透過日射を考慮した膜構造建築物の半屋外空間における熱放射環境の予測手法 - 膜屋根を有する駅プラットホームの実測値と計算値の比較検討-

親川昭彦^{*1} 吉野達矢^{*2} 梅干野晁^{*3}

梗 概

著者らは、2008年に膜構造建築物を対象に、屋外に開放的な建築空間に形成される熱環境の実測調 査を行っている。本報では、その実測結果をもとに膜構造建築物の屋根下空間に形成される熱放射環境 を数値シミュレーションにより予測し、その評価方法について述べるものである。本文の前半では、実測 結果をもとに、膜材の透過日射等が膜に覆われている建築空間の熱環境に及ぼす影響の度合について 述べると共に、透過日射を考慮した平均放射温度分布の算出が行える数値モデルの改良を行った。後半 では、本予測ツールを用い、本実測対象の膜構造建築物を計算モデルとして、膜材料の透過日射の違 いによる熱放射環境に及ぼす影響について予測し、評価を行った。

1. はじめに

近年、屋外に開かれた半屋外空間においては、昼光や通風 といった自然エネルギーを活用した明るく涼しい空間が求めら れている。そのような空間を実現するために、透光性のある材料 で構成される膜構造建築物が注目されている¹⁾。このような背景 の中、半屋外空間を有する膜構造建築空間(以下、膜下空間) においては、熱環境を緩和する具体的な設計提案が求められ ている。

数値シミュレーションを用いた屋外の熱放射環境の把握を行う研究は、数多くなされている。山田ら²⁰は、都市形態を再現し、 道路上の人体が受ける短波長放射量と長波長放射量の計算を 行っている。しかし、この数値モデルは半屋外空間を対象とした ものではない。また、膜下空間では佐野により、大空間エアドー ムを対象とした夏期及び中間期の垂直温度分布の推定³⁰、夏期 の冷房負荷の推定⁴⁰が行われている。これらは、膜材料の透光 性という長所が逆に熱負荷の過剰となるような空間、即ち、周囲 が囲まれた閉鎖的な膜構造の建築空間が主な研究対象になっ ており、半屋外空間を対象にしたものではない。

一方, 梅干野ら⁵は, 設計支援を目指した屋外熱環境のシミュ レーションツールの開発を行っている。このツールは **3D-CAD** を用いて建築外部空間を再現し, 空間全表面での熱収支計算

*3 放送大学 教授 工学博士

による表面温度分布を予測するものである。また、実測データを もとに膜下空間に形成される夏季の微気候を明らかにし⁹、計 算モデルを数値シミュレーションに導入し、計算手法を開発して いる⁷⁾。さらに、生活空間における熱的快適性を評価するため、 空間形態や構成部材の違いが評価できるように、長波長放射と 日射を考慮した平均放射温度を評価指標に用いている⁸⁰。ここ では、直達日射と天空日射、反射日射を考慮しているが、膜材 からの透過日射の影響は考慮していない。しかし、膜構造建築 空間を評価する場合、膜材の日射透過率が10~20%程度であ ることから、透過日射による膜下空間の放射環境への影響を考 慮する必要がある。また、膜材の日射反射率が70~80%程度と 高いため、膜下空間における多重反射を考慮する必要がある。

本報では、梅干野らが開発している熱環境シミュレーションツ ールを用いて、膜下空間における熱放射環境を評価するため に、透過日射を考慮した平均放射温度の算出方法を示す。その 際、透過日射と多重反射を導入する。また、著者ら⁹が実測した 膜屋根を有する駅プラットホームを計算モデルとし、熱環境の実 測値と計算値を比較し、膜下空間に形成される熱放射環境の計 算精度を確認する。さらに、本実測対象を計算モデルとして、膜 材料からの透過日射の違いによる膜下空間の熱放射環境に及 ぼす影響について予測し、評価を行う。

