

特集 車室内温熱環境の新評価手法の開発*

New Evaluation Method of Transient and Non-uniform Environment in a Passenger Compartment

今井 健二郎
Kenjiro IMAI

片岡 拓也
Takuya KATAOKA

増田 貴文
Takafumi MASUDA

稲田 智洋
Tomohiro INADA

Quantitative evaluation methods of thermal sensation and comfort are required to develop new passenger car climate control systems that contribute to improve comfort and/or decrease fuel consumption. Therefore, an evaluation method of transient and non-uniform environments in passenger compartments has been developed.

Passenger's local body thermal sensations are evaluated using partial SET*

(Standard new Effective Temperature) that is calculated with a human thermal model.

Furthermore, passenger's whole body thermal comfort is evaluated by local body thermal sensation. The theory of the method and some examples of its application are introduced in this paper.

Key words : Air Conditioner, SET*, Thermal Comfort , Thermal Sensation

1. まえがき

自動車車室内の温熱環境は非定常かつ不均一であり、冷暖房においては分布改善による快適性の向上も重要な要素である。また、近年のCO2排出規制の強まりとともに、自動車の低燃費化が強く求められ、カーエアコンに対しても最小のエネルギーで乗員の快適性を満足させることが求められている。この取り組みとして、将来的にはタスクアンビエント空調や直接冷暖房など乗員に効率的に熱を伝える技術が期待されている¹⁾。こういった快適性向上や省燃費に関する技術の実現のためには、乗員の温熱感や快適感を定量的に評価する技術が不可欠と考えられる。

車室内の環境を定量的に評価する手法としては、サーマルマネキンを用いた評価²⁾、皮膚温やSET*(新標準有効温度: Standard new Effective Temperature)を用いた評価^{3) 4)}が試みられている。サーマルマネキンは乗員の形状、着衣や皮膚温を考慮し、顕熱移動に基づいて等価温度を評価できるが、暑熱環境や非定常環境の評価が困難であるという課題がある。そのため、近年、温熱諸要素の計測値に基づいて部位毎のSET*を算出し、評価に用いることが試みられている。

筆者らは、車室内の不均一、非定常な環境下の空気温度、風速、放射温度、湿度をアメニティマネキンで計測し、16部位分割128ノード人体熱モデルを用いて部位毎のSET*を算出し、乗員の各部位の温熱感の評価を試みた。次に、乗員が快適と感じる各部位の温熱

感の分布を求め、この分布と評価環境における温熱感の分布の差から、乗員の全身快適感の推定を試みた。本論文では、部位毎SET*算出方法の概要と、車室内の定常、非定常環境での温熱感、快適感評価への応用について述べる。

2. 部位毎SET*算出方法

2.1 主な記号

Q_{sk}	: 皮膚からの放熱量 W/m^2
F_{cl}	: 衣服の伝熱係数 -
F_{pcl}	: 衣服の透質効率 -
h_c	: 対流熱伝達率 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
h_r	: 放射熱伝達率 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
T_{sk}	: 皮膚温度 $^\circ C$
T_a	: 空気温度 $^\circ C$
T_r	: 輻射温度 $^\circ C$
P_{sk}	: 皮膚温度における湿り空気の飽和水蒸気圧 Pa
ϕ_a	: 相対湿度 %
P_a	: 人体周囲の湿り空気の飽和水蒸気圧 Pa
ω	: 発汗による皮膚表面の濡れ面積率 -
h_{cs}	: 標準環境における対流熱伝達率 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
F_{cls}	: 標準環境における衣服の伝熱係数 -
F_{pcls}	: 標準環境における衣服の透質効率 -
SET*	: 体感温度 $^\circ C$
P_{SET^*}	: 温度が SET*の場合の湿り空気の飽和水蒸気圧 Pa

