

環境実験室における車両の室温予測計算モデルと冷房実験での比較

Predictive Calculation Model of Vehicle Cabin Temperature in Environmental Laboratory and Comparison with Cooling Experiment

正会員 ○奥山 博康 (清水建設) 正会員 大西 由哲 (清水建設)
 非会員 大井 元 (日産自動車) 非会員 小野 健二 (日産自動車)
 学生会員 永山 啓樹 (日産自動車・九州大学)

Hiroyasu OKUYAMA*¹ Yoshinori ONISHI*¹ Hajime OI*² Kenji ONO*² Hiroki NAGAYAMA*³

*¹ Shimizu Corporation *² Nissan Motor Co., Ltd. *³ Nissan Motor Co., Ltd., Kyushu University

Synopsis: For the heating and cooling experiments conducted on vehicle cabins, the environment in the laboratory simulates the harsh temperature and solar radiation of actual meteorological conditions. Also, this requires an economical predictive calculation model and computer program development to save the time and cost spent on the experiments under various conditions. We have developed a vehicle heat transfer model—the accuracy of which has verified through outdoor measurements. In this paper, a solar lamp energy emission distribution model, a lamp energy receiving model of the vehicle, and further, a comparison between the calculation results and the vehicle cabin cooling experiment are described.

1. はじめに

本研究は、実態の変動する気象条件と車内条件による室温と冷暖房熱負荷を予測検討できる実用的な計算モデルを開発することを目的にして、2006年度は日射による温室効果で車室内に生じる上下温度分布を再現するモデル¹⁾を考案し、幾つかの実験との比較検討を行った。

2007年度は太陽位置と車両の相対的な位置関係の変化に従って、窓透過日射が室内の様々な部位に分配される割合が変化する工学モデル²⁾を考案し、コンピュータグラフィックスによる結果と比較検討した。さらに室内表面での総合伝達率モデルよりも精密なモデルとして、表面对流熱伝達と長波長放射熱伝達を分離したモデルを構築し、幾つかの屋外実験で比較検討した。

2008年度は、環境実験室での実験との比較検討のため、まず日射ランプによる加熱実験を再現できるように、ランプ配光曲線のモデルと車両の日射受熱モデルを考案し、計算プログラムを開発し、さらに発光効率(照度/熱量の換算係数)と実験室内平均反射率等を日射計による測定値から最適化した。そして冷房実験との比較検討を行った。本論では、この2008年度の実施内容について述べる。

2. 日射ランプのモデル

多くのランプの配光曲線は軸対称であり、軸を含む平面上で卵形あるいは洋梨形をしている。一方、卵形曲線等の方程式の研究結果³⁾がインターネット上に紹介されているので参考にした。これは、ランプの軸をx軸として、卵形曲線を次式で表している。

$$(x^2 + d' \cdot y^2)^2 = a' \cdot x^3 + c' \cdot x \cdot y^2 \quad (1)$$

これを線形の最小二乗法にて回帰できる式の形にするため展開し、冪乗の順に項を並べ、4つの未定係数a, b, c, dを定義して次式のように表示する。

$$y^4 + a \cdot x^4 + b \cdot x^2 \cdot y^2 + c \cdot x^3 + d \cdot x \cdot y^2 = 0 \quad (2)$$

配光曲線は極座標を使って、光線の射出角度 θ と、この方向でのエネルギーrで表される。そこで次式の(3)と(4)式のように新たな変数 θ, r により(5)式に書き直す。

$$x = r \cdot \cos \theta \quad (3) \quad y = r \cdot \sin \theta \quad (4)$$

$$r^4 \cdot \sin^4 \theta + a \cdot r^4 \cdot \cos^4 \theta + b \cdot r^4 \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + c \cdot r^3 \cdot \cos^3 \theta + d \cdot r^3 \cdot \cos \theta \cdot \sin^2 \theta = 0 \quad (5)$$

ランプメーカー等から配光曲線の図が得られれば最小二乗法により係数a, b, c, dが回帰される。(5)式を観察すれば両辺を r^3 で除することでrについて解くことができる。従ってランプの軸と為す角度を θ として、この方向への光度 $I(\theta)$ (Cd=Lm/Steradian)は次式で計算される。

$$I(\theta) = \frac{-(c \cdot \cos^3 \theta + d \cdot \cos \theta \cdot \sin^2 \theta)}{(\sin^4 \theta + a \cdot \cos^4 \theta + b \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta)} \quad (6)$$