^{*1} 太陽工業株式会社 研究開発本部 博士 (工学) *2 太陽工業株式会社 技術研究所 博士 (工学)

2. 透過日射を考慮した熱環境の計算方法

設計実務において膜下空間の熱環境を設計する際,周辺地 物からの熱的影響を考慮するとともに,膜構造建築物の空間 形態や構成部材を決定する必要がある。その際,パラメトリ ックな提案を前提に,短時間で大まかに熱環境を予測し,評 価する必要がある。本報の熱環境評価は,透過日射を考慮し た平均放射温度(以下,OUT-MRT)を用いるとし,周辺地物から 人体に入射する放射エネルギーの放射量と平均放射温度の計 算式に,膜材からの透過日射の影響が考慮できるよう計算ア ルゴリズムを拡張する。以下に,熱環境の予測手法および OUT-MRT の計算方法について述べる。

2.1 熱環境予測手法の計算方法

熱環境予測手法は、熱環境シミュレーションを実行するための条件設定部分である「1)周辺地物の空間形態と構成部材の再現」と、「2)熱環境の計算」、「3)計算結果の可視化」に分けられる。ここで、熱環境シミュレーションとは、街区における建物や地面等の表面温度を予測するシミュレータである。また、図1に熱環境予測手法の計算フローを示す。

1) 周辺地物の空間形態と構成部材の再現

計算対象となる空間形態(建物や地面,樹木等)や構成部 材に関する情報は、意匠と構造の設計で活用した 3D-CAD モ デルを用いて、3 次元の空間形態を再現した上で、自動的に メッシュモデルを生成する。次に、各メッシュに、法線の向 きや部位、材料特性(日射反射率や熱伝導率など)等の情報 を格納する。ここで、メッシュモデル生成のアルゴリズムは、 既往のツールのモデルと同様に均等メッシュサイズを採用す る¹⁰。

2) 熱環境の計算

熱環境の計算は、対象範囲内の膜構造建築物を含めた周辺 地物の外表面の各メッシュについて熱収支計算(直達日射, 天空日射,反射日射や膜材からの透過日射を含む受熱日射量, 大気放射量,対流熱伝達量,周辺地物からの長波長放射量) と断面方向の一次元非定常熱伝導計算により、表面温度を算 出する。表面温度は一日を通して対象モデルの全ての表面温 度分布として得られる。尚、熱環境の計算は、梅干野らが開 発した膜材の伝熱計算モデルを適用する。ここでは、膜材料 を透過した日射は指向性のない均等拡散としている。また、 膜材からの透過日射の膜下空間内における反射日射は、多重 反射を考慮する。本報では、4回反射とする。

3) 計算結果の可視化

計算結果は、通常の設計作業時に必要となる情報として、 昼光率や天空率等の設計要件や、評価に必要となる表面温度 分布を 3D-CAD モデル上に 3 次元画像で可視化する。また、 全表面温度から対象地域内の OUT-MRT 分布を求め、同様に可 視化を可能にしている。ここで、人体モデルは微小立方体と し、重み付け係数を用いて人体の受ける放射量を算出する。 1)周辺地物の空間形態と構成部材の再現



2)熱環境の計算



図1 熱環境予測手法の計算フロー

$$R_{human(A)} = a_1 \delta_s \left(\frac{A_p}{S_{human}} I_d \delta_{di} + \sum_{i=1}^6 W_i (\varphi_i I_{si} + \sum_{k=1}^S C_{ik} I_{rk} + \delta_{it} \sum_{k=1}^S C_{ik} I_{ik}) \right) + a_2 \sum_{i=1}^6 W_i \left(\sum_{k=1}^S C_{ik} L_{object(k)} + \varphi_i L_{sky(i)} \right)$$
(1)

$$OUT - MRT = \sqrt[4]{\frac{R_{human}}{\sigma}} - 273.15$$
 (2)