* (社)自動車技術会の了解を得て、「自動車技術会論文集」Vol. 43 - No. 2 01, 34より一部加筆して転載

- $q_{sk,i}$: 各部位皮膚血流量 m^3/s
- E_i : 各部位発汗による潜熱移動量 W
- E_{base} : 基礎発汗による単位面積当たりの潜熱移動量 W/m^2
- $M_{shiv,i}$: 各部位の代謝による産熱量 W
- A_i : 各部位表面積 m^2
- $V_{sk,i}$: 各部位皮膚体積 m^3
- ρ_b : 血液密度 kg/m^3
- $T_{sk,m}$: 平均皮膚温度 $^{\circ}C$
- T_{core} : 体核温度 $^{\circ}C$
- ζ_i : 血流変化量相対比 -
- ε_i : 相対的発汗係数 -
- η_i : 産熱量調節比 -
- 添字
- i : 部位の番号(1~16)

2.2 部位毎SET*の考え方

本手法は一般に知られたSET*の考え方を拡張しているため、まずSET*の概要について説明する。

皮膚表面における人体から環境への単位表面積あたりの放熱量は次式で表すことができる。

$$Q_{sk} = F_{cl}(h_c(T_{sk} - T_a) + h_r(T_{sk} - T_r)) + F_{pcl}\kappa h_c \omega (P_{sk} - \Phi_a P_a) \dots (1)$$

ここで、右辺第1項は対流熱伝達量を、第2項は放射熱伝達量を、第3項は発汗による潜熱移動量を示す。 κ は物質移動と対流熱伝達率の相似関係から導かれる係数でルイスの係数と呼ばれ $0.0165^{\circ}C/Pa$ が与えられる。一方、標準環境における放熱量は同様に、

$$Q_{sk} = F_{cls}(h_c(T_{sk} - SET^*) + h_r(T_{sk} - SET^*)) + F_{pcl}\kappa h_c \omega (P_{sk} - 0.5P_{SET^*}) \dots (2)$$

と表されるので、この2つの等価関係より導かれる次の方程式を解くことによりSET*を求めることができる。

$$F_{cl}(h_c(T_{sk} - T_a) + h_r(T_{sk} - T_r)) + F_{pcl}\kappa h_c \omega (P_{sk} - \Phi_a P_a) = F_{cls}(h_c(T_{sk} - SET^*) + h_r(T_{sk} - SET^*)) + F_{pcl}\kappa h_c \omega (P_{sk} - 0.5P_{SET^*}) \dots (3)$$

この式中の人体生理量である皮膚温と濡れ面積率（発汗量）はGaggeの2ノード人体熱モデルで計算される⁵⁾。

このように、SET*は人体生理量と人体から環境への放熱量が等しいと仮定した標準環境における等価温度を表しており、温熱感と相関が良いことが確認されている。

本手法では、この考え方を乗員各部位の温熱感の推

定に拡張している。人体各部位をモデル化した人体熱モデルを用いて各部位の皮膚温と発汗量を求めることで、各部位のSET*を算出し、各部位の温熱感の評価を試みた。以下、部位毎SET*の算出方法について説明する。

2.3 人体熱モデルの概要

人体熱モデルはGaggeの2ノードモデル以来発展を続け、現在では人体各部位まで詳細にモデル化したものも現れている^{6) 7)}。ここでは、日常の空調評価業務で手軽に使えるよう、計算負荷が少ないノードモデルを用いた。

人体熱モデルは大きく分けて血流を含む体組織間の伝熱と主に皮膚表面を通じた環境との伝熱、そして血流と発汗・代謝による体温調節反応で構成される。以下開発したモデルの詳細について述べる。

Fig. 1にモデルの人体各部の分割方法を、Fig. 2に各部位の組織と血流のモデルを示す。人体は頭、首、胸、胴、上腕、前腕、手、大腿、下腿、足の16部位に分割され、各部位は、体核と皮膚の2組織と大動脈、大静脈、および、各組織内動静脈の6つの血液プールから成り、全身で128ノードから構成されている。

血管系は上体躯部を起点として頭部、腕、足への往復を行なうものとし、血液プールは部位をまたいで血液を輸送する大動脈や大静脈などの血液大プールと、その部位内に血液を循環させる毛細血管などの血液小プールに分割した。