日射ランプから受熱する物体は、直達光を受けるのに加えて、室内表面での反射および相互反射による拡散光も受ける。この拡散光の計算のために、日射ランプから全方向への放散光の積分が必要になってくる。そこで図-1の様に考えて積分式を導く。原点を中心として単位長さの半径を持つ球を想定する。放射光はこの球面上を通過して全方向に放射されるものとする。I(θ)を単位球上で積分した量が全放射光と考える。ステラジアン(sr)とは単位長さ半径の球面上に投影された面積で表す立体角であり全方向角は 4π (sr)となる。

三次元の球面上の積分は角度 θ に沿って行う。まずx-y平面で θ の方向の直線と、微小 $d\theta$ だけ変位した方向の直線と、さらに単位円周の部分で作られる扇形を考えると、

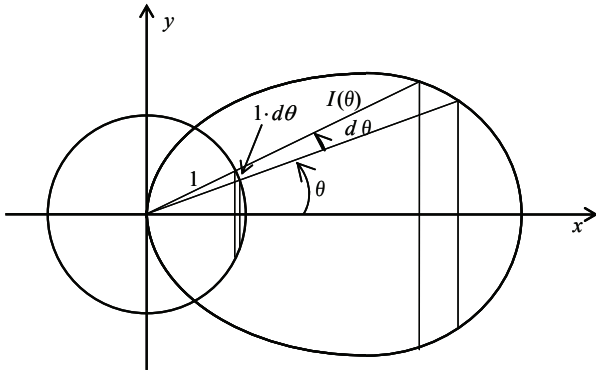


図-1 配光曲線と全方向放射量の積分

単位円周に沿った扇形の周長は $d\theta$ である。またこの周長を通過する放射光は $I(\theta)d\theta$ である。次に三次元では、この扇形の周長を x 軸の回りに回転してできるリングを考える。リングの半径は $\sin\theta$ だからリングの面積は $2\pi \cdot \sin\theta \cdot d\theta$ となる。またリングの立体角は $2\pi \cdot \sin\theta \cdot d\theta$ である。一方、単位立体角あたりの放射光は $I(\theta)$ であったから、このリングを通過する放射光は、これら両者を乗じて $2\pi \cdot I(\theta) \cdot \sin\theta \cdot d\theta$ となる。全立体角にわたっての積分を全放射光 F と置くと、積分変数を θ に置き換えて F は次式で計算することができる。

$$F = \int_0^{4\pi} dF = \int_0^{\pi/2} 2\pi \cdot I(\theta) \cdot \sin\theta \cdot d\theta \quad (7)$$

ここに θ の積分区間は、曲線の方程式が $\pi/2$ を超える範囲は存在しないので 0 から $\pi/2$ とした。積分変数を変換し $t = \cos\theta$ とおくと $dt = -\sin\theta$ であり、積分区間は $\theta[0 \sim \pi/2]$ から $t[0 \sim 1]$ になる。

$$F = -2\pi \int_0^1 \frac{c \cdot t^2 + d \cdot (1-t^2)}{a \cdot t^4 + b \cdot t^2 \cdot (1-t^2) + (1-t^2)^2} \cdot t dt \quad (8)$$

さらに $u = t^2$ と置くと $du = 2t dt$ であり、積分区間は $t[0 \sim 1]$ から $u[0 \sim 1]$ になる。

$$F = -\pi \int_0^1 \frac{(c-d) \cdot u + d}{(a-b+1) \cdot u^2 + (b-2) \cdot u + 1} \cdot du \quad (9)$$

この(9)式の形であれば公式集⁴⁾等を参考にして不定積分を求めることができる。ただし(9)式を見ると $(a-b+1)=0$ の場合と $d(b-2)=c-d$ の場合は特別に考えなければならない。詳述は割愛するが、複数の解式が得られるので解の吟味が必要となる。

