

# 熱画像を用いた温冷感推定技術および車載空調への応用

Estimation of Thermal Sensation Using Thermal Images and Application to Vehicle Occupants

式井 慎一  
Shin-ichi Shikii

米田 亜旗  
Aki Yoneda  
吉岡 元貴  
Mototaka Yoshioka

野坂 健一郎  
Ken-ichiro Nosaka  
久保 博子  
Hiroko Kubo

## 要 旨

ルームエアコンでの空調時の温熱快適性の向上やエネルギーロスの削減のために、撮影した熱画像から人の温冷感を推定するアルゴリズムを開発した。本アルゴリズムは、熱画像から算出した人体からの放射熱に基づき温冷感を推定する独自モデルによるもので、着衣の量によらず温冷感を推定できるという画期的な効果を有する。また、温冷感推定を車載環境下で実現するには、人体に暴露される風速のリアルタイム計測が困難なことが実用化の大きな問題となっていた。そこで、ルームエアコン向け温冷感推定モデルをベースに、乗車時に装着が必須なシートベルトを活用することで、風速を計測することなく温冷感推定可能な車載向けモデルへと進化させた。実車を模した環境下で行った実験の結果、風速を用いることなく従来モデルを超える温冷感推定精度を実現した。

## Abstract

We have developed a novel estimation algorithm for thermal sensation by using a thermal camera for the application of room air conditioning. This algorithm is based on our original model which uses the relationship between heat loss from the human body and thermal sensation. This model has the unique feature to estimate the thermal sensation without estimating the amount of clothes, and is expected to improve thermal comfort and reduce energy consumption. Practical application of in-vehicle estimation of thermal sensation had been difficult to implement due to the challenge of accurately measuring wind velocity exposed to the human body in real time. For the application of this algorithm to vehicle occupants, we have improved the original model by using the seat belt to estimate thermal sensation without measuring wind velocity. In an experiment under conditions imitating the environment of an actual vehicle, we have shown that the proposed model is able to estimate thermal sensation without using wind velocity with accuracy higher than the conventional model.

## 1. はじめに

ルームエアコンで空調されている室内に複数の人がいる時、暑く感じる人、寒く感じる人など温度の感じ方は多様であり、すべての人に快適な空調を実現するためには人の温冷感(暑い寒い感覚)を推定し、推定した温冷感に基づき風を吹き分ける必要がある。この課題の解決のため、人の温冷感を推定する方法が従来から検討されてきた。

人の温冷感は、気温、放射温度、湿度、風速、代謝量、着衣量の温熱6要素が分かれば推定可能とされ[1], Fangerや Gaggeらはそれら温熱6要素を用いた独自の温冷感推定モデルを提案してきた[2][3]。これらのモデルをルームエアコンに適用する場合、気温、放射温度、湿度は容易に計測可能で、人体に暴露される風速はほぼ無視でき、代謝量も所定の値として差し支えない。しかし人の着衣量の推定が困難なことが、ルームエアコン向け温冷感推定実現の課題であった。一方で、人の手や足、鼻等の末梢(まっしょう)部と呼ばれる部位の温度を計測することで、サーモカメラのみを用いて非接触で温冷感を簡易的に推定するモデルも提案されている[4]-[6]。これは、寒い時には末梢部の温度が

低くなり、暑いと高くなるという人体の反応を起点としている。しかしこのモデルでも、着衣量の違いにより正確に温冷感を推定できないという問題があった。

筆者らはこの問題を独自モデルにより解決した。詳細は2.1節で述べるが、このモデルは人体から放射される放射熱と温冷感の関係に基づくもので、人体からの放射熱を熱画像から求めることにより人の温冷感を推定する[7]。このモデルは従来と同様に、用いるのはサーモカメラのみであるが、従来と異なり着衣量の影響を受けないという画期的な特長を有する。本モデルに基づくアルゴリズムはすでにルームエアコン向けに搭載され、快適性の向上のみならず、冷やしすぎ等の防止により従来比24%減の省エネ性能が確認されている。

一方で温冷感推定技術は、ルームエアコンに加え、以下の観点から車載用途でも要望されている。運転中に室温を調整することは運転への集中を妨げ事故の危険性が増すため、温冷感推定により自動で空調が制御され、室温調整が不要になることが望ましい。さらに、今後市場が拡大する電気自動車では、特に冬場の空調におけるエネルギー消費が大きく、車の全消費エネルギーに対して50%以上が空調

