# 差分顔面皮膚放射温度を用いた運転ストレス評価の試み：単調運転ストレス負荷による基礎的検討


| メタデータ | 言語: Japanese<br>出版者:<br>公開日: 2017-10-03<br>キーワード (Ja):<br>キーワード (En):<br>作成者: 山越, 健弘, 松村, 健太, 小林, 寛幸, 後藤, 雄二, 廣瀬, 元<br>メールアドレス:<br>所属: |
| --- | --- |
| URL | http://hdl.handle.net/2297/26228 |

生体医工学
**48**(2)：163-174, 2010

研　究

# 差分顔面皮膚放射温度を用いた運転ストレス評価の試み
## ―単調運転ストレス負荷による基礎的検討―

山越　健弘*・松村　健太**・小林　寛幸*
後藤雄二郎*・廣 瀬　元***

# Feasibility Study on Assessment of Driver's Stress from Differential Skin Temperature Measurement under Simulated Monotonous Driving

Takehiro YAMAKOSHI,* Kenta MATSUMURA,** Hiroyuki KOBAYASHI,*
Yujiro GOTOH,* Hajime HIROSE***

***Abstract***　Prolonged monotonous driving may lower a driver's awareness level as well as increasing their stress level due to the compulsion to maintain safe driving, which may result in an increased risk of a traffic accident. There is therefore an opportunity for technological assessment of driver physiological status to be applied in-car, hopefully reducing the incidence of potentially dangerous situations. As part of our long-term aim to develop such a system, we describe here the investigation of differential skin temperature measurement as a possible marker of a driver's stress level. In this study, after giving informed consent 25 healthy male ($n$ = 18) & female ($n$ = 7) subjects (26.8 ± 8.0 S.D. yrs) were investigated under environment-controlled conditions, whilst being subjected to simulated monotonous travel at constant speed on a test-course. We acquired physiological variables, including facial skin temperature which consists of truncal and peripheral skin temperatures ($T_s$) using thermography, beat-by-beat blood pressure (BP), cardiac output (CO), total peripheral resistance (TPR), and normalized pulse volume (NPV) used as an indicator of local peripheral vascular tone. We then investigated the driver's reactivity in terms of skin temperatures with this background of cardiovascular haemodynamics. We found that the simulated monotonous driving produced a gradual drop in peripheral $T_s$ following the driving stress, which, through interpretation of the TPR and NPV recordings, could be explained by peripheral sympathetic activation. On the other hand, the truncal $T_s$ was not influenced by the stress. These findings lead us to suggest that truncal-peripheral differential $T_s$ could be used as a possible index indicative of the driver's stress. In fact, a significant correlation was confirmed between stress reference of BP and differential skin temperatures.

**Keywords :** cardiovascular parameters, monotonous driving, safer driving, skin temperature, stress.

## 1. は じ め に

警視庁の交通事故統計によれば，平成 20 年度の交通事故死者数は 5,155 人で，平成 4 年のピーク時（11,451 人）に比べると次第に減少してきている[1]．この成果は，広く普及している ABS（Antilock Brake System）やエアバッグといった車両自体の安全装備の充実に努めた自動車メーカー，および道路環境整備や安全運転思想の普及に取り組んだ政府や地方自治体の努力の成果だと言われている．しかしながら，5,000 人を超える死者数に加えて，依然として高い水準を維持している事故発生件数（約 70 万件）と事故負傷者数（約 90 万人）を鑑みれば，なお一層の交通事故対策を進めることが極めて重要である．

2009 年 12 月 11 日受付，2010 年 2 月 12 日改訂，2010 年 3 月 9 日再改訂
Received December 11, 2009; revised February 12, 2010, March 9, 2010.
* 金沢大学大学院自然科学研究科
Graduate School of Natural Science & Technology, Kanazawa University
** 国立精神・神経センター精神保健研究所成人精神保健部
Department of Adult Mental Health, National Institute of Mental Health, National Center of Neurology and Psychiatry
*** 金城大学短期大学部ビジネス実務学科
Department of Business Administration, Kinjo College

これらの交通事故の要因としては，1）人的要因（発見の遅れ，判断・操作ミスなど），2）環境要因（天候・道路状況など），3）車両要因（整備不良や故障など），が挙げられるが，事故要因の 8〜9 割は人的要因によるものだと言われている[2]．当然ながら人的要因の中には運転者の行動や規律を守る意識から防げるもの，例えばスピード違反や飲酒運転などがある．しかし，その中でも眠気我慢や過労運転など主に“運転ストレス”と定義されるものからくる交通事故に対しては，車両側から生体側に何らかの対策を施す安全運転支援システムの構築が望まれる[3, 4]．自動車の運転とは「認知→判断→操作」の一連の作業を繰り返すことであり，それら運転パフォーマンス（認知・判断・操作能力）の低下が人的要因の交通事故を引き起こす．一方で，古くから生理心理学の分野で“パフォーマンス”と“ストレス”の間に密接な関係（逆 U 字曲線：ストレスが高すぎても低すぎてもパフォーマンスは低下する）[5]があることが示されており，自動車運転といった状況でも“運転ストレスの蓄積”が“運転パフォーマンスの低下”に繋がると考えられる．

そこで本研究ではこの運転ストレスに着目し，その検知・緩和を最終目標とした先進安全運転支援システムの構築を目指す．中でも漫然運転（過労，居眠り，ボンヤリなど）に代表される単調な運転シーンでは運転ストレスが高い状況に置かれ，ドライバーの運転パフォーマンスの低下も著しいことが実証されている[3, 4]．このことは法令違反別死亡事故のトップが漫然運転（約 16%）であることからも明らかである．その対策としては現在，LKA（Lane Keeping Assist：車線の維持を補助するシステム）[6]や ADA（Active Driving Assist：速度や車間距離を一定に保つシステム）[7]などが開発されてきているが，これらはあくまでドライバーの運転操作を支援する機能であり，事故を防止するという観点では非常に有効であるが，漫然運転自体を予防するものではない．漫然運転の予防（主に居眠り運転防止）という観点では，まばたき・脳波・心拍変動などといった生体情報から事故の危険性を未然に評価しようという研究[8-10]が盛んに行われているが，未だ実用に供し得る安全装置が無いのが実状である．

以上から本研究では，運転ストレス評価システムの実車内構築を考えた際に非拘束性や計測の簡便性といった条件を満たす顔面の体表面温度（皮膚表面温度；以後，皮膚温と呼ぶ）情報に着目し，DST（皮膚温差分）ストレス評価法（後述）と命名する手法を用いて運転ストレスの検知を目指す．なお，顔面皮膚温を生理状態指標に用いようという試みは幾つか報告されている[11-16]．これらの研究は，末梢部皮膚温（鼻部）の精神的要因に伴う温度変化をストレス評価あるいは覚醒水準評価に用いている．後述する本研究の運転ストレス評価法は，原理的には石川らの研究[11]と同等の手法であるが，運転環境で評価可能なストレス指標を目指すという意味では目的と手法が異なる．本稿では研究の第一段階として，運転シミュレーターを用いた単調運転ストレス負荷（覚醒度を強制的に低下させることによる）実験を行い，各種循環器系の生体情報を説明変数として本研究で提案しているストレス評価法の有用性の基礎的検討を行ったので報告する．

## 2. 運転ストレス評価法―DST（Differential Skin Temperature）ストレス評価法―

ここでは，本研究で提案する皮膚温を用いた運転ストレス評価法を述べる．人間がストレスを感じると自律神経を介し，内分泌系・免疫系・心臓血管系などに影響を与える[17]．筆者らが着目している皮膚温情報も「交感神経の亢進→末梢血管の収縮→末梢部血流量減少→末梢部皮膚温低下」というストレスに対する生体反応の一つであり，ストレス評価に末梢部皮膚温を用いる研究はしばしば見られる[11-16, 18-19]．皮膚温の決定因子は約 80%が皮膚下血流量に依存する[20]と言われているが，その他の外的因子による温度変化も無視できない．ここで挙げた外的因子というのは人体側 2 要素（着衣量・代謝量）と環境側 4 要素（気温・湿度・風速・放射温度）である[20]．

