

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	半屋外の膜構造建築空間に形成される光・熱環境の予測・評価手法の構築
Title(English)	
著者(和文)	親川昭彦
Author(English)	Akihiko Oyakawa
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9507号, 授与年月日:2014年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:梅干野 晃,浅輪 貴史,田村 哲郎,山田 哲,中村 芳樹
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9507号, Conferred date:2014/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

半屋外の膜構造建築空間に形成される
光・熱環境の予測・評価手法の構築

環境理工学創造専攻

親川 昭彦

平成25年度 学位論文

半屋外の膜構造建築空間に形成される
光・熱環境の予測・評価手法の構築

指導教員 梅干野 晁 連携教授

浅輪 貴史 准教授

東京工業大学 大学院総合理工学研究科

環境理工学創造専攻 博士課程 10D29028

親川 昭彦

目 次

第1章 序論	1
1-1 研究の背景	3
1-2 関連する既往研究と本研究の位置づけ	7
1-3 研究の目的	9
1-4 論文の構成	10
 第2章 半屋外膜下空間における光・熱・風環境の実態把握	14
2-1 はじめに	15
2-2 膜構造建築物の空間形態と膜材料	16
2-2-1 膜構造建築空間の特徴	16
2-2-2 膜材料の種類とその特徴	17
2-2-3 膜構造建築空間の分類	19
2-3 膜材料の材料特性の把握	20
2-3-1 測定概要	20
2-3-2 測定結果	22
2-4 実測による膜下空間の光・熱・風環境の実態把握	23
2-4-1 実測の目的	23
2-4-2 実測対象の選定	24
2-4-3 実測の概要	24
2-4-4 測定項目とその方法	28
2-4-5 測定期間における気象	36
2-4-6 膜下空間における短波長放射の実態	36
2-4-7 膜下空間における長波長放射の実態	39
2-4-8 膜下空間における風速の鉛直分布	49
2-4-9 膜下空間における気温の鉛直分布	51
2-4-10 膜面近傍の気温と膜面表面温度	53
2-4-11 膜下生活空間における温熱環境の評価	55
2-5 予測・評価ツール構築のための配慮項目	57
2-6 まとめ	58

第3章 透過日射を考慮した膜構造建築空間における光・熱環境の予測手法の開発	61
3-1 はじめに	62
3-2 光・熱環境のトレードオフを考慮した膜下空間の設計支援の方法	63
3-3 膜材の透過特性を考慮した光・熱環境の予測手法	66
3-3-1 光・熱環境の予測・評価手法構築のための検討項目	67
3-3-2 光・熱環境の予測・評価手法の適用範囲	68
3-3-3 予測・評価手法の計算方法	68
3-4 膜下空間における昼光照度計算モデルの導入	71
3-4-1 昼光照度計算アルゴリズムの開発	71
3-4-2 計算精度の検討	74
3-4-3 膜下空間における昼光照度計算の予測精度	76
3-4-4 輝度画像による光環境評価に向けた検討	78
3-4-5 膜材の透過光を考慮したベクトル照度の算出	81
3-5 膜下空間における熱収支計算アルゴリズムの機能拡張	83
3-5-1 既往のシミュレーション手法の概要	83
3-5-2 膜材料の特性を考慮した熱収支計算モデルの導入	83
3-5-3 計算結果の検証	86
3-5-4 膜材の透過日射を考慮した平均放射温度（MRT）の算出	90
3-6 まとめ	99
 第4章 膜下空間における光・風環境を考慮した熱環境評価手法	 103
4-1 はじめに	104
4-2 既往の研究と本研究の位置づけ	105
4-3 膜下空間における光・熱・風環境の影響要因と熱環境対策方法の検討	105
4-3-1 膜下空間における光・熱・風環境の影響要因	106
4-3-2 膜下空間の熱環境対策方法の提案	107
4-3-3 熱環境対策方法と設計条件との関係	110
4-4 膜構造建築空間の光・熱・風環境を考慮した設計支援手法の提案	111
4-4-1 本手法における熱環境と風環境の関係	112
4-5 光・熱環境と風環境の連成計算アルゴリズムの導入	113
4-5-1 既往の連成シミュレーション手法の概要	113
4-5-2 膜構造建築空間のための連成手法の提案	119

4-6	実測対象の膜下空間における熱的快適性の評価	122
4-6-1	主風向における熱的快適性への影響.....	123
4-6-2	膜下空間の床面材料の違いによる熱的快適性の評価.....	124
4-7	光・熱・風環境の関係性を考慮した評価方法の提案.....	127
4-7-1	半屋外膜下空間における光・熱・風環境の目的関数の設定	128
4-7-2	光・熱・風環境の評価のための多目的最適化の手法	130
4-7-3	トレードオフ評価の概要	130
4-7-4	計算方法	132
4-7-5	目的関数に対するトレードオフ評価.....	133
4-8	まとめ	137

第5章 半屋外膜下空間の光・熱・風環境の予測・評価手法の活用140

5-1	はじめに.....	141
5-2	光・熱・風環境を考慮した膜下空間の設計支援の方法.....	141
5-2-1	設計条件の設定.....	141
5-2-2	光・熱・風環境の予測・評価.....	142
5-2-3	設計者による判断	143
5-3	昼光利用による膜下空間の光・熱環境に及ぼす影響とその適用例	143
5-3-1	対象空間の設定.....	144
5-3-2	設計概要	144
5-3-3	設計条件の設定.....	145
5-3-4	評価空間と評価指標の設定.....	148
5-3-5	光・熱・風環境の予測・評価.....	152
5-3-6	設計者による判断	158
5-4	膜下空間の熱環境対策方法を適用したモデル変更	158
5-4-1	熱環境対策技術の選定	159
5-4-2	設計条件の設定.....	159
5-4-3	光・熱・風環境の予測・評価結果.....	166
5-4-4	曇天日の光環境の検討	164
5-4-5	設計者による判断	168
5-5	蒸発冷却部材を適用したモデル変更.....	172
5-5-1	蒸発冷却部材の設置方法の検討.....	172

5-5-2 光・熱・風環境の予測・評価	176
5-6 まとめ	180
第6章 総括	184
6-1 研究の総括	186
6-2 今後の課題	188
発表論文一覧	189
謝辞	193
付録	

第 1 章 序論

1-1 研究の背景

1-2 関連する既往研究と本研究の位置づけ

1-3 研究の目的

1-4 論文の構成

1-1 研究の背景

近年、建築分野では地球温暖化対策として、省エネルギー対策や自然エネルギーの有効利用により、環境に配慮した快適な建築空間を創出することが望まれている。その快適な建築空間を創出する方法として、商業ビル等の密閉空間においては、建物の高断熱・高气密化による空調設備のエネルギー使用量の低減や窓からの日射熱侵入の抑制、高効率機器の導入による排熱量の低減等の対策を施した人工的な環境を作り出す傾向にある¹⁻¹⁾。特に公共性の高い空間においては、その傾向は強い。一方、駅前広場等の半屋外空間においては、太陽光や風、雨水といった自然エネルギーを最大限に利用することでエネルギー使用量を最小限にした自然エネルギー利用型空間を提案している¹⁻²⁾。

自然エネルギー利用型空間の建築物においては、立地・気候特性を半屋外空間の気候の改善に活かしていくために、日射を遮蔽しながらも昼光利用の工夫をしたり、通風や換気により空間内の気温上昇を抑制するための工夫をする等、光環境や熱環境、風環境のバランスを考慮し、設計に活かすことが必要であると言える。しかしながら、このような設計を都市空間の中で行う場合、中高層ビル等の隣棟建物や看板等の工作物によって影の影響や風通しが悪くなるといった課題が考えられる。そのため自然エネルギー利用型の半屋外空間を有する建築物を計画する際、周辺環境に配慮した設計が必要であると言える。



図 1-1 自然エネルギー利用型空間のイメージ¹⁻²⁾

自然エネルギー利用型空間において、積極的に太陽光を活用することを考えた場合、隣棟建物からの影の影響を最小限に抑えるためには、できる限り屋根面から太陽光を取り入れることは効果的と考えられる。実際、トップライトから透過光を取り入れたり、半屋外空間内に反射光を取り入れるための設計的工夫がなされている。また、地域風やビル風を活用する場合は、周辺建物を含めたその地域全体の特性を把握することが重要

である。この場合、気象データ等から代表的な風向や風速を入手することにより、定性的に判断することで方針を決める事は可能であるが、半屋外空間内部の壁の配置や通風により冷却効果を生み出す部材等の最適配置を検討することで熱環境に配慮した建築空間を提案する場合、定量的な判断が必要と考えられる。そのためには、風環境と熱環境の関係性を定量的に予測し、設計提案することが必要と考える。したがって、自然エネルギー利用型空間を設計提案するためには、光環境や熱環境、風環境のトレードオフの関係性を考慮しながら、予測・評価ができる設計支援のためのツールが必要といえる。

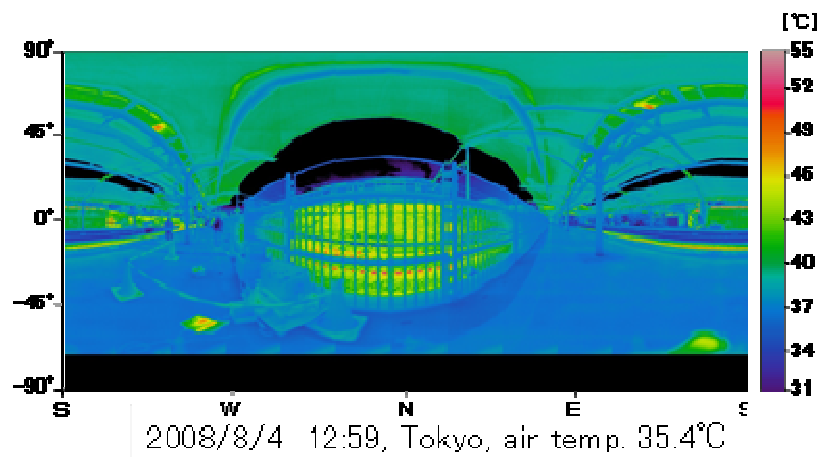
そこで本研究では、比較的多くの人が集まる駅前広場等の半屋外空間を有する公共施設を対象に、昼光利用や通風のための形状工夫が可能と考えられる膜構造建築物に着目する。

膜構造建築物の特徴として、透光性、軽量性、柔軟性という、他の構造材料にはない特性を持つ。そのため、曲面を生かした形態は、建築デザインであると同時に、構造性能を発揮する構造物でもある。したがって、意匠と構造が密接に関係している。また、それらのデザインの違いが光や熱といった外部環境に対して大きな影響を与えるため、光・熱環境に配慮した設計を行う観点からは、意匠性、構造的性、環境性とのバランスを考慮することとなる。

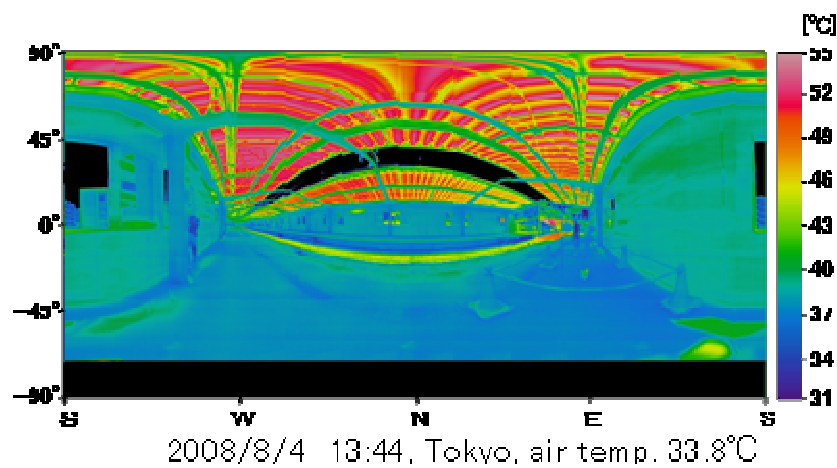
ここで、半屋外の膜構造建築空間に形成される光環境と熱環境の特徴について述べる。著者らの実測¹⁻³⁾により、屋根に膜構造、スレート材、金属材を用いた駅プラットホームの屋根下の光環境と熱環境について比較しており、膜屋根を用いることで、金属屋根よりも 12,000lx 照度は増加しており昼光利用の効果が期待できる。また、熱環境では、屋根裏面の表面温度で 9℃低下しており、蓄熱の影響が小さいことが分かる。しかしながら、透過日射により床面表面温度は 3℃増加することから、透過に日射の影響は不利側になることが示されているが、平均放射温度（MRT）では 3℃程度の低下が示された（表 1-1、図 1-2）。これは、屋根下空間全体の総合的な評価により、明るく、涼しい空間を膜構造により実現できる可能性があると言える。

表 1-1 屋根材料の違いによるプラットホームの光・熱環境実測結果の比較

屋根材	床面照度[lx]	表面温度 [°C]	
		屋根裏	床面
膜屋根	16000	40	40
金属屋根	4700	49	37



膜屋根プラットフォーム



金属屋根プラットフォーム

図 1-2 プラットホームにおける全球熱画像

以上より，本研究では半屋外の膜構造建築物を対象に，建築外部環境の影響を考慮しながら半屋外の膜構造建築空間（以下，膜下空間という）に形成される光・熱・風環境を並列に予測し，それらの関係性から評価した結果より，光環境や熱環境の快適性にどう寄与するかを設計提案できる支援手法について検討して行く。

■本研究が目指す半屋外空間の対象

都市空間において，公的な空間は図 1-2 に示すように広場や通路の日除け空間として存在している。このような空間においては，快適性や省エネルギー性といった，たとえば下記の条件を満たした空間が必要とされている。

<快適性の観点>

- ・ 日射遮蔽による熱環境に配慮した空間
- ・ 昼光利用による光環境を改善した空間
- ・ 通風利用による熱環境に配慮した空間
- ・ 冷却効果のあるパッシブな部材利用により熱環境に配慮した空間 など

<省エネルギーの観点>

- ・ 太陽光をうまく取り入れ光環境に配慮した空間
- ・ 昼光利用による照明エネルギー消費量を削減できる空間
- ・ 風通しがよく排熱性が高く換気エネルギー消費量を削減できる空間
- ・ 雨水等を利用するパッシブな冷却効果のある部材利用による熱環境に配慮した空間
- ・ 太陽光発電の電力使用により排熱量を削減した熱環境に配慮した空間 など

このような条件に対し、膜構造建築物の特徴である透光性や柔軟性等を適用することで、省エネで快適な空間が設計提案できるものと考え、本研究の対象とする。

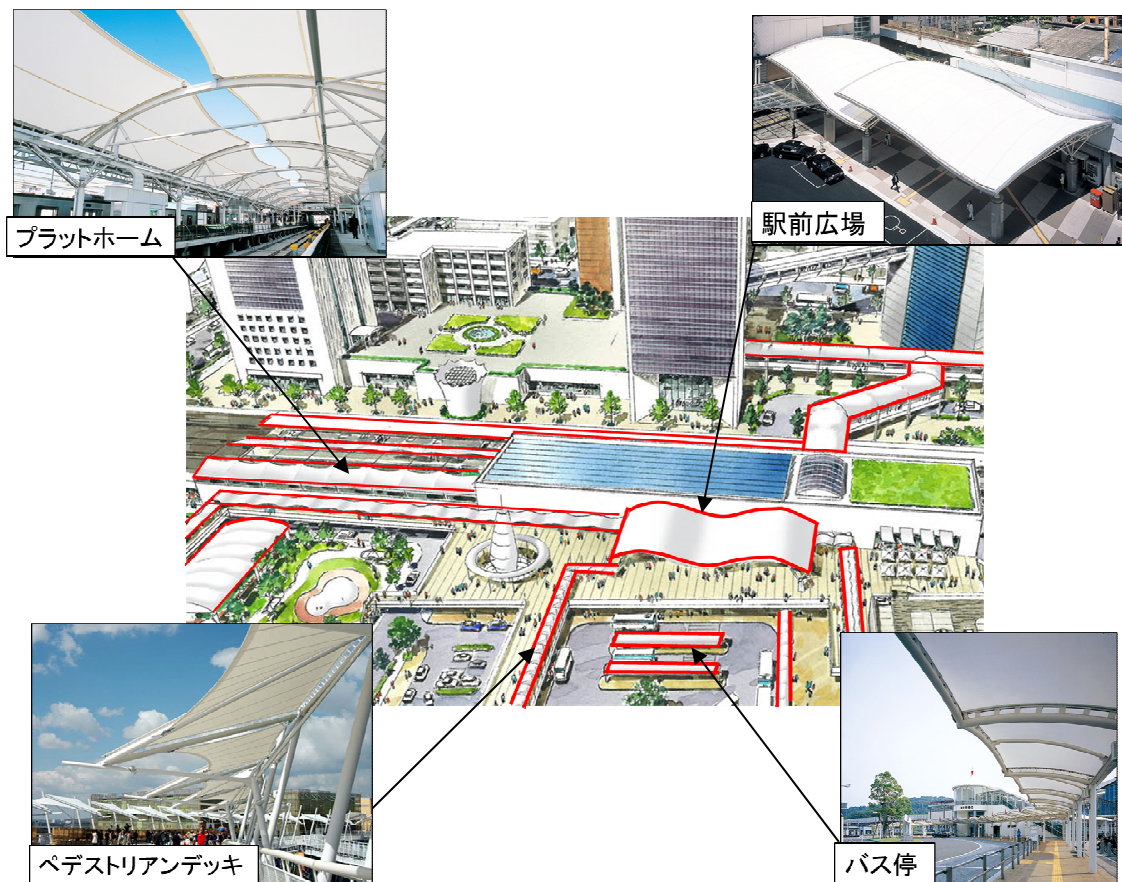


図 1－2 都市空間における半屋外空間のイメージ図

1-2 関連する既往研究と本研究の位置づけ

本研究に関連する既往研究について述べる。

(1) 都市空間における半屋外空間を有する建築物の光・熱・風環境に配慮した予測評価

建築外部空間の光環境や熱環境の予測手法については、これまで多くの研究事例が報告されている。例えば、昼光環境の予測・評価について、Francis Miguet (2002) ら¹⁻⁴⁾ は、都市の屋外空間形態を考慮した屋内空間の昼光環境ツールを開発しているが、熱環境は考慮していない。また、Christelle Franzetti (2004) ら¹⁻⁵⁾ は、屋内空間における昼光利用と熱環境を考慮した予測手法を提案しているが、屋外環境を対象とした研究ではない。膜構造建築物では、松浦、岩田ら¹⁻⁶⁾ は、膜構造の屋内球技場内の昼光光源と計算方法の提案をしているが、熱環境との関係性は検討していない。このように、膜下空間の光環境と熱環境を同時に評価する設計プロセスは、未だ対応可能な状況には至っていない。

建築外部空間の光・熱・風環境に配慮した評価については、飯野ら¹⁻⁷⁾ は都心部に存在する大規模ターミナル駅におけるプラットフォーム温熱環境の実測手法の提案と駅ビルの有無や列車の有無による熱・風環境への影響の分析を行っている。プラットフォームにおける温熱環境の特徴を示し、列車の有無が風速と気温分布に与える影響を明らかにしているが、プラットフォームの熱環境の実測手法の提案と、実測による対象駅プラットフォームの熱環境を把握するに留まっており、新たなプラットフォームの計画設計や改修において用いるべき手法の提案や熱環境改善の為の手法提案には至っていない。

中野ら¹⁻⁸⁾ は、駅の総合快適性評価方法の検討を行っているが、既存の安全性や機能性から新しく配慮すべき快適性や省エネ性能まで多岐に渡る環境項目をすべて網羅しようとしているため、定性的な概念を含む点数方式での環境評価の方法をとっている。しかしながら、プラットフォームは 100~200m と長大なものが多く、地点によって環境の変化は確実に起こっていると考えられるため、プラットフォームにおける微気候を正確に評価することは困難であると考えられる。

(2) 膜構造建築物の環境に配慮した空間設計

膜構造建築物はこれまで、建築構造の観点から多くの研究がなされているが、環境的な視点から膜構造建築物を捉えた研究は未だ少ないといえる。

膜材料に関する研究として、佐野らは膜材料に用いる塩ビ膜とフッ素樹脂膜における

光特性と熱特性についての検討¹⁻⁹⁾や、汚れと経年変化についての検討¹⁻¹⁰⁾により物理的な特性を明らかにしているが、具体的に膜下空間の光・熱環境を評価していない。

膜構造建築空間に関する研究として、佐野により、大空間エアドームを対象とした夏期および中間期の垂直温度分布の推定¹⁻¹¹⁾、夏期の冷房負荷の推定¹⁻¹²⁾が行われている。さらに、武田らによって、光触媒建築用膜材料を使用した愛知万博休憩所とそのモックアップ実験¹⁻¹³⁾により、光触媒の親水性を利用して蒸発冷却による冷房負荷削減効果を確認した報告がある。これらは膜材料の環境物理的な特性と、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、すなわち、屋根と壁に囲まれた膜構造の建築空間が主な研究対象になっていた。一方で、半屋外を形成する建築空間の生活環境の改善を目的に行われてきた研究として、辻原ら^{1-14~16)}によるアーケード空間を対象とした実測調査と温熱環境の評価があるが、半屋外空間に形成される微気候に関する研究は未だ少ないと言える

以上のように、環境的な立場からこれまでの既往研究では、膜材料の環境物理的な特性と、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いた。本研究では、膜材料の透過日射や、膜による天空への放射の遮蔽、通風・換気の状態等が膜構造建築物に形成される光・熱・風環境に及ぼす影響を明らかにし、これにより得られた知見をもとに膜構造建築空間の新たな設計提案について検討していく。

1-3 研究の目的

本研究は、半屋外の膜構造建築空間に形成される光・熱環境の予測・評価手法を開発し、その手法を適用することで、膜下空間において良好な光環境と快適な熱環境を創出することを可能にする設計手法を構築することを目的とする。

1. 光・熱環境を考慮した設計支援のための予測手法の開発を目指し、

- (1) 膜下空間における光・熱・風環境の特性を把握するために、膜材の材料特性については材料試験により、膜下の空間特性については実測調査により把握し、開発する予測・評価手法の開発要件を明らかにする。
- (2) 既往の熱環境シミュレーションツール¹⁻¹⁶⁾をベースに、膜構造建築空間の光・熱環境の予測手法を活用した設計支援の考え方を提案し、光・熱環境のトレードオフの関係性から予測を可能とする連動解析する手法を開発する。
- (3) 膜下空間の熱環境対策としての通風利用の観点から、開発した光・熱環境の予測手法と風環境シミュレータ（CFDソフト）を連成することで、設計支援を意識した光・熱・風環境を並列に予測する計算アルゴリズムを構築する。

2. 設計支援を意識した光・熱・風環境のトレードオフ評価手法の提案を目指し、

- (4) 構築した手法により、膜下空間の光・熱・風環境の予測した結果を用いて、そのトレードオフの関係性から評価するための手法を構築するため、評価アルゴリズムを提案し、ケーススタディを通して考え方を明らかにする。
- (5) 最後に、駅プラットフォームの設計計画を取り上げ、構築した光・熱・風環境の予測・評価手法を用いて、膜下空間の改善過程を示すことで、実務設計への有用性を示す。

1-4 論文の構成

本研究の全体の概要を図1-3に示す。本論文は序論と結論を含め全6章から構成される。各章の構成は次の通りである。

第2章「半屋外の膜構造建築空間における光・熱・風環境の実態把握」では、環境配慮設計が求められる中で、半屋外空間を有する膜構造建築物において、昼光利用の効果や通風利用の提案に向けた設計を行うため、実際の半屋外空間を有する膜構造建築物を対象に、膜下空間に形成される光・熱・風環境の実態を実測により分析する。その分析結果より、数値解析を用い定量的に予測・評価するためのツールの開発要件を明らかにする。

第3章「透過日射を考慮した膜構造建築空間における光・熱環境の予測手法の開発」では、第2章で得られた開発要件の中から、膜下空間における昼光利用の効果を予測するための課題として、膜材からの透過日射による膜下空間の光環境改善と同時に起こる熱環境の悪化を予測することである。そのため、設計支援を考慮した光・熱環境予測のための設計支援手法を提案し、既往のツールをベースに、膜材の材料特性を組み込み、光・熱環境を連動で予測する手法を開発し、計算精度を検証する。

第4章「膜下空間における光・風環境を考慮した熱環境評価手法」では、第2章で得られた開発要件の中から、熱環境対策を前提とした通風利用を提案するための課題として、膜材からの透過日射により悪化した熱環境を改善するための対策技術を効率よく選定し、設計に適用することである。そこで、第3章で開発した光・熱環境の予測手法と風環境予測ツール（CFDソフト）を連成し、通風効果を確認しながら熱環境対策を提案する手法を構築する。さらに、光・熱・風環境のトレードオフの関係性から評価するための手法を提案し、その方法を示す。

第5章「半屋外膜下空間の光・熱・風環境の予測・評価手法の活用」では、第4章で構築した光・熱・風環境の予測手法とトレードオフの関係性から評価する手法を用いて、実在街区における駅プラットフォームのプロジェクトを例に、熱環境対策方法を適用し、設計改善のプロセスを確認することで、本手法が半屋外空間を有する膜構造建築物に対して、光・熱・風環境の設計へ有用であることを示す。

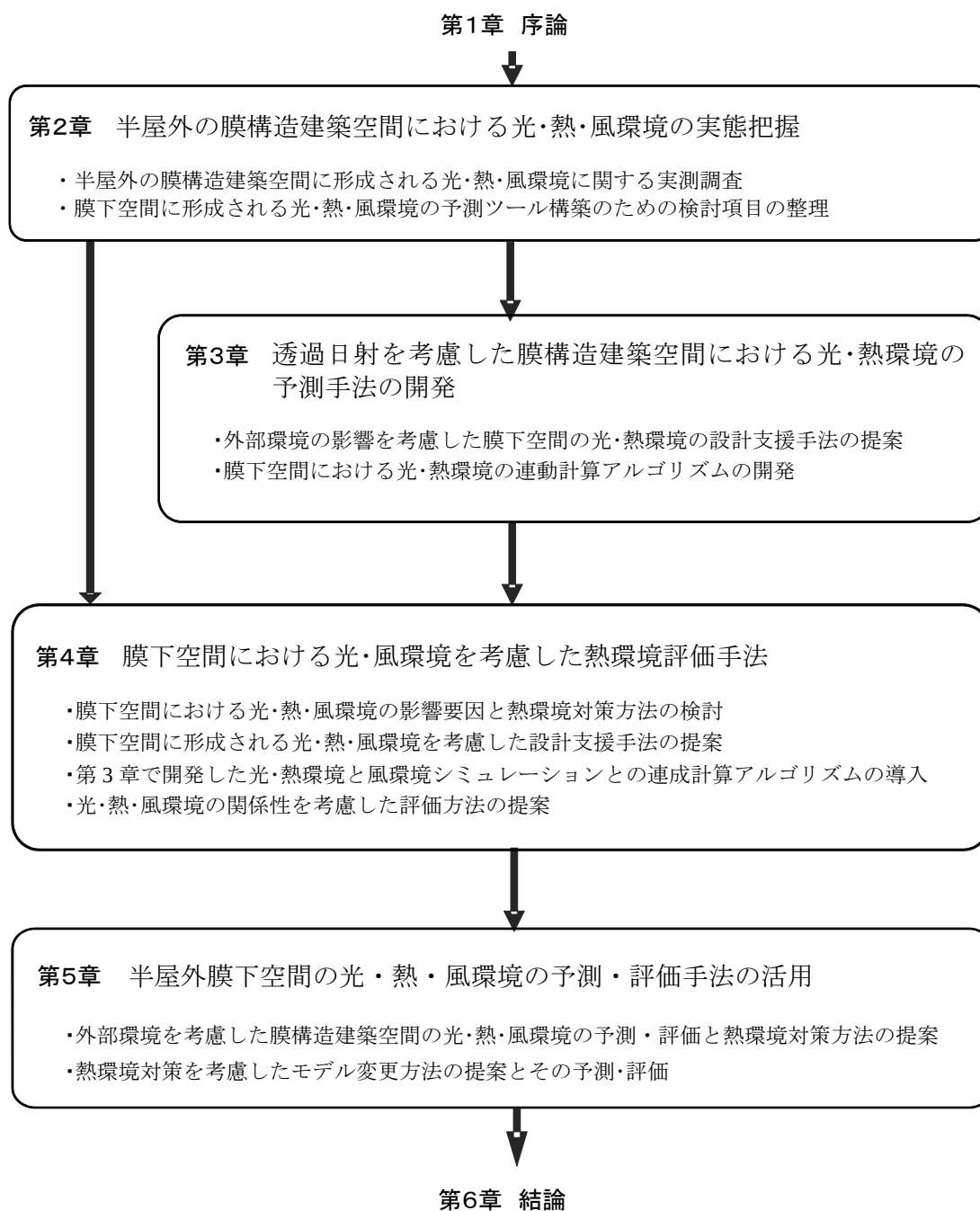


図1-3 論文の構成

〔1章の参考文献〕

- 1－1) 住宅・建築物省 CO₂ 先導事業：<http://www.kenken.go.jp/shouco2/index.html>
(独) 建築研究所
- 1－2) 東京駅八重洲口「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>
- 1－3) 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
- 1－4) Francis Miguët, Dominique Groleau: A daylight simulation tool for urban and architectural spaces-application to transmitted direct and diffuse light through glazing, Building and Environment, Volume 37, Issue 8-9, pp. 833-843, 2002
- 1－5) Christelle Franzetti, Gilles Fraisse, Gilbert Achard: Influence of the coupling between daylight and artificial lighting on thermal loads in office buildings, Energy and Buildings Volume 36, Issue 2, pp. 117-126 2004
- 1－6) 松浦邦男, 岩田朋子, 上谷芳昭: 開閉式膜構造建築物における昼光照明計算と光環境の予測(その 1): 昼光光源と昼光照明計算法, 日本建築学会近畿支部研究報告集計画系 (30), 37-40, 1990-05-14
- 1－7) 飯野 秋成, 塚本 健二, 富永 禎秀: 鉄道駅における列車の停留と周辺の高層建物がプラットフォーム上の風速と気温の空間分布に及ぼす影響 日本建築学会環境系論文集 (608), 89-95, 2006-10-30
- 1－8) 田辺新一ら: 駅の総合評価に関する研究 その 3 日本建築学会学術梗概集 2009 年 8 月
- 1－9) 佐野武仁: 膜構造建築に用いる塩ビ膜とフッ素樹脂膜の光特性と熱特性に関する実験研究, 日本建築学会計画系論文集, No. 451, pp. 19-27 1993. 9
- 1－10) 山口温, 佐野武仁: 膜構造建築に用いる四フッ化エチレン膜樹脂の汚れと経年変化に関する実験研究, 日本建築学会計画系論文集, No. 546, pp. 23-29, 2001. 08
- 1－11) 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

- 1－1 2) 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
- 1－1 3) 武田仁，本田貴久，中田貴之：光触媒建築用膜材料の蒸発冷却実測調査とシミュレーションー建築用膜材料を使用した愛知万博休憩所とモックアップの検証，日本建築学会環境系論文集，第 608 号，pp. 23-29，2006. 10
- 1－1 4) 辻原万規彦，中村泰人，田中稔，大塚順基：温暖多照地域における全蓋型アーケード内部の気温分布性状，日本建築学会計画系論文集，第 508 号，pp. 43～50，1998. 6
- 1－1 5) 辻原万規彦，中村泰人，田中稔，岡村圭子，梅宮典子：温暖多照地域における全蓋型アーケード内部の温熱環境の評価，日本建築学会計画系論文集，第 514 号，pp. 43-50，1998. 12
- 1－1 6) 辻原万規彦，平栗靖浩，川井敬二，田中稔，河上健也：遮光膜を設置した全蓋式アーケード内部の温熱環境評価，日本建築学会計画系論文集，第 578 号，pp. 55-61，2004. 4
- 1－1 7) 梅干野晃，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，日本建築学会技術報告集，第 20 号，pp. 195-198，2004. 12

第2章 半屋外膜下空間における光・熱・風環境の実態把握

2-1 はじめに

2-2 膜構造建築物の空間形態と膜材料

2-2-1 膜構造建築空間の特徴

2-2-2 膜材料の種類とその特徴

2-2-3 膜構造建築空間の分類

2-3 膜材の材料特性の把握

2-3-1 測定概要

2-3-2 測定結果

2-4 実測による膜下空間の光・熱・風環境の実態把握

2-4-1 実測の目的

2-4-2 実測対象の選定

2-4-3 実測の概要

2-4-4 測定項目とその方法

2-4-5 測定期間における気象

2-4-6 膜下空間における短波長放射の実態

2-4-7 膜下空間における長波長放射の実態

2-4-8 膜下空間における風速の鉛直分布

2-4-9 膜下空間における気温の鉛直分布

2-4-10 膜面近傍の気温と膜面表面温度

2-4-11 膜下生活空間における温熱環境の評価

2-5 予測・評価ツール構築のための配慮項目

2-6 まとめ

近年、日射遮蔽や昼光利用、通風利用等の観点から、高反射性や透光性、軽量性等の特徴を有する建築用膜材で建設された膜構造建築物は、半屋外空間を形成する都市施設（例えば、屋外通路やバス待合所の上屋）への利用が増加している。しかし、膜材料を透過した日射により、膜下空間の熱環境への影響が大きく、改善の余地が残されている。

本研究では、光・熱・風環境を考慮した設計支援のための予測・評価ツールの構築を目指し、膜下空間における夏季の熱放射環境の特性を、太陽放射領域の短波長放射^{注1)}と常温域熱放射の長波長放射^{注2)}、通風性状を中心とした実測調査により把握し、予測・評価ツールの開発要件を明らかにする(図2-1)。

The diagram illustrates the heat balance for a building facade. It shows the following components and processes:

- Solar Radiation (太陽放射):** Represented by a sun icon. It includes **Direct Solar Radiation (直達日射)** and **Diffuse Solar Radiation (天空日射)**.
- Shortwave Radiation (短波長放射):** Indicated by a thick black arrow.
- Longwave Radiation (長波長放射):** Indicated by a thin white arrow.
- Atmospheric Radiation (大気放射):** Shown as a downward arrow from the sky.
- Reflection (反射):** Includes **Reflection from the sky (天空日射)** and **Reflection from the ground (地表からの放射)**.
- Absorption (吸収):** The process where radiation is absorbed by the building material.
- Transmission (透過):** Radiation passing through the building material.
- Building Material (膜材料):** The facade itself, shown as a vertical rectangle.
- Building (建物):** The interior space, shown as a rectangle to the right of the facade.
- Heat Storage/Release (蓄熱・蓄冷):** Indicated by a thick black arrow pointing into the building and a thin white arrow pointing out of the building.

15

2-2 膜構造建築物の空間形態と膜材料

2-2-1 膜構造建築空間の特徴

膜構造建築物は、屋根や外壁に膜材料を用いた建築物であり、博覧会のパビリオンのような仮設的な使用から、東京ドームに代表されるような恒久的建築物としてスポーツ施設をはじめ広い範囲で活用されている。

膜構造建築物の特徴として、材料の軽量性、柔軟性を生かし、優れた施工性、経済性で大規模な空間を実現することができる。また、透光性に優れ、半屋外のような明るく、柔らかな雰囲気の下空間を創造できる。さらに曲面を生かしたユニークな外観は、デザイン性に富んだ造形が創造できることなどがあげられる。

膜構造建築空間の特徴は構造形式により、以下の3つに分けることができる。

(1) 骨組膜構造

鉄骨造やその他の構造の骨組に膜材料を張ることにより、屋根または外壁を形成する構造方法は構造的な安定感と開口部を自由に作れる特徴を持ち、経済性に優れた、大小の規模を問わず広く使用されている。

(2) サスペンション膜構造

膜材料を主材料として用い、基本形状を吊り構造（サスペンション構造）とした構造方法は起伏に富んだ形状で曲面のユニークさを生かしたデザイン性に優れ、強いインパクトで視覚効果の高い建築物を実現する。

(3) 空気膜構造

膜材料を用いて形成された屋根および外壁の屋内側の空間に空気を送り込むことにより、内部の空気圧力を高め、膜材料を張力状態とし、荷重および外力に対して抵抗する構造方法である。柱や梁のないドーム状の構造物で、広大な空間づくりにおいて、高い経済性、施工性を発揮する。

図 2-2 に膜構造建築物の構造形式と構成材料の関係を示す。

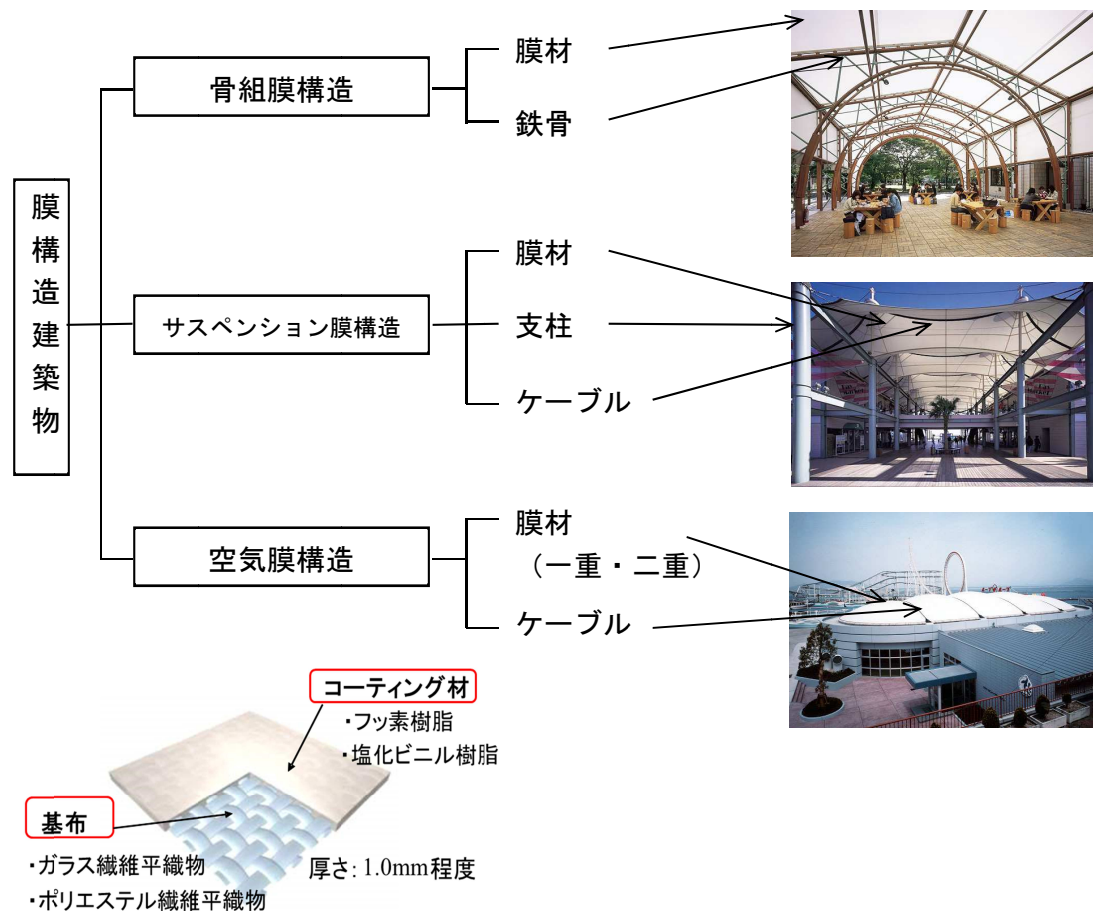


図 2-2 膜構造建築物の構造形式と構成材料

2-2-2 膜材料の種類とその特徴

膜構造建築物で使用する膜材料は建築基準法で定められており、大きく 3 種類に分類される。また、膜材料の構成は、ガラス繊維やポリエステル繊維といった「基布」と、四ふっ化エチレン（フッ素）樹脂や塩化ビニル樹脂といった「コーティング材」から構成される。基布は主に、力学的特性（引張強度、引裂強度など）と防火性といった外部環境に対し抵抗する役割がある。また、コーティング材は耐候性、防火性、防汚性、耐水性のほか、耐屈曲性、耐摩擦性と着色性を付与する。ここで、コーティング材の着色性に着目すると、膜材の透過率を調整することが可能になる。ただし、透過率を大きくした場合、指向性に注意が必要となる。また、透過率を大きくした場合、基布の紫外線劣化が考えられるが、たとえば、65%透過で紫外線侵入量は1%未満であり、材料強度への影響はほとんどない。膜材料の種類²⁻¹⁾について表 2-1 に、基準強度²⁻¹⁾について表 2-2 に示す。

表 2-1 「特定膜構造建築物」に使用される膜材料の種類

区分	基布	コーティング材	厚さ	備考
膜材料 A種	ガラス繊維 (重量150g/m ² 以上)	四ふっ化エチレン樹脂 (400以上、1100g/m ² 以下)	0.5mm以上	
膜材料 B種	ガラス繊維 (重量150g/m ² 以上)	塩化ビニル樹脂 クロロブレンゴム クロロスルフォン化 ポリエチレンゴム (いずれも重量400以上、 1100g/m ² 以下)	0.5mm以上	難燃処理が施されていること
膜材料 C種	ポリアミド系 ポリアラミド系 ポリエステル系 ポリビニルアルスール系繊維 (いずれも重量 100g/m ² 以上)	塩化ビニル樹脂 クロロブレンゴム クロロスルフォン化 ポリエチレンゴム (いずれも重量400以上、 1100g/m ² 以下)	0.5mm以上	JIS A 1322 (建築用薄物材の難燃性試験方法)による防災2級に合格している

表 2-2 特定膜構造建築物用膜材料の基準強度等

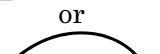
特性		基準値	備考
膜材料	引張強度	20kg/cm以上	JIS L 1096 によるストリップ法で求め、許容応力度算定の基準強度F _m とする 破断時伸率は35%以下、繊維方向による差は、大きな方の値の20%以内
	引裂強度	基準強度F _m の15%以上 かつ10kg以上(幅10mm当り)	JIS L 1096 によるトラペゾイド法で求める
	耐久・耐候・耐水等	—	設計条件に応じた性能を試験により確認
膜材料接合部	引張強度	○基準強度F _m の70%以上(縫製接合部の場合) ○基準強度F _m の80%以上(縫製接合部以外の場合)	○60℃における接合部の引張強度はF _m の60%であること ○膜材料の取り付け部分の許容応力の基準強度F _r は、取り付け部の実情に応じた引張強度試験を行って定める引張強度とする

2-2-3 膜構造建築空間の分類

本研究を進めるにあたり、膜下空間の熱環境や気温分布、気流性状などの環境工学的な視点から、膜構造建築空間を表 2-3 のように分類する。

同表の①は比較的小さな膜面が道路や敷地に沿って設置され、日射や通風の影響を大きく受ける形態となっており、バス停や駐車場の上屋などに多く見られる。②は空間の上方を覆うように膜面が構成され、日射の遮蔽効果は大きい、風が通りやすい空間形態である。たとえば、屋外通路やレストランのテラス席の上屋などに用いられる。③は②の膜面の形態が凹凸になった形態で、自転車置き場などに利用されている。④は膜面が建物の片側に接して設置されている形態で、その出入り口等の底部分として利用されている場合が多い。⑤は④の形態の両側に建物が接している場合である。両側の建物によって直達日射の影響は小さくなり、通風も制限される。膜下が人々の生活空間として利用される休憩スペースなどの場所で利用されている。

表 2-3 膜構造建築物の空間形態による分類

名称	底型	丸型	突起型	片側閉鎖型	両端閉鎖型
空間の形態	① 	② 	③ 	④ 	⑤  or 
実在の空間	 バス停	 屋外通路	 屋外通路	 カフェテラス	 レジャー施設
	 タクシー乗り場	 レストラン	 ステージ	 駅	 駐輪場
	 駐車場	 遊び場	 駐輪場	 商店	 駅前広場

2-3 膜材料の材料特性の把握

2-3-1 測定概要

膜構造建築物で使用される白色系膜材を 6 種類選定し、JIS R 3106²⁻²⁾ に基づき、分光透過率、反射率を測定し、日射透過率、反射率を求める。表 2-4 に建築用膜材料の種類と材料構成、透過・反射の測定を行った膜材料の関係を示す。次に、分光透過率、反射率の拡散性を把握するため、JIS K 7136²⁻³⁾ に基づき、以下の手順で透過ヘーズと反射ヘーズを求める。①分光光度計に積分球反射測定装置を設置し、ヘーズを測定する。②本研究では、光環境と熱環境を連動で計算するため、波長範囲を日射域(300～2500nm)まで拡張し、測定を行う。③反射光については、透過光のヘーズ測定方法に準じた反射ヘーズ²⁻⁴⁾の測定方法を用いて、拡散性を評価した。ここで、反射率測定の場合の積分球反射測定装置の光学系概念図を図 2-4 に、測定方法を表 2-5 に示す。尚、分光光度計は日本分光製 JASCO V-570 を、積分球反射測定装置はダブルビーム方式を用いた。また、重係数は JIS R 3106 を用いた。

表 2-4 測定対象膜材の種類

	材料構成	試験片名	厚さ (mm)
A 種	ガラス繊維＋フッ素系樹脂	A1 (白色)	0.6
		A2 (白色)	0.8
B 種	ガラス繊維＋塩化ビニル系樹脂	B1 (白色)	0.6
		B2 (白色)	0.6
C 種	ポリエステル繊維＋塩化ビニル系樹脂	C1 (白色)	0.6
		C2 (白色)	0.5

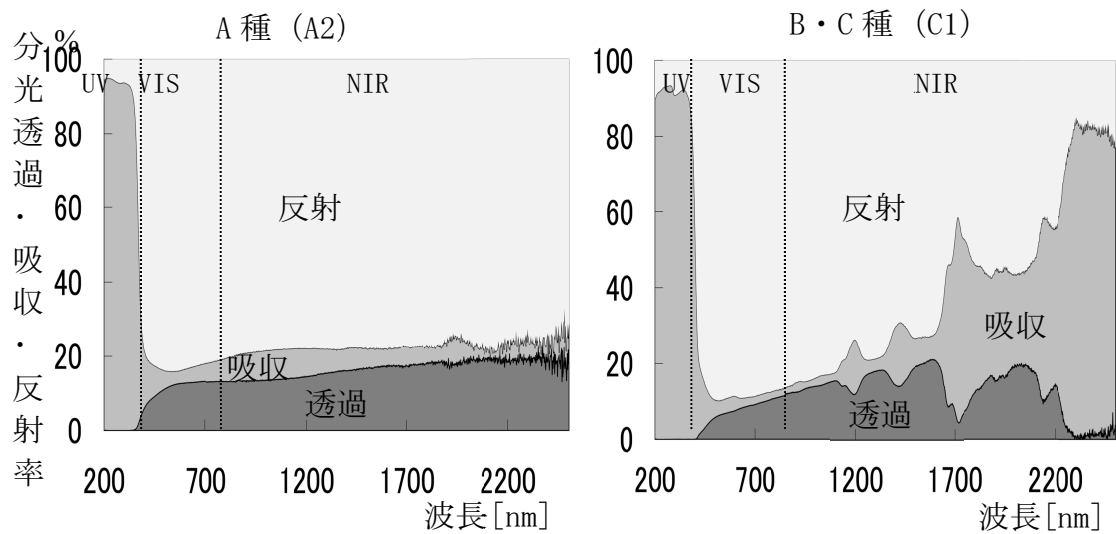


図 2-3 分光透過・吸収・反射率の測定結果例

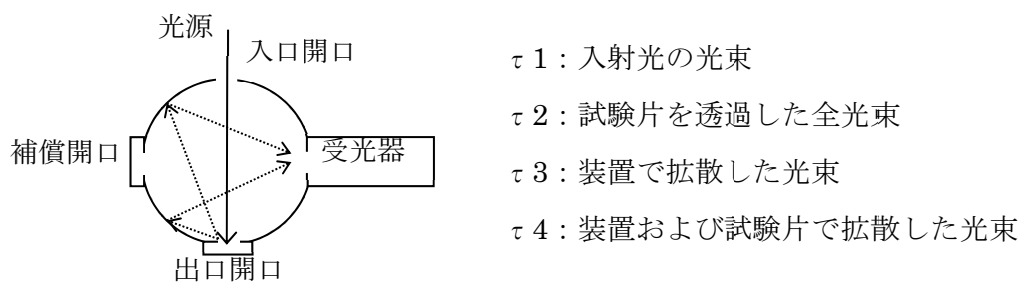


図 2-4 光学系統図（反射ヘーズ測定）

表 2-5 反射ヘーズの測定方法

記号	入口開口	出口開口	補償開口
$\tau 1$	(開口)	標準白板	光トラップ
$\tau 2$	(開口)	試験片	光トラップ
$\tau 3$	(開口)	光トラップ	標準白板
$\tau 4$	(開口)	試験片	標準白板

表 2-6 日射／可視光反射・透過率の測定結果

試験片名	日射域		可視光線域	
	反射率	透過率	反射率	透過率
A1	74.1	17.5	79.4	16.2
A2	78.9	12.8	81.5	12.2
B1	73.2	14.7	81.8	13.4
B2	73.2	14.0	80.8	13.6
C1	81.4	8.2	90.7	5.6

表 2-7 可視光ヘーズの測定結果

試験項目(%)	A1	A2	B1	B2	C1	C2
可視光透過ヘーズ値	100	99.6	99.4	99.2	99.3	99.4
可視光反射ヘーズ値	100	100	96.9	96.3	97.1	96.6

表 2-8 日射ヘーズの測定結果

試験項目 (%)	A1	A2	B1	B2	C1	C2
日射透過ヘーズ値	100	99.5	99.3	99.0	99.4	99.5
日射反射ヘーズ値	100	100	96.7	96.0	96.9	96.5

2-3-2 測定結果

1) 建築用膜材料の分光特性の分類

表 2-6 に日射域と可視光域の透過率・反射率の測定結果を、図 2-3 に分光透過・反射率の測定結果例を示す。A 種と B・C 種で大きく 2 つのタイプに分けられた。A 種の反射率は紫外線域 (UV : 200~380nm) で 10%程度、可視光域 (VIS : 380~780nm) では 80%程度、赤外線域 (NIR : 780~2500nm) で 80%程度の値を示した。透過率は紫外線域では 0~5%程度であるが可視光線、赤外線域では 15%程度で推移した。B・C 種の紫外線、可視光線域の透過、反射率は、A 種の挙動と類似しているが、赤外線域の挙動に大きく変化があり、1100nm を超えた時点から反射率が大幅に減少し、2300nm で 20%

程度を示した。透過率は反射率と同様の挙動となり、赤外線域では2～15%程度を示した。

2) 拡散性の評価

表2-7, 2-8にヘーズ試験結果を示す。可視光域と日射の透過ヘーズは、6種類の膜材のいずれも99%を超えている。反射ヘーズは、A1, A2で100%, B1, B2, C1, C2で96～97%程度を示した。また、反射・透過ヘーズ共に材料構成の違いによる影響はほとんどないといえる。以上より、白色系建築用膜材は拡散性の高い材料といえる。

2-4 実測による膜下空間の光・熱・風環境の実態把握

2-4-1 実測の目的

本研究では、両側にある建物によって膜下空間の通風量が低減され、さらに、膜の裏面付近において部分的な気流停滞が発生しやすい形態の膜構造建築空間を対象に、その気流停滞と日射透過の影響を考慮した膜下空間の夏季における光・熱・風環境を実測調査により明らかにする。

また、実測対象物の実測データをもとに、既往の3D-CAD対応熱環境シミュレータを用いて膜構造建築空間の膜下空間に形成される光・熱・風環境の予測・評価に必要とされる開発要件を提示する。

なおここでは、人間の温熱感に影響を与える高さ1.2mにおける物理要素（日射、気温、

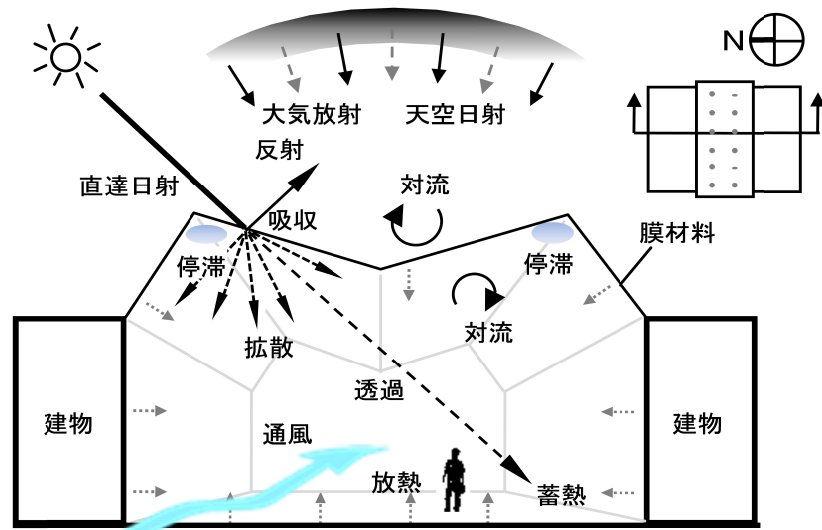


図 2-5 膜下空間の熱環境形成に及ぼす主な熱環境要素

湿度，風向，風速，表面温度等）を扱い，空間形態や構成材料によって形成される物理要素の日変化に着目する。

図 2－5 に膜下空間の熱環境形成に及ぼす主な温熱環境要素を示す。

2－4－2 実測対象の選定

対象となる半屋外空間を有する膜構造建築物の選定条件として，以下の 4 点に着目する（図 2－6）。

- ① 膜材から透過日射が膜下空間の昼光照度や表面温度に与える影響が比較的大きな場所が存在する
- ② 太陽高度の低い朝方や夕方の影響が現れやすいと考えられる開口部が存在し，天空に比較的開けている
- ③ 膜下空間を構成する部材からの反射光が昼光照度や表面温度に影響し，その影響度が確認できる場所が存在する
- ④ 膜屋根形状の変化が膜下空間の昼光照度や表面温度に与える影響が確認できる

この 4 つの条件を満たす表 2-3 の膜構造建築物の空間形態による分類より，両端閉鎖型のサスペンション膜構造建築物を対象とする。

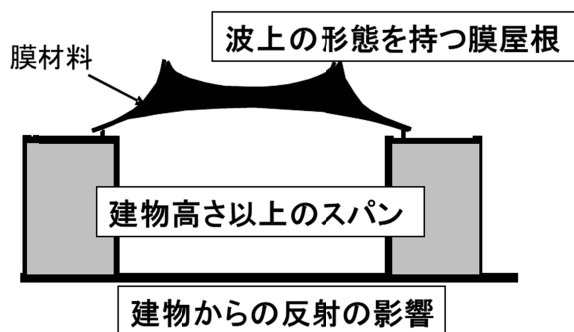


図 2－6 実測対象の選定条件

2－4－3 実測の概要

本研究の実測対象は，神奈川県横浜市金沢区に位置しているサスペンション膜構造建築物である（図 2－7）。対象空間は風通しのある 2 面開放型の空間であり，レジャー施設の休憩スペース，または通路として利用されている。

膜下空間の中央部から各方向を撮影した写真を図 2－8 に，設計図面を図 2－9 に示す。空間の大きさは幅 20m，高さ 10～15m である。それを覆っている膜は，支柱とケーブルで凹凸のある形状となっている。膜下空間の上方向が膜材料に覆われており，その南側と北側には 2 階建ての建物が配置されている。また東側は海に向かって，西側は

森（樹高は約 15m）に向かって開放されている。

図 2－8 のように、両側建物付近の床はタイル仕上げであるが、それ以外の床面は板張りである（全床面の約 7 割を占めている）。



図 2-7 本実測調査対象とした膜構造建築空間

左上：測定場所周辺地図(出典：GoogleMap)，右上：外観（俯瞰），
上中：航空写真右上(GoogleEarth)，
左下：海(東)から見た膜構造建築，右下：山(西)から見た膜構造建築

表 2-9 膜下空間の中央部（高さ 1.2m）からみた方位別構成要素の割合

方向(番号)	割合 (%)			
	膜面	床面	建物表面	その他※
東(①)	30	40	25	5
南(②)	30	45	20	5
西(③)	30	40	25	5
北(④)	30	45	20	5
上(⑤)	60	0	35	5
下(⑥)	0	80	1.5	5

※その他は天空および屋外の周囲地物を示す。

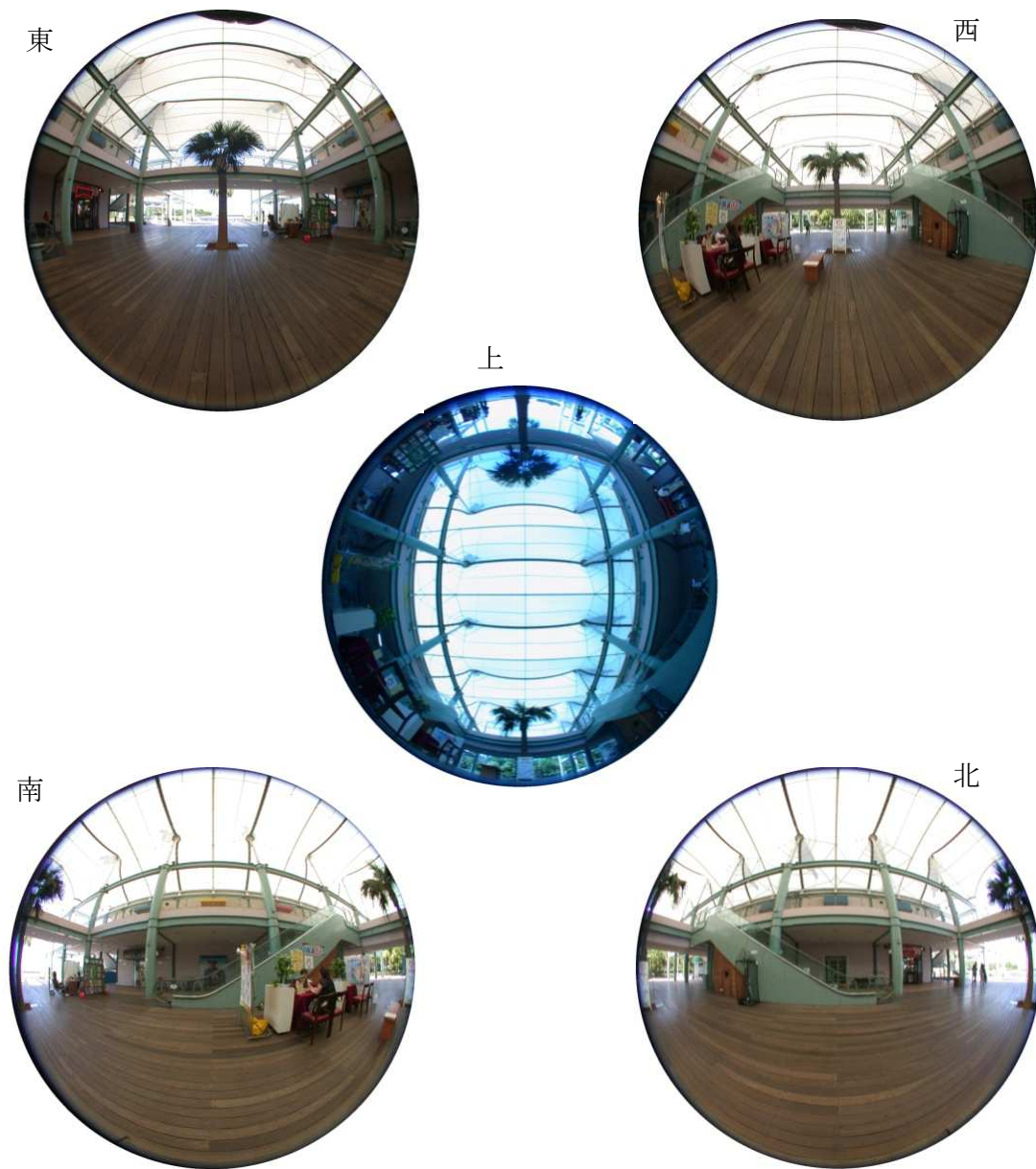


図 2-8 膜下空間の中央部から撮影した各方位の写真

後述する 6 方向日射量と全球熱画像の測定地点となる膜下空間の中央部の地上高さ 1.2m における空間形態および構成材料は表 2-9 に示すとおりである。この測定点の周囲 4π (全球) は、膜面 30%、地面 40%、建物 20% の割合で構成されている。上方方向では、膜面・建物・その他の割合はそれぞれ 60%、35%、5% である。下方方向では床面が支配的であり、その割合が 80% である。

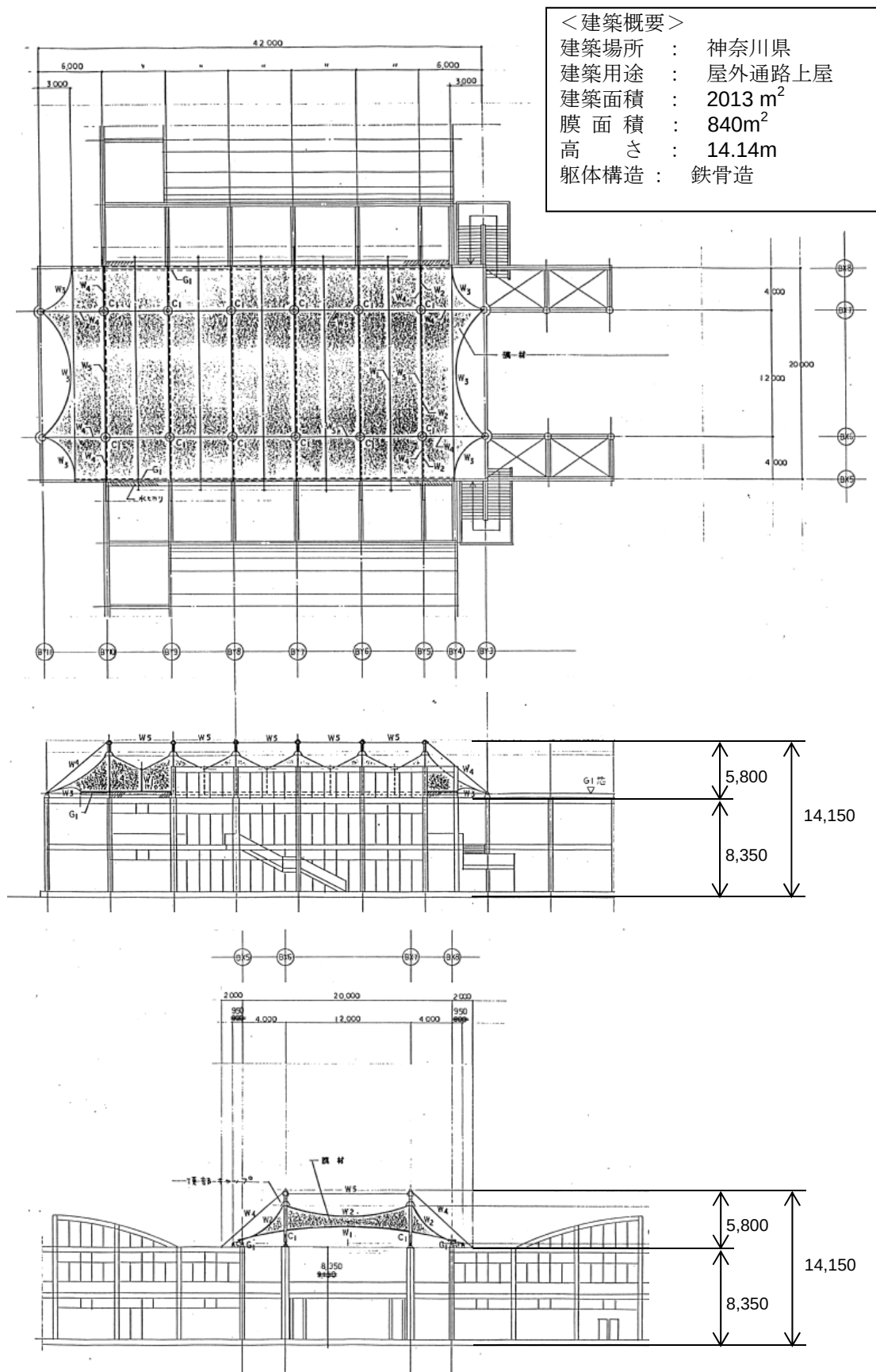


図 2-9 実測対象の設計図

2-4-4 測定項目とその方法

表 2-10 に主な測定項目とその測定器の仕様を示す。

表 2-10 主な測定装置と仕様

測定項目	装置	仕様	測定精度	測定機器
気温・表面温度	T 型熱電対	線径:0.1mm	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$	
相対湿度	電子式高分子湿度センサ	測定範囲:5~95%	$\pm 5\%$	
外部風速 外部風向	プロペラ式風速 風向計	測定範囲:0.4~70m/s 測定範囲:0~540°	$\pm 0.3\text{m/s}$ $\pm 5^{\circ}$	
膜下風速 膜下風向	超音波三次元風速計	測定範囲:0~40m/s 測定範囲:0~360°	$\pm 0.1\text{m/s}$ $\pm 2^{\circ}$	
風速鉛直分布	Tr 式微風速計	測定範囲:0.05~25m/s	$\pm 0.1\text{m/s}$	
全天日射量 6 方位日射量	サーモパイル日射計	波長域:0.3~2.8 μm	$\pm 5\%$ $\pm 10\%$	
放射温度	赤外線放射カメラ	波長域:8~14 μm	$\pm 2^{\circ}\text{C}$	

外気温，外気の相対湿度，風速，風向，および水平面全天日射量を外部気象の測定項目とした。外部気象の測定は，周囲の障害物や建物の影響を考慮し，対象の膜構造建築物に隣接した地上 10m の建物屋上（図 2-10）において屋上面から高さ 2m の位置で行った。なお，測定データは 1 分間隔で記録した。