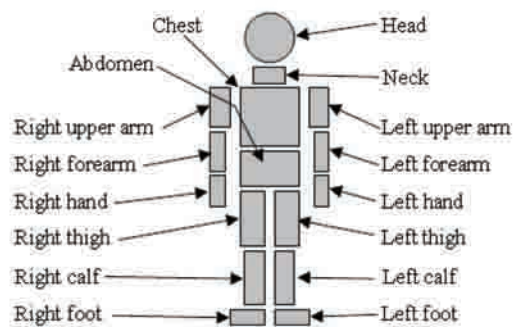


Fig. 1 Division of Human Thermal Model

また、人体は外気温度が高い条件においては四肢の皮膚表面付近の静脈を通り体中心部に血流が戻る動静脈吻合(AVA)の機能を有しているため、これを模擬する機能も組み込んだ。

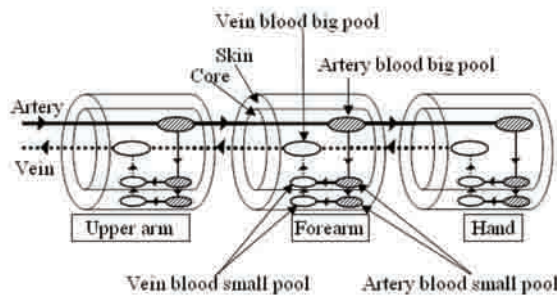


Fig. 2 Tissues and Blood Flow Model

体温調節反応に関する制御系としては、血流量、発汗量、産熱量の制御式を組み込んだ。

体温は血流量、発汗量、産熱量の制御によって調節されており、それらの量は皮膚温や体温の関数として表すことができることが知られている。ここでは、この関数に次に示す横山の式を用いた⁸⁾。

皮膚血流量：

$$q_{sk,i} = \zeta_i \left\{ 0.694(T_{core} - 36.7) + 0.074(T_{sk,m} - 34.0) + 0.149 \right\} \frac{100V_{sk,i}}{6\rho_b}$$

発汗による潜熱移動量：

$$E_i = \varepsilon_i A_i + \left\{ 197(T_{core} - 36.7) + 23(T_{sk,m} - 34.0) + 7212\delta_i \left(\frac{dT_{sk,m}}{dt} + 0.00317 \right) \right\} \times \exp\left(\frac{T_{2,i} - 34.0}{10} \right) + A_i E_{base}$$

代謝による産熱量制御式：

$$M_{shv,i} = \eta_i A_i \{ 13(T_{core} - 36.7) + 0.4(T_{sk,m} - 34.0) \} (T_{sk,m} - 34.0)$$

この式では体温調節反応は体温36.7℃、皮膚温34.0℃を制御目標として行なわれる。いずれも各部位毎の反応の違いは、それぞれ血流変化量相対比 ζ 、相対的発汗係数 ε 、産熱量調節比 η で表される。

2.4. 人体熱モデルの精度検証

このモデルの信頼性を検証するために温度がステップ的に変化した場合の生理量の変化を実験値と比較した。実験値にはHardy⁹⁾らの文献値を用いた。実験では、被験者は28℃の部屋で1時間安静にした後、静かに温度の高い別の部屋に移り2時間安静にした後再び元の部屋に戻って1時間安静にし、その間の皮膚温を計測している。一例としてFig. 3に、室温28℃→48℃→28℃と変化した場合の、実験値と計算値の比較結果を示す。高温の部屋への入出前後の皮膚温は、入室直後の変化を含め、良く一致していることが分かる。