に消費される場合もある[8]。すなわち、快適性や安全性のみならずエネルギー使用の観点からも、車載向けの温冷感推定が求められる。

車載向けの温冷感推定では、ルームエアコンと異なりカーエアコン吹き出し口と人の距離が近く、風の影響が無視できない。しかし吹き出し口の方向は制御されていない場合がほとんどで、ドライバーにあたる風の場所や風速を運転中にリアルタイムに推定することは困難である。

そこで筆者らは、ルームエアコン向けに開発した温冷感推定のモデルを元に、乗車時に着用必須なシートベルトに着目することで、風速を用いなくても温冷感を推定する独自モデルを車載向けに提案した。

本稿では、2章においてルームエアコン向けの温冷感推定モデルとともに、筆者らの提案する車載向け温冷感推定モデルを説明する。3章では、提案する車載向け温冷感推定モデルにおける表面温度の推定モデルと検証結果に関して説明する。4章では、提案した車載向け温冷感推定モデルの実験検証結果を述べ、5章にてまとめとする。

## 2. 車載向け温冷感推定モデル

車載向け温冷感推定モデルは、ルームエアコン向け温冷感推定モデルと同様に、人体からの放熱量に基づき推定している。まず 2.1 節にて筆者らが提案したルームエアコン向けの温冷感推定モデルに関して概説し、次に 2.2 節にて車載向け温冷感推定モデルを説明する。

### 2.1 放熱量に基づく温冷感推定モデル

人体は、代謝等により体内から発生した熱量（発熱量）を体の表面から外部に放熱することで、体温を一定に維持しようとする。この時、例えば気温が高くなると体温と気温の差が小さくなるため放熱量が減少し、人体に熱が籠もった状態となる。このように発熱量よりも放熱量が小さく熱収支がアンバランスになった状態を、人は暑いと感じる（第1図）。

温冷感	体の熱収支
暑い	代謝（発熱量：一定） > 放熱量
寒い	代謝（発熱量：一定） < 放熱量



第1図 温冷感と熱収支の関係  
Fig. 1 Relationship between thermal sensation and heat balance

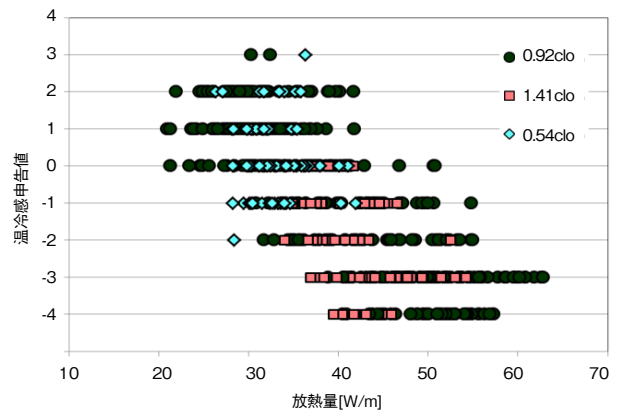
逆に気温が低く放熱量が多い場合には体温と気温の差が大きくなるため放熱量が増大し、体表面温度が低下する。こ

のような状態を人は寒いと感じる。以上のことから、人体から外部への放熱量 $Q_a$ は、以下の式で表すことができる。

$$Q_a = (T_{cl} - T_a) \times h_a \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $T_{cl}$ は着衣や皮膚表面の温度、 $T_a$ は気温、 $h_a$ は空気の熱伝達率であり、無風状態を含む一定の風速下では定数となる。すなわち、人体に直接風が暴露されない環境下においては、着衣や皮膚表面の温度 $T_{cl}$ と気温 $T_a$ をサーモカメラから求められれば放熱量の算出が可能で、求めた放熱量により温冷感を推定することが可能となる。

このモデルに基づき、筆者らは熱画像から放熱量を求めるアルゴリズムを開発し[9]、熱画像から求めた放熱量が、着衣の量によらず人の温冷感と相関を有することを明らかにした（第2図）[10]。ここで第2図の縦軸の温冷感申告値は、空気調和・衛生工学会の温冷感小委員会による9段階尺度で、-4；非常に寒い、-3；寒い、-2；涼しい、-1；やや涼しい、0；どちらとも言えない、+1；やや温かい、+2；温かい、+3；暑い、+4；非常に暑い、である。また、着衣量の単位cloは着衣の熱抵抗に基づく単位であり、1 clo = 0.155 m<sup>2</sup> °C W<sup>-1</sup>で、目安として1 cloはスーツ上下程度である。実験では薄着、中着、厚着（それぞれ0.54 clo, 0.92 clo, 1.41 clo）、の3種類の着衣にて検証し、熱画像から求めた放熱量と温冷感申告値の間には、着衣によらず0.78の相関係数が得られた。