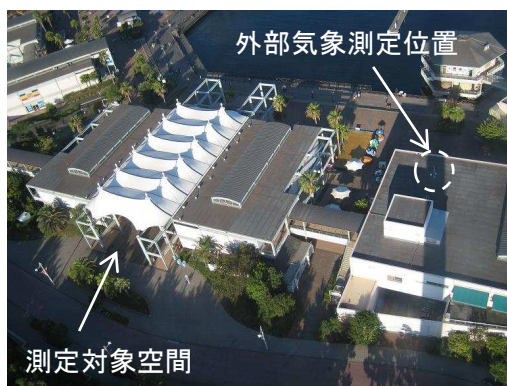


図 2-10 外部気象測定位置と測定機器

左上：実測対象建築空間と外部気象測定位置の関係

右上：南側から外部測定装置と対象空間の眺め

下：外部測定装置の様子

膜下空間の構成と測定位置を図 2-11 ～ 2-13 に示す

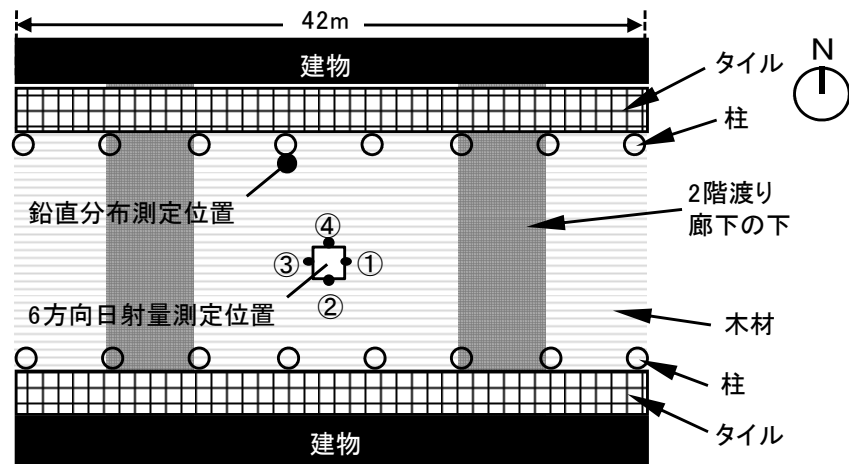


図 2-11 膜下空間の床面の構成材料と測定位置

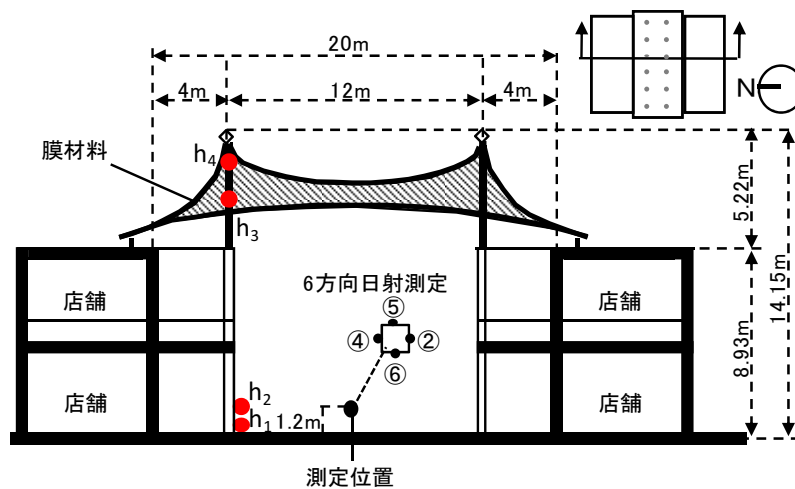


図 2-12 実測対象空間の北西方向の断面と測定点の位置

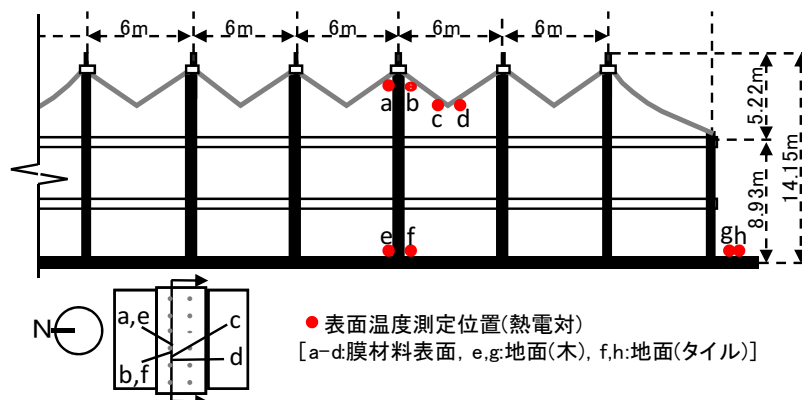


図 2-13 実測対象空間の東南方向の断面と測定点の位置

膜材料を透過する日射の影響が最も大きい膜下空間の中央部（図 2－1 1）で、人の生活高さとして地上高さ 1.2m（図 2－1 2）において 6 方向からの入射日射量と全方向の放射温度を表す全球熱画像を測定した。6 方向日射量の測定は、外部の水平面全天日射量が安定していることを確認した上で下記の 5 つの時間帯に実施した。1) 日出直後の 7 時，2) 東から日射入射がある 9 時，3) 日中太陽高度が最高となる 12 時，4) 西から日射入射がある 15 時，5) 日没直前 17 時。測定の様子を図 2－1 4 に示す。方位別日射量を測定した 6 方向は表 1 の東・南・西・北・上・下と略称し、それぞれに番号①～⑥を付け、図 2－1 1 と図 2－1 2 に明記している。また、全球熱画像の測定には、梅干野らが開発した全球熱画像収録システム^{2-5~6)}を使用した。全球熱画像の観測は以下の 8 つの時間帯に行った。

1) 日出直前 5 時，2) 日出直後の 7 時，3) 9 時，4) 12 時，5) 15 時，6) 17 時，7) 日没直後 19 時，8) 20 時。

放射カメラと全球熱画像収録システムの仕様と外観について表 2－1 1 と図 2－1 5 に示す。

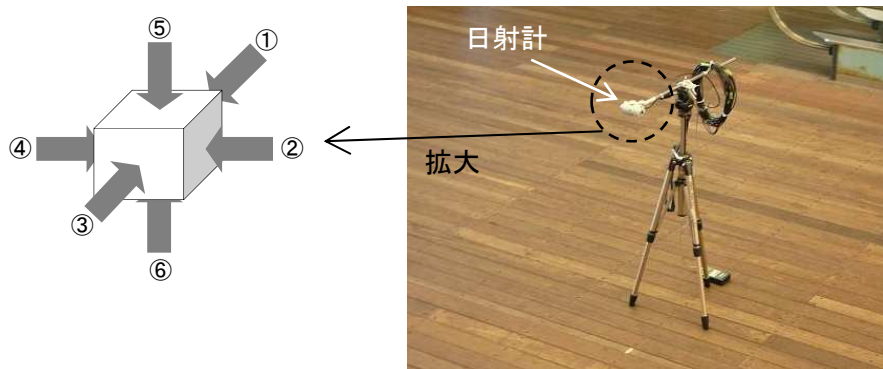


図 2-14 6 方向日射量の測定の様子

表 2-11 全球熱画像収録システムの仕様

(a)放射カメラ	
温度測定範囲	-20～100℃
測定精度	±2℃ or ±2%
温度分機能	0.06℃(14bit)
瞬時視野角	1.58mrad
ピクセル数	320(H)×240(W)px
視野角	29° (H) × 22° (W)
感度波長域	8～14 μm
(b) 全球熱画像収録システム	
ピクセル数	3973×1964 px
総撮影枚数	112枚(重ね率2%)



図 2-15 全球熱画像収録システムの外観

膜下の床面から膜裏面近傍までの鉛直方向に4点（図2-12の $h_1 \sim h_4$ ）の測定点を設け、気温・相対湿度・風速の鉛直分布を測定した。これらの高さは以下のとおりである。 $h_1=0.1\text{m}$, $h_2=1.2\text{m}$, $h_3=11\text{m}$, $h_4=12\text{m}$ （膜裏面の頂点から1m程度）。また、測定点 h_3 と h_4 においては膜下空間の風向も測定した。

熱電対を用いて、膜面の山部と谷部の裏側表面温度および膜下空間の床表面温度を測定した。測定位置は、膜材料の場合、東西方向の波形状であるため、直達日射の照射有無や気流による影響を考慮し、4箇所とした（図2-13のa～d）。床面においては、

構成材料による差を把握するために、木材とタイルの2種類の材料についてそれぞれ中央部に1点ずつ図2-13の測定点eとfを設けた。図2-16にタイルと木材の床面の写真を示す。



図 2-16 床面の構成材料の様子

2) 測定期間

外部気象および膜下空間における気温・風速分布等についてそれぞれ2007年8月29日～9月26日に24時間の連続測定を行った(図2-17)。この測定期間の晴天日を代表日として6方向日射量と全球熱画像の測定を実施した。本報では、晴天日を含む9月19～22日の4日間に測定したデータを中心に解析を行い、その測定結果を考察する。

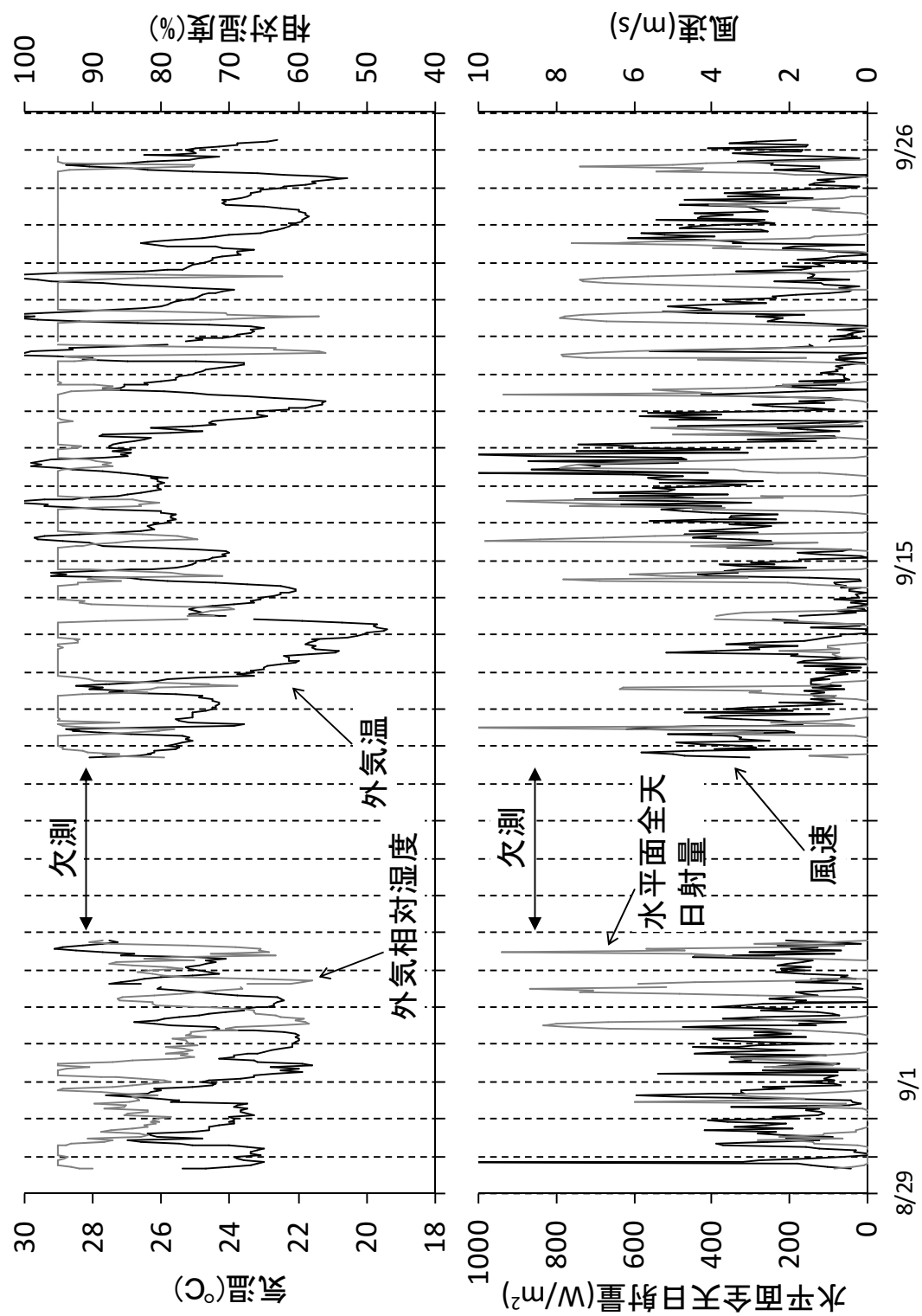


図 2-17 実測期間中(8/29～9/26)の外部気象条件

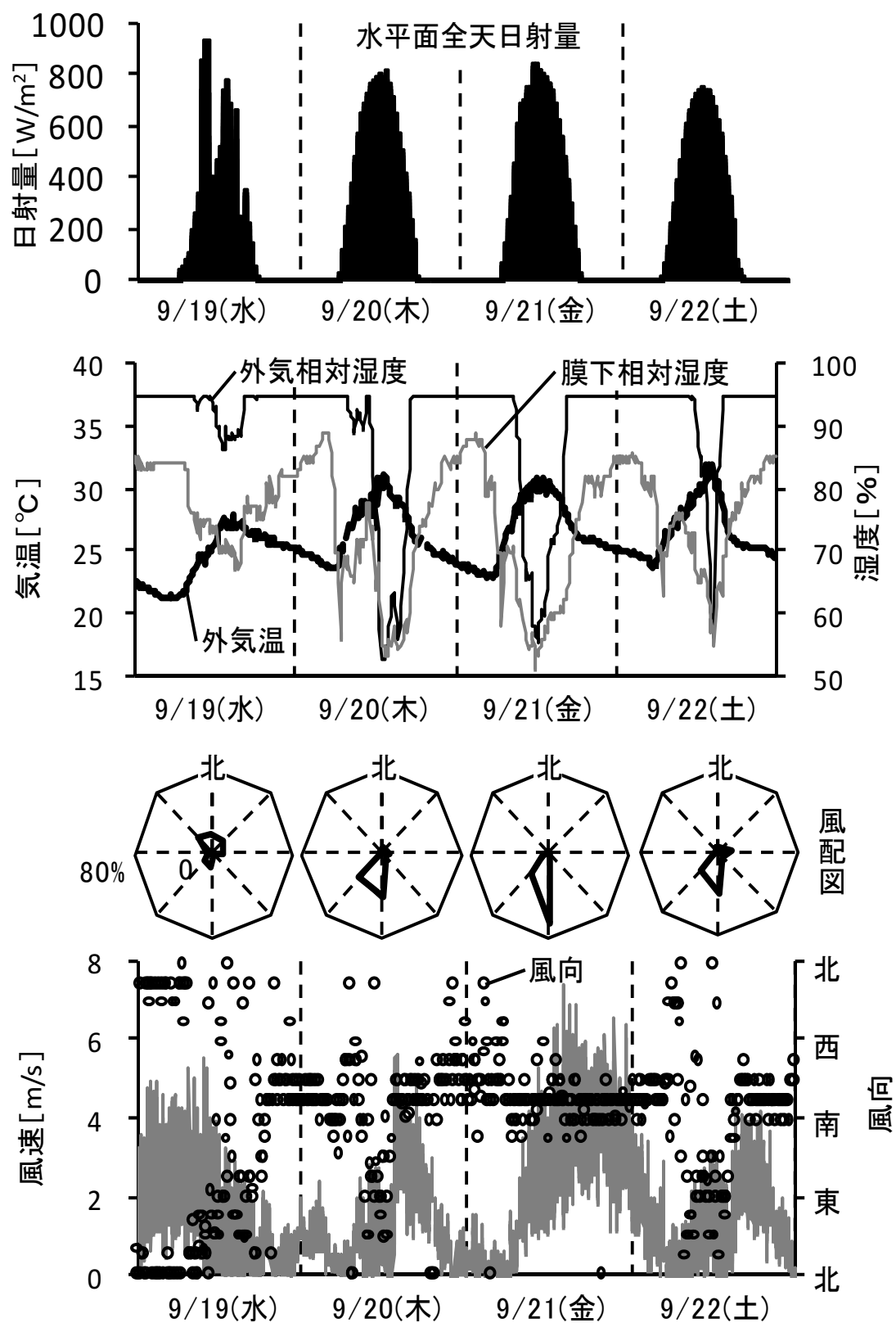


図 2-18 測定期間(9/19-22)における気象

2-4-5 測定期間における気象

図2-18に解析対象とした4日間の外部気象条件等を示す。初日(9/19)の天候は晴れ時々曇りであったが、2日目から3日間の晴天が続いた。この期間の日最低・最高気温はそれぞれ22℃、30℃前後であった。初日を除き、図中の風配図より外部の卓越風は南風であることが読み取れる。以下に、外部風速は一日を通して比較的弱い2日目(9/20)および比較的強い3日目(9/21)に着目し、測定結果を考察することにした。なお、両日とも平日であったため、来園者は比較的少なかった。

2-4-6 膜下空間における短波長放射の実態

日射が透過する膜材料に覆われている建築空間の熱放射環境を調査するため、まずそこにおける日中の短波長放射の状況を明らかにする必要がある。ここでは、はじめに、膜下空間の地面に届く短波長放射の分布の確認に容易である照度計を用いて、地面における光領域の水平面照度分布の日変化を実測によって確認した。次に、膜材料の透過日射の影響を大きく受ける膜下空間の中央部において、地上高さ1.2mにおける六方向(東西南北、上下)日射量の日変化を確認した。

図2-19に示すように、水平面照度の測定位置は、2F 渡り廊下による地面レベルの水平面照度への影響等を考慮した上で、膜下空間の照度分布の様子が確認できる9点(a1~c3)の測定点を選定した。水平面照度分布の測定は、照度計を用いてa1~c3の順番に、一日3回東西からの直達日射が入射しやすい8時と16時、そして膜材料を透過する日射の影響が確認しやすい12時に行った。

6方向日射量の測定は、図2-12の断面図と図2-14の写真に示すように、人の生活高さを考慮し地上高さ1.2mとした。6方向日射量の測定は、2方向が同時に測定できる日射計を用いて、上下、東西、南北の順番に行った。測定は、一日5回、日出直後の6時、東から日射入射がある9時、日中太陽高度が最高となる1.2時、西から日射入射がある1.5時、日没直前の17時に行った。装置は日射計(測定波長域0.3~2.8 μ m)と照度計(測定波長域0.4~0.7 μ m)を用いた。なお、水平面照度および六方向日射量の測定は、外部の全天日射量が一定であることを確認した上で行なった。

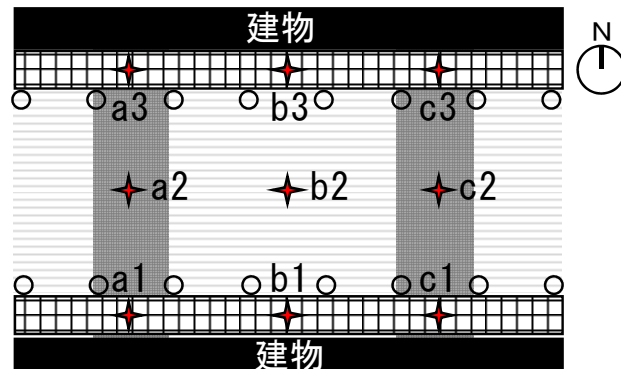


図 2-19 照度測定位置

1) 水平面照度の面分布とその日変化

測定時刻ごとの膜下空間の水平面照度（以下、照度）分布を図 2-20 に示す。8 時における東側の測定地点の照度は直達日射の影響によって全天空照度（55,000 lx 程度）の 90% 以上にあたる 50,000 lx 程度が測定されたが、直達日射の当たらない西側の測定地点の照度は、全天空照度の 5% 以下にあたる 1,000～2,000 lx 程度であった。なお、周囲を遮るものが少ない中央の測定地点では全天空照度の 13% にあたる 6500 lx が測定された。

12 時頃に膜下空間における照度は、太陽高度が最も高くなるため、膜材料を透過した日射の影響を大きく受ける。特に、膜材料を透過した日射の影響を最も受けている中央部の照度（図 2-19 の b2）は全天空照度（100,000lx）の 7% 程度にあたる 7000 lx であった。なおこの時、上方にある渡り橋の日射遮蔽の影響で、図 2-19 の a2 や c2 の測定地点は中央部（b2）に比べ低い値（5,000lx 程度）となっている。

16 時頃における照度分布では、直達日射の入射がある西側（全天空照度の 70% : 25,000 lx 程度）が最も高く、東側が全天空照度（36,000lx）の 4% 程度の 1500 lx であった。この時、中央部の b2 の照度は、上方にある渡り橋の日射遮蔽の影響を受けるが、全天空照度の 7% にあたる 2600 lx を示した。

以上、膜下空間の中央部地面における水平面照度は、開放方向から直達日射が入射する早朝を除くと、膜材料の透過日射と相互反射等によって全天空照度の 10% 前後で変動した。

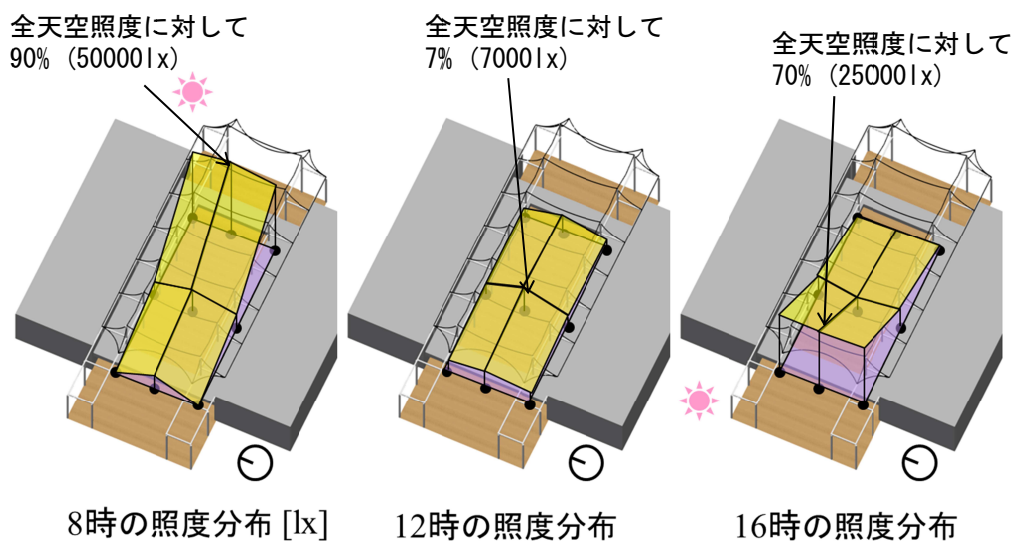


図 2-20 全天空照度に対する各測定点の水平面照度比の日変化

2) 膜下空間における入射日射の分布特性

晴天日であった 9 月 21 日に測定した時間帯別の 6 方向日射量を図 2-21 にまとめた。太陽高度が低い 6 時と 9 時は東からの日射の入射量が多く、6 時における東からの日射量が $135\text{W}/\text{m}^2$ で一日を通して最も多かった。そのときの屋外水平面全天日射量に対する割合は 99% であった。このときに地面（下方向）からの日射反射量は $36\text{W}/\text{m}^2$ で全天日射量の 27% であった。太陽高度が高くなる 12 時頃は、膜材料を透過した上方向か

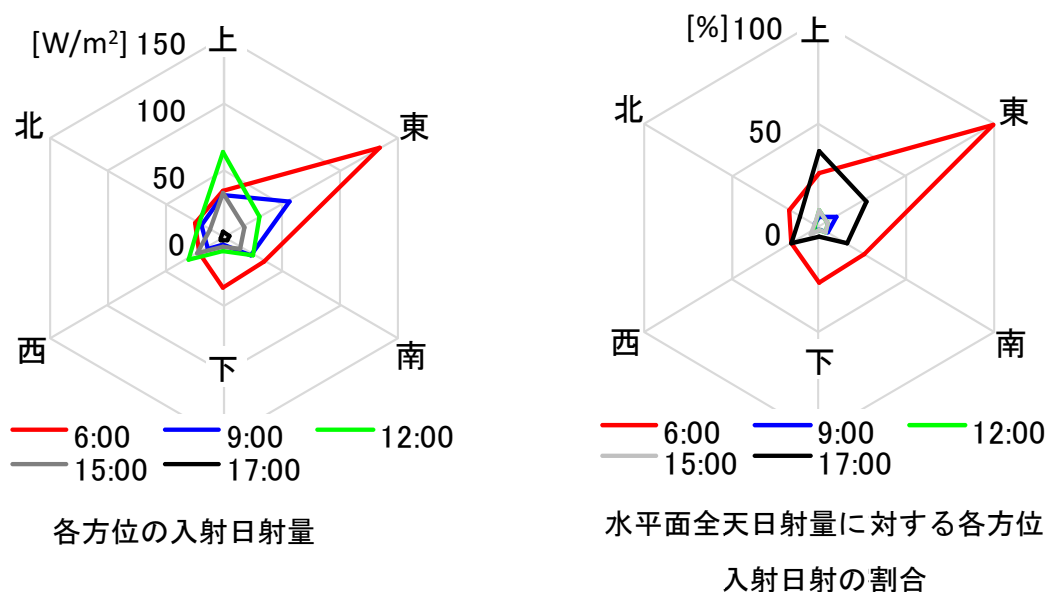


図 2-21 9 月 21 日の 6 方向日射量の日変化

らの日射入射量が最も多く $65\text{W}/\text{m}^2$ であり、全天日射量の 8% に相当した。測定点の西側は隣接している森の日射遮蔽によって、午後に太陽高度が下がっても西方向から測定点へ入射する 15 時の日射量は少なく約 $23\text{W}/\text{m}^2$ （全天日射量の 6%）であった。そのときに、上方向からは全天日射量の 9% に相当する $34\text{W}/\text{m}^2$ の透過日射を受けた。

以上の結果より、膜下空間の中央部の地上高さ 1.2m では、開放方向から直達日射が入射する早朝 6 時頃を除くと、膜材料を透過した日射の影響を最も大きく受けていることがわかった。

2-4-7 膜下空間における長波長放射の実態

膜構造の建築空間における長波長放射環境は、その空間を囲んでいる膜材料、地面（木材）、および建物の壁面等といった周囲の構成地物から放射する熱によるものであり、日中の短波長放射の影響を大きく受ける。膜下空間における短波長放射の実態については 2-4-6 節で確認したので、ここではその知見を踏まえ、膜構造の建築空間を構成する膜材料や地面（木材等）や建物の壁面等によって形成される長波長放射環境の日変化を、熱画像を用いて把握する。さらに膜材料と地面の表面温度の日変化については熱電対を用いた接触測定法によって明らかにする。

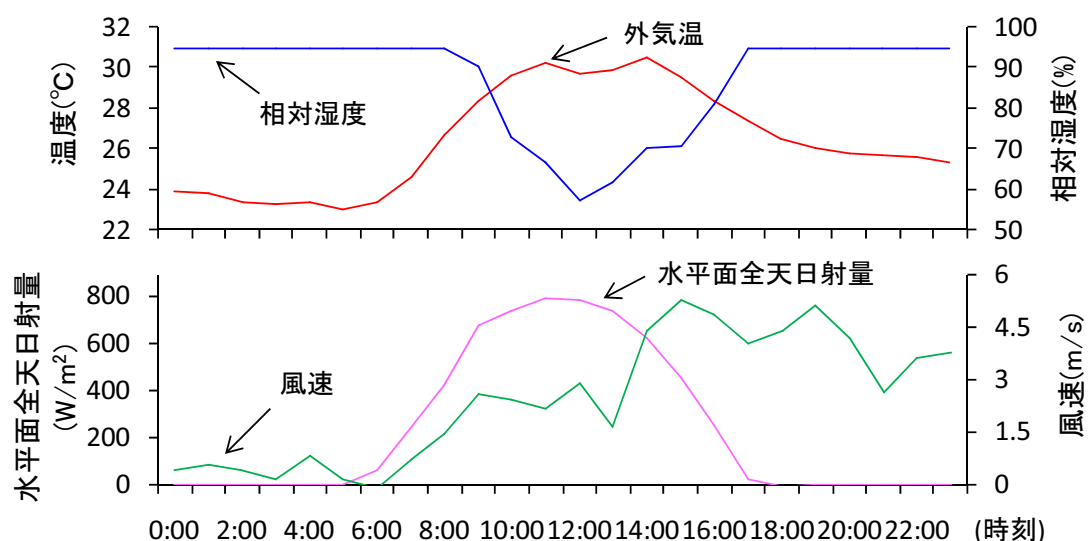


図 2-22 9 月 21 日の外部気象条件

1) 全球熱画像による長波長放射の日変化

ここでは、対象空間の主な構成材料となる膜材料、地面（木材）、および建物の壁（コンクリート）を中心にそれらの表面温度の日変化の傾向を確認する。図2-22に9月21日の外部気象条件を示し、各時間帯の温度範囲を統一した全球熱画像を図2-23に示す。また、図2-24～2-27に9, 12, 17, 20時の熱画像を拡大して温度範囲を各画像に合わせたものを示す。

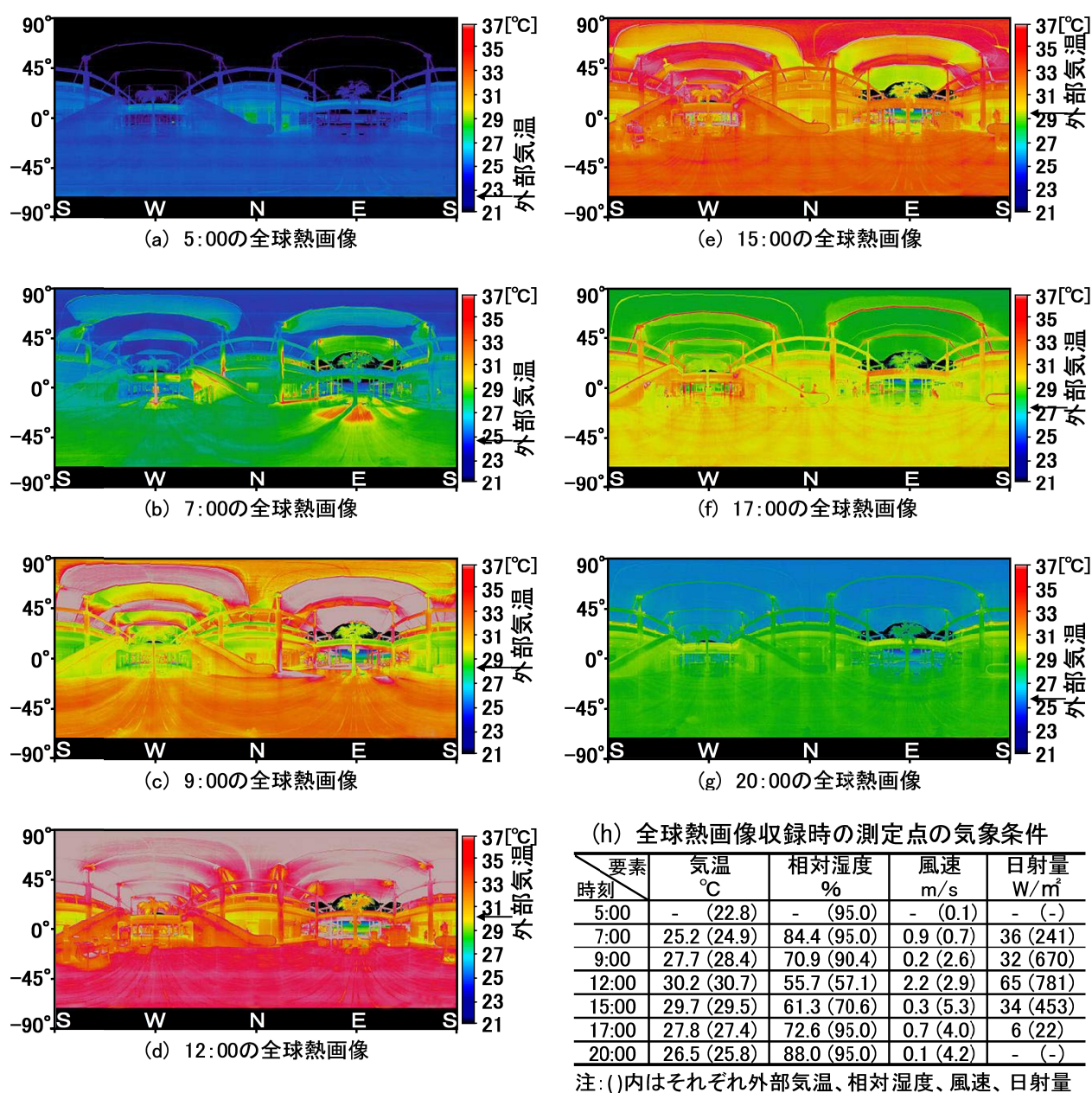


図2-23 全球熱画像による長波長放射の日変化

日出前の 5 時頃，膜材料の表面温度は大気への放射冷却によって外部気温に比べて 2℃程度低く，膜材料によって大気への放射冷却が遮られている地面（木材）は外部気温より 1℃程度高い傾向が見られた。一方，地面（木材）より熱容量が大きい建物の壁面は，前日日中の蓄熱や大気への放射の遮蔽によって，外部気温に比べ 3℃高い部分が多く，設備放熱によるものと見られる北方向の壁面の一部は外部気温より最高 5℃も高かった。この傾向は，日出（5:30 頃）によりすぐ変化し，1 時間程度の直達日射の影響で，すべての構成材料の表面温度の上昇がみられた。特に受熱日射量の多い膜材料や地面の部分における表面温度上昇が著しかった。9 時になると，東側を向いている膜材料の表面温度は，外部気温より最高 9℃程度高くなり，地面の表面温度も外部気温より 4℃程度高くなった。太陽高度が最も高い 12 時頃には，膜材料のほとんどの部分が外部気温より 7℃以上高い 37℃を超えており，膜材料を透過した日射の影響を主に受ける地面では，外部気温より 4℃高い 34℃以上を示す部分もあった。これは 12 時の熱画像を拡大した図 2-25 をみるとより確認しやすい。15 時頃，太陽高度が西側に傾くにつれて膜材料の透過日射量も 12 時頃に比べ減少するので，膜材料や地面の表面温度は 12 時頃に比べ低下している傾向がみられた。一方，熱容量の大きい南北の壁面の表面温度は，12 時頃からの変化があまりみられなかった。

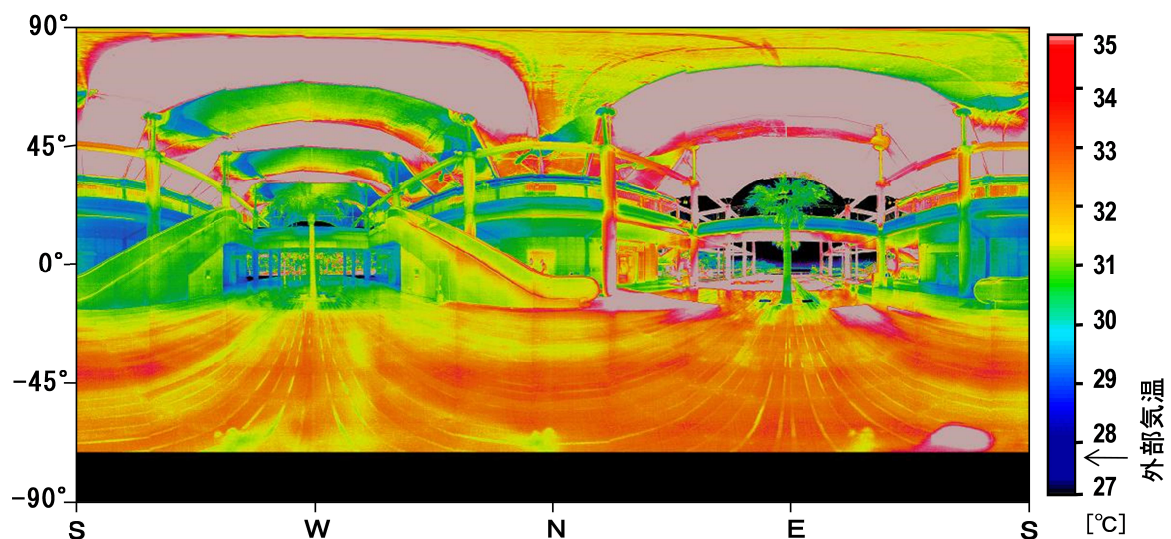


図 2-24 測定点 9 時の全球熱画像

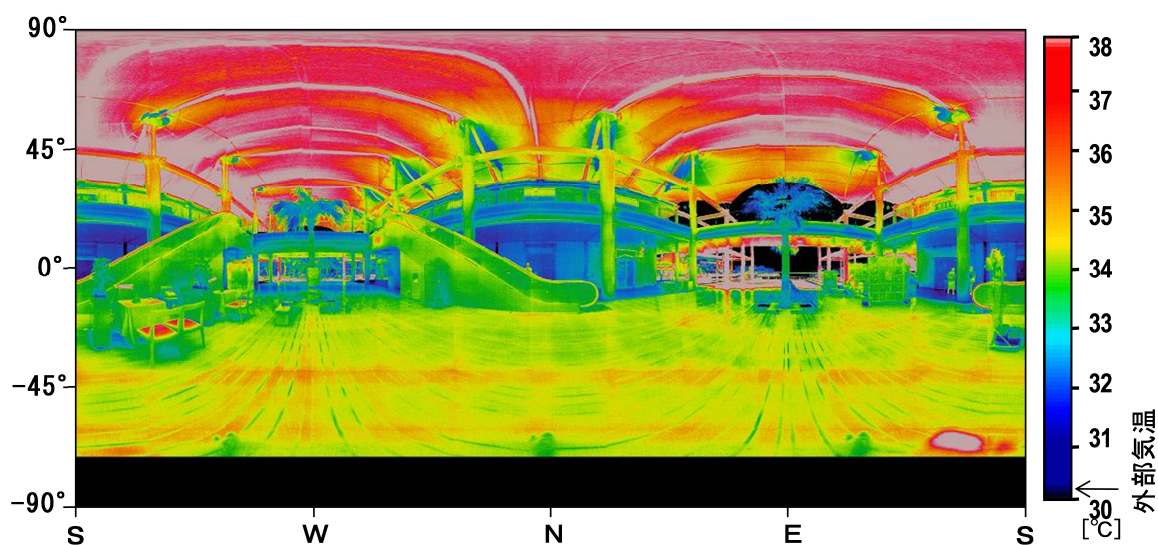


図 2-25 測定点 12 時の全球熱画像

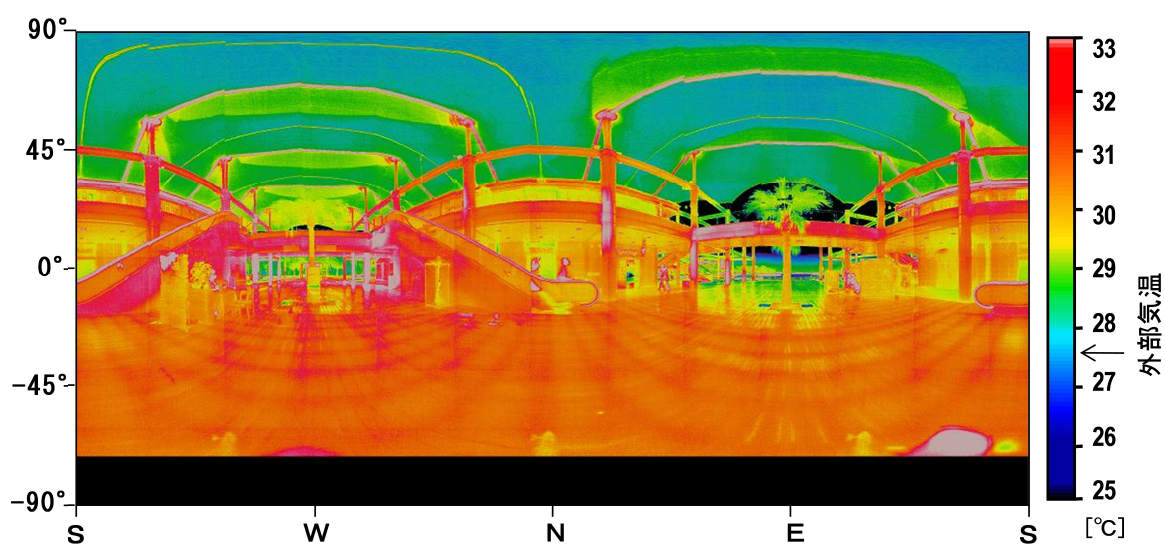


図 2-26 測定点 17 時の全球熱画像

日没直前の 17 時頃になると、膜材料の表面温度はほぼ外部気温と等しくなる一方、地面の表面温度はまだ外部気温より 2℃程度高かった。それ以降、膜材料や地面の表面温度は対流や放射によって低下し、日没から 3 時間程度経過した 20 時頃には、気温相当あるいはそれ以下まで低下していた。ただし、熱容量の大きい建物の壁面等は外部気温以上の表面温度を保っていた。なお、全球熱画像の地面付近に横に伸びている縞模様は、赤外線放射カメラと撮影対象面との角度によって生じる温度差とみられる。

以上、膜材料の表面温度は、日出前、大気への放射冷却によって外部気温より 2℃程度 (21℃) 低い、日中にはその受熱日射量の程度によって、外部気温より最高 7℃ (37℃) も高くなることが確認された。また、地面から大気への放射が遮られ、日出前の地面 (木材) の表面温度は外部気温相当または若干高い傾向であったが、膜材料の透過日射と相互反射の影響を最も受ける 12 時頃には最高 34℃まで上昇した。なお、熱容量の大きい建物壁面の表面温度は、前日の蓄熱と膜材料によって大気への放射冷却が遮られ、日出前にも外部気温より 3℃程度高かった。

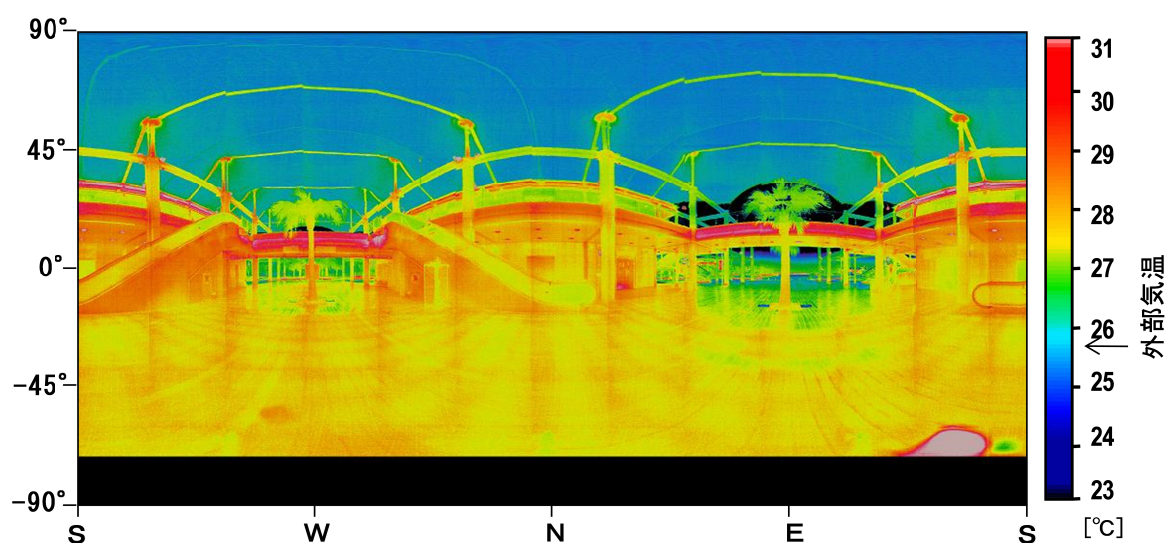


図 2-27 測定点 20 時の全球熱画像

2) 膜面と床面の長波長放射の分布と温度変化特性

ここでは、前項での構成材料の日変化の傾向を踏まえ、膜材料および地面の表面温度分布を詳細に分析する。分析には、測定点から上方向をみた膜材料の熱画像と、測定点から下方向をみた地面の熱画像を用いる。

図 2-28 に膜の形態による膜材料の表面温度の差がもっとも明確な、9 時の上方向 2π の熱画像を示す。黒のラインは膜と壁の境界線である。熱画像の右のグラフは、境界線内の膜材料の表面温度分布を表したヒストグラムである。膜材料の表面温度は、31℃から 34℃付近に分布し、3℃程度の温度幅がある。膜表面の平均温度は 32.2℃であり、外部気温である 28.4℃よりも 4℃程度高くなっている。膜材料の表面温度に分布が生じているのは、膜の形態による受熱日射量の差が熱容量の小さい膜材料の表面温度に

反映された結果と考えられる。

また、日没後の膜材料の表面温度が確認できる 20 時の上方向 2π の熱画像（図 2－29）をみると、日中上昇した膜材料の表面温度は、放射冷却により 20 時頃に外部気温より 2°C 程度低下していた。日没後、熱容量が小さい膜材料の表面温度幅は、対流や放射による冷却により、 1°C 未満まで低下していた。

地面の表面温度の分布が確認できる 15 時頃の下方向 2π の熱画像を図 2－30 に示す。地面の場合は、膜材料の透過日射など短波長放射の蓄熱により、その表面温度が 34°C まで上昇し外部気温に比べ 4°C 程度高くなっている。膜下空間の中央部地面の表面温度は、3 節で前述したように、渡り廊下など周囲に障害物が少ないため、透過日射が当たりやすく、その周囲の地面（ 32°C ）に比べ 2°C 程度高くなっていた。

以上、熱容量の小さい膜材料では膜の形態に起因する受熱日射量の差によって 3°C 程度以内の表面温度の幅が生じたが、夜間になるとその幅は 1°C 未満となっていた。一方、地面（木材）の表面温度では、膜材料の透過日射量の影響の度合いによって 2°C 以内の温度の幅が確認された。

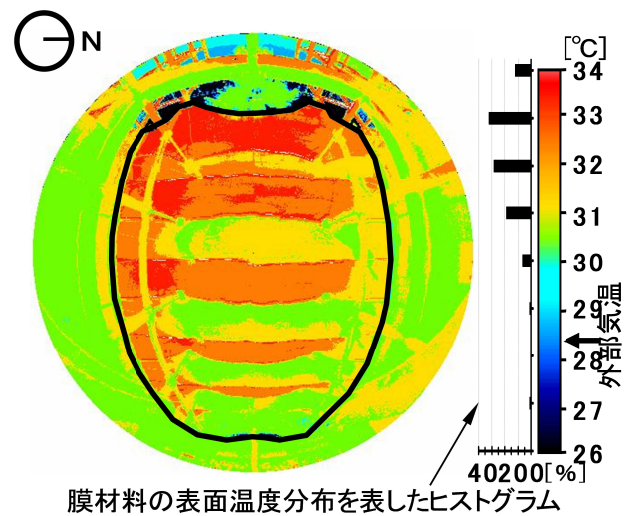


図 2-28 9/21 9時の屋根膜裏を見上げた 2π の表面温度分布

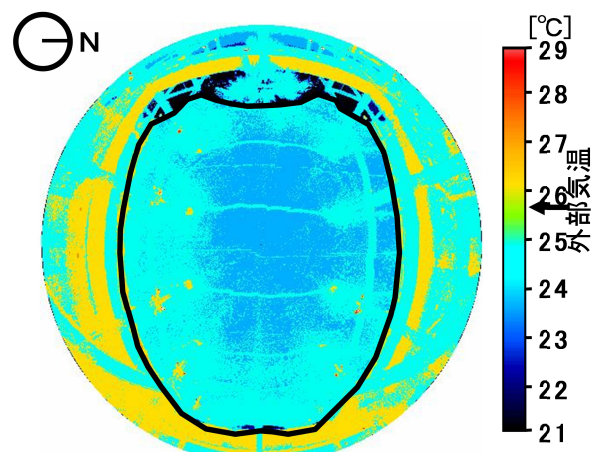


図 2-29 9/21 20時の屋根膜裏を見上げた 2π の表面温度分布

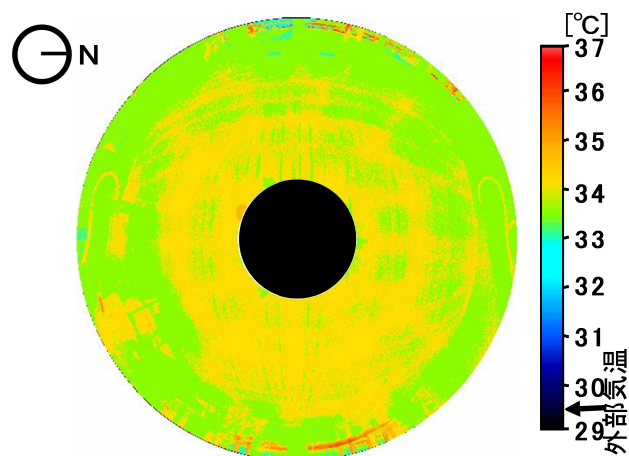


図 2-30 9/21 15時床面を見下ろした 2π の表面温度分布

3) 接触測定法による膜面および地面の表面温度の日変化

膜材料と地面の表面温度の日変化を接触測定法による連続データを用いて考察する。

図 2-3 1 に示すように、膜材料の表面温度は膜材料に直達日射が当たらないときは外部気温以下となり、その日変化の範囲は 21℃～37℃であった。日中、各測定部位の表面温度差は、主に受熱日射量の差によるものと考えられ、夜間における 1℃程度の各測定部位の温度差は、波形状をしている膜の形態によって、上部における気流停滞の傾向と考えられる。この詳細については、本論文の議論の対象としない。

図 2-3 2 は材料（木材、タイル）や天空への開放程度による地面の表面温度の日変化を示す。膜にほぼ覆われている木材の地面の温度は 24℃～38℃の範囲で変化し、東側や西側から直達日射の入射による温度上昇を除き、日中に 32℃まで上昇した。これは同時間帯に膜に覆われているタイルの地面の表面温度より 4℃程度高い温度であり、熱画像（最高温度 34℃）との差は測定位置に起因するものと考えられる。なお、夜間におけるタイルの地面の表面温度は、日中の蓄熱が保持され、気温より 2℃以上高かった。一方、膜にほぼ覆われていない地面の日中最高の表面温度は、木材とタイルでそれぞれ 60℃と 45℃まで上昇した。

以上、膜材料の表面温度は、日出前に大気への放射冷却によって外部気温に比べ最大 2℃程度低い 21℃であったが、日中は外部気温より最高 7℃（37℃）も高くなった。膜下空間の地面（木材）の表面温度は、日出前に外部気温に比べ 1℃程度高い 24℃であったが、膜材料の透過日射量の影響を最も受ける 1.2 時頃には外部気温よりも 4℃程度高い 34℃まで上昇した。

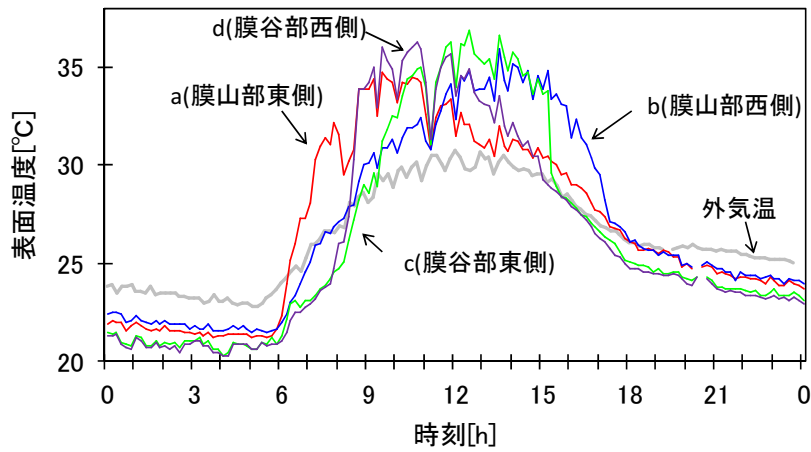
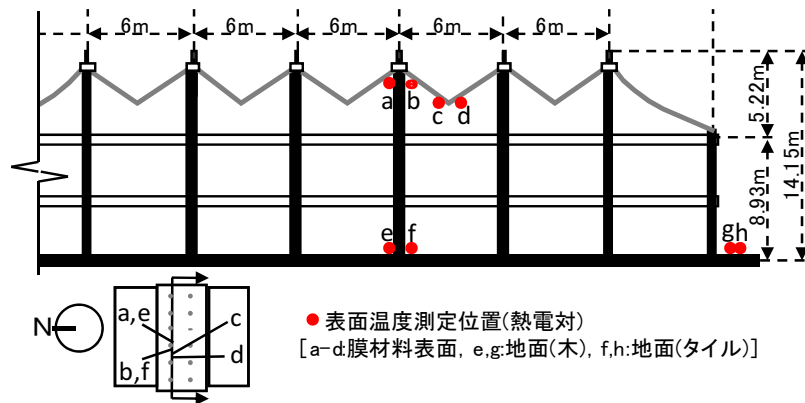


図 2-31 膜材料表面温度の日変化

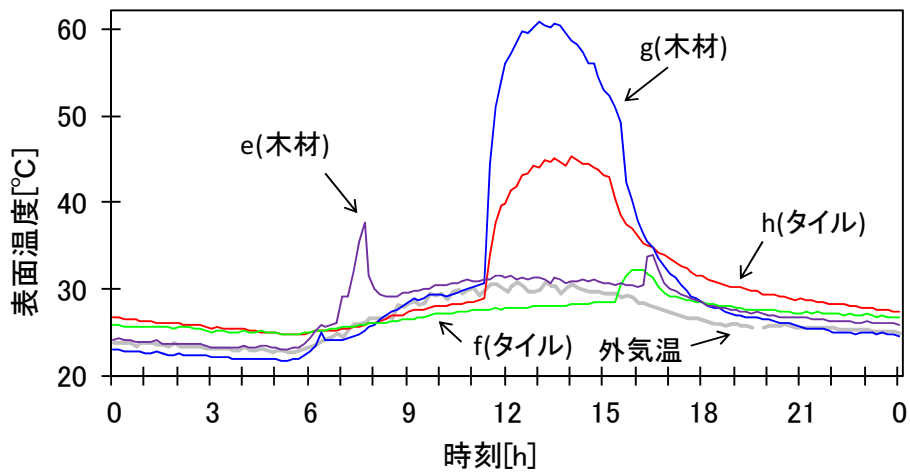


図 2-32 地面表面温度の日変化

また、上記 4 日間に熱電対により測定した膜材料と床の表面温度および膜下の気温（地上高さ 1.2m）を図 2-33 に示す。同図より、晴天日において膜表面に直達日射が当たらない時間帯には膜材の表面温度は外気温以下となり、その日変化範囲は 21～37℃であった。日中に生じた各測定部位の表面温度差は、主に受熱日射量の差によるものと考えられる。夜間に生じた 1℃程度の各測定部位の温度差は、波形状をしている膜下空間の上方に停滞している空気の温度差によるものと思われる。ここで、太陽高度が最も高い正午頃（9/21）に収録した全球熱画像を図 2-25 に取り上げ、膜下空間の表面温度分布について考察する。同図で見られるように、膜面のほとんどの部分が外気温より 7℃以上高い 37℃に上昇しており、膜材料を透過した日射の影響を主に受ける床面では、外気温より 4℃高い 34℃以上を示す部分も存在していた。

また、床の表面温度の日変化について、図 2-33 に示す 9/21 のグラフより、木材の床面では(図中の e)膜面からの透過日射の影響により日中は外気温より 1℃前後高くなっていた。そして日中の透過日射が床へ蓄熱されていることと、膜材料が床面から天空への放射を遮蔽することにより、夜間でも木材の床面温度は外気温を 1℃前後上回っていることが見られた。タイルの床面では(図中の f)日中 9 時～1.5 時の時間帯に外気温より低い温度を示していたが、床への透過日射の蓄熱により午後 15 時以降から夕方まで外気温より 2℃前後高い温度を保っていた。夜間から早朝にかけては木材の床面よりもタイルの床面温度の方が 1℃程度高かった。

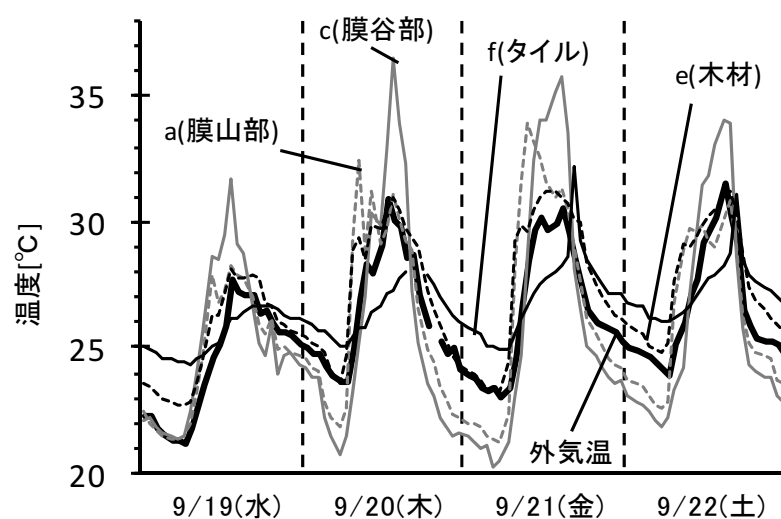


図 2-33 膜材料表面温度の日変化

2-4-8 膜下空間における風速の鉛直分布

図2-34に晴天日（9/20と9/21）の9時～18時における膜下空間の鉛直風速分布や外部風速等の時間変化を示す。同図の左図を見ると、9/20には、午前と午後の外部風の主風向はそれぞれ東と西方向であった。すなわち、風が午前に海の方から流れており、午後（13時以降）になると海に向かって流れていた。また、午前中の外部風速が1m/s前後であるのに対して、膜下空間では高さ11mまでの風速は1m/s程度強い2m/s前後であった。これは、海面近傍では上空より強い海風が流れていることによる結果と思われる。午後では外部風速は2～4m/sの範囲であり、13時以降に徐々に低下していた。このときに、膜下空間の風速は高さ11mの位置では外部風速の半分以下に減衰していた。それ以外の位置（膜裏面近傍や床面近傍、高さ1.2m）では変化が少なく、0.5m/s前後であった。

図2-34の下図に示した9/21のグラフに注目すると、前日（9/20）に比べ、日中の卓越風は南風であり、風速は1～2m/s強かった。しかし、膜下空間の風向は不安定で東か南方向に揺らしていた。また、膜下空間の風速は前日と同様な減衰の様子を示していた。南風または南西風が吹いた午後に膜下生活空間（高さ1.2m）の風速が大きく低下していることは、膜下空間の開放部の西側に位置する森等の影響によると考えられる。

膜下空間における時刻別風速鉛直分布を示す図2-35からもわかるように、膜裏面近傍の風速は最大でも1m/s以下であり、殆どの時間帯には0.5m/s前後であった。この結果から、膜裏面近傍に空気が停滞していることが推測できた。

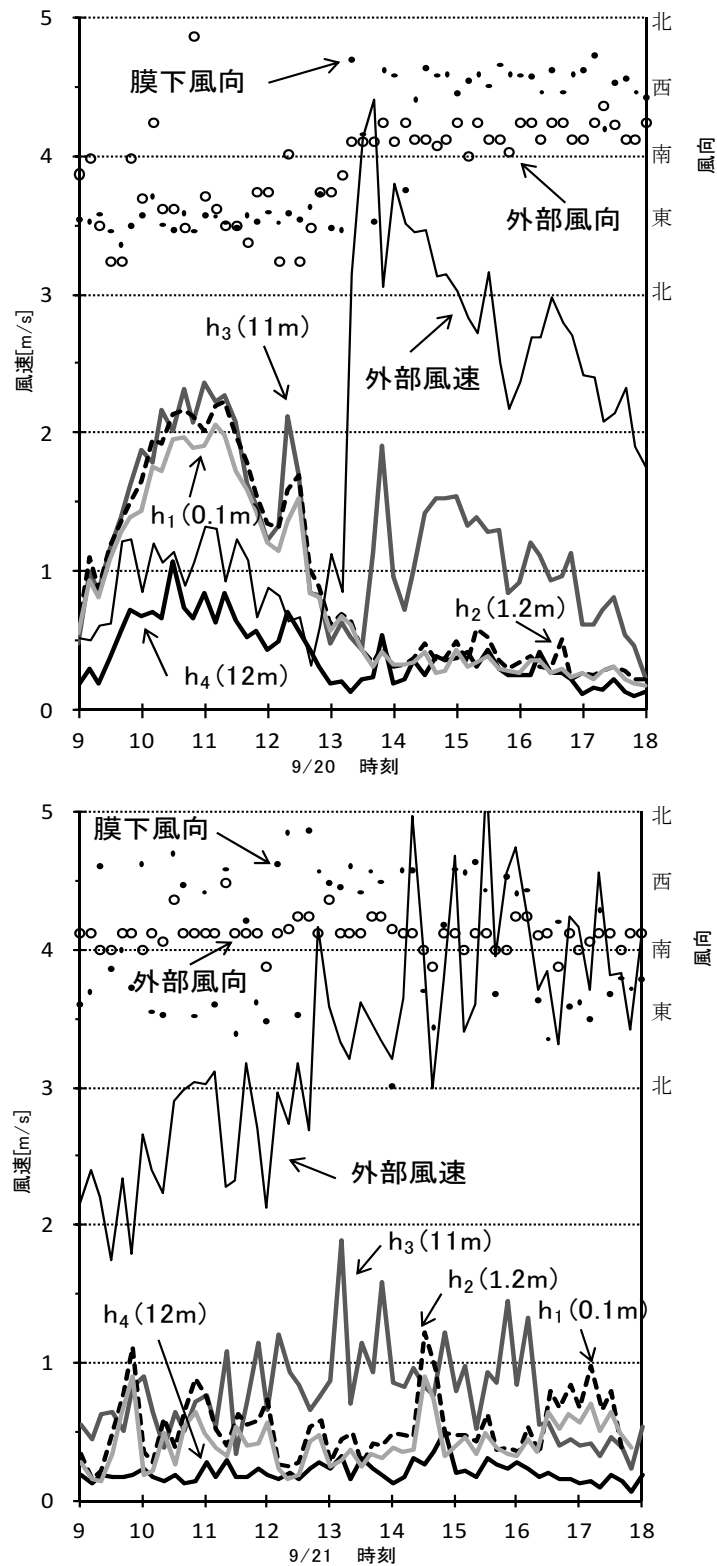


図 2-34 夏季晴天日の 9～19 時における外部風速・風向および膜下空間の
風向・鉛直風速分布の時間変化(上図：9/20，下図：9/21)

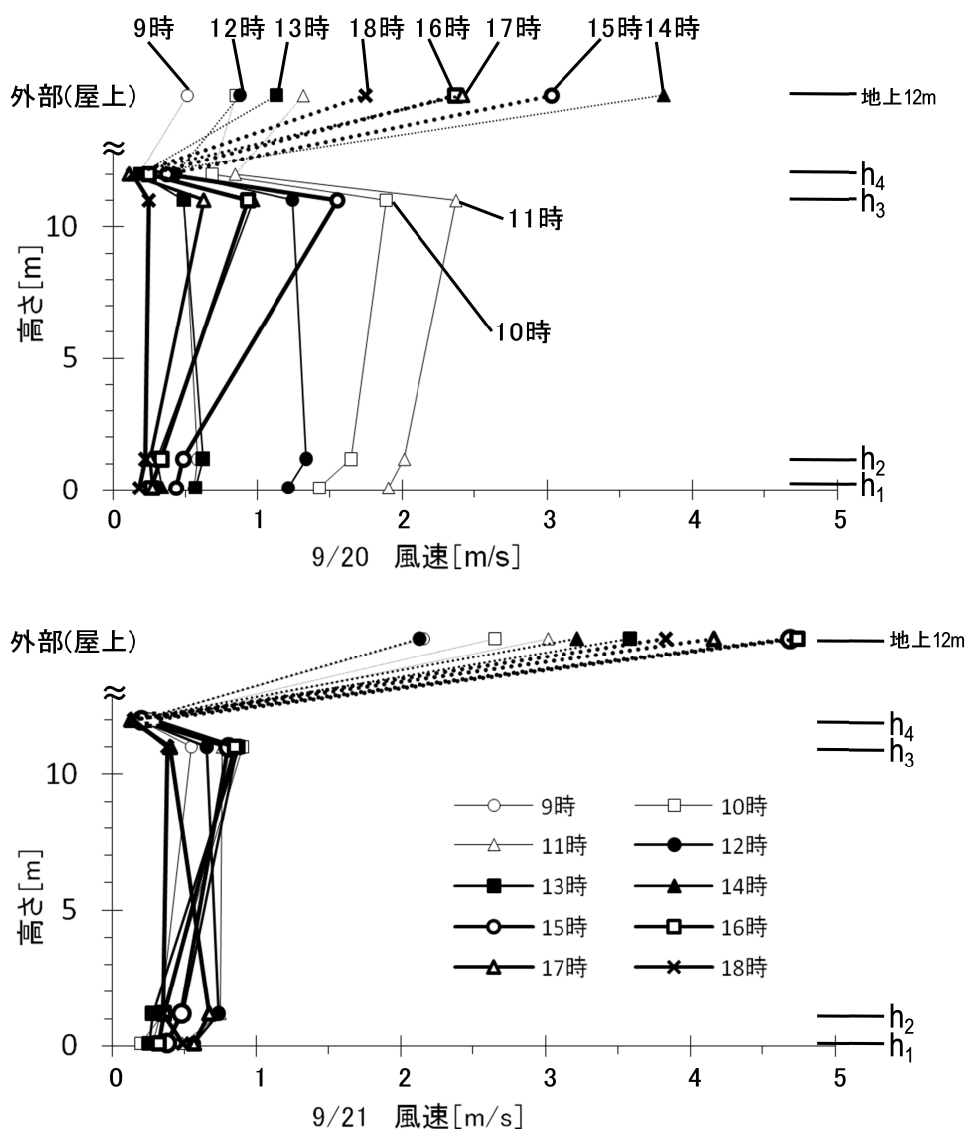


図 2-35 膜下空間の鉛直風速分布 (上図 : 9/20, 下図 : 9/21)

