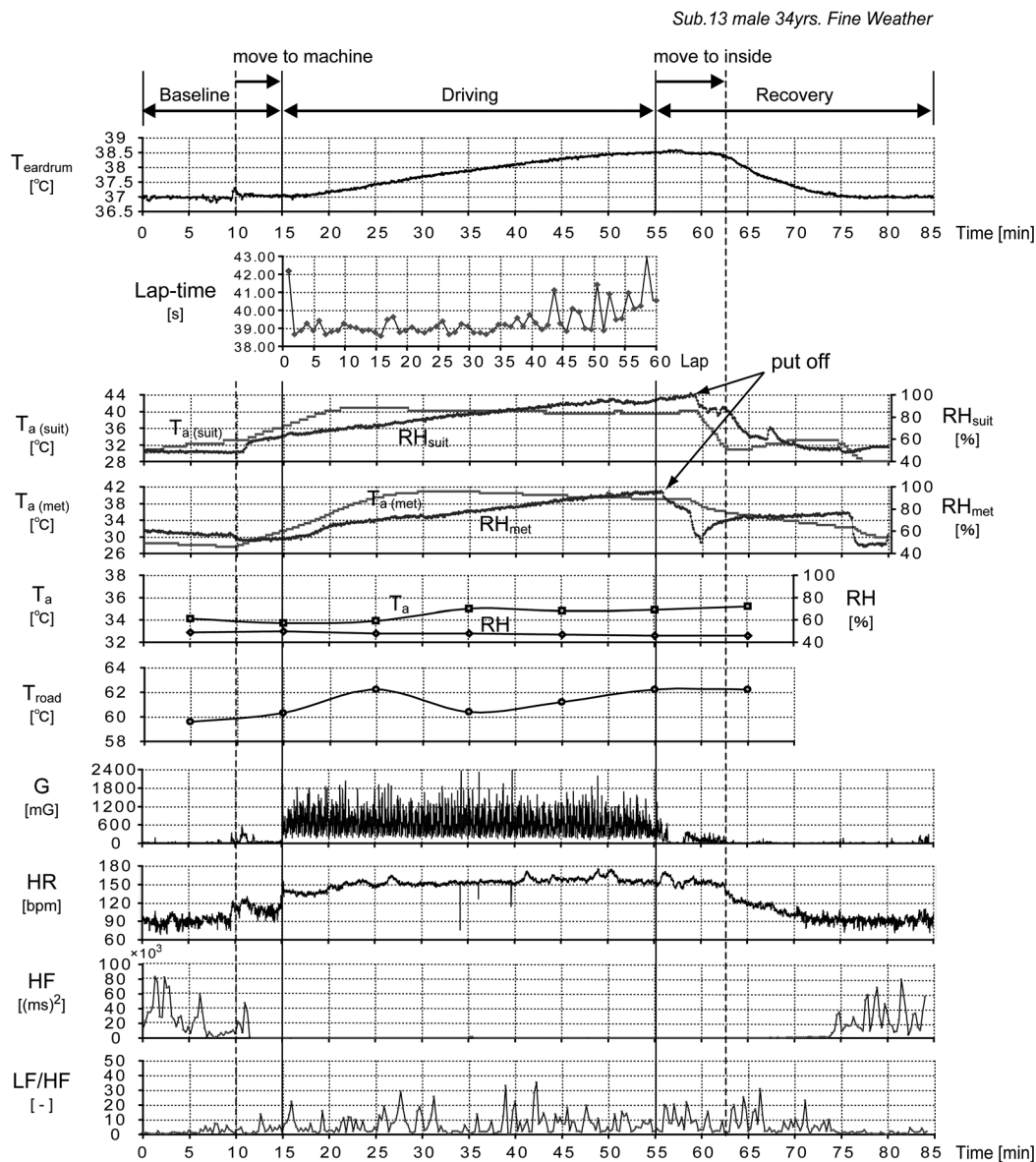


図5 計測対象の時系列変化と解析結果一例。縦軸は上から順に、鼓膜温 T_{eardrum} 、横軸は周回数であるラップタイム、レーシングスーツ内温湿度 $T_{\text{a(suit)}}$, RH_{suit} 、ヘルメット内温湿度 $T_{\text{a(met)}}$, RH_{met} 、外気温 T_{a} 、湿度 RH 、路面温度 T_{road} 、合成加速度 G 、瞬時心拍数 HR 、時間周波数解析から得られた迷走神経活動を反映する RR の高周波成分のパワー値 HF 、同様に交感神経活動を反映する RR の低周波成分と高周波成分の比のパワー値 LF/HF を示す。