第2図 放熱量と温冷感申告値の関係  
Fig. 2 Relationship between reported thermal sensation and heat loss

### 2.2 車載向け温冷感推定モデル[11]

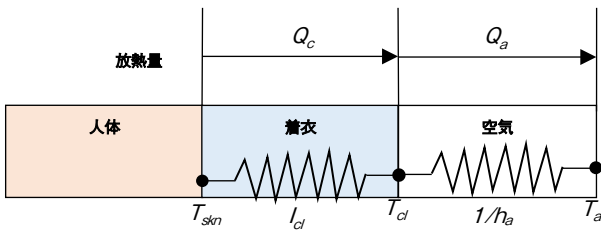
ルームエアコンでは人体に直接風が暴露されるケースが少なく、(1)式において空気の熱伝達率 $h_a$ は定数として扱うことができた。しかし車室内ではエアコン吹き出し口と人の距離が近いので、直接風が人体に暴露される。その際、空気の熱伝達率 $h_a$ は人体に暴露される風速により変動する。一方で、1章で述べたとおり、風速をリアルタイムで車室内にて計測することは現実的ではなく、(1)式を用い

て放熱量を推定することは困難である。そこで筆者らは、風温や風速を用いずに放熱量を求めるモデルを提案した。このモデルの基本となる考え方を、第3図を用いて説明する。

第3図は左側の人体から着衣を介して空気中に放熱される様子を模式的に表したものであり、着衣、空気中での熱の伝わりにくさを、着衣量 $I_{cl}$ と空気熱伝達率の逆数 $1/h_a$ を使って表している。(1)式は着衣表面から空気への放熱量 $Q_a$ を表したものであるが、平衡状態においては人体から着衣表面を通過する放熱量 $Q_c$ と等価となる。ここで平衡状態とは放熱量の変動がない状態のことを指しており、例えば寒い所から暖かな車室内に入った直後のような過渡状態は含まれない。人体から着衣表面を通過する放熱量 $Q_c$ は体表面温度 $T_{skn}$ と $T_{cl}$ 、着衣量 $I_{cl}$ を使うと以下の式で表すことができる。

$$Q_c = \frac{T_{skn} - T_{cl}}{0.155 \times I_{cl}} \dots \dots \dots (2)$$

よって、着衣表面温度 $T_{cl}$ をサーモカメラで求め、着衣量 $I_{cl}$ と体表面温度 $T_{skn}$ を別途求めることができれば、風速を求めることなく人体から着衣表面を通過する放熱量 $Q_c$ を算出することができ、温冷感の推定が可能になると考えた。



第3図 車載向け放熱量推定モデルの模式図  
Fig. 3 Schematic diagram of heat loss estimation model for automotive use

### 3. 着衣量と体表面温度推定

#### 3.1 推定モデル

着衣量 $I_{cl}$ と体表面温度 $T_{skn}$ の推定モデルを模式的に表したものを第4図に示す。本モデルは、自動車運転時に装着が義務付けられているシートベルトを利用したものである。シートベルトの裏側2箇所温度センサを配置し、温度 $T_{cl1}$ 、 $T_{cl2}$ を計測する。さらにシートベルトの温度センサとは逆側に熱流束計を取り付け空気中への放熱量 $Q_{t1}$ 、 $Q_{t2}$ を測定する。さらにそのひとつはシートベルトと熱流束計の間にプラスチックフォームを挟んでいる。そのため $Q_{t1} > Q_{t2}$ となる。この時、以下の2つの式が成り立つ。

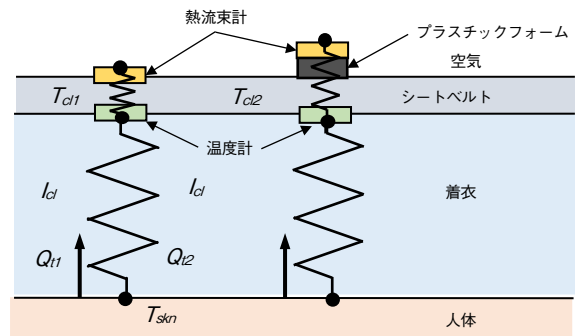
$$I_{cl} = \frac{T_{skn} - T_{cl1}}{0.155 Q_{t1}} \dots \dots \dots (3)$$

$$I_{cl} = \frac{T_{skn} - T_{cl2}}{0.155 Q_{t2}} \dots \dots \dots (4)$$

ここから体表面温度 $T_{skn}$ を消すと、

$$I_{cl} = \frac{T_{cl2} - T_{cl1}}{0.155(Q_{t1} - Q_{t2})} \dots \dots \dots (5)$$