3. 車両の受熱モデル

日射ランプは複数でもランプ1個毎の受熱量をランプ総数分だけ積算すれば良い。ランプは点光源と見なす。受熱面も代表点でとらえる。つまり本計算法は逐点法と呼ばれる部類に属する。ランプの三次元座標系での位置ベクトルを \mathbf{p}_l とする。受熱面での代表点の位置ベクトルを \mathbf{p}_s とする。またランプからの放射中心軸の単位ベクトル

を \mathbf{v}_l 、受熱面の法線単位ベクトルを \mathbf{v}_s とする。日射ランプと受熱点を結んだ直線が、ランプの \mathbf{v}_l と成す角度を θ_l 、受熱面の \mathbf{v}_s と成す角度を θ_s とする。そしてこれらの角度の余弦をそれぞれ $\cos\theta_l$ 、 $\cos\theta_s$ とする。

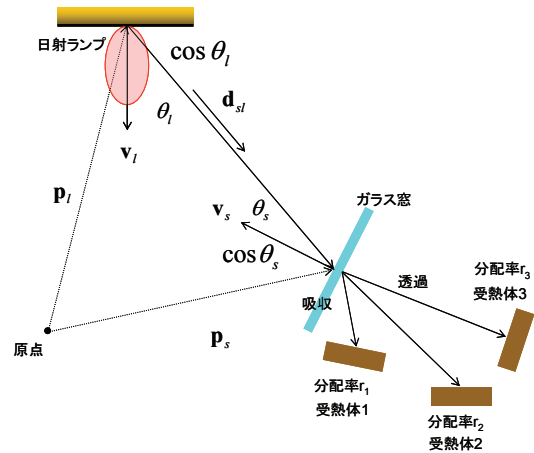


図-2 日射ランプと受熱体の関係

日射ランプから受熱点へ向かう単位方向ベクトルを \mathbf{d}_{sl} とする。このベクトルは次式で計算される。2点間の距離は d_{sl} と表わすことにして続く式で計算される。

$$\mathbf{d}_{sl} = \frac{\mathbf{p}_s - \mathbf{p}_l}{\|\mathbf{p}_s - \mathbf{p}_l\|} \quad (10) \quad d_{sl} = \|\mathbf{p}_s - \mathbf{p}_l\| \quad (11)$$

そして前述の各余弦は次式の単位ベクトルの内積で計算される。

$$\cos\theta_l = \mathbf{v}_l \cdot \mathbf{d}_{sl} \quad (12) \quad \cos\theta_s = \mathbf{v}_s \cdot (-\mathbf{d}_{sl}) \quad (13)$$

受熱表面には入射角度 θ_s で入るから $\cos\theta_s$ が乗じられ、さらに距離減衰により d_{sl}^2 で除した量となる。この面への到達量 Et は照度 ($I_x = lm/m^2$) と呼び(14)式で計算され、これは点光源 $I(Cd)$ から $d(m)$ 離れた距離にある面での照度との定義的な関係式でもある。

次に受光量から受熱量に変換する発光効率 η を導入する⁵⁾。 η は (lm/W) の単位を持つので、 η で Et を除すことにより熱流 $Rt(W/m^2)$ に換算できる。

$$Et = \frac{I(\theta_l) \cdot \cos\theta_s}{d_{sl}^2} \quad (14) \quad Rt = \frac{Et}{\eta} \quad (15)$$

直達日射に対する透過率と反射率は、受熱面への入射角度を θ として、次式で計算する。入射角余弦の冪級数の係数は、ガラスメーカーからのデータから、最小二乗回帰しておくことができる。

$$\tau_D = \sum_{j=0}^5 t_j \cdot \cos^j \theta \quad (16) \quad \rho_D = \sum_{j=0}^5 r_j \cdot \cos^j \theta \quad (17)$$

また拡散日射に対する透過率と反射率は次式で計算する。

$$\tau_d = 2 \sum_{j=0}^5 \frac{t_j}{j+2} \quad (18) \quad \rho_d = 2 \sum_{j=0}^5 \frac{r_j}{j+2} \quad (19)$$

ガラスの吸収率は1から透過率と反射率を差し引いた値である。窓を透過した後で複数の室内部材への分配率は図面を参考にして決めた。例えば前窓を通してランプ群から見える操作卓、前席座面、前席背面への分配率は、其々0.7, 0.15, 0.15の様々に仮定した。