S:メッシュ面の総数		C_{ik}	:形態係数
<i>i</i> (下付)	:微小立方体面番号	$\pmb{\varphi}_i$:天空率
I_d	:直達日射輝度[W/m²]	a_1	:人体の日射吸収率[-]
I _{si}	:天空日射輝度[W/m²]	a_2	:人体の放射率[-]
I _{ri}	:反射日射輝度[W/m]	S _{human}	:人体の表面積[m]
Ι _{τi}	:透過日射輝度[W/m]]	A_p	:人体の有効放射面積[m²]
$L_{object(k)}$:長波長放射輝度[W/m²]	W_{i}	:重み付け係数[-]
$L_{sky(i)}$:大気放射輝度[W/m]]	σ	:ステファンボルツマン定数[W(m²・K4)]
δ_{di}	:1のとき、直達日射授受	する。00	のとき直達日射授受しない
δ_s	:1のとき、日射を考慮す	る。0の	とき日射を考慮しない
δ_{π}	:1のとき,透過日射を考	慮する。	0のとき透過日射を考慮しない

2.2 透過日射を考慮した平均放射温度(OUT-MRT)の算出方法

OUT-MRT の計算方法は、微小立方体が受ける日射を考慮 した放射量を計算し、式(2)により求める。放射量の計算には、 人体が受ける日射量(直達日射量, 天空日射量, 反射日射量, 透過日射量)の吸収分と放射量(大気放射量、地物からの長 波長放射量)の吸収分を合計した値で、式(1)により求める。 また、人体の長波長放射量の放射率は1.0、日射吸収率は0.7 とする。ここで, 4.4節で透過日射の違いによる OUT-MRT への影響を比較検討するため、式(1)において $\delta_s=0$, $\delta_{-i}=$ 0の場合,長波長放射のみの平均放射温度(以下, MRT)を, $\delta_s=1$, $\delta_{si}=0$ の場合, 透過日射以外の日射を考慮した平均 放射温度(以下, OUT-MRT(τ 0))を, $\delta_s=1$, $\delta_{\tau i}=1$ の場 合,透過日射を含む日射を考慮した平均放射温度(以下, OUT-MRT(τ)) を示す。

3. 駅プラットホームの実測

本手法の計算結果を比較検討するため、著者ら⁹が実測調 査を行った駅のプラットホームに着目する。ここでは、実測 概要について述べるとともに、数値シミュレーションの計算 条件と実測結果について述べる。

3.1 実測概要

実測対象は神奈川県川崎市に位置しているK 駅の膜屋根 を有するプラットホームである (図2)。 測定は外部気象とプ ラットホームに分けられ,外部気象は 2008 年8月1日から8 月4日に24時間, プラットホームは8月4日の10時から15 時30分連続測定を行った。また,膜下空間の太陽放射領域の 短波長放射と常温域熱放射の長波長放射を中心に夏季の熱放 射環境の特性を把握した。また、K駅はM駅の東北東の方角



約2.3kmに位置しており、金属とスレート屋根を有するプラ ットホームである。

3.2 実測期間における気象

- 45

ここでは、8月4日の結果をもとに気象条件を設定する。



図3に外気温と相対湿度,水平面全天日射量の結果を示す。 尚,風速については,平均0.5~1.0m/s程度の微風であった。

3.3 実測結果

1) 長波長放射環境

膜屋根の裏面および膜屋根下の床面に着目した熱画像を図 4、図5に示す。この結果から、12時21分における膜の屋根 裏面温度は39~40℃を示し、床面温度も39~40℃であった。 また、屋根なし部の床面温度は膜屋根下に対して、10℃程度 高い値であった(図6)。

膜屋根下の床面から1.2mにおける13時44分の全球熱画像 を図7に示す。ここで、熱画像から算出した平均放射温度 (MRT)は37℃であった。これは、外気温に比べると2℃程度高 い値であった。