となり、2つの温度計と2つの熱流束計の値から、着衣量 $I_{cl}$ が求まる。さらに、求めた $I_{cl}$ と(3)式もしくは(4)式から体表面温度 $T_{skn}$ も求めることができる。



第4図 着衣量および体表面温度推定モデル模式図  
Fig. 4 Schematic diagram of the model for estimating the clothing insulation and body surface temperature

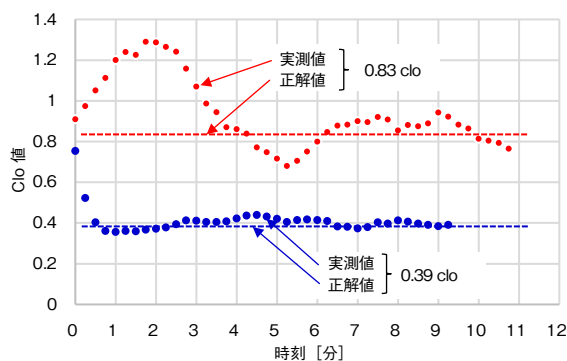
#### 3.2 着衣量推定モデルの検証

第4図に示したモデルを実際に以下の構成で作成し、着衣量を推定することで本モデルの検証を行った。シートベルトとして幅10cmのポリエステルを用い、厚み1cmのプラスチックフォームを両面テープで取り付けた。温度計、熱流束計はなるべく近接した位置に取り付けるように配置し、その間隔は約2cmとした(第5図)。また両面テープは厚み0.115mmと薄く、熱抵抗は無視できる。



第5図 着衣量推定検証実験でのセンサ配置  
Fig. 5 Measuring devices worn by the subject

着衣は着衣量が分かっている2種類の着衣（Tシャツ；0.39 clo, Tシャツ+トレーナ；0.83 clo）を用いた。これらの着衣を実験参加者（ $n=1$ ）に着せ、室温 $24^{\circ}\text{C}$ の実験室にてデータを取得した。（5）式によって求めた着衣量に関して、60秒の移動平均処理を行ったclo値を第6図に示す。Tシャツ条件（0.39 clo）では初期30秒では実測値が正解値に対して乖離しているが、それ以降は安定して一致していることが分かる。Tシャツ+トレーナ条件（0.83 clo）でも初期4分程度では乖離が見られるが、それ以降は正解値付近で安定している。初期の乖離は放熱量が平衡状態に達するまでの状態と考えられる。



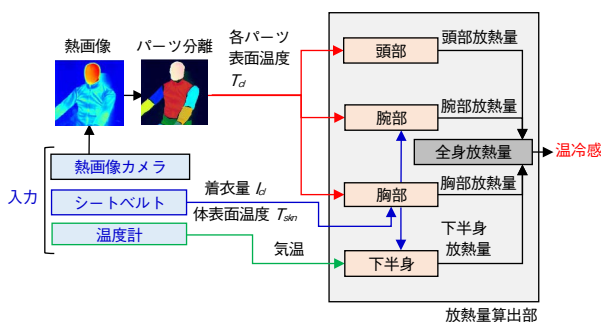
第6図 着衣量推定結果

Fig. 6 Results of the clothing insulation estimation

## 4. 車載向け温冷感推定モデルの検証

### 4.1 車載向け温冷感推定モデルの最適化

車載向け温冷感推定の基本的なモデルを2.2節にて述べた。実際には人体は例えば顔のように着衣で覆わない部分が存在し、着衣量も部分によって異なる。そのため、第7図に示すように、撮影した熱画像から人体の部分（頭部、胸部、腕部、下半身の4パーツ）に分離し、分離したパーツ毎に算出した放熱量を重み付け加算して全身からの放熱量を求めるモデルを提案した。