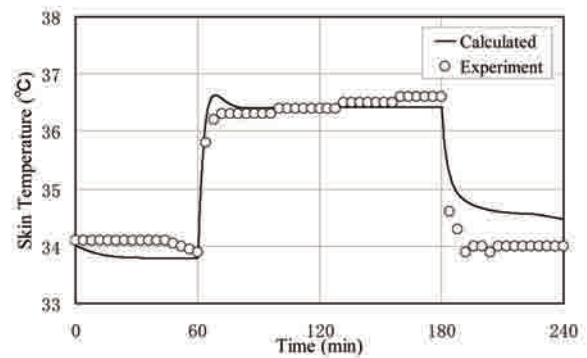


Fig. 3 Transition of Skin Temperature

次に、実際に車室内環境での皮膚温度の変化を検証した。試験には実車を用い、条件は外気温度0℃、日射なし、初期車室内温度0℃、エアコン設定温度25℃とした。乗員が車両内に乗り込み空調開始してからの皮膚温度変化を計測し、モデル計算結果と比較した(Fig. 4)。ここでは、頭部、胸部、足部の皮膚温度を比較しているが、いずれも過渡、定常共に傾向を捉えている。試験初期の温度乖離についてはソーク時の熱伝達率、着衣の熱容量の違いと推定している。その他の外気温度、他部位においても同様に実験値と比較し、1℃以内で皮膚温度を予測可能であり、実用に耐えることを確認した。

以上から本人体熱モデルはSET*を算出するために必要な生理量の予測においては十分な精度を有するものと考えられる。

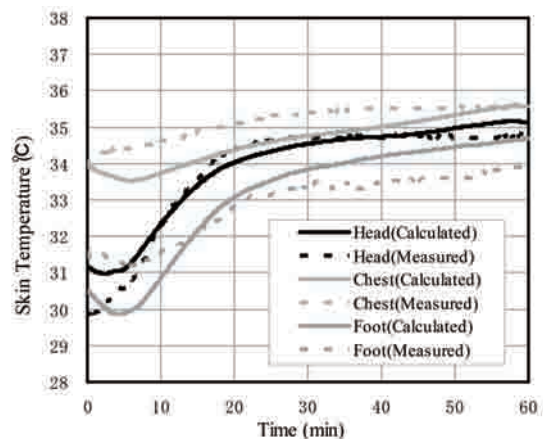


Fig. 4 Transition of Skin Temperature during Warming Up

2.5. 部位毎SET*算出方法

部位毎SET*は、人体熱モデルと(3)式を用いて求める。(3)式および人体熱モデルへの環境条件入力値は、アメニティマネキン³⁾で計測する。アメニティ

マネキンは、マネキン表面に熱電対、無指向性風速センサー、放射センサー、湿度センサーを取り付けたもので、これら4種の環境条件を計測できる。

(3) 式中には熱伝達率に関する項と着衣量に関する項があるが、これらは表面加熱式のサーマルマネキンを用いて与えた。熱伝達率に関しては、様々な車室内の風速環境下でアメニティマネキンによる風速計測とサーマルマネキンによる熱伝達率計測を行い、各部位毎に風速と熱伝達率の相関式を作成した。また、着衣のclo値はサーマルマネキンで計測した値を用いた。

3. 定常温熱感, 快適感

3.1 定常温熱感

2章で述べた方法で求めた車室内環境における人体部位毎のSET*と被験者の申告値を比較し、各部位におけるSET*と温熱感の関係を調査した。温熱感には、+4：非常に暑い、+3：暑い、+2：暖かい、+1：やや暖かい、0：どちらでもない、-1：やや涼しい、-2：涼しい、-3：寒い、-4：非常に寒い9段階スケールで申告した。試験条件は、外気温度が夏季40、30℃、中間季20、10℃、冬季0、-10℃で行なった。車室内の温熱環境はエアコンの設定温度で変更し、車室内環境（温度、風速、放射温度、湿度）をアメニティマネキンを用いて計測し、前章にて述べた人体熱モデルを用いてSET*を計算した。また、同条件の環境に被験者が乗り込み部位毎の温熱感を申告し、SET*と温熱感との相関関係を調べた。

一例として頭部のSET*と温熱感の関係をFig. 5に示す。図からSET*と温熱感に相関関係があることが確認できる。実線で示したSET*と温熱感申告値の相関式に対し、いずれの申告値も相関式±1以内(破線内)に収まっている。その他の部位も同様にSET*と温熱感申告値との間に相関関係があり、定常時においてはSET*から部位温熱感が予測可能であることが確認できた。ここで、温熱感予測において湿度も重要な因子であるが、空調使用時の車室内環境においては相対湿度10~20%と低湿度で、SET*算出においても0.3℃程度の変化と予測に対する影響は小さい。

