

車室内の日射分配変化の工学モデル

An Engineering Calculation Model of Sunlit Distribution Change in Vehicle Cabin

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: Solar radiation through the window into a vehicle cabin is distributed to seats, instrument panel, doors and other inner surfaces. The distribution ratios among these receiving objects vary according to the solar position. There are conventional methods such as ray tracing technique pursuing precise variation of the distribution. However there are few methods simple but practical that can be incorporated into the air conditioning load calculation program to be applied for rather long period simulation. The present paper describes a practical engineering model devised making use of several linear approximations. The prediction accuracy is verified through a comparison with computer graphics.

1. はじめに

昨年「車室内の上下温度分布の工学モデル」¹⁾を報告した。しかしその室内の日射受熱モデルは、太陽位置により受熱場所が変化しない固定モデルだった。車室の窓から入ってきた直達日射は、座席、計器板やドア等の室内表面に受熱されるが、太陽位置によって各受熱体の受熱割合は変化する。従来こうした変化の計算は光線追跡計算法等やコンピュータグラフィックス (以降CGと略記) 的技術で精密に追う方法が使われてきた。しかし非定常伝熱負荷計算を行って行く中で、時々刻々そうした重い計算も並行することは、計算プログラムを複雑にするだけでなく、計算経済性も損なう。これまで比較的長期間の熱負荷計算の中でも使える簡易法はあまり研究開発されて来なかった。

そこで分析的志向とは逆に総合的志向を取り、幾つかの工学的近似を考案し、さらにアルゴリズムではなく人間の優れた幾何的判断能力を活用する簡易法を考えた。ある窓を通した太陽と車室内受熱体との平面図と断面図における角度的関係に関して、各受熱体が最大の受熱をする角度関係は、受熱体総数分だけ、人間による画面上の幾何的判断で得られる。実際の太陽位置変化では、これらの角度関係の間の状況が多く起こる。そこで離散的な最大受熱角度の間の線形補間近似を利用した。さらに受熱面積は、平面図と断面図各々の日射の射影幅の積で近似できるとしたことで、実用的な工学モデルを導いた。本論では理論の概要とCGとの比較検討を述べる。

2. 室内日射分配率時間変化モデル

2.1 コンセプト

これまでのNETS²⁾では、窓ガラス透過後に室内で受熱する場所は最大10カ所までとし各々の受熱比率 $r_a, r_b, r_c \sim r_j$ は一定値という制約があった。しかし太陽位置等の移動に従って分配率も本来は変化するので、この変化を考慮できる様にした。当初は分配率 $r_a \sim r_j$ を見かけの太陽方位角 ϕ_a と見かけの太陽高度 ϕ_h の余弦と正弦の3次冪級数の積から成る回帰式で表し、予め光線追跡プログラム等に

よる計算結果により回帰しておく案を考えていた。しかし高次の冪級数とはいえ角度変化に関して滑らかな変化しか扱えないのに対し、実際は角度によって日射受熱の有無の面が異なるので、全く別の回帰関数に変えなければならず対応できない。さらに面倒な光線追跡プログラムを使わず、紙上の簡単な図面作成で係数等を用意できるモデルにする。ここで太陽位置の角度定義と窓の向きを次の図の様に進行。見かけの太陽方位角度 ϕ_a は(1)式となり、見かけの太陽高度(profile angle) ϕ_h は(2)式で計算される³⁾。

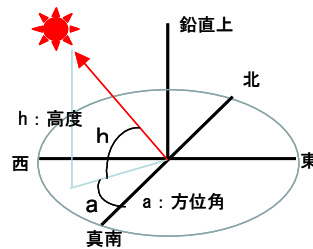


図1 太陽位置の角度

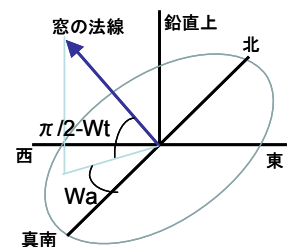
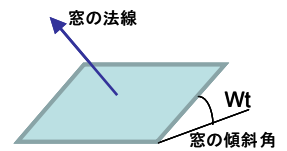