2-4-9 膜下空間における気温の鉛直分布

図 2-36 に膜下空間における気温鉛直分布の時間変化を示す。同図は、前記 2 日間の晴天日における 6 時～20 時までの期間に 10 分間隔で測定したデータを用いて作成したものである。9/20 の 10 時～13 時を除き、膜裏面近傍の気温（図中の h_4 ）は最も高いことが示されている。9 月 20 日の 10 時～13 時の時間帯には膜裏面近傍の気温は外気温より 0.5°C 程度低くなっていた。これは、前述したようにこの時間帯に膜下空間を流れていた海風による通風冷却効果と言える。

図2-36は、前記両日について膜下空間の生活高さ 1.2m (図中の h_2) の気温と外気温との相関を示すものである。海の方から風が流れた 9/20 の午前中 (9 時～13 時) には膜下空間の気温は外気温より低くなっていることが見られた。これに対して、9/21 においては膜下空間の気温が外気温を上回っている場合は前日より多くなっていた。

膜下空間における時刻別気温鉛直分布を示す図2-40により、前記両日ともに生活空間高さ 1.2m の気温は床面近傍の気温よりも 0.5°C 前後低くなっていた。9/20 の午前中 (9～12 時) に外気より低温の海風が流れてきたため、高さ 1.2m の気温に比べ、膜下空間の上方 (h_3) の方が若干低いことが見られた。これに対して、海風が流れていなかった 9/21 の午前中では、後者の方が 1°C 弱高くなっていた。

膜裏面近傍 (h_4) の気温は殆どの時間帯に外気温より高くなっていた。両者の差が正午以降に徐々に増大していき、日没直後 (18 時頃) に最大となり、その最大値は約 1.5°C であった。

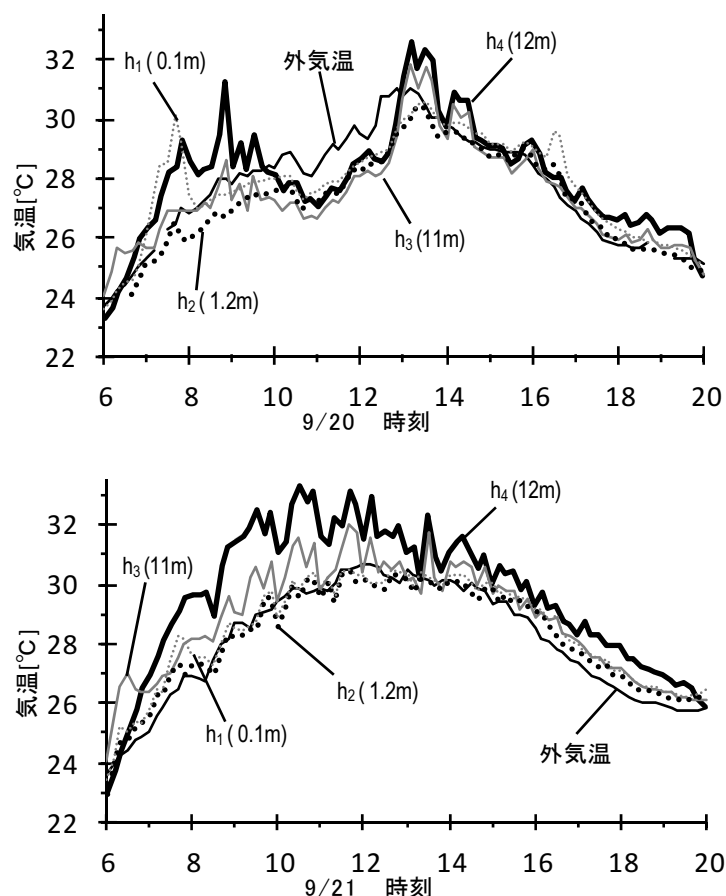


図2-36 夏季晴天日の6～20時における膜下鉛直気温分布の時間変化

(上図：9/20，下図：9/21)

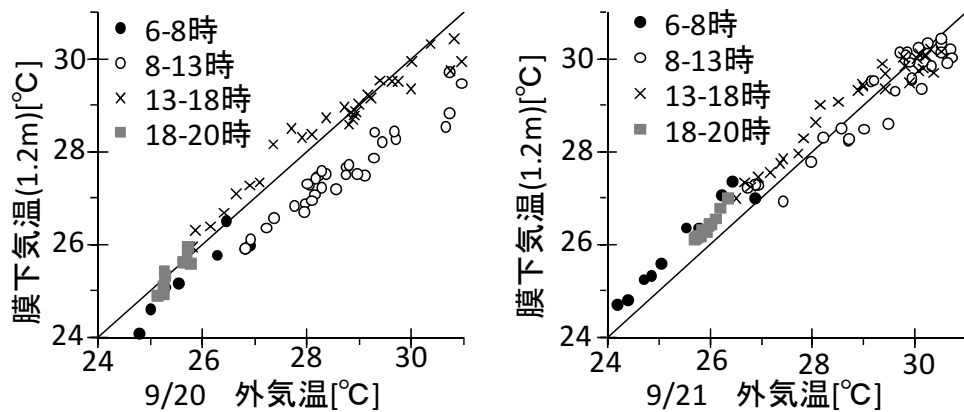


図 2-37 外気温と膜下空間(高さ 1.2m)の気温との相関

2-4-10 膜面近傍の 気温と膜面表面温度

図 2-38 に柱で突き上げている部分の熱画像と, 図 2-39 に柱近傍の気温と膜面の表面温度の関係を示す。図 2-38 は 9/21 の 8 時で山部と谷部で約 3℃程度の表面温度の差があり, 熱溜りの影響が起因しているものと考えられる。図 2-39 は同日の 7 時から 20 時までの膜面近傍の気温と膜面表面温度の関係を示しており, 最大で 4℃程度の差があった。ここで, 熱溜りの現象を分析するため, 熱溜り部分の水平方向の距離 (スパン) に対する高さ (ライズ) の比

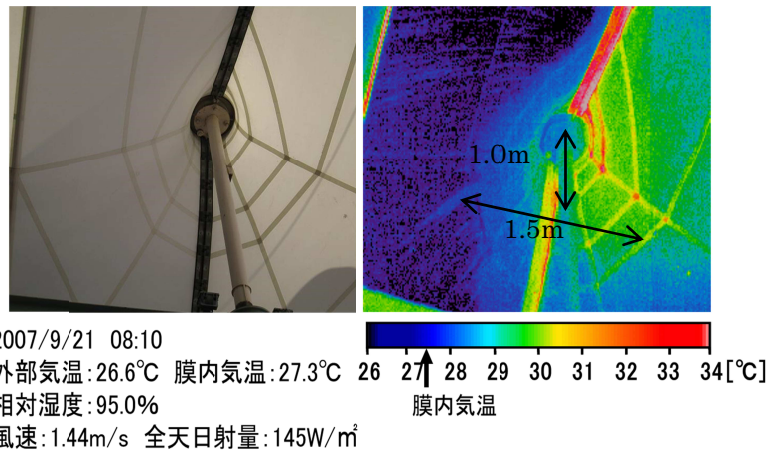


図 2-38 山部近傍の熱画像

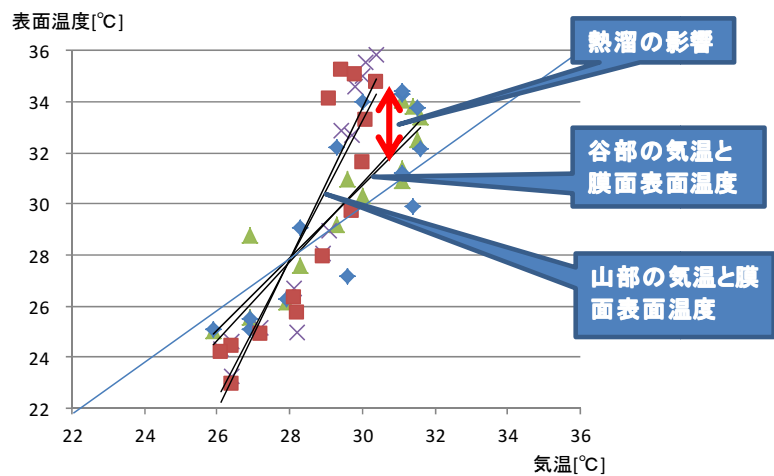


図 2-39 膜面近傍の気温と膜面表面温度の関係

率をスパン-ライズ比と定義する。図2-38・右図より、山部のスパン1.5m, ライズ1mより、スパン-ライズ比は0.6程度であった。

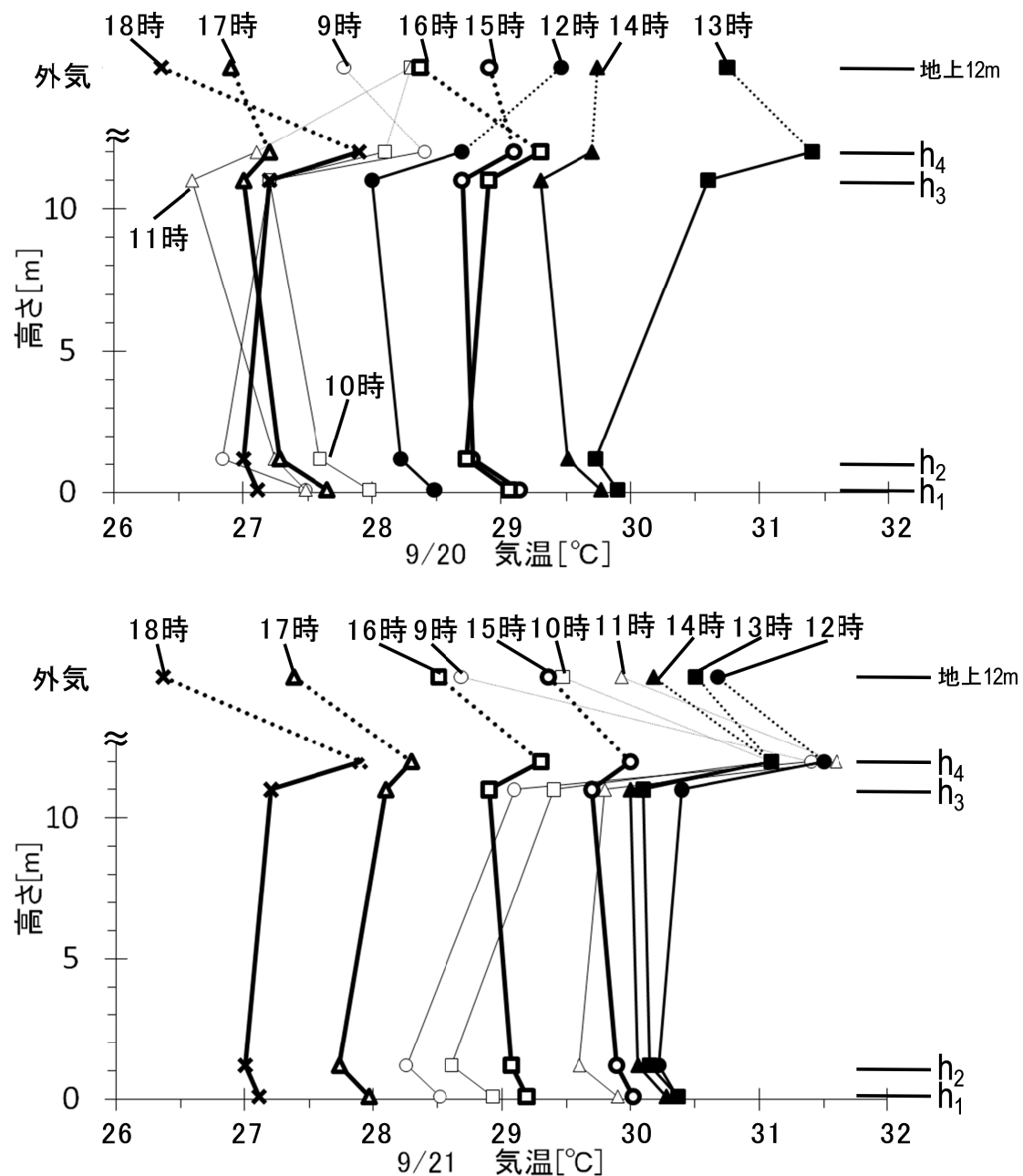


図2-40 膜下空間の時刻別鉛直方向の気温分布（上図：9/20，下図：9/21）

2-4-11 膜下生活空間における温熱環境の評価

1) 平均放射温度(MRT)

熱放射場が人体に及ぼす熱的影響を評価するために、その評価指標の一つとして平均放射温度(MRT)を用いることとした。梅干野らが開発した全球熱画像収録システムは、周囲全方位(4π)から測定点に到達する放射エネルギーを計測することにより、周囲の放射温度分布を表現する全球熱画像を作成することができる。収録された全球熱画像を用いて式(2-1)でMRTを算出することができる。

$$MRT = \sqrt[4]{\sum \epsilon_i \phi_i T_{si}^4} \quad \text{式 2-1}$$

T_{si} : 周囲空間の閉鎖面にある(i)微小面の放射温度

ϵ_i, ϕ_i : i 微小面の放射率, 対象点から微小面への形態係数

膜下空間の中央部高さ 1.2m において、測定した 9/21 の 5 時～20 時の MRT を図 2-4 2 に示す。8 時から 12 時まで MRT は膜下空間の気温より 0.5～3℃低かったが、12 時以降には逆転して 1℃以上の高い値を示していた。MRT は 15 時頃に最高となり、膜下空間の気温より約 4℃高い 34℃に達した。これは、膜材料の温度上昇と、膜材料を透過した日射に起因する床面の温度上昇等による結果である。また、膜材料により建物壁体や床から大気への放射冷却が遮られ、建物壁体や床に日中吸収された日射熱が蓄熱された結果、朝方 6 時まで MRT は膜下空間の気温より 2℃前後の高い温度を保っていた。

透過日射が膜下空間の放射環境に及ぼす影響について日射を考慮した MRT を用いて評価することにした。日射を考慮した MRT は表 2-1 2 の式(2-2)で算出した。MRT の算出には、人体を微小六面立方体に仮定した中村らのモデル²⁻⁵⁾を適用し、図 2-4 1 に示した等価形態係数や人体の日射吸収率等の設定値を使用した(表 2-1 2)。9/21 の 6 時～17 時に測定した 6 方向日射量や MRT 等を用いて日射を考慮した MRT を算出し、その結果を図 2-4 2 に示す。同図より、日射を考慮していない MRT (全球熱画像による値) に比べ、日射を考慮した方が 6 時～15 時の時間帯では 1～3℃、その他の時間帯では 1℃近く高くなっていた。また、12 時には膜材料からの透過日射が最も多いため、日射を考慮した MRT は最大となり、その値は膜下空間の気温より 6℃高い 36℃であった。

表 2-12 日射を考慮した平均放射温度の算出式²⁻²⁾

$$T_{r^*} = T_r + \frac{a}{h_r} \cdot \left(\frac{A_r}{A_D} \right) \cdot J \quad \text{式 2-2}$$

$$J = \sum_{i=1}^6 F_i \cdot J_i \quad \text{式 2-3}$$

T_{r^*} 日射を考慮した平均放射温度[K]

T_r 平均放射温度[K]

a 人体(着衣)の日射吸収率[-] (0.7と設定)

h_r 人体(着衣)に対する放射熱伝達率[W/m²・K] (4.1と設定²⁻⁶⁾)

A_r 人体(着衣)の有効放射面積[m²] (1.276と設定²⁻⁷⁾)

A_D 人体の体表面積[m²] (1.72と設定²⁻⁷⁾)

J 人体(着衣)に当たる全方向からの平均日射量[W/m²]

J_i 立方体のi方向を向いた面に対する日射量[W/m²]

F_i 立方体のi方向を向いた面から周壁全体を見る等価形態係数²⁻⁸⁾ [-]

人体を微小立方体に置き換えた場合の,xyz直角座標に沿っておいたi面からの人体形状に見合った重み係数。以下の設定値を用いた²⁻⁸⁾。

$F_1=F_2=F_3=F_4=0.168$ (図2-5に示した①～④方向の側面)

$F_5=0.138$ (上面), $F_6=0.190$ (下面)

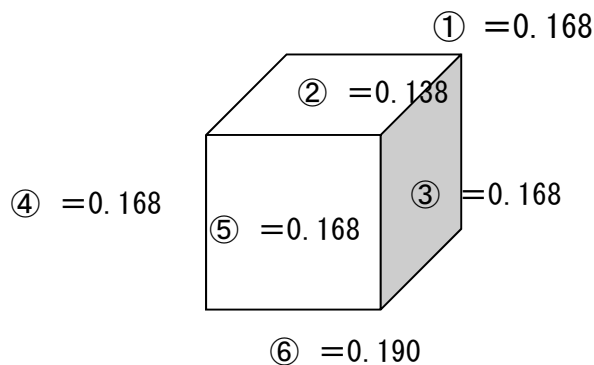


図 2-41 日射を考慮した平均放射温度算出時の
人体形状に見合った重み係数の概念図

2) 新標準有効温度 (SET*)

熱放射、気温、気流、湿度を考慮した温熱快適性指標である SET* を用いて膜下生活空間（地上高さ 1.2m）における温熱快適性を評価した。SET* の算出には、Gagge ら²⁻⁹⁾に提案された人体熱平衡モデルをもとに作成されたプログラムを用い、人体の着衣量と代謝量をそれぞれ 0.5clo（半袖シャツとズボンの着衣状態）と 1.5Met（ゆっくりした歩行時）に設定した。図 2-42 に、9/21 の 6 時～17 時に測定した気温や風速等のデータを用いて算出した SET* を示す。図中の SET* に注目すると、6 時から 15 時まで SET* の値は気温より 2～4℃ 高くなっており、最高で 31℃ に達した。16 時以降の SET* は気温以下に低下した。

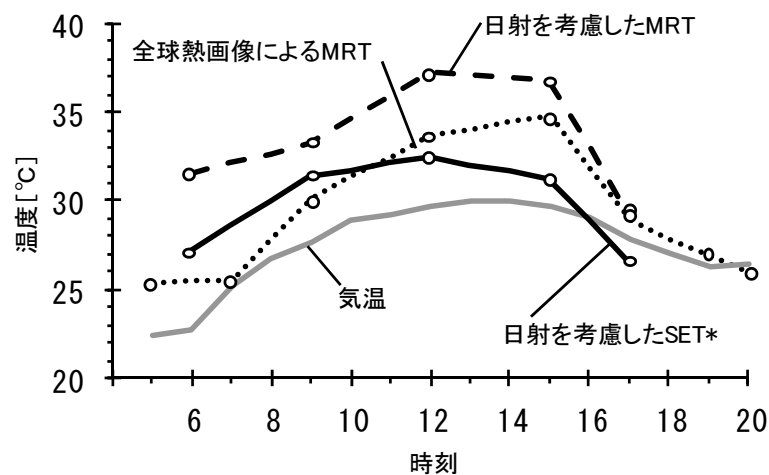


図 2-42 晴天日（9/21）における膜下生活空間の気温，MRT，SET*

2-5 予測・評価ツール構築のための配慮項目

実測結果より、半屋外の膜構建築空間の光・熱・風環境の特性が明らかとなった。そこで、膜下空間における光・熱・風環境の予測・評価ツールを構築する上で配慮すべき項目を図 2-43 にまとめた。

- ① 光環境で配慮すべき項目として、膜材からの可視光線透過量と多重反射による照度環境への影響
- ② 熱環境で配慮すべき項目として、膜材からの日射透過量と膜材の吸収率による表面温度への影響
- ③ 風環境で配慮すべき項目として、膜形態による気流停滞と熱溜りによる熱環境への影響

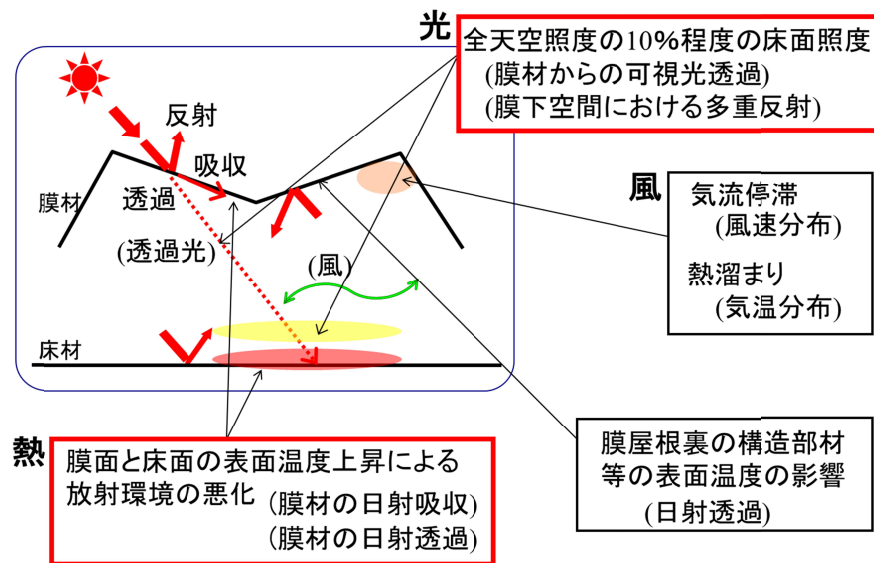


図 2-43 本予測・評価ツール構築のための配慮項目

2-6 まとめ

半屋外空間を有する膜構造建築物を対象として、まず材料試験により分光指向特性を把握した。次に、膜下空間に形成される夏季の光・熱・風環境について実測調査を行い、夏季晴天日における気流性状や気温分布等に関する実測データの解析により、以下の知見を得た。その上で、膜下空間の光・熱・風環境の予測・評価の構築に必要な開発要件を示した。

・膜材の材料特性

- 1) 予測・評価ツールに膜材の透過特性を再現する計算モデルを導入するため、代表的な膜材において、分光特性の測定により可視光域と日射域の透過率と反射率を、光線の広角散乱に関する試験により拡散性の扱いを明らかにした。

・膜下空間に形成された光・熱・風環境

- 2) 膜下空間においては、日中、膜材からの透過日射の影響により、床面の温度は膜下空間の気温より2～3℃程度高い値を示した。夜間では、日中の透過日射による床材への蓄熱および膜材料による天空への放射遮蔽により床表面温度は気温より2℃前後高い温度を保っていた。

- 3) 夜間には膜材料の表面温度は外気温またはそれ以下になるが、膜下空間の地面や壁面の表面温度は日中に地面や壁面に吸収された日射熱の放出(大気の放射冷却)が膜材料により遮蔽されているため、それらの表面温度は膜下空間の気温より高く、早朝でも膜下空間の平均放射温度は2℃程度高い値を示した。
- 4) 風の弱い晴天日における膜下中央部 (h=1.2m) の平均放射温度は、外気温より4℃程度高くなることを把握した。
- 5) 夏季晴天日において、膜下生活空間におけるSET*は日中に気温より2~4℃高くなっており、最高で31℃に達した。
- 6) 床表面の温度上昇や床材への蓄熱により、生活高さ1.2mの気温は床面近傍の気温よりも0.5℃前後高くなった。
- 7) 海風による通風があった場合、膜下空間の気温は外気温以下に低下した。外部風による通風が行われていなかった場合、膜下空間の気温は外気温より若干高くなっていた。
- 8) 波形状をしている膜屋根の裏面付近の気温は殆どの時間帯に外気温より高いことに加え、風速は常に弱い(0.5m/s前後)ことから、空気の停滞を確認できた。

本実測対象とした膜下生活空間においては、膜面近傍の気流停滞による熱溜り現象と膜材料からの透過日射による床表面温度の上昇がその温熱環境悪化をもたらす主要因であるという課題を明らかにした。今後、課題について影響要因を分析し、その対策方法を検討する必要がある。

【2 章の引用・参考文献】

- 2－1) 一般社団法人日本膜構造協会：膜材料の紹介，膜材料等認定品マップ，
<http://www.makukouzou.or.jp/index2.html>
- 2－2) JIS R3106：板ガラス類の透過率・反射率・放射率・日射熱取得率の試験方法，
1998
- 2－3) JIS K7136：プラスチック－透明材料のヘーズの求め方，2000
- 2－4) 日本分光株式会社：太陽電池関連分析技術(2)ヘーズ測定，
<http://www.jasco.co.jp/jpn/technique/solar2.html>
- 2－5) 浅野耕一，梅干野晁，山田貴代，松永徹志：建築外部空間における熱環境解析
のための3次元熱画像の作成に関する研究，日本建築学会計画系論文集，
No. 508，pp. 35-41，1998. 6
- 2－6) 梅干野晁，浅輪貴史，何江，平野絢也，涌井隆史：全球熱画像を用いた市街地
生活空間の熱放射環境評価，日本赤外線学会誌，第16巻2号，2007
- 2－7) 土川忠浩，坂本英彦，藏澄美仁，大和義昭：建築空間における歩行時の人体放
射・対流熱伝達率に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集(九州) 環
境工学Ⅱ，pp. 399～400，2007. 8
- 2－8) 尾関義一，小西正哲，成田千恵，田辺新一：数値計算による人体の有効放射面
積の評価，日本建築学会計画系論文集，第525号，pp. 45～51，1999. 11
- 2－9) A.P. Gagge, A.P. Fobelets, L.G. Berlund: A standard predictive index
of human response to the thermal environment, ASHRAE Transactions 91-B,
pp. 709-731, 1986

[注]

- 注 1) 短波長放射は，太陽放射（直達日射，天空日射）およびその地物からの反射を
対象とし，波長 $0.3 \sim 3 \mu\text{m}$ の放射
- 注 2) 長波長放射は，屋根面，地面，及び建物壁面等といった生活空間を構成する面
からの常温域の熱放射で波長 $10 \mu\text{m}$ 前後の放射
- 注 3) 筆者らが開発した全球熱画像収録システムは，赤外線放射カメラを鉛直方向と
水平方向に自動旋回させることで，収録地点の周囲 4π （全球）方向の放射温度
分布を取得し，全球の熱画像を作成するシステムである²⁻⁶⁾

第3章 透過日射を考慮した膜構造建築空間における 光・熱環境の予測手法の開発

- 3-1 はじめに
- 3-2 光・熱環境のトレードオフを考慮した膜下空間の設計支援の方法
- 3-3 膜材の透過特性を考慮した光・熱環境の予測手法
 - 3-3-1 光・熱環境の予測・評価手法構築のための検討項目
 - 3-3-2 光・熱環境の予測・評価手法の適用範囲
 - 3-3-3 予測・評価手法の計算方法
- 3-4 膜下空間における昼光照度計算モデルの導入
 - 3-4-1 昼光照度計算アルゴリズムの開発
 - 3-4-2 計算精度の検討
 - 3-4-3 膜下空間における昼光照度計算の予測精度
 - 3-4-4 輝度画像による光環境評価に向けた検討
 - 3-4-5 膜材の透過光を考慮したベクトル照度の算出
- 3-5 膜下空間における熱収支計算アルゴリズムの機能拡張
 - 3-5-1 既往のシミュレーション手法の概要
 - 3-5-2 膜材料の特性を考慮した熱収支計算モデルの導入
 - 3-5-3 計算結果の検証
 - 3-5-4 膜材の透過日射を考慮した平均放射温度（MRT）の算出
- 3-6 まとめ

3-1 はじめに

近年、屋外に開かれた公共広場やプラットホーム等の半屋外生活空間においては、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。膜構造建築物は、軽量性、柔軟性等の特徴を有しているため公共施設の屋根や壁に使用されている。半屋外の膜構造建築空間（以下、膜下空間という）において、膜材料が 10～30%程度の可視光線を透過する性質を有するため、日中の膜下空間では昼光利用が可能となる。一方、熱環境においては、膜材料が高反射性の材料であるため、その表面温度はあまり上昇しないが、透過した日射と、それによる膜下空間の地物の表面温度の上昇により、放射環境の悪化が考えられる。つまり、膜材料を利用することで、光環境と熱環境の間でトレードオフの関係が生じている。

設計実務では、膜下空間の光環境を考慮しながら、同時に熱環境を緩和する設計提案が求められている。そのため、設計の流れの中で光・熱環境のトレードオフを定量的に評価する予測・評価ツールの構築が必要となる。

本研究では、半屋外空間を有する膜構造建築物を対象に、著者ら³⁻¹⁾が開発した 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による表面温度分布を予測・評価する手法を開発しており、それをベースに設計実務において光・熱環境の予測・評価手法を活用した設計支援の考え方を提案する。また、外部環境が膜下空間の光・熱環境に及ぼす影響を考慮した上で、トレードオフの関係性から予測を可能とするシミュレーションツールを開発する。具体的には、以下の2点について検討を行う。

(1)外部環境の影響を考慮した膜下空間の光・熱環境の設計支援手法の提案

(2)設計支援を目的とした膜下空間の光・熱環境を並列に予測するための計算アルゴリズムの開発

(1)では膜下空間の光・熱環境のトレードオフの関係性から設計できるように、従来の膜構造設計プロセスに合致させ、並列に検討するための設計手法を提案する。(2)では、著者ら³⁻¹⁾が開発した 3D-CAD 対応熱環境シミュレーション（以下、既往のツールという）の計算アルゴリズムをもとに光・熱環境の連動計算アルゴリズムの開発を行う。

3-2 光・熱環境のトレードオフを考慮した膜下空間の設計支援の方法

膜構造建築物を構成する膜材は、柔軟で引張強度の高い材料である。そのため、曲面を生かした形態は、建築デザインであると同時に、構造性能を発揮する構造物でもある。したがって、意匠と構造が密接に関係している。また、それらのデザインの違いが光や熱といった外部環境に対して大きな影響を与えるため、膜下空間の光・熱環境に配慮した設計を行うためには意匠と構造と並列に、環境設計を進めていくことが求められる。

膜構造建築物の設計は、一般の建築設計と同様、計画設計から基本設計、実施設計へと設計プランを収斂させて行く（図3-1・A）。各設計段階において、膜構造建築物

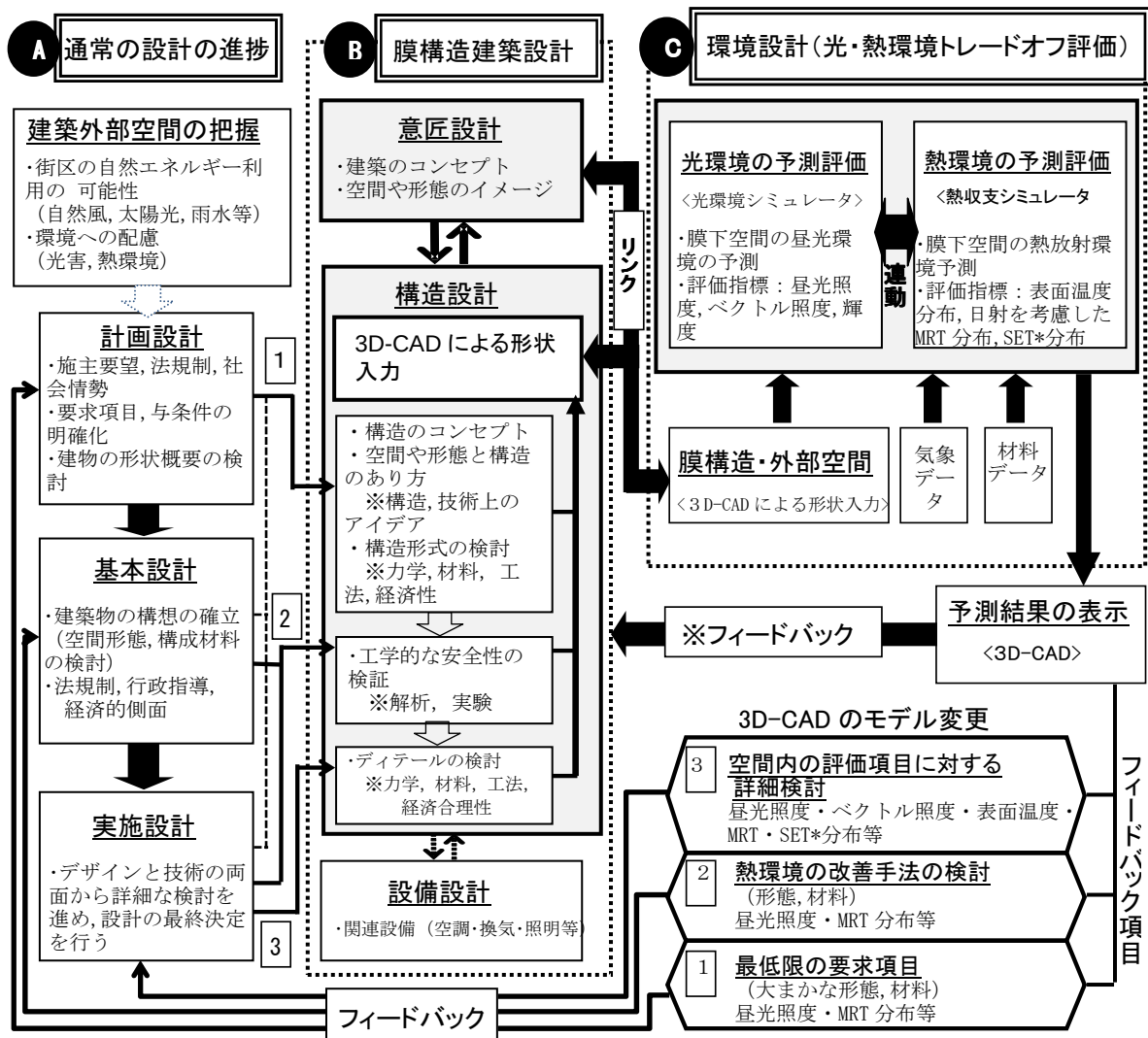


図3-1 設計プロセスと膜構造設計の関係および光・熱環境の設計支援概要例

の構造設計³⁻²⁾（以下、膜構造設計という；図3-1・B）は、意匠と構造のバランスを見ながら構造の形式と形態を提案し、設計者や施主等とコミュニケーションをしながら、試行錯誤し、方針を決定する。本研究では、これまでの膜構造設計プロセスの中に、膜構造建築物の形式と形態が大きく影響する光・熱環境の要素を設計初期段階から導入することを考える。つまり、設計の初期段階から意匠と構造と並列に評価ができるように環境設計を加える（図3-1・C）。ここでは、予測・評価結果を膜構造設計プロセスへ効率的に反映し、各設計段階における支援を意識した手法構築のために、以下の項目を前提とした検討を行う。

① 設計プロセスにおける光・熱環境に対する要望の把握

一般的な建築設計は、施主要望、法規制、経済性、環境への配慮等あらゆる要素をもとにコンセプトを固めて行く。また、設計段階が進むにつれ、空間形態や構成材料が具体的に決定され、設計条件の制限が大きくなり、予測・評価結果をフィードバックしにくくなる。図3-1に示すように、建築外部空間からの影響や地域特有の自然エネルギーを有効利用する方法等、環境決定要素を明確にした上で、設計の段階を追って適宜必要な予測・評価を行い、各設計段階において具体的な設計方針が決定できる柔軟な手法が必要である。たとえば、計画設計段階では、自然エネルギー利用の可能性を検討し、光・熱環境のトレードオフ評価により最低限の要求項目を満足した空間構成要素の概略が提案でき（図3-1の①）、基本設計段階では、光・熱環境のトレードオフ評価から熱環境改善手法を含む構成材料と、それらの配置計画の構想を確立し（図3-1の②）、実施設計段階では、デザインと構造、熱環境対策技術の観点から詳細な検討を実施し、計画を最終決定する（図3-1の③）といった関係である。

② 外部空間の設定スケール

実務設計において膜構造建築物の外部空間を設定する際、膜下空間の光・熱環境への影響を把握できる事が前提となる。光・熱環境では、最低でもその影響は近接する地物が設定される必要がある。一方、実務において扱う範囲が広すぎると設計時間の負荷が大きく現実的ではなくなるため、地域の気候特性の概略を把握した上で、街区スケールを決定する。

③ 評価対象となる空間構成要素

設定した街区スケールに対し、外装建材、土地被覆材料、樹木等、その他膜構造建築物の光・熱環境に影響を及ぼす空間構成要素が対象となる。

④ 設計支援における光・熱環境の評価項目・判断指標

外部空間の構成要素や膜材の材料特性等をパラメトリックに変化させ、膜下空間の視覚的、熱的影響分析を検討する場合、照度分布やSET*分布による評価指標だけでなく、空間構成要素が特定できるように表面温度や輝度などの値も必要となる。また、空間構成要素を変更した場合、光・熱環境は直接的に決められることを考慮すると、設計プロセスの各段階に応じて、設計へのフィードバックに必要十分な評価指標を適宜選択して評価できるツール構成とすることで設計支援の柔軟性と即応性が高まると考えられる。

⑤ 評価結果のフィードバックの方法

膜構造建築物の環境設計は、膜下空間において、視覚的に良好な光環境と同時に、快適な熱環境を創出することを目指しているため、膜構造建築物だけでなく、周辺建物の壁面や床面等を含めた生活空間全体の評価が必要になる。そのため、膜構造建築設計に関わる意匠設計者や構造設計者、環境設計者が連携して設計作業を進めることが重要となる。

これまでの設計プロセスにおいて、意匠設計者と構造設計者、膜面メーカー等がそれぞれの設計範囲の中で実施されてきた設計行為において、明確に作業が区別されていることが多く、図面データをもとにコミュニケーションをすることが一般的だった（図3-2・左）。今後、光・熱・風環境に配慮した膜下空間を設計提案するためには、設計実務に関わる設計者が、膜下空間の環境情報を連携する必要がある。ここで、本手法を用いることにより、計算対象地における膜構造建築物や周辺建物、樹木等の空間形態と構成材料の情報を3D-CADモデルにより再現できる。つまり、従来の設計プロセスに、本手法を取り入れることで、対象モデルに対し、空間形態、構成材料と光環境、熱環境の関係を把握できる評価手法を導入することで、意匠、構造が保守してきた設計案に対して、環境面から課題を抽出し、フィードバックすることで、これまでのデザインに環境面の価値を付加できるものとする（図3-2・右）。ここで、表3-1に膜下空間の光・熱・風環境の評価結果のフィードバックのフローを示す。

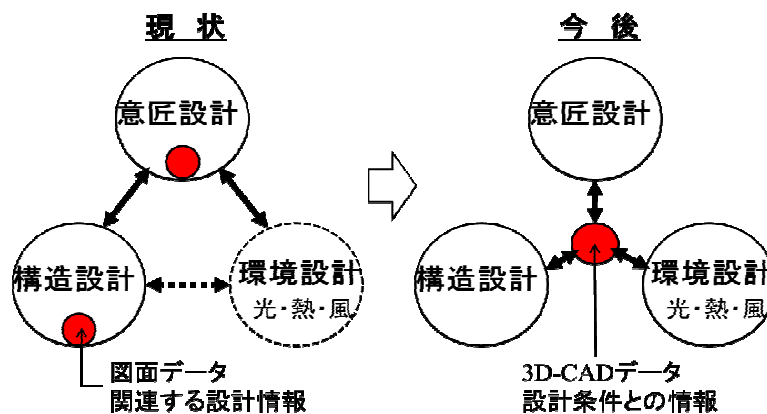


図 3-2 各設計における設計情報の伝達

表 3-1 評価結果のフィードバックの方法

意匠設計	構造設計	環境設計
3D-CAD入力データ ①変更前		
※施主とコミュニケーション		
変更案：施主要望、要求項目等の確認		
フィードバック		
※コミュニケーション		
3D-CAD入力データ ②変更案		
3D-CAD入力データ ③変更後		

3-3 膜材の透過特性を考慮した光・熱環境の予測手法

設計初期段階から光・熱環境の予測・評価を進めるには、計算のための作業負荷や計算時間の低減を図る必要がある。そこで膜下空間の光環境と熱環境を並列に解析できるように、建築外部空間の形状モデルや気象データ、日射解析など類似する箇所を統合し、連動計算環境を構築する。また、本研究では、設計実務において短時間でパラメトリックな提案ができることを前提に、光・熱環境のトレードオフの関係性を大まかに評価することを前提に、空間形態や構成部材を決定し、設計初期段階から予測ができるよう構築する。光環境では水平面照度分布により、熱環境では表面温度と日射を考慮した平均放射温度（MRT）分布により評価する。以下に、光・熱環境の予測・評価手法構築のための検討項目と予測・評価手法の枠組みについて述べる。

3-3-1 光・熱環境の予測・評価手法構築のための検討項目

本手法は膜構造建築物を含む外部空間を対象とするため、既往のツールを踏襲しつつ

表 3-2 光・熱環境に影響を与える配慮項目と本手法の対応

建築外部デザインに起因する要素			自然現象に起因する環境要因		
建 物	形状(平面、高さ)	A	気 象 条 件	日射量	A
	建具等の凹凸の影響	E		気温	A
	色	A		相対湿度	A
	材料の表面性状(指向性)	A		雲量	A
	日射吸収率	A		風速	A
	日射反射率	A		気温・風速分布	E
	長波長放射	A		降雨時の天候考慮	F
	容積比熱	A		潜熱移動	E
	対流熱伝達率	A		水平面全天空日射量	A
	熱伝導率	A		大気放射量	A
	土地被覆	A		対流熱伝達率	A
樹 木	形状	A		樹木等の蒸散作用	A
	日射透過率	A			
膜構造建築物に影響を受ける環境要因			立地に起因する要素		
光 環 境	直射日光(発光効率)	C	地 面	土地起伏	E
	天空光(天空輝度分布を考慮)	C		計算領域外の状況	F
	天空率	A		河川等の水面	F
	反射光(指向性を考慮)	A	光環境評価指標		
	反射光(拡散性を考慮)	A	昼光照度分布	C	
	多重反射	A	輝度分布(拡散条件)	C	
	透過光(指向性を考慮)	A	ベクトル照度分布	C	
	透過光(拡散性を考慮)	C			
熱 環 境	直達日射	A	熱環境評価指標		
	天空日射(放射輝度分布を考慮)	A	表面温度分布	A	
	天空率	A	放射量分布(透過日射考慮)	B	
	大気放射量(天空輝度分布を考慮)	A	平均放射温度(MRT)分布(透過日射考慮)	B	
	反射日射(指向性を考慮)	A	SET*分布(日射考慮)	E	
	反射日射(拡散性を考慮)	A			
	多重反射	A	トレードオフ評価		
	透過日射(指向性を考慮)	A	視認性(昼光照度)と熱環境(MRT)	C	
	透過日射(拡散性を考慮)	C	明るさ感と熱環境	F	
	長波長放射	A	輝度対比と熱環境(表面温度)	D	
	気温・気流の分布	D	グレア(ベクトル照度)と熱環境(放射量)	C	
	熱伝導(膜材の特性考慮)	B			

【凡例】

- A: 「既往のツール」の方法を踏襲
 - B: 本予測・評価手法構築にあたり大幅に変更したもの
 - C: 本予測・評価手法構築に新たに導入したもの
 - D: 光・熱環境のトレードオフ評価を行うにあたり、今後考慮が必要
 - E: その他、今後考慮が必要な項目
 - F: 上記以外(当面对象としない)
- ※網掛け部分は、本予測・評価手法に導入検討を行った項目

も、光環境計算を行う連動解析部分においては新たな計算アルゴリズムを導入する。表 3-2 に光・熱環境の予測・評価に影響を与える配慮項目の一覧を示す。

設計初期段階においては、大まかな空間形態と材料の違いを評価する必要があり、表 3-2 中 A～C の項目がそれらに当たる。本研究では、その中でも既往のツールを拡張することが対応する項目 B と光・熱環境のトレードオフの関係性を評価する上で優先的に予測・評価手法に組み込む項目 C について開発を進めた。

本報では、その中でも本ツールの根幹をなす以下の 2 点について述べる。

- ① 膜材の透過特性を再現する計算モデルを導入する。
- ② 膜材からの可視光線の透過を考慮した光環境の計算を行うために、昼光照度計算アルゴリズムを導入する。

3-3-2 光・熱環境の予測・評価手法の適用範囲

表 3-3 に本手法の適用範囲を示す。

表 3-3 本手法の適用範囲

予測手法		
光環境	透過光 (拡散性を考慮)	透過指向性の影響の大きい膜材については、適用外とする
熱環境	透過日射 (拡散性を考慮)	透過指向性の影響の大きい膜材については、適用外とする
	気温・気流の分布	気流停滞による熱溜りの影響が発生するような場所が存在する場合、その影響を考慮する必要がある。 (第 2 章 2-4-10 を参照) (注 3)
評価指標		
光環境	輝度分布 (拡散条件)	拡散条件のもと光束発散度を計算しているため、主に指向性のある材料で構成される空間については、誤差の要因となるため注意が必要である。
熱環境	SET*分布 (日射考慮)	下記に示す影響が考えられるため、評価の際注意が必要である。 ①風速の影響が大きくなるすぎる恐れがある。 ②SET*による温熱感覚の快適範囲は室内より屋外の方が広い ③温熱感覚の快適範囲は人や地域により異なる。

3-3-3 予測手法の計算方法

図 3-4 に構築する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材料の再現

計算対象となる空間形態や構成材料に関する情報は、意匠と構造の設計で活用した 3D-CAD モデルを用いて、3 次元幾何形状を再現した上で、各メッシュ面に、法線の向きや部位、材料特性等の情報を格納する。次に、作成された CAD モデルから自動的にメッシュモデルを作成する。このメッシュモデルは、光・熱環境の両方の解析に用いる。また、メッシュモデル作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³⁻³⁾。

2) 光・熱環境の連動解析

光環境と熱環境のトレードオフの関係性を評価するために、同条件で計算できることが望ましい。そこで、光環境の計算を行う際は、光・熱環境を同条件で連動計算できるように、気象データベースの日射量と井川ら³⁻⁴⁾の発光効率を用い、昼光照度を求める。

まず、対象範囲内の膜構造建築物を含めた周辺建物の外表面の日射解析と熱収支計算により表面温度を算出する。尚、熱環境の計算は、著者ら³⁻⁵⁾が開発した膜材の伝熱計算モデルを適用する。次に、後述するように、可視光線の反射や透過を考慮した光束発散度を計算し、参照点の昼光照度を算出する。ここで用いる膜材の透過率、反射率については、次章で述べる透過・反射特性を測定した上で評価し、可視域、日射域のそれぞれについてデータベースを作成している。

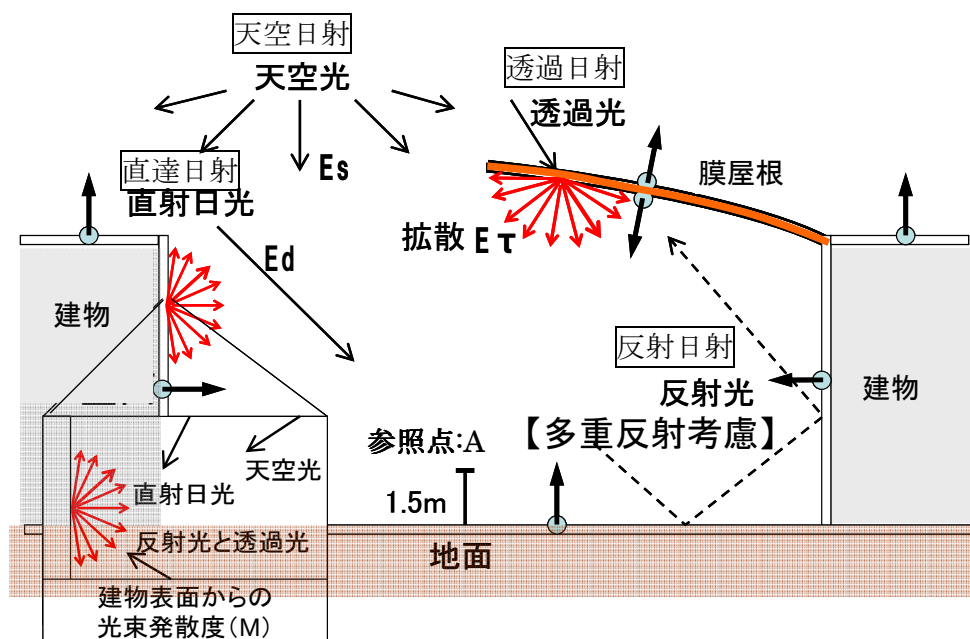
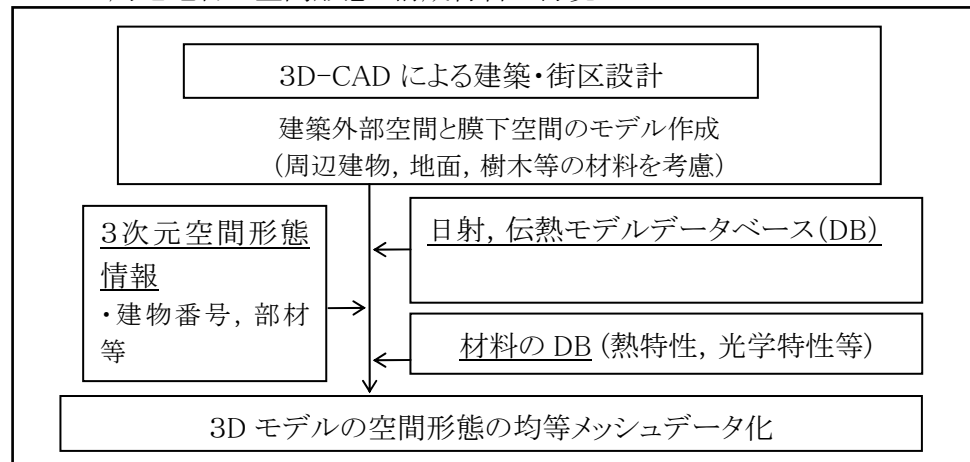
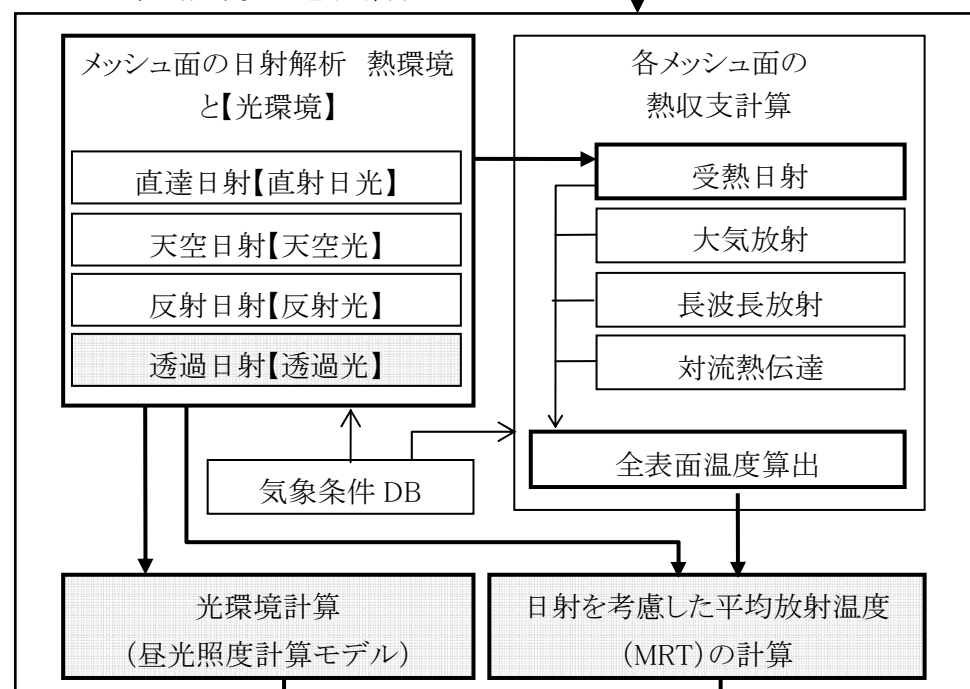


図3-3 昼光照度計算と日射計算項目との関係

INPUT: 周辺地物の空間形態と構成材料の再現



SOLVER: 光・熱環境の連動解析



OUTPUT

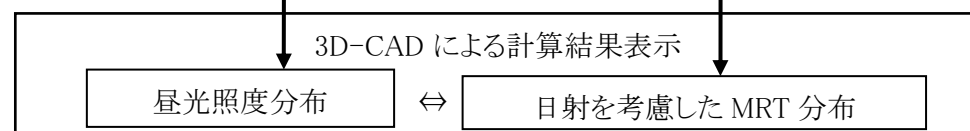


図 3-4 構築する予測・評価手法の計算フロー

3-4 膜下空間における昼光照度計算モデルの導入

図3-3に本予測・評価ツールの日射解析の概要を示す。日射解析は、光環境と熱環境の解析において同じ要素について解析を行うため、併記した。

3-4-1 昼光照度計算アルゴリズムの開発

昼光照度は、直射日光および天空光による直接照度と、反射光と透過光による間接照度に分けて計算する。本報では、既往のツールに膜材の光学特性を考慮した昼光照度計算アルゴリズムを導入する。

1) 直接照度の算出

直射日光による直接照度 (E_d)

直射日光による直接照度はレイトレーシング法により計算する。参照点から太陽位置に探索線射出を行い、計算領域外へ到着した場合、直射日光を取得し、式(3-1)で算出する。

$$E_d = \eta_s \cdot I_{DR} \cdot \delta_{di} \quad \text{式 3-1}$$

ここで、 $\eta_s = (-7.87\gamma_s^4 + 40.56\gamma_s^3 - 78.43\gamma_s^2 + 68.05\gamma_s + 35.16) \cdot I_{DR}^{1.1} / I_{DR}$

η_s : 井川ら⁷⁾が実測結果をもとに求めた直達日射量[W/m²]の発光効率[lm/W]

I_{DR} : 直達日射[W/m²], γ_s : 太陽高度[rad]

$\delta_{di} = 1$: 探索線が計算領域外へ到着し、直射日光を取得する場合

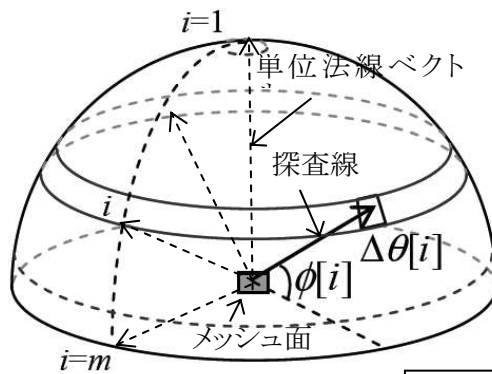
$\delta_{di} = 0$: 探索線が計算領域内へ到着し、直射日光を取得しない場合

天空光による直接照度 (E_s)

天空光による直接照度は、井川ら³⁻⁶⁾の提案する All Sky Model-L を用いて、天空輝度分布を再現し、参照点に対して法線方向に対して、半球を等立体角投影率になるように分割した上で、マルチレイトレーシング法により、その分割方向に探索線を射出し、微小天空要素の輝度を求めて積算し、算出する

ここで、探索線方向の設定について、図3-5に示す。

- ① 微小面（メッシュ面ともいう）での法線向きに単位半球を仮定する
- ② 単位半球を等形態係数となるように n 個に分割する
- ③ 分割した面の中心を通る単位ベクトルを算出する
- ④ 算出した単位ベクトルに All-Sky Model-L を用いて天空輝度分布を算出する
- ⑤ 算領域内の上記③で求めた単位ベクトル方向に光線追跡を行い、計算領域外に到達した場合、微小面に上記④で計算した天空輝度値を加える
- ⑥ 上記⑤を分割数分繰り返し、すべての光線追跡が終了したら、積算した値を分割数 n で除すことで微小面の天空光による直接照度を算出する



$$m = \sqrt{\frac{N}{\pi + 1}}$$

$$n[i] = \pi \times (2 \times i - 1)$$

$$\phi[i] = \cos^{-1} \left(\frac{2 \times i - 1}{2 \times m} \right)$$

$$\Delta\theta[i] = \frac{2\pi}{n[i]}$$

N : 探索線の総数
 m : 鉛直方向の分割数（四捨五入）
 $n[i]$: 水平方向の分割数（四捨五入）
 $\phi[i]$: i 番目の探索線の鉛直角度
 $\Delta\theta[i]$: i 番目の探索線の水平分割角度

図 3-5 探索線方向の設定

2) 間接照度の算出

間接照度は、まず対象空間を構成する地物表面の全メッシュについて光束発散度を計算する。以下に算出方法を示す。

- ① 1 回目の計算では、全メッシュが受ける直射日光と天空光による直接照度を式(3-2)で算出する。

$$j=1 \text{ のとき } \Delta E_{1i} = E_d \times \delta_{di} + E_s \times \phi_i \quad \text{式 3-2}$$

- ② 各メッシュにおいて計算された直接照度に、可視光線反射率または透過率を乗じ、光束発散度を式(3-3)で算出する。

$$\Delta M_{jk} = \rho_k \Delta E_{jk} + \overline{\tau_k} \times \overline{\Delta E_{jk}} \quad \text{式 3-3}$$

- ③ ②で求められた光束発散度より，マルチレイトレーシングを用いて各メッシュの間
接照度を式(3-4)で計算する。

$$j=2\sim m \text{ のとき} \quad \Delta E_{ji} = \sum_{k=1}^S C_{ik} \times \Delta M_{(j-1)k} \quad \text{式 3-4}$$

- ③ 膜下空間では多重反射を考慮するため，各メッシュにおける間接照度と光束発散度
を計算回数繰り返し，それぞれ式(3-5)と式(3-6)で算出する。

$$E_{tmi} = \sum_{j=1}^m \Delta E_{ji} \quad \text{式 3-5}$$

$$M_{tmk} = \sum_{j=1}^m \Delta M_{jk} \quad \text{式 3-6}$$

ここで，反射光の再現については，メッシュ面に到達した直射日光と天空光から，鏡面・
拡散成分ともに計算する。鏡面反射は，反射面において，直射日光の反射角方向にトレ
ースし，到達地点のメッシュ面に反射光を与える。拡散反射は，均等拡散条件とし，メ
ッシュ面から周辺半球方向へ探索線射出を行い，到達地点が拡散反射面の場合，その反
射光を取得し算出する。透過光は反射光と同様にメッシュ面を透過した裏面において正
透過成分または拡散透過成分に分離し計算する。ここで膜材からの透過光は4章の結果
より，均等拡散条件とし計算する。

3) 参照点における水平面昼光照度の算出

参照点における昼光照度は，参照点に入光する直接照度と m 回反射後の各メッシュ
の光束発散度から式(3-7)により算出する。

$$E_{tmA} = E_d \delta_{dA} + E_s \phi_A + \sum_{k=1}^S C_{Ak} M_{t(m-1)k} \quad \text{式 3-7}$$

δ_{dA} : 任意基準点 A において直射日光を受光する場合， $\delta_{dA}=1$

直射日光を受光しない場合， $\delta_{dA}=0$

φ_A : 任意基準点 A における天空率

E_{tmA} : 計算回数 m の任意基準点 A における合計照度 [lx]

$M_{t(m-1)k}$: 計算回数 $m-1$ の k 番目における合計光束発散度 [lm/m²]

C_{Ak} : 任意基準点 A から k 番目の発光面が占める形態係数

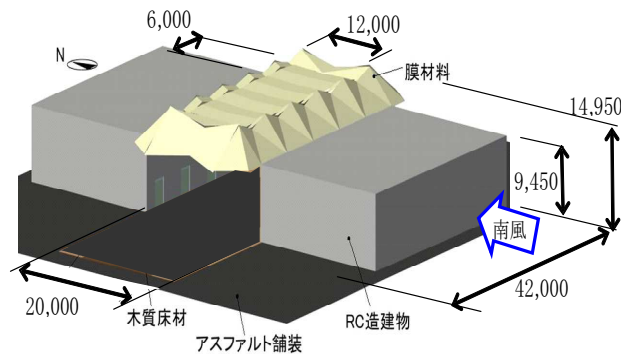


図 3-6 解析用 3D-CAD モデル

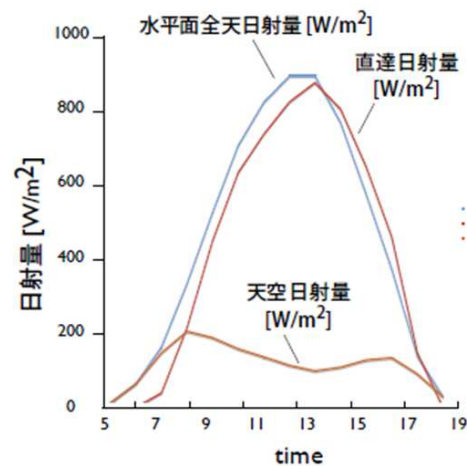


図 3-7 気象条件

3-4-2 計算精度の検討

膜下空間の光環境を評価する場合、熱環境に比べ空間内の日射反射の影響が大きく出る。そこで、参照点における昼光照度の計算精度を向上するため、探査線数と反射回数を増加し計算することが考えられる。しかし、計算負荷を増加させる結果となるため、設計実務を考慮すると最適数を決定する必要がある。ここでは、探査線数と反射回数が昼光照度に与える影響の関係から計算精度を検討する。

対象モデル（図 3-6）の参照点（膜下空間の中央床面から高さ 1.5m）における水平面昼光照度の算出を行う。計算精度の指標としては Root Mean Square Error (RMSE) ^{注 9)} を用い、参照点から探査線を射出した場合、到達したメッシュ数が最大となる探査線の本数を最も正しい値であるとして、その本数より探査線を減らし算出した昼光照度の誤差を検討した。最大となる探査線数の設定は、膜下空間の影響を反映できるメッシュ数として床、壁、屋根面を構成する各メッシュから探査線を射出した際、空間内のメッシュに到達する本数が最大となる 18,165 本である。ここで、精度の許容値は 50lx とした。精度の許容の設定については以下の条件を考慮する必要があり、その要求レベルに応じて変更することができる。

また、気象データは、空気調和・衛生工学方式による東京都の夏季晴天日とする。水

平面全天日射量と直達成分と天空成分の日変化を図 3-7 に示す。

1) 探索線数の計算精度

図 3-8 に計算結果を示す。9 時から 15 時における探索線数と水平面昼光照度の

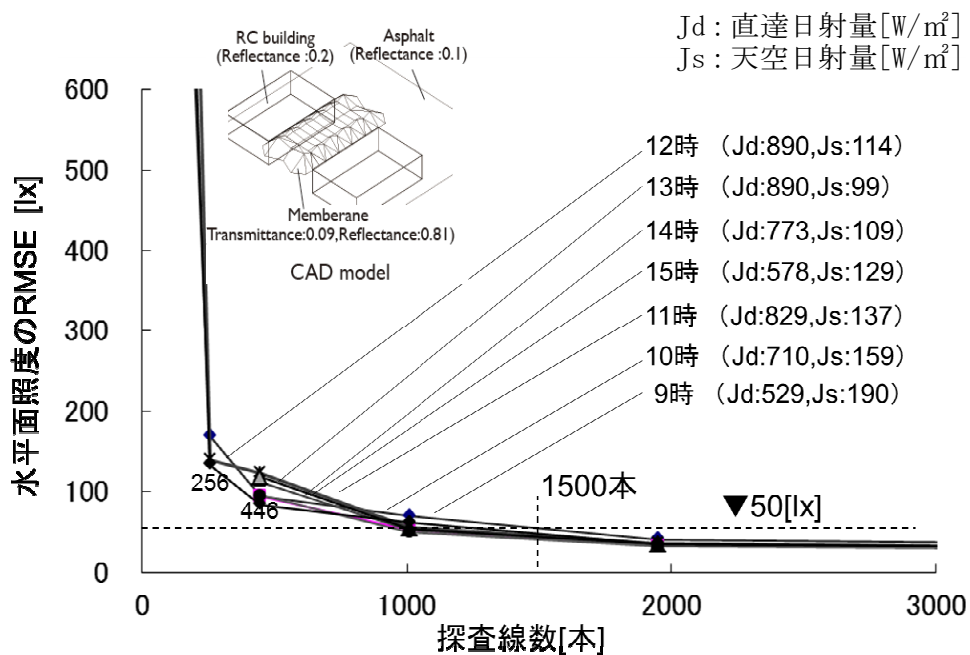


図 3-8 探索線本数と昼光照度の RMSE の関係

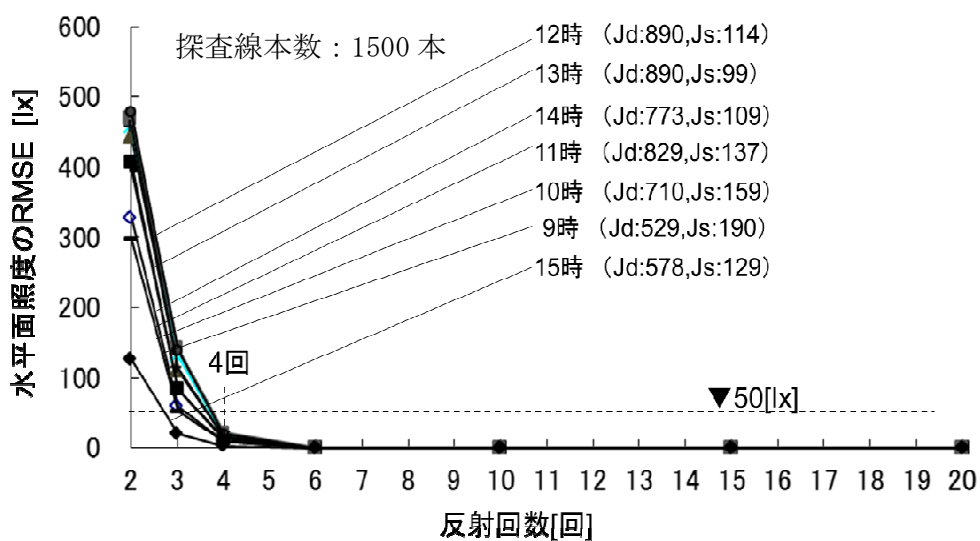


図 3-9 反射回数と昼光照度の RMSE の関係

RMSE の関係を示す。探索線数が増加するとともに、RMSE の値は減少した。しかし、およそ 446 本の探索線数の時、RMSE の変化は小さくなった。また、1500 本の探索線が適用された時、水平面昼光照度の誤差は 50lx 未満となり、評価精度として許容されるとみなし、探索線数の最適値を 1500 本とする。