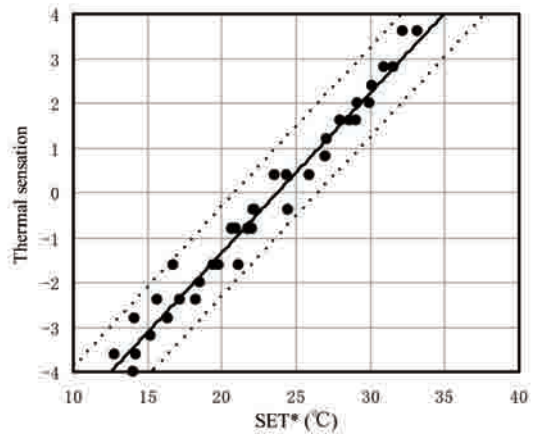


Fig. 5 Correlation of SET* and Thermal Sensation of Head

3.2 定常快適感

快適感の予測モデルで知られているパークレーのモデル¹⁰⁾では部位温熱感から部位快適感を予測し、部位快適感から全身快適感を予測している。本評価手法では、不均一環境では温熱感部位毎に感じる一方で快適感部位毎ではなく全身で感じるものとして仮定し、部位毎の局所温熱感から全身快適感の評価が可能かを試みた。

まず、先ほどの実験結果から部位温熱感の申告値と全身快適感の申告値の関係を調べた。ここで、快適感には、+3：非常に快適、+2：快適、+1：やや快適、0：どちらでもない、-1：やや不快、-2：不快、-3：非常に不快の7段階スケールで、温熱感と同時に申告させた。一例として頭部の部位温熱感、全身快適感との関係をFig. 6に示す。

図より頭部では温熱感が-1で全身快適感が最大となり、その温熱感から乖離していくほど快適感が低下していく傾向があることが分かる。その他の部位も同様の傾向があることが確認できている。このとき、全身快適感が最大を取る温熱感を快適温熱感と定義する。

このように、部位温熱感と全身快適感には相関があると考えられるので、不均一環境における部位温熱感と全身快適感との関係を調査した。

外気30℃の夏季条件において、先ほど定義した快適温熱感と申告温熱感との乖離値と全身快適感の関係をFig. 7に示す。

サークルで囲んだ部分は、ある1つの試験における手、胸、足、頭、大腿の温熱感乖離値と全身快適感の関係をプロットしたものである。このケースでは、大腿部の温熱感の快適温熱感からの乖離が最も大きく、

それを●で示している。その他の試験ケースでも乖離が最も大きい部位の温熱感乖離値と全身快適感を●でプロットすると、温熱感乖離の最大値と全身快適感には負の相関があることが分かる。