図2 窓の向きの角度

$$\phi_a = a - W_a \quad (1)$$

$$\phi_h = \tan^{-1} \left(\frac{\tan(h)}{\cos(\phi_a)} \right) - \left(\frac{\pi}{2} - W_t \right) \quad (2)$$

図3には窓透過後の受熱体の様子を模式化している。単純な直方体の室空間の場合、窓の面以外の(a)から(e)までの5つの受熱面が存在することになる。ある角度で日射が入ってきて各面に当たった状況を、実際の3次元的な図では表現し難いので、2次元的に平たく延ばして表現すると例えば図4となる。

この図4の様な状況では、受熱体(b)が最大の受熱をするものとしている。そしてこの状況で同時に一部受熱する(a)と(c)も含めた、各(a), (b)と(c)のそれぞれの受熱割合すなわち分配率が射影幅から求められる。同様にして他の(a), (c), (d)と(e)のそれぞれが最大の受熱をする角度(各

最大受熱角と呼ぶ) と、その時の他の面の分配率が図面上で定められる。ただし実際の角度は2種類有り、見かけの太陽方位と、見かけの太陽高度である。

本方法のひとつの重要な近似とは、一般に発生する見かけの太陽位置の角度は、離散的なこれら各最大受熱角度の間に多く起こるが、角度の線形補間の比率で分配率も線形補間近似できるとするものである。

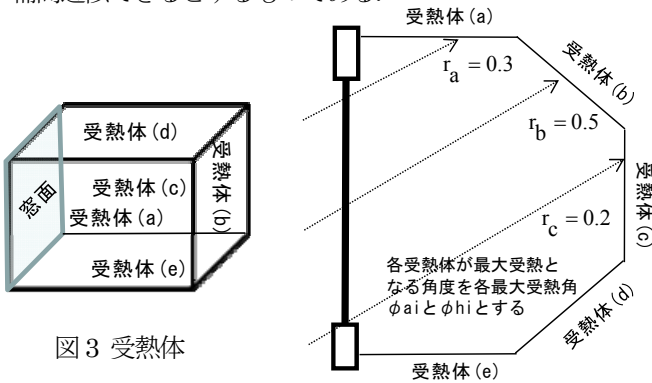
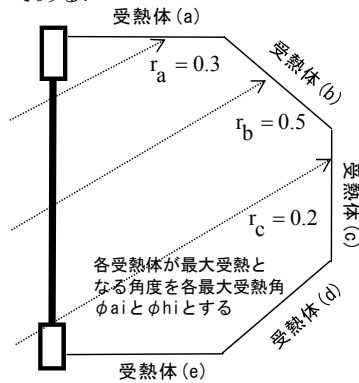


図3 受熱体



$r_a = 0.3, r_b = 0.5, r_c = 0.2, r_d = 0, r_e = 0$

図4 各最大受熱角度

説明のために図4の様になたく延ばしたが、実際の比較的に複雑な3次元的室内状況を、この様なひとつの図にすることは困難であるし、実際の角度は見かけの太陽方位と、見かけの太陽高度の2つあるから、2つの図が最低限は必要である。このために平面図と断面図の2つを用いる。

本方法のふたつ目の大きな仮定は、実際に受熱する面積が、こうした平面図での幅と断面図の幅の積で、近似できるとするものである。

2.2 計算方法

次式の分配率 r を持つベクトル \mathbf{v} を定義する。分配率 r の添え字は受熱体番号を表す。

$$\mathbf{v}_{i,j} = {}^t(r_a, r_b, r_c, \dots, r_9, r_{10}) \quad (3)$$

ベクトル \mathbf{v} の添え字の意味は、下の表1において、 i 行の高度角、 j 列の方位角の各最大受熱角での \mathbf{v} を $\mathbf{v}_{i,j}$ とし表すものである。なお次の表1で表す表の左右と上下の並び方は、各最大受熱角度について、左上隅から小さい順に並べた変えたものである。こうして受熱体記号 a, b, c, \dots から番号に変わる。