Fig. 5 Typical recordings of trend-charts of T_{eardrum} , Lap-time, $T_{\text{a(suit)}}$, RH_{suit} , $T_{\text{a(met)}}$, RH_{met} , T_{a} , RH , T_{road} , G , instantaneous HR , HF , and LF/HF obtained in one subject.

は最大 41.0°C を記録した。これは深部体温の急上昇を引き起こした一要因だと言える。また、発汗による蒸発は周囲空気の温度と皮膚温に加えて、特に湿度に大きく影響される[14, 15, 16]ことから、レーシングスーツ・ヘルメット内湿度がそれぞれ最大 96.9, 93.5%にも上ることを考慮すると、走行中のその蒸発による熱放散は期待できないことが解る。したがって、レーシングスーツ・ヘルメット内の湿度低下対策は熱中症予防に特に重要な役割を持つと考えられる。上述したように、暑熱環境において人体の発汗による熱放散は深部体温の上昇抑制に極めて重要な手段であ

り、作用温度で 36°C 以上の環境で深部体温が上昇を始めると、人体の防衛反応として発汗量も急増すると報告されている[16-19]。実際に本実験では走行中の発汗率は $1.59 \pm 0.42(\text{S.D.})\text{kg/h}$ と高いものであった。モータースポーツ中の脱水症の危険性も指摘しておきたい。

さて、図4に示すように、(a)のラップタイム $\Delta\text{Lap-time}$ と鼓膜温 T_{eardrum} 、(b)のラップタイムのばらつき Lap-time S.D. と T_{eardrum} は、それぞれ弱い相関 $r = 0.34$, 0.24 であり、その相互関係に統計的に有意な“直線”関連が認められたが、鼓膜温とラップタイムの重要かつ緊密な

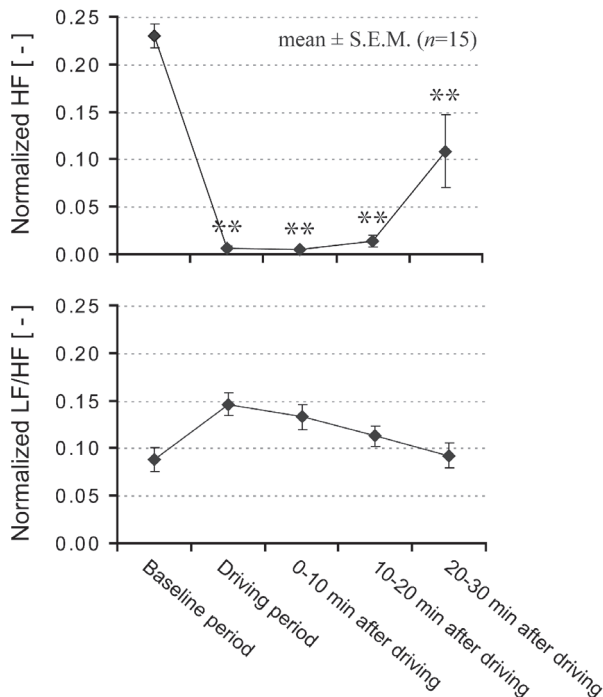


図6 ベースライン、走行、そして回復期間における推定迷走神経活動（基準化 HF）と推定交感神経活動（基準化 LF/HF）の変化。平均値±標準誤差（S.E.M.）を表す。

Fig. 6 Means $\pm$ SEMs of the sympatho-vagal activity balance during baseline, driving, and recovery period analyzed by the normalized HF & LF/HF trend-charts. Asterisks indicate significant deviation according to the *Dunnett* test (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$). See text for details.