本研究がターゲットとしている自動車運転中という状況で皮膚温を用いたストレス評価を行う場合，先に述べた外的因子をキャンセルすることが特に重要となる．ただし，運転中に着衣量・代謝量の人体要素が大きく変わるとは考えにくいので，環境要素をキャンセルしてストレス評価を行う手法をとる．ここでは，末梢交感神経活動の影響（ストレスによる血管収縮）が大きい細動脈，および動静脈吻合血管（AVA 血管）の豊富な部位[21, 22]を“末梢部”，それ以外の部位を“体幹部”と定義する．以下に本ストレス評価の理論的な方法を示す．

まず，体幹部においては安静時の皮膚温（$T_{st\text{-}rest}$）と環境外乱による皮膚温変化分（$\Delta T_{st\text{-}d}$）により定常時の皮膚温（$T_{st}$）が決定される．

$$T_{st} = T_{st\text{-}rest} \pm \Delta T_{st\text{-}d} \quad \cdots ①$$

末梢部においては安静時の皮膚温（$T_{sp\text{-}rest}$）と環境外乱による皮膚温変化分（$\Delta T_{sp\text{-}d}$）に加えて，ストレス由来の血管収縮・拡張による温度変化分（$\Delta T_{sp\text{-}stress}$）が発生すると考えられる．

$$T_{sp} = T_{sp\text{-}rest} \pm \Delta T_{sp\text{-}d} \pm \Delta T_{sp\text{-}stress} \quad \cdots ②$$

ここで，外乱による皮膚温変化分がほぼ等しくなる末梢部と体幹部（$\Delta T_{sp\text{-}d} \fallingdotseq \Delta T_{st\text{-}d} \cdots ③$）が存在すると仮定すれば，その差分値はほぼストレスのみに依存したものになると考えられる．

$$T_{st} - T_{sp} = \pm \Delta T_{sp\text{-}stress} + \alpha \ (\text{const.}) \quad \cdots ④$$

ただし，$\alpha$：安静時の 2 部位間の部位温度差[℃]

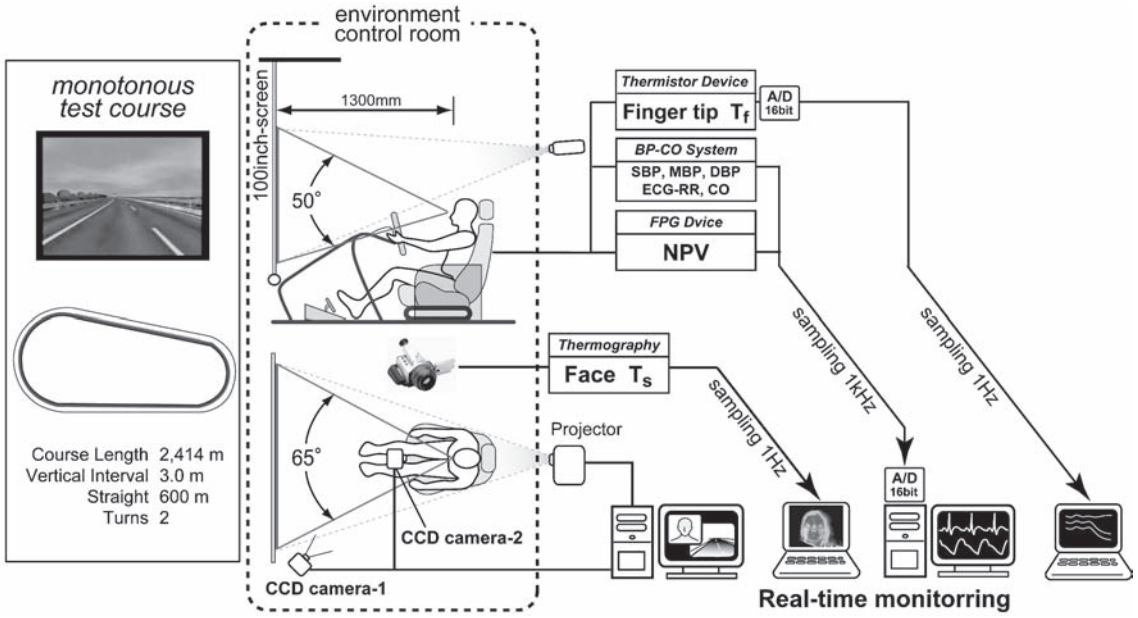


**図 1**　実験システムの概要
**Fig. 1**　Schematic drawing of experimental system.

このように，環境要素による外的因子に伴う皮膚温変化を補正するために体幹部との差分をとる手法は，先述の石川らの研究[11]により報告されており，そこでは体幹部として“額”を計測対象としている．その報告では，中立温熱環境での室内単調作業を前提としたストレス評価を対象としており，大きな温熱環境の変化は想定し難い状況にある．そのような温熱環境変化の少ない状況では，体幹部が末梢部の“鼻”以外の部位でさえあれば比較的容易にストレス成分のみを評価できると考えられる．しかし，本研究がターゲットとしているのは自動車運転環境であり，日射・車内温湿度変化・空調による風といった環境外乱が複合的に作用しており，顔面の皮膚温も常に変動している状態が予想される．そこで，その影響を極力キャンセルできるような，すなわち③式の条件を満たす体幹部の選定は本手法の要となる部分であり，新規性があると言える．次の研究ステップでは環境外乱負荷実験を行い，解剖学的見地などからその最適な体幹部を選定していく予定である．本稿では，末梢部位として鼻（参考として指尖部も着目），体幹部として③式の条件を満たすと期待できる頬，顎，顔面下半分，そして従来から利用されている額の 4ヶ所に着目して実験および解析を行った．

## 3．装置及び方法

### 3･1　実験システムと装置

**図 1** に実験システムの概要を示す．実験システムは液晶プロジェクター（LV-5210，キャノン(株)，東京），100-inch スクリーン，単調運転シミュレーター（PLAYSTATION3，ソニー(株)，東京），運転コックピット（自作），被験者監視用 CCD カメラ 2 台（WAT-232，ワテック(株)，山形），容積補償法原理[23-25]の連続血圧計測装置（自作：本法の計測原理の詳細と精度等は成書[26, 27]を参照されたい.），胸郭電気的アドミタンス法原理[28]の心拍出量計測装置（自作[26, 27]），光電式指尖脈波装置計（MPN1001，メディセンス(株)，東京），マルチテレメーターシステム（WEB-5000，日本光電(株)，東京），サーミスタセンサ（DS100，テクノセブン(株)，横浜：精度± 0.05 ℃，分解能 0.001 ℃），サーモグラフィー（TH9100-MLN，NEC 三栄(株)，東京：精度± 2 ℃又は読み値の± 2%のいずれか大きい方，分解能 0.04 ℃），デスクトップ PC2 台（Dimension XPS Gen4，DELL(株)，Texas），そしてラップトップ PC2 台（INSPIRON，DELL (株)，Texas）から成る．

### 3･2　計測対象量

本実験における計測対象量は 2・1 で述べた装置を使用し，以下の生体情報を計測した．一心拍毎の心電図心拍間隔時間（RR ms），心拍出量（cardiac output；CO l/min），$\alpha$ アドレナリン作動性末梢交感神経の働きを示す基準化脈波容積（normalized pulse volume；NPV unitless）[29]，顔面の各部位の平均温度（各部位の計測領域の詳細は**図 2** を参照），そして末梢部である指尖部皮膚温（$T_f$ ℃）である．

さらには運転中ストレスの客観的指標として，容積補償法を用いた一心拍毎の連続血圧｛最高（systolic blood pressure；SBP）・平均（mean blood pressure；MBP）・最低血圧（diastolic blood pressure；DBP）mmHg｝を測定した．内外環境からの刺激（ストレス）が入力され，中枢神経系が自律神経系を介して心臓血管系をコントロールするとき，その主たる被制御変数は血圧，すなわち血行力

**表 1**　被験者データ（性別，年齢，運転歴，運転時間）
**Table 1**　Basic information of between individuals（sex, age, driving experience, driving time）.