拡散日射のモデルは簡易的なものとした。前述した各ランプからの全方向放射光の積分値を合計した量 F_i が、環境実験室内表面の全面積 s_i で反射して拡散光となると考える。室内表面は、各面での反射率 ρ を面積加重平均した反射率 ρ_m で一様近似する。この時に室内の任意の面に到達する拡散日射の量 $R_d(W/m^2)$ は次式で計算される。

$$R_d = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{F_i \cdot \rho_m}{s_i \cdot (1 - \rho_m)} \quad (20)$$

4. 発光効率 η と室内表面平均反射率 ρ_m の推定

前述した発光効率(照度/熱量の換算係数)は、自然の日射でさえ、大気圏外では放射エネルギーの波長分布が一定であっても、大気圏内の季節、天候、太陽高度等では違ってくるので、波長特性が異なる日射ランプの値は尚更不明である。また室内表面は、反射率が不明な複数の材料から構成されている。今回はこれらの特性を分析的に測定することはできなかった。環境実験室内の様々な位置で測定した全日射量の結果から推定した。この際に前節までに述べた計算法による日射ランプ受熱量計算プログラムを開発して利用した。実験では、日射ランプ配列板と床近くに設置した日射計の間に直達成分を遮蔽する板を設けて、拡散成分だけを計ったものもある。また床面から何通りかの高さで計った全日射量の値もある。さらに日射ランプの名目出力を何通りかに変えて計ったこれらの拡散と全日射量の値もある。そこで試行錯誤の初期値として、天然日射での凡その発光効率が100、室内平均反射率が0.3から始めて、それぞれ最適値を求めた。おそらく多数の条件での日射量の測定値から、最小二乗法等で最適値を求める方法もあり得ると考える。

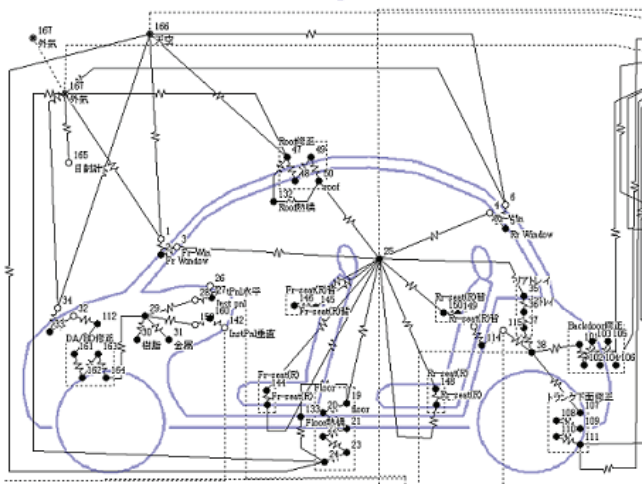


図-3 車室空気の1節点の熱回路網モデル

5. 車室空気の1節点モデル化

昨年度までは日射のある屋外気候に曝された自然室温の予測計算を主として行ってきたので、車室内の温度成層化現象の考慮が必要であった。しかし冷暖房状態になると強制対流状態なので空気温度も混合状態に近くなる。従って今年度は4層モデルから1層モデルに改造した。4節点モデルの構造のままでも温度成層間の混合流一般化熱コンダクタンスを非常に大きくすれば、室内温度混合の1節点モデルと同様な計算結果を出すようになる。室内空間を1節点とする構造的な修正を加えた過程で間違いが無かったか、その4節点十分混合モデルと1節点モデルの両方の室温が十分に一致するか検証した。こうして構築した熱回路網モデルの一部を図3に示す。

6. 環境実験室での比較検討

環境実験室に小型乗用車1台を設置し、車室内の室温を測定した。実験は日射ランプONとOFFの2条件で実施した。最初1時間10分は実験環境下に車両を放置し、その後車両のエンジンをかけ一定吹出し風量での冷房を開始した。車両の状態はアイドル停止状態とした。車両冷房実験と予測計算との比較を行う際に、冷房自体をどのような条件で与えるか、また冷房装置系のモデルはどうするか何通りか考えられる。今回は車室空気に与える条件だけで済むようにし、測定された冷房吹出温度と風量を与える条件を主に検討した。参考までに冷房開始と共にステップ関数的に一定の冷却熱流を与える条件でも計算してみた。冷房の吹出風量は風速計による吹出口平均風速に面積を乗じて274.98m³/hとした。室内平均温度で比較するために、室内20点の温度測定点の中から合理的な平均を出すと思われる8点平均について比較した。