従って、この関係に着目することで、不均一環境の部位温熱感から全身快適感を推定可能と考えられる。

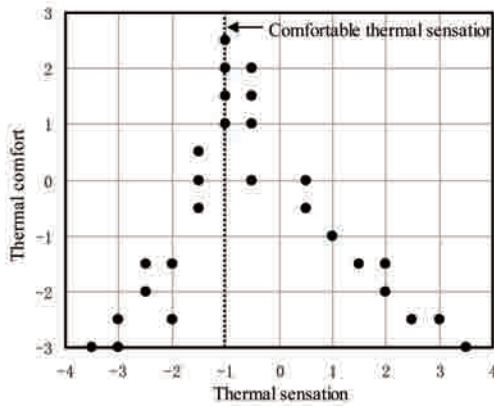


Fig. 6 Correlation of Thermal Sensation of Head and Thermal Comfort

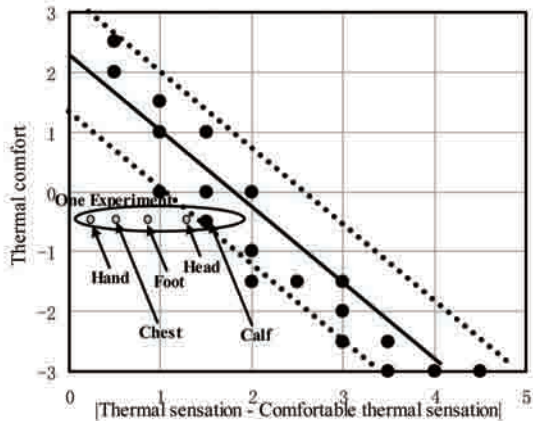


Fig. 7 Correlation of Thermal Sensation and Thermal Comfort

4. 非定常温熱感, 快適感

4.1 非定常温熱感

前章にて導き出したSET*と温熱感との相関関係が非定常環境においても有効か検証した。実験条件は、外気温度0℃において車両へ乗り込み、車両コールド状態から設定温度25℃でヒータを起動し、5分間隔で部位温熱感を申告した。一例として、車両に乗り込んでから60分間の大腿部の温熱感申告値と、SET*およびSET*より計算した温熱感評価値の推移をFig. 8に示す。

この図より、30分以降の定常状態においては温熱感申告値(■)と温熱感評価値(▲)が良く一致しているが、0分~30分の非定常環境においては乖離が大きいことが分かる。

このときのSET*の値を見ると、低い値となっているものの、増加率が大きいことが分かる。一般に、非定常の環境では、変化の大きさが温熱感に影響を与えることが知られている。つまり、早く暖められる(冷やされる)とより暖かく(冷たく)感じる。そこで、SET*の変化量が大きいとより暖かく(冷たく)感じると仮定し、SET*変化率をパラメータにして温熱感評価値を補正することを試みた。

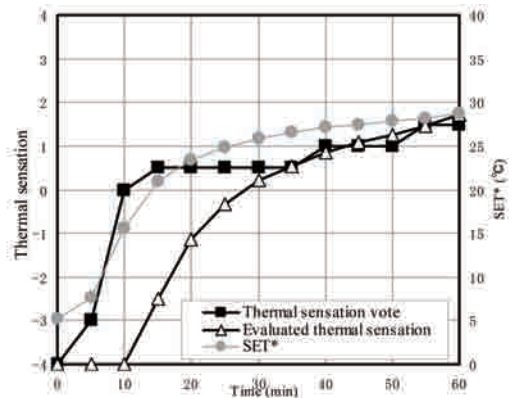


Fig. 8 Transition of Thermal Sensation of Calf during Warming Up

各種試験条件での、温熱感申告値と温熱感評価値の乖離値とSET*変化率の関係をFig. 9に示す。

この図より、SET*変化率が大きいほど温熱感の乖離値も大きいことが確認できたため、非定常時の温熱感評価値に関してはSET*変化率による補正項を追加することとした。この補正項を加えた評価結果をFig. 10に示す。補正後の温熱感評価値(▲)は、温熱感申告値(■)と良く一致していることが分かる。このことから、非定常時の部位温熱感はSET*変化率の補正項を追加することで推定可能であることが確認できた。

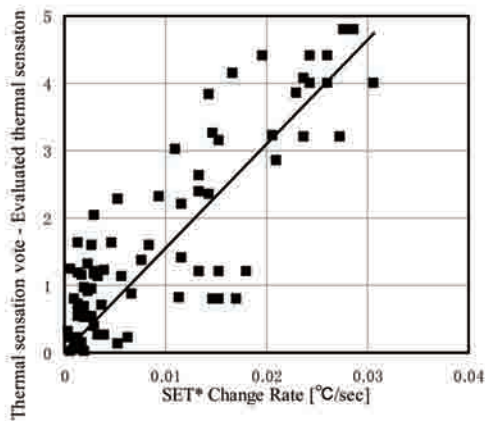


Fig. 9 Inference of SET* Change Rate for Thermal Sensation

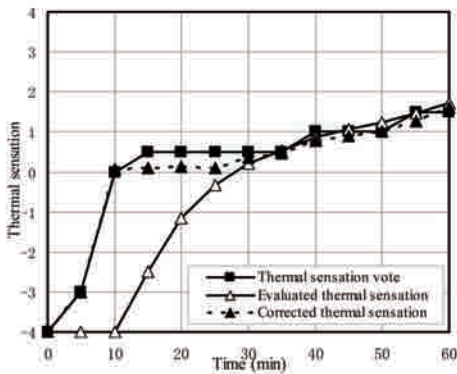


Fig. 10 Transition of Corrected Thermal Sensation Evaluation

4.2 非定常快適感

次に、前節で示した非定常温熱感の考え方と前章で示した快適感の考え方から非定常環境における快適感予測を試みた。定常時と同様に求めた全身快適感評価値(△)と快適感申告値(■)をFig. 11に示すが、過渡時の快適感が大きく乖離している。