表1 各最大受熱角度依存の分配率を要素に持つ \mathbf{v}

		各最大受熱方位角(最小1個最大10個)				
		ϕ_{a1}	ϕ_{a2}	ϕ_{a3}	ϕ_{a4}	ϕ_{a5}
各最大受熱高度角(最小1個最大10個)	ϕ_{h1}	$\mathbf{v}_{1,1}$	$\mathbf{v}_{1,2}$	$\mathbf{v}_{1,3}$	$\mathbf{v}_{1,4}$	$\mathbf{v}_{1,5}$
	ϕ_{h2}	$\mathbf{v}_{2,1}$	$\mathbf{v}_{2,2}$	$\mathbf{v}_{2,3}$	$\mathbf{v}_{2,4}$	$\mathbf{v}_{2,5}$
	ϕ_{h3}	$\mathbf{v}_{3,1}$	$\mathbf{v}_{i,j}$	$\mathbf{v}_{i,n}$	$\mathbf{v}_{3,4}$	$\mathbf{v}_{3,5}$
	ϕ_{h4}	$\mathbf{v}_{4,1}$	$\mathbf{v}_{m,j}$	$\mathbf{v}_{m,n}$	$\mathbf{v}_{4,4}$	$\mathbf{v}_{4,5}$
	ϕ_{h5}	$\mathbf{v}_{5,1}$	$\mathbf{v}_{5,2}$	$\mathbf{v}_{5,3}$	$\mathbf{v}_{5,4}$	$\mathbf{v}_{5,5}$
		j列	n列			

ある日時の太陽位置と車両の向きにおいて、見かけの太陽方位角が ϕ_a で高度角が ϕ_h とする。これが分配率表では、隣り合う j 列と n 列の ϕ_{aj} と ϕ_{an} の間にあり、かつ隣り合う i 行と m 行の ϕ_{hi} と ϕ_{hm} の間にあるとする。この状態での分配率は、4点の各最大受熱角度での $\mathbf{v}_{i,j}, \mathbf{v}_{i,n}, \mathbf{v}_{m,j}, \mathbf{v}_{m,n}$ の線形補間で近似的に計算できると考える。まず i 行と m 行各々において ϕ_{aj} と ϕ_{an} および ϕ_a により線形補間するのは次の式(4)と式(5)で示される。

$$\mathbf{v}_{i,j-n} = \frac{\|\phi_a - \phi_{an}\| \cdot \mathbf{v}_{i,j} + \|\phi_a - \phi_{aj}\| \cdot \mathbf{v}_{i,n}}{\|\phi_a - \phi_{an}\| + \|\phi_a - \phi_{aj}\|} \quad (4)$$

$$\mathbf{v}_{m,j-n} = \frac{\|\phi_a - \phi_{an}\| \cdot \mathbf{v}_{m,j} + \|\phi_a - \phi_{aj}\| \cdot \mathbf{v}_{m,n}}{\|\phi_a - \phi_{an}\| + \|\phi_a - \phi_{aj}\|} \quad (5)$$

次に ϕ_{hi} と ϕ_{hm} および ϕ_h により、最終的な補間値 \mathbf{v} は次式で計算される。

$$\mathbf{v} = \frac{\|\phi_h - \phi_{hm}\| \cdot \mathbf{v}_{i,j-n} + \|\phi_h - \phi_{hi}\| \cdot \mathbf{v}_{m,j-n}}{\|\phi_h - \phi_{hm}\| + \|\phi_h - \phi_{hi}\|} \quad (6)$$