2) 反射回数の計算精度

探索線数 1500 本を用いて膜下空間における反射回数（計算回数－1）を検討する。計算回数は 20 回のときに得られた昼光照度を正しい値であるとして、20 回より計算回数を減らし算出した昼光照度の誤差を検討する。計算精度の指標は RMSE^{注 4)} を用いる。図 3－9 に 9 時から 15 時における計算回数と参照点における昼光照度の RMSE の関係を示す。計算回数が増加するとともに、RMSE の値は減少し、およそ 4 回の計算回数の時、昼光照度の誤差は 50lx 未満となり、計算回数の最適値を 4 回とする。

3－4－3 膜下空間における昼光照度計算の予測精度

膜下空間における光環境の予測精度について、開発した光・熱環境予測ツールを使用し、第 2 章の計算モデル（図 3－6）における昼光照度の計算値と実測値を比較することで、計算精度の検証を行う。ここで、気象条件は夏季の晴天日に取得した実測データ（図 3－7）を用いる。

図 3－10 に水平面照度の測定位置を、図 3－11 に実測結果を示す。測定位置は、膜下空間の照度分布の様子が確認できる 9 点（a1～c3）を選定した。実測値は、直達日射が入射しやすい 8 時と 16 時、膜材料を透過する日射の影響が支配的と考えられる 12 時について行った。

図 3－12 に、膜下空間における昼光照度の計算結果を示す。鉛直方向に昼光照度 [lx] を示す。実測値に対する計算値は、8 時で 6,500lx に対し 6,616lx で 2% 程度、12 時で 7,000lx に対し 7,010lx で 0.1%、16 時で 2,600lx に対して 2,910lx で 10% 程度の誤差であった。16 時については、看板や樹木の再現をしていないために計算

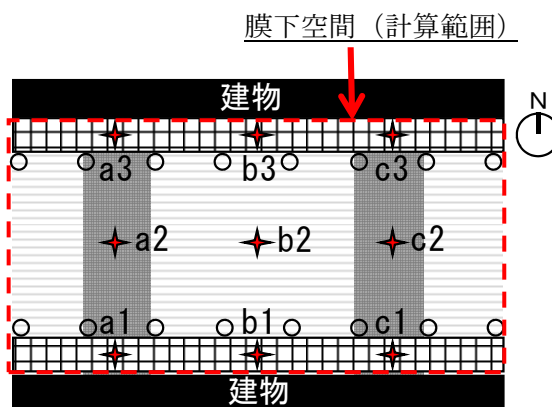


図 3－10 照度測定位置

値の方が高めの値となった（図 3－1 3）。校正部材の影響が少ない 12 時において、照度の予測は妥当といえる。

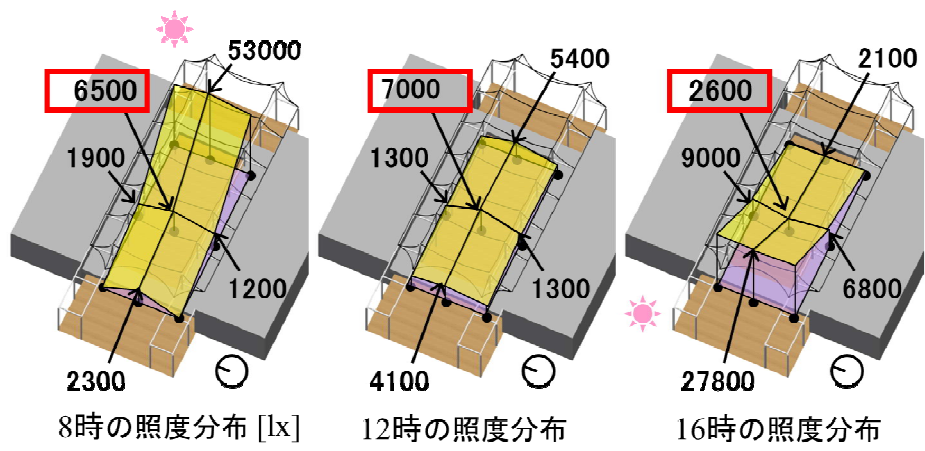


図 3－11 実測による水平面照度の日変化

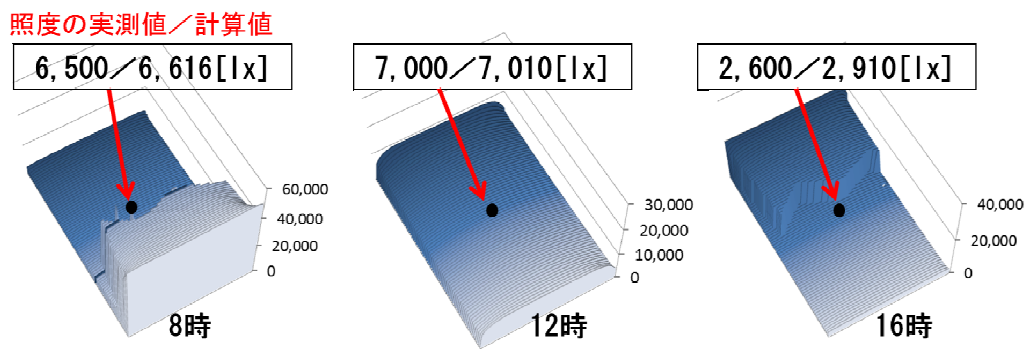


図 3－12 水平面昼光照度の計算結果と膜下中央における実測値との比較

表 3－4 照度の比較（12 時）

測定点	実測値[lx]	計算値 [lx]
a2	4100	5390
b2	7000	7010
c2	5400	6110
屋外	101400	101400



図 3－13 膜下中央から西側を見た可視画像

また、表 3-4 に 12 時における膜下空間の 3 点（図 3-12 の a2,b2,c2）の照度の実測値と計算値を示す。ここでは、膜材料からの透過光が膜下空間への影響を確認するため、膜下空間に存在する渡り廊下や付帯設備、樹木等の地物を CAD 上で再現していない。そのため、透過光に加え、開口部からの天空光による入射光の影響が顕著にでており、計算値に方が 1,000[lx]程度高めの値を示した。以上より、膜下空間の昼光照度の予測値は、膜材料からの透過光の影響が大きい 12 時において有効性が示された。また、評価対象点によっては、構成部材の再現性が照度計算に影響が出ることから、その判断に注意を要する。

3-4-4 輝度画像による光環境評価に向けた検討

本研究が目指す設計支援のための光・熱環境の予測・評価手法は、視覚的效果を評価するため明るさ感といった指標は今後の課題としている。しかしながら、昼光を快適性の観点から評価する上で順応を考慮することは重要である。そこで本研究の光環境の評価の考え方として、光の指向性を考慮した厳密な計算をするのではなく、トレードオフ評価による判断がしやすくなるように、表面温度分布画像と比較できる輝度画像による出力により評価する。したがって、計算モデルを均等拡散面と仮定したときの光束発散度分布から輝度画像を作成し、第 2 章の実測モデルにより光環境の評価の可能性を示す。

1) 夏季晴天日における輝度の検討

膜下空間において、開口部からの直射日光の入射量が大きな時間帯はグレアが生じることが考えられる。グレアの状況を把握するために、膜下中心点 b の高さ 1.2m に視点を置き(図 3-14)、評価の時間は開口部からの入射光の影響が大きいと考えられる 9 時と 15 時とする。9 時においては視点から東側を、15 時においては視点から西側方向の輝度画像で評価する。ここで、画角は人間の注視角を想定し、水平面 90°、鉛直面 70° の範囲とする。図 3-15 に輝度画像の結果を示す。

夏季の晴天日において、9 時では膜面が 400-500cd/m² の分布であるのに対して、開口部が 5,000-6,000cd/m² で膜面の 10 倍大きな値であった。15 時では膜面が 600-700cd/m² に対し、開口部で 7,000-8,500cd/m² となった。膜面と開口部の輝度対比により、開口部方向にグレアの評価が必要となることが予想され、本ツールにおいて、定量的に示すことが可能であることを示した。

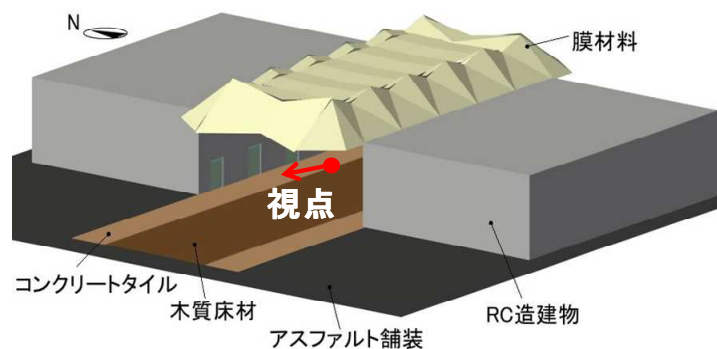


図 3-14 15 時における視点の設定

膜下中心 高さ 1.2m から太陽方向の開口部を見る。

画角 水平面： 90° ，鉛直面 70° （上方向 50° ，下方向 20° ） 人間の注視角

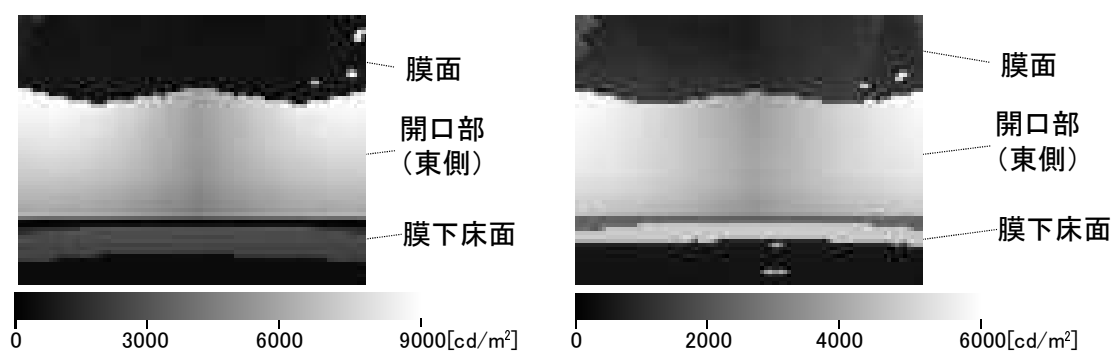


図 3-15 開口部方向の輝度分布 左:9 時 右:15 時

2) 夏季晴天日における輝度の検討

夏季晴天日の時は、日照時間帯において膜下空間内に十分な照度が確保されているが輝度のばらつきによるグレアの可能性を示した。ここでは、曇天日において評価を試みる。計算モデルは、晴天日と同じとし、気象データより曇天日を設置する。

気象データ

拡張アメダス標準気象データより、一日曇天が続いた 8 月の気象データを用いる。(図 3-16)

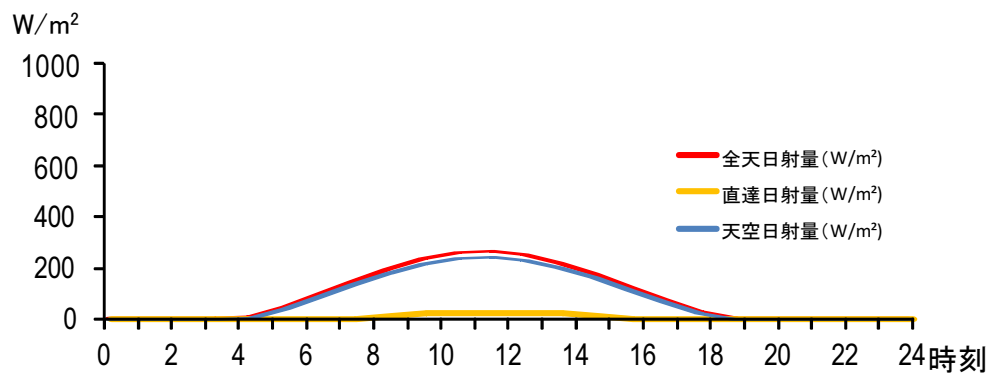


図 3-16 夏季曇天日の標準気象データ

・昼光照度の日変

図 3-18 に膜下空間の中心点 b における昼光照度の日変化の推移を示す。一日を通して 700lx 以下の照度を示している。また、日照時間内においても、照度が 500lx 以下の時間帯も見られることから、曇天日における膜下空間の照度は十分に確保出来ていないことが分かる。

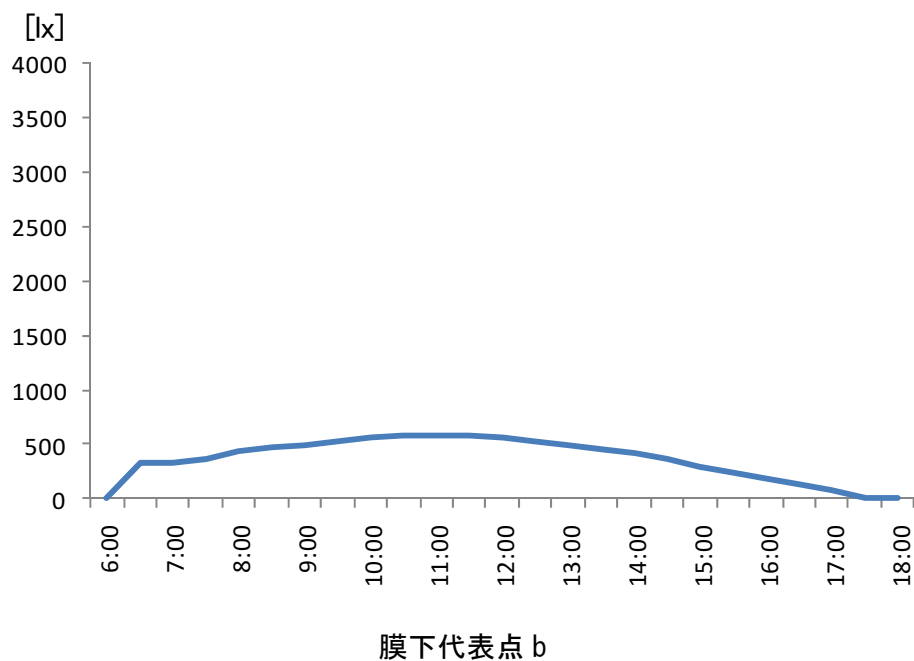


図 3-18 夏季の曇天日における昼光照度の日変化

・輝度画像による光環境の検討

前節と同様に膜下中心点 b に視点を設置し、9 時、15 時の太陽方角の開口部に対し、輝度画像による評価を行った（図 3-19）。9 時では膜面が 500 cd/m^2 程度の分布に対して、開口部では $2,500 \sim 3,000 \text{ cd/m}^2$ で 5～6 倍程度となり、15 時では膜面が 400 cd/m^2 程度で、開口部が $1200 \sim 1500 \text{ cd/m}^2$ で 3～4 倍程度となり、夏季晴天日の同時刻の時よりもグレアの可能性が小さくなっていることが分かる。

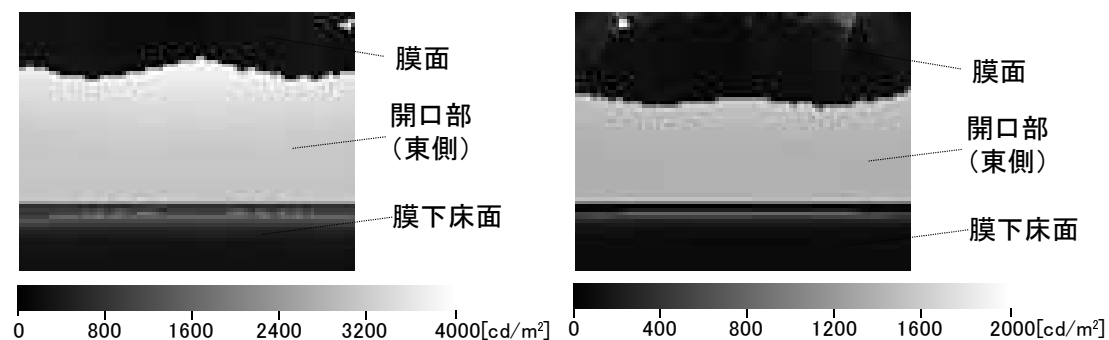


図 3-19 開口部方向の輝度分布 左:9 時 右:15 時 曇天日

3-4-5 膜材の透過光を考慮したベクトル照度の算出

膜下空間内の光環境の快適性を考える際、物の見え方が人の心理に与える影響は大きく、それらが光の方向性に依存していることは明らかである。しかし、実務における空間設計における評価は、水平面照度、演色性、グレアは基準値を示しているが、光の方向性については明確に示されていない。

ベクトル照度は、空間の任意点にある無限小球上の相対する 2 点で測定された照度の最大差の絶対値として定義している。本研究では、中村ら³⁻⁷⁾の簡易法に基づき、各方位照度から水平面・鉛直面ベクトル照度を導いた。ベクトル照度の実測で使用している実測方法に基づき、ベクトル照度計算を行っている。熱環境で計算した日射を考慮した平均放射温度と比較することを前提にしており、既往のツールで作成した 3 次元の空間形態の均等メッシュと材料特性、気象条件等を使用することで光環境と同条件で、同時に評価することができる。熱環境の評価には、中大窪ら³⁻⁸⁾が提案する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機能を拡張する。

膜材からの透過光を考慮したベクトル照度を算出するには、①基準点に微小立方体の人体モデルを仮定し、②各微小面に入射する昼光照度（直射日光量，天空光量，反射光量，透過光量）を算出する。③その後，算出した昼光照度よりベクトル照度を計算する。

以下に計算式を示す。

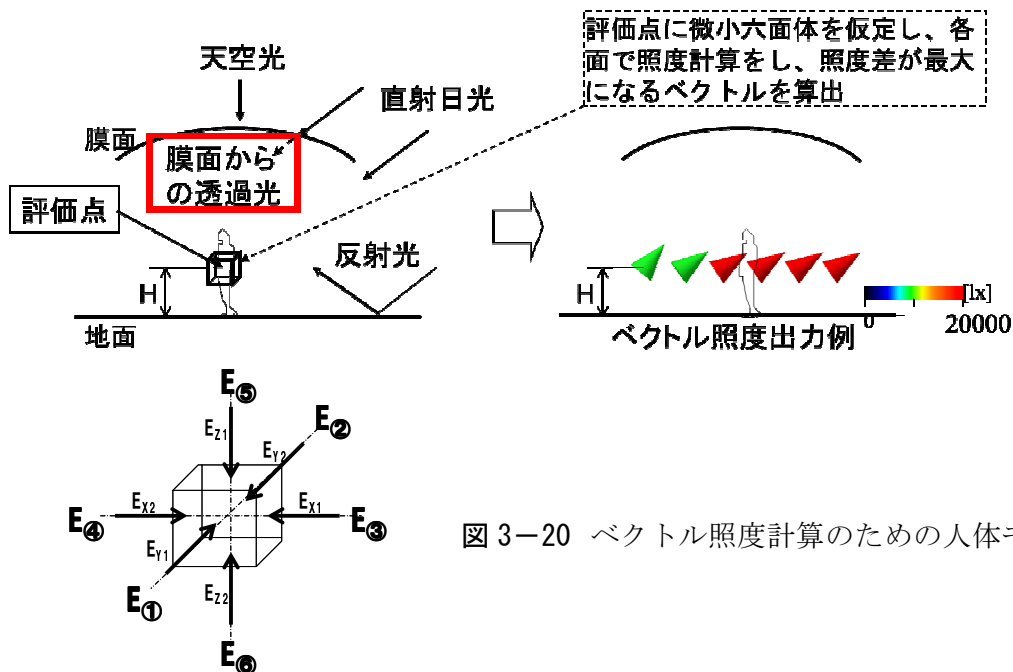


図 3-20 ベクトル照度計算のための人体モ

・ 水平面照度

$$E_V = E_{\textcircled{5}} \quad (3-8)$$

・ ベクトル照度の大きさ

$$|\vec{E}| = \sqrt{(E_{\textcircled{1}} - E_{\textcircled{2}})^2 + (E_{\textcircled{3}} - E_{\textcircled{4}})^2 + (E_{\textcircled{5}} - E_{\textcircled{6}})^2} \quad (3-9)$$

・ 方位角

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{E_{\textcircled{1}} - E_{\textcircled{2}}}{E_{\textcircled{31}} - E_{\textcircled{4}}} \right) \quad (3-10)$$

・ 高度

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{E_{\textcircled{5}} - E_{\textcircled{6}}}{\sqrt{(E_{\textcircled{1}} - E_{\textcircled{2}})^2 + (E_{\textcircled{3}} - E_{\textcircled{4}})^2}} \right) \quad (3-11)$$

3-5 膜下空間における熱収支計算アルゴリズムの機能拡張

3-5-1 既往のシミュレーション手法の概要

計算に用いる 3D-CAD 対応熱環境シミュレータは、解析対象地区の空間形態を再現した建物や樹木等の 3 次元モデル(3D-CAD)に、構成材料の熱的パラメータ(表面日射反射率や熱伝導率など)を入力する。3D-CAD モデルに対して、均等メッシュ間隔で質点化を行い、気象条件等を与え、各質点について非定常熱収支を計算する。計算方法等の詳細については引用文献³⁻⁹⁾を参照されたい。

各表面質点における熱収支計算は次のように行われる。直達日射量はレイトレース法により、また反射日射量は、その面における直達日射量から、鏡面・拡散成分ともに一次反射までを計算する。天空からの放射成分は、いずれも別途計算される天空率をパラメータとし、天空日射量は気象条件の水平面天空日射量との積から、また大気放射量は Brunt の式で求まる放射量との積から算出する。周辺地物との長波長放射量の授受はモンテカルロ法に基づく。ある時刻において都市キャノピー空間内の気温・風速は一様とし、対流熱伝達率は風速の関数としてユルゲスの式により与える。部材断面方向の熱伝導は一次元として扱い、後退差分により 5 分間のタイムステップ毎に表面温度及び部材内断面温度分布を算出する。建物であれば外壁の断面構成を、地表であれば地中温度の日変化が殆ど無い深さ(地中 1m 前後)までの材料構成を計算上再現し、各構成層より細かな分割幅で一次元方向にメッシュ分割する。

計算結果として、建物の外表面温度や地表面温度、その他の表面温度が解析対象地区の 3D-CAD モデルに可視化画像として出力される。また、算出された表面温度から屋外空間の生活高さにおける平均放射温度も求められ、温度分布画像として出力できる。なお、同じ日の気象データを連続させた五日間のデータを入力条件として 4 日間の助走計算を行い、5 日目の計算結果は解析用データとして出力される。

3-5-2 膜材料の特性を考慮した熱収支計算モデルの導入

本研究では、膜構造建築物を含む街区の表面温度を算出するため膜材特有の熱収支式を作成し、既往ツールに組み込む必要がある。そのため膜材表面からの透過日射による伝熱モデルについて以下に述べる。

膜材料の厚さは1mm前後で非常に薄いため、膜材への蓄熱の影響を無視できるとし、膜材表面においては、図3-22に示す伝熱モデルが成り立つ。本伝熱モデルは、膜材の表面と裏面のそれぞれに計算質点を設定しており、各質点における熱収支式は式(3

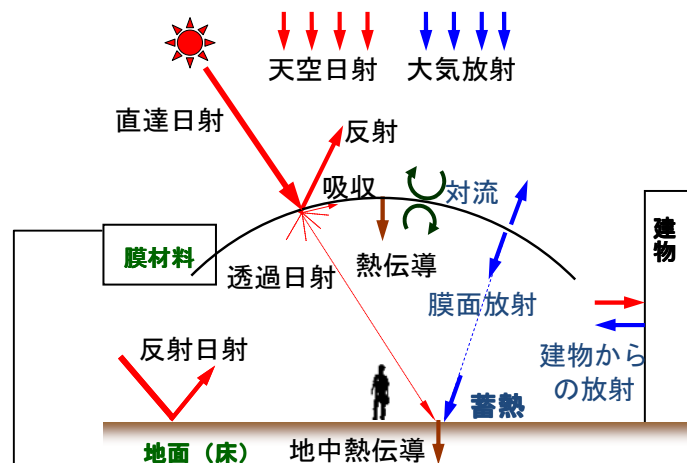
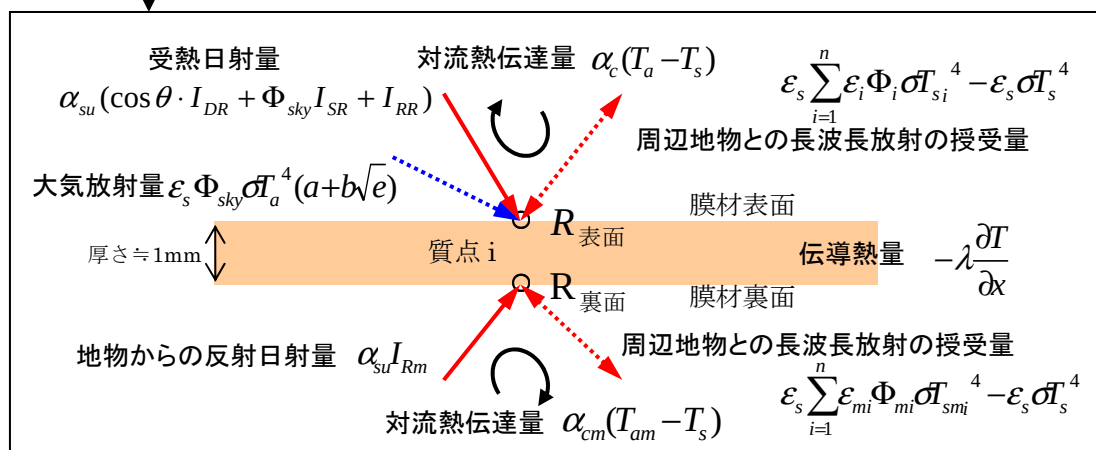


図3-21 膜下空間における熱放射の収支



λ :熱伝導率[W/(m・K)]
 T :温度[K]
 x :一次元断面方向の距離[m]
 α_{su} :日射吸収率
 I_{DR} :直射日射量[W/m²]
 θ :質点の面に対する直射日射入射角[rad]
 Φ :形態係数 (sky:天空率)
 I_{SR} :天空日射量[W/m²]
 I_{RR} :周辺地物からの反射日射量[W/m²]

ε :長波長放射率
 σ :ステファンボルツマン定数[W(m²・K⁴)]
 a, b :Brunt 式における定数
 e :地表付近の水蒸気圧[Pa]
 α_c :対流熱伝達率[W(m²・K)]
 s, a (下付文字):表面, 空気
 m (下付文字):膜下空間
 n, i (下付文字):長波長放射の授受を計算する周辺地物の質点の数, 番号
 I_{Rm} :膜下空間の地物からの反射日射[W/m²]

図3-22 膜材表面における伝熱モデル

－13)と式(3－14)で表される。式(3－13)は膜材の表面と屋外空間の空気との熱授受を表し、式(3－14)は膜材の裏面と膜下空間を取り囲む地物・膜下空間の空気との熱授受を表す熱収支成分である。膜材を用いる特色は膜材の蓄熱の影響がほとんどないところにあり、式(3－13)と式(3－14)を加えた熱収支式(3－15)のような定常熱収支式で表現することができる。ここでは、膜材料を透過した日射については指向性のない完全拡散としている。また、膜材の透過日射が膜下空間内の床面や建物壁面で反射する成分を1次反射までとした。

一般材の熱収支式

$$\begin{aligned}
 -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = & \alpha_{su} (\cos \theta \cdot I_{DR} + \Phi_{sky} I_{SR} + I_{RR}) + \varepsilon_s \Phi_{sky} \sigma T_a^4 (a + b\sqrt{e}) \\
 & + \varepsilon_s \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \Phi_i \sigma T_{si}^4 - \varepsilon_s \sigma T_s^4 + \alpha_c (T_a - T_s)
 \end{aligned} \tag{3-12}$$

膜材の熱収支式

$$\begin{aligned}
 R_{表面} = & \alpha_{su} (\cos \theta \cdot I_{DR} + \Phi_{sky} I_{SR} + I_{RR}) + \varepsilon_s \Phi_{sky} \sigma T_a^4 (a + b\sqrt{e}) \\
 & + \varepsilon_s \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \Phi_i \sigma T_{si}^4 - \varepsilon_s \sigma T_s^4 + \alpha_c (T_a - T_s)
 \end{aligned} \tag{3-13}$$

$$R_{裏面} = \alpha_{su} I_{Rm} + \varepsilon_s \sum_{i=1}^n \varepsilon_{mi} \Phi_{mi} \sigma T_{smi}^4 - \varepsilon_s \sigma T_s^4 + \alpha_{cm} (T_{am} - T_s) \tag{3-14}$$



$$\begin{aligned}
 & \alpha_{su} (\cos \theta \cdot I_{DR} + \Phi_{sky} I_{SR} + I_{RR}) + \varepsilon_s \Phi_{sky} \sigma T_a^4 (a + b\sqrt{e}) \\
 & + \varepsilon_s \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \Phi_i \sigma T_{si}^4 - \varepsilon_s \sigma T_s^4 + \alpha_c (T_a - T_s) \\
 & + \left(\alpha_{su} I_{Rm} + \varepsilon_s \sum_{i=1}^n \varepsilon_{mi} \Phi_{mi} \sigma T_{smi}^4 - \varepsilon_s \sigma T_s^4 + \alpha_{cm} (T_{am} - T_s) \right) = 0
 \end{aligned} \tag{3-15}$$

3-5-3 計算結果の検証

式 3-15 に基づく膜材の表面温度の計算アルゴリズムを上記熱環境シミュレータへ取り込み、前記実測日(9月21日)の気象データ等を用いて本実測対象の膜構造建築を解析モデルとした熱収支シミュレーションを行った。図 3-23 に解析対象とした膜構造建築の CAD モデルを示す。計算に用いたメッシュサイズは 0.2m、対象とした膜構造物のメッシュ分割数は 21,128 であった。膜材料の物性値は表 3-5 に示す通りである。なお、直達日射の入射方向による指向性反射・吸収等を考慮せず、膜材の日射透過率は前述した実測結果から 9%とし、反射率は実験室での測定結果から 74%とした。

計算結果の一例として、図 3-25 に 12 時における表面温度分布の算出結果を示す。同図より、直達日射が当たっている膜面の温度はその時の外気温より 5~8℃高い 37℃前後に上昇しているが、直達日射が当たらない膜面の温度は外気温より 1~2℃程度高い 32℃となっている。

本シミュレーション手法による計算結果を確認するため、膜材の表面温度の計算値を実測値と比較した一例を図 3-26 に示す。同図の左図は膜下空間の測定点から見上げた膜材の 2 π 熱画像であり、点線で囲まれた部分は膜材部分である。直達日射が当たっている中央部分の膜表面温度に着目すると、計算値は実測値と 1~2℃以内で一致していることが読み取れる。全球熱画像による表面温度の測定精度は $\pm 1\sim 2^{\circ}\text{C}$ であることを考えると、本シミュレーション手法により妥当な表面温度が予測できると言える。

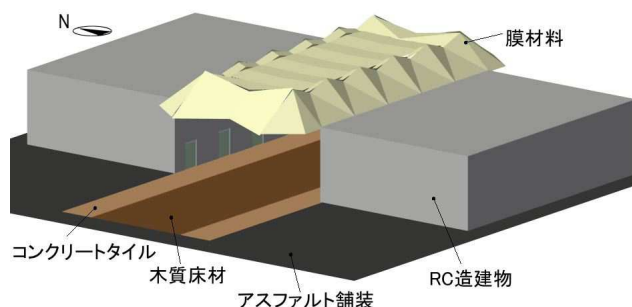


図 3-23 計算対象膜構造空間の 3D-CAD モデル

表 3-5 膜材料の熱物性特性

日射反射率	日射透過率	熱伝導率[W/(m・K)]	厚さ[mm]
0.74	0.09*	0.103	0.83

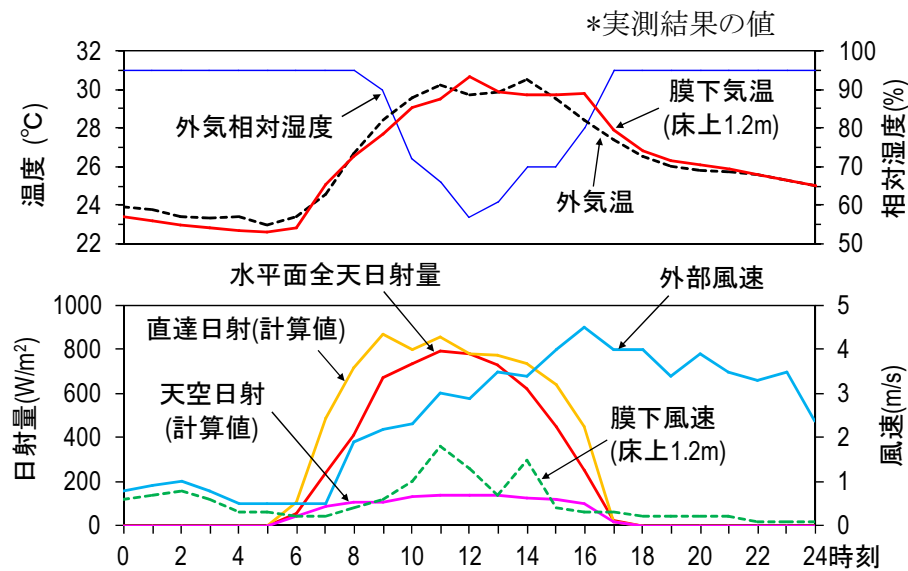


図 3-24 計算に用いた気象条件

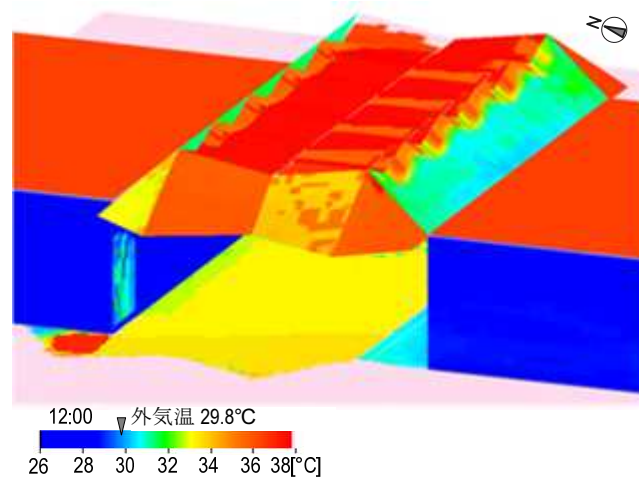


図 3-25 数値シミュレーションから得られた 12 時の表面温度分布

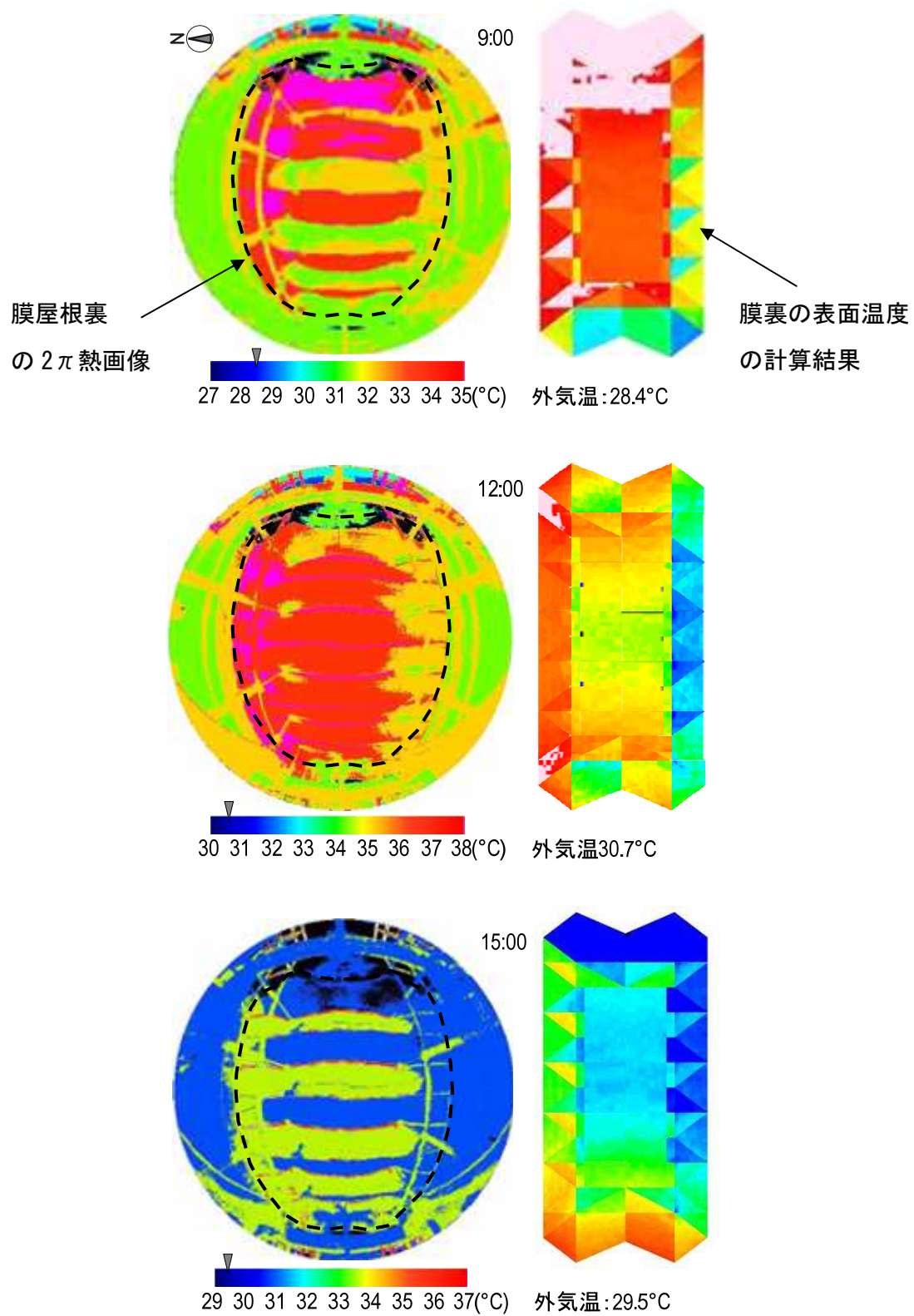


図 3-26 全球熱画像と数値シミュレーションによる膜表面温度の比較例

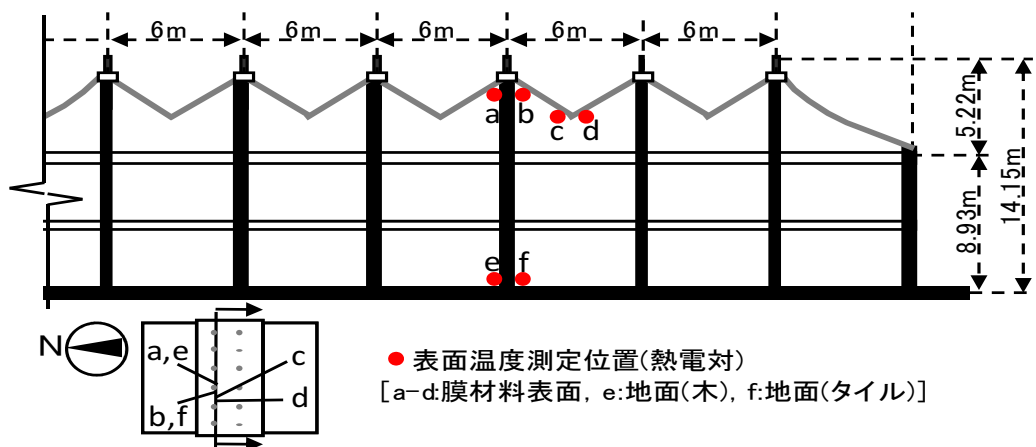
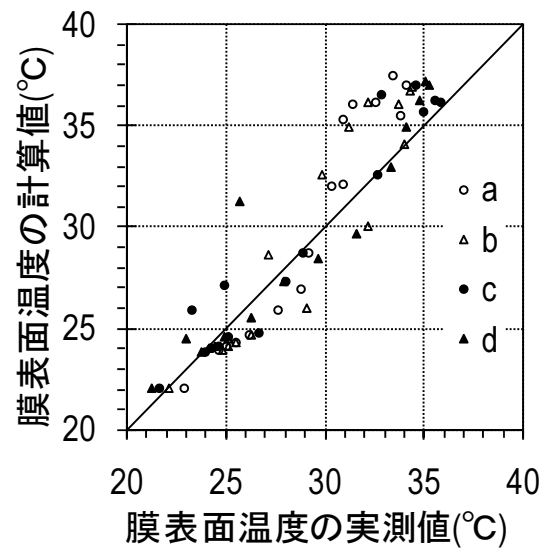
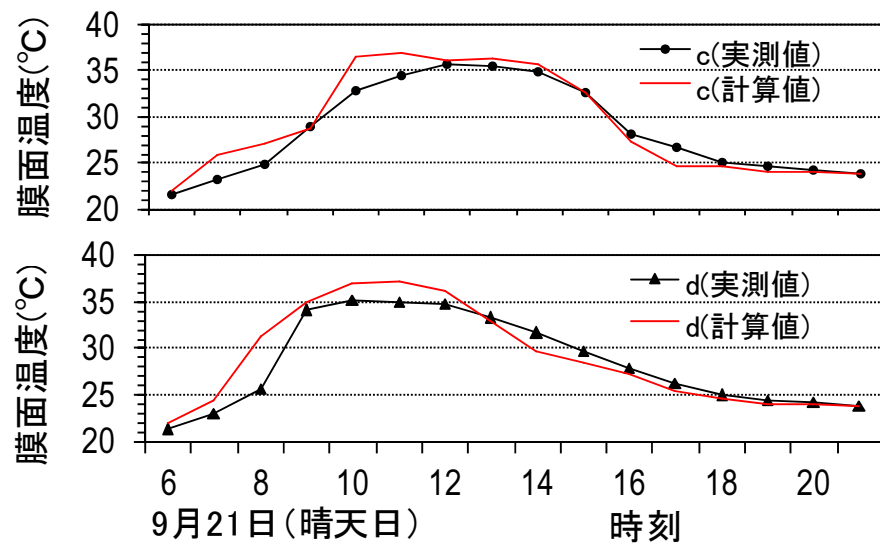


図 3-27 接触法(熱電対)と計算による膜表面温度の比較例

3) 光・熱環境のトレードオフ評価に必要な指標の可視化

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な昼光照度、MRT等の算出結果を3D-CAD上に表示することを可能にしている。MRTに関しては、著者ら³⁻¹⁰⁾が提案する日射を考慮したMRTの算出方法を用いて、膜材からの透過日射($I_{\tau i}$)を計算機能に導入する。また、人体モデルは微小立方体とし、重み付け係数³⁻¹⁰⁾を用いて人体の受ける放射量を算出する。図3-28に膜材からの透過日射と人体モデルの関係を示す。

これらの結果は、設計者は従来の3D-CADモデルと同様の操作で光・熱環境のトレードオフの関係性を確認することができる。

3-5-4 膜材の透過日射を考慮した平均放射温度(MRT)の算出

本研究では、光環境で計算した水平面昼光照度と比較することを前提にしており、既往のツールで作成した3次元の空間形態の均等メッシュと材料特性、気象条件等を使用することで光環境と同条件で、同時に評価することができる。熱環境の評価には、中大窪ら¹¹⁾が提案する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機能を拡張する。

膜材の日射透過を考慮した平均放射温度を算出するには、①まず基準点に微小立方体の人体モデルを仮定し、②各微小面に入射する放射量(直達日射量、天空日射量、反射日射量、透過日射量、大気放射量、長波長放射量)を算出する。③その後、算出した放射量より平均放射温度(MRT)を計算する。

1) 人体モデル

半屋外膜下空間において人体に入射する放射量を算出するためには、日射量と放射量を分けて扱う必要がある。膜材からの透過日射以外の放射量の算出については、中大窪らにより人体が受ける放射量と日射を考慮した平均放射温度の算出が行える数値モデルを作成しており、本研究では、既往の放射量算定式に、膜材からの透過日射量($I_{\tau i}$)を追加し、計算機能を拡張した。

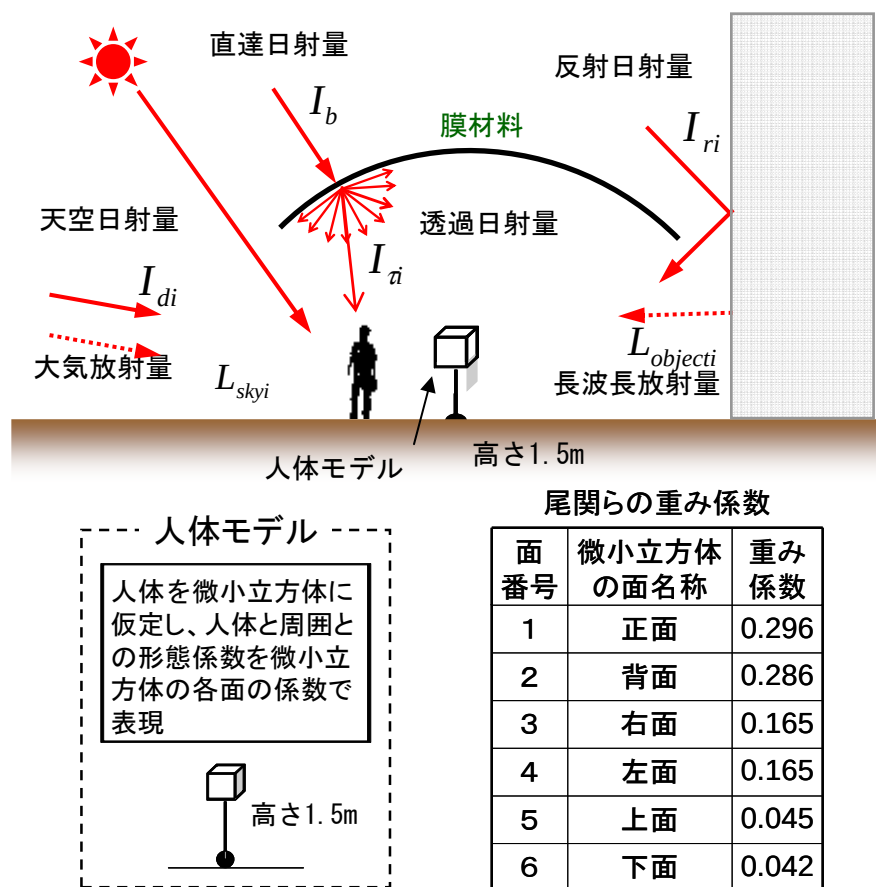


図3-28 日射を考慮した平均放射温度（MRT）計算要素と人体モデル

人体に入射する透過日射量を算出するためには、人体と膜材との形態係数を求める必要がある。また、本研究で用いる人体モデルを図3-28に示す。人体モデルは微小立方体とし、人体モデルの重み付け係数を用いて人体の受ける放射量を式(3-22)により算出する。評価基準高さは、地面から1.5mとする。

2) 人体が受ける日射を考慮した放射量の算出

透過日射による膜下空間の熱放射環境を評価するため、既往のツール機能を拡張する。評価基準高さは、地面から1.5mとする。日射を考慮した放射量の算出には、基準点において直接受けとる日射・放射量と、地物からの反射や透過により間接的に受けとる日射・放射量の計算が必要である。

1) 日射量の算出

基準点 (A) において直接受けとる日射量には、①直達日射量と②天空日射量、間接的に受けとる③反射日射量と④透過日射量がある。

① 直達日射量 (I_b)

高さ 1.5m 地点より太陽位置に向かい光線追跡を行い、計算領域外へ到着した場合、直達日射を受けると判断し、気象条件として入力する直達日射量と人体投影面積より算出する。

$$I_{dA} = \frac{A_p}{S_{human}} I_d \delta_{dA} \quad \text{式 3-16}$$

A_p : 人体の有効放射面積[m²], S_{human} : 人体の有効放射面積[m²], I_d : 直達日射量[W/m²], δ_{dA} : 直達日射受熱の有無

② 天空日射量 (I_{di})

人体モデルの微小面に対し、別途計算される天空率と気象条件として入力する天空放射輝度との積から天空日射量を算出する。天空率の計算は、微小面に対して水平方向に 360 度を一定の間隔で分割したうえ、その分割方向へ探索線を射出し、到達した地物の高さ方向の仰角から天頂角を求め算出している。また、天空放射輝度に関しては、井川らの提案する数値モデル All-Sky Model-R を用いて再現する。また、天空日射量の算出方法は以下の通りである。

- (1) 微小面での法線向きに単位半球を仮定する
- (2) 単位半球を等形態係数となるように n 個に分割する
- (3) 分割した面の中心を通る単位ベクトルを算出する
- (4) 算出した単位ベクトルに All-Sky Model-R を用いて天空放射輝度分布を算出する
- (5) 計算領域内の上記 (3) で求めた単位ベクトル方向に光線追跡を行い、計算領域外に到達した場合、微小面に上記 (4) で計算した放射エネルギーを加える
- (6) 上記 (5) を分割数分繰り返す、すべての光線追跡が終了したら、積算した値を分割数 n で除すことで各微小面の天空日射量を算出する

③ 反射日射量 (I_{ri})

メッシュ面における直達日射と天空日射から、鏡面・拡散成分ともに反射日射を計算する。鏡面反射は、鏡面反射面（メッシュ面）において、直達日射の反射角方向にトレースし、到達地点のメッシュ面に反射日射を与える。拡散反射は、均等拡散条件とし、メッシュ面から周辺半球方向へ探索線射出を行い、到達地点が拡散反射面の場合、その反射日射を取得し、算出する。ここで、反射指向特性の再現については、鏡面反射成分と均等拡散成分に分離する³⁻¹²⁾。また、2次反射以降については、同様の放射伝熱モデルを用いて、多重反射量を算出する。本研究の反射回数は、1次反射まで計算を行う。

④ 透過日射量 (I_{ti})

膜材の場合、均等拡散透過を考慮した放射伝熱モデルの再現を行い、光環境計算手法と同様の手順で透過日射量を取得する。

2) 長波長放射量の算出

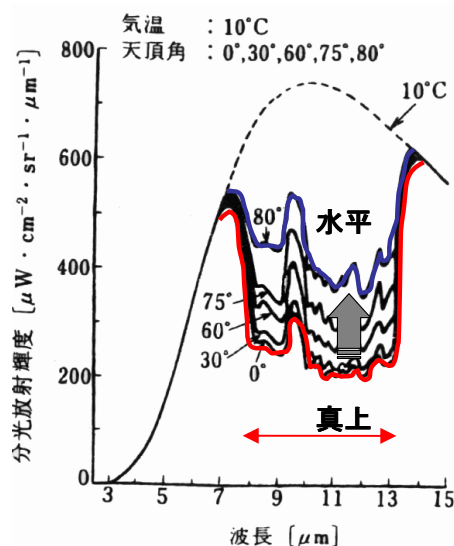
基準点 (A) における放射量には、直接受けとる①大気放射量と間接的に受けとる②地物からの長波長放射量がある。

① 大気放射量 (L_{skyi})

大気放射量は $7.5 \sim 13 \mu m$ の波長帯において、天頂角により放射輝度が異なる。そこで、松井らの手法を用いて、大気放射量の天空放射輝度分布の再現を行い、天空日射量同様の手順で放射輝度を取得する。

② 地物からの長波長放射量 ($L_{objecti}$)

地物からの長波長放射量を算出する際必要となる人体の周辺地物の表面温度分布は、既往のツールで算出可能である。ここでは、天空日射と大気放射の放射輝度分布、膜材からの均等拡散透過特性を導入し、計算を行っている。



引用：赤外線技術研究会編，赤外線工学，
オーム社，1991

図3-29 天頂角の違いによる
大気放射量の変化

3) 地物からの間接放射照度の算出

地物（各メッシュ面ともいう）から放つ長波長放射量を計算する際、建物表面や地表面の放射発散度を計算する必要がある。放射発散度の計算アルゴリズムを以下に示す。

1) 地物表面が受ける直達日射の放射照度と天空日射の放射照度

地物表面が受ける直達日射の放射照度と天空日射の放射照度は、上記 3-5-4 の基準点における直射日光と天空光による照度計算と同じ方法で算出される。間接放射照度は、高さ 1.5m 地点の基準点に入射する地物表面からの放射発散度を算出し、形態係数を乗じることで得られる。

2) 日射反射率の計算条件

反射日射による間接放射照度は、メッシュ面における直達日射と天空日射から、鏡面・拡散成分ともに反射日射を計算する。鏡面反射は、鏡面反射面（メッシュ面）において、直達日射の反射角方向にトレースし、到達地点のメッシュ面に反射日射を与える。拡散反射は、均等拡散条件とし、メッシュ面から周辺半球方向へ探索線射出を行い、到達地点が拡散反射面の場合、その反射日射を取得し、算出する。ここで、反射指向特性の再現については、鏡面反射成分と均等拡散成分に分離する³⁻¹²⁾。また、反射回数については、メッシュ面が受ける反射日射が設定の計算精度以下になるまで計算を行うことが可能であるが、本研究では 1 次反射まで計算する。

3) 日射透過率の計算条件

透過日射による間接放射照度は、反射日射と同様にメッシュ面を透過した裏面において透過日射は正透過または拡散透過とする。ここで、膜材からの透過日射は均等拡散条件とする。

4) メッシュ面が受ける日射を考慮した放射量の算出

メッシュ面が受ける日射を考慮した放射量の計算に関する計算項目を図 3-28・上に示す。

本研究では、任意点 A の床面から 1.5m の高さにおける放射量を計算することとし、その手順を以下に示す。

- ① 膜下空間では多重反射を考慮するため、メッシュ面毎に、直接受ける日射量と大気放射量（以下、直接放射照度という）、反射や透過により間接的に受けとる日射量と周辺地物からの長波長放射量（以下、間接放射照度という）を計算回数毎の増分量として算出する。
- ② 1 回目の計算では、計算領域内に入射する放射エネルギーにより、全メッシュ面における 1 回目の直接放射照度の増分量(ΔE_{e1i})を算出する。
- ③ また、各メッシュ面において、上記②で求められた直接放射照度の増分量に日射反射率または日射透過率を乗じ、1 回目の放射発散度の増分量(ΔMe_{1k})を算出する。
- ④ 2 回目の放射量の増分量の計算では、③で求めた 1 回目の放射発散度の増分量を受熱面とし算出する。以降、計算回数分くり返し、計算回数毎の直接放射照度(ΔE_{e2i})と放射発散度(ΔMe_{2k})を算出する。
- ⑤ 計算回数分の増分量を加算することで、各メッシュ面の放射照度(ΔE_{eji})と放射発散度(ΔMe_{jk})の合計を算出する。

以下に、日射を考慮した放射量の計算アルゴリズムを示す。

- 1) 各メッシュ面における直接放射照度と放射発散度の増分量の算出

$$j=1 \text{ のとき} \quad \Delta E_{e1i} = I_d \times \delta_{di} + I_s \times \varphi_i \quad \text{式 3-17}$$

$$j=2 \sim m \text{ のとき} \quad \Delta E_{eji} = \sum_{k=1}^S C_{ik} \times \Delta T_{(j-1)k} \quad \text{式 3-18}$$

ここで、 ΔMe_{jk} は j 回目の k 番目の放射発散度を示し、式(3-19)より計算する。

$$\Delta Me_{jk} = \rho_k \Delta E_{eji} + \overline{\tau_k} \times \overline{\Delta E_{eji}} \quad \text{式 3-19}$$

- 2) 各メッシュ面における放射照度と放射発散度の合計値の算出

$$E_{emi} = \sum_{j=1}^m \Delta R_{ji} \quad \text{式 3-20}$$

$$Me_{tmk} = \sum_{j=1}^m \Delta T_{jk} \quad \text{式 3-21}$$

S : 計算領域のメッシュ面の総数

m : 計算回数

i : 計算領域全メッシュの i 番目の受熱面

k : 計算領域全メッシュの k 番目の発熱面

j : j 回目の計算

I_d : 直達日射量 [W/m^2]

I_s : 天空日射量 [W/m^2]

δ_{di} : i 番目の面で直達日射を受光する場合, $\delta_d = 1$

直達日射を受光しない場合, $\delta_d = 0$

ϕ_i : i 番目の面における天空率

$\Delta E_{e_{ji}}$: j 回目の i 番目の受熱面の増分放射量 [W/m^2]

$\Delta E_{e_{jk}}$: j 回目の k 番目の発熱面の表面の増分放射量 [W/m^2]

$\overline{\Delta E_{e_{jk}}}$: j 回目の k 番目の発熱面の裏面の増分放射量 [W/m^2]

ΔMe_{jk} : j 回目の k 番目の発熱面の増分放射発散度 [lm/m^2]

c_{ik} : i 番目の受熱面における k 番目の発光面が占める形態係数

ρ_k : k 番目の発熱面の表面の日射反射率

τ_k : k 番目の発熱面の表面の日射透過率

$\overline{\rho_k}$: k 番目の発熱面の裏面の日射反射率

$\overline{\tau_k}$: k 番目の発熱面の裏面の日射透過率

Ee_{tmi} : m 回目までの i 番目の受熱面の合計放射量 [W/m^2]

Me_{tmk} : m 回目までの k 番目の発熱面の合計発熱放射量 [lm/m^2]

3) 人体が受ける放射量と日射を考慮した平均放射温度 (MRT) の算出

任意基準点 における日射を考慮した平均放射温度 (MRT) は、まず微小立方体が受ける日射を考慮した放射量を式(3-23)で計算し、平均放射温度を式(3-24)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

分を合計した値である。ここで、人体の長波長放射量の放射率 1.0、日射吸収率は 0.7 として算出する。

1) 人体が受ける放射量 ($R_{human(A)}$)

中大窪らが導入した人体が受ける放射量と日射を考慮した平均放射温度の算出が行える数値モデルに、膜材からの透過日射量 (I_a) を追加する。人体に入射する透過日射量を算出するためには、人体と膜材との形態係数を求める必要がある。また、本研究で用いる人体モデルを図 3-30 に示す。人体モデルは微小立方体とし、人体モデルの重み付け係数を用いて人体の受ける放射量を式(3-22)により算出する。評価基準高さは、地面から 1.5m とする。

$$R_{human(A)} = a_1 \left(\frac{A_p}{S_{human}} I_d \delta_{di} + \sum_{i=1}^6 W_i (\varphi_i I_{si} + \sum_{k=1}^S C_{ik} I_{rk} + \sum_{k=1}^S C_{ik} I_{ak}) \right) + a_2 \sum_{i=1}^6 W_i \left(\sum_{k=1}^S C_{ik} L_{object(k)} + \varphi_i L_{sky(i)} \right) \quad \text{式 3-22}$$

S : 計算領域のメッシュ面の総数	C_{ik} : 微小面 i から k 番目のメッシュ面が占める形態係数
i (下付): 微小立方体の各 i 面 ($i=1 \sim 6$)	φ_i : 微小面 i における天空率
I_d : 直達日射輝度 [W/m^2]	a_1 : 人体の日射吸収率 [-]
I_{si} : 微小面 i が受ける天空日射輝度 [W/m^2]	a_2 : 人体の放射率 [-]
I_{ri} : 微小面 i が受ける反射日射輝度 [W/m^2]	S_{human} : 人体の表面積 [m^2]
I_a : 微小面 i が受ける透過日射輝度 [W/m^2]	A_p : 人体の有効放射面積 [m^2]
$L_{object(k)}$: k 番目のメッシュ面からの長波長放射輝度 [W/m^2]	W_i : 重み付け係数 [-]
$L_{sky(i)}$: 微小面 i が受ける大気放射輝度 [W/m^2]	σ : ステファンボルツマン定数 [$W(m^2 \cdot K^4)$]
δ_{di} : 微小面 i において直達日射を授受する場合, $\delta_{di}=1$ 直達日射を授受しない場合, $\delta_{di}=0$	

①直達日射のみ

Underwood らが提案する人体の有効放射面積の算出式で求めた有効放射面積を人体の全表面積（1.8 m²）で標準化した値を用いる。

$$A_p = 0.043 \times \sin \theta + 2.997 \times \cos \theta \sqrt{0.02133 \times \cos^2 \phi + 0.0091 \times \sin^2 \phi} \quad \text{式 3-23}$$

A_p : 人体の有効放射面積[m²]

θ : 太陽の方位角[rad]

ϕ : 太陽の仰角 [rad]

③ 達日射以外の受熱日射量

人体に入射する天空日射量，反射日射量，地物からの長波長放射量，大気放射量と膜材からの透過日射量を算出する際，人体と周辺地物との形態係数を求める必要がある。ここでは，計算負荷を小さくするため，人体を微小立方体と仮定し，各微小面と周辺地物との形態係数の関係から入射する放射量を算出し，尾関らの提案による各微小面の重み付け係数（図 3-28）を乗じて放射量を算出する。

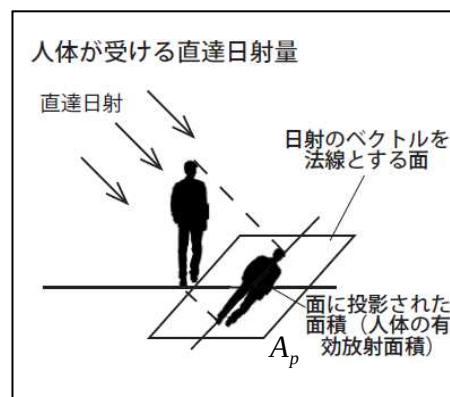


図 3-30 人体モデル

2) 人体の受ける日射を考慮した平均放射温度（MRT）の算出

日射を考慮した平均放射温度（MRT）は，式 8 で算出した人体が受ける放射量を算出し，式(3-24)で算出する。このとき，人体の放射率は 1.0，日射吸収率は 0.7 とて算出する。

$$MRT = \sqrt[4]{\frac{R_{human}}{\sigma}} - 273.15 \quad \text{式 3-24}$$

3-6 まとめ

膜構造建築物の半屋外膜下空間における光と熱環境のトレードオフの関係性を評価するため、膜材の透過特性を考慮した昼光照度分布と平均放射温度分布の算出が行えるように、両者の連動計算を行う手法を開発した。

- (1) 設計実務において、膜下空間の光環境を考慮しながら熱環境を緩和する設計が求められることを述べた上で、設計の流れの中で光・熱環境の観点から膜下空間を評価する設計支援手法を提案し、それに基づいた予測手法の位置づけを示した。
- (2) 膜材からの可視光線の透過を考慮した光環境計算アルゴリズムの開発を行うために、既往研究により構築された屋外熱収支シミュレーションツールをもとに、光環境と熱環境の計算アルゴリズムにおいて類似する箇所を統合し、両者の連動計算を行う方法を示した。その上で、膜材からの可視光線の透過を考慮した昼光照度計算アルゴリズムを導入し、計算精度の検証を行った。
- (3) 膜下空間の日射を考慮した平均放射温度を算出するために、まず、既往ツールの計算アルゴリズムを拡張し、膜材の熱収支計算式を導入した。それにより、表面温度分布の結果が得られ、その結果をもとに透過日射を考慮した平均放射温度分布の結果を得られるように構築した。

本章では、膜材料を透過した日射を拡散条件とみなし、膜下空間に形成される光環境と熱環境を連動して予測する手法を開発した。現段階では、膜材の透過特性を拡散条件としているが、特に光環境の評価をする場合、熱環境に比べ膜下空間内の反射光の影響が大きくであるため、今後指向性についても検討が必要である。

参考文献

- 3－1) 梅干野晃,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,日本建築学会技術報告集,第 20 号,pp.195-198,2004.12
- 3－2) 一般社団法人日本膜構造協会:膜構造 30 年のあゆみ,日本膜構造協会法人化 30 周年記念誌,2010.4
- 3－3) 山村真司,梅干野晃,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
- 3－4) 井川憲男,島崎佐智代,中村洋:日射量による昼光照度の推定方法に関する研究,日本建築学会計画系論文集(526),17-24,1999.12
- 3－5) 井川ら,全天日射量と天空日射量で推定する天空放射輝度分布と天空輝度分布,日本建築学会環境系論文集, No573, pp33-44, 2003.11
- 3－6) 中村 洋,中西 正明:視環境評価の指標の簡易測定法に関する検討,日本建築学会大会学術講演梗概集. 計画系 56(環境工学), pp181-182, 1981-10-05
- 3－7) 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
- 3－8) 梅干野晃,何江,中大窪千晶,矢ヶ部信吾,小川俊輔,巖泰潤: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