このとき、乖離値が最大の部位は胴部であり、この部位の乖離値から快適感が算出されている。一方、冬季の快適感に影響すると考えられる大腿、下腿、足の平均乖離値で快適感を予測した値(▲)は、申告快適感と比較的良く一致していることが確認できた。このことから、部位により快適感への寄与度が異なる可能性があるため、この重み付けを検討した。冬季の非定常試験9条件の5分毎のデータを用い、各部位の温熱感乖離値と全身快適感との関係を解析し、重み付け係数を算出した。

こうして得られた、重み付け係数を用いて、再計算を行った結果をFig. 12に示す。改良前の評価値(△)に対して、改良後(▲)は申告値(■)に近くなっていること

が分かる。

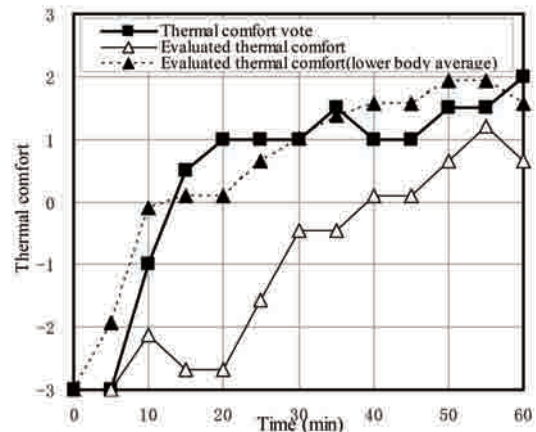


Fig. 11 Transition of Thermal Comfort

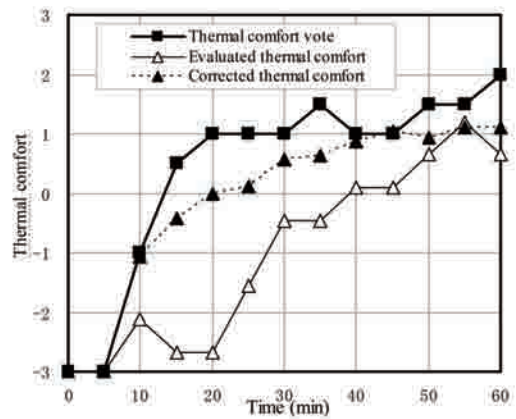


Fig. 12 Transition of Improved Thermal Comfort Evaluation

5. 適用事例

最後に、本手法の適用事例として、冬季FOOTモード時のマルチ吹出しの評価例を示す。マルチモードは乗員の上半身の温熱感向上のためにFACE吹出口から暖風を吹き出させる狙いがあるが、この評価に本手法を適用し、各部位の温熱感と全身快適感を予測、実際の申告値との比較を行なった。

試験条件は、外気温度0°C、日射なしで、試験パターンはマルチ吹出しあり、なしの2パターンでウォームアップ試験を行った。

まず、頭部温熱感を比較した結果をFig. 13に示す。マルチあり申告値(■)とマルチあり評価値(□)、マルチなし申告値(◆)とマルチなし評価値(◇)はほぼ一致している。また、10分時での温熱感を比較すると、マルチ吹き出しによる立ち上がりでの頭部温熱感向上が、本手法により予測可能であることが確認できる。

また、全身快適感の比較結果 (Fig. 14) より、10分時点立ち上がり時の快適感向上の早さ、および、定常時における分布改善による快適感向上も捉えられており、本手法の有用性を確認することができた。