前述の各最大受熱角度による分配率の表を生成する入力ユーザーインターフェイスを考案する。影の計算など本来は複雑な処理になるところを、ユーザーの判断に多くを依存することで、極力簡単な処理プログラムになるように工夫する。また車室内の幾何学的状況を描く機能を付けると複雑になるので、bmp ファイルの下絵として入力処理プログラムは受け取るようにする。図7と8に示す車室の平面図と断面図は bmp ファイルとして既に作られたものを利用するという前提である。

下絵には平面図と断面図において最大10個の受熱体が描かれているものとし、各受熱体の中心位置には左図で赤色で示す点(a)~(g)を描いておく。また窓面の中心点も描いておくものとする。また平面図と断面図での各中心点の対応情報を処理プログラムに認識させる。断面図では図面奥行き方向に受熱体中心点が重なっている場合もある。

ユーザーは各受熱体について次のことを行う。平面図において窓の中心点と受熱体の中心点を結ぶ。この時に(a)~(g)のどれについての定義であるか処理プログラムに認識させる。この直線と平行な直線として、当受熱体が受けるであろう受熱量を考慮する適切な幅を表す2本の直線を描く。このとき処理プログラムは、この射影幅 W_h を読み取ることができ、また窓を透過する窓射影幅 $W_h(0)$ も読み取ることができる。中心点を通らない他の受熱体についてもユーザーは受熱体射影幅 W_h を定義するものとし処理プログラムはこれらの幅も読み取る。

この操作と処理は全受熱体について行われるものとする。同様なことは断面図においても行う。すると表2で表

す様な手順で分配率 r_x は計算される。これらの各受熱体 x の分配率 r_x を要素に持つベクトル $v = (r_{a}, r_{b}, \dots, r_{10})$ は、平面図と断面図でそれぞれ(a)から最大10個の受熱体について作成できるから、合計で最大 10×10 の v が作成される。

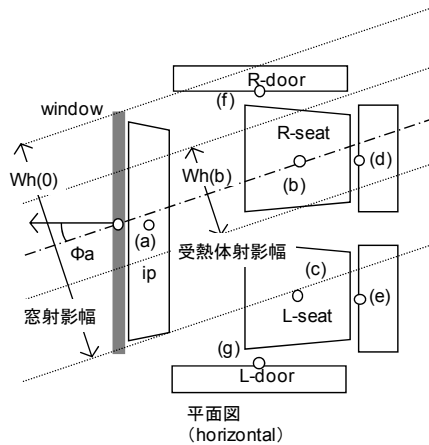


図5 平面図での日射受熱定義

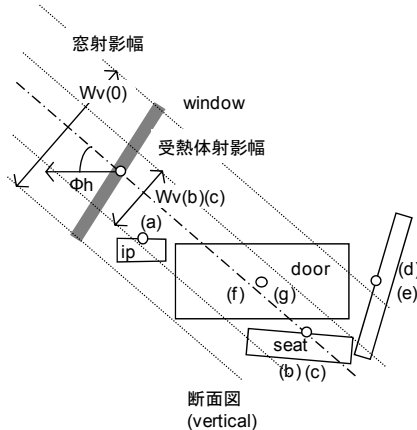


図6 断面図での日射受熱定義

表2 各最大受熱角度による受熱比率

受熱体	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
平面図射影幅	Wh(a)	Wh(b)	Wh(c)	Wh(d)	Wh(e)	Wh(f)	Wh(g)
断面図射影幅	Wv(a)	Wv(b)	Wv(c)	Wv(d)	Wv(e)	Wv(f)	Wv(g)
上2の積	f(a)	f(b)	f(c)	f(d)	f(e)	f(f)	f(g)
分配率r	f(a)/Σf	f(b)/Σf	f(c)/Σf	f(d)/Σf	f(e)/Σf	f(f)/Σf	f(g)/Σf