注

注 1) 探査線本数の Root Mean Square Error (RMSE) は次式で求めた。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{total_18165} - E_{total_m})^2}{N}}$$

E_{total_18165} : 探査線の本数 18165 本のときの水平面昼光照度

E_{total_m} : 探査線の本数 m 本のときの水平面昼光照度

N: メッシュ数

注2) 計算回数の Root Mean Square Error (RMSE) は次式で求めた。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Ir_{total_20} - Ir_{total_m})^2}{N}}$$

Ir_{total_20} : 反射回数 20 回のときの水平面昼光照度

Ir_{total_m} : 反射回数 m 回のときの水平面昼光照度

N: メッシュ数

注3) 膜面形態による適用範囲

膜面の形態は、構造形式により 3 種類に分けることができ (図 2-2), 適用範囲を以下に示す。

(1) 骨組膜構造

実在空間の例として表 2-3 の底型、丸型、片側閉鎖型、両端閉鎖型などがある。これらは本研究の対象とするが、以下の点に注意する必要がある。

・風がよどむような袋状の空間が存在する場合

本研究における袋状の考え方の目安として、膜面の全体または局所的な形態に対し、スパン-ライズ比が 0.6 を超える場所については、熱放射の影響が無視できない可能性があるため、その影響を考慮する必要がある。

・膜面の膜下空間近傍に設備等が設置される場合

膜下空間近傍に設置される設備等は、膜材からの透過日射により表面温度が上昇し、膜下空間の熱放射環境へ影響するため (右図)、設計計画段階で設備等の形状や配置の状況を確認し、計算モデルに反映する必要がある。本研究では、膜下空間に設置する設備等の割合は、膜面の水平投影面積の 2~3 割程度であれば、平均放射温度で 0.2℃程度の影響であることを確認している。それ以上の場合は、計算モデルに反映する等、その影響を考慮する必要がある。



設備受け部材の例

(2) サスペンション膜構造

実在空間の例として表 2－3 の突起型、両端軽鎖型などがあり、これらは本研究の対象とするが、上記 (1) で説明したように、局所的にスパン・ライズ比が 0.6 を超える場所が存在する場合は、その影響を考慮する必要がある。

(3) 空気膜構造

屋内空間のため、本研究では対象外とする。ただし、2 重膜の内部に空気を入れ、ユニット化した膜材を屋根や壁面に適用した場合で、半屋外空間を有する場合を除く。

注 4) スパン・ライズ比の計算例による熱溜りの目安

膜面の全体または局所的な形態に対し、水平方向の距離（スパン）に対する高さ（ライズ）の比率をスパン・ライズ比と定義する。下図にスパンとライズの計算例を示す。

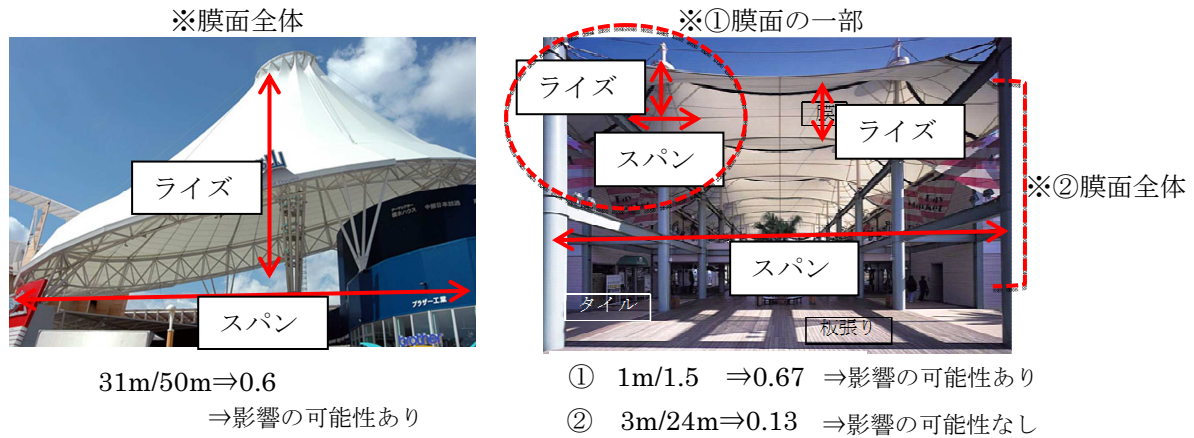


図 スパン・ライズの関係

APPENDIX

井川ら¹³⁾が提案する天空輝度分布（All Sky Model-L）は次式で表せる。

$$Lv\alpha(\gamma_s, \gamma, \zeta) = Lv\alpha(\gamma_s) \cdot Lv(\gamma_s, \gamma, \zeta) \quad : \text{All Sky Model-L} [\text{cd/m}^2]$$

$$Lv(\gamma_s, \gamma, \zeta) = \frac{\phi(\gamma) \cdot f(\zeta)}{\phi(\pi/2) \cdot f(\pi/2 - \gamma_s)} \quad : \text{相対天空輝度分布}$$

$$Lv\alpha(\gamma_s) = \frac{Evd}{\int_{\gamma=0}^{\pi/2} \int_{\phi=0}^{2\pi} Lv(\gamma_s, \gamma, \zeta) \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma \cdot d\gamma \cdot d\alpha} \quad : \text{天頂輝度} [\text{cd/m}^2]$$

$$Lvz(\gamma_s, Kc, Cle) = Evd \cdot LzEd = \eta d \cdot Eed \cdot \sum_{k=0}^4 [A(k) \cdot Kc^k]$$

Evd: 全天空照度 [lx]

Eed: 天空日射量 [W/m²]

ηd : 天空日射の発光効率 [lm/W]

第4章 膜下空間における光・風環境を考慮した熱環境評価手法

- 4-1 はじめに
- 4-2 既往の研究と本研究の位置づけ
- 4-3 膜下空間における光・熱・風環境の影響要因と熱環境対策方法の検討
 - 4-3-1 膜下空間における光・熱・風環境の影響要因
 - 4-3-2 膜下空間の熱環境対策方法の提案
 - 4-3-3 熱環境対策方法と設計条件との関係
- 4-4 膜構造建築空間の光・熱・風環境を考慮した設計支援手法の提案
 - 4-4-1 本手法における熱環境と風環境の関係
- 4-5 光・熱環境と風環境の連成計算アルゴリズムの導入
 - 4-5-1 既往の連成シミュレーション手法の概要
 - 4-5-2 膜構造建築空間のための連成手法の提案
- 4-6 実測対象の膜下空間における熱的快適性の評価
 - 4-6-1 主風向における熱的快適性への影響
 - 4-6-2 膜下空間の床面材料の違いによる熱的快適性の評価
- 4-7 光・熱・風環境の関係性を考慮した評価方法の提案
 - 4-7-1 半屋外膜下空間における光・熱・風環境の目的関数の設定
 - 4-7-2 光・熱・風環境の評価のための多目的最適化の手法
 - 4-7-3 トレードオフ評価の概要
 - 4-7-4 計算方法
 - 4-7-5 目的関数に対するトレードオフ評価
- 4-8 まとめ

4-1 はじめに

日光利用の観点から膜下空間を設計提案する際、光環境を考慮しながら、同時に熱環境を緩和する具体的な方法が求められる。ここで、第2章の東西方向開口部を持つ半屋外の膜下空間の実測結果から、日中、膜材からの透過日射により、床面の表面温度は膜下空間の気温より2~3℃高い値を示した。また、開口方向からの通風が無い場合、膜下空間の気温より若干高い値を示し、通風がある場合、外気温程度に低下した。つまり、日光利用の結果、透過日射により膜下空間の熱放射環境は悪化し、気温も上昇することになる。そのため熱環境対策を設計提案する場合、通風の利用方法を検討することは改善効果が期待できる。また、膜下空間の構成部材における表面温度上昇部分については、蒸発冷却部材等をバランスよく導入することで、さらに熱的快適な膜下空間が提案できるものとする。

ここで、膜下空間に形成される光・風環境を考慮した熱環境対策方法を設計提案するためには、第3章で構築した光・熱環境の予測・評価ツールに、風環境の予測が可能な数値流体力学シミュレーション（CFD）との連成計算アルゴリズムを導入し、通風や蒸発冷却部材による冷気流や冷放射といった熱環境対策を施した膜下空間の設計提案が可能になる。ここで目指す設計提案とは、膜下空間の光・風環境を考慮しながら熱環境問題を解決する対策手法をどのように適用したら効果的な解決が図れるかの概要を把握し、提案することである。そのためには、膜下空間における主要な熱的要素を定量的に把握し、簡単であっても熱環境対策手法を適用した空間の計算が実行できる状態にすることが重要である。また、予測・評価するためには、計算時間の負荷と計算回数を少なくすることで効果的な設計提案ができる。そのため、事前に予測・評価した結果から適切な熱環境対策手法を選定できるような知見をまとめたデータベースと、光・熱・風環境のトレードオフを簡単に評価できる手法が必要である。

本章では、まず、設計支援を意識した光・熱・風環境の予測を可能にするシミュレーションツールを構築する。また、膜下空間の熱環境対策手法の適用を判断するためのトレードオフ評価手法を提案する。さらに、熱環境評価手法の計算例を示すことでデータベースの考え方を提案する。具体的には、以下の3点について述べる。

- (1) 外部環境の影響を考慮した膜下空間の熱環境評価方法と光・熱・風環境の設計支援手法の提案
- (2) 設計支援を目的とした膜下空間の光・熱・風環境のトレードオフ評価をするために、

第 3 章で構築した光・熱環境の予測ツールと風環境のシミュレーションツール (CFD) を連成した計算アルゴリズムの構築

(3) 設計実務を考慮し、膜下空間の光・熱・風環境のトレードオフ評価を実施するため、既往研究で提案している多目的最適化手法を適用し、評価手法を提案する。

4-2 既往の研究と本研究の位置づけ

光・熱・風環境の連成計算については、膜下空間の熱環境を改善する設計手法を提案することが前提であるため、通風や蒸発冷却等の風速分布や気温分布の概略を把握でき、設計提案ができることが必要となる。光・熱環境の予測・評価ツールは、第 3 章で構築したツールをベースに検討するが、この場合、膜下の計算領域内の風速の空間分布を一様として設定しているため、気流性状を考慮することはできない。そこで、近年実務設計の現場でも使われようになっている CFD ソフトとの連成により、膜下空間の気流性状を考慮した熱環境の予測を行う。

多目的最適化手法に関する既往研究として、様々な研究成果が報告されている。浜田ら⁴⁻¹⁾は、建築構造物の幾何学的な距離と力学量の歪みエネルギーの双方を目的関数として自由曲面シェル構造の構造形態創生法を提案し形態を決定する方法を提案している。陳ら⁴⁻²⁾は、屋外の温熱環境と樹木の最適配置について、放射と対流により最適解の探索法について提案している。しかし、これらは選好解を選びだす意思決定まで考察を進めてはいない。一方、菅ら⁴⁻³⁾は、室内環境を考慮した窓のデザインを取り上げ、パレート最適集合解の構造を把握することで、意思決定の手法を提案している。本研究では、膜下空間の形態に対し、光・熱・風環境の予測結果をもとに、トレードオフの関係性の概要が把握でき、意思決定をできる評価手法が求められるため、パレート最適解集合を適用し、トレードオフ評価の可能性を考察する。

4-3 膜下空間における光・熱・風環境の影響要因と熱環境対策方法の検討

実務設計において、膜下空間の光・風環境を考慮した熱環境対策方法を提案する際、対策を施す範囲や条件が多数存在するため、専門知識がない設計者は数多くの対策方法を検討し、数値シミュレーションの結果を分析し、都度方向性を決定する必要がある。この場合、熱環境対策方法の選択が効率的に行われることが求められる。効率的に判断するためには、①設計提案毎に発生する環境影響要因を特定し、対策案を提案する場合

と、②対策方法をデータベースから選定し、対策案を提案する場合が考えられる。ここでは、以下の手順で熱環境対策方法を検討し、設計提案の考え方を示す。

- 1) 半屋外の膜構造建築物において、建物外部環境から膜下空間に影響を及ぼす光・熱・風環境の要因を定性的に整理する。
- 2) 1) の影響要因を、光・熱のトレードオフの関係性と物理的要素と関連付け、熱環境対策方法を提案する。
- 3) 2) で得られた熱環境対策方法から定性的な対策方法と設計への配慮項目を整理する。
- 4) 最後に、熱環境対策方法と設計変更のための条件設定についてデータベースの考えを示す。

ここで、「①設計提案毎に対策案を提案する場合」設計者は、熱環境対策の考えを持っていることを意味しており、4) のデータベースで設計判断できると考えられる。また、「②データベースから対策案を提案する場合」は、光・熱・風環境の予測結果から光・熱のトレードオフ評価をできない場合が想定され、データベースから対策情報を決定するための何らかの手法が必要である。しかしながら、対策方法は多数存在するため、ここでは、第2章で実測した商業施設の半屋外空間の広場を例に、膜材の透過率の違いによる評価例を示す。今後、設計対応の中から、典型的な形態を設定し、データベース構築を実施することが望まれる。

4-3-1 膜下空間における光・熱・風環境の影響要因

図4-1に建築外部空間が膜下空間に及ぼす主な環境影響要因について検討する。①周辺建物による膜下空間への環境影響項目として、日陰による光環境の均斉度の低下や風速の減少、②構成部材の違いによる環境影響項目として、輝度分布や表面温度分布の差、③膜面形態による環境影響項目として、風速減少や熱溜りの発生、④膜材の光学特性（反射率、透過率、吸収率）の違いによる環境影響項目として、日射熱や可視光線の侵入量の増減や膜材の表面温度の上昇、⑤建物からの反射日射による環境影響項目として、局所的な表面温度の上昇や照度差等があげられる。

4-3-2 膜下空間の熱環境対策方法の提案

膜下空間の熱環境方法を提案するために、まず、4-3-1で上げられた環境影響要因について、光環境と熱環境のトレードオフの関係性から、1) 膜下空間へ侵入する光の

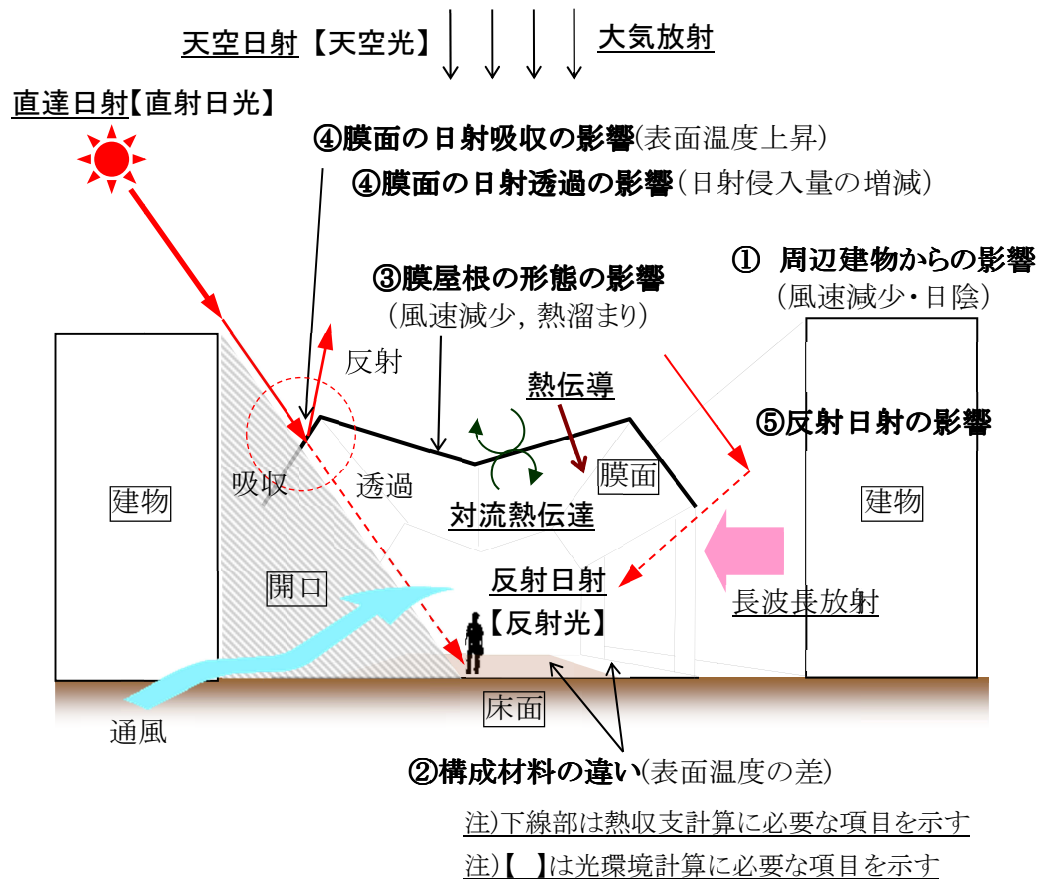


図4-1 建築外部環境から膜下空間への光・熱・風環境の主な影響要因

適正化と、2) 膜下空間へ侵入する熱の最小化について、環境影響要因を整理する。次に、3) 光・熱環境の物理的要素と関連づけることで、膜下空間の形態や構成部材の選定による熱環境対策方法を体系的にまとめる (図4-2)。

1) 膜下空間へ侵入する光の適正化

物理的要素として、直射日光量、天空光量、周囲からの光束発散度があげられ、適正利用の観点から、直射日光、天空光、反射光、透過光の侵入を調整する工夫が求められる。

2) 膜下空間へ侵入する熱の最小化

物理的要素として、直達日射量、天空日射量、周囲の表面温度、気温・風向風速があげられ、抑制方法の観点から、直達日射、天空日射、周囲からの放射、反射日射、透過日射の侵入や膜下空間内部の熱溜りの低減を調整する工夫が求められる。

ここで、光の適正化と熱の最小化はトレードオフの関係にあるため、第3章で構築した予測・評価ツールを活用し、定量的に示すことが可能となる。尚、トレードオフの評価方法については、後述提案する。

3) 熱環境対策方法

熱の最小化を考えるうえで、ここでは下記の3項目に分類する。

- ① 侵入する熱の最小化
- ② 放熱の促進
- ③ 適切な蓄冷

①の「侵入する熱の最小化」は、直達日射、天空日射、反射日射、透過日射に対して抑制するための提案方法として、

- A：直達日射の遮蔽方法
- B：天空、反射日射の侵入量の低減方法
- C：透過日射の侵入量の調整方法

②の「放熱の促進」は、周囲からの放射に対して抑制するための提案方法として、

- D：通風による体感効果の促進
- E：通風による排熱の促進
- F：通風を利用した冷気の導入
- G：冷放射部材による放射改善
- H：蒸発潜熱による冷却効果の促進

③の「適切な蓄冷」は、膜下内部空間の熱溜りに対して抑制するための提案方法とし、

- I：蓄冷用部材の利用

を考慮した設計方針を決め、予測・評価手法により、改善効果を示す。表4-1に、提案項目に対する対策例と設計に配慮する項目を示す。日射侵入の対策(A, B)として、屋根形態や壁面設置による空間形態の工夫、高反射材料の使用、開口部の調整等が考えられる。この場合の設計時の配慮項目は、光環境の悪化や動線計画により制限がある等

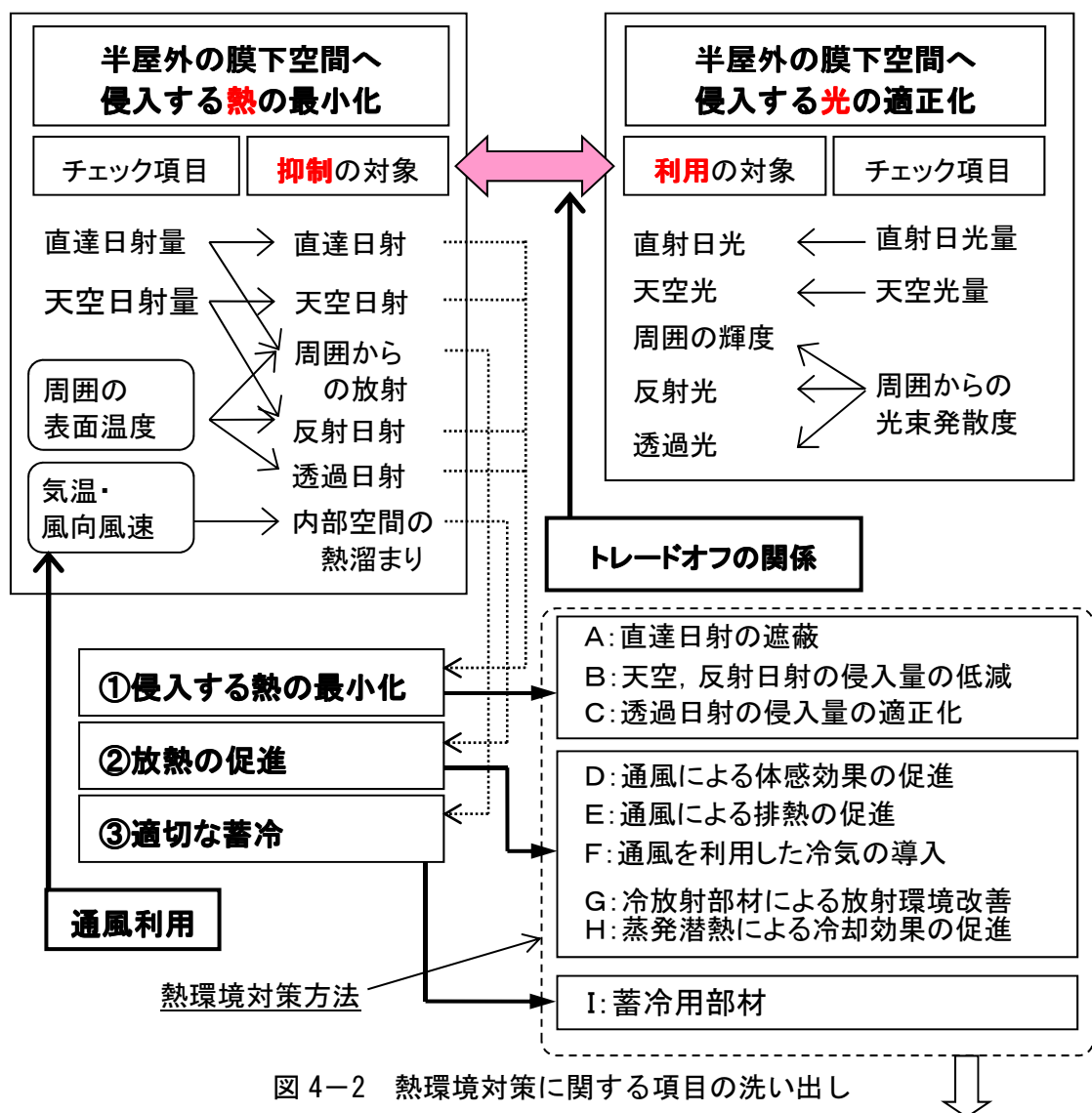


図 4-2 熱環境対策に関する項目の洗い出し

表 4-1 膜下空間の熱環境対策方法

熱環境の対策項目	記号	対策例	設計における配慮項目例
直達日射の遮蔽	A	空間形態の工夫 高反射材料等の利用	用途や動線計画により制限 光環境への影響
日射侵入量の低減	B	開口部の工夫	
透過日射の侵入	C	透過率の工夫	光環境への影響
通風の利用	DEF	利風の工夫 防風の工夫	用途や動線計画により制限 光環境への影響
潜熱利用	GH	潜熱部材の利用 散水の工夫	湿気や水分による影響 光環境への影響
蓄冷部材利用	I	蓄熱部材の利用	放射による影響 光環境への影響

があげられる。透過日射の対策（C）として、膜材の透過率の工夫が考えられる^{注2)}。設計時の配慮項目は、光環境の悪化があげられる。通風利用（D、E、F）として利風を検討するか、防風を検討するかで大きく方針が変わる。設計の配慮項目は、季節変動等の影響を考慮する必要がある、対策方法の矛盾や熱と風の対立の調整をしなければならないという難しさがある。また、風のコントロールを検討するときは、構成部材のディテールの工夫や屋根形状の変更、壁面等の配置計画等により、光環境への影響や動線計画からの制限が考えられる。潜熱利用の対策（G、H）として、潜熱部材の利用方法や散水の方法が考えられる。設計時の配慮項目は、湿気等の影響を考慮する必要がある。蓄冷部材利用の対策（I）として、ダイレクトゲインシステム等の蓄冷部材の活用が考えられる。設計時の配慮項目は、放射の影響や光環境への影響を考える必要がある。

図4-3に熱環境対策を考慮した膜下空間例を示す。図中の[A]から[H]は、図4-2の熱環境対策方法の番号を示す。

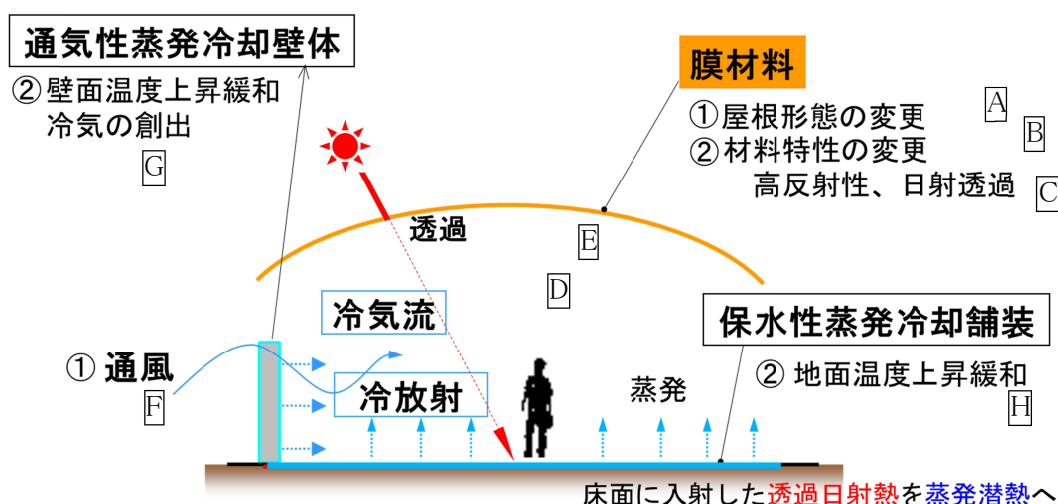


図4-3 熱環境対策を考慮した膜下空間例

4-3-3 熱環境対策方法と設計条件との関係

最後に、4) 熱環境対策方法から、具体的な対策項目と対策例について述べる。表4-2に膜下空間の光・熱・風環境に影響するパラメータ例を示す。ここでは、熱環境対策方法を選定した結果、改善効果を定量的に示す必要があるため、光・熱・風環境の予測ツールへの計算モデル変更条件と設計条件の再設定を行うための計算モデル変更のメニューが整理されている。

表4-2 膜下空間の光・熱・風環境に影響するパラメータ

	物理的要素	部位	膜下空間に影響する現象	影響パラメータ
熱環境	直達日射	屋根	膜面の日射吸収率による表面温度の上昇	膜面の日射吸収率
	天空日射	床	膜面からの日射透過による床面の表面温度上昇	膜面の日射透過率
	反射日射		開口部からの日射進入による床面の表面温度の上昇	床面の日射吸収率
		壁等	膜面からの日射透過による壁面等の表面温度上昇	膜面の日射透過率
			開口部からの日射進入による壁面等の表面温度の上昇	壁面等の日射吸収率
		構成部材	膜下空間における日射反射率による構成部材の表面温度上昇	日射反射率
	大気放射	構成部材		放射率
	対流熱伝達率	構成部材	熱容量が小さいため、風速の影響を受け表面温度が下がりやすくなる	風速、表面温度
	潜熱輸送	PCW等	蒸発潜熱による表面温度の低下	蒸発潜熱、絶対湿度
	長波長放射	構成部材	表面温度上昇により、地物からの放射熱の上昇	表面温度、放射率
光環境	伝導熱	構成部材	熱容量の違いによる表面温度の上昇	熱伝導率
	直射光	屋根	膜面からの可視光透過により床面照度値が上昇する	膜面の可視光透過率
	天空光	床	開口部からの可視光進入による床面照度値が上昇する	構成部材の可視光反射率
	反射光	壁等	膜下空間員における可視光反射率による照度値の上昇	構成部材の可視光反射率
風環境	風速	建物形態	通風や風の対流	空間形態
	乱流	-	構成部材の配置による風速変化	形態係数
	対流熱伝達量	構成部材	開口率と開口配置による風速の変化	対流熱伝達率

4-4 膜構造建築空間の光・熱・風環境を考慮した設計支援手法の提案

前節で述べたように、膜下空間に侵入する熱の最小化を実現するためには、通風や蒸発冷却手法を利用することは効果的と考えられる。そこで、膜下空間の通風を設計提案するため、3章で述べた光・熱環境の予測ツールに風環境シミュレーションを導入することで、光・熱・風環境を並列に予測できる設計支援手法を提案する。

図4-4に膜構造建築物の光・熱・風環境予測・評価手法の設計フローを示す。本設計フローは、3つの段階で構成され、1)設計条件の設定、2)シミュレータの連成解析を用いた予測・評価手法、3)設計者の判断による環境改善手法である。1)の設計条件の設定段階では、膜構造の設計パラメータとして、膜材物性、空間形態、膜構造以外の構成部材の物性が挙げられ、これらを設計コンセプトに基づいて設計条件と環境評価目標を設定する。次にこれらをCAD上で3次元の幾何形状を再現しモデル化する。2)の予測・評価手法の段階では、光・熱・風環境を解析し、評価に必要な項目を可視化する。その後、評価場所の解析結果に対し、評価基準と比較し設計判断する。3)の改善手法では、これらの評価結果を元に、課題点の抽出を行い、課題点が存在する場合は関連する項目の設計パラメータを変更して再設計を行うか、建築的手法や蒸発冷却手法等を適用する

対策の検討を行う。これらを 1)設計条件の設定段階にフィードバックし、予測・評価手法の結果から変更前後により環境改善の効果を検討する。最終的に環境評価の目標を達成した場合、設計完了となる。尚、評価手法については後述する。

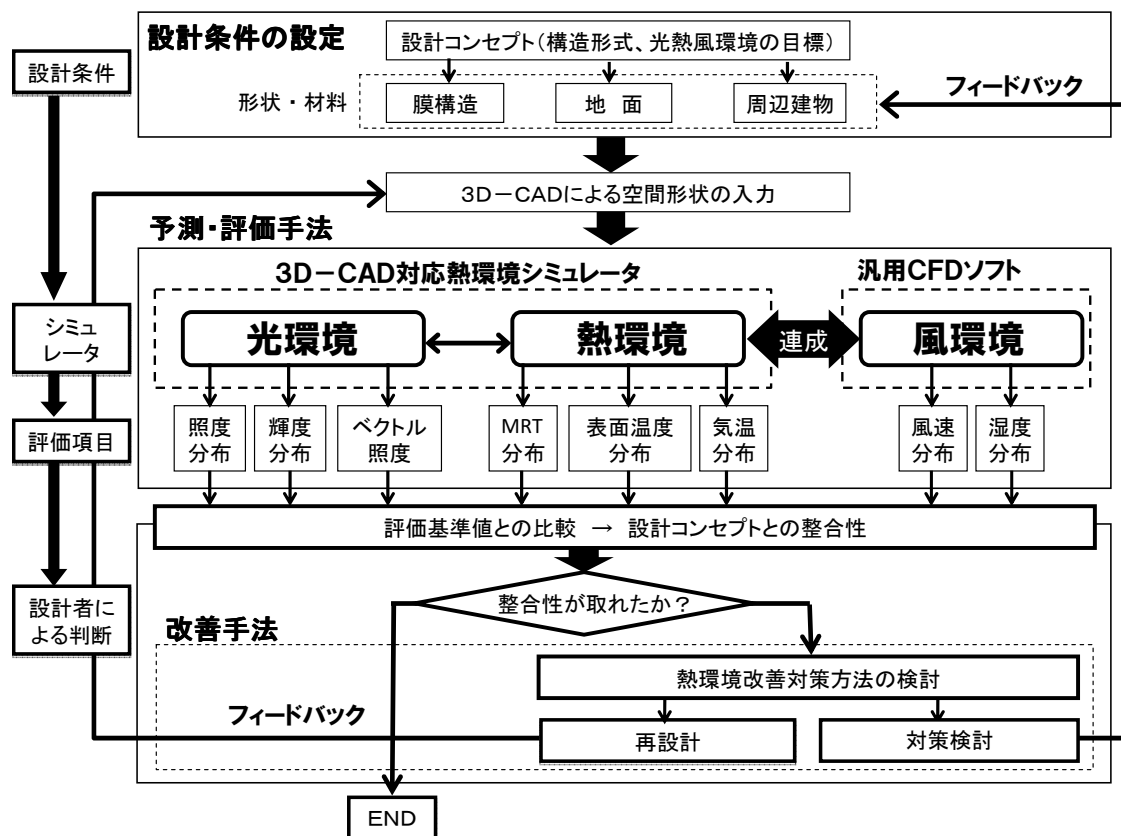


図 4-4 膜構造建築物の光・熱・風環境の設計フロー

4-4-1 本手法における熱環境と風環境の関係

本研究における膜下空間の光・熱環境のトレードオフ評価の考え方は、膜下の生活空間（地面から 1.5m とする）で活動する人が視覚的に良好な光環境と同時に、快適な熱環境であることを設計判断することと考えている。ここでの設計判断とは、膜下空間における熱環境対策方法の適用や設計変更の方針を決めることである。そのためには、熱環境対策方法の選定し、優先すべき熱環境対策の適用方法の考え方が重要になる。

光環境では、膜材からの透過光による適度な明るさを昼光照度と輝度画像、ベクトル照度により評価する。一方、同時に起こる透過日射による膜下空間の熱環境の問題については、表面温度と放射温度により評価する。さらに、侵入した熱を放熱する対策が必

要となった場合、適度な通風に着目し、熱環境対策手法の適用の有無を設計判断し、生活空間における平均的な気温と風速分布、放射温度で評価する。ただし、複雑な形状をした膜面からの対流熱伝達と熱輸送により生じる膜面の表面温度の上昇や近傍の熱溜りによる気温分布への影響が考えられる。しかし、本研究で対象とする半屋外の生活空間では、第2章の実測より得られた熱溜りの発生しそうな袋状の形状を除き、熱溜りの影響は少ないものと考えられる。尚、熱溜りの扱いについては、今後の課題とする。

4-5 光・熱環境と風環境の連成計算アルゴリズムの導入

4-5-1 既往の連成シミュレーション手法の概要

第3章で構築した光・熱環境の予測ツールは、気流・気温・湿度の予測は行えない。また、表面温度を決定するための重要なパラメータのひとつである街区内の風速分布は微気候評価を対象としているため、空間一様と仮定している。そのため、より精度の高い熱環境を予測するためには、風速の空間分布を考慮することが課題となる。

一方、街区内の気流性状を予測する手法として、気流シミュレーション（CFD：Computational Fluid Dynamics）を使用することが考えられる。この手法は、基本的には平均的な風速分布を予測するものであるが、これに熱と湿気の輸送方程式を連成することにより、気流・気温・湿気の空間分布を予測することができる。しかし、この手法は境界条件となる表面温度および蒸発量の与え方が課題となる。

また、CFDをベースとした微気候予測は、対象領域が比較的広域で、建物形状の単純化を行うことが殆どのため、境界条件となる表面温度を求めるための放射計算の精度はそれに準じたものとなっている。そのため、外部環境の膜下空間を詳細な形状再現に十分対応したものとはいえず、その主旨からは第3章で構築した光・熱環境シミュレータには及ばない。

そこで、光・熱環境シミュレータと気流シミュレータ（CFDソフト）の連成を行えば、熱環境シミュレータにおいては表面温度の予測精度の向上が図れ、CFDにおいては境界条件となる表面温度を精度よく与えることができる。これにより、建築空間の詳細形状を再現したうえでの微気候予測が可能になると考えられる。ただし、実際に2つのシミュレーションツールを連成するためには、前述の設計支援ツールとして必要な項目を満たすための連成手順、データ授受方法などに留意しなければならない。

1) 気流シミュレーションの概要

・乱流モデルの選定

本研究の対象となる膜下空間の熱環境対策方法として、たとえば蒸発冷却部材の適用を考えた場合、その部材によって得られる冷気は外部風の非定常な変化（揺らぎ）に支配される。風の揺らぎのように非定常的な現象を予測する精度が比較的高い乱流モデルとしては、LES（Large Eddy Simulation）などがある。外部環境を考慮した膜下空間における気流解析に LES を適用する場合、以下の二つの課題を解決する必要がある。

①流れ性状に応じたモデル係数の最適化、

②流入境界条件における非定常な境界条件（流入変動風）の作成

しかしながら、上記2点に関しては、実務レベルで適用できるまでに至っていないのが現状である。特に、②の流入境界条件として与えるべき乱流変動は取り扱いが難しい問題である。近年、LES のための流入変動風の生成方法に関する多くの研究が行われているが、これを適切に行うには乱流理論や風工学の専門知識を必要とする。また、汎用ソフトでは十分なサポートがなされていない場合も多いため、LES による予測を実務の領域で普及させて行く上では、流入変動風の問題が依然として大きな障害となっている。

一方、流れに対して時間平均操作を施した平均流として扱う RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equation) モデル（レイノルズ平均モデル）という乱流モデルが実務上よく用いられている。予測すべき対象が統計的平均流のみであるならば、RANS モデルでも実用上十分な精度が得られると報告されている（例えば、文献⁴⁻⁴⁾）。本研究では、気流は平均流とし扱い、気流解析には RANS モデルを適用することとする。そして、RANS モデルの代表的モデルとして、改良型高レイノルズ $k-\varepsilon$ モデル（L-K モデル⁴⁻⁵⁾）を使用することにした。また、上空風を気流シミュレーションの流入条件として上記の乱流モデルを適用する。

ここで、標準型の $k-\varepsilon$ モデルを建物まわりの流れの解析に用いると、風上コーナー部で乱流拡散が過剰となり、屋上面に生じる逆風や地表面付近の風速増加領域が正しく予測できない。本研究で採用した改良型 $k-\varepsilon$ モデル（L-K モデル）も建物風上コーナー部周辺の剥離に伴って生じる強風域の予測精度を改善する効果があるが、建物後方の循環流域の広さが実測や実験結果よりも広く予測される問題は依然として残っている。この建物後方の循環流領域の性状に関しては、渦放出に伴う周期的な変動が再現されない $k-\varepsilon$ モデルを適用する場合には、高精度に予測することは困難である。

・計算アルゴリズム

本連成手法の流体は非圧縮性流体と仮定し、質量保存式、運動量保存式、流体－固体エネルギー保存式、乱流エネルギー・乱流消失率の式、拡散物質の保存式を基本方程式（表 4－3 の式 4－1 ～式 4－6）とする。これらの方程式を離散化して解くために、SIMPLE 法による計算アルゴリズムを用い、移流項の差分スキームには QUICK スキーム（2 次精度風上差分）を用いる。

乱流モデルは標準 $k-\varepsilon$ モデルの改良型である L-K モデルを採用する。L-K モデルは、標準 $k-\varepsilon$ モデルの問題点であった風上側隅角部での乱流エネルギーの過大生成を改善するため、乱流方程式の生産項に改良を加えたものである。

表 4－3 気流解析に用いる基礎方程式と乱流モデル

質量保存式	$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$	式 4－1
運動量保存式	$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \underbrace{\rho g_i \eta (T - T_0)}_{\text{温度差による浮力項}}$	式 4－2
乱流エネルギー k の輸送方程式	$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \underbrace{G_s + G_T}_{\text{浮力による } k \text{ の生産}} - \rho \varepsilon$	式 4－3
乱流消失率 ε の輸送方程式	$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \underbrace{C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_s + G_T) (1 + C_3 R_f)}_{\text{浮力による } \varepsilon \text{ の生産と消散}} - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}$	式 4－4
	$G_T = g_i \eta \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad R_f = -\frac{G_T}{G_s + G_T}$	
熱エネルギーの保存式	$\frac{\partial \rho c_p T}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho c_p T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right)$	式 4－5
絶対湿度 q の輸送方程式	$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial u_j q}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_m \frac{\partial q}{\partial x_j} \right)$	式 4－6
乱流モデル (L-Kモデル)	$G_s = \rho C_t \frac{k^2}{\varepsilon} S \Omega, \quad \mu_t = C_t \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2}, \quad \Omega = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2}$ $C_1(\eta) = 1.42 - \frac{\eta(1 - \eta/4.38)}{1 + 0.012\eta^3}, \quad \eta = \frac{k}{\varepsilon} S$	

$$\begin{aligned} \text{乱流エネルギー} & k \\ \text{乱流消失率} & \varepsilon \end{aligned} \quad k = (SV)^2, \quad \varepsilon = \frac{\sqrt{\rho C_t} S^2 V^3}{n(Z - Z_0)}$$

$$C_1 = C_1(\eta), \quad C_2 = 1.68, \quad C_3 = 0.0, \quad C_t = 0.085, \quad \sigma_k = 0.719, \quad \sigma_\varepsilon = 0.719, \quad \sigma_t = 0.9,$$

各定数の設定値

$$C_1(\eta) = 1.42 - \frac{\eta(1 - \eta/4.38)}{1 + 0.012\eta^3}, \quad \eta = \frac{k}{\varepsilon} S, \quad \underline{S} = \min\left(20, \frac{k}{\varepsilon} S\right), \quad C_t = \min\left(0.09, \frac{0.3}{1 + 0.3\underline{S}^{1.5}}\right)$$

x_i	位置座標[m]	u_i	x_i 方向の流速[m/s]	t	時間[s]
ρ	密度[kg/m ³]	μ	粘性係数[kg/(m・s)]	μ_t	渦粘性係数[kg/(m・s)]
g_i	加速度[m/s ²]	η	体膨張率[K ⁻¹]	T	流体・固体の温度[K]
T_0	流体の基準温度[K]	c_p	定圧比熱[J/(kg・K)]	λ	熱伝導率[W/(m・K)]
k	乱流エネルギー[m ² /s ²]	ε	乱流消失率[m ² /s ³]	D_m	水蒸気拡散係数[m ² /s]
C_1, C_2, C_3	乱流方程式の定数	$\sigma_k, \sigma_\varepsilon, \sigma_t$	乱流方程式の定数	V	風速[m/s]
S	乱れの強さ	Z	高さ[m]	Z_0	基準高さ[m]

気流シミュレーションにおいて全ての固体の温度を固定しているため、熱伝導の解析を行なわない。

水蒸気の拡散に対する絶対湿度 q の輸送方程式 (式 4-7) では等方性拡散と仮定している。拡散係数 D_m は下式で与える。

$$D_m = 2.311 \times 10^{-5} \left(\frac{T_a}{273} \right)^{1.8} \quad \text{式 4-7}$$

ここで、 D_m は水蒸気の拡散係数[m²/s]、 T_a は気温[K]である。

・ 計算格子

熱収支シミュレーションに用いる熱環境シミュレータが構造格子でのメッシュ化を行うため、データ授受等の利便性を考慮し、気流シミュレーションにも構造格子でのメッシュ化を行う。

2) 既往の連成計算の流れ

熱環境シミュレータと CFD ソフトを用いた連成手法として、山村の既往研究⁴⁻⁶⁾ および高橋の既往研究⁴⁻⁷⁾ がある。図 4-5 と 4-6 に計算の流れを示す。

本連成手法は、二つのツール間でのデータ授受を繰り返すことで解析を進める。この場合、熱収支シミュレーションの計算メッシュと気流シミュレーションの計算メッシュは、一対一で対応するデータ授受を行っている。しかし、気流シミュレーションは、建物や地面の表面のみをメッシュ化する熱収支シミュレーションとは異なり、空間全体をメッシュ化するため要素数は格段に多くなる。解析対象の街区規模にもよるが、熱収支シミュレーションと気流シミュレーションで同様のメッシュ分割を行うと、気流シミュレーションの要素数が著しく増大し、計算機のメモリの制約上、計算不可能になることも考えられる。

本研究で対象となる膜構造建築の屋根のような複雑な形状を持つ構造物を気流シミュレーションでメッシュ化を行う上では、上記のような問題点が生じる。ここでは、光・熱・風環境を並列的に評価するシミュレーションツールとして設計提案に用いていくことを念頭に置いているため、計算負荷が膨大になり計算に長時間を有することや、一般的なPCのメモリの制約の中で、計算可能な手法が望まれる。

そこで、第2章の実測調査によって明らかになった膜下空間の光・熱・風環境を考慮し、計算負荷が小さく設計支援として用いることが出来る膜構造建築用の熱収支・気流連成シミュレーション手法を、既往の手法に改良を施すことで導入を行う。

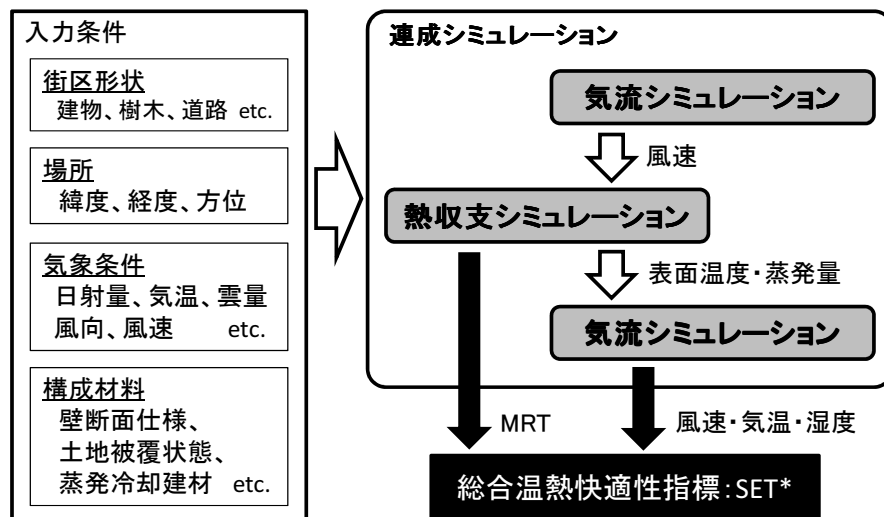


図4-5 既往の熱・風環境の連成計算設計フロー

<連成手法の手順とその適用条件>

- (1) [計算モデルの作成] 計算対象地における膜構造建築物や建物、樹木等の空間形態を 3D-CAD モデルにより再現する。
- ※作成された 3D-CAD モデルを CFD ソフトに取り込み、熱・風環境シミュレーションの共有データとし、計算メッシュは 1 対 1 で対応するように作成する。
- (2) [1 回目の気流計算] 等温状態での定常気流解析 (RANS モデル：解析対象時刻とその 1 時間前の時刻) により対象地内の風速分布をシミュレーションする。
- (3) [熱収支計算] 気流解析によって得られた対象地内の表面近傍 (表面より第 1 セル) 風速分布を表面対流熱伝達率の算出の入力データとして利用する。
- ※膜面の形態について、質問・指摘 4 で述べておりますが、熱溜りが予想される形態については、その影響を無視できない可能性があるため、本手法の適用外とする。
- (4) [2 回目の気流計算] 全表面熱収支シミュレーションで算出された表面温度分布と蒸発量の出力データを気流解析の境界条件に加えて、非等温分布状態における定常気流解析を実施する。
- ※適用範囲については、②と同じである。
- (5) [出力結果] 一日を通して全時刻における対象地内の全表面温度分布、着目時刻における風速・気温・湿度分布が算出される。また、生活空間における熱的快適性の評価指標である平均放射温度 (MRT) 分布や新標準有効温度 (SET*) 分布の時間変化も求められる。

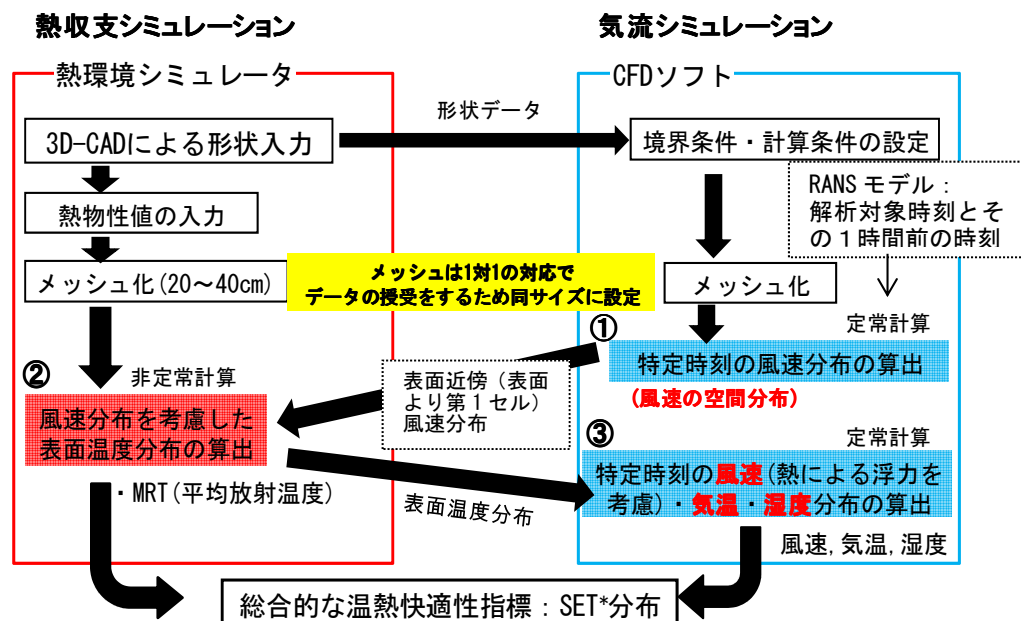


図 4-6 熱・風環境の連成計算アルゴリズム

4-5-2 膜構造建築空間のための連成手法の提案

従来の連成計算手法では、熱収支シミュレーションと気流シミュレーションで、同座標で同サイズのメッシュ化し、各ソフトでの計算結果を相互に授受することで計算を行っている。この手法は膜構造建築の膜屋根の形状を再現する場合、計算負荷が膨大になる。そこで、膜構造建築用の計算負荷を軽減させた連成計算アルゴリズムを図 4-7 に示す。計算の手順としては、

- ① CFD ソフトを用いて、特定時刻の膜下空間の風速分布の算出を行う。この際、空間の表面温度分布を考慮せず計算を行っている。
- ② 次に、実測により膜下空間内においては鉛直方向の気流の停滞が見られることから、膜面毎に対する膜外空間の平均風速と膜内空間の平均風速とを算出する。また、熱収支計算においては膜下空間の対流熱伝達率と膜外空間の対流熱伝達率の2つの対流熱伝達率を入力条件とすることで、熱収支計算の際に各メッシュ毎に対流熱伝達率を用いる従来の連成手法からの計算負荷の軽減を計った。
- ③ 熱収支シミュレーションで算出した空間の全表面温度分布から、膜面毎の平均温度を算出し、気流シミュレーションへ連成する際、従来のやり方のように気流シミュレーション上の各メッシュに温度を与えるのではなく膜面毎に温度を与えることで、計算負荷の軽減をはかる。

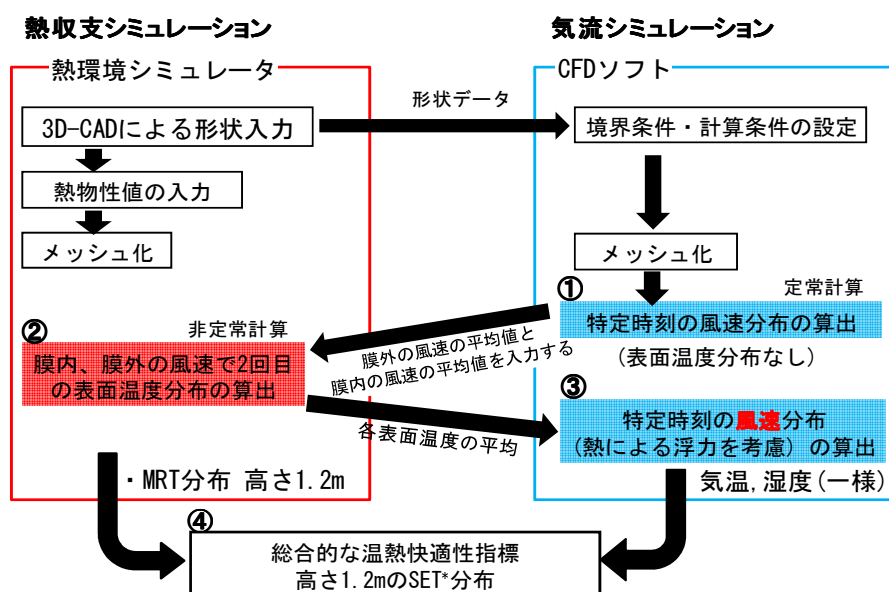


図 4-7 膜構造建築物の連成計算アルゴリズム

2) 計算精度の検証

第3章で提案した膜材料の伝熱モデル及び、提案した連成計算アルゴリズムの計算精度を検証するため、膜下空間の全表面温度分布を指標として行う。図4-8に解析対象とした膜構造建築空間のCADモデルとその周辺構成材料の概要を示す。計算に用いた膜材料の物性値は表4-3に示す通りである。計算に用いた気象条件は図4-9に示す。

本シミュレーション手法による計算結果の有効性を確認するため、膜材の表面温度の計算値を実測値と比較した一例を図4-10に示す。連成計算を行わないで計算した膜下空間の表面温度分布と膜構造建築用の連成計算手法によって計算した膜下空間の表面温度分布とを比較すると、連成計算アルゴリズム手法を適用した場合の表面温度の方がより、実測値に近い分布になっており、その誤差は1℃程度であることから、提案した膜構造建築用の連成計算手法の有効性を確認した。

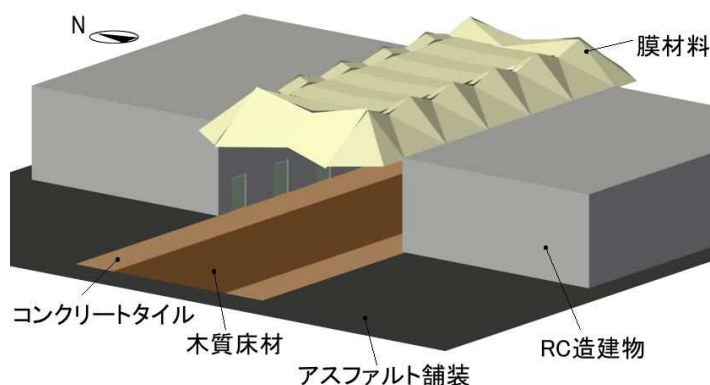


図4-8 計算対象膜構造空間の3D-CADモデル

表4-3 膜材料の熱物性特性

日射反射率	日射透過率	熱伝導率[W/(m・K)]	厚さ[mm]
0.74	0.09*	0.103	0.83

*実測結果の値

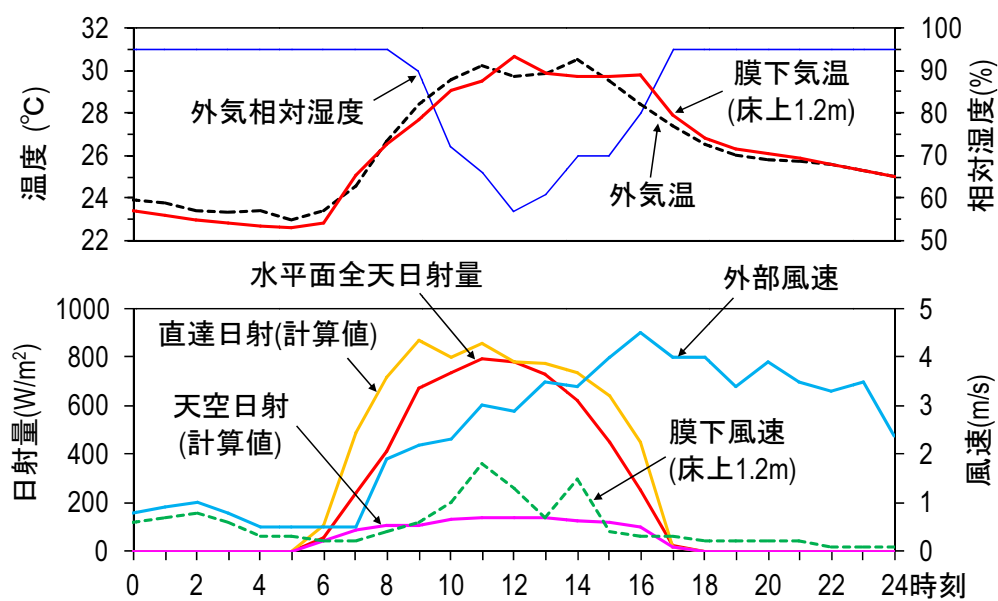
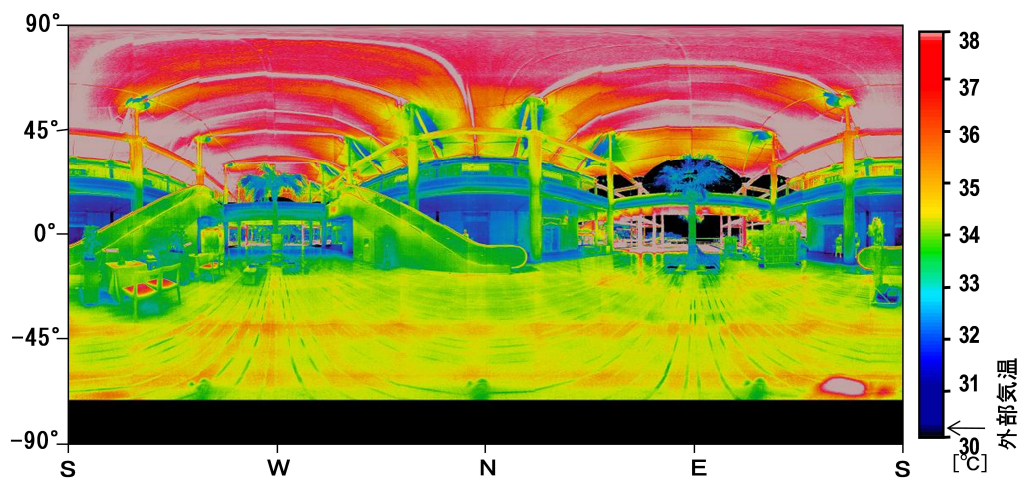
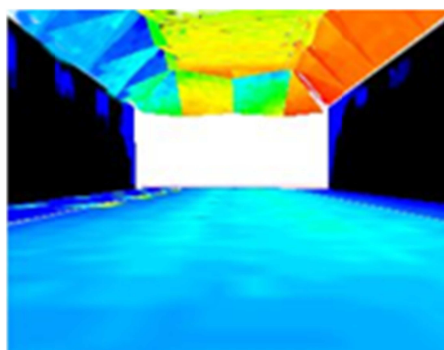


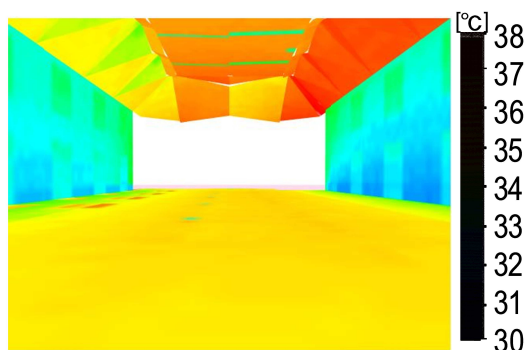
図 4-9 計算に用いた気象条件



測定点 12 時の全球熱画像



対流熱伝達率が一様



膜内と膜外 2 つの対流熱伝達率

図 4-10 全球熱画像と数値シミュレーションによる膜表面温度の比較例 (12 時)

4-6 実測対象の膜下空間における熱的快適性の評価

通風効果を設計提案することを想定し，ケーススタディにより，主風向と膜下生活空間（地面から 1.2m）の放射環境と熱的快適指標（SET*）との関係性を示すことで，その効果を定量的に把握することが可能となる。

ここでは，膜構造建築物は開口部からの通風の効果があり，主風向により膜下空間の快適性に大きく影響を及ぼすことが考えられる。そこで，図 4-11 に示すように主風向が膜下空間を通り抜けるケース (Case1) と通り抜けないケース (Case2) について快適性の評価を行う。気流シミュレーションの計算条件を表 4-4 に示す。流入境界にはベキ乗則（市街地：n=4）を適用し，風速基準高さは地上 6.5m とした。また，入力気象条件は図 4-9 の外部気象で風速は 12 時を用いる。Case1 の計算モデルの概要を図 4-12 に示す。



図 4-11 主風向の概要

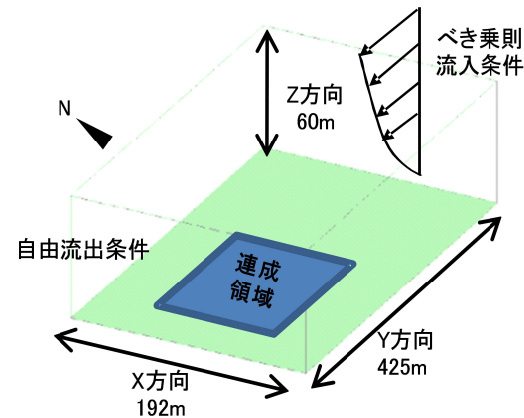


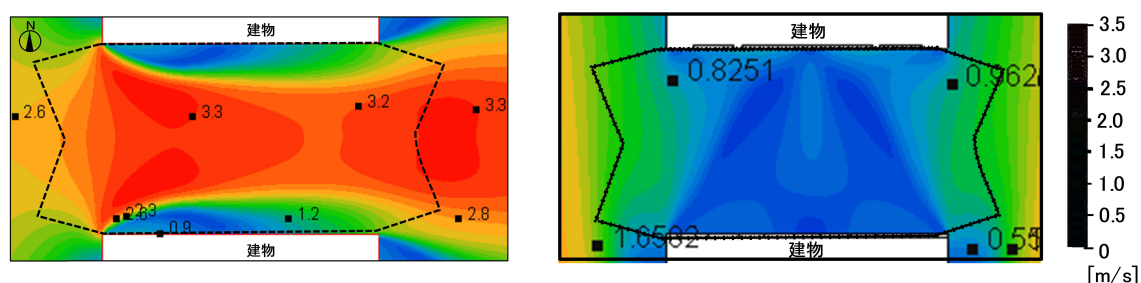
図 4-12 CASE1 の計算モデル概要

計算領域	192m(X) 425m(Y) 60m(Z)
メッシュ分割	(40cm): 膜構造建築及び膜周辺 不等間隔(拡大率: 1.1)
壁面境界	滑面の対数則
熱伝達境界	ユルゲスの式より対流熱伝達率を算出
流入境界	ベキ乗速 (n=4, 基準高さ6.5m)
流出境界	表面圧力境界
乱流モデル	LKモデル
差分スキーム	QUICK

表 4-4 計算条件

4-6-1 主風向における熱的快適性への影響

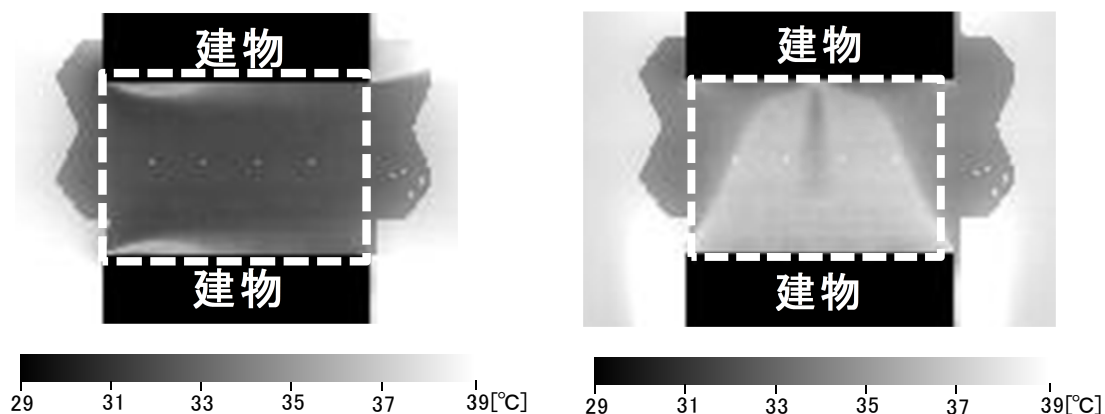
膜下空間の開口部からの主風向を気象条件とする CASE 1 と膜下空間の開口部方向の軸に対して垂直の主風向を持つ CASE 2 について、SET*を指標として熱的快適性の評価を行った。Case1 では膜下空間の中央部において、30～32℃の分布を示し、Case2 においては、35～38℃の分布を示した。(図 4-13)。開口部における通風性状が膜下空間の快適性によって、大きく影響することを示した。また実測時と同風向に設定した Case1 では 12 時において、膜下代表点高さ 1.2m の SET*は 32℃程度であり、実測値の 32℃と比較し、本章で提案した膜構造建築用の連成計算手法の有効性を確認した。



Case1

Case2

膜下床面高さ 1.2m の気流分布



Case1

Case2

膜下床面高さ 1.2m の SET*の分布

図 4-13 主風向による膜下空間の快適性への影響

4-6-2 膜下空間の床面材料の違いによる熱的快適性の評価

実務設計において、昼光利用の結果、膜下の床面温度が上昇したことに対し、床面材料を調整する設計提案を考えた場合、その効果を定量的に示す必要がある。その際、表面温度の大小に加え、熱放射環境の改善効果と膜下の気温について提案することが必要である。