2) 表面温度の日変化

図 8 に屋根裏面温度を,図 9 に床面温度の日変化を示す。 屋根裏面は平均で38.3℃,13 時46 分で最大42.2℃であり, 屋根下床面は平均で37.5℃,13 時38 分で最大40.7℃であっ た。また屋根なし床面は平均で44.1℃,13 時38 分で最大 49.7℃であった。

4. 数値シミュレーションによる計算結果と実測結果の比較

上述した実在街区にある駅プラットホームを対象に, 膜材 からの透過日射が膜下空間に形成する熱放射環境への影響を 把握するため検討を行う。まず本予測手法により,多重反射 を考慮した表面温度分布とMRTを計算し,実測結果と比較 する。次に, 膜材の日射透過率の違いによる OUT-MRT(τ) と OUT-MRT(τ 0)を比較し, 膜下空間の熱放射環境への影響 度合いを把握する。ここでは,実測日(8月4日)の気象デ ータ等を用いて膜構造建築物を含む街区全体を計算モデルと する。

4.1 街区形状のモデル化

街区形状の計算モデルと構成部材を図10に示す。計算モデルは図2の実測対象のプラットホームを含む186m×286mの街区全体とする。街区は起伏のある地面に、低層から中層の建物が7種類、その他屋外通路や自転車置き場等のキャノピーがあり、その中央に長さ約200mの2棟の駅プラットホームが並列している。また、構成部材の材料特性を表1に示す。ここで、計算領域において40cmの均等メッシュ分割とし、メッシュ分割数は474,609であった。

ここで、透過日射を考慮した OUT-MRT(τ)を検討する上で、膜下空間への影響を考慮し、日射透過率が0%と15%の2つのケースについて検討する(表 2)。

4.2 気象条件と建物の室温スケジュールの設定

計算に用いる気象データは、図3の屋根なし部の水平面全 天日射量とK駅の膜下空間の外気温と相対湿度の実測結果を 採用する。ここで、日射量は水平面全天日射量を直達日射成 分と天空日射成分に分散する。直達日射量は Bouguer の式を、 天空日射量は Nagata の式により計算する (図 11)。また、外 周建物の室温スケジュールを図 12 に示す。



図10 計算モデルと構成部材

表1 材料特性

			111111		
構成材料		厚さ [nn]	日射反射率	熱貫流率 [W/㎡・K]	熱容量 [kJ/㎡・K]
屋	膜材	1	(表2)	0.1	2
根	鋼板	51	0.3	2.19	71
	アスファルト	227	0.2	0.92	363
	アスファルト2	197	0.4	2.92	362
蠈	タイル	250	0.3	1.99	404
	コンクリート(普通)	195	0.2	1.55	375
	コンクリート(ALC)	330	0.2	1.55	375
	憲業系サイディング	185	0.2	0.42	38
柱	鉄骨	2	0.3	0.45	15
地	アスファルト舗装	130	0.1		
面	アスファルト舗装2	130	0.3		
	コンクリート舗装	70	0.2		
	乾燥裸地	500	0.2		
	緑地	150	0.2		

表2	膜	才の光学特性	
検討ケース		日射反射率	日射透過率
CASE1:OUT-MRT(t0)		0.89	0
CASE2:OUT-MRT(t)		0.74	0.15



4.3 表面温度とMRT の計算結果と実測結果の比較

膜下空間を構成する部材の表面温度が最大となる13時45 分に着目し、街区全体と膜下空間の表面温度分布を図13と図 15に示す。まず、周辺地物から膜下空間への放射の影響が大 きい場所として、斜面緑地と建物1,2,および地面に着目す る。斜面緑地と建物の表面温度は37~46℃程度、地面は50 ~70℃程度であった。一方、膜屋根は直達日射が当たってい





る膜面温度は外気温より5℃程度高い40℃前後に上昇してい るが,直達日射が当たらない膜面温度は外気温より2~3℃高 い37℃程度であった。また,床面の表面温度も膜面温度と同 程度の値であった。ここで,本予測による計算結果の妥当性 を確認するため,実測時の評価点(図15のB,C)の膜面温 度と床面温度の計算値と実測値を比較した結果を図16に示 す。計算値は実測値と0.5~2℃以内で一致している。また, 床面から1.2mの高さの全球熱画像による表面温度の計算結 果(図14)と実測結果(図7)から計算したMRTは、37℃ 程度であった。