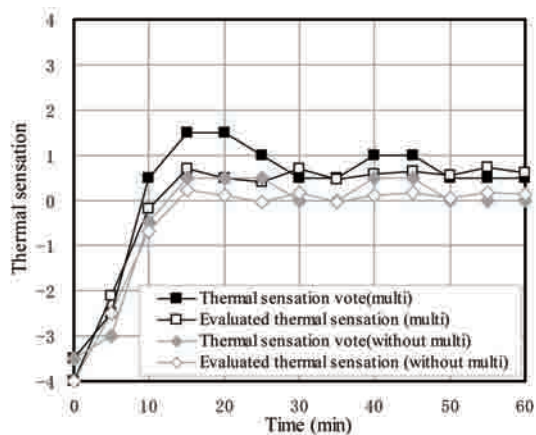


Fig. 13 Transition of Thermal Sensation

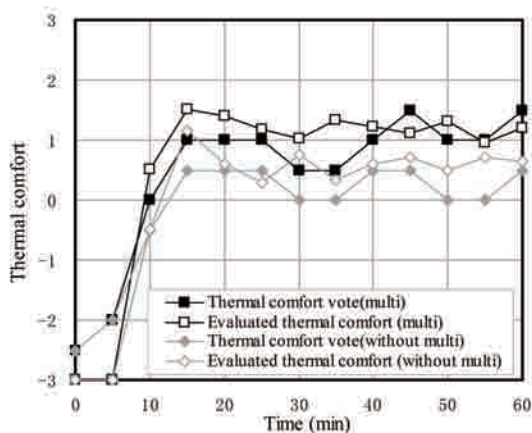


Fig. 14 Transition of Thermal Comfort

6. むすび

- (1) 人体16分割128ノードの人体熱モデルを開発し人体部位毎SET*の算出を可能にした。
- (2) 定常環境において、人体部位毎SET*から部位温熱感、全身快適感の評価手法を提案した。
- (3) 非定常環境において、SET*変化率を用いることで、部位温熱感を、部位による快適感の寄与度を明確にすることで、全身快適感の評価が可能であることを示した。

<参考文献>

- 1) 自動車技術会 車室内環境専門委員会編：自動車空調技術総合レビュー2011～自動車空調技術展望～，自動車技術会（2011）
- 2) 松永和彦：皮膚温可変型サーマルマネキンによる車室内温熱環境評価法，自動車技術会論文集，Vol.25, No.3, p.104-109（1994）
- 3) 小川一成：乗員の空調感覚のビジュアル化，自動車技術会学術講演会前刷集，No.944, p.169-172（1994）
- 4) Kataoka, T : Prediction of Occupant's Thermal Sensation under the Transient Environment in a Vehicle Compartment, SAE 2001 Transactions J. Passenger Cars, Vol.110 -6, p.557-571（2002）
- 5) Gagge, A. P. : A Standard Predictive Index of Human Thermal Environment, ASHRAE Trans, 98, p.709-731（1987）
- 6) 竹森：人体熱モデルの開発(熱的快適性評価のための基本モデル開発)，日本機械学会論文集（B編），Vol.61 No.584, p.297-304（1995）
- 7) 田辺新一：温熱環境評価のための65分割体温調節モデルに関する研究，日本建築学会計画系論文集,599, p.31-38（2001）
- 8) 横山真太郎：生体内熱移動現象，北海道大学図書刊行会，（1993）
- 9) Hardy, J.D. and Stolwijk, J.A.J. : Partitional Calorimetric Studies of Man During Exposures to Thermal Transient, J. Appl. Physiol., 31-6, p.1799-1806（1966）
- 10) Zhang, H. : Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments PartⅢ: whole-body sensation and comfort, Indoor Environment Quality UC Berkeley（2009）

<著 者>



今井 健二郎
(いまい けんじろう)
熱性能開発部
エコ快適空調開発に従事



片岡 拓也
(かたおか たくや)
熱機器開発1部 工学博士
車室内快適性製品の開発に従事



増田 貴文
(ますだ たかふみ)
熱性能開発部
エコ快適空調開発に従事



稲田 智洋
(いなだ ともひろ)
冷暖房技術1部
カーエアコンシステムの設計
に従事