| Subject No. | Sex | Age | Driving experience, year | Driving time, min |
|---|---|---|---|---|
| | | | Young male | |
| Sub.01 | M | 21 | 1.5 | 120 |
| Sub.02 | M | 21 | 1 | 107 |
| Sub.03 | M | 21 | 2 | 62 |
| Sub.04 | M | 21 | 2 | 105 |
| Sub.05 | M | 21 | 2 | 120 |
| Sub.06 | M | 21 | 1.5 | 61 |
| Sub.07 | M | 22 | 2 | 112 |
| Sub.08 | M | 21 | 2 | 120 |
| Sub.09 | M | 23 | 0 | 120 |
| Sub.10 | M | 23 | 3 | 52 |
| Sub.11 | M | 21 | 1 | 120 |
| Mean | | 21 | 1.64 | 99.91 |
| S.D. | | 0.8 | 0.78 | 27.36 |
| | | | Young female | |
| Sub.12 | F | 23 | 2 | 120 |
| Sub.13 | F | 22 | 3 | 55 |
| Sub.14 | F | 27 | 5 | 67 |
| Sub.15 | F | 26 | 1 | 68 |
| Sub.16 | F | 23 | 2 | 110 |
| Sub.17 | F | 22 | 2 | 89 |
| Sub.18 | F | 21 | 1 | 57 |
| Mean | | 23 | 2.29 | 80.86 |
| S.D. | | 2.2 | 1.38 | 25.96 |
| | | | Middle male | |
| Sub.19 | M | 31 | 8 | 120 |
| Sub.20 | M | 31 | 10 | 120 |
| Sub.21 | M | 31 | 8 | 120 |
| Sub.22 | M | 35 | 10 | 120 |
| Sub.23 | M | 49 | 30 | 120 |
| Sub.24 | M | 44 | 24 | 120 |
| Sub.25 | M | 33 | 14 | 120 |
| Mean | | 36 | 14.86 | 120.00 |
| S.D. | | 7.3 | 8.71 | 0.00 |

学的にみると最終出力パラメータであり，この血圧反応をストレスと捉えるのは，心臓血管系血行動態を強調した視点からすると妥当な生理的ストレス指標と言える[17, 30].

### 3･3　被験者

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，十分な実験主旨の説明を受けた運転免許保有の健常成人男女 25 名（26.8 ± 8.0 S.D. 歳）であった．なお性別差・年齢差の検討も視野に入れ，若年層男性 11 名（young male；YM：Sub.01-11：21.5 ± 0.8 S.D. 歳），若年層女性 7 名（young female；YF：Sub.12-18：23.4 ± 2.2 S.D. 歳），中高年層男性 7 名（middle male；MM：Sub.19-25：36.3 ± 7.3 S.D. 歳）を対象として実験を行った．被験者の詳細と実験での運転時間（条件は 3.4 参照）を**表 1** に示す．

### 3･4　実験手順・条件

本実験の主たる目的は，運転ストレスと提案ストレス評

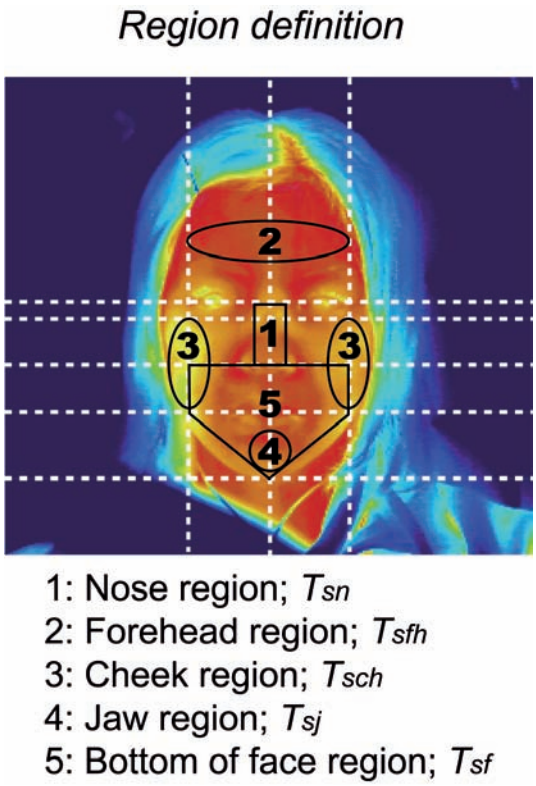


**図 2**　顔面皮膚温計測領域
**Fig. 2**　Region definition of the face.

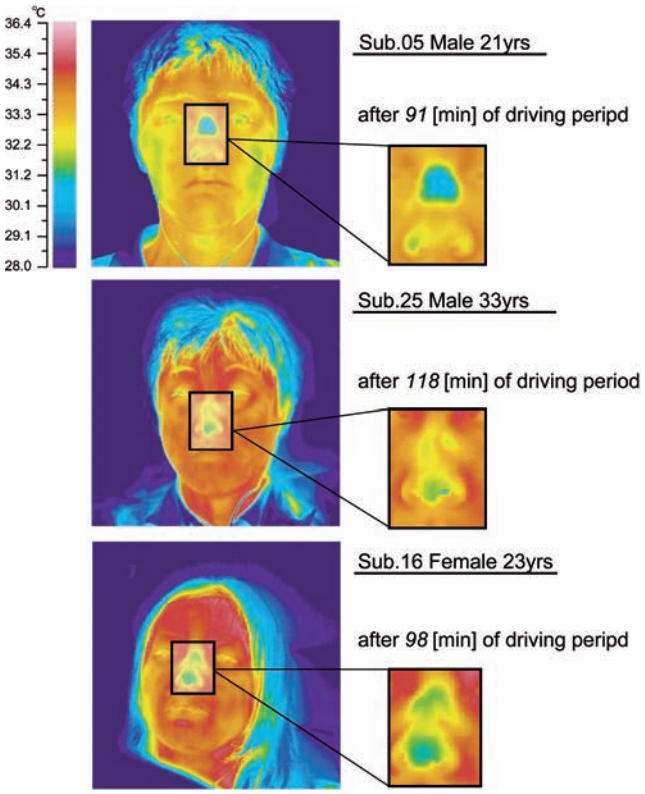


**図 3**　単調運転ストレス負荷中の鼻部熱画像
**Fig. 3**　Thermal images of the nose in monotonous driving situation.

価手法との相関関係を確認することにあるので，実験室の環境条件は一定とした．被験者はセンサ類を装着後，一定温度（約 25 ℃）に保たれた運転シミュレーター室に入室し，スクリーンから 1300 mm 離れた運転席にて座位安静にしてもらった．その後，10 分間の安息休息（baseline period），最長 120 分間の模擬単調運転（simulated driving period），5 分間の安静休息（end period）の順で午前 9 時より実施し，その時の各種生体情報を計測した．このとき被験者には次のような条件および教示を与えた．

1）実験 2 日前より規則正しい生活をしてもらい，概日リズムを整えてもらうこと．
2）実験当日の食事は実験開始 1 時間前までに済ませておくこと．
3）極めて単調なオーバルコースを時速 80–120 km/h で運転すること．
4）指定された走行レーンを逸脱しないこと．
5）実際の車を運転しているつもりで，安全運行に努めること．

なお，実験の運転時間は 120 分間に設定したが，この間に眠気に耐えられず走行レーンを完全に逸脱，側壁に激突するなど事故を想起させる状況がみられた場合はその時点で実験を終了した．

### 3·5　データ解析

統計解析

各生理指標における時間経過の条件差の分析と相関分析では，表 1 に示したとおり被験者により走行中の実験時間が異なるため，各人の実験時間を 100％に規格化を施し 100％-time に統一した後，各測定項目に対して 10％-time 毎の平均値を使用した．平均値の有意性検定には，4 水準のグループ毎（YM，YF，MM，全被験者）に，各指標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．また，必要な場合には Greenhouse と Geisser の $\varepsilon$ 補正を自由度に施し，有意水準は 5％と 1％を使用した．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 検定を行った．使用した統計解析ソフトは SPSS（SPSS Release 16.0J，SPSS Japan Inc.，Japan）であった．

熱画像解析

サーモグラフィーを用いて計測した顔面の温度は実験中 1 frame/s で計測後，1 分毎に各領域（詳細は下記）の平均温度をマニュアルで抽出し，解析を行った．各温度抽出部位は各被験者の目や口などの境界部位を基準に設定した（図 2 参照）．なお，解析に使用したのは熱画像処理プログラム NEC San-ei Image Processor Pro（TH91-702，NEC 三栄(株)，東京）であった．