床面温度の上昇を抑制する床材の効果を比較するため、計算モデルは図4-8と同一とし、2つの検討ケースを設定した。Case1は現状の木板床であり、Case2は蒸発冷却効果を有する蒸発冷却舗装を利用した場合である。なお、適用対象とした蒸発冷却舗装体は、梅干野らが試験体を用いた長期屋外実験等により開発した蒸発冷却舗装システム⁴⁻⁸⁾である。

前記実測日の気象条件において、Case1とCase2について膜下空間の表面温度分布を算出した結果(12時)の一例を図4-14に示す。同図で見られるように、膜下の床表面温度は床面に蒸発冷却舗装を適用した場合(Case2)の方が2~3℃低くなっていることがわかる。また、2つのケースについて計算した膜下空間の中央部の床表面温度の日変化を図4-15に示す。日中の床表面温度は、膜下の床面が木板で仕上げられたCase1の方が最も高く、蒸発冷却舗装を適用したCase2が最も低い。また、蒸発冷却舗装を適用した床面の温度(Case2)は一日中外気温を1~3℃下回っていることも見られる。

床面温度低下により、膜下の気温もCase1に比べCase2では、主風向が変化した場合でも、1℃程度低い値を示し、かつ外気温を若干低くなった(図4-16)。

床表面温度の違いが膜下の生活空間における熱放射環境に及ぼす効果を把握するために、膜下生活空間(地上高さ1.2m)におけるMRT分布を算出した結果を図4-17に示す。床面が木板仕上げである場合、膜下空間・中央部のMRTは約40℃であった。これに対して、床面への蒸発冷却舗装の利用によって膜下生活空間のMRTが2℃前後低い38℃に低下していた。

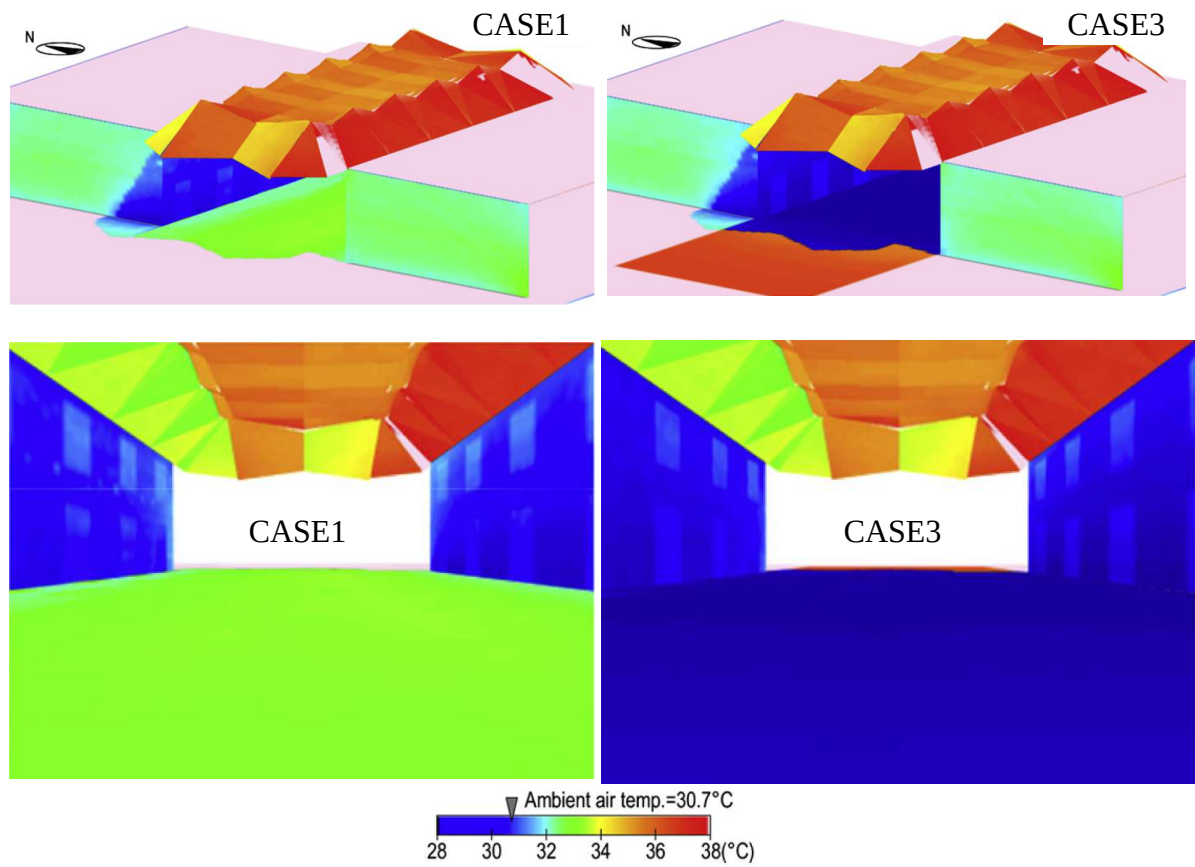


図 4-14 12 時における表面温度分布図

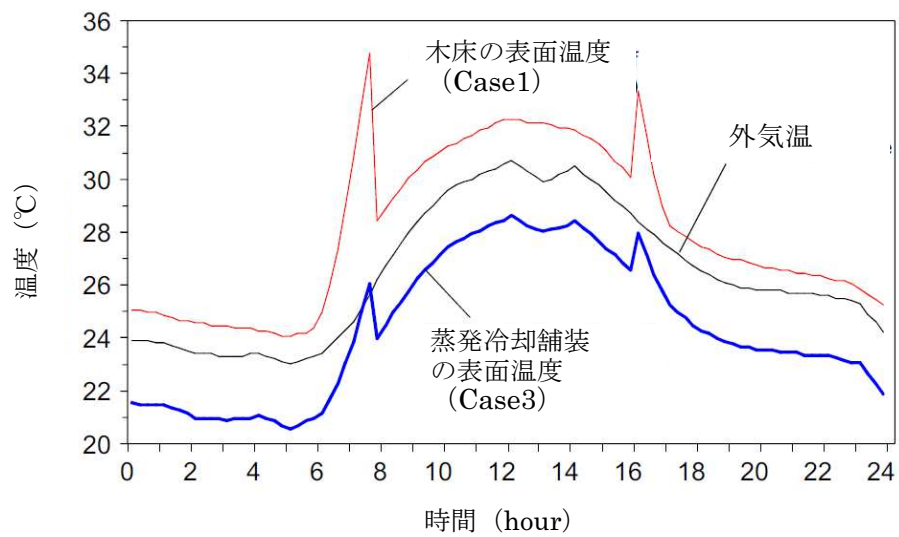


図 4-15 床面表面温度分布の日変化

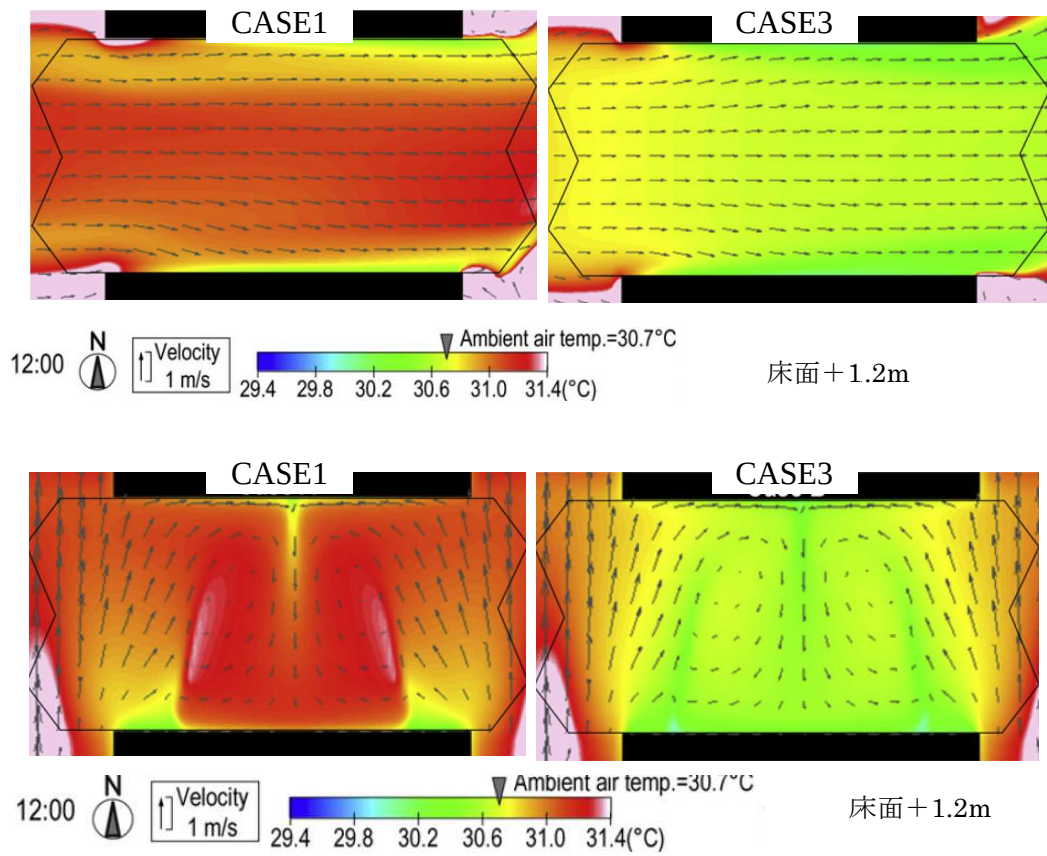


図 4-16 12 時における気温分布図

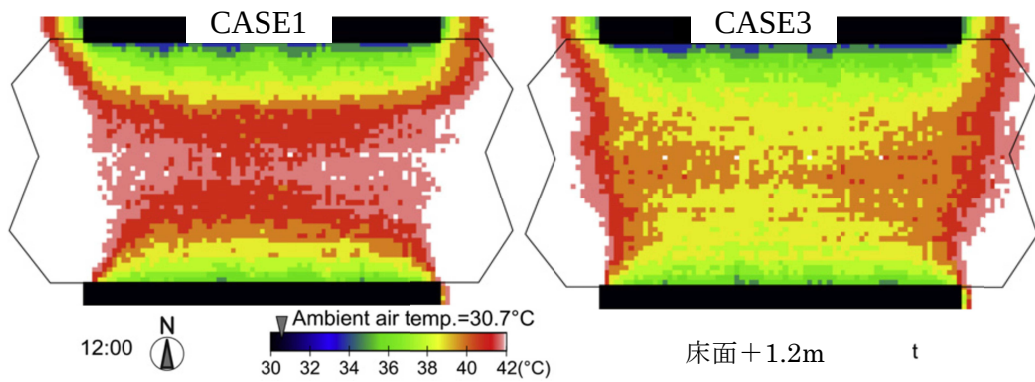


図 4-17 12 時における日射を考慮した MRT 分布図

4-7 光・熱・風環境の関係性を考慮した評価方法の提案

本研究における半屋外の膜構造建築空間の光・熱・風環境の評価をする際、評価範囲において光・熱・風環境の制約を満足することが要求されると同時に、より効果的に設計目標を達成されることが望まれる。そこでは、膜下空間を形成する形態や材料に求められる種々の条件を満たしつつ、どこまでその目的を進めることができるかという課題が必然的に生じてくる。この課題が、膜下空間の最適化問題という考え方につながる。

本研究では、膜下空間の熱環境対策に関わる最適化問題として、昼光利用と通風利用を考慮し、膜下空間を構成する空間的パラメータを操作する問題と膜材の材料特性パラメータを操作する問題と定義する。空間的パラメータを操作する膜下空間の最適化問題とは、膜下空間の熱環境の改善手法を導入することによる光・風環境へ影響する形態を設計変数とする最適化問題である。これに対して、材料特性パラメータを操作する膜下空間の最適化問題とは、膜材の日射・可視光線透過率を設計変数とする最適化問題である。図4-18に、膜下空間の熱環境対策（表4-2）の適用を考慮し、光・熱・風環境の評価に関する設計変数の一例を示す。実際の評価においては、設計コンセプトや施主からの要望等により、設計変数が設定されることが望ましいが、本研究では、第2章で対象とした商業施設に着目し、評価方法の検討を試みる。

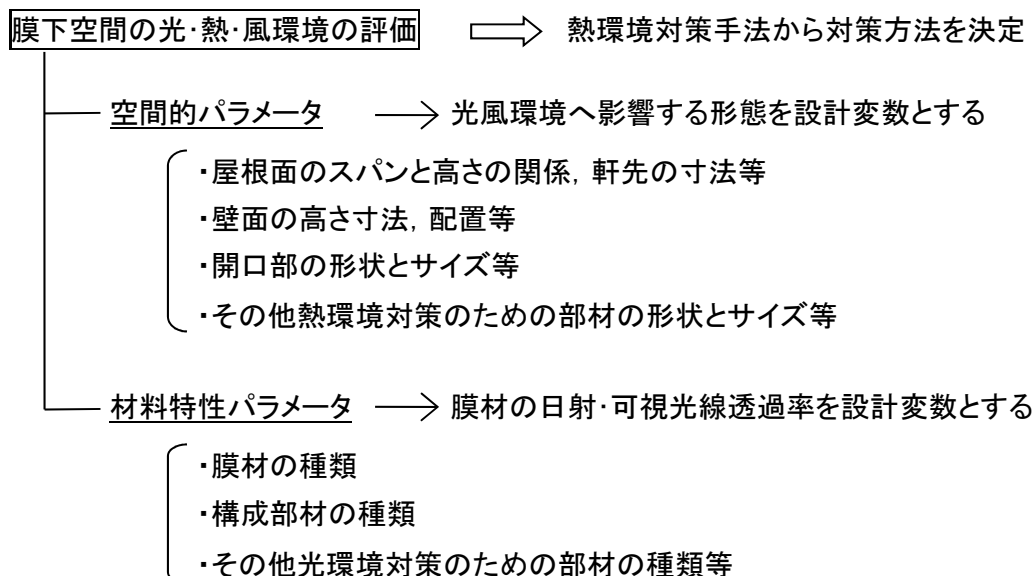


図4-18 膜下空間の設計変数の一例

4-7-1 半屋外膜下空間における光・熱・風環境の目的関数の設定

膜下空間における光・熱・風環境のトレードオフの関係性を最適化手法により評価するために、目的関数を設定する必要がある。本最適化手法では、昼光利用や通風利用、熱環境対策の観点から、評価項目を整理し、トレードオフ評価に必要となる目的関数を設定する。

目的関数を設定するためには、設計要求に合致する評価項目を整理する必要がある。本研究の対象空間である半屋外の膜構造建築空間は、自然エネルギーを利用した、光・熱環境の快適な膜下空間を創造することを目指している。その空間を設計提案するためには、1) 膜材からの日射透過による膜下空間の光環境改善効果（昼光利用）、2) 膜下空間の熱環境改善手法として、通風やパッシブな蒸発冷却部材の利用による改善効果（通風利用）があげられる。

（１）昼光利用による評価項目

膜構造建築物からの透過光による膜下空間の昼光環境は、外部光環境の変化に応じて変化しつつも調和のある光環境を作るという視点が重要となる。そのため膜下空間において、1)いかに必要な光量を確保するか、2)いかに照明エネルギーの使用割合を減らすか、3)十分な日射を取得しながら、いかに眩しさを処理するか、4)いかに余分な日射エネルギーの進入を防ぐかを考慮し、バランス良い設計が必要となる。したがって、昼光計画が目指す目標は、1)膜下空間にできるだけ多くの均斉のとれた昼光を取り込むため、膜構造の空間形態を設定すること、2)昼光の導入量や導入される昼光の変動を把握し、人工照明の制御を考慮したシステム構成を検討することである。本研究では、昼光の変動により光環境への影響を考慮することとする。

膜下空間の昼光計画において検討することは、膜面からの可視光透過と開口部からの直射日光の侵入により形成される膜下空間の光環境を評価する。そのため目的関数は、①対象範囲全体における床面照度分布（最低基準の評価）とベクトル照度分布（光質、グレア等の評価）の予測、②対象場所における輝度画像による光質の評価（グレア対策の検討）があげられる。

（２）通風利用による評価項目

膜構造建築物に当たる風をコントロールする方法は2つ考えられる。風を利用する場

合（利風）と風を防ぐ場合（防風）である。計画に当たっては利風を優先するか防風を優先するかを明確に設定する必要がある。本研究においては、熱環境改善対策の1つである蒸発冷却壁体を半屋外膜下空間に設置し、冷氣溜まりをコントロールすることを想定しているため、利風を例に述べる。熱環境改善対策を検討する際、熱溜まりを換気により改善する場合は、極力壁面をなくするような空間形態が良いが、冷氣溜まりを設計する場合、壁面の配置に大きく左右される。

風のコントロールは検討対象によりスケールが異なる。1) 構成部材近傍を検討し、性能を明確にする。2) 膜下空間のスケールでは、風の進入を促進する形態を検討する。3) 周辺建物を含む街区スケールでは、地域特性を考慮した風向・風速が対象膜構造に及ぼす影響を検討する。このように、風のコントロールを評価地点に集中させることは難しく、各スケールの利風や防風の対策技術の組合せが必要である。また、通風計画の際、四季の変化、日時の変化、昼夜の変化等を考慮し、どの部分の値を取り込み、設計条件とするかを決定する必要がある。したがって、通風計画が目指す2つの目標は、1) 風向によらず、一定の通風量が得られるようにすること、2) 夏季や中間期において、十分な通風量が必要な時間において確保するために、熱環境対策手法を適切に用いて、その種類や配置を検討することが重要である。

膜下空間の通風計画において検討することは、蒸発冷却手法等の適用の有無を設計判断できるように必要な部分の風環境を評価する。そのため目的関数は、①対象範囲全体における風速分布の予測、②対象場所に適用した改善技術に求められる性能を最大限に発揮するための風速分布の予測があげられる。

（3）熱環境改善手法の適用による評価項目

膜下空間の熱環境改善手法を適用するときの目指す3つの目標は、1) 熱溜まり空間に対して風通しをデザインするため屋根面や壁面形態を工夫すること、2) 熱放射環境の改善のため、日中を通してできるだけ直達日射の進入を防ぐような空間形態を設定し、熱環境の悪化防止に努めること、3) 評価地点における熱放射環境改善のため蒸発冷却部材を床面や壁面に適用し、表面温度上昇を抑制することがあげられる。また局所的には、蒸発冷却壁体により囲み空間を形成し、冷涼空間の創造や冷気流による気温低下地点の設計が考えられる。

熱環境改善手法の適用を検討する際、膜面からの日射透過と開口部からの日射侵入に

より形成される膜下空間の熱環境を手法の適用前後において評価する。そのため目的関数は、①対象範囲全体における表面温度分布、日射を考慮した MRT 分布、気温分布の予測、②対象場所を取り囲む表面温度分布、日射を考慮した MRT 分布、気温分布の予測があげられる。

4-7-2 光・熱・風環境の評価のための多目的最適化の手法

膜下空間を構成する空間形態や材料の選択は非常に多様な解の候補を持ち、光環境や熱環境、風環境など複数の評価指標が存在する。この条件のもと多目的最適化問題に対する手法の 1 つとして、Pareto 最適解を求めるための手法として考案されたスカラー化手法が一般的に知られている。その手法の概念を探索に用いたアルゴリズムとして、Fonseca らにより提案された MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) ^{注1)} の計算方法をもとに検討する。

本研究のアプローチとしては、一つの最適解を求めるのではなく、その設計要求に対し、目的関数であげられる項目の関係性からトレードオフを評価し、その傾向を分析することから設計判断することを目的としている。したがって、本研究では、1 回目の最適化計算により設計判断ができる点に着目し、MOGA を用いる。

4-7-3 トレードオフ評価の概要

図 4-8 に示す半屋外空間を有する膜構造建築物を例として、ここでは一定の風環境を維持した上で、光環境、熱環境、エネルギー消費量が最適となるような膜構造建築の透過率に着目する。光・熱環境の快適性の評価には、膜下空間中央部の床面から高さ 1.5m を対象とする。また、検討する気象条件は図 4-9 とする。

1) 設計変数の設定

膜構造建築空間を構成する形態と膜材の材料特性から設計変数を設定する。膜構造の形態については、膜スパンに対する軒先の高さ寸法や曲率といった項目に注目するところだが、ここでは、対象モデルが決定したこととする。ここで、膜材の材料特性については、透過率を設計変数と設定する。また、検討する膜材の種類は、透過率 0%、10%、20%、30% の 4 種類とする。

2) 目的関数の設定

本最適化問題では、光環境と熱環境、省エネ性の観点から4つの目的関数を設定する。ここで、商業施設の広場を対象としているため、極端な明るさよりも利用客の歩行や待機環境を重視する観点から、光環境では昼光照度と均斉度を評価項目として、膜材からの日射透過による構成部材の表面温度の上昇による放射環境の悪化が利用客の熱的快適性に影響する観点から、熱環境では日射を考慮した平均放射温度を評価項目として、省エネ性の観点から、照明エネルギー消費量とした。ここでは、膜下空間の通風性状や光質は適度な効果が期待できるとして、制限条件で考える。

(1) 照明エネルギー消費量

照明エネルギー消費量は、膜下空間の代表的な1日の照度分布を求め、制約条件(たとえば1000lx以上)に満たない場合を照明点灯の時間とし、照明点灯の範囲については、均斉度の制約条件(たとえば0.4以上)に満たない場合の照度分布からその範囲を設定する。ここで、照度センサーによる制御を想定することにより、昼光により一定以上の照度が確保されるエリアについては照明 OFF となるよう設定する。

今回の評価期間は、夏季(7月~9月)とする。

(2) 均斉度

膜下空間の床面から1.5m面での均斉度とする。

(3) 昼光照度

膜下空間の中央部の12時における照度値とする。

(4) 日射を考慮した平均放射温度

膜下空間の中央部の12時における日射を考慮した平均放射温度とする。

3) 制約条件の設定

本研究における評価基準は、一般的な推奨値に従い、以下の制約条件を設ける。

- 1) 平均昼光照度：1000[lx]以上 (JIS 照度基準)
- 2) 日射を考慮した MRT：25[℃]以下 (気象庁：夏日の定義)
- 3) 通風性状：半屋外空間であり、開口方向が山から海へと並行に配置荒れていることから、ある程度の風速は確保できることとする。

4) 輝度や明るさ感： 周辺建物の高さに対して，膜構造屋根面のスパンが 1.5 倍程度あること，膜材からの可視光透過は均等拡散であることから，膜下空間の光質は確保されているとする。

以上より，対象モデルに対する最適化問題の設計変数と目的関数，および制約条件を表 4-5 にまとめる。

表 4-5 対象モデルに対する最適化問題の概要

設計変数	目的関数
膜材の種類 (4 種類)	- 昼光照度 (光環境) →最大化 - 均斉度 (光環境) →最大化 - 日射を考慮した MRT (熱環境) →最小化 - 照明エネルギー消費量 →最小化
制約条件 - 平均昼光照度：1000[lx]以上 - 日射を考慮した MRT：25[℃]以下 - 通風性状：適度な風速は確保されている - 輝度や明るさ感：満足する範囲である	

4-7-4 計算方法

計算方法は，構築した光・熱・風環境の予測ツールにより，日変化を考慮した昼光照度，均斉度，日射を考慮した平均放射温度（MRT）を計算する。また，照明エネルギー消費量は，評価期間の代表日において，対象範囲全ての照明点灯時間と照明器具の消費電力を掛け合わせ計算する。また，照明点灯時間は光環境シミュレーションの結果より，照明モード^{注3)}を設定し，照明点灯の制約条件により判断し，照明のスケジューリングを作成する。尚，建築用途によっては，安全性等の理由により制約条件を満足し消灯する条件であったとしても点灯するということが考えられる。ここでは制約条件を基にスケジューリングを作成する。照明設備の機器の性能については，市販のカタログを参考に消費電力量を設定する。

4-7-5 目的関数に対するトレードオフ評価

光・熱環境のトレードオフの関係性から評価する場合、目的関数の中から設計コンセプトに合致するトレードオフ評価項目を選定する。また、設計変数は膜材の透過率は0～30%の範囲で選定するものとする。以下に、トレードオフ評価の考え方を述べる。

- ① 昼光照度の値は最低値より高いほど、日射を考慮した MRT の値は低いほど良いという基準で光・熱環境の設計要求を検討し、照明エネルギー消費量の値は小さいほど、照明点灯の場所に関わる均斉度の値は大きいほど良いという基準で照明エネルギー消費量を設定する。
- ② 次に、それらの値の変動が0から1になるように、照度と均斉度は式(4-1)で、日射を考慮した MRT と照明エネルギー消費量は式(4-2)を用いて基準化し、値の大きい方の評価が良いことを示す。

尚、式(4-1)と(4-2)は、それぞれ照度と MRT の関係式としたが、均斉度の場合は照度書き換え、照明エネルギー消費量の場合は MRT に書き換える。

$$\text{昼光照度} = \frac{\text{透過率C\%の照度値} - \text{透過率B\%の最小照度値}}{\text{透過率A\%の最大照度値} - \text{透過率B\%の最小照度値}} \quad \text{式 4-1}$$

$$\text{MRT} = \frac{\text{透過率A\%の最大MRT値} - \text{透過率C\%のMRT値}}{\text{透過率A\%の最大MRT値} - \text{透過率B\%の最小MRT値}} \quad \text{式 4-2}$$

ここで、Aは比較対象膜材の透過率の最大値を、Bは最小値を、Cは計算対象となる設定値を示す。

1) 計算結果

図 4-18 に 12 時における CASE0 (膜材透過率 0%) と CASE3 (膜材透過率 30%) の表面温度分布と、評価点(膜下空間中央)の昼光照度と日射を考慮した MRT の結果を示す。

評価点において、透過率が 0% から 30% になった場合、照度は 6,850[lx] から 19,329[lx] と 2.8 倍に改善されたのに対し、MRT は 33.5[℃] から 36.6[℃] と 3℃ 程度悪化した。この結果より、透過率の違いから、光・熱環境のトレードオフの関係性が示唆された。

2) トレードオフ評価

表 4-6 に計算結果の概要を示す。また、表 4-7 に基準化された計算値をまとめる。

評価点(A)では、透過光の影響が大きく基準化された照度は 0.02 で、日射を考慮した MRT は 1.0 の最大値となり、トレードオフの関係性が顕著に表れる結果となった。一方、北側端部(B)では、照度環境は基準値の 0.4 を超え、RC 建物の影の影響が照度環境を悪くしたと言える。また、日射を考慮した MRT は 0.83 で基準値より高めの値であり、放

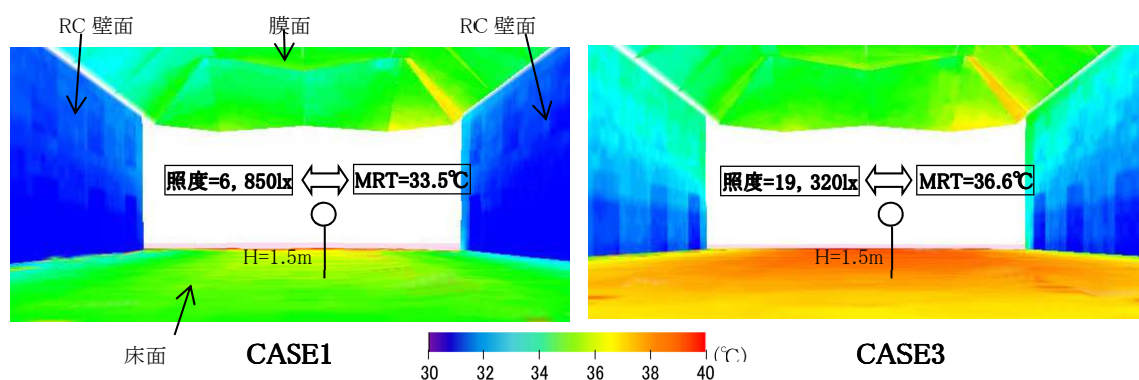


図 4-18 膜下空間の表面温度分布図（12 時，B 矢視方向）

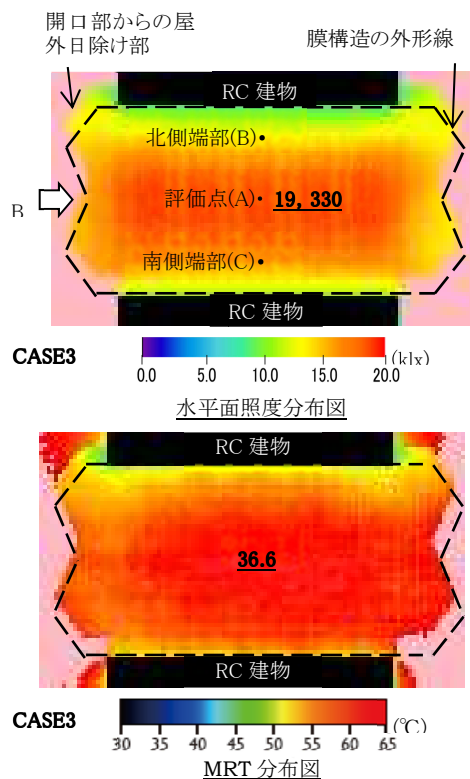


図 4-19 12 時，高さ 1.5m における MRT と照度分布図

表 4-6 12 時における評価点の MRT 値(°C)と照度値(lx)

透過率 (%)	評価点(A)		北側端部(B)		南側端部(C)	
	MRT	照度	MRT	照度	MRT	照度
0	30.2	620	30.7	480	30.0	490
10	33.5	6,850	33.0	4,090	32.7	5,060
30	36.6	19,320	35.4	11,320	35.3	14,200

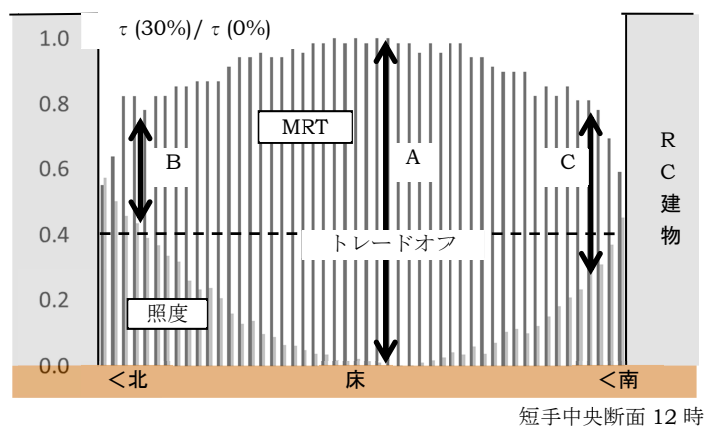


図 4-20 透過率 30%の光・熱環境のトレードオフの関係

射環境は改善されていないことが分かる。南側端部(C)ではRC建物の影響がない分、照度環境は改善されたが、日射を考慮した MRT の値は、(B)とほとんど変わらない結果であった。

図 4-21 に、CASE0 に対する CASE3 の評価点(A)におけるトレードオフ評価の計算結果の一例を示す。今回の対象モデルに対し、膜材の透過率を 0%から 30%まで変更した場合、膜下中央部における照度を大幅な改善として見て、日射を考慮した MRT の値は 0.0 となっており、熱環境的には悪化したことを意味している。また、均斉度については、0.6 となっており、膜下空間全体を見ても、光環境が改善されていることが分かる。照明エネルギー消費量については、膜下空間の南北に RC 建物があること、壁面側に渡り廊下があるため、消費電力量の削減量としては 30%程度であることが分かった。

表 4-7 CASE0 に対する CASE 3 の照度と MRT の結果

評価項目	評価点(A)	北側端部(B)	南側端部(C)
昼光照度	1.00	0.56	0.71
日射を考慮した MRT	0.00	0.17	0.19
膜下空間全体			
均斉度	0.60		
照明エネルギー消費量	0.70		

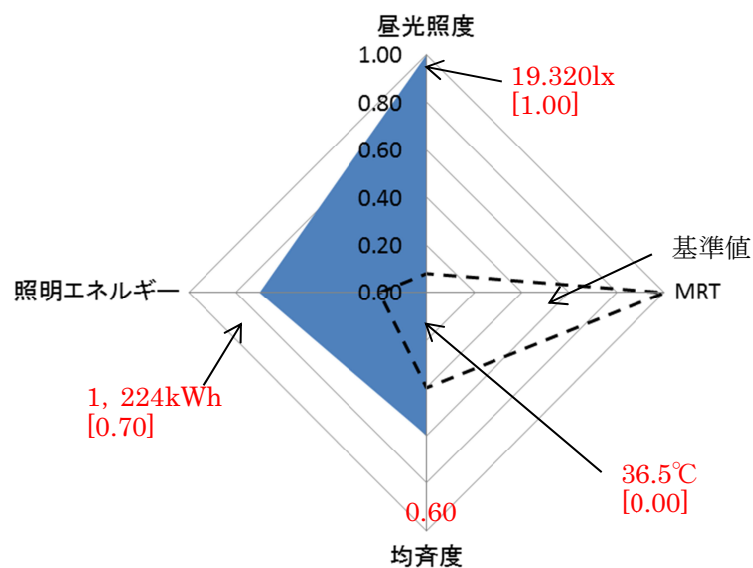


図 4-21 トレードオフ評価例

3) モデル変更のデータベース例

2) の結果から、CASE3 の透過率 30%では、12時の評価点 (A) において 19,000lx とかなり照度値が高い値を示しており、一方、日射を考慮した MRT の値は 3℃程度上昇する結果となった。これは、膜材からの透過日射の影響が大きいことに関係する。このような場合、モデル変更の一つの考え方として、透過率を小さくすることが考えられる。その際、昼光照度の目標値を鑑み、熱環境とのトレードオフの関係性から評価する必要がある。

設計実務において、光・熱環境のトレードオフ評価の判断材料となるデータベースが用意されていると、決定までの時間を短縮することができる。

ここでは、対象モデルに対し、透過率の違いによる昼光照度と日射を考慮した MRT のトレードオフの関係性をデータベースの例として示す。

図4-22にデータベースの一例を示す。日射および可視光透過率の違いが膜下空間の光・熱環境に及ぼす影響を比較するため、膜下床面の長手中央の断面における昼光照度と日射を考慮した MRT の分布に着目する。計算結果の概要については、評価点 A, B, C の 12 時における昼光照度と日射を考慮した MRT の値を用い、比較方法として、透過率比 ($= \tau(x) / \tau(0)$) を定義し、8 時～17 時における昼光照度と日射を考慮した MRT の関係性を示した。その結果より、以下の関係がわかった。

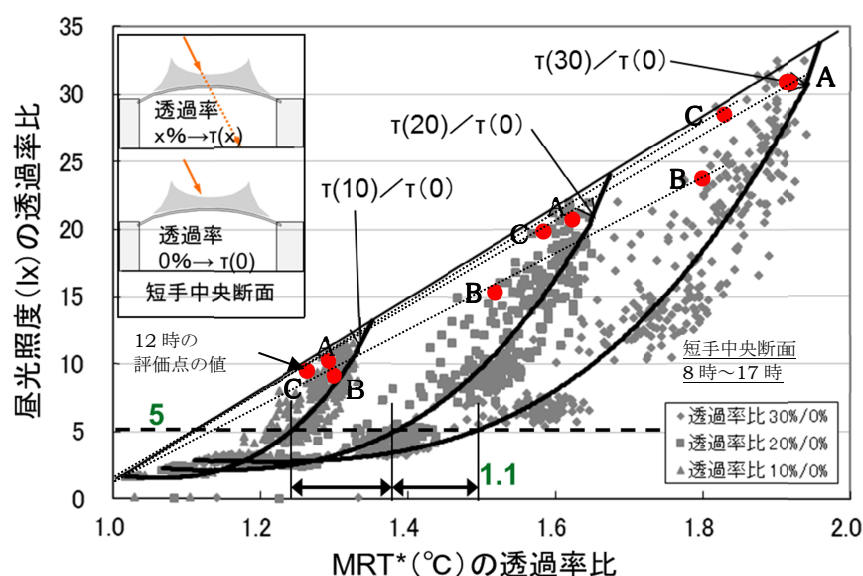


図 4-22 透過率の違いによる光・熱環境のトレードオフの関係

① 透過率比を考慮した指標により、昼光照度と日射を考慮した MRT は相関性が高く、

透過率比が大きくなるほど、その関係は大きくなる。また、同一の時間と評価点においては、比例関係になることがわかった（図 4-22 の A, B, C 点）。

- ② 太陽高度の低い時間帯（8～9 時，16～17 時）では，昼光照度の変化は小さいが，日射を考慮した MRT の値は大きくなった。また，太陽高度が高くなるにつれ昼光照度の変化が日射を考慮した MRT の変化に比べ，大きく変動することがわかった。

このことから，透過率比別の特徴を考慮することで，昼光照度と日射を考慮した MRT の関係からトレードオフ評価が可能であることが示された。

4-8 まとめ

設計支援を意識した光・熱・風環境の予測・評価を可能にするシミュレーションツールを構築し，膜下空間の熱環境対策手法の適用を判断するためのトレードオフ評価手法を提案した。具体的には，以下について検討した。

- （1）実務設計を考慮し，外部環境から膜下空間に影響を及ぼす光・熱・風環境の要因を定性的に整理し，光・風環境のトレードオフの関係性から熱環境における課題を整理し，風環境を考慮した熱環境評価の必要性を示した。
- （2）設計支援を目的とした膜下空間の光・熱・風環境を並列に評価するために，第 3 章で構築した光・熱環境の予測・評価ツールと風環境のシミュレーションツール（CFD）を連成した計算アルゴリズムを構築した。
- （3）設計実務を考慮し，膜下空間の光・熱・風環境のトレードオフ評価を実施するため，膜下空間における光・熱・風環境のトレードオフ評価の考え方について検討した上で，既往研究の手法を適用し，トレードオフ評価を提案した。
- （4）第 2 章の計算モデルを対象に，膜材の日射透過率の違いが，膜下空間（床面から 1.5m）の昼光照度分布と日射を考慮した平均放射温度分布に大きく影響することを定量的に示し，膜材の日射透過率を設定できることを示した。

本章では，設計実務を考慮した設計支援手法を提案し，膜下空間の光・風環境を考慮した熱環境の対策方法が検討でき，予測・評価により設計判断する方法を示した。今後は，トレードオフ評価の精度を向上するためのデータ構築が必要である。

【引用文献・参考文献】

- 4-1) 浜田英明, 大森博司: 設計者の選好と力学的合理性を勘案した自由曲面シェルの構造の構造形態創生法の提案: その1 多目的遺伝的アルゴリズムによる発見的方法, 日本建築学会構造系論文集 (618), 143-150, 2007-08-30
- 4-2) 陳 宏, 大岡龍三, 加藤信介: 対流・放射連成解析と遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた屋外温熱環境の最適設計手法に関する研究: 屋外温熱環境設計のための樹木の最適配置, 日本建築学会環境系論文集 (576), 65-71, 2004-02-28
- 4-3) 菅健太郎, 加藤信介, 樋山恭助: 多目的最適化におけるパレート最適解集合の構造解析: 多目的遺伝的アルゴリズムを用いた建物外装窓問題への適用, 日本建築学会環境系論文集 73(625), 283-289, 2008-03-30
- 4-4) 村上周三, 加藤信介, 近本智行: 低 Re 数領域にも適用可能な新しい $k-\epsilon$ モデル, 日本建築学会計画系論文集, No.476, pp.9-17, 1995
- 4-5) Launder B. E. and Kato M., Modeling flow-induced oscillations in turbulent flow around stationary and vibrating square cylinder. ASME Fluid Engineering Conference, pp.20-24, 1993
- 4-6) 山村真司, 梅干野晃, 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収支・気流連成シミュレーション手法開発の基礎的検討, 日本建築学会計画系論文集, 第560号, pp.78-80, 2002.10
- 4-7) 高橋晃一郎, 何江, 梅干野晃, 角谷亜璃砂: 屋外生活空間に形成されるクールスポット評価のための数値シミュレーション手法の提案-3D-CAD 対応熱環境シミュレータと汎用 CFD ソフトウェアの連成, 日本環境管理学会大会, 2008 学術講演梗概集, pp.45-48, 2008.5
- 4-8) 円井基史, 梅干野晃, 浅輪貴史, 板津佳恵: “蒸発冷却舗装システムの基本性能に関する夏季屋外実験(都市熱環境改善に向けた蒸発冷却舗装システムとその予測評価手法の開発 その1, その2)”, 日本建築学会環境系論文集, 600, pp.51-58 (Feb. 2006), 610, pp.75-82 (Dec. 2006)

注

注1) MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm)

1993年に Fonseca らにより提案された MOGA は, Pareto 的概念を探索に用いたアルゴ

リズムであり、個体の評価として Pareto ランキング法を用いた評価方法を行っている。このランキング法を用いた選択手法は数多く存在するが、Fonseca らは各ランク間においてシェアリング関数を用いる方法である。シェアリング $SH(d_{i,j})$ とは、個体 i に対してある一定の範囲内 (σ_{share}) に別の個体 j が存在していた時にその距離に応じて 0 以上 1 以下の正の値を返す関数であり次式で表される。

$$SH(d_{i,j}) = \begin{cases} 1 - \frac{d}{\sigma_{share}} & (d_{i,j} \leq \sigma_{share}) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

このシェアリング関数では、設計変数空間での距離ではなく、目的関数空間での距離を用いる。あるランクにおける個体 i と j 間の距離は次式で求まる。

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^M \left(\frac{f_k^i - f_k^j}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \right)^2}$$

$f_k^{\max}$, $f_k^{\min}$ は、 k 番目の目的関数値の最大値と最小値である。

注 2) 透過日射の侵入量の調整方法

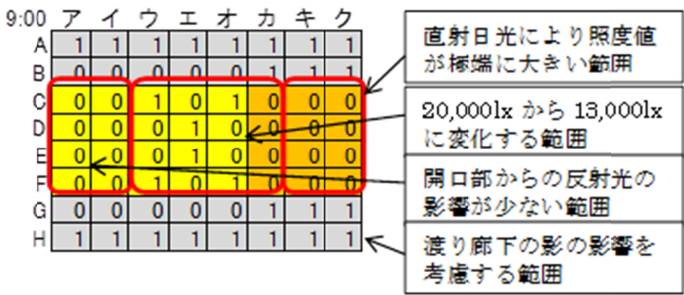
膜材からの透過日射の侵入量は、膜材の透過率により調整することが考えられる。具体的には、2-2-2 項で述べた通り、コーティング材の色を変化させることで、透過率を調整することが可能である。下表に膜材の色と透過率の関係の一例を示す。

表 膜材色と透過率の関係例

膜材色例	可視光線透過率(%)
クリアグレー	1
クリアアイボリー	5
クリアホワイト	10
ホワイト(3)	15
ホワイト(2)	20
ホワイト(1)	35
半透明(2)	55
半透明(1)	65

注 3) 照明モードの設定

照明モードとは、ある設定時間の昼光の状況に応じて、電気照明を点灯したり、消灯したり、調光する照明パターンのことを示します。この照明モードを具体的に設定することで照明エネルギーを定量的に示すことが可能になります。(作成例：右図)



第5章 半屋外膜下空間の光・熱・風環境の予測・評価手法の活用

5-1 はじめに

5-2 光・熱・風環境を考慮した膜下空間の設計支援の方法

5-2-1 設計条件の設定

5-2-2 光・熱・風環境の予測・評価

5-2-3 設計者による判断

5-3 昼光利用による膜下空間の光・熱環境に及ぼす影響とその適用例

5-3-1 対象空間の設定

5-3-2 設計概要

5-3-3 設計条件の設定

5-3-4 評価空間と評価指標の設定

5-3-5 光・熱・風環境の予測・評価

5-3-6 設計者による判断

5-4 膜下空間の熱環境対策方法を適用したモデル変更

5-4-1 熱環境対策技術の選定

5-4-2 設計条件の設定

5-4-3 光・熱・風環境の予測・評価

5-4-4 曇天日の光環境の検討

5-4-5 設計者による判断

5-5 蒸発冷却部材を適用したモデル変更

5-5-1 蒸発冷却部材の設置方法の検討

5-5-2 光・熱・風環境の予測・評価

5-6 まとめ

5-1 はじめに

実務において、半屋外の膜構造建築空間の光・熱・風環境を考慮した設計提案を目的に、第3章で開発した光・熱環境の予測手法と第4章で構築した風環境との連成計算手法、および熱環境対策方法を用いて、ケーススタディにより比較検討した結果と熱環境の改善過程を示すことで、実務設計への有用性を示す。ここでは、計画設計の初期段階を想定し、近年昼光利用の観点から多くの実績がある半屋外空間を有する駅プラットフォーム（以下、プラットフォームという）を対象とする。まず、膜下空間における昼光利用の観点から、プラットフォーム上屋に従来よく使用される金属屋根と今回提案する膜構造屋根を比較することで、光・熱環境のトレードオフの関係性から評価を行う。次に、直達日射の侵入熱により悪化した熱放射環境を改善するため、屋根形態の工夫により日射遮蔽を意識し改善したプラットフォーム空間を提案し、その効果を示す。さらに、膜材からの透過日射の影響で悪化した熱放射環境を改善するため、熱環境対策方法の中から、蒸発冷却部材を選定し、適用したプラットフォームを提案し、改善効果を示す。

5-2 光・熱・風環境を考慮した膜下空間の設計支援の方法

第4章で述べたように、設計支援の方法は大きく3つの段階に分けられる。1) 設計条件の設定、2) 光・熱・風環境の予測・評価、3) 設計者による判断である。以下に、各段階における設計概要について述べる（図5-1）。

5-2-1 設計条件の設定

設計プロジェクト等で提案される設計コンセプトや法規制等を確認し、光・熱・風環境に及ぼす条件や環境性能の目標値を設定する。次に膜構造設計において、3D-CADで作成した膜材の構造形態および周辺建物等の3次元の幾何形状を用い、メッシュ分割する。各メッシュに建物番号や部位、材料特性の情報を割り当て、気象条件を設定する。ここで、空間分解能は、解析対象空間の全表面を20cmメッシュに分割し、空間形態や材料の違いを再現する。ここで、光・熱・風環境の予測・評価を実施する際、膜下空間は、膜構造建築物以外の周辺地物からの影響を大きく受ける。その影響を把握できる程度の周辺地物の再現が必要である。光・熱環境では、最低でもその影響は近接する地物が設定される必要がある。風環境では、その範囲は広くなり、地域気候特性と街区を形成する建物群の影響を再現できる事が望ましい。しかしながら、実務において扱う範囲

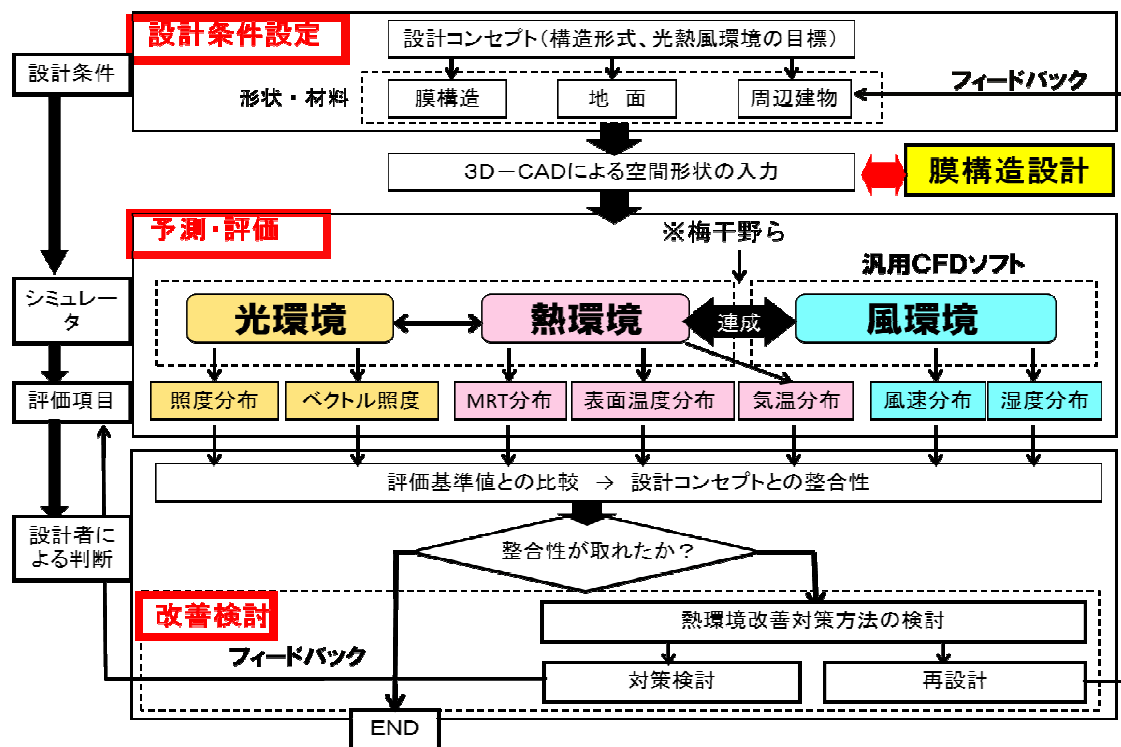


図 5-1 膜構造建築物の光・熱・風環境の設計支援手法

が広すぎると設計時間の負荷が大きく現実的ではなくなる。そこで地域の気候特性の概略を把握した上で、扱う頻度の比較的高い街区スケール（数百m）から住棟間スケール（数十m）が対象となる。

5-2-2 光・熱・風環境の予測・評価

半屋外の膜下空間の光・熱・風環境を予測・評価するために、3つの数値シミュレーションが連携しており、評価のための計算結果の出力は、8項目からなる。

- ・光環境では、絶対的な明るさの指標としての照度分布と膜下空間に入光する光の方向性を確認するためのベクトル照度分布、順応状態の推定のための輝度分布（均等拡散条件）
- ・熱環境では、熱放射環境を把握するための表面温度分布、快適性に関わる日射を考慮した平均放射温度（MRT）分布と人の活動空間における局所的な気温分布
- ・風環境では、熱環境改善手法を取り入れる際、通風や蒸発冷却効果の評価として、風速分布と湿度分布

5-2-3 設計者による判断

膜下空間の構成要素をパラメトリックに変化させ、その光・熱・風環境の環境性能を評価することを目的としている。そこで、具体的な設計案を提示するためには、予測手法で得られた計算結果より、光・熱・風環境の関係性を単独または並列に示し、判断する必要がある。本研究における評価は、①各環境に対する評価と②各環境のトレードオフの関係性からの評価がある。①各環境に対する評価は、屋外空間の影響を考慮した評価指標は十分に対応できる状況にないため、それぞれの環境に対しては、従来の環境設計で適用されている評価指標や推奨値を用いることとする。つまり、設計プロセスの各設計段階に応じて、デザインへのフィードバックに必要十分な評価指標を適宜選択して評価するようなツール構成であることが設計支援としては必要と考える。また、すべての環境指標を満足することが最終判断になる場合も考えられるが、環境コンセプトを把握した上で優先順位を付け、いずれかの環境評価で判断する場合も考えられる。②各環境のトレードオフの関係性からの評価は、第4章で述べたとおり、目的関数を設定する必要がある、設計コンセプトや要件に合致する項目を選定し、評価する。尚、設計者が熱環境評価手法で検討する際、意匠的、構造的、経済的な要素を含め、施主等と打合せを重ね、提案する必要があるが、本節での適用例に対する設計判断は、膜下空間の光・熱・風環境がどのように改善し、視覚的・熱的に快適な空間を実現できるかを示すため、環境決定要素以外の条件は除外する。

5-3 昼光利用による膜下空間の光・熱環境に及ぼす影響とその適用例

第3章で構築した光・熱環境の予測・評価手法による適用例として、膜材料からの日射透過による昼光利用を積極的に行うことを想定したケーススタディを行う。その際、昼光利用の効果を定量的に示すため、従来の非透過材料と膜材料を比較し、設計支援としての有用性を示す。具体的には、プラットホームの屋根に対し、非透過材（金属系材料）と透過材（膜材）による可視光線と日射熱の侵入による屋根下空間の光環境と熱環境を計算し、その違いを明らかにする。

5-3-1 対象空間の設定

対象空間は、実在する計画をベースに設定することとし、さいたま市で公募型プロポーザル事業として計画された「浦和駅西口南第四地区第一種市街地再開発事業の浦和駅周辺鉄道高架化事業⁵⁻¹⁾ (図5-2)」より、プラットホームの配置や外部空間を参考にし、モデル化する。ここで、プラットホームの平面形態は島式で、乗入路線は3路線である。また、プラットホームは建物の2階に位置しているが、周囲建物の影響を考慮するため、地平駅で線路脇に建物が配置されている条件とする。



図 5-2 浦和駅再開発のプラットホーム計画図⁵⁻¹⁾

5-3-2 設計概要

膜構造を適用するメリットとして、透過率・反射率・軽量性の特徴があげられる。これらの特徴は、次のような効果があると同時に、光・熱・風環境への影響があげられる。

透過率に関しては、昼光利用としての効果があり、光環境と熱環境に影響を及ぼす。反射率に関しては、70%程度の日射の侵入を防ぐことができ、光環境と熱環境に影響する。また膜の軽量性から可能となる自由な形態設計により、気流分布や光の入射を調整することができ、光・熱・風環境のすべてに影響する。

鉄道設計においては、プラットホームの高さ・長さ・幅・方角といったものは車両形状や線路数・進行方向から決定するものである。したがってこれらについては鉄道の運営に関わる内容であり、効率性を重視した機械的な設計を優先すべきであると考えられる。一方でプラットホームの上屋や柱・壁面のデザイン、設備の配置といったものは駅により様々であり、その駅の特徴を表すものとなっている。鉄道各社のマニュアルにおいてもこれらは最低限の制約(構造物を縁端から 1m 以上離す等)が存在するが、それらの部材の種類や色、形状に制約はほとんど無い。

5-3-3 設計条件の設定

(1) プラットホーム形態決定に関わる法規制

プラットホームの空間形態を決定する方法として、計画図をベースとし、詳細寸法については法規制を整理し、設定する。

プラットホームの設計では、列車の運行を考慮した建築限界が定められている⁵⁻²⁾。これはプラットホームの土台や上屋等を設計するときの制限事項となり、これらを踏まえた上での設計が求められる。具体的には、普通鉄道構造規則において、図5-3に示す建築限界の寸法が定められている。また、プラットホーム上方および、側方となる箇所での建築限界と車両限界の隙間は50mm以上と定められている。

次に、鉄道に関する技術上の基準を定める省令の第四章第一節ではプラットホームに関する項目として以下のように定められている。

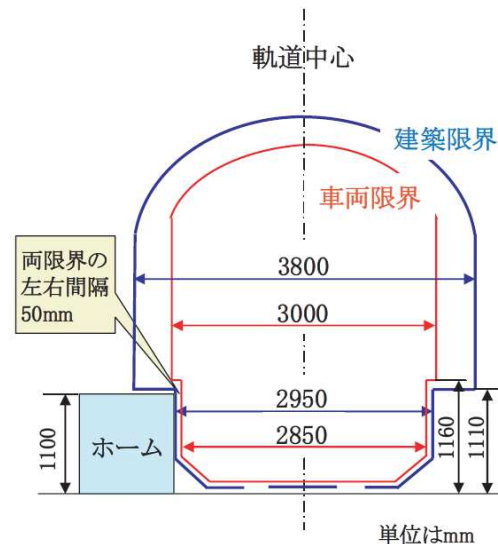


図5-3 建築限界⁵⁻³⁾

1. プラットホームの有効長は、当該プラットホームに発着する列車の最も前方にある旅客車（車掌が旅客車以外の車両に乗務する場合は、当該車両を含む。以下この条において同じ。）から最も後方にある旅客車までの長さのうち最長のものの長さ以上であって、旅客の安全かつ円滑な乗降に支障を及ぼすおそれのないものであること。ただし、地形上等の理由によりやむを得ない場合であって、車両の旅客用乗降口の閉鎖その他の必要な措置が講じられているときは、この限りでない。
2. プラットホームの幅並びにプラットホームにある柱類及び跨線橋口、地下道口、待合所等の壁とプラットホーム縁端との距離は、旅客の安全かつ円滑な流動に支障を及ぼすおそれのないものであること。
3. 列車の速度、運転本数、運行形態等に応じ、プラットホーム上の旅客の安全を確保するための措置を講じたものであること。

以上の規制に加え、プラットホーム上に工作物を設置する場合、旅客の安全上、柱類はプラットホーム端部より 1.0m 以上、壁状のものは 1.5m 以上離すことが義務付けられている。最低限必要とされるプラットホームの幅は、両面使用の場合 3.0m 以上(端部では 2.0m 以上)、その他の場合 2.0m 以上(端部では 1.5m 以上)とされているが、通常では 5～6m の事例が多い。

(2) プラットホームの計算モデルと計算条件の設定

プラットホームの計算モデルと計算条件は、浦和区環境配慮指針等で定められる設計コンセプトと、文献や鉄道駅に関する技術資料等を考慮する。また、条件設定の際、駅の規模と利用者数、周辺地物の配置、季節や時間帯等を想定する必要がある。以下に、今回の設定方法について述べる。

計算モデルの作成

プラットホームの計算モデルは、都市近郊にある中規模の浦和駅で、駅周辺には低層から中層の施設があり、その中央に南北 100m(一般車両 5 両分の長さ)、東西 44m の駅プラットホームを設定する。プラットホームは 6 線の路線を持ち、3 面の島式ホームで構成される。島式ホームの断面形態は従来よく見られる V 字型の屋根で、幅は 7m とする。さらにプラットホームは長大であることから周辺地物からの影響を複雑に受けると予想されるため、街区はプラットホーム全体を含む 200m×200m の規模の解析モデルとする。図 5-4 に 3D-CAD で作成した街区の解析モデルと図 5-5 に断面図を、表 5-1 に構成材料を示す。また、メッシュの分割数は 20cm の均等分割とする。

光・熱環境の解析モデルは、部位を屋根、壁に分け、島式ホームは、屋根、鉄骨柱、床に分け、断面構成、材料物性値を与えた。

比較モデルの設定

計画設計の初期段階を想定し、膜下空間の昼光利用の効果を評価するため、島式ホームの屋根に非透過材(金属系材料)と透過材(膜材料)の 2 種類のモデルを作成し、可視光線と日射熱の侵入による屋根下空間の光環境と熱環境を比較し、その違いを明らかにする。ここで比較する計算モデルは、V 字型の金属屋根を有する島式ホームのモデルを CASE1 とし、屋根のみを膜材に変更したモデルを CASE2 とする。

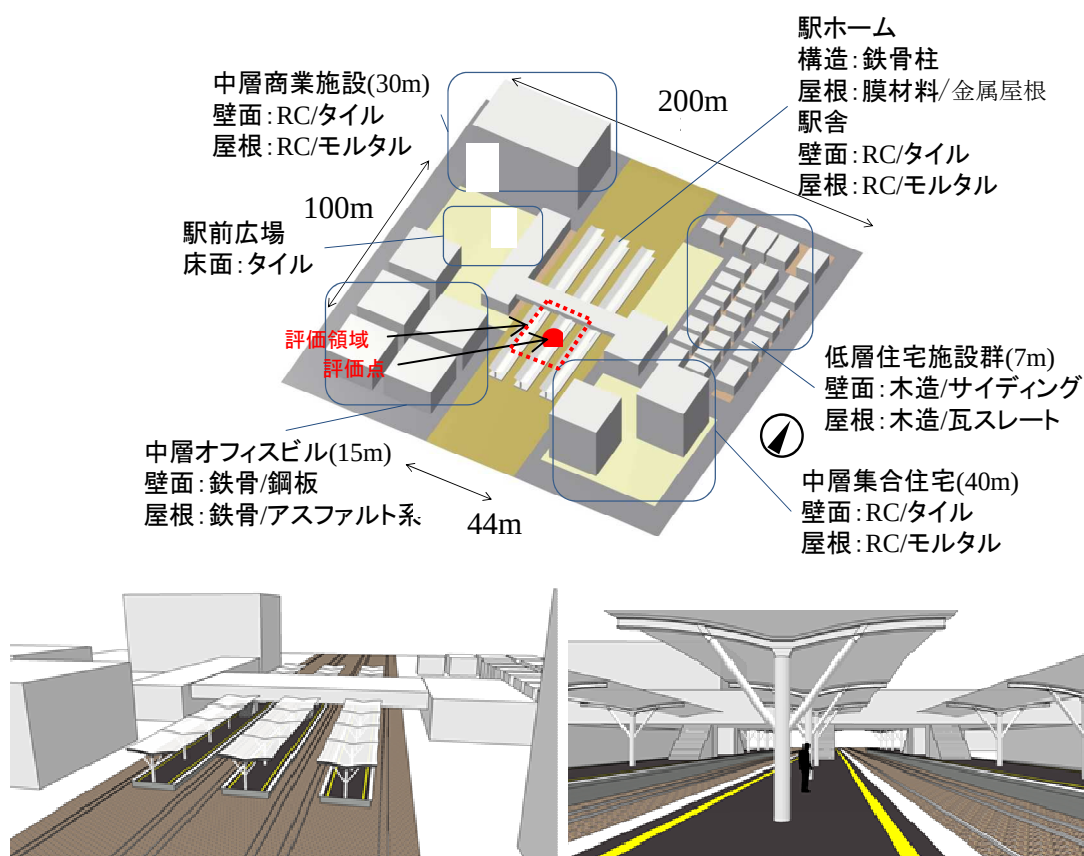


図 5-4 街区モデルと対象プラットフォーム

気象条件

光環境と熱環境の計算に用いる気象条件は、共に拡張アメダスデータより地方中枢都市の夏季晴天日として「埼玉県浦和 2000 年 8 月 1 日」を使用する。それぞれの気温、相対湿度、全天日射量、風速を図 5-6 に示す。また風環境に関しては、夏季の卓越風向と平均風速データを入手し、東側、流入風速 2m/s を流入境界条件とする。気象条件の選定理由は、熱環境への影響が大きいと予想される以下の 3 点により決定した。

- ①日中において気温が、32℃以上まで上昇する真夏日で、夜間も 24℃以下に低下しない熱帯夜である。
- ②ヒートアイランド現象が顕在化しやすい低風速日である。
- ③晴天日において日中高い日射量が得られ、地物への蓄熱の促進がされる。

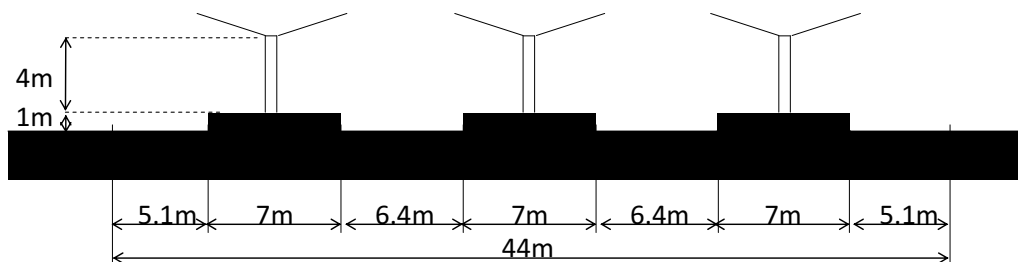


図 5-5 対象プラットホームの断面図

表 5-1 建物および地面の構成材料と熱物性値

構成部分	材料名	日射 反射率[-]	熱伝導 [W/(m・K)]	容積比熱 [× 10 ⁶ MJ/ (m ³ ・K)]
商業壁面	外壁タイル仕上げ	0.2	1.3	2
商業屋根	モルタル仕上げ	0.3	1.5	1.6
オフィス壁面	鋼板	0.3	53	3.8
オフィス屋根	アスファルト系(屋根)	0.2	0.11	1
住宅壁面	窯業系サイディング	0.2	0.12	0.8
住宅屋根	瓦スレート(屋根)	0.2	0.96	1.5
住宅地被覆	乾燥裸地	0.2	0.5	1.6
屋根支柱	鉄骨柱	0.6	25	3.8
ホーム屋根	膜材料	0.74	0.1	1.6
線路敷	砂利面	0.2	0.6	1.5
ホーム床面	アスファルト舗装面	0.1	0.7	2
ホーム土台	コンクリート舗装面	0.2	1.6	1.9
駅前広場被覆	タイル舗装面	0.4	1.3	2

5-3-4 評価空間と評価指標の設定

プラットホームの主要目的である、電車の乗降やホームの移動として利用客の行動に対し、評価する必要がある。ここでは、既往研究より評価空間の設定条件を取得し、適用する。

(1) 評価空間の設定

列車運行間隔と列車停車時間を考慮した空間状態の設定

列車の運行間隔について今回対象とする浦和駅の時刻表によると、混雑時の8時で約5分間隔、12時前後では10分から15分間隔での運転を行っている。つまり熱環境とし

晴天日（埼玉県浦和 2000 年 8 月 1 日）

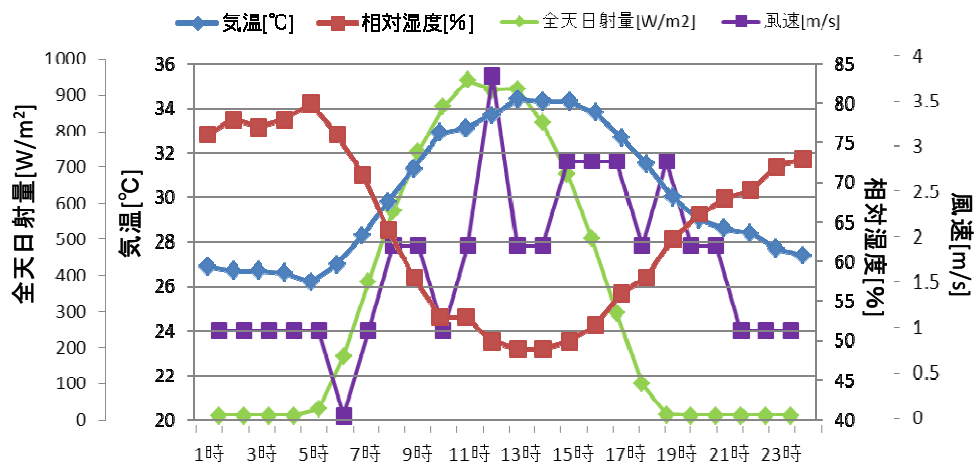


図 5-6 気象データ

て最も悪化が予想される 12 時前後では 10 分から 15 分の間ホーム空間で待機する必要があるため、熱環境改善の必要性は非常に高いと言える。

列車停車時間について、岩倉ら⁵⁻⁴⁾は、旅客が集中する時間帯において、乗降者数が増加し遅延が発生したとしても乗降所要時間が 1 分を超すことは稀であることを明らかにした（表 5-2）。つまり、停車時間としては混雑が予想される時間帯の都心駅においても標準で 30 秒程度であり、列車を待つ時間に比べてかなり短いということが分かる。