まず日射ランプは使用せず、環境室温を35°C程度に維持した条件での冷房実験について述べる。図-4には環境室温、壁表面の平均温度、車両真下とそれ以外の床表面温度の推移を描いた。壁表面温度は比較的に低い隣室の影響を受けて2~3°C低めの温度で推移している。車両真下の床表面温度は冷房を始めるとエンジン熱の影響で少し上昇している。

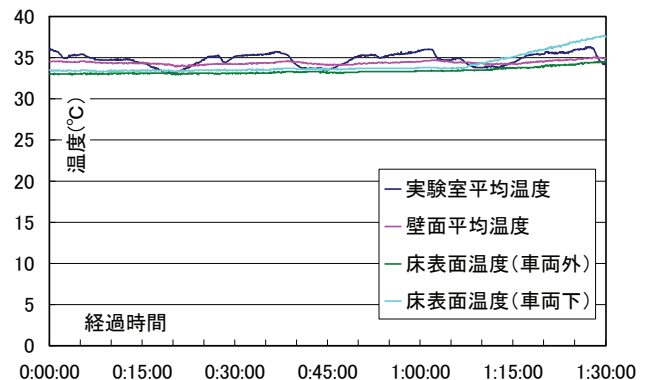


図-4 日射ランプ無し冷房実験環境条件

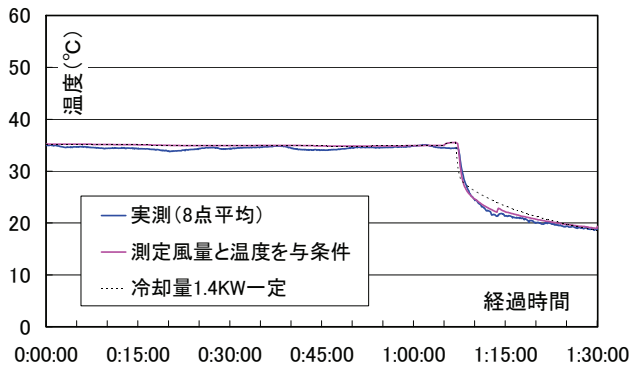


図-5 日射ランプ無し冷房実験室温比較

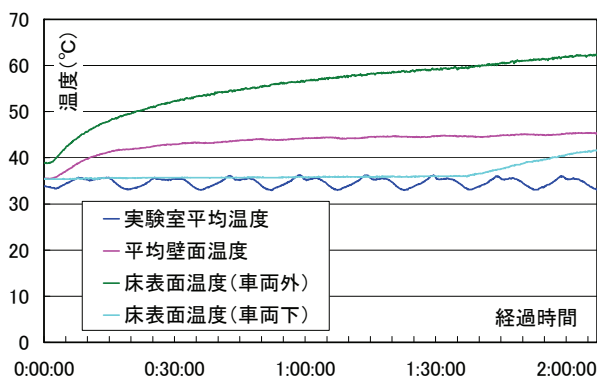


図-6 日射ランプあり冷房実験環境条件

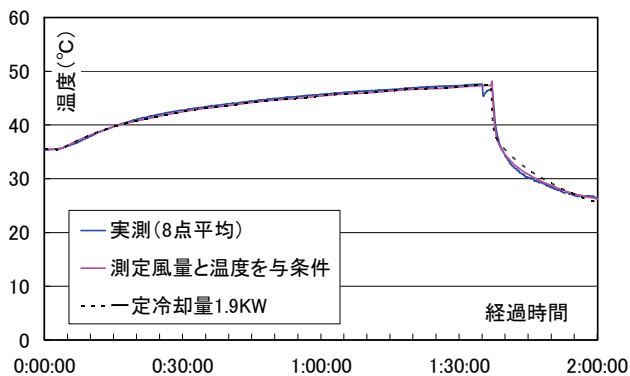


図-7 日射ランプあり冷房実験室温比較

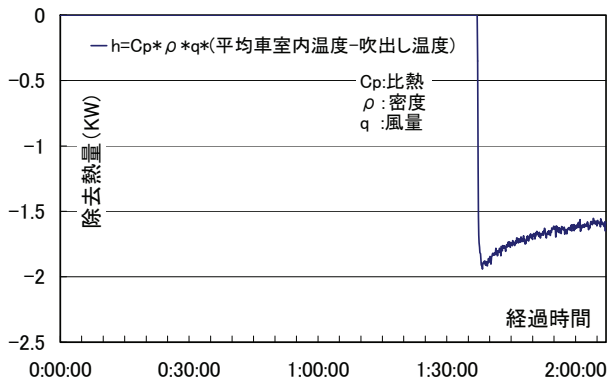


図-8 日射ランプあり室内空気への冷却熱量

この条件での比較を図-5に示す。自然室温状態では実測値と予測計算値は良い一致を見せているが、冷房が始まると僅かに差異が生じてくる。比較的に1.4KWで一定冷却の場合は差異が大きい。これは実測の冷風の出入口

温度差と風量から計算される冷却量が、始め大きく次第に小さくなる変化をしているからである。なおこの場合の1.4KWとは予め熱負荷計算を行っておいて求めた値である。

次に日射ランプ照射の場合の実験室の温度状況を図-6に示す。室温は34℃ぐらいを推移するが、壁と床はランプの放射を受けて高温になり、特に床は60℃を超えるまでに上昇している。車両真下は影になり、この影響が少ないが、エンジン熱による上昇が見られる。車両の伝熱モデルは、こうした環境実験室内表面と車両外表面の長波長放射熱交換も考慮している。図-7には比較したグラフを示す。冷房開始直前に実態の室温が少し下がっているのはドアが開けられ乗車したので換気が行われたためである。冷房開始前の自然室温の上昇曲線は良く一致している。