4.4 透過日射が熱放射環境に与える影響

透過日射を考慮した膜下空間の熱放射環境への影響を確認 するため、13時45分におけるOUT-MRT(τ)分布の計算結 果を示す(図17(C))。膜屋根からの透過日射の影響の大きい F点で49.7℃,建屋の影響を受けるG点で37℃となっている。 一方、日向は75.3℃であった。

この分布の形成要因を示すため、MRT(図17(a))の計算 結果とOUT-MRT(τ 0)(図17(b))の計算結果を比較する。 長波長放射の影響を見ると、MRTが31~38℃程度の範囲で 分布しており、膜屋根からの影響の大きいF点で36.8℃、建 屋の影響を受けるG点で34.6℃となっている。また、柱から ホーム端部方向に、1~2℃程度上昇しており、温度変化が見 られた。一方、日向で38.6℃であることから、膜屋根の設置 により2℃程度の低下がみられた。

日射透過率を0としたときの日射の影響を確認するため, 図 17 (b)の計算結果と比較する。OUT-MRT (τ0)が 31~66℃ 程度の範囲で分布していることがわかった。ここで, MRT の 影響分を差し引くと、日射の影響により 0~28℃程度上昇し ており、膜屋根からの影響の大きいF点では46℃(+10)、建 屋の影響を受けるG点で36℃(+2)となっている。また、 ホームの南から北方向に向かい、6℃程度低下しており、温度 変化が確認された。北側のホームでは、柱近辺で4℃程度さ らに低下している。一方、日向は75.3℃(+37)であった。

透過日射の影響を確認するため、図 17(C)の計算結果と比較する。OUT-MRT(τ)が 31~68°C程度の範囲で分布していることがわかった。ここから OUT-MRT(τ 0)の影響を差し引くと、透過日射の影響により 1~6°C程度上昇しており、膜屋根からの影響の大きい F 点では 49.7°C(+4)、建屋の影響を受ける G 点で 37°C(+1)となっている。また、ホームの南から北方向に向かい、7°C程度低下しており、温度変化が見られた。

5. 結論

半屋外空間における膜構造建築物の熱放射環境を評価する ため、透過日射を考慮した平均放射温度分布の算出が行える 数値モデルの改良を行った。その際、透過日射と多重反射を 考慮し、実在する駅プラットホームを対象に、膜下空間に形 成される熱放射環境の実測結果と本予測手法による計算結果 を比較し、その精度を確認した。また、本実測対象を計算モ デルとして、膜材料からの透過日射の違いによる膜下空間の 熱放射環境に及ぼす影響について予測し、評価を行った。そ の結果、次のことがわかった。

- 表面温度と MRT の計算精度を確認するため、実測値と 計算値を比較した結果、0.5~2℃以内で一致した。また、 床面から 1.2m の高さにおける全球熱画像の実測結果から算出した MRT と、計算結果から算出した MRT は同程 度の 37℃であった。したがって、本予測手法の表面温度 と MRT の計算値は妥当であることが確認できた。
- 2) 透過日射の違いが膜下空間の熱放射環境に与える影響を 確認するため、長波長放射のみの平均放射温度と、日射 透過率を0としたときの日射を考慮した平均放射温度を 比較することで、その形成要因を分析した。その結果、 長波長放射(MRT)に対し、透過日射を0としたときの OUT-MRT(τ0)は+1~28℃程度の影響があり、そこに 膜材からの透過日射の影響を考慮したときの OUT-MRT (τ)は、さらに1~2℃程度上昇することが分かった。以 上より、透過日射が膜下空間の熱放射環境に与える影響 が確認できた。