表 5-2 乗降時間の実測値とシミュレーションによる推定値

	都心駅 【ピーク】	都心駅 【オフピーク】	郊外駅
実測値(秒)	25.6	13.7	10.6
推定値(秒)	29.2	9.2	7.9
最大値	67.4	11.6	12
最小値	18.6	7.4	5.4
混雑率(%)	210	130	120

以上から、プラットホームの列車待機空間としての機能を踏まえれば、旅客が長時間待機するような状況を評価すべきであるが、列車の待機時間が短いことから、今回の評価空間では、プラットホーム上に列車が存在しない場合を対象とする。

移動空間における評価範囲

国土交通省は、視覚障害者向けの安全な歩行範囲を、ホーム縁端警告点字ブロック（黄色い線）により区別することを義務付けている。国土交通省の「公共交通機関の旅客施設に関する移動等円滑化整備ガイドライン（平成 19 年 7 月）」によると、点字ブロックはプラットホームの縁端から 80cm 以上離れた場所にホームの長軸方向に沿って連続的に敷設することが定められている。また、原則としてプラットホーム縁端からホーム縁端ブロックまでの距離は最大でも 100cm 程度としている。

視覚健常者についてもこの点字ブロックの内側を安全な歩行環境とみなすことができるため、本研究では点字ブロックの内側に含まれるプラットホームの範囲を歩行空間として評価することとする。歩行空間の評価範囲を図 5-7 に示す。

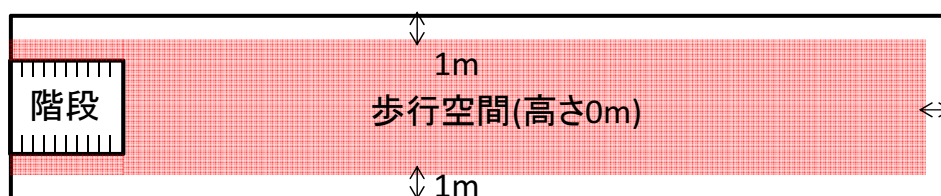


図 5-7 歩行空間の評価範囲

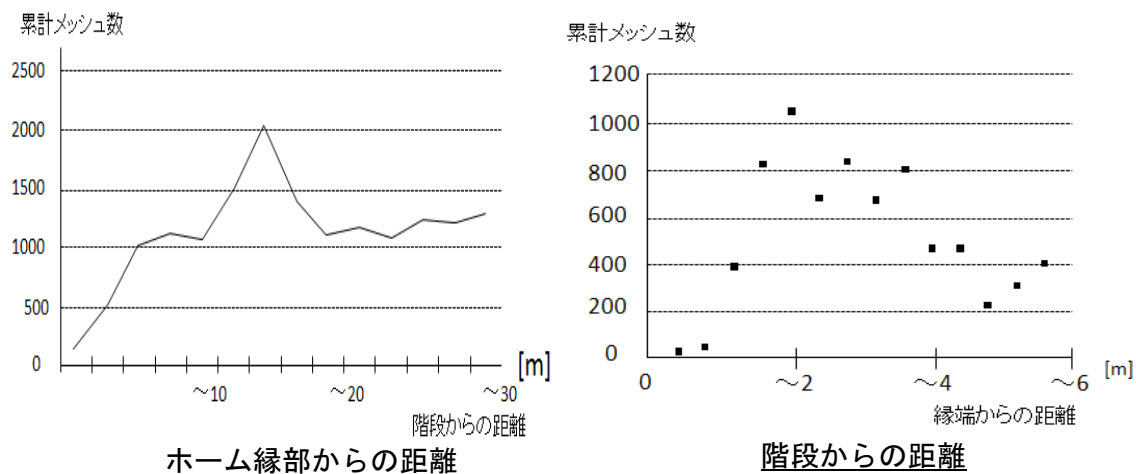


図 5-8 立ち止まり累計メッシュ数の関係

待機空間における評価範囲

待機空間について、渡辺ら⁵⁻⁵⁾がプラットホーム空間における立ち止まり行動について、プラットホーム床面を 400 mm のメッシュで分割し、そのメッシュに立ち止まった時間を累計することで立ち止まった位置と時間の傾向を明らかにしている。立ち止まり

の位置としては階段から 5m 未満の位置では少なく、15m 程度離れた位置で最大である(図 5－8・左)。また縁部からの距離では、1m 未満ではほとんど人の立ち止まりは認められず、1.4m 以降に増加し、2m 付近で最大である(図 5－8・右)。以上より、待機空間の評価範囲を図 5－9 に示す。

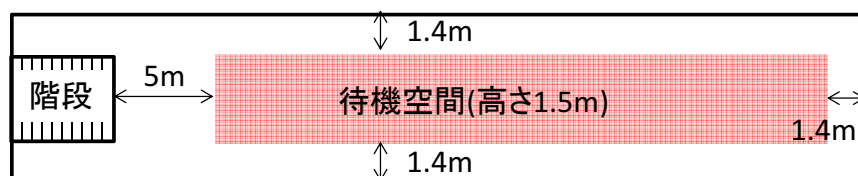


図 5－9 待機空間の評価範囲

プラットフォームの利用時間帯と評価時刻の設定

国土交通省の「都市交通センサス(平成 17 年)」によると、乗車人数に関しては、首都圏では 8 時に乗車数が急激に上昇し、10 時から 17 時にかけて、乗車人数は方面ごとに一定の人数で安定している。また、夜間は 18 時から 19 時にかけて乗車人数が増加し、20 時からなだらかに減少していくことを示している。平日においても熱環境が悪化する日中 12 時には一定の利用客が見込まれること、8 時には日中の 3 倍以上の利用客が見込まれることから環境評価が必要である。また夕方の 16 時における西日の影響も大きいと考えられる。以上より、8 時・12 時・16 時を評価対象時刻とする。

(2) 光・熱環境の評価指標の設定

ここでは、プラットフォームの評価空間において、昼光利用による光環境の改善効果と、侵入熱による熱環境の悪化について評価する。

光環境の評価

プラットフォームに求められる光環境は、主要目的である電車の乗降や移動空間として利用客が行う活動を円滑に行えるような安全で、視覚的快適な空間であることを評価するため、床面と生活高さにおいて十分な照度を確保する必要がある。その際極力、直射日光を取り込むのではなく、膜材を透過した太陽光の拡散成分によるグレアの発生しにくい均一な明るさの環境が望まれる。また、人間の視点・視野において光環境の快適性まで考慮されるべきである。

ここでの評価項目は、設計計画の初期段階であり、膜材料使用による光環境の程度を把握出来ればよいという考えのもと、歩行空間の光環境としては、絶対的な明るさの指標である水平面昼光照度（床面から 1.5m）を、歩きやすさの点では照度差があまり生じない空間として均斉度を評価する。具体的な基準値については「日本工業規格(JIS Z 9110-2010)」における駅舎の歩行空間の必要照度と均斉度の値を採用する。大規模駅舎における評価基準は床面照度 500lx、均斉度 0.4 以上となっており、これを最低基準値とする。

また、輝度対比については具体的な数値による指標は示されていないものの、古賀ら⁵⁻⁶⁾によって極力輝度の比を小さくすることで、不快グレアの発生を抑制することができることを室内実験により示していることから、膜面とその周囲の構成部材、天空輝度や直射日光を受ける箇所をベクトル照度で評価する。

熱環境の評価

プラットホームに求められる熱環境は、半屋外空間を対象としており、気象条件の変化が直接影響を及ぼすため、その影響の度合いを極力小さくした空間が求められる。そのためホームで行動する人が暑すぎると感じないような局所的な気温や、周辺部材からの放射の影響まで配慮された環境が望まれる。また、暑さを改善する為に導入した手法の冷却効果により、人が涼しいと感じられる空間であることが望まれる。

ここでの評価項目は、屋根や床面の物性や形態係数の違いがどのように熱放射環境に影響するかを評価するため、表面温度分布と日射を考慮した平均放射温度（MRT）を用いる。以上より、ホーム空間の評価項目と評価基準を表 5－3 にまとめる。

表 5－3 光・熱・風環境の評価項目と評価基準

シミュレーション	評価項目	出力項目	評価基準
光環境	歩行環境	水平面照度分布	床面照度500lx以上 均斉度[＝面の最小照度/面の平均照度]0.4以上
	視覚環境	ベクトル照度分布	視野角内における膜面と天空輝度や周辺地物との輝度差の大きさ
熱環境	放射環境	平均放射温度分布	ホーム床面高さ1.5mにおけるMRTが外気温以下

5－3－5 光・熱・風環境の予測・評価

本予測・評価手法による光・熱環境の評価点は、中央のホームの南側階段から 14m 離れた位置とする(図 5－10 の  印)。また、評価範囲は点線枠とする。

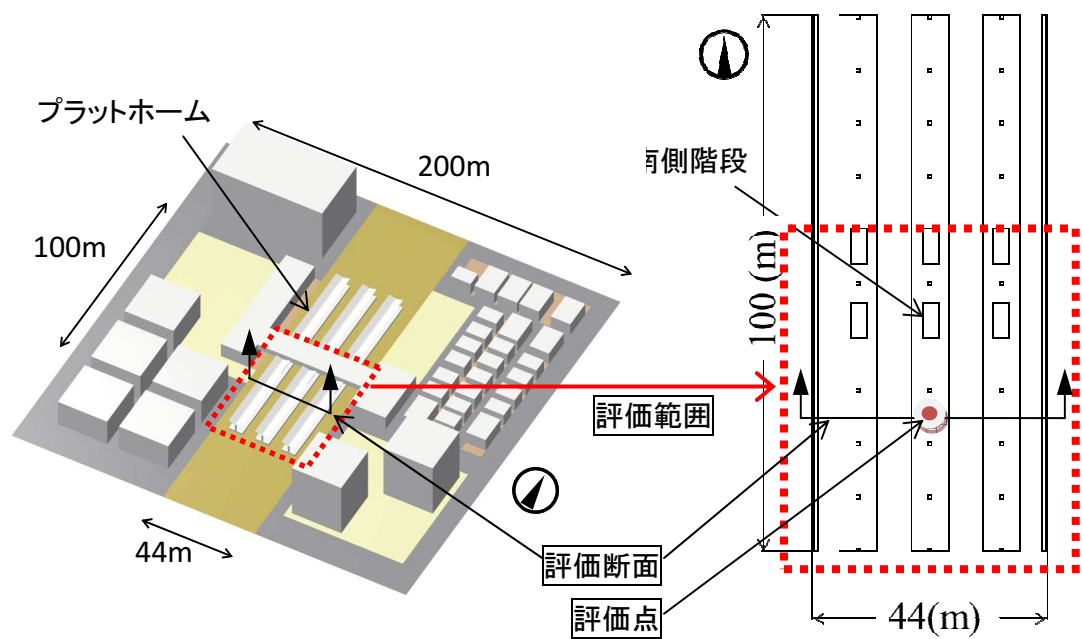


図 5-10 CASE1 と CASE2 の計算モデルと評価空間

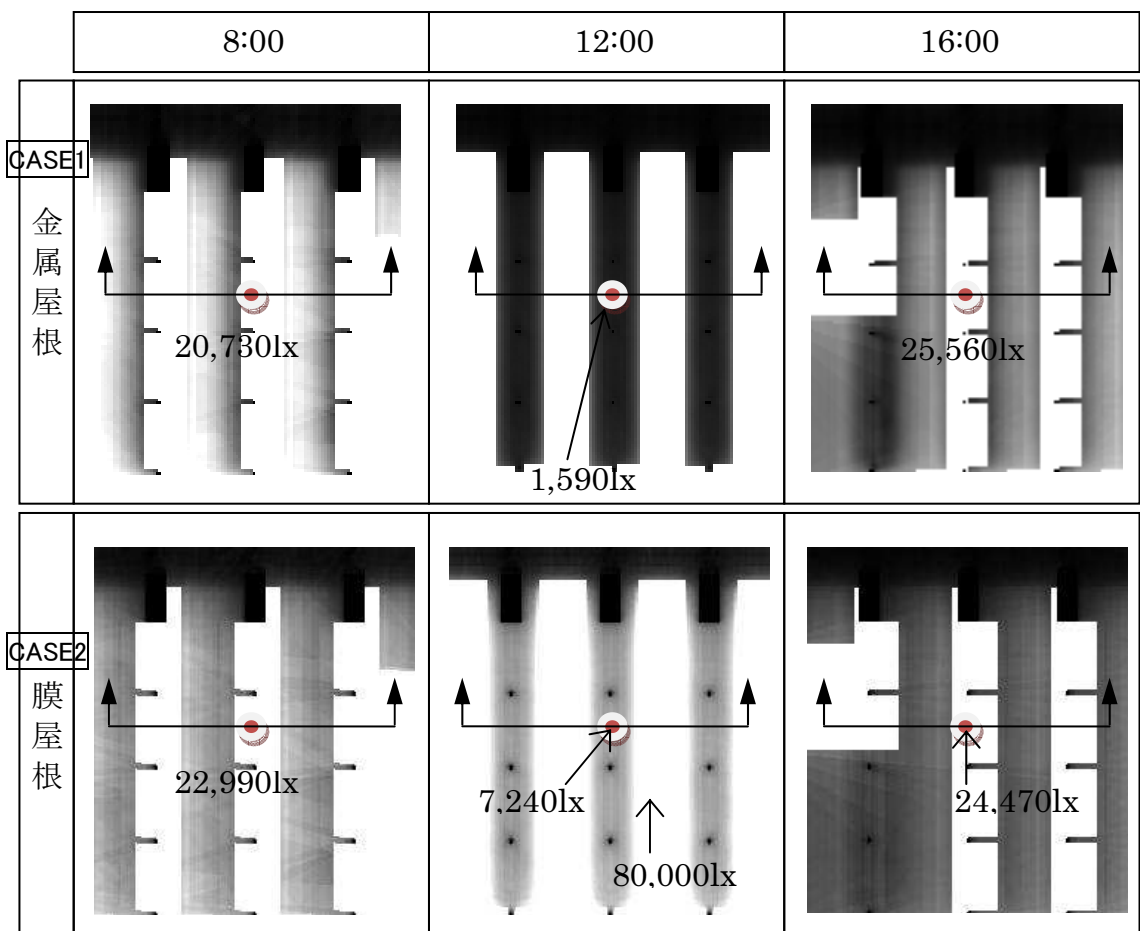
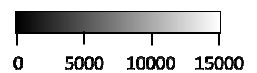


図 5-11 CASE1 と CASE2 の水平面屋光照度分布図



（１）水平面昼光照度分布の比較

図５－１１は、CASE1 と CASE2 の評価範囲における水平面昼光照度分布と評価点の照度値を示す。昼光利用の効果が表れやすい状況として、開口部からの直射日光の影響がほとんどない 12 時について水平面昼光照度分布と均斉度により比較する。CASE1 では評価点の昼光照度が 1,590lx に対し、CASE2 では 7,240lx であった。また、CASE1 の均斉度が 0.21 に対し、CASE2 では 0.76 と上昇し、光環境が改善された。

（２）ベクトル照度分布による光環境の評価

図５－１２は、CASE2 の評価範囲におけるベクトル照度分布を示す。開口部からの直射日光の侵入による膜下空間への影響は、8 時と 16 時について評価する。両時刻において、最高値と最低値の差が約 19,000lx あり、ベクトルの向きも直射日光が侵入する方向を示している。したがって、ホームに平行歩行する利用者にとっては、横からの侵入光による影響が大きく、不快に感じる可能性がある。

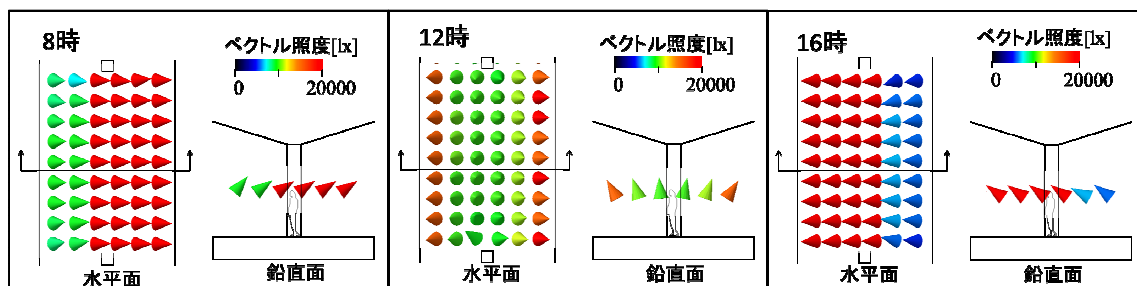


図 5-12 CASE1 と CASE2 のベクトル照度分布

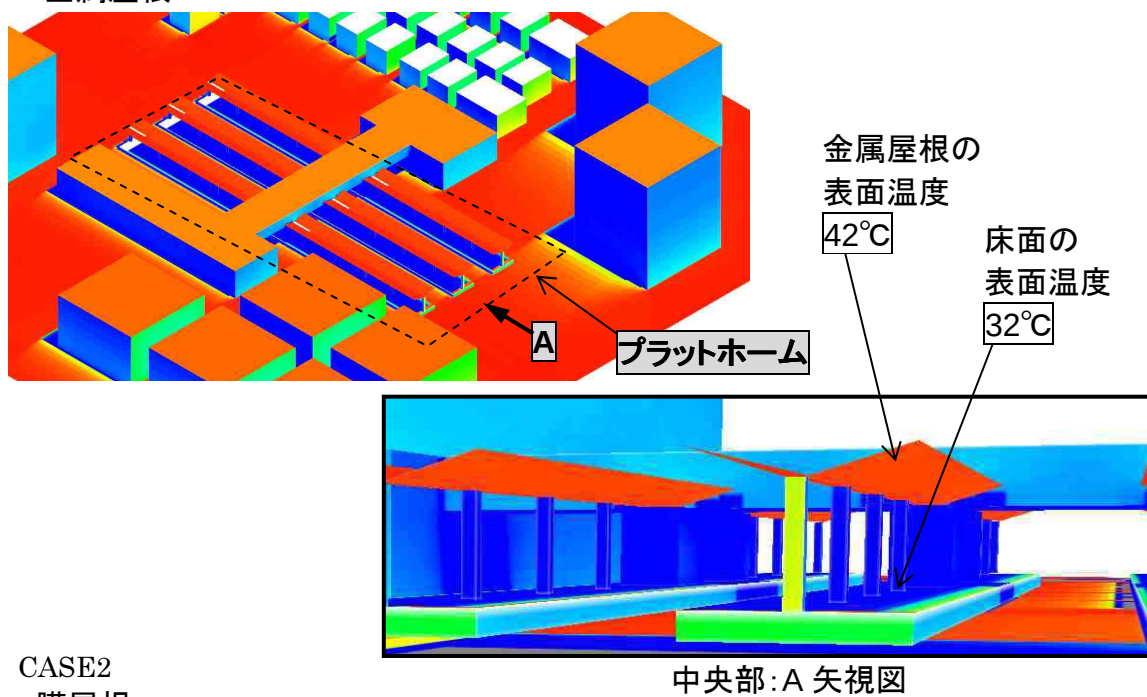
（３）表面温度分布の比較

図５－１３は、12 時における CASE1 と CASE2 の鳥観方向からみたプラットホーム全体の表面温度分布と A 矢視方向から見た内部空間の表面温度分布の計算結果を示す。金属屋根から日射透過率 9% の膜構造屋根にすると、膜下空間の床面温度は、32℃から 34℃に 2℃程度上昇し、最大で 3℃程度となった。一方、膜構造屋根の表面温度は 42℃から 33℃と 9℃程度低下している。

（４）日射を考慮した平均放射温度（MRT）分布の比較

図５－１４－１は、CASE1 と CASE2 の 12 時における日射を考慮した平均放射温度（MRT）分布を示す。評価点において、直達日射の侵入により CASE1 では MRT が

CASE1
金属屋根



CASE2
膜屋根

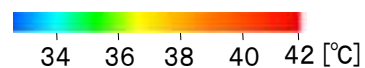
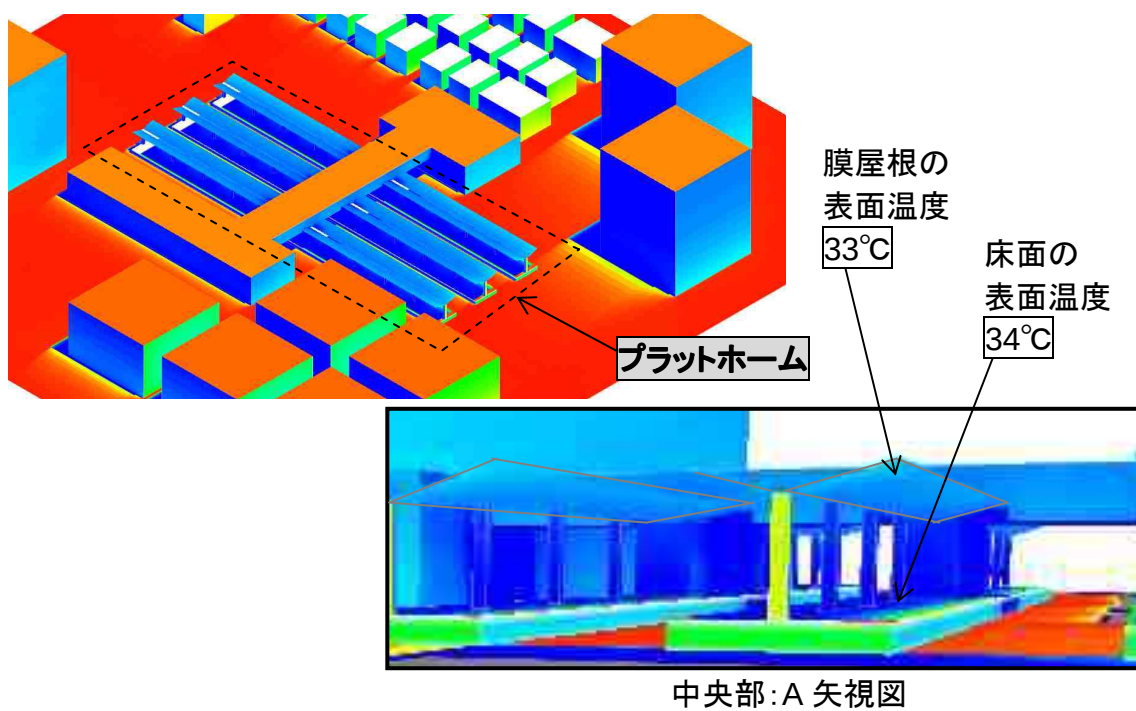


図 5-13 表面温度分布(晴天日:12 時)

31.1℃であり、CASE2 に比べて 44.5℃悪化した。また、外気温 33.7℃と比較すると、10.8℃程度高い結果となった。そのため夏季 12 時の熱環境改善のさらなる対策が必要といえる。

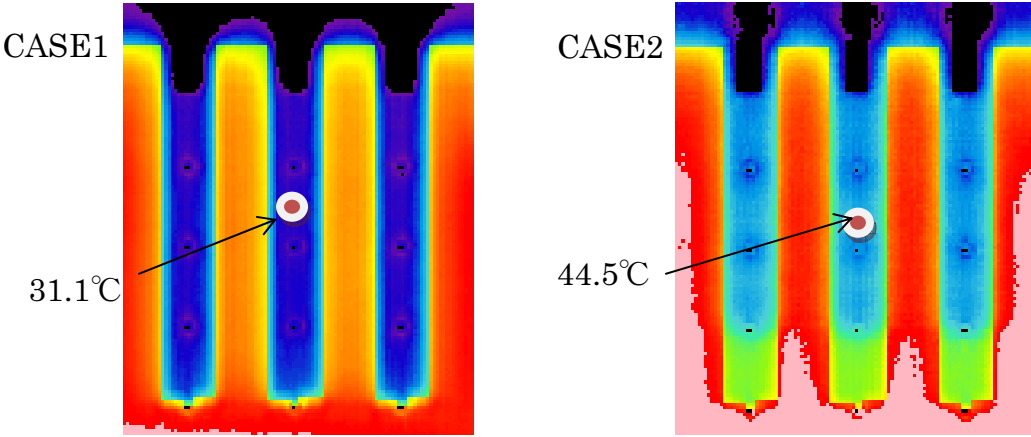


図 5-14-1 CASE1 と CASE2 の日射を考慮した平均放射温度（MRT）図

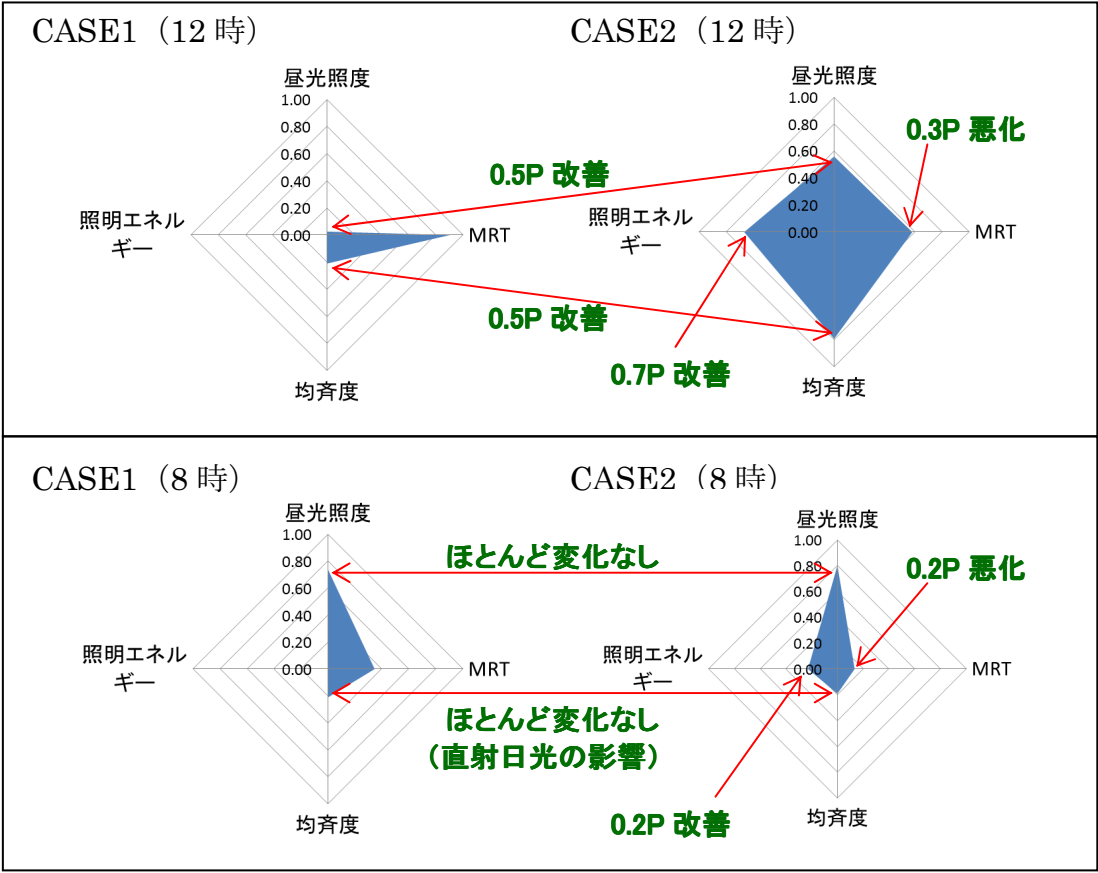
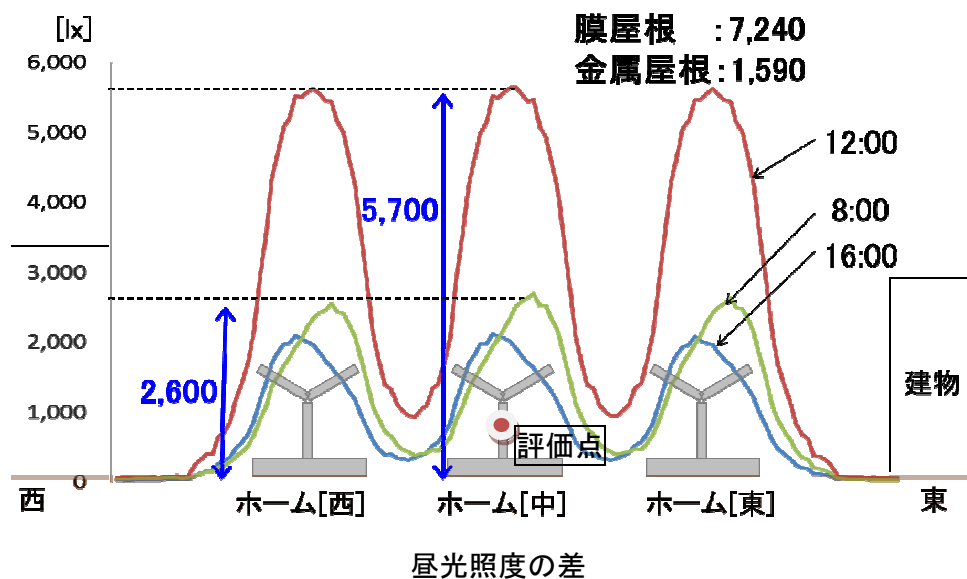
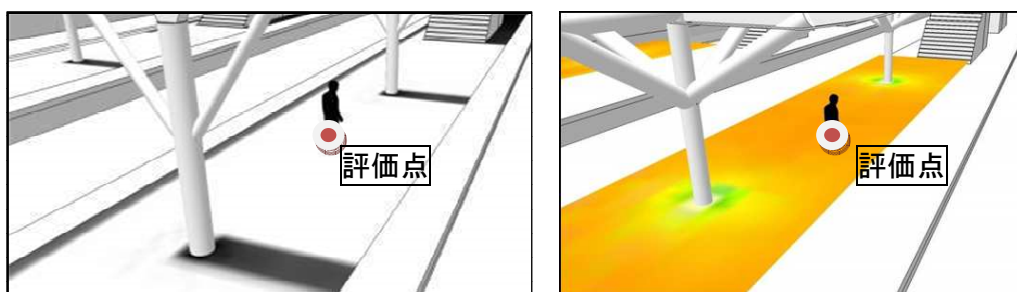
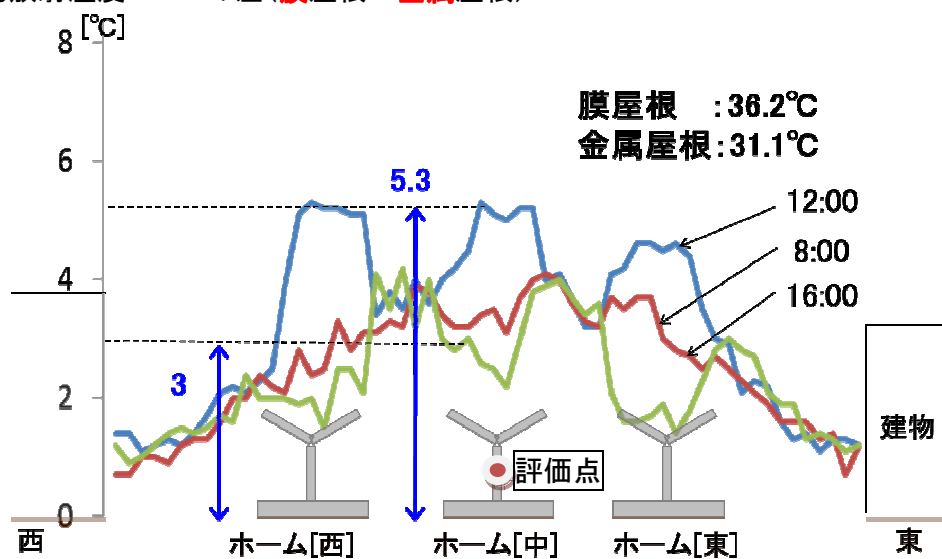


図 5-15 CASE1 と CASE2 のトレードオフ評価

水平面昼光照度差（膜屋根－金属屋根）



平均放射温度 MRT*の差（膜屋根－金属屋根）



日射を考慮した平均放射温度の差

図 5-14-2 CASE1 と CASE2 の昼光照度と日射を考慮した平均放射温度の差

5-3-6 設計者による判断

5-3-5の結果を踏まえ考察すると、金属屋根（CASE1）から膜構造屋根（CASE2）に屋根材を変更することで、膜材からの光の侵入量を調整し、直射日光は透過の際、拡散光に変える役割と考えると、昼光利用の観点からは、均斉度の高い均一な光環境を実現できることが分かった。しかし、8時と16時においては、開口部からの直射日光が直接床面に到達するため、均斉度が低くなった。

一方、膜下空間の熱環境は、膜材料からの日射透過により、床面表面温度が3℃程度上昇している。また、図5-15に12時と8時におけるトレードオフ評価例を示す。この結果を踏まえ、熱環境対策方法より、まず屋根形態を変更し、直射日光の侵入を調節する。次に、床面温度の上昇を抑制する対策の一つとして、蒸発冷却効果を有する保水性舗装を適用する。さらに、ホーム柵や休憩スペースの仕切りに蒸発冷却効果のある壁体を設置することを検討する。ここでは、以下の設計変更を試みる。

- CASE3として、直射日光の開口部からの侵入量を極力低減するため、屋根形態を変更する。
- CASE4として、床面の表面温度上昇による熱環境を改善するため、床面に保水性舗装を設ける（CASE4-1）。さらに、熱環境改善の可能性を探るため、ホーム柵等の壁面に蒸発冷却体を設け（CASE4-2～4-4）、改善効果を比較検討する。

5-4 膜下空間の熱環境対策方法を適用したモデル変更

5-3-6より決定した設計変更の考えに基づき、プラットホームの計算モデルの変更を行う。ここで計算モデルの変更とは、光・熱・風環境の予測・評価を行った結果、設計要請に対する熱環境対策を施す必要がでてきた場合、その対策方法を第4章の熱環境対策方針から選定し、設計条件にフィードバックするといった一連の流れを示す。

具体的には、以下の手順でモデルの変更を行う。

- 1) 熱環境対策方法より、対策技術を選定する（表4-1）。
- 2) 上記1)の対策技術をCASE2（対策前）に導入するため、設計コンセプトと変更に伴う設計条件（空間形態、材料、評価項目）を提案する。
- 3) 提案モデルをCASE3（対策後）として、同条件で予測・評価し、CASE2と比較することで改善効果を示す。

4) 3) の評価で、更なる改善が必要かどうかの設計判断を行う。

5) モデル変更が必要となった場合は、上記 1) にフィードバックし、モデル変更の必要が無い場合は設計終了とする。

5-4-1 熱環境対策技術の選定

膜下空間を構成する床面の温度上昇が熱放射環境を悪化させる要因となっている。今回のモデルの場合、幅が短く長辺の屋根形状をしており、太陽高度が傾いた場合、直達日射の影響により、熱環境に大きく影響する。したがって、直達日射を極力侵入させない工夫により検討する必要がある。また、CASE2 の結果より、膜材からの透過日射の多い 12 時において表面温度が 2℃程度上昇しているため、透過日射の影響も検討する必要がある。ここでは、蒸発冷却部材の適用条件も考慮し、風速のデザインを行う。

熱環境対策方法(表 4-1)より、屋根と壁の開口部の形状の工夫により設計コンセプトを提案する(図 5-16)。

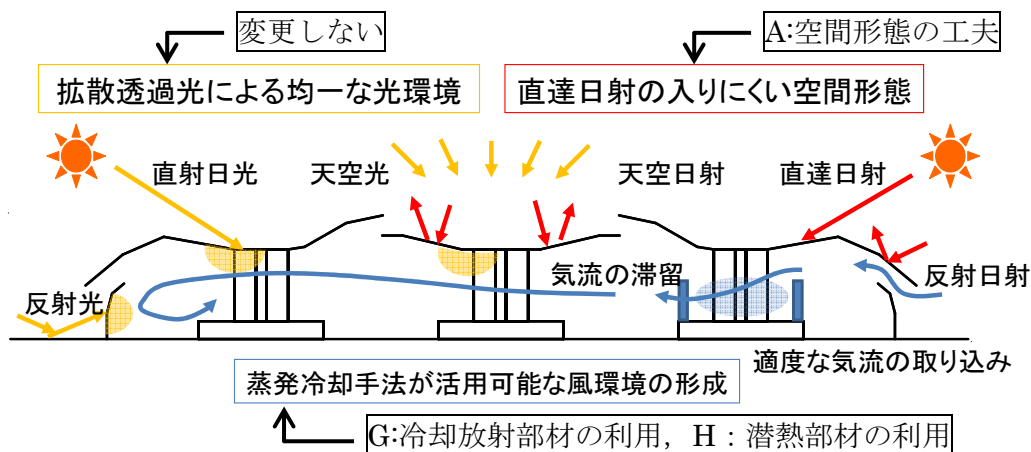


図 5-16 環境配慮設計コンセプト例

5-4-2 設計条件の設定

光・熱・風環境の観点から屋根と壁形態の工夫を検討する際、以下の条件を考慮する。

- ① 熱環境: ホーム屋根の形状によって朝日や西日等の直達日射を極力遮る設計を行う。
また、高日射反射率膜材を利用し直達日射を遮る半密閉空間を創出する。熱環境において更なる改善が求められる場合には蒸発冷却システムを用いた改善手法を導入

する。

- ② 環境：風環境を考慮し，ホーム空間における気流の流れをデザインする。膜構造の壁面によりホームに流入する風向を調節し，流入風に対してホーム上に適切な風の流れをつくり出すための形状を屋根形状により調節する。また強風に対しても，ホーム内の気流分布を抑えた防風設計を試みる。

ここで気流分布を調整する例として，後述する熱環境対策方法の1つである蒸発冷却壁体をホーム柵に設置することを想定する。その際，蒸発冷却壁体の性能を活用するため，効果的な風速にする必要がある。そこで，プラットホームの側壁を設置することで，風速性状の検討を行う。ここで風速の目標値は，プラットホーム内で1m/s以下が要求される。そこで主風向に対し，風速の調整に効果がある側壁に着目し，その形状を設定した。その結果アール上の形状とした。

ここで，気流計算の条件として，計算モデルは連成対象領域である200m×200m×50mとし，光・熱環境計算モデルと同じ20cmの均等メッシュ分割である(図5-18)。また，側壁の有無による一般断面の風速分布図の一例を図5-17に示す。

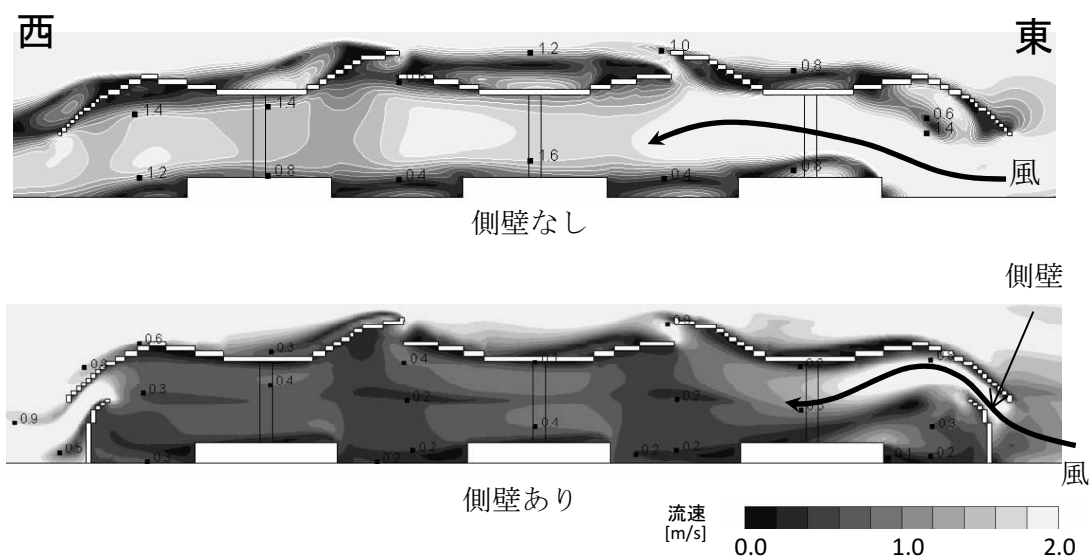
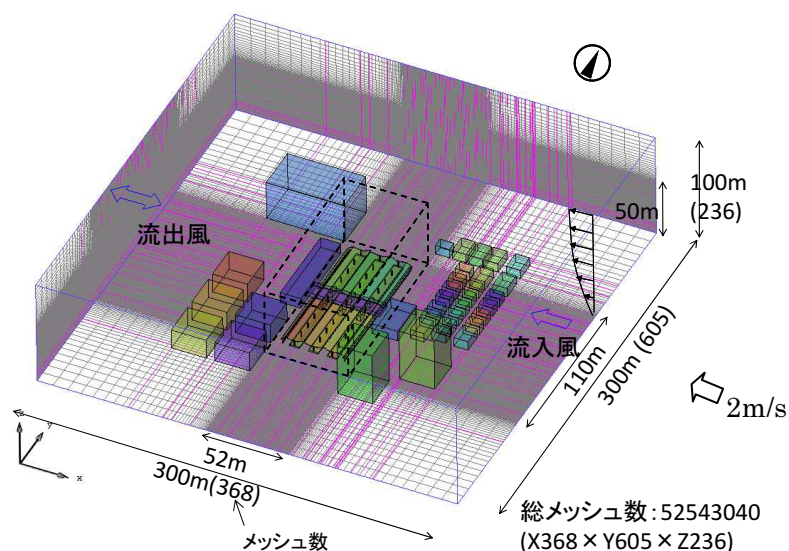


図5-17 側壁の有無による風速分布図(出力例)



気流解析条件			
解析領域	300m(x) × 300m(y) × 100m(z)	差分スキーム	QUICK
メッシュ分割	368(x) × 605(y) × 236(z) =52543040 メッシュサイズ:200mm 等比率:1.1	流入境界	べき指数 0.27 流入風速 2.0m/s 風向: 東(基準高さ 2.5m)
乱流モデル	標準k-εモデル	流出境界	自由流出境界
解析アルゴリズム	SIMPLE,定常解法	側面・天空面境界	free-slip
		建物壁面境界	滑面の対数則

図 5-18 気流シミュレーションの計算領域と計算条件

(1) 設計変更に伴う計算モデルの設定

5-4-2 の設計コンセプト, および第 4 章の熱環境対策方法の通風利用のための屋根の隙間形状と側壁形状を CASE2 に適用し, 提案モデル (CASE3) を設定する^{付 5-1)}。提案モデルを図 5-19 に示す。尚, 周辺建物およびホーム床面は CASE2 のモデルと同一である。

(2) 光・熱・風環境の評価指標の設定

光環境の評価

5-4-2 を適用する。

熱環境の評価

5-4-2 を適用する。ただし, 床面, 壁面に蒸発冷却部材を用いることを想定して

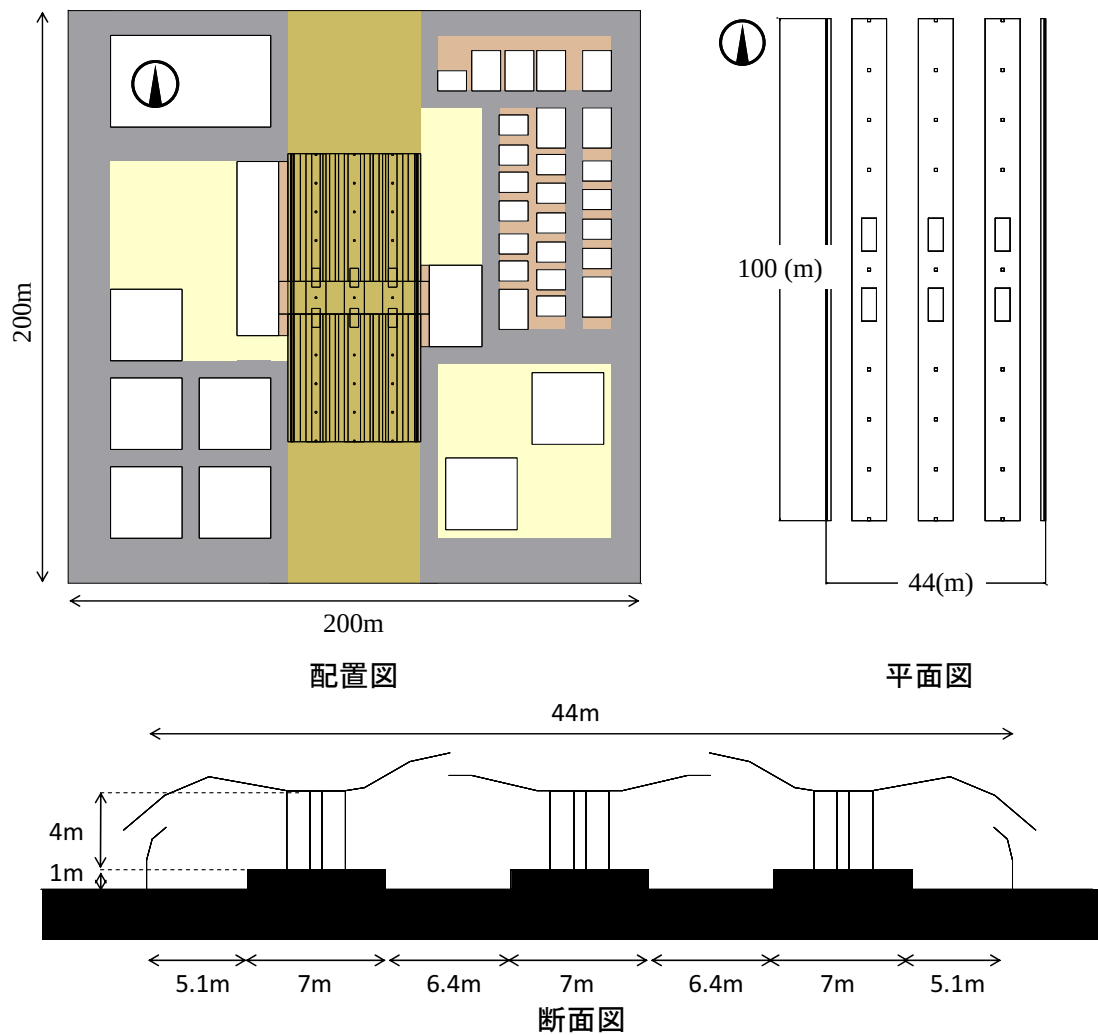


図 5-19 CASE3 の提案モデルの概要図

おり、蒸発冷却壁体（以下、PCW とする）の特質である壁面からの冷放射と壁体を通り抜ける冷気流について評価する際にも MRT と気温分布により行う。

ここで、SET*や PMV の適用も考えられるが、屋外空間を対象に作成された総合評価指標は未だ存在しないため、今回は適用除外とする。

風環境の評価

プラットホームに求められる風環境は、あらゆる方角からの風に対し、気流の安定した空間をつくることであると考えられる。そのため、地域における特徴的な風向・風速に対して、適度な気流をプラットホーム内に取り込むと共に、冬季の冷風まで考慮し、強風に対しては極力低減させる必要がある。その上で、蒸発冷却部材を用いた場合に、

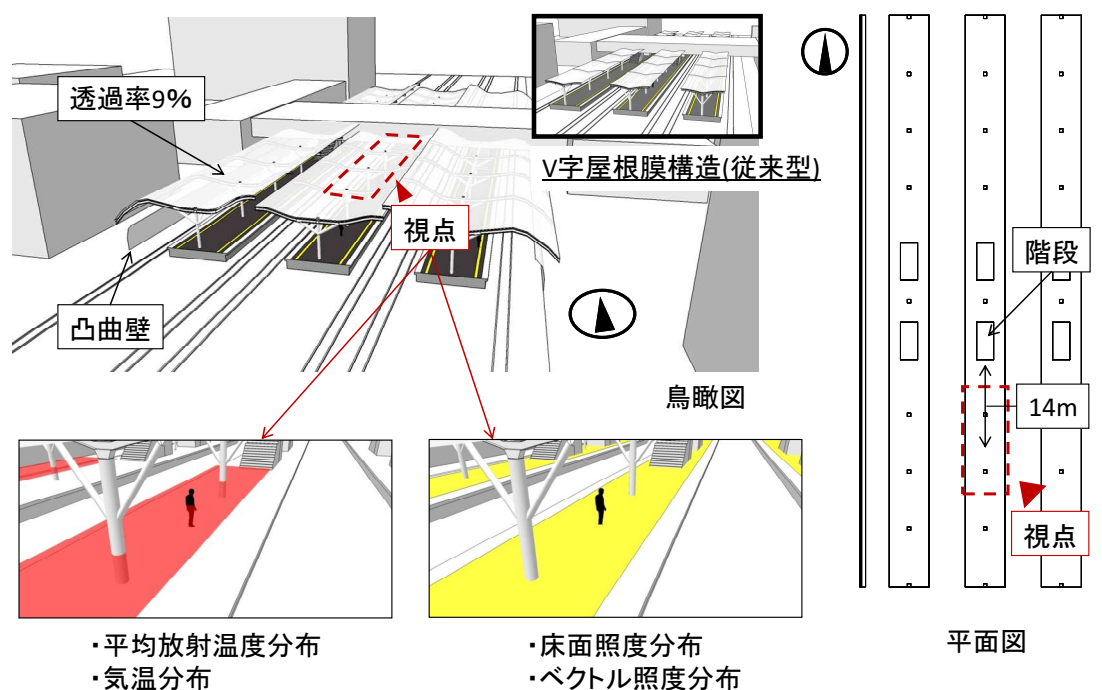


図 5-20 評価範囲の設定

適切な効果が得られる風速・気温分布をホーム空間につくりだすことが望まれる。

本研究では、自然エネルギーを効率よく利用することにより、熱的快適な空間が創造できることを目指している為、PCW の使用を前提にする。PCW の適用条件として最適な空間を、梅干野らは⁵⁻⁷⁾、風速が 1m/s 程度で気流の滞留が生じる空間になると定義している。この数値を採用し、ホーム空間における風速・気流分布を評価する。

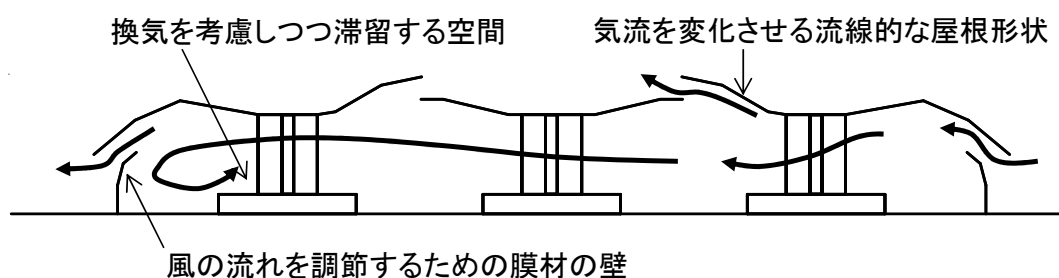


図 5-21 風速コントロールのポイント

また、村上ら⁵⁻⁸⁾の「市街地低層部における風の性状と風環境評価に関する研究(Ⅲ)」で示されている「村上方式評価尺度」を参照し、強風であるとされる風速 5m/s の流入風に対してホーム内気流環境を予測・評価する。

以上より、ホーム空間の評価項目と評価基準を表 5－4 にまとめる。

表 5－4 光・熱・風環境の評価項目と評価基準

シミュレーション	評価項目	出力項目	評価基準
光環境	歩行環境	水平面照度分布	床面照度500lx以上 均斉度[＝面の最小照度/面の平均照度]0.4以上
	視覚環境	ベクトル照度分布	視野角内における膜面と天空輝度や周辺地物との輝度差の大きさ
熱環境	放射環境	平均放射温度分布	ホーム床面高さ1.5mにおけるMRTが外気温以下
風環境	温湿環境	気温分布、湿度分布	流入風の気温・湿度との比較
	平均風、強風時の風環境	風速分布	流入風速と対象場所との比較
	蒸発冷却手法の適正		対処場所の風速が1m/s程度の気流の滞留

5－4－3 光・熱・風環境の予測・評価

(1) 水平面昼光照度分布の比較

図 5－2 2 に計算結果を示す。CASE2 と CASE3 では歩行環境を比較するため、水平面昼光照度分布を分析する。8 時には CASE2 の床面照度が過剰に高くなると共に、構造物の影により均斉度が 0.18 と基準値を大きく下回る。これは 16 時においても同様である。一方、CASE3 ではこれらの直射日光による影響が抑えられており、均斉度が 0.85 と高く、基準値を大きく上回る照度が確保されている。12 時の CASE3 では、CASE2 にみられるようなホーム中心部と縁端の床面照度の差が少なくなり均斉度が 0.56 から 0.97 へと大幅に上昇している。ここで、均斉度が改善した結果、評価点の照度値が 10,240lx から 6,070lx と 40%程度減少している。また、16 時においても大幅に減少している。しかし、基準照度と比較するといずれも高い値であり、歩行に対する光環境の面では、改善されたといえる。

(2) ベクトル照度分布の比較

予測結果を図 5－2 3 に示す。CASE2 では 8 時と 16 時にホームの大部分で直射日光の影響を受けており、待機および歩行中に不快グレアを感じる可能性が極めて高い。

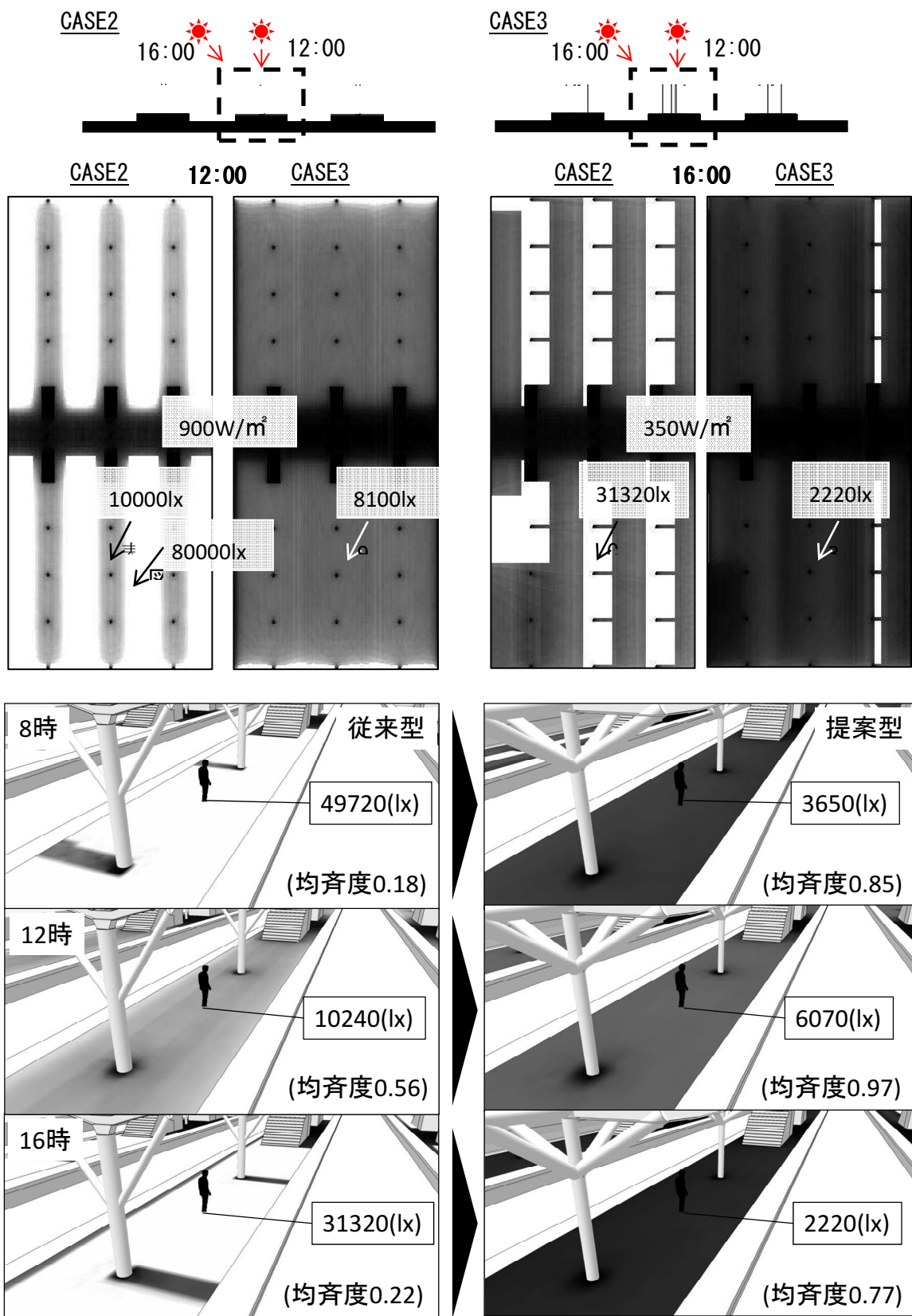


図 5-22 床面照度分布の比較(高さ 0m)

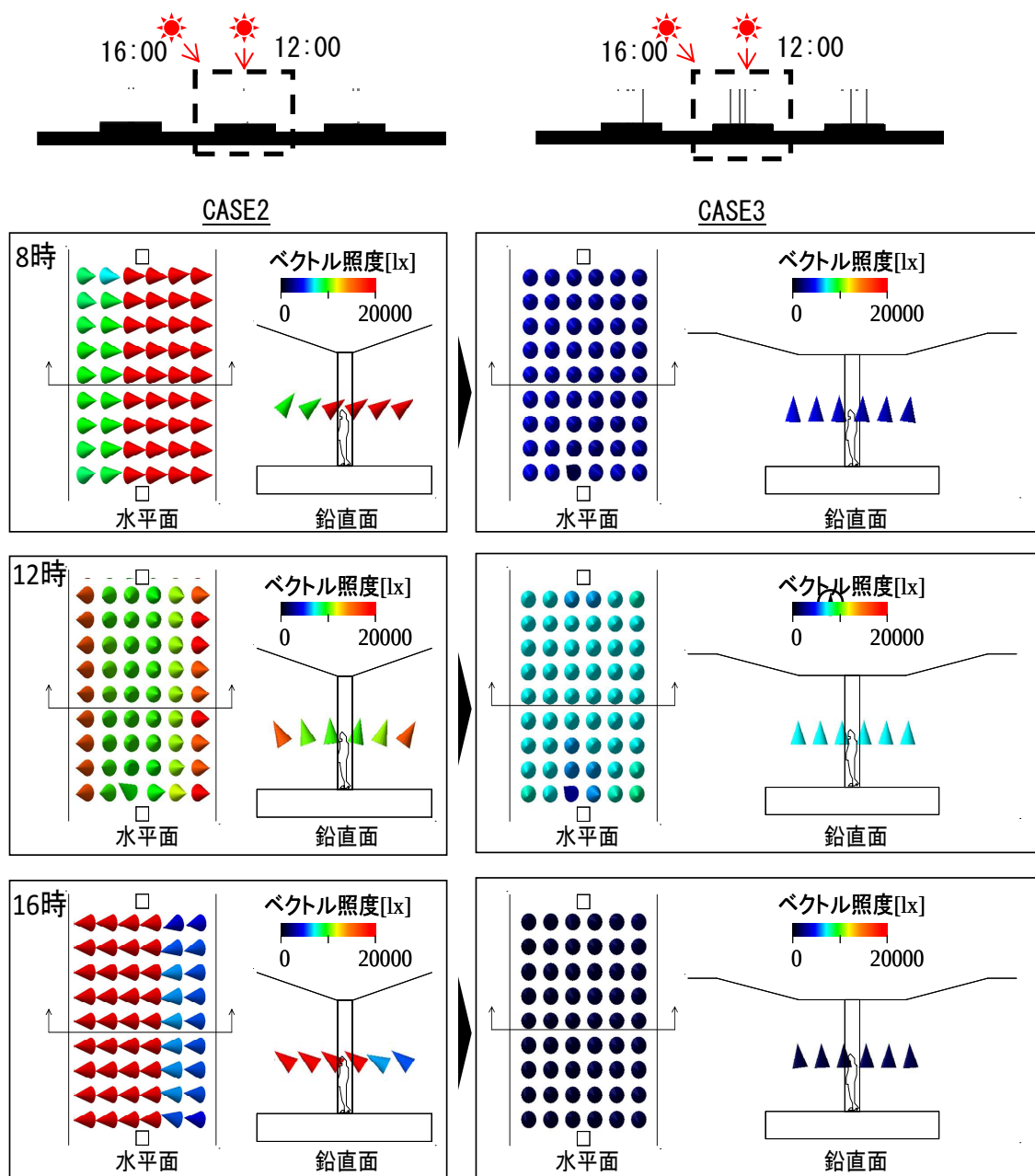


図 5-23 ベクトル照度分布の比較（高さ 1.5m）

また、12 時においても天空光や反射光の影響がホーム縁端で強く出ており、これがグレアの原因になる可能性がある。これに対し、CASE3 のホームではすべての時刻において、大部分が真上からの向きになっており、かつホーム全体の値の差も大きくないことから、均等かつ真上からの光が一日中保たれることがわかり、グレアの発生が抑えられていると考えられる。

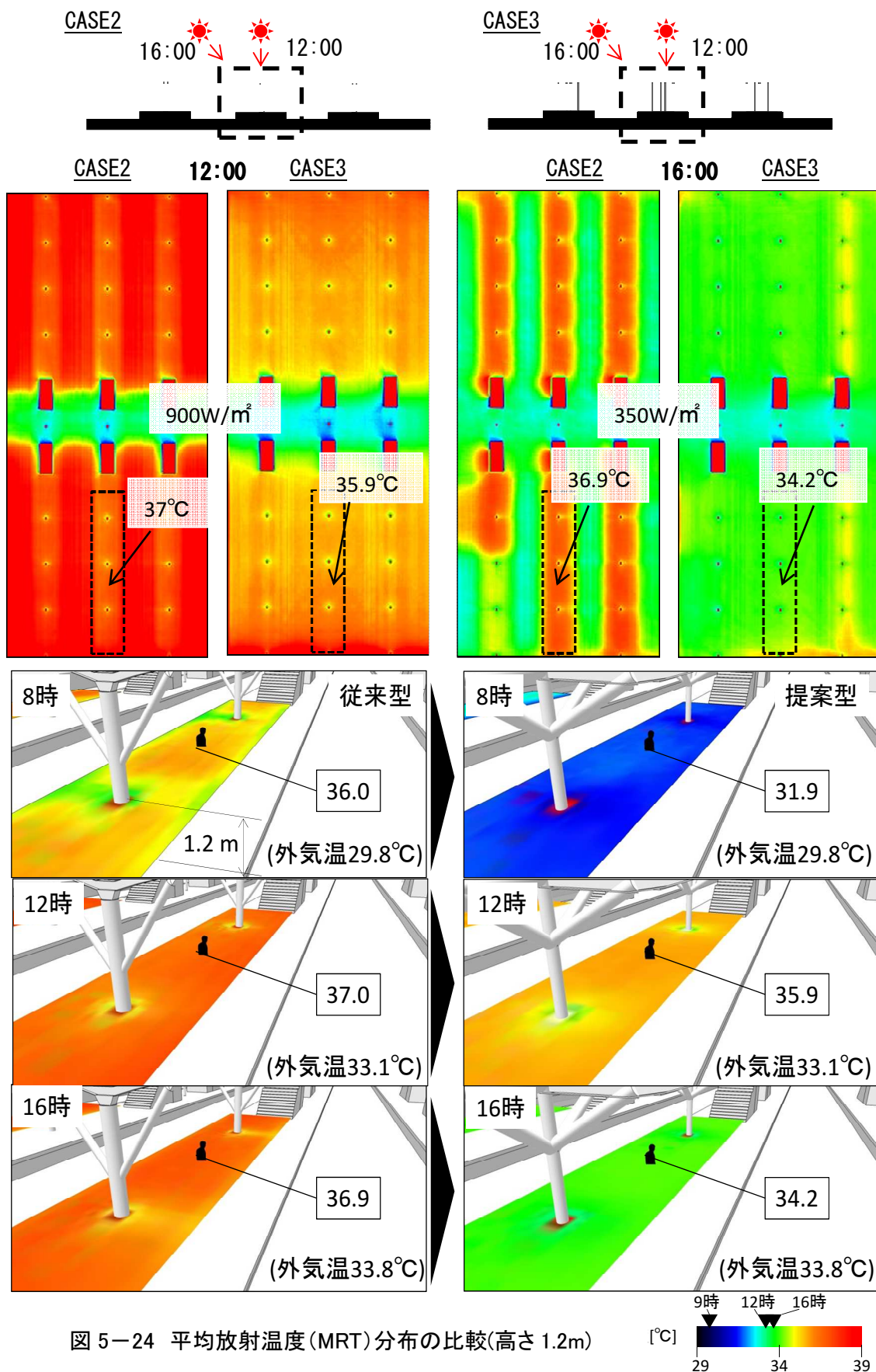


図 5-24 平均放射温度(MRT)分布の比較(高さ 1.2m)