1）鼻…鼻根から鼻尖まで鼻全体をカバーする長方形の領域

※**図 3** に実験中（運転ストレス負荷時）の鼻の温度低下の様子を示す．ストレスにより温度低下が確認された末

梢部の鼻であるが，実験中は図 3 に示すように同じ鼻でも温度低下が顕著に表れる部位が Sub.05 のように鼻根，Sub.14 のように鼻尖，Sub.16 のように鼻全体と被験者により違いが見られた．解剖学的には鼻の血管走行が人により異なりいくつかのタイプに分類できること，また鼻への主な血液供給血管に個人差があることに由来すると言われている[31]．そこで，その点を考慮した上で鼻の温度抽出領域を鼻根から鼻尖までの鼻全体カバーする長方形とした．

2）額…顔面中心を通る垂直線と，そこから目尻を通る線までを楕円の長半径とする領域
3）頬…目の下縁を通る水平線から唇の中心を通る水平線までを長直径とする楕円領域
4）顎…顎先を通る水平線と顔面中心を通る垂直線を基準とした円領域
5）顔面下半分…両目尻を通る垂直線・鼻の下縁，唇の中心，顎先を通る水平線を基準とした 5 角形の領域

## 4. 結　　果

**図 4 − 7** にそれぞれ若年層男性（YM 群）11 名・若年層女性（YF 群）7 名・中高年層男性（MM 群）7 名の性別・年齢層別に分類した 3 グループ，およびそれら全被験者 25 名を整理した計測対象時系列変化を示す．横軸は時間[%-time]，縦軸は上から順に平均血圧 MBP，心拍間隔時間 RR，心拍出量 CO，血圧と心拍出量より算出した全末梢循環抵抗 TPR（Total Peripheral Resistance：= *MBP/CO*），基準化脈波容積 NPV，指尖部皮膚温 $T_f$，鼻部皮膚温 $T_{sn}$，額部皮膚温 $T_{sfh}$，頬部皮膚温 $T_{sch}$，顎部皮膚温 $T_{sj}$，顔面下半分の皮膚温 $T_{sf}$，額部と鼻部の差分皮膚温 $T_{sfh\text{-}sn}$，頬部と鼻部の差分皮膚温 $T_{sch\text{-}sn}$，顎部と鼻部の差分皮膚温 $T_{sj\text{-}sn}$，顔下半分と鼻部の差分皮膚温 $T_{sf\text{-}sn}$ である．同図の各プロットは平均値（± S.E.M.）を示している．

グループ毎に，各指標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結果，YM 群では $T_f/T_{sfh}/T_{sch}$ 以外，YF 群では $RR/T_{sch}/T_{sj}/T_{sf}$ 以外，MM 群では $CO/RR/T_{sfh}/T_{sch}/T_{sj}/T_{sf}$ 以外，および全被験者では $RR/CO/T_{sch}/T_{sf}$ 以外の主効果が有意であった．言い換えれば，上記の指標に有意な差が認められなかった．グループ毎の検定統計量の結果を**表 2** に示す．主効果が有意だった指標に対しては，対ベースライン比較の Dunnett 下位検定を行い，図 4 − 7 のグラフにはその結果も示されている．

図 4 − 7 の平均血圧 MBP に関しては，MM 群で全体的に絶対値が高めの傾向であったが，性別差や年齢差による反応パターン自体の違いは見られず，実験終盤ではベースライン時と比べて約 25 mmHg の有意な増加が見られた．被験者に課したタスクは眠気を我慢しながら周回コースを

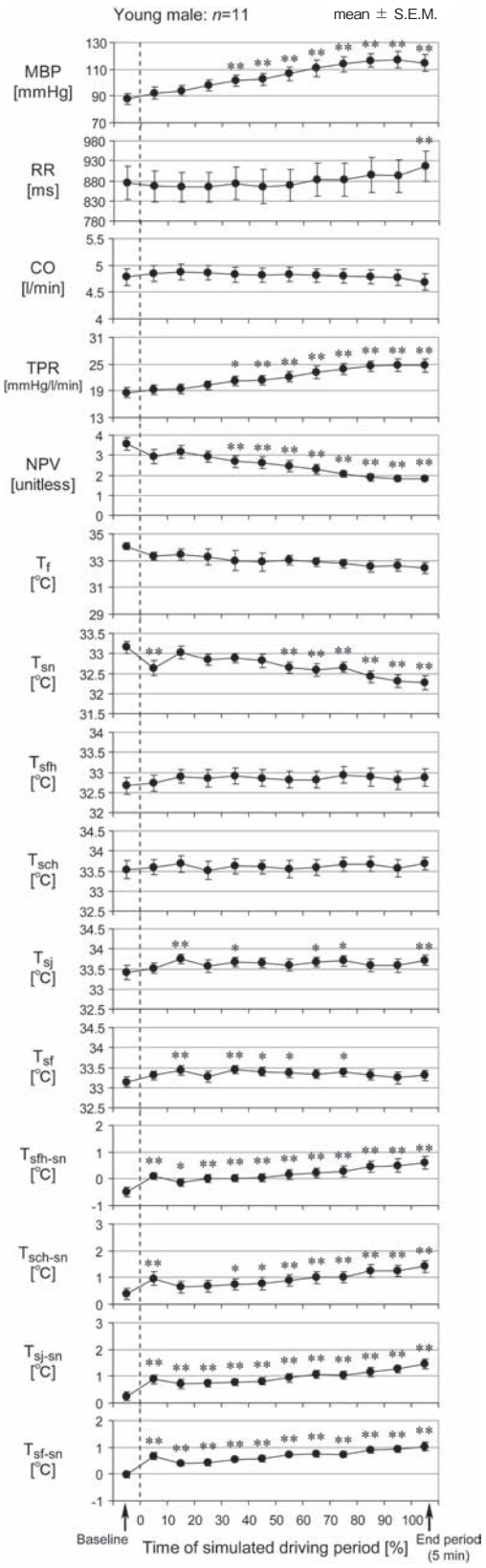


**図 4**　計測対象量と各皮膚温差分値の時系列変化（若年層男性 11 名）

**Fig. 4**　Summarized results of trend-charts of physiological variables together with those of differential skin temperatures. Asterisks indicate significant deviation according to the *Dunnett* test ($^{*}p < 0.05$, $^{**}p < 0.01$). See text for symbols and explanation.（Young male subjects: $n = 11$）