繋がりは少なかった。ΔLap-time は各被験者 ($n = 15$) の総ラップタイムの平均値と 5 ラップ毎の平均値との偏差であり、鼓膜温が上昇していく過程で、10 名の被験者は後半にラップタイムの増加が確認された。しかし、ΔLap-time の低下は、鼓膜温上昇による“ドライバー由来”の運転パフォーマンス低下の他に、路面温度による“環境由来”の要因、さらには時間経過のタイヤの垂れによる路面グリップ力の低下などの“マシン由来”の要因も影響している可能性があり、図 4(a) に示すように一概に鼓膜温が上昇する過程でラップタイムが増加するとは結論づけられない。しかし一方で、図 4(b) に示す Lap-time S.D. (ラップタイムのばらつき) は 5 ラップ毎の標準偏差であり、ラップ毎にマシン状態が大きく変化することは考えにくい為、これは“ドライバー由来”の運転パフォーマンスが強く反映されている指標と考えられる。よって、運転中のこうした指標 (Lap-time と Lap-time S.D.) が把握できれば、ドライバーの“大凡の”生理状態が評価できる可能性があると言える。しかし、生命がかかっている指標の代替として、統計有意ではあってもこうした弱い相関しかない指標の採用は問題があると言える。従って、モータースポーツ中の深部体温計測という技術的な問題をクリアした点の新

規性と、これをリアルタイムに測定することの重要性は極めて高いと主張したい。一方、コンマ一秒を争うというモータースポーツの特徴を考えた場合、たとえ“相関が弱い”とは言え深部体温の上昇に伴う運転パフォーマンスのばらつきの増加が認められたことは、深部体温が競技結果に大きな影響を与える可能性を示唆している。そのため、生命を守るという側面だけでなく、より良い競技結果を追求するという側面から考えて、モータースポーツ中のリアルタイム深部体温の測定は大きなメリットになる可能性を秘めていると言えよう。

レーシングカート走行における G の影響は既報[7, 8]と同様の傾向が見られた。この G の生体への影響は、他のスポーツと明らかに異なるモータースポーツ特有の影響因子である。強烈な減加速・旋回によりドライバーは常に平均 0.7 G (体重 65 kg の人で約 46 kg) もの荷重を受けていた。瞬間的には最大約 2.5 G (体重 65 kg の人で約 164 kg) もの荷重を受け、走行中はいかに身体に負担が作用しているかが解る。ちなみに、モータースポーツの最高峰である Formula 1™では、コーナーリング時の G は 4.5 G にも達する[20]と言われている。レーシングドライバーは、この受ける G に抗う筋活動（反作用運動; アイソメトリック運動）が支配的であり、これが運動強度、すなわち心拍数上昇の一要因となる[7]。また実際に、このドライバーが受ける G と心拍数 HR には相関関係が成立すると報告されている[8]。本実験における瞬時心拍数 HR は、休憩室からカート傍に移動し始めてから徐々に上昇し、走行開始と同時に素早く上昇した。走行中の心拍数は平均 155 bpm (ベースライン時の 1.6 倍) を推移し、そのレベルは途中回復することもなく常に高い水準を維持した。このモータースポーツ中の HR の上昇は、上述した G の影響の他に、“暑熱による要因”と“精神的な要因”も考えられる。それぞれは一要因解明の事例研究として今後扱うべき重要な研究課題である。G、暑熱、そして精神、大局的に言うとドライバーは強烈な肉体的・精神的ストレスを受けていると言える。1) 速く走るためにレーシングドライバーに求められる的確な判断（マシンコントロールなど）、2) 限界速度ギリギリでコース上にマシンを留めようとする緊張感、3) 他車と競り合うレース競争状況の緊張感は、総じて精神的ストレスに分類できると考えられる。本実験では単独走行が条件であったので、3) の影響は無かったが、本来はモータースポーツがレース競技である以上、3) の影響の解明は、今後の重要な研究課題となる。