各受熱体代表中心点(a)~(g)のそれぞれについて上記操作と処理が行われれば、それぞれで各最大受熱角度が決定される。もし(a)から(g)まで順番に行えば、これらの各最大受熱角度は必ずしも大小順番には並んでいないであろう。従って分配率表を作る際には、表の左から右へ、また表の上から下への順番で、比較的こ小さい各最大受熱角度から大きな各最大受熱角度になるように並べ替える。こうして前述の各最大受熱角度による受熱比率の表が作成できる。一方、拡散日射に対しては一定的なモデルとした。ある窓を透過した直達日射が各受熱体に分配される割合を、日の出から日没まで平均した値を拡散日射の分配率とした。これは直達に関して分配率が大きければ拡散に関して大

きいであろうということによる。

2.3 日射分配率変化のユーザーインターフェイス

実際のユーザーインターフェイスの概要を述べる。前面窓からの透過と受熱の射影幅を決めるための平面図での様子を図7に、断面図での様子を図8に示す。まず最初にbmp形式の下絵を読み込ませる。下絵には予め各受熱体の中心点を印しておく。窓の両端を指定し窓の向きと幅を定める。各受熱体について受熱体中心点と窓の中心点を結び各最大受熱角度を定める。そしてこの時の他の受熱体の幅も定める。最後に各受熱体と熱回路網の節点との対応付けを行う。

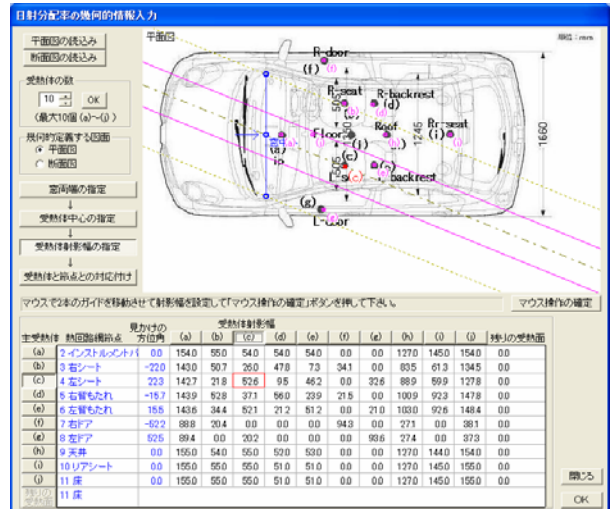


図7 平面図での射影定義画面

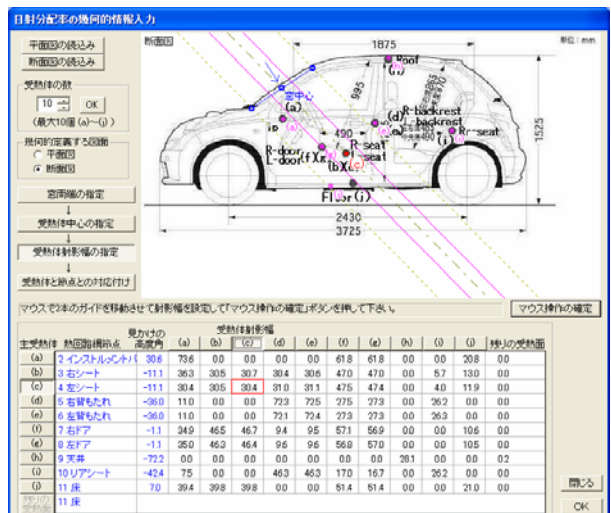


図8 断面図での射影定義画面

3. 日射分配率変化モデルとCGの比較検討

室内日射分配率時間変化モデル (NETS に組み込まれているので以降NETSのモデルと呼ぶ) による日射分配率と、別途CGにより求められた各受熱体の日射分配率を、9月8日の厚木における、12時、15時と17時の3時点の太陽位置で比較した。図9は12時に日射が当たる窓の射影面積を見積もるための図である。また図10は12時に透過した直達日射が当たる受熱体を色分けしたものである。