冷房開始後の室温もほぼ一致していると言えるが、測定した吹出温度と風量を与えた予測室温は、僅かに実測室温よりも高めである。さらに1.9KWの一定冷却による予測結果は、さらに少しだけ高めである。なお冷風吹き出しの測定出入口温度差と風量から算出した冷却熱流の変化を描いたのが図-8である。冷房開始直後は冷却熱流が大きく、次第に小さくなる傾向が見られるのは、日射無しの場合と同様である。実測の吹出温度と風量を与えての予測計算は半分答えを与えている様なものである。一定冷却量を与える予測室温でも、かなり実測値に近づくので、仮に冷却装置系(熱交換器、空調器、冷媒、蒸発器、圧縮機、凝縮器 etc)を、ある程度までモデル化できれば、より測定値に依存しない演繹的なモデルにすることができる。

7. まとめ

環境実験室で用いられる日射ランプについて、配光曲線の方程式、全方向放射量の積分式、車体外表面と窓透過後の室内での受熱量計算方法を考案した。ランプの発光効率と室内表面反射率は、様々な条件での測定日射量から推定した。この環境実験室での車両冷房実験の予測計算室温と実験値を比較して良好な結果を得た。

参考文献

- 1) 大西由哲, 奥山博康, 永山啓樹, 大井元, 「車室内の上下温度分布の工学モデル」, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, E-8, 2007年9月, pp333-336
- 2) 奥山博康, 大西由哲, 大井元, 小野健二, 永山啓樹, 「車室内の日射分配変化の工学モデル」, 空気調和・衛生工学会大会(滋賀県)学術講演論文2008年8月, E-20, pp1875-1878
- 3) 山本信雄, 「卵型曲線の方程式は?創造への一歩」, 茨城高専図書館だより63号(2006年), 電気電子システム工学科, P.8, <http://www16.ocn.ne.jp/~akiko-y/index.html#egg>
- 4) 森口, 宇田川, 一松「岩波 数学公式 I 微積分・平面曲線」, 1988年2月15日新装第2刷発行, p.87およびp.82
- 5) 宿谷昌則「光と熱の建築環境工学」丸善, 1993年7月25日発行, pp30-34