さて、この精神的ストレスの影響は、自律神経活動を観察することでも評価できると考えられる。一心拍毎の RR のデータには、自律神経系（迷走神経—交感神経）を介した循環調節機能が内含されているため、時間周波数解析を行ってこの自律神経活動の推定を試みた。ベースライン期間、走行期間、走行後 (0-10)/(10-20)/(20-30) 期間の 5

条件で推定した結果 (図 6 参照) をみると、既報 [7, 8] と同様に、走行中の統計有意な迷走神経活動の抑制が確認された。交感神経活動の亢進は有意傾向であった。そして、走行後は少なくとも 30 分をかけて回復傾向であった。走行中は圧倒的に交感神経活動の支配下にあり、この精神的影響による HR の上昇も肉体的影響 (G) による HR の上昇に加えてモータースポーツ中の HR を押し上げる一要因と言える。

モータースポーツ中の HR の上昇を単純に「運動強度の上昇」と結びつけるのは、上述のように“精神的”な影響も受けるが故に飛躍があるかも知れないが、レーシングドライバーは高運動強度に伴って筋活動による自己発熱量も高くなる。すなわち、HR の上昇は、先に述べた主要な論点である深部体温上昇の一要因と言える。暑熱環境におけるレーシングカート走行中の鼓膜温は、この肉体活動と精神活動による HR の上昇、そしてレーシングドライバーを取り巻く温熱環境の影響で、個人差を持ちながら走行開始から緩やかに危険な水準へと上昇し、走行後は少なくとも 30 分 (冷房の効いた部屋で待機したため) を要しながら緩やかにベースラインレベルへ回復傾向であった。

さてここで一旦著者らの主張を整理すると、生理学的に見ても暑熱状況における深部体温は上昇せざるを得ず、従来のようなマシンのラップタイムやそのばらつきなどの指標からドライバー状態を判断することには不安が残ることから、モータースポーツ中における鼓膜温のリアルタイム計測は今後極めて重要であろう、ということであった。また、鼓膜温が競技結果に大きな影響を与える可能性を示唆したが、これに関して結論を与えるには更なる検証が必要となる。つまり、本報では鼓膜温とラップタイムの重要かつ緊密な繋がりには少なかった、と結論を与えたが、 $r = 0.34, 0.24$ を「関連性有り」と強調して論ずる場合、鼓膜温以外の指標、例えば上述のような路面温度、タイヤ温度など、潜在的にラップタイムに影響を与えると考えられる多数の要因で以上の相関を調整しても、なお深部体温とラップタイムの関係性が有意であることを示す必要がある。さらには、この“ラップタイムと鼓膜温の関連性仮説”を完全に証明するためには、鼓膜温を極度に上昇させない環境条件 (高いパフォーマンスを与える最適な鼓膜温の閾値や範囲も存在すると思われる) で、時間経過の「疲れ」によるパフォーマンス低下の影響がラップタイムとラップタイムのばらつきにどの程度影響を及ぼしているかも検証する必要があるだろう。これらの検討は、今後の更なる研究課題として残される。さらにこの $r = 0.34, 0.24$ という相関であるが、本実験では安全のために上限を 38°C 台に設定したが、これがそれ以上であれば、温度が上昇するにつれ加速度的にラップタイムとばらつきが増加する可能性もある。従って、本報の相関は実際の体温閾値に達する前の状態のものであり過小評価の可能性もあるの

で、現在実際に行われている灼熱下のレース状況での試験を行い、本実験結果が過小評価になっていないかどうかとも検証する必要がある。

5. 結 論

レーシングカートドライバーを実験対象とし、高温熱ストレス条件下における鼓膜温並びに各種生体情報反応が定量的に明らかにされた。また、マシンのラップタイムやそのばらつきなどの指標からドライバー状態を判断することは危険であり、モータースポーツ中における鼓膜温のリアルタイム計測は今後極めて重要となることを示した。さらには、ラップタイムと鼓膜温の関連性が確認され、鼓膜温計測はレーシングドライバーのドライビングパフォーマンス低下を予測できる可能性を秘めているという新知見を与えた。