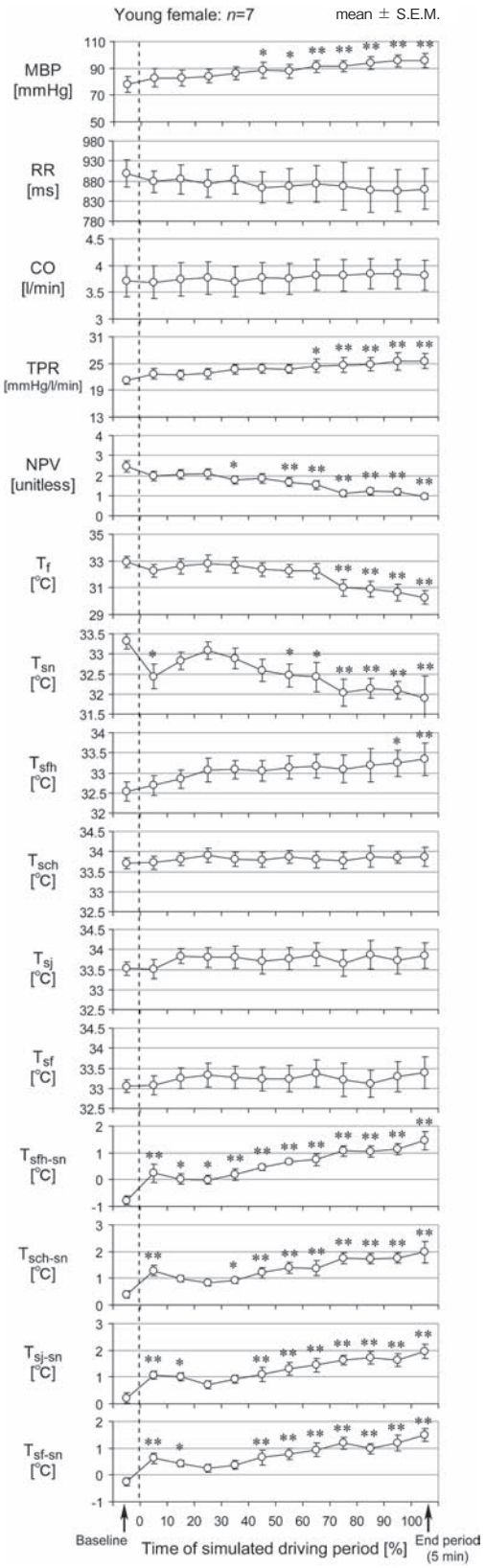


**図 5**　計測対象量と各皮膚温差分値の時系列変化（若年層女性 7 名）

**Fig. 5**　Summarized results of trend-charts of physiological variables together with those of differential skin temperatures. Asterisks indicate significant deviation according to the *Dunnett* test ($^{*}p < 0.05$, $^{**}p < 0.01$). See text for symbols and explanation. (Young female subjects: $n = 7$)

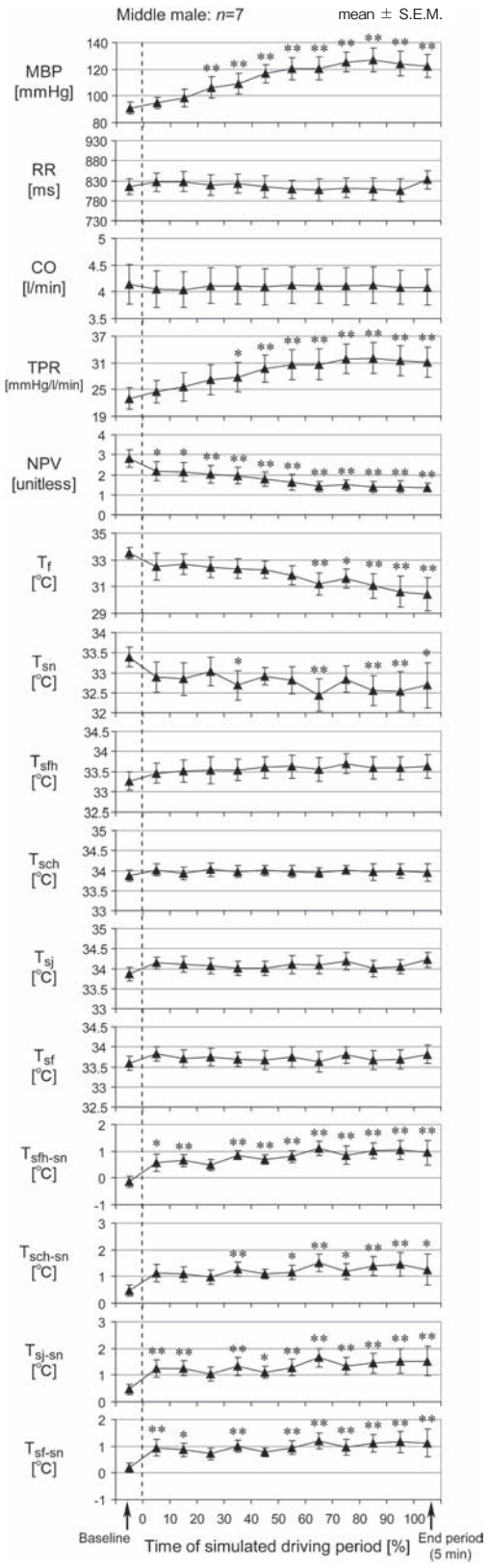


**図 6**　計測対象量と各皮膚温差分値の時系列変化（中高年層男性 7 名）

**Fig. 6**　Summarized results of trend-charts of physiological variables together with those of differential skin temperatures. Asterisks indicate significant deviation according to the *Dunnett* test ($^{*}p < 0.05$, $^{**}p < 0.01$). See text for symbols and explanation. (Middle male subjects: $n = 7$)

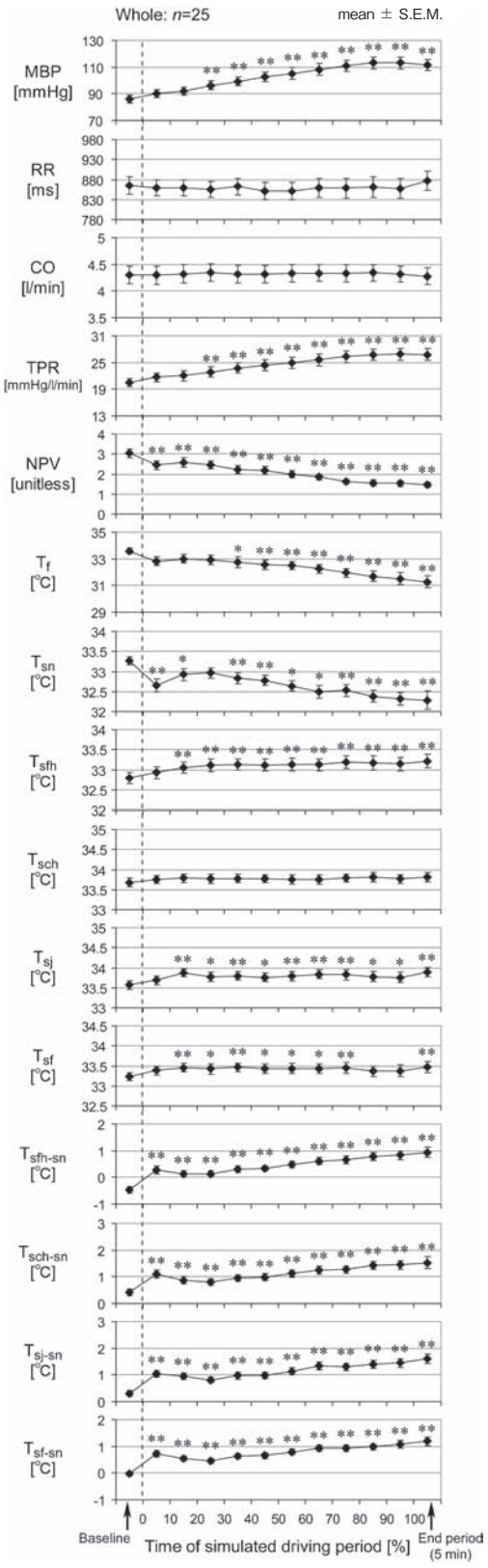


**図 7**　計測対象量と各皮膚温差分値の時系列変化（全被験者 25 名）

**Fig. 7**　Summarized results of trend-charts of physiological variables together with those of differential skin temperatures. Asterisks indicate significant deviation according to the *Dunnett* test ($^{*}p < 0.05$, $^{**}p < 0.01$). See text for symbols and explanation. (Whole subjects: $n = 25$))

ひたすら運転するという単調なものであったが，そこから発生する「眠気に抗う」という行為が生体にとって強いストレスになっていたことが解る．ただし，Finapres や本研究で用いた容積補償法の“volume-clamp 法”を利用した非侵襲連続血圧計測には，長時間計測時の鬱血などの要因[32, 33]でドリフト（上向き方向へのシフト）の影響が少なからず重畳する可能性があり，血圧上昇要因の全てが運転ストレスによるものとは言えないことを付記しておく．

心拍間隔時間 RR と心拍出量 CO の心機能に関するパラメータにおいては，YM 群の両指標と，YF 群の CO のみ主効果が認められた．しかし，その下位検定では YF 群の走行後安静条件のみにしか主効果が認められなかったため，両指標はグループ間の絶対値の違いがあるものの，走行中はほぼ一定で推移したと言える．