今後,熱放射環境に加え,人体の着衣量や温熱感を考慮した評価を行える設計手法を構築し,設計提案につなげて行きたい。

[謝辞]

本研究の一部は 2011 年度能村膜構造技術振興財団からの 研究助成金を受けた成果である。ここに感謝申し上げます。

[参考文献]

- 1) 東京駅八重洲ロ「グランルーフ」:東日本旅客鉄道株式会社, 2013.7.2, http://www.jreast.co.jp/press/2013/20130701.pdf
- 2)山田昇, 齋藤武雄, 日射を考慮した都市空間の熱環境評価に 関する研究, 太陽エネルギー, №28, pp.65-70,2002
- 3) 佐野武仁: 大空間エアドームの夏季, 中間期における垂直温 度分布の実測と推定に関する研究, 日本建築学会計画系論 文集, No.472, pp.21-29, 1995.06
- 4) 佐野武仁:大空間エアドームの夏期の熱負荷の推定に関する研究、日本建築学会計画系論文集, No.489, pp.37-46, 1996.11
- 5) 梅干野晁, 浅輪貴史, 中大窪千晶: 3D-CAD と屋外熱環境シ ミュレーションを一体化した環境設計ツール, 日本建築学会 技術 学術講演梗概集, p45-p48, 2008-5
- 6) 梅干野晁,何江,小川俊輔,嚴泰潤,吉野達矢,親川昭彦: 膜構造 建築物の半屋外生活空間に形成される夏季の微気候に関す る実測調査,日本建築学会技術報告集 15(30), 505-510, 2009-06
- 7)梅干野晁,何江,中大窪千晶,矢ヶ部信吾,小川俊輔,嚴泰潤:膜 構造建築の生活空間の熱放射環境に関する実測調査と予 測・評価,日本赤外線学会誌,第17巻2号,P40-47,2008.9
- 8)中大窪千晶,梅干野晃:屋外生活空間における空間形態や構成材料の違いを考慮した放射環境の数値解析,日本建築学会環境系論文集 73(630),957-964,2008-08-30
- 9) 吉野達矢,親川昭彦,梅干野晃:駅プラットホームの膜屋根下 空間における夏季の熱放射環境に関する実測調査,膜構造研 究論文集 2008,第 22 号,2008
- 10)山村真司,梅干野晁,浅輪貴史:建築外部空間デザインの設計 支援を目的とした熱放射環境の予測手法の開発,日本建築 学会計画系論文集(554),85-92,2002.4
- 11) Google Map: https://www.google.co.jp/maps/

Simulation Method for Thermal Environment inside semi-outdoor space of Membrane Structures in consideration of solar transmission

-Comparison and verification of filed measurements and simulated values in the station platform with membrane roofs-

Akihiko OYAKAWA^{*1)} Tatsuya YOSHINO^{*2)} Akira HOYANO^{*3)}

SYNOPSIS

Authors investigated field measurements of thermal environment formed in a membrane structure with a semi-outdoor space in 2008. In this report, thermal radiation environment formed under the roof space of the membrane structure by simulation based on field measurements is predicted and the evaluation method is described.

The first part of the paper describes the following findings from the measurement data: the solar transmission through the membrane material had the greatest impact on the thermal environment in the living space under the membrane during the daytime; the mean radiant temperature at the central part of the living space was higher than the air temperature due to heat retained in the ground and walls of surrounding buildings. The calculation method for the mean radiation temperature distribution in consideration of solar transmission has been improved.

In the second part of the paper, influence to give the membrane structure for field measurements to the thermal radiation environment by the difference of the solar transmission of membrane materials using this predictive tool as a calculation model was predicted and evaluated.

^{*1)} Research & Development Division, Taiyo Kogyo Corporation, Dr. Eng.

^{*2)} Technical Research Center, Taiyo Kogyo Corporation, Dr. Eng.

^{*3)} Professor, The Open University of Japan, Dr. Eng.