第7図 車載向け温冷感推定アルゴリズムブロック図

Fig. 7 Block diagram of thermal sensation algorithm for automotive use

その際の各パーツの重みは、別途サーマルマネキン（体表面温度を自由に設定可能なマネキン）にて種々気温や着衣量でデータを取得し最適化した値を用いた[9]。また、熱画像から算出した各パーツの表面温度 $T_{si}$ および、シートベルトから算出した着衣量 $I_{cl}$ および体表面温度 $T_{skin}$ 以外でも、車室内で簡単に得られる情報として気温を用いた。気温は、下半身の熱画像の撮影が困難であるため、下半身の放熱量推定のために補助的に用いた。

### 4.2 車載向け温冷感推定モデルの検証実験

第7図にて示した車載向け温冷感推定モデルの妥当性検証のため、奈良女子大学久保研究室内の恒温室内にて実験を行った。冬場の車載空調では脛部（けいぶ）を暖房することが多いが、夏場の車載空調では脛部のみならず胸部や、人によっては頭部に風を暴露する人も多い。そこで本実験では風の暴露部位のばらつきが多く温冷感推定の難易度が高い夏期の車室内を想定した。実験も人体の暑熱順化を考慮して夏期（8/20～9/18）に行った。実験に際しては倫理審査委員会の承認のもと、実験参加者には事前にインフォームドコンセントを行った上で実施した。実験参加者は20代の健康な男子5名、女子6名の合計11名とした。恒温室内で着座している実験参加者の正面からスポットエアコンにより送風することで、車室内におけるカーエアコンでの空調を再現した。実験参加者前方にサーモカメラを配置し、実験中の実験参加者の全身の熱画像を撮影した。用いたサーモカメラの画素数は $382 \times 288$ 画素であった。

実験条件は気温、着衣量等に関して夏期の車室内で発生し得る組合せを以下の中から選び、実験参加者1名に対して2～4条件を実施し、合計30条件で実験を行った。実験参加者は上記環境内で15分間滞在しながら、2.1節にて述べた9段階尺度に基づいて温冷感を5分毎に申告してもらった。

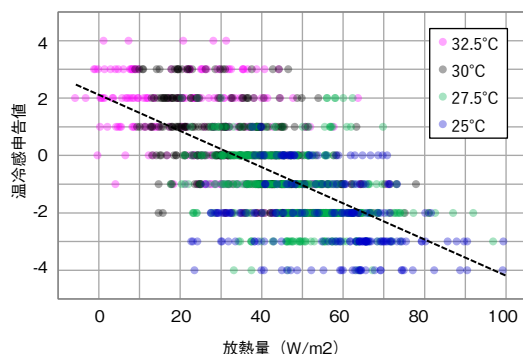
- ・気温：4水準（ $25^{\circ}\text{C}$ 、 $27.5^{\circ}\text{C}$ 、 $30^{\circ}\text{C}$ 、 $32.5^{\circ}\text{C}$ ）
- ・着衣量：2水準（0.39 clo, 0.83 clo）
- ・暴露部位：4水準（なし、胸部、頭部、脛部）
- ・風速：2水準（等温風、冷風）
- ・風速：3水準（なし、小、大）

### 4.3 検証実験結果

この実験で取得したデータから、第7図のモデルにて放熱量を算出し、温冷感申告値との相関を分析した結果、RMSE (Root Mean Squared Error) 値は1.34であった（第8図）。

本モデルを用いた温冷感の推定精度を、従来モデルとして1章で説明したGaggeのモデル[3]と比較する。Gaggeのモデルでは風速を用いる必要があるため、実験毎に人体各部分の表面位置にて計測した風速を用いた。その結果、本モデルでのRMSE値1.34に対して、Gaggeのモデルでは1.45で

あった。すなわち本モデルは、風速を用いて計算するGaggeのモデルを超える精度を示すことがわかる。



第8図 算出した放熱量温冷感申告値の関係

Fig. 8 Relationship between estimated heat loss and reported thermal sensation

本モデルの方が高精度であったのは、人体のような複雑な形状に暴露する風速を安定して計測することが困難であることも一因と考えられる。すなわち風速を測定せず着衣表面温度で熱流束の変化を推定する本モデルは精度の面で有利と考えられる。