全身の末梢循環抵抗を表す TPR に関しては，全ての群に対して主効果が有意であり，下位検定では実験終盤から有意な上昇が確認された．基準化脈波容積 NPV に関しても，全群，主効果が有意であり，下位検定では時間経過に伴う有意な低下が確認された．すなわち，$\alpha$ アドレナリン作動性の交感神経活動が亢進し，末梢部の血管が収縮していたことを示している．さらに，それに伴う末梢部血流低下の影響により指尖部温 $T_f$ および鼻部温 $T_{sn}$ の時間経過に伴う有意な低下が確認された．

末梢部に対して各体幹部皮膚温（額部皮膚温 $T_{sfh}$，頬部皮膚温 $T_{sch}$，顎部皮膚温 $T_{sj}$，顔面下半分の皮膚温 $T_{sf}$）は，一部の指標に主効果が認められたが，実験室の環境が一定であったことからほぼ一定あるいは上昇傾向で推移していることが判る．

末梢部皮膚温低下と体幹部皮膚温一定という結果より，本研究でストレス指標として用いようとしている各皮膚温差分値（体幹部皮膚温－末梢部皮膚温：$T_{sfh\text{-}sn}$，$T_{sch\text{-}sn}$，$T_{sj\text{-}sn}$，$T_{sf\text{-}sn}$）は，ストレス指標である MBP に追従するように上昇した．そこで，Passing-Bablok 法（Passing-Bablok regression）を用いて MBP と皮膚温差分値との相関関係の有無を検討した．この解析手法は臨床化学検査の分野において，誤差を含む 2 つの測定法の間の直線関係を分析するのによく用いられる手法である[34]．**図 8** に MBP と各皮膚温差分値の相関図を示す．ここで，x-y 両軸の MBP と皮膚温差分値には，模擬運転期間全体の標準偏差で除して標準化した値（z 得点）を用いた．同図から判るように，全ての皮膚温差分値において回帰直線の切片と傾きは 95％信頼区間内に入り，両者の相関が確認された．

## 5．考　　察

### 5･1　心臓血管系と皮膚温

循環動態の把握，すなわち血行力学測定はストレスを評

**表 2**　グループ毎の，時間経過を要因とする分散分析の検定統計量
**Table 2**　Test statistic of 1-way analysis of variance.

| Measures | YM[a] | | YF[b] | | MM[b] | | Whole[c] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $F_{11,110}$ | $\eta^2_p$ | $F_{11,66}$ | $\eta^2_p$ | $F_{11,66}$ | $\eta^2_p$ | $F_{11,264}$ | $\varepsilon$ | $\eta^2_p$ |
| MBP, mmHg | 14.73** | 0.60 | 5.70** | 0.49 | 15.77** | 0.72 | 32.45** | 0.22 | 0.58 |
| RR, ms | 4.91** | 0.33 | 0.71 | 0.11 | 1.15 | 0.16 | 1.30 | 0.23 | 0.05 |
| CO, l/min | 1.94* | 0.16 | 2.41* | 0.29 | 0.61 | 0.09 | 0.83 | 0.34 | 0.03 |
| TPR, mmHg/l/min | 15.17** | 0.60 | 3.35** | 0.36 | 12.33** | 0.67 | 27.11** | 0.24 | 0.53 |
| NPV, unitless | 10.36** | 0.51 | 9.29** | 0.61 | 9.05** | 0.60 | 26.82** | 0.28 | 0.53 |
| $T_f$, ℃ | 1.80 | 0.15 | 11.64** | 0.66 | 4.62** | 0.44 | 10.89** | 0.26 | 0.31 |
| $T_{sn}$, ℃ | 8.82** | 0.47 | 4.74** | 0.44 | 2.25* | 0.27 | 11.92** | 0.52 | 0.33 |
| $T_{sfh}$, ℃ | 1.16 | 0.10 | 1.96* | 0.25 | 1.47 | 0.20 | 3.82* | 0.23 | 0.14 |
| $T_{sch}$, ℃ | 1.21 | 0.11 | 0.43 | 0.07 | 0.26 | 0.04 | 0.76 | 0.47 | 0.03 |
| $T_{sj}$, ℃ | 2.33* | 0.19 | 1.55 | 0.21 | 1.08 | 0.15 | 3.53** | 0.52 | 0.13 |
| $T_{sf}$, ℃ | 2.22* | 0.18 | 0.94 | 0.14 | 0.90 | 0.13 | 2.00 | 0.50 | 0.08 |
| $T_{sfh-sn}$, ℃ | 12.41** | 0.55 | 10.90** | 0.65 | 4.24** | 0.41 | 21.98** | 0.34 | 0.48 |
| $T_{sch-sn}$, ℃ | 11.51** | 0.54 | 7.58** | 0.56 | 2.62** | 0.30 | 16.77** | 0.42 | 0.41 |
| $T_{sj-sn}$, ℃ | 16.21** | 0.62 | 7.62** | 0.56 | 3.85** | 0.39 | 21.99** | 0.47 | 0.48 |
| $T_{sf-sn}$, ℃ | 12.98** | 0.57 | 8.76** | 0.59 | 3.20** | 0.35 | 21.99** | 0.47 | 0.48 |

YM: Young male, YF: Young female, MM: Middle male
[a]$n$=11. [b]$n$=7. [c]$n$=25
**$p < 0.01$. *$p < 0.05$.

価するうえで非常に重要である[17，35-37]．この循環系を血行力学的に見ると，近似的に（循環器系を大雑把に線形系と考え，静脈圧は動脈圧に比べて十分小さいとすれば）オームの法則（圧＝抵抗×出量）が適用され，$BP = TPR \times CO$（血圧＝全身末梢循環抵抗×心拍出量）で表される．既述のように血圧の変動はストレス評価の指標として用いられるが，血圧を上昇させる要因が TPR 由来なのか CO 由来なのかでそのストレスの質をも評価可能である．すなわちヒトがストレスを感じると脳の心臓血管中枢から自律神経－副腎髄質系を介し二通りの経路で血圧を変化させる．一つ目が交感神経系の亢進により末梢血管を収縮させて血圧を上昇させる血管優位反応パターン，二つ目は心臓の心拍間隔時間および血液駆出量を調節する心臓優位反応パターンである[38]．前者を惹起させるような事態を受動的対処（騒音や寒冷負荷など，対処の余地の少ないストレッサーにより喚起），後者を惹起させるような事態を能動的対処（暗算計算などの能動的に対処が可能なストレッサーにより喚起）と呼ばれる[39, 40]．本実験で行った眠気を抗いながら単調な運転をするというストレスは，実験結果からも明らかなように，統計有意な TPR の上昇と NPV の低下（末梢血管抵抗の増加＝末梢血管の収縮）が血圧上昇の主な機序であり，受動的対処事態に分類できる．この単調運転の受動性に関する知見は，従来から Yamakoshi ら[4, 41]によっても論じられており，本実験においてもそれが再確認された．単調運転ストレスが血管優位性のストレス反応を示すという結果は，ストレス指標に末梢部皮膚温を用いるという本研究の視点からは非常に重要なものである．なぜならば，皮膚温の決定因子はほぼ皮膚下血流量（血管容積変化）に依存するからである[20]．さて，末梢皮膚温として運転中に適用可能と考えられる部位は，鼻 $T_{sn}$ の他に手指 $T_f$ が考えられる．図 7 から判るように $T_f$ は $T_{sn}$ に比べて温度低下が顕著であることは，末梢部位として優れる点である．ここで，個々人の末梢部皮膚温低下の最大値を平均化すると，$T_f$：－3.47 ± 1.92 S.D.℃，$T_{sn}$：－1.61 ± 0.93 S.D.℃であり，$T_f$ は $T_{sn}$ の約 2 倍低下した．しかし，3.5 項で述べたように $T_{sn}$ は温度分布の個人差を考慮した鼻部抽出範囲の平均の温度であり，例えば鼻部抽出範囲の最低温度で評価してやれば，更に大きな差として評価可能である．すなわち，温度抽出処理の方法によっては鼻部のストレスを更に大きな差として評価できることを付記しておきたい．また，皮膚温は接触圧の影響を受けやすい（虚血される）点も鑑みると，末梢部位としては総合的に鼻部が優れると言えよう．