モータースポーツは、依然としてレーシングマシンの速さを追求した開発が主体であり、ドライバー自身の安全性に目を向けられることは少ない。言わばドライバーに対しては、“根性論”が先行している感がある。しかし、本研究で明らかのように、暑熱環境下では温熱生理学的にみてもドライバー深部体温は上昇せざるを得ない。よって、トレーニングによる暑熱順化は勿論のこと、加えて深部体温のリアルタイムモニターシステムの導入、並びにドライバークーリングによる鬱熱予防策 [1, 21] が今後非常に重要であると言えよう。

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。また、実験補助を終始手伝って頂いた金沢大学の堂前和政氏に深謝する。また、実験にご協力頂いた石野サーキットのスタッフの皆様、そして被験者の皆様にも深謝する。

文 献

1. 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ークーリングシステムの開発. 自動車技術. **63**(10): 84-89, 2009.
2. Jareño A, Serna JL, Cercas A, Lobato A, Uyá A: Heat stroke in motor car racing drivers. Br J Sports Med. **21**: 48, 1987.
3. 鈴木肇: 医学大辞典 (豪華版). 南山堂出版, 東京, 1999, pp. 1596-1599.
4. 高橋規一: GT ドライバの生理. 自動車技術. **63**(10): 90-95, 2009.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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, 2010. (*in press*)
9. Berger RD, Saul JP, Cohen RJ: Transfer function analysis of autonomic regulation. I. Canine atrial rate response. Am J Physiol. **256**: 142-152, 1989.
 10. Pomeranz B, Macaulay RJB, Caudill M, Kutz I, Adam D, Gordon D, Kilborn KM, Barger AC, Shannon DC, Cohren RJ, Benson H: Assessment of autonomic functions in human by heart rate spectral analysis. Am J Physiol. **248**: 151-153, 1985.
 11. Pagani M, Lombardi F, Guzzetti S, Rimoldi O, Furlan R, Pizzinelli P, Sandrone G, Malfatto G, Dell'Orto S, Piccaluga E, Turiel M, Baselli G, Cerutti S, Malliani A: Power spectral analysis of heart rate and arterial pressure variabilities as a marker of sympatho-vagal interaction in man and conscious dog. Circulation Research. **59**: 178-193, 1986.
 12. Nielsen M: Die Regulation der korper Temperatur bei muskular Arbeit. Scand Arch Physiol. **79**: 193-230, 1938.
 13. Saltin B, Hermansen L: Esophageal, rectal, and muscle temperature during exercise in humans. J Appl Physiol. **21**: 1757-1762, 1966.
 14. 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. 建築学会環境系論文集. **575**: 127-136, 2004.
 15. 中山昭雄編: 温熱生理学, 理工学社, 東京, 1981.
 16. ASHRAE: "ASHRAE Handbook Fundamentals". Chapter 9. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc, Atlanta, 2009.
 17. 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.
 18. 井上晴夫: 新版 運動処方—理論と実際(現代の体育・スポーツ科学), 朝倉書店, 東京, 1990.
 19. Robinson S, Turrell ES, Gerking SD: Physiologically equivalent conditions air temperature and humidity. Am J Physiol. **143**: 21-32, 1945.
 20. Watkins ES: The physiology and pathology of Formula One grand prix motor racing. Clinical Neurosurgery. **53**: 145-152, 2006.
 21. 高橋規一: 熱中症対策 Reports. <<http://supergt.net/jp/>> (URL)

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特任准教授に就任。現在に至る。生体計測と解析, 生体情報の無侵襲・無拘束計測法, 健康・福祉工学, スポーツ工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。

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。ストレス負荷時およびPTSD患者の心理生理的反応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。



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, 健康・福祉工学に関する研究に従事。

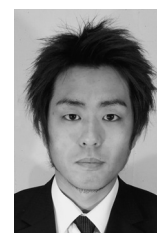
日本生体医工学会, IEEE Engineering in Medicine & Biology Societyなどに所属。



廣瀬 元 (ヒロセ ハジメ)

2003年東北大学博士後期課程修了。博士(工学)。1998年金城短期大学短期学部秘書学科専任講師, 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。



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.