表3 直達透過日射の分配率をCG計算とNETS計算で3時点で比較

		12時				15時				17時						
		CG		NETS		CG		NETS		CG		NETS				
		ピクセル数	面積比(1)	面積比(2)	分配率(1)	分配率(2)	ピクセル数	面積比(1)	面積比(2)	分配率(1)	分配率(2)	ピクセル数	面積比(1)	面積比(2)	分配率(1)	分配率(2)
フロント から入射	フロントガラス 全投影面積	30293	100%	100%	100%	100%	18800	100%	62%	100%	62%	4827	100%	16%	100%	16%
	インパネ	13073	43%	43%	40%	40%	8155	43%	27%	36%	22%	2352	49%	8%	48%	8%
	フロント右シート座面	4163	14%	14%	13%	13%	0	0%	0%	0%	0	0	0%	0%	0%	0%
	フロント左シート座面	4917	16%	16%	16%	16%	1084	6%	4%	8%	5%	0	0%	0%	1%	0%
	フロント右シート背面	0	0%	0%	1%	1%	0	0%	0%	0%	0	0	0%	0%	0%	0%
	フロント左シート背面	0	0%	0%	1%	1%	0	0%	0%	0%	0	0	0%	0%	0%	0%
	リアシート座面	0	0%	0%	0%	0%	0	0%	0%	0%	0	0	0%	0%	0%	0%
	リアシート背面	0	0%	0%	0%	0%	0	0%	0%	0%	0	0	0%	0%	0%	0%
	右ドア	0	0%	0%	0%	0%	0	0%	0%	0%	0	0	0%	0%	0%	0%
	左ドア	0	0%	0%	5%	5%	6258	33%	21%	48%	30%	0	0%	0%	44%	7%
	左サイドガラス	0	0%	0%	-	-	2621	14%	9%	-	-	1151	24%	4%	-	-
	フロア	8140	27%	27%	24%	24%	682	4%	2%	8%	5%	0	0%	0%	6%	1%
	フロント左ピラー	0	0%	0%	-	-	0	0%	0%	-	-	1324	27%	4%	-	-

		12時				15時				17時						
		CG		NETS		CG		NETS		CG		NETS				
		ピクセル数	面積比(1)	面積比(2)	分配率(1)	分配率(2)	ピクセル数	面積比(1)	面積比(2)	分配率(1)	分配率(2)	ピクセル数	面積比(1)	面積比(2)	分配率(1)	分配率(2)
右サイド から入射	右サイドガラス 全投影面積	9447	100%	31%	100%	31%	21047	100%	69%	100%	69%	23919	100%	79%	100%	79%
	インパネ	0	0%	0%	0%	0%	0	0%	0%	1%	1%	561	2%	2%	4%	3%
	フロント右シート座面	322	3%	1%	4%	1%	782	4%	3%	4%	3%	0	0%	0%	0%	0%
	フロント左シート座面	0	0%	0%	0%	0%	3024	14%	10%	13%	9%	0	0%	0%	1%	1%
	フロント右シート背面	1082	11%	4%	11%	3%	5686	27%	19%	23%	16%	1936	8%	6%	11%	9%
	フロント左シート背面	0	0%	0%	0%	0%	2208	10%	7%	7%	5%	507	2%	2%	2%	2%
	リアシート座面	2102	22%	7%	24%	7%	1682	8%	6%	16%	11%	0	0%	0%	3%	2%
	リアシート背面	2549	27%	8%	27%	9%	6637	32%	22%	29%	20%	1037	4%	3%	6%	4%
	右ドア	0	0%	0%	-	-	0	0%	0%	-	-	0	0%	0%	-	-
	左ドア	0	0%	0%	0%	0%	0	0%	0%	1%	1%	12100	51%	40%	47%	37%
	左サイドガラス	0	0%	0%	0%	0%	0	0%	0%	0%	0%	7778	33%	26%	25%	20%
	フロア	3392	36%	11%	34%	11%	1028	5%	3%	6%	4%	0	0%	0%	1%	0%
	フロント左ピラー	0	0%	0%	-	-	0	0%	0%	-	-	0	0%	0%	-	-