グループ間の循環動態反応パターンは総じて同様な傾向であり，本実験で着目したグループ間における相違は確認されなかった．グループ間の温度反応に関しては，末梢部位としての鼻部 $T_{sn}$ の有意な低下は申し分ない．一方，体幹部としての額部 $T_{sfh}$，頬部 $T_{sch}$，顎部 $T_{sj}$，および顔下半分 $T_{sf}$ の反応は，グループ間に微妙な違いが確認された．本報の主旨とは異なるので，ここで差分を取るべき適

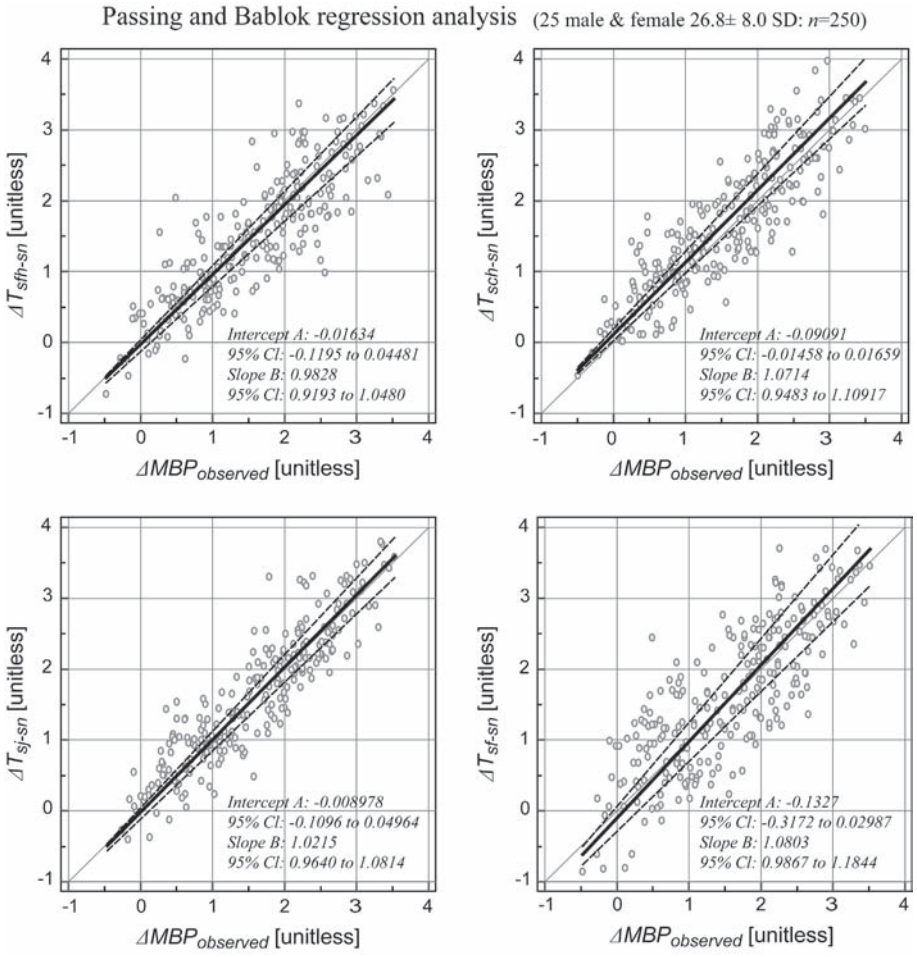


**図 8**　ストレス指標としての血圧 MBP と各皮膚温差分値の相関関係

**Fig. 8**　Correlation between stress reference of mean blood pressure and differential skin temperatures.

切な体幹部位を結論付けることはできないが，4 水準（YM/YF/MM/全被験者）で主効果が認められなかった $T_{sch}$ と，3 水準（YF/MM/全被験者）で主効果が認められなかった $T_{sf}$ は，今後適切な体幹部位を検討していく上での有力候補に挙げられる．ただし，その部位の持つ熱容量の相違で，環境外乱変化を与えたときはまた異なる結果が得られると考えられるので，最適な体幹部位の検討は今後の研究に期待される．また，実際に車を運転する年齢層は幅広く，本研究で扱ったグループ間の検討のみでは本法の汎用性を証明する必要十分な条件とは言えない．この個人差に関する更なる検討も今後の課題に残される．

### 5･2　ストレス評価指標としての皮膚温差分値

本研究では末梢部と（条件付きの）体幹部との皮膚温差分値をストレス評価指標として提案した．それは環境外乱の影響をキャンセルし，おおよそストレスによる温度変動のみを抽出するであろうというのが仮説であった．今回は環境一定という条件の下で実験を行った為，着目した 4ヶ所の体幹部皮膚温は期待値通りほぼ一定で推移した．それに対して末梢部の皮膚温は，運転ストレスが蓄積する実験後半になるにつれて緩やかに温度低下が確認された．故に，両者の差分値は，客観的ストレス指標の MBP と良い追従を示した．そこで，「MBP（対）皮膚温差分値」の相互相関の検討を試みた結果，全ての皮膚温差分値において有意な相関が確認された（図 8 を参照）．故に，本研究で提案した皮膚温差分値は，環境一定及びシミュレーター環境という条件の下においては，運転ストレスを良く反映する定量的指標と扱えることが確認された．しかしながら，本法の有効性を証明するには更なる重要な論点が残される．すなわち，2 章でも触れたが，③式の条件を満たす最適なリファレンス体幹部位の選定，そして外乱を負荷した運転環境でのストレス評価試験による本法の有効性を検証することが最重要ポイントとなる．また，実用に持って行く場合は，対象部位のトラッキング処理技術も重要な課題となる．これらに関する更なる検討は，今後の課題として残される．

最後に本法の限界として 1 つ問題点を指摘しておく．既述の「③式の条件を満たす最適なリファレンス体幹部位の選定」に関して，皮膚温の部位差の影響である．すなわち，リファレンスとする体幹部位は，環境変化が起こったとき鼻部と同等の温度勾配で過渡的に変化し，変化幅も同

等程度であることが理想である．しかし実際は，部位による熱容量の相違，また環境変化による部位別温度差は刺激の強度が大きくなればなるほど広がるとの報告がある[42]ことから，本法は軽度な（寒すぎるあるいは暑すぎると言った温熱環境的に著しい変化のない）環境変化の中でしか適用できないであろう点である．しかし近年の車内は温熱快適性を追求し，オートエアコンの普及や窓ガラスの熱線吸収構造などが一般化してきている．よって，運転者の温熱感に大きな影響を及ぼすほどの環境変化は少ないと期待できるので，実用的には問題ない制約であると考える．

## 6. 結　　論

運転ストレスの定量的指標として，本研究で提案した末梢部と体幹部との皮膚温差分値が，本実験で再現したような“単調な運転状況におけるストレス”を反映する有用な情報であることが確認された*．その機序は交感神経活動の亢進による末梢血管の収縮から引き起こされたことが，各種心臓血管系の生体情報反応から説明された．ただし，本研究では純粋にストレスと皮膚温差分値との相互関係を調べることが主目的であったため，環境外乱は一定の条件であった．今後は実車内環境で想定される環境外乱変動の伴う評価実験を行い，本ストレス評価法に用いる最適な体幹部の選定を行っていく予定である．

*運転中に生じる多種のストレスを本法で全て評価できるかどうかは現段階では断言できない．また，皮膚温で評価可能なのは運転ストレスに限ったものではなく，既報[11-14]にもあるような一般的な作業ストレスなど，極めて応用範囲が広い生理指標であることを付記しておく．

**謝辞**　本研究は，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運転シミュレーター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．なお，本研究の一部は，立石科学技術振興財団研究費補助金，独立行政法人科学技術振興機構シーズ発掘試験補助金，および株式会社ユーシスの支援により行われた．ここに記して謝意を表する．