さらに、気温32.5℃の環境において人は通常暑いと感じていると考えられ、温冷感を推定するまでもなく冷房を稼働させれば良いと考えられる。そこで、気温32.5℃条件を除外して推定精度を求めた所、本モデルでの誤差はRMSE値は1.34から1.29へと改善した。これは、32.5℃のような暑い環境においては発汗しているためと考えられる。すなわち、発汗していると頭部の放熱量を計測する際に頭部の表面温度が低下し、放熱量が想定よりも低く見積もられているためと推定される。このように発汗する気温では放熱量の推定誤差が大きくなることで温冷感推定精度の悪化が考えられるが、実用上そのような温度帯では冷房を稼働させればよく、実際の運用と組み合わせることで本モデルを有効に活用することが望まれる。

## 5. まとめ

熱画像を用いた人の温冷感推定技術を開発した。人体から放射される放熱量に着目し、ルームエアコンにおいては手や足といった末梢部の皮膚温を計測不要で着衣量によらない、サーモカメラのみでの温冷感推定を可能にした。

本温冷感推定モデルを新たに車載向けに検討した。車室内にて計測が困難な風速を計測することなく、放熱量から温冷感を推定する独自のモデルを提案し、従来のGaggeのモデルを超える精度が得られることを確認した。

これにより、自動車運転中に空調を調整する必要がなく

なり、運転に集中することが可能になる。さらに今後一層拡大する電気自動車においても、快適性の向上とともに冷やしすぎや温めすぎによる空調エネルギーのロス低減に貢献できると考えられる。また、運転中に眠気を検知した際には、寒くならない範囲で涼しく空調することで、快適性を維持しながら眠気を低減できることも報告されている[12]。これらを組み合わせることで、安全、快適、省エネルギーな運転環境をソリューションとして提供することで、自動車産業への貢献を目指す。

## 参考文献

- [1] P. O. Fanger, "Calculation of thermal comfort: introduction of a basic comfort equation," ASHRAE Trans., vol. 73, pp. III4.1-III4.20, 1967.
- [2] P. O. Fanger, "Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering," Danish Technical Press, Copenhagen, 1970.
- [3] A. P. Gagge et al., "An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response," ASHRAE Trans., vol. 77, 1972.
- [4] 武川博三 他, "赤外線放射計での皮膚温計測に基づく温冷感推測," 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集B-19, pp. 185-188, 1995.
- [5] 梶井宏修 他, "頭部と身体の温熱環境条件が異なる時の足部温冷感および生理的反応," 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集B-5, pp. 85-88, 2005.
- [6] 野中麻由 他, "中立的な温冷感、快適感が得られる平均皮膚温と身体各部位皮膚温の差：若年女子における夏期と冬期の比較," 人間と生活環境, vol. 16, no. 2, pp. 91-97, 2009.
- [7] 楠亀弘一 他, "サーモカメラによる非接触温冷感センシング," パナソニック技報, vol. 63, no. 2, pp. 10-14, 2017.
- [8] 萩原康正 他, "電気自動車用空調の特徴・動向について," デンソーテクニカルレビュー, vol. 16, pp. 83-89, 2011.
- [9] K. Kusukame et al., "A new proposal of estimation method for thermal sensation using infrared thermography," The Fifth International Conference on Human-Environment System, 2016.
- [10] 式井慎一 他, "冬期における温熱的快適性に関する研究 その2：サーモグラフィを用いた温冷感推定," 人間生活環境系シンポジウム報告集, 38, pp. 281-284, 2014.
- [11] A. Yoneda, et al., "Robust estimation of thermal sensation for vehicle occupants using seat-belt-type sensor and thermal camera," 2021 IEEE Intelligent Transportation System Conference (ITSC), pp. 1572-1577, 2021.
- [12] 大友香穂里 他, "温熱条件と照度条件の複合環境が覚醒度に与える影響," 日本生理人類学会第75回大会抄録集, p 59, 2017.

## 執筆者紹介



式井 慎一 Shin-ichi Shikii  
パナソニック インダストリー (株)  
技術本部  
Engineering Div., Panasonic Industry Co., Ltd.



米田 亜旗 Aki Yoneda  
パナソニック インダストリー (株)  
技術本部  
Engineering Div., Panasonic Industry Co., Ltd.



野坂 健一郎 Ken-ichiro Nosaka  
パナソニック インダストリー (株)  
技術本部  
Engineering Div., Panasonic Industry Co., Ltd.



吉岡 元貴 Mototaka Yoshioka  
パナソニック インダストリー (株)  
技術本部  
Engineering Div., Panasonic Industry Co., Ltd.  
博士 (工学)



久保 博子 Hiroko Kubo  
奈良女子大学 研究院工学系  
Faculty Division of Engineering, Nara Women's  
University  
博士 (学術)