こうしたCG画像により窓の射影面積および車内の受熱体の射影面積を、それぞれピクセル数のカウント値として代表し、日射分配率は窓の射影ピクセル数に対する各受熱体射影ピクセル数の比率で算出した。

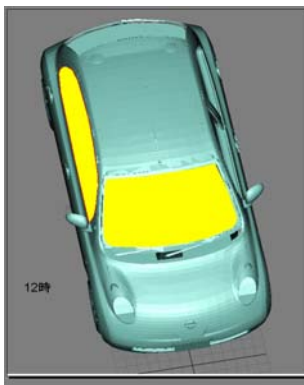


図9 窓日射射影のCG

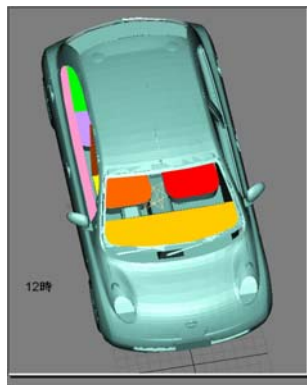


図10 受熱体射影のCG

一方、NETSではシミュレーション結果の中に分配率は含まれない。しかし日射を受ける節点の発熱量は出力される。そこで車両伝熱モデルの傍らに同一面積で同一向きの窓をモデル化し、この窓を透過する日射を受熱する節点を設け、この発熱量を分母として、車内の各受熱体の発熱量を分子とし、日射分配率を算出した。この場合に使用した日射量は理想化し、直達分の1kwだけで拡散日射と地表面反射日射は0とした。また図10の12時のCGでは車両右側面の窓台にも日射が当たっているが、NETSの伝熱モデルではこうした窓台に対応する節点は持っていない。そこでCGで窓台に当たった分は、他の部分へ其々の大きさ割合に応じて割り振りした。こうして日射分配率のCGの結果とNETSの結果を比較したのが表3である。各時点での窓日射射影面積に対する分配率(1)だけを見ると大きく異なる所もある。しかし結局は熱量的な影響の比較が重要であるので、12時のフロントガラス射影面積を分母にした日射分配率(2)も算出して比較した。

つまり面積比(1)と分配率(1)は、各時刻での窓ガラスの射影面積を分母にした比率であるのに対して、面積比(2)と分配率(2)は12時のフロントガラス日射射影面積を分母としたものである。これらにより、もし(1)において大きな差異があっても、(2)の値が小さければ影響は少ないと見る。表3を見ると概ね一致していると思われる。太陽高度が高い12時の場合はよく一致しているが、15時そして17時と太陽位置が低くなってくると違いが目立つようになる。比較的大きく違うのは17時のフロント窓から日射が入った場合の左ドアの分配率で、CGは0%でNETSは44%である。しかしこれは比率(2)で見ると7%と小さく、熱量的には影響が少ないと思われる。また窓を透過した日射は車室内のどこかに受熱する実現象でありモデルであるから、窓面積と透過の性能が正確であれば、大局的な室内表面での総受熱量は正確である。

4. まとめ

窓からの日射室内分配の変化を光線追跡計算法等で精密に追う方法はあったが、比較的長期間の熱負荷計算の中でも使える簡易法は不十分だったので、線形近似等から実用的な工学モデルを考案した。

【謝辞】CGの作成において、早稲田大学の田辺新一教授、佐野潤一様をはじめ、関係者より多大なるご協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 大西, 奥山, 永山, 大井, 「車室内の上下温度分布の工学モデル」, E-8, pp333-336, 2007年9月, 空衛学会大会学術講演論文集
- 2) Hiroyasu Okuyama, "Thermal and Airflow Network Simulation Program NETS", Proceedings of the 6th International IBPSA Conference (Building Simulation '99), Kyoto, September 1999, pp1237-1244
- 3) 木村建一, 「建築設備基礎理論演習」, 1971年再発行, (株)学敵社