## 文　　献

1. 警視庁：警視庁統計「平成 20 年中の交通事故の発生状況」
2. 交通事故総合分析センター：人はどんなミスをして交通事故を起こすのか．イタルダ・インフォメーション．**33**, 2001.
3. 山越健弘, 山越憲一, 日下部正宏：単調運転時の生体反応計測と生理活性度指標の基礎的検討．自動車技術会論文集．**36**(6)：205-212, 2005.
4. Yamakoshi T, Rolfe P, Yamakoshi Y, Hirose H: A novel physiological index for driver's activation state derived from simulated monotonous driving studies. Transp Res C. **17**(1)：69-80, 2009.
5. Robert Y, John D: The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. J Comparative Neurol Psychol. **18**: 459-482, 1908.
6. 河上清治, 岩崎克彦, 西田誠ほか：レーンキーピングアシストの紹介．Toyota Technical Review. **55**(1)：54-59, 2006.
7. Takahashi Y: Development of ADA (Active Driving Assist III). Subaru Technical Review, 2004.
8. Miyakawa T, Sakai T, Nakamura K: Development of blink detection system for doze alarm using real-time eye tracking system. IEICE Tech Rep. **103**(81)：41-45, 2003.
9. Christos P, Chrysoula K, Panagiotis D: Indicators of sleepiness in an ambulatory EEG study of night driving. 28th Annual Int Conf of IEEE EMBS, 6201-6204, 2006.
10. 柳平雅俊, 安士光男：眠気予測技術の開発．PIONEER R & D. **17**(1)：1-8, 2007.
11. 石川恵子, 原野広和, 栗原武克, 織田弥生, 西尾恭幸, 鈴木まや：顔面皮膚温を用いた緊張作業ストレスの評価．計測自動制御学会論文集．**11**(2)：131-134, 1996.
12. Genno H, Ishikawa K, Kanbara O, Kikumoto M, Fujiwara Y, Suzuki R, Osumi M: Using facial skin temperature to objectively evaluate sensations. Int J Ind Ergonomics. **19**(2)：161-171, 1997.
13. Tanaka H, Ide H: Study of stress analysis using facial skin temperature. J Robotics Mechatronics. **10**(2)：1998.
14. Or CKL, Duffy VG: Development of a facial skin temperature-based methodology for non-invasive mental workload measurement. Occupational Ergonomics. **7**: 83-94, 2007.
15. 島田賢, 田中久弥, 井出英人：顔面皮膚温による覚醒水準の一評価法．電気学会論文誌 C. **118**(11)：1680-1681, 1998.
16. 島田賢, 田中久弥, 井出英人：顔面皮膚温の局所フラクタル次元解析による覚醒水準の評価法．電気学会論文誌 C. **120**(10)：1429-1434, 2000.
17. 澤田幸展：一過性ストレス－心臓血管系血行動態を強調した視点－．心理学評論．**44**: 328-348, 2001.
18. Takahara M: Peripheral skin temperature as an index of psychological stress. availability and limitations research bulletin of educational sciences. Naruto University of Teacher Education. **15**: 119-128, 2000.
19. Nakayama K, Goto S, Kuraoka K, Nakamura K: Decrease in nasal temperature of rhesus monkeys (Macaca mulatta) in negative emotional state. Physiol Behav. **84**: 783-790, 2005.
20. 中山昭雄：温熱生理学, ㈱理工学社, 東京, 1981, pp. 13-15.
21. 中山昭雄：温熱生理学, ㈱理工学社, 東京, 1981, pp. 122-126, 538-539.
22. Bergersen TK: A search for arteriovenous anastomoses in human skin using ultrasound Doppler. Actta physiol Scand. **147**(2)：195-201, 1993.
23. Yamakoshi K, Shimazu H, Togawa T: Indirect measurement of instantaneous arterial blood pressure in the human finger by the vascular unloading technique. IEEE Trans Biomed Eng. **BME-27**: 150-155, 1980.
24. Yamakoshi K: Non-invasive techniques for ambulatory blood pressure monitoring and simultaneous cardiovascular measurements. J Ambul Monit. **4**: 123-14, 1991.
25. 山越憲一, 戸川達男：“2 生体内圧の計測”生体用センサと計測装置, ㈱コロナ社, 東京, 2000, pp. 17-57.
26. Yamakoshi K, Nakagawara M, Tanaka S: Current development in beat-by-beat cardiovascular monitoring with non-invasive and ambulatory techniques, (In Singh M, Radhakrishnan S, Ratil KM, Reddy MRS (Eds): Medical Diagnostic Techniques and Procedures, Narosa Pub-

lishing House, New Delhi), 2000, pp. 132-141.
27. Yamakoshi K: Non-invasive cardiovascular haemodynamic measurements, (In Oberg PA, Togawa T, Spelman F (Eds): Sensors in Medicine and Health Care (Sensors Applications, Vol. 3), Wiley-VCH Verlag, Weinheim), 2003, pp. 107-160.
28. Ito H, Yamakoshi K, Togawa T: Transthoracic admittance plethysmography for measuring cardiac output. J Appl Physiol. **40**: 451-454, 1976.
29. Sawada Y, Tanaka G, Yamakoshi K: Normalized pulse volume (NPV) derived photo-plethysmographically as a more valid measure of the finger vascular tone. Int J Psychophysiol. **41**: 1-10, 2001
30. 澤田幸展: 血圧反応性再訪. 生理心理学と精神生理学. **24** (3): 257-271, 2006.
31. Jung DH, Kim HJ: Arterial supply of the nasal tip in asians. Laryngoscope. **110**: 308-311, 2000.
32. Pickering TG, Hall JE, Appel LJ, Falkner BE, Graves J, Hill MN, Jones DW, Kurtz T, Sheps SG, Roccella EJ: Recommendations for blood pressure measurement in humans and experimental animals: Part 1: Blood pressure measurement in humans: A statement for professionals from the subcommittee of professional and public education of the American heart association council on high blood pressure research. Circulation. **111** (1): 697-716, 2005.
33. Ristuccia HL, Grossman P, Watkins LL, Lown B: Incremental bias in finapres estimation of baseline blood pressure levels over time. Hypertension. **29** (4): 1039-1043, 1997.
34. Passing H, Bablok W: A new biometrical procedure for testing the equality of measurements from two different analytical methods. Application of linear regression procedures for method comparison studies in clinical chemistry, Part I. J Clin Chem Clin Biochem. **21**: 709-720, 1983.
35. 大須賀美恵子: 自律神経系生理指標を用いたストレス評価. HQL. **21**: 1992.
36. 大須賀美恵子, 寺下裕美, 下野太海: 心臓血管系モデルを用いた自律神経指標の解釈. 医用電子と生体工学. **11** (1): 75-85, 1997.
37. 山越健弘, 野川雅道, 山越憲一: ストレスの物理的評価. BIO INDUSTRY. シーエムシー出版, 東京, 2008, **25** (6), pp. 7-17
38. 澤田幸展: 心拍変動制: それは生理心理学において利用可能か？ バイオフィードバック研究. **26**: 8-13, 1999.
39. Gregg ME, Matyas TA, James JE: A new model of individual in hemodynamic profile and blood pressure reactivity. Psychophysiology. **3**: 64-72, 2002.
40. Obrist PA: Cardiovascular psychophysiology. A perspective. New York: Plenum Press, 1981.
41. Yamakoshi T, Park SB, Jang WC, Kim K, Yamakoshi Y, Hirose H: Relationship between salivary Chromogranin-A and stress induced by simulated monotonous driving. Med Biol Eng Comput. **47**: 449-456, 2009.
42. 大原孝吉: 新生理学大系 22 エネルギー代謝・体温調節の生理学, 医学書院, 東京, 1987, p. 100.

**山越　健弘**（ヤマコシ　タケヒロ）

1998 年室蘭工業大学建設システム工学科卒，2000 年同大学院修士課程修了．2006 年福井大学大学院博士課程修了．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・福祉工学などの研究開発に従事．

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．

**小林　寛幸**（コバヤシ　ヒロユキ）

2008 年金沢大学工学部人間・機械工学科卒業．現在，金沢大学大学院修士課程在学中．主に自動車運転中の生体情報計測・解析に関する研究に従事．

日本生体医工学会に所属．

**後藤　雄二郎**（ゴトウ　ユウジロウ）

2009 年金沢大学工学部人間・機械工学科卒業．現在，金沢大学大学院修士課程在学中．主に自動車運転中の生体情報計測・解析に関する研究に従事．

日本生体医工学会に所属．

**廣瀬　元**（ヒロセ　ハジメ）

1994 年青山学院大学理工学部機械工学科卒業，1997 年米国オハイオ州立大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了，2003 年東北大学博士課程修了．工学博士．1998 年金城短期大学秘書学科専任講師，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．