(3) 日射を考慮した平均放射温度 (MRT) 分布の比較

図5-24に計算結果を示す。CASE2とCASE3のプラットホーム上の待機空間の熱放射環境を比較するため、日射を考慮した平均放射温度 (MRT) 分布を分析する。8時には直達日射をプラットホーム床面に直接受けるCASE2では、最大で外気温よりMRTが6℃上昇しているが、CASE3ではプラットホーム全体を膜材料で覆うことにより直達日射の侵入を抑えた結果、MRTは2℃程度の上昇であった。また、同様の効果が16時においてもみられる。12時ではMRTの上昇を抑える効果がそれほどみられないため、12時の熱環境改善のためのさらなる対策が必要と考える。

(4) 温度分布の比較(12時)

図5-25に計算結果を示す。CASE2とCASE3の待機空間の温度環境を比較するため、12時における気温分布を分析する。CASE2では33℃の流入風に対し34℃近い温度分布であるが、CASE3では33.4℃に下がっている。しかしながら、現状では温度環境としても多少の悪化がみられるため対策が必要であると考えられる。

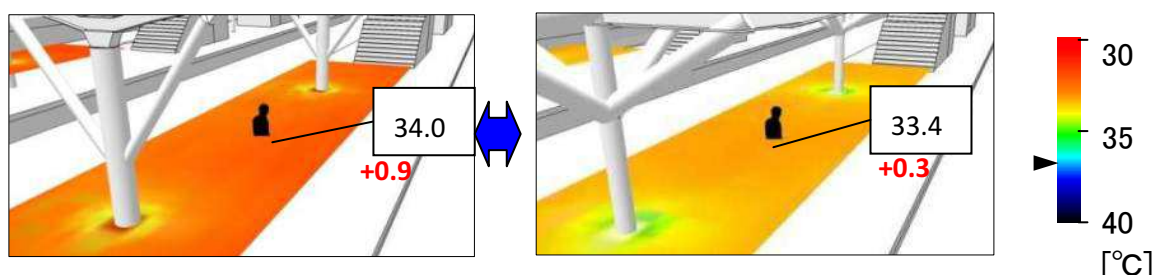


図5-25 CASE2とCASE3の気温分布図 (FL+1.2m) 外気温 33.1℃

5-4-4 曇天日の光環境の検討

5-4-3のCASE3の結果から、屋根形態と側壁を設けたため、晴天日に対する曇天日の膜下空間における光環境への影響を把握する必要がある。ここでは、直射日光の影響がほとんどない状態での視覚的判断を要求されたと仮定すると晴天日と曇天日の光環境の差と、順応状態を推定する必要があり、視野内の輝度分布画像により判断することが考えられる。本研究で構築した光・熱・風環境の予測・評価ツールにおける光環境計算では、光の透過指向性を考慮していないため、計算モデルは均等拡散面で構成される

として検討することになる。明るさ感といった視覚的快適な評価をするような詳細設計も考えられるが、現段階では、照明の質を確保するという照明設計としての判断が推定出来ればよいとの考えから、輝度画像にて把握する。

気象条件

拡張アメダスデータより、埼玉県浦和の夏季曇天日（7月13日）の気象データを採用した（図5-26）。

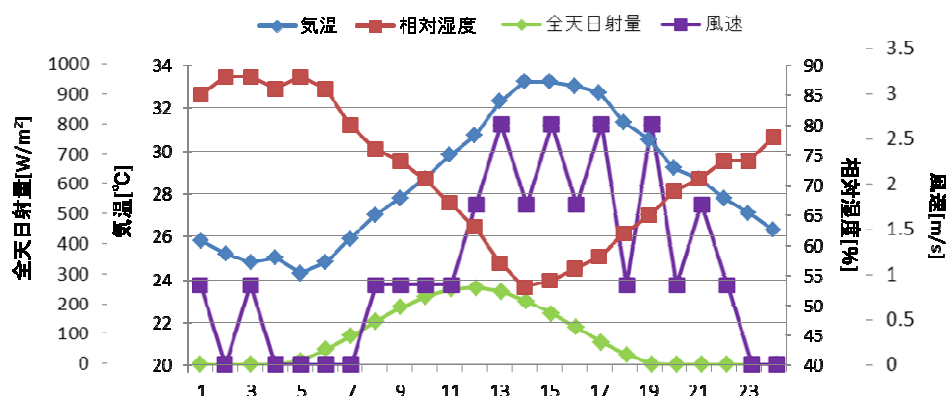


図 5-26 気象データ(曇天日:7月13日)

計算結果と考察

(1) 曇天日の照度分布

図5-27のプラットホーム評価断面における照度分布をグラフ化し、曇天日について、8時、12時、16時の3時刻の変化を確認する。

各時刻において、床面照度は1000[lx]以上が確保されており、曇天日においても必要照度の500[lx]を上回る照度が得られている。東西のホームでは屋根の隙間から天空光、天空輝度分布の影響が生じているものの均斉度は0.8~0.9程度に抑えられている。中央のホームでは均斉度は0.97以上であり非常に安定した照度環境が形成されている。

(2) 晴天日と曇天日の輝度分布比較

視点(図5-19平面図参照)の高さ1.5mにおいて南側を向いた際の人間の視野角における輝度を評価する(図5-28)。

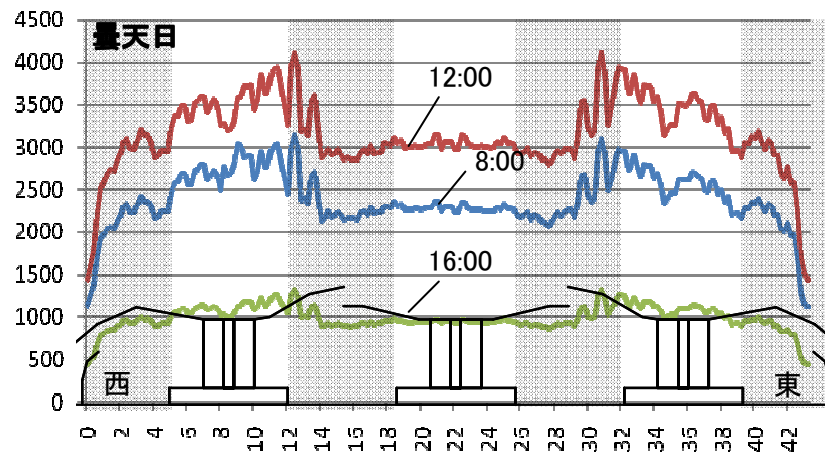


図 5-26 曇天日の 3 時刻における照度分布

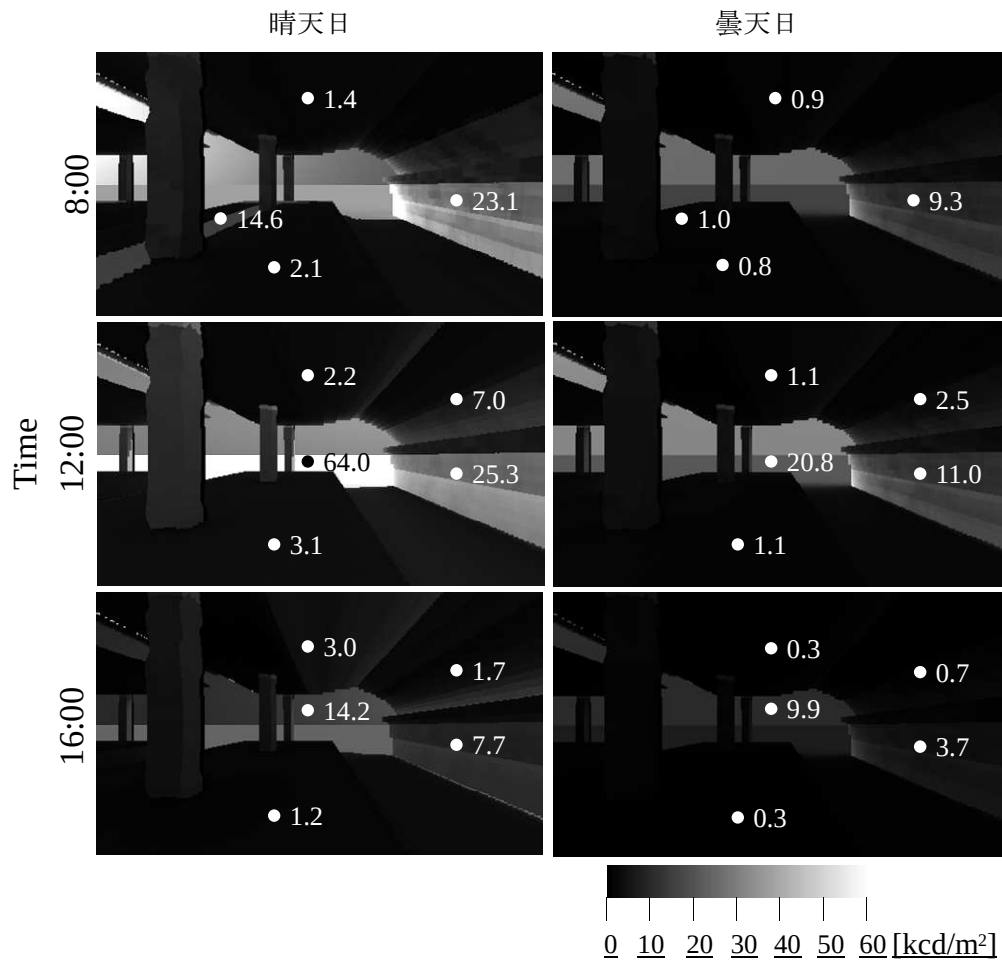


図 5-28 晴天日と曇天日の輝度分布画像

a. 晴天日における視点 B(床面高さ 1.5m)南方向の輝度分布

8 時では直射日光の影響により、床面に 12.5 kcd/m^2 程度の輝度差が生じ、不快グレアの原因に成り得る。12 時では周辺地面の輝度が 64.0 kcd/m^2 となり、ホームの開口部を視野内に入れると不快グレアが発生すると考えられる。

b. 曇天日における視点 (床面高さ 1.5m)南方向の輝度分布

8 時と 12 時で膜面輝度が 1 kcd/m^2 程度であり、直射日光が無くともある程度の輝度面が得られている。16 時には輝度値が 0.3 kcd/m^2 程度となり、昼光のみでは床面の認識が困難になるおそれがある。

(3) 評価

5-4-3 の晴天日と曇天日を比較した結果、晴天日のプラットホーム床面最小照度で曇天日の 2~2.7 倍程度を確認した。また、12 時の晴天日の膜面輝度で曇天日の 2 倍程度、床面輝度で 2.8 倍程度を確認した。この結果より直射日光の影響は大きく、雲の影響や周辺地物による光環境の低下を評価することが課題といえる。

5-4-5 設計者による判断

5-4-4 の結果を踏まえる考察すると、直達日射の侵入を極力防ぐために膜屋根形状を大幅に変更した CASE3 では、大幅に改善された。しかし、12 時における透過日射による侵入熱により、日射を考慮した MRT は外気温より 2°C 程度上昇しており、待機空間の温度も外気温より若干高めにてている。このことから、外気温以下の設計要求に対し、さらなる対策が必要である。

ここでは、CASE3 をベースに蒸発冷却部材や高反射膜材を適用することで、熱環境改善を図る。以下の手順で予測・評価し、方向性を決定する。

- 1) CASE3 に、蒸発冷却機能のあるホームドアを設置 (CASE4-1 とする)
- 2) CASE4-1 に、保水性舗装の床面を設置 (CASE4-2 とする)
- 3) CASE4-2 に、高反射の膜材に変更 (CASE4-3 とする)
- 4) CASE4-2 に、待合空間の壁面に PCW を設置 (CASE4-4 とする)

5-5 蒸発冷却部材を適用したモデル変更

5-5-1 蒸発冷却部材の設置方法の検討

モデル変更のため、蒸発冷却部材の設置方法を検討する。

(1) ホームドアへの蒸発冷却壁体（PCW^{注1)}）の適用

PCWはルーバー上の形状を持つため、熱環境改善効果だけでなく意匠性も兼ね備えているため、建築空間や設備機器への親和性が高い。そのため公園や広場等のオープンスペースからカフェや交通機関の待合所、通路や歩道といった空間で、建築のデザインと融合した形で配置することが可能である。都市周辺の利用者の多いプラットホームでは、近年ホームドア整備の必要性が示されており、実際の大都市圏の駅にも設置が進んでいる。本研究では、プラットホームへ設置されるホームドアに着目し、柵部分にPCWを適用可能かどうか検討する。

近年開発されているホームドア⁵⁻⁹⁾では図5-29のような透明なガラスを用いて広い視界を得られるものがある。この設備を応用することでPCWの適用が可能であると考えられる。具体的には透明なガラスを用いている柵部分のガラスを取り除き、その両側をPCWの柵を配置することで、冷気を通しつつ、ホームドアの機能は保つことができると考えられる。国土交通省で推奨されているホームドアの寸法に対しPCWを設置した場合の図面を図5-30に示す。



図5-29 近年開発されている透過型のホームドア⁵⁻⁹⁾

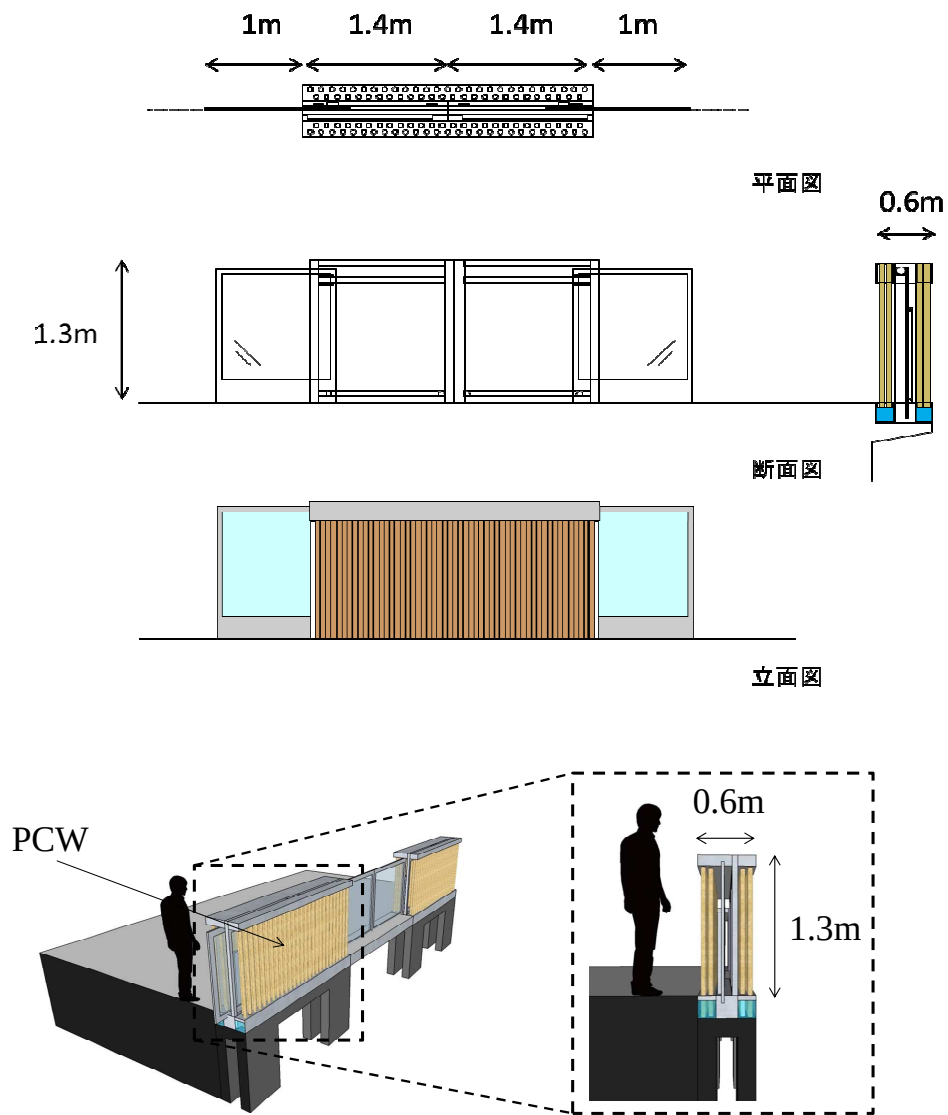


図 5-30 PCW を適用したホームドア

（２）PCW を用いた待合空間の検討

待合空間としての役割を持つプラットフォームでは旅客が座って待機できるベンチが設けられる場合が多い。列車の到着を立って待つ状態で、旅客が疲労を感じる時間を旅客疲労時間というが池田ら⁵⁻¹⁰⁾によると、5 分以上の場合に 50 パーセント以上の人間がベンチを利用すると回答している。また列車の遅延においても 5 分以上遅延する場合に半数以上が不快感を示すことが明らかになっている。

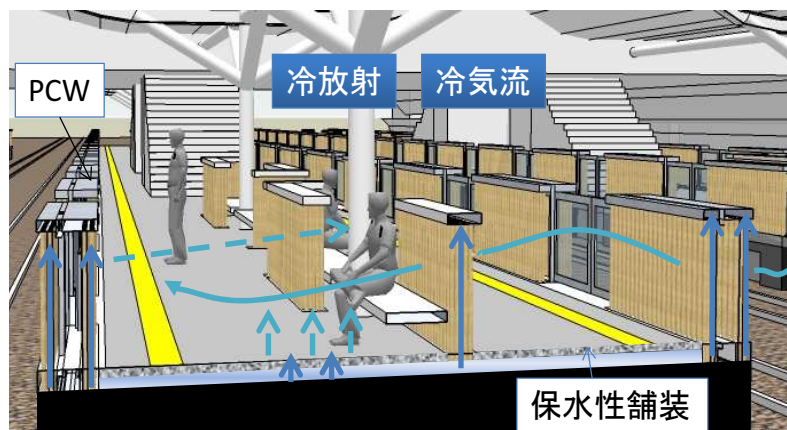
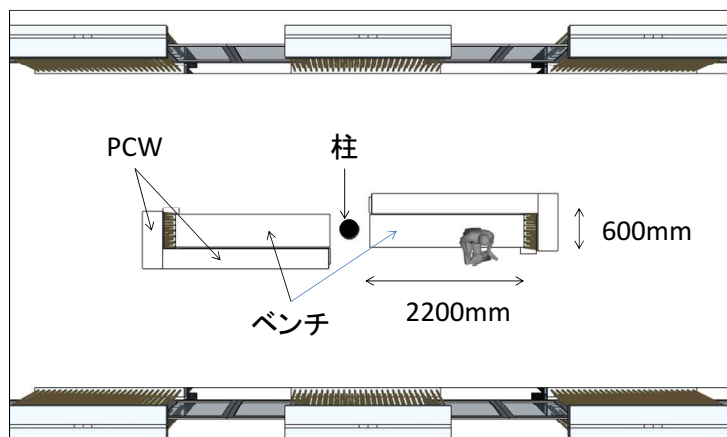
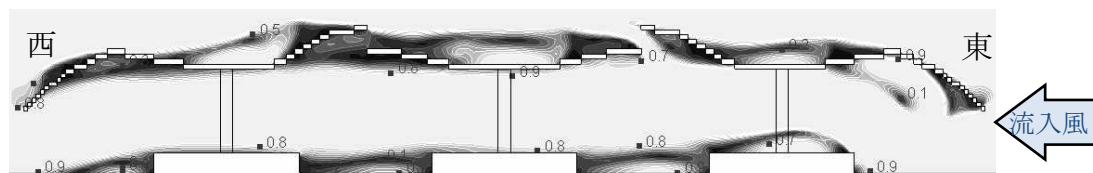
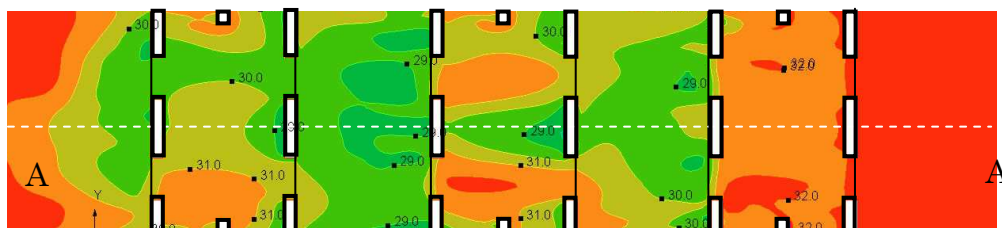


図 5-31 PCW・保水性舗装を用いた待合空間

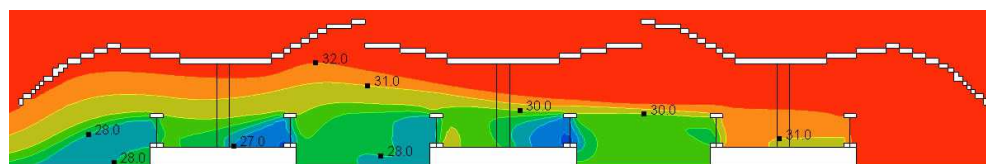
側壁無し



鉛直面風速分布図 (A-A'断面)

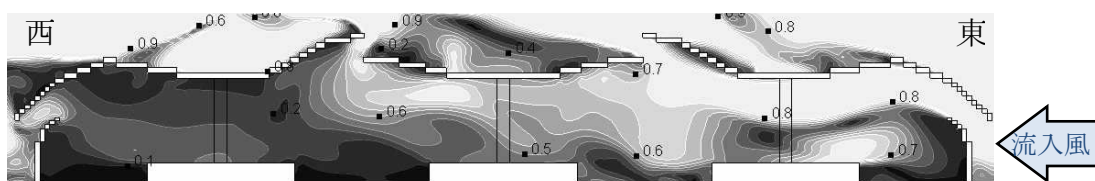


水平面気温分布図 (高さ 1.5m)

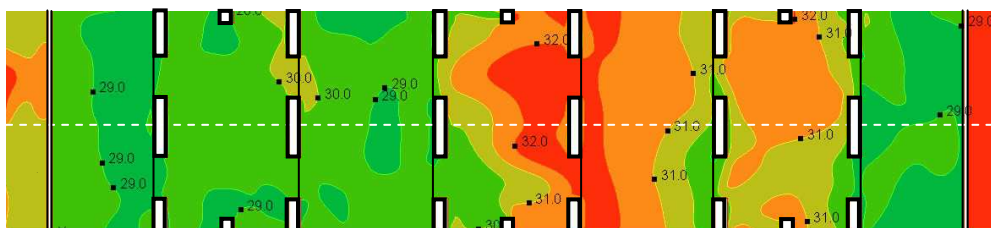


鉛直面気温分布図 (A-A'断面)

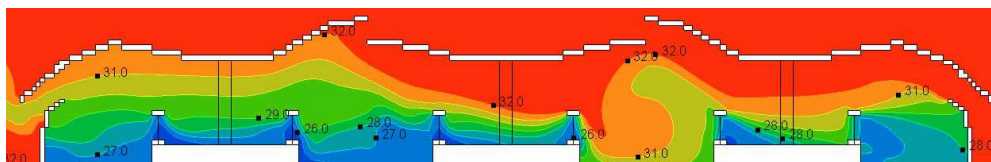
側壁有り



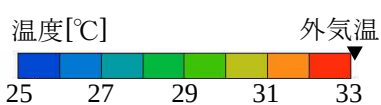
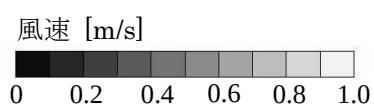
鉛直面風速分布図 (A-A'断面)



水平面気温分布図 (高さ 1.5m)



鉛直面気温分布図 (A-A'断面)



外気温

流入風向：東
流入風速：2[m/s]
外気温 33.1[°C]

図 5-32 側壁の有無による風速と気温分布の違い

プラットホーム上のベンチ形態に関する既往研究として堀内ら⁵⁻¹¹⁾によって、防風性や居住快適性からコの字型の囲み空間で 2.5 人分程度の幅を有するベンチが求められることが示されている。プラットホームにおけるスペースは重要であり、待合空間もなるべく幅とるべきでない。そこで本研究では柱を上手く利用したベンチ空間を設け、そこをコの字型に PCW で囲うような待合空間を提案する（図 5-31）。なお座った場合の待機空間の評価高さは人が座った時の首下高さである 1100mm とする。

5-5-2 光・熱・風環境の予測・評価

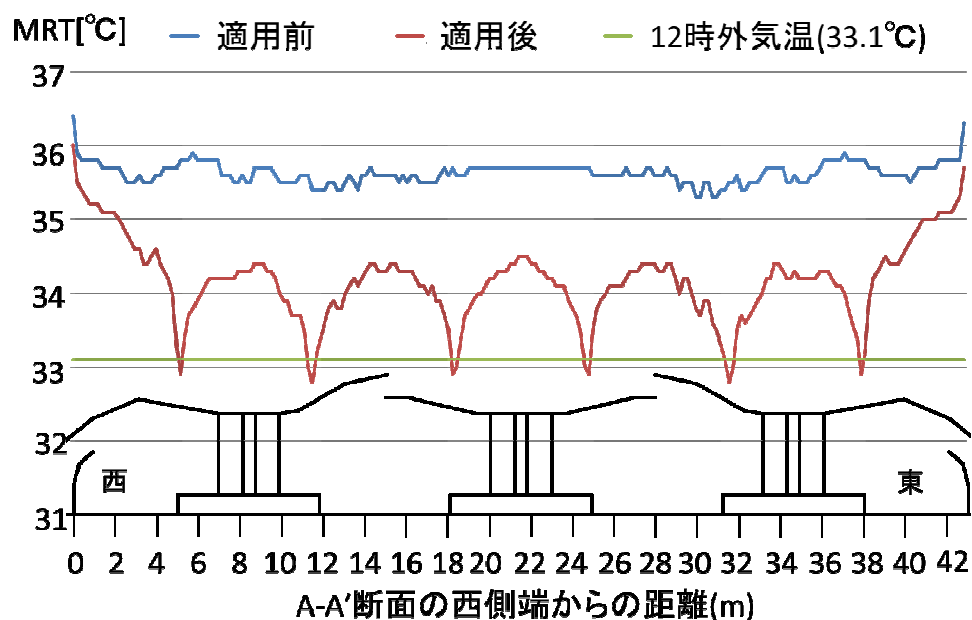


図 5-33 PCW を用いたホームドアの MRT 分布図

(1) 解析入力条件

熱環境シミュレーション入力条件として、地方中枢都市(埼玉県浦和)における夏季晴天日 2000 年 8 月 1 日の気象データを用いる。気流シミュレーションの境界条件を図 5-18 に示す。RANS モデルを用い、平均風速のみを考慮する。今回は平均風速 2m/s、主風向として夏季浦和の卓越風である東向きの風を設定して解析を行う。

(2) 解析結果と考察

風環境解析

今回は側面に日射と風量調整のための壁体(以下側壁)を設けた場合と側壁の無い場合に、ホーム内部の気流分布の傾向の違いを把握する。流入風側 2m/s に対して A-A' 断面での気流分布を図 5-32 に示す。壁無しでは風速 1.5m/s 以上の気流がホームを通り抜けている。側壁がある場合、気流が屋根曲面に沿ってホームに流入し、冷気が滞留するような乱れを生じている。流速についても 0.5~1.0m/s 程度となり、PCW 適用のためには側壁による風量調整が有効であると予想される。

PCW 適用前後の熱環境解析比較

計算結果より、側壁を設けた場合に PCW をホームドアの柵として適用した場合の効果について検証する。以下、12 時における解析結果について分析する。

a. 冷放射の効果

PCW を適用前後の A-A' 断面の 12 時 MRT(床面高さ 1.5m)について図 5-33 に示す。12 時の外気温は 33.1℃となっている。適用前では MRT は 35.7℃程度であった。適用後には MRT はホーム中間で 34.5℃程度、PCW 付近では 34℃以下まで下がる。冷放射の効果として、ホーム全域で外気温より MRT が 1~2℃高い程度の環境を形成しており、放射環境の改善がみられる。

b. 冷気流の効果

PCW を適用した際に、側壁の有無が冷気の流れに対しどのように作用するかについて分析する。A-A' 近傍の柱間の平面(床面高さ 1.5m)と A-A' 断面の気温分布を図 8, 9 に示す。側壁を設けることでホーム上・線路敷内に 27~29℃程度の冷気が溜まっている。平面気温分布においても側壁を設けた場合、設けない場合より 1~2℃程気温が低くなる。逆に側壁の影響で気流の流れが変わり中央のホームでは 32℃程度の気温分布の悪化がみられる。

以上より、PCW の適用によって 1~2℃の MRT 低減効果と、外気温より 3~4℃低い冷気流の滞留を確認した。気流分布より、西側ホームにおける気流が弱い。これにより冷気の滞留が線路敷内に大半が流れてしまっている。屋根・側壁の再設計による、更なる気流の取り込みによって利用することが課題といえる。

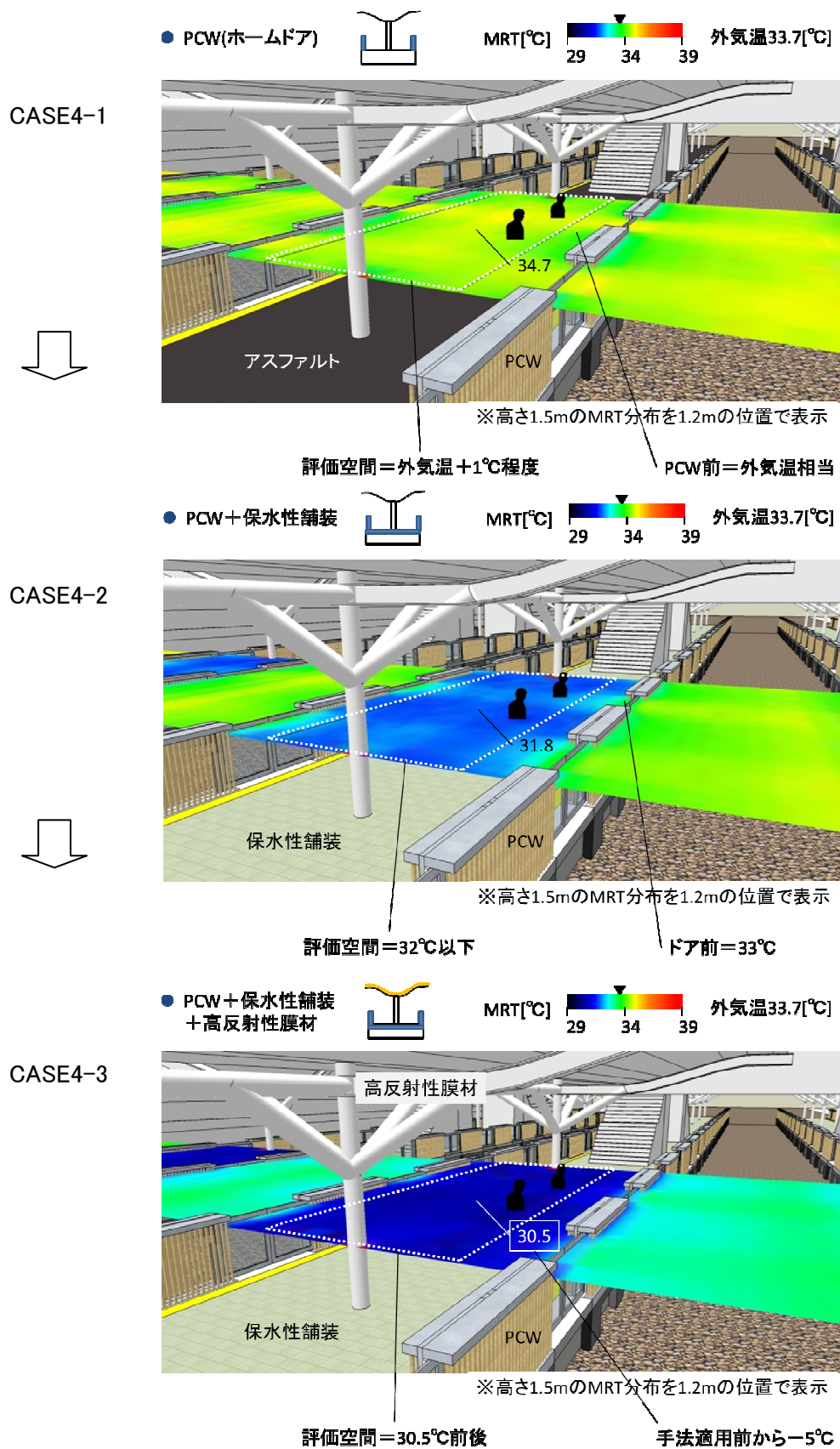


図 5-34 CASE4-1~4-3 の熱環境改善効果

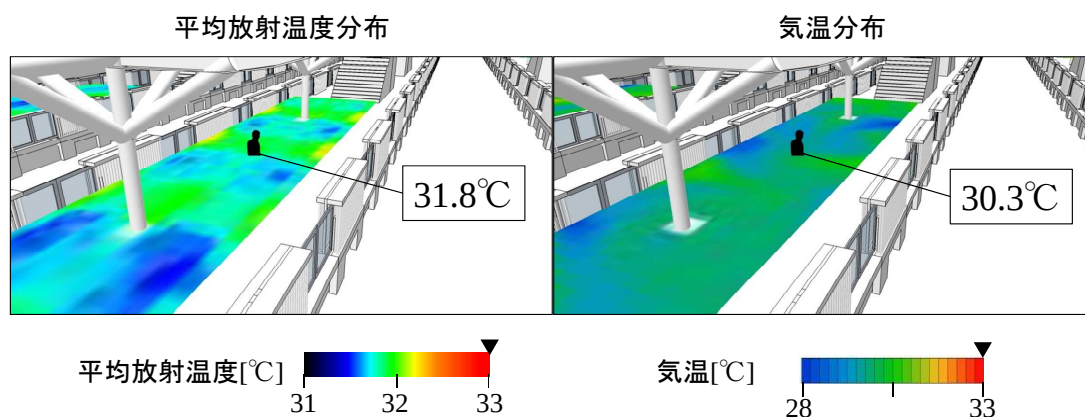


図 5－35 CASE4-2:PCW を用いたホームドアの熱環境改善効果

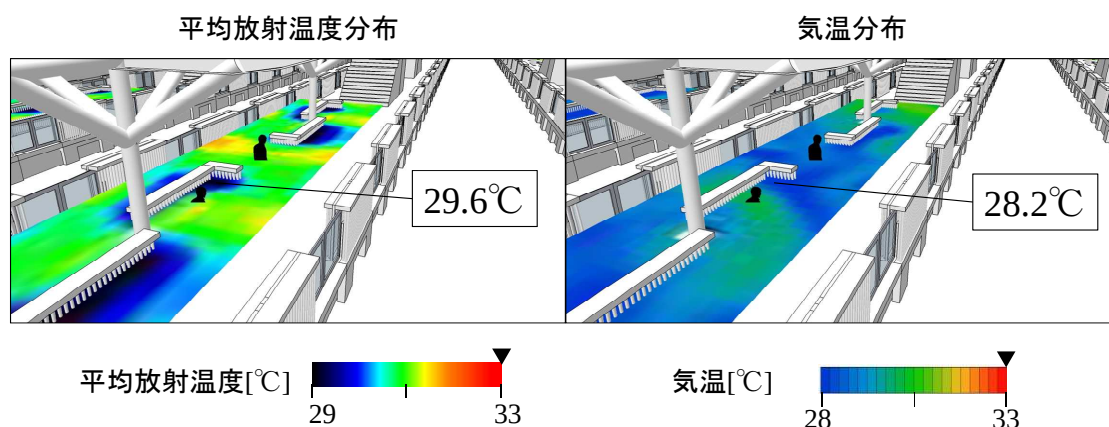


図 5－36 CASE4-4:PCW を用いた待合空間の熱環境改善

次に，図 5－3 4 に CASE3 のプラットホーム空間に PCW と保水性舗装を設置した空間を示す（CASE4－1～CASE4－4）。

PCW と保水性舗装を適用したプラットホーム

前項において検討した PCW を用いたホームドアとプラットホームの床面に保水性舗装を適用した場合の熱環境改善効果を見る。予測・評価手法を用いて対策を用いた後の平均放射温度分布と温度分布の結果を図 5－3 4 に示す。なお，外気温最大(赤色)としたレンジを用いている。対策後には評価範囲内の平均放射温度およびホーム上の温度が外気温より大幅に低下していることがわかる。さらに PCW の効果の分布の偏りも明確

になり、更なる熱環境改善のためにはホーム中央部分に PCW を設置するのが効果的であることがわかる。

これにより、予測・評価手法の適用により、熱環境対策による効果を明らかにすると共に、評価範囲内における局所的な分布と課題点の抽出を行うことが可能であるといえる。

PCW を用いた待合空間を設けたプラットホーム

PCW を用いたホームドアの効果を予測・評価手法で明らかにし、さらなる対策としてホーム中央部分に PCW を用いた待合空間を設けた場合の効果について図 5-35、5-36 に示す。この結果、多くの旅客が集まると予想されるホーム中央部分の平均放射温度分布及び温度分布が大幅に改善され、評価範囲内での一定以上の熱環境改善効果が得られていることがわかる。

以上から、課題点に対する熱環境対策を用いた場合に予測・評価手法を用いることで局所的な課題点の改善結果まで示すことができる。

5-6 まとめ

本章では、実在する駅プラットホームの設計計画に、構築した光・熱・風環境の予測・評価手法を適用して、設計要件や熱環境対策方法を設計プロセスの中で判断し、計算モデルを変更して行く過程を通して、設計への有用性を確認している。以下に結果をまとめる。

- 1) 設計計画におけるプラットホームの非透過材の屋根に着目し、昼光利用効果を提案するため、膜材に変更した設計案を作成している。そして、作成した設計案において、第 4 章で構築した光・熱・風環境の予測・評価手法を用いて、膜下空間の昼光照度分布、日射を考慮した平均放射温度を予測し、設計判断をしている。
- 2) 1) の結果を踏まえ、膜下空間の熱環境が悪化した結果を分析し、熱環境対策を施したモデル変更の考え方を提案し、太陽高度の低い時間帯における光環境の問題については、屋根形態を変更することで昼光照度環境を改善できることを示した。次に、熱放射環境の問題に対しては、さらなる熱環境改善の必要性を示し、膜下空間に蒸発冷却部材を床面と壁面に適用することによって、熱環境を改善できることを

提案し、膜下空間の光・熱・風環境は計画空間より改善できることを示した。

以上より、計算モデル変更の過程を通して、膜下空間の光・熱・風環境が改善されていくことを本予測・評価手法により確認し、設計への有用性を示している。今後は、実務設計への展開を視野に入れ、モデル変更の適用に必要となる知見をまとめた設計資料が必要となる。

注1) 蒸発冷却体利用による空間形態

蒸発冷却壁体（PCW）とは、揚水・保水性に優れた多孔質セラミック材と雨水利用等の給水システムによって構成された壁体である。吸水により継続的に壁面を濡らすことで、図 5-37 に示すような冷放射効果や冷気の移流効果が期待できる。また、ポンプを用いず揚水効果を利用するため、省エネルギーを実現しつつ温熱環境改善が可能である。本研究では自然エネルギーを最大限に利用することを目的とすることから PCW を利用した熱環境改善手法を検討する。

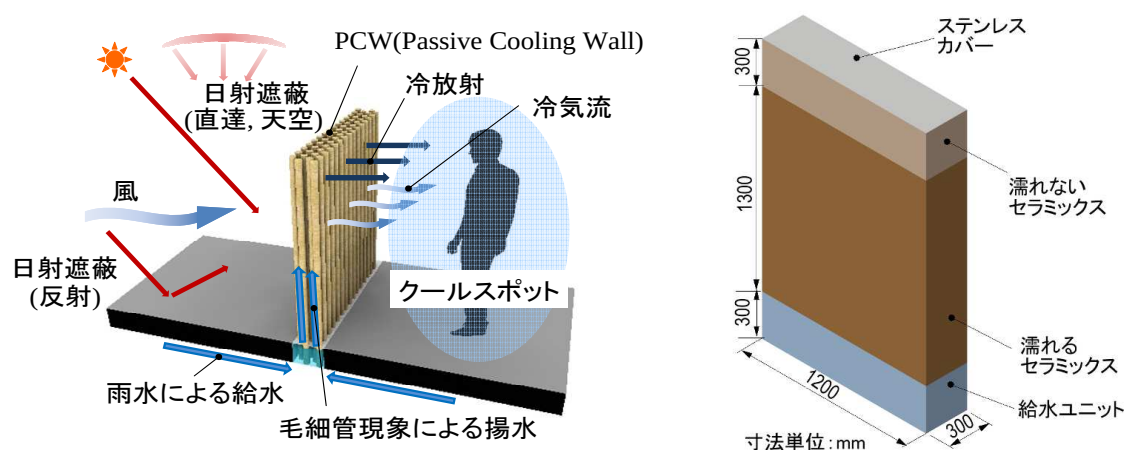
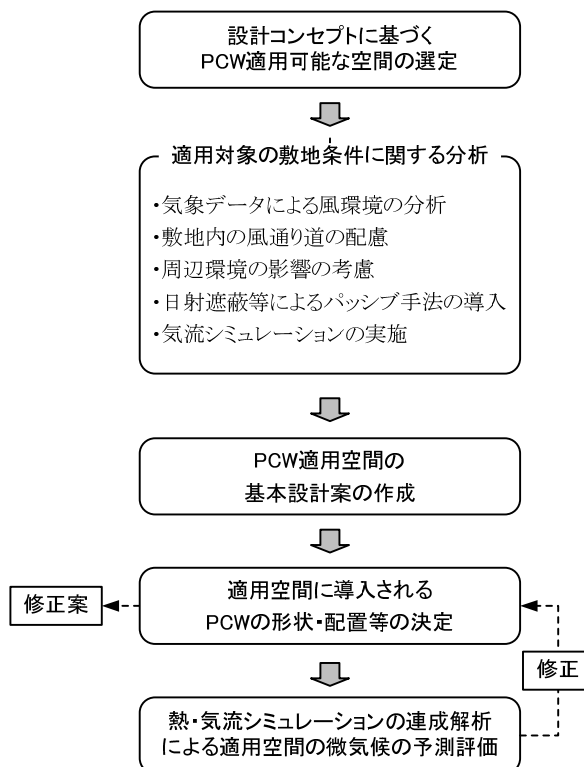


図 5-37 蒸発冷却壁体（PCW）の概要

PCW 適用空間の設計手順



【引用・参考文献】

- 5－1) さいたま市「まちづくり・交通・建設まちづくり（区画整理・再開発等）」：浦和駅西口南第四地区第一種市街地再開発事業の浦和駅周辺鉄道高架化事業，
<http://www.city.saitama.jp/www/contents/1243571962429/index.html>, 2012.3.27
- 5－2) 鉄道に関する技術上の基準を定める省令，平成十三年十二月二十五日国土交通省令第百五十一号
- 5－3) 芳賀 昭弘，榎本 衛，石塚 弘道 [他]：ホーム付近の建築限界と車両限界の変遷，RTRI REPORT Vol.25 No.1, Jan.2011
- 5－4) 仮屋崎 圭司，岩倉 成志，森地 茂：都市鉄道の運行ダイヤ過密化に伴う列車遅延の波及に関する研究 運輸政策研究 2009
- 5－5) 熊倉 知博，林田 和人，渡辺 仁史，青木 俊幸：ホーム上階段付近における空間定位に関する研究 日本建築学会関東支部研究報告集 2004
- 5－6)
- 5－7) 梅干野晃,何江,小川俊輔他：高揚水性セラミック材を用いた蒸発冷却壁体システムの開発－製作したセラミック材の基本性能と試験壁体の冷却効果等の把握実験，日本建築学会環境系論文集 74(641), pp.775-782, 2009-7
- 5－8) 村上周三，岩佐義輝，森川泰成：居住者の日誌による風環境調査と評価尺度に関する研究：市街地低層部における風の性状と風環境評価に関する研究(Ⅲ)，日本建築学会論文報告集 (325), 74-84, 1983-03-30
- 5－9) 三菱重工交通機器エンジニアリング株式会社，
<http://www.mhi-tes.co.jp/products/pfd/index.html>
- 5－10) 池田 耕二，中西 啓晴，望月 太郎，長谷川 貴則：駅ベンチを考察するベンチ設置数量算定手法と検証，日本建築学会学術梗概集，2005 年 9 月
- 5－11) 堀内 愛里，中西 啓晴，原垣内 愛，橋本 祐典：狭隘ホームにおける待合空間に関する一考察 その 2，日本建築学会学術講演梗概集，2007 年 8 月

第 6 章 総括

6-1 研究の総括

6-2 今後の課題

6-1 研究の総括

本研究では、半屋外空間を有する膜構造建築物を対象に、光・熱環境を予測・評価する手法を構築することで、膜下空間の光・熱環境のトレードオフの関係性に配慮した設計を可能にした。各章で得られた知見は以下の通りである。

第1章「序論」では、比較的多くの人が集まる駅前広場等の半屋外空間を有する建築物において昼光や通風といった自然エネルギーを有効に利用しながら良好な光環境と快適な熱環境を創出することの重要性を指摘し、膜構造建築空間（以下、膜下空間という）に着目することの意義について述べた。その上で、膜下空間の光・熱環境を予測・評価する手法を構築し、それを環境設計に適用することによって、光環境や熱環境の快適性を設計提案できる支援手法について検討し、その有用性を確認することを、本研究の目的として述べた。

第2章「半屋外の膜構造建築空間における光・熱・風環境の実態把握」では、膜下空間の光・熱環境の予測手法の構築に向けて、まず、材料試験により、膜材料の日射透過と反射に関わる特性を調べ、建築物に利用される樹脂系膜材の数値シミュレーションに必要な分光指向特性のデータベースを作成した。次に、実在する半屋外の膜下空間において実測調査を行い、光環境に関しては透過光を考慮した照度分布について、熱環境に関しては表面温度分布や気温、放射等による熱的快適性への影響を分析し、風環境に関しては風速分布の特性を明らかにした。これらの結果より、膜下空間における昼光の特徴を示すとともに、透過日射により膜下空間の地表面温度が上昇し、熱放射環境が悪化するという課題点を指摘した。以上の材料試験と実測調査による実態把握の結果を踏まえ、膜下空間に形成される光・熱環境の予測・評価手法の構築に必要な開発要件を提示した。

第3章「透過日射を考慮した膜構造建築空間における光・熱環境の予測手法の開発」では、設計実務において、膜下空間の光環境を考慮しながら熱環境を緩和する設計が求められることを述べた上で、設計の流れの中で光・熱環境の観点から膜下空間を評価するような設計支援手法を提案した。次に、膜材からの可視光線の透過を考慮した光環境計算アルゴリズムの開発を行い、昼光照度計算モデルを導入し、精度検証を行った。また、膜下空間の平均放射温度を算出するため既往のツールに膜材からの透過日射の計算

機能を導入した。

第4章「膜下空間における光・風環境を考慮した熱環境評価手法の検討」では、膜下空間の設計において光環境と風環境との関係性も考慮に入れながら熱環境の評価を行うための手法を提示した。まず、前章で開発した予測手法に、既往の数値流体力学シミュレーション手法を導入し、膜下空間の通風性状を考慮した熱環境の評価を可能とした。さらに、膜下空間における光・熱・風環境のトレードオフ評価の考え方について論じた上で、既往研究で提案されている多目的最適化手法を適用し、評価項目の関係性をチャートで表現することで、トレードオフ評価による設計判断を行う方法を示した。また、第2章で実測調査の対象とした膜下空間を対象とし、本予測・評価手法を膜構造の設計判断の過程の中に適用することで、光環境と熱環境の両面から最適な材料の選択が可能であることを示した。

第5章「半屋外膜下空間の光・熱・風環境の予測・評価手法の活用」では、駅プラットフォームの設計計画を取り上げ、駅プラットフォームの屋根材料に着目し、前章までに開発した予測・評価手法を適用することで、現状の非透過性の屋根材料を膜材に変更することで膜材の昼光利用効果を評価し、さらに太陽高度の低い時間帯における膜下空間への直達日射の侵入に対しては、通風利用も想定した屋根形態に変更することで、通風の促進とともに昼光照度を改善できることを示した。一方、透過日射による熱放射環境の悪化に対しては、蒸発冷却部材を床面と壁面に適用することにより通風を考慮に入れた改善方法を提案した。これらの一連の設計プロセスにより、膜下空間における光・熱・風環境の評価結果を反映する設計支援の方法を提案し、本手法の有用性を確認した。

6-2 今後の課題

＜数値シミュレーションの計算精度について＞

本研究では、計算対象空間の全体を同一の分解能でメッシュ分割を行っていることから、膜構造も同様にメッシュ分割している。膜構造の形体的特徴から、再現性の誤差が顕著に表れる場合の計算精度の向上が課題といえる。

また、膜構造建築物の構造形式によっては、大断面の鉄骨等を計算モデルに反映しなければならぬ場合が考えられる。実務設計の計画設計の初期段階において、効率的な設計作業が求められる中、判断基準となるデータベースの構築が必要といえる。

膜材の形態によっては、気流停滞や熱溜りといった現象がでてくる。本研究では、膜下生活空間における熱環境対策の検討では、設計方針を決めるための概要を把握出来れば良いという条件としているが、評価範囲において気流計算の精度が求められる場合の気流計算の条件を判断する基準をデータベース化する必要がある。

光環境の評価指標として、均等拡散を条件とした輝度分布画像を導入した。照明エネルギー使用量や光環境の概略を議論する場合、設計要求レベルにより問題にならないと考えられるが、膜材の種類によっては、指向性を考慮しなければならない場合も想定されるため、導入に向けた検討が必要といえる。

＜数値シミュレーション上で設定した条件について＞

3章で構築した光・熱環境の予測手法において、膜材の透過率を均等拡散条件としており、入射角度による透過指向性への影響を考慮していない。しかしながら、近年、フィルム系膜材の開発が進んでおり、指向性を考慮しなければ計算誤差が大きくなるような場合が想定される。そのため膜材料の光学特性を把握する必要がある。

＜評価手法について＞

実務設計を考慮しているため、光・熱・風環境の予測結果から、できる限り計算時間の負荷を低減し、回数を減らすための配慮が必要となる。それを実現するために、本研究では、トレードオフ評価の考え方を提案した。今後は、その考えをベースに、評価精度を向上するための検討をして行く必要がある。一方で、可視化方法の工夫等により、専門家でない設計者が判断できるような方法も今後は検討して行く必要がある。

發表論文一覽

【審査付論文】

- 1) 梅干野晃, 何江, 小川俊輔, 巖泰潤, 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 第15巻 第30号, pp. 505- pp. 510, 2009. 06 (掲載済) 【第2章】
- 2) 親川昭彦, 中大窪千晶, 梅干野晃, 吉野達矢: 膜構造建築物の半屋外空間における透過日射を考慮した光・熱環境の予測・評価手法開発の基礎的検討, 日本建築学会環境系論文集 (査読中) 【第3章】
- 3) 親川昭彦, 梅干野晃: 半屋外の膜構造建築空間の光・熱・風環境を考慮した設計支援手法の基礎的検討, 日本環境管理学会誌 (査読中) 【第4章】
- 4) 親川昭彦, 梅干野晃, 吉野達矢: 半屋外の膜構造建築空間における光・熱・風環境の予測・評価—駅プラットフォームの環境配慮設計, 日本環境管理学会誌 (投稿予定) 【第5章】

【国際会議 (全文審査付プロシーディング)】

- 1) Akihiko Oyakawa, Akira Hoyano, Tatsuya Yoshino, Shuhei Ikegawa: Simulation and Evaluation of Luminous and Thermal Environment inside semi-enclosed Membrane Structures, the 5th International Building Physics Conference in Kyoto, Japan, 2012. 5 (掲載済)

【国際会議 (口頭発表)】

- 1) Akihiko Oyakawa, Akira Hoyano, Tatsuya Yoshino: Development of Support Tool for Luminous and Thermal Environmental Design Inside Semi-Outdoor Membrane Structures, the 9th International Symposium on Architectural Interchanges in Asia, Korea, 2012. 10 (掲載済)

【口頭発表】

- 1) 親川昭彦, 吉野達矢, 梅干野晃: 駅プラットフォームの膜屋根下空間における夏季の熱放射環境 その1 ホームの熱放射環境の実測, 日本建築学会大会 (東北学院大学), 2009. 8
- 2) 親川昭彦, 吉野達矢, 梅干野晃: 駅プラットフォームの膜屋根下空間における夏季の

熱放射環境調査 その1 ホームの熱放射環境の実測, 日本ヒートアイランド学会
第4回全国大会(東工大すずかけ台), 2009.8

- 3) 親川昭彦, 梅干野晃, 吉野達矢, 池川修平: 半屋外膜構造建築物の屋根下空間における光・熱・風環境の予測・評価- 駅プラットホームの環境配慮設計, 日本ヒートアイランド学会第6回全国大会, 2011.7
- 4) 親川昭彦, 梅干野晃, 吉野達矢, 池川修平: 駅プラットホームの膜屋根下空間における光・熱・風環境の予測・評価 その1 昼光利用による膜下空間の光環境の検討, 日本ヒートアイランド学会第6回全国大会, 2011.7
- 5) 親川昭彦, 梅干野晃, 吉野達矢, 池川修平: 半屋外膜構造建築物の屋根下空間における光・熱・風環境の予測・評価 - 駅プラットホームの環境配慮設計, 日本ヒートアイランド学会第6回全国大会, 2011.7
- 6) 親川昭彦, 梅干野晃, 吉野達矢, 池川修平: 膜構造駅プラットホームの半屋外空間における光・熱・風環境の予測・評価, 日本建築学会大会(東海), 2012.9

※申請者が共著の口頭発表の論文

- 1) 小川俊輔, 梅干野晃, 嚴泰潤, 吉野達矢, 親川昭彦: 全球熱画像による膜構造建築物の熱放射環境の解析, 日本リモートセンシング学会第43回学術講演会, 2007.11
- 2) 小川俊輔, 梅干野晃, 嚴泰潤, 吉野達矢, 親川昭彦: 膜構造建築物の熱放射環境に関する実測調査, 赤外線学会研究発表会, 2007.11
- 3) 矢ヶ部信吾, 梅干野晃, 何江, 吉野達矢, 親川昭彦: 3D-CAD 対応型熱環境シミュレーションのための膜構造建築の短波長放射収支のモデル化, 赤外線学会研究発表会, 2007.11
- 4) 池川修平, 親川昭彦, 梅干野晃, 吉野達矢: 駅プラットホームの膜屋根下空間における光・熱・風環境の予測・評価 その2 蒸発冷却壁体を適用した熱環境改善手法の検討, 日本ヒートアイランド学会第6回全国大会, 2011.7

【受賞歴】

- 1) 小川俊輔, 梅干野晃, 嚴泰潤, 吉野達矢, 親川昭彦: 膜構造建築の熱放射環境に関する実測調査, 日本赤外線学会第4回奨励賞, 2008.5

※その他の論文

- 1) 吉野達矢, 親川昭彦, 梅干野晃 : 駅プラットフォ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, pp. 55- pp. 63, 2008. 12 (掲載済)【第2章】
- 2) 吉野達矢, 親川昭彦, 梅干野晃, 巖泰潤, 小川俊輔 : 膜構造の建築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 2007, pp. 65- pp. 74, 2007. 12 (掲載済)【第2章】
- 3) 親川昭彦, 吉野達矢, 中田貴之, : 光触媒を塗布したテント倉庫への散水による冷却効果 その2 グローブ温度と蒸発特性, 日本ヒートアイランド学会第5回全国大会, 2010. 7
- 4) 吉野達矢, 親川昭彦, 中田貴之 : 光触媒を塗布したテント倉庫への散水による冷却効果 その1 実測概要と膜表面・室内温度, 日本ヒートアイランド学会第5回全国大会, 2010. 7

謝辭

本研究を行うにあたり、多くの皆様のご指導とご協力を賜り、心から感謝申し上げます。

指導教員である東京工業大学 連携教授、放送大学 教授 梅干野晁先生には、研究者としての信念や研究の方法論、環境問題に対する意識など様々なことを教えていただきました。心より感謝いたします。

同じく指導教員である東京工業大学 准教授 浅輪貴史先生には、研究を進める上での基本となる、仮説のたて方や、全体のまとめ方を踏まえた多くのご指導、ご助言をいただきました。心より感謝しております。

東京工業大学 教授 田村哲郎先生、同准教授 中村芳樹先生、同准教授 山田哲先生からは、論文発表会など機会あるごとに貴重なご助言をいただきましたこと、深く感謝いたします。

佐賀大学 准教授 中大窪千晶先生（当時、東京工業大学 助教）には、研究の助言、論文執筆の作成指導、研究を進める上では、膜材料の光環境と熱環境にかかわる数値シミュレーション結果の導出にあたり多大なるご尽力をいただきました。また、ゼミ発表の際には常に的確なご指摘をしていただきました。研究のあらゆる面で懇切丁寧に常にご助言をいただきました。心より感謝いたします。

熊本大学 助教 高田真人先生（当時、東京工業大学 特別研究員）、首都大学東京 助教 熊倉永子先生（当時、東京工業大学 特別研究員）には、研究の助言、研究を進める上では、数値シミュレーションの操作を教えてください、本研究の遂行にあたって多くの励ましもいただきました。

東京工業大学 特別研究員 河合英徳氏をはじめとする多くの特別研究員の方々に、博士課程の方々には、数多くの研究の助言を頂き、研究生活を進める励みになりました。また、秘書 薄葉千景氏には、生活に関わる多方面でご支援いただきました。多くの方の支援の下で、たくさんの経験ができたことは、私にとって大きな財産となりました。

一方、勤務先である太陽工業(株)においては、今回、大学での研究活動を快くご了解いただき、機会あるごとに寛大なるご理解、ならびに便宜を賜りました能村卓専務取締役、山際高典研究開発本部長、岡本英一技術研究所長、畠山孝宏開発企画部長、また、研究期間中の異動先におい

では、荒木秀文取締役兼経営企画室長、能村祐己取締役に心より感謝いたします。また、技術研究所 吉野達矢氏とは共に研究を進めてきたと同時に、様々なご助言をいただきました。心より感謝いたします。また、研究期間中に携わった、実測対象施設等の実測をサポートしてくださった多くの同僚、関係各位に感謝いたします。

皆様のおかげをもちまして、ようやく学位論文としてとりまとめるに至りました。今後、よりいっそうの取り組みに奮励し、社会への貢献を目指す所存です。

最後に、博士課程進学を快く受け入れ、長い学生生活を支え、共に頑張りながら、常に励まし続けてくれた家族に心より感謝致します。

本研究は梅干野研究室・浅輪研究室をはじめ、数多くの方々のご協力により遂行することができたものであり、その全ての方に改めて深くお礼申し上げます。

2013 年 2 月 親川 昭彦

付録

1	膜材の材料特性	付- 2
2	照明エネルギー消費量の計算例	付- 9
3	トレードオフ評価例	付-13
4	駅プラットフォームモデルにおける膜材の透過率の変化が 光・熱環境に及ぼす影響	付-14

1 膜材の材料特性

- ・複数枚重ねたときの光学特性の算出方法

図 1 に示すように膜材料が複数枚になった場合の総合透過率 $\bar{\tau}_i$ と総合吸収率 $\bar{\alpha}_i$ の算出式を示す。なお、透過率を τ_i 、反射率を ρ_i 、吸収率を α_i とする。ただし、 i は入射側から数えたときの膜材料の番号を意味する。

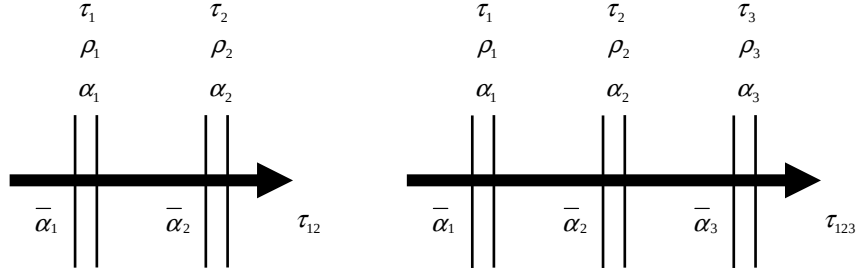


図 1 複数枚の場合の総合透過率と総合吸収率

中間に空気層を有する膜材料 2 枚の場合：

$$\begin{aligned}\tau_{12} &= \frac{\tau_1 \tau_2}{1 - \rho_1 \rho_2} \\ \bar{\alpha}_1 &= \alpha_1 \left(1 + \frac{\tau_1 \rho_2}{1 - \rho_1 \rho_2} \right) \quad \bar{\alpha}_2 = \frac{\tau_1 \alpha_2}{1 - \rho_1 \rho_2}\end{aligned}\quad (1)$$

中間に空気層を有する膜材料 3 枚の場合：

$$\begin{aligned}\tau_{123} &= \frac{\tau_1 \tau_2 \tau_3}{(1 - \rho_2 \rho_3)(1 - \rho_1 \rho_2) - \tau_2^2 \rho_1 \rho_3} \\ \bar{\alpha}_1 &= \alpha_1 \left\{ 1 + \frac{\tau_1 \rho_2 + \tau_1 \tau_2^2 \rho_3 - \tau_1 \rho_2^2 \rho_3}{(1 - \rho_2 \rho_3)(1 - \rho_1 \rho_2) - \tau_2^2 \rho_1 \rho_3} \right\} \\ \bar{\alpha}_2 &= \alpha_2 \left\{ \frac{\tau_1 - \tau_1 \rho_2 \rho_3 + \tau_1 \tau_2 \rho_3}{(1 - \rho_2 \rho_3)(1 - \rho_1 \rho_2) - \tau_2^2 \rho_1 \rho_3} \right\} \\ \bar{\alpha}_3 &= \alpha_3 \left\{ \frac{\tau_1 \tau_2}{(1 - \rho_2 \rho_3)(1 - \rho_1 \rho_2) - \tau_2^2 \rho_1 \rho_3} \right\}\end{aligned}\quad (2)$$

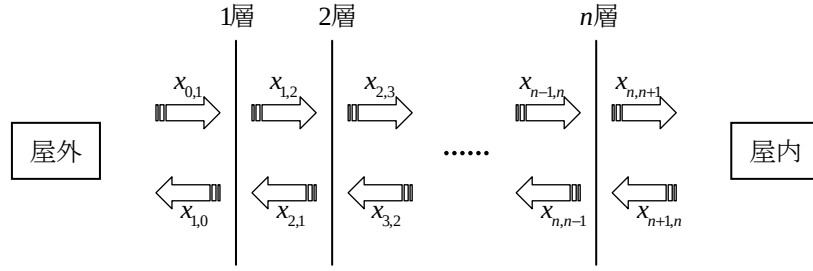


図 2 任意数枚の場合の総合透過率と総合吸収率

任意の枚数（ n 枚）の場合を考える。図 2 のように、 n 層の膜材料の各層間で光が授受され、定常状態となっているとする。図 2 に示すように、

- i 層から $i+1$ 層に入射する光: $x_{i,i+1}$
- $i+1$ 層から i 層に入射する光: $x_{i+1,i}$
- 屋外から 1 層に入射する光: $x_{0,1}$
- 1 層から屋外に放出される光: $x_{1,0}$
- n 層から屋内に入射する光: $x_{n,n+1}$
- 屋内から n 層に入射する光: $x_{n+1,n}$

とする。ここで、入射する光の量を J とすると、

$$x_{0,1} = J \quad (3)$$

である。また、屋内空間での反射は考慮しないので、

$$x_{n+1,n} = 0 \quad (4)$$

となる。 i 層の光に対する透過率、反射率、吸収率を、

- i 層の透過率: τ_i
- i 層の反射率: ρ_i
- i 層の吸収率: α_i

とすると、 $x_{i,i+1}$ は $x_{i-1,i}$ が i 層を透過する光と $x_{i+1,i}$ が i 層で反射される光の和なので、 $x_{i,i+1}$ は、

$$x_{i,i+1} = \tau_i \cdot x_{i-1,i} + \rho_i \cdot x_{i+1,i} \quad (i \neq 0) \quad (5)$$

のように表される。同様に、 $x_{i+1,i}$ も以下のように得られる。

$$x_{i+1,i} = \tau_{i+1} \cdot x_{i+2,i+1} + \rho_{i+1} \cdot x_{i,i+1} \quad (i \neq n) \quad (6)$$

(3)–(6)をまとめると、以下のような $x_{i,i+1}$ と $x_{i+1,i}$ についての連立方程式となる。ここで、(7)左辺の行列の、指定のない成分は0である。

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & & & 0 & & & \\ -\tau_1 & 1 & 0 & & & -\rho_1 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots & \\ & & -\tau_n & 1 & 0 & & & -\rho_n \\ -\rho_1 & & & 0 & 1 & -\tau_1 & & \\ & \ddots & & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & -\rho_n & & 0 & 1 & -\tau_n & \\ & & & 0 & & 0 & 1 & \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{0,1} \\ x_{1,2} \\ \vdots \\ x_{n,n+1} \\ x_{1,0} \\ \vdots \\ x_{n,n-1} \\ x_{n+1,n} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} J \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

(3.1.7)を解くと、 $x_{i,i+1}$ と $x_{i+1,i}$ が求められる。

複層膜材料全体での総合透過率、総合反射率、総合吸収率は、

$$\text{総合透過率: } \bar{\tau} = \frac{x_{n,n+1}}{x_{0,1}} \quad (8)$$

$$\text{総合反射率: } \bar{\rho} = \frac{x_{1,0}}{x_{0,1}} \quad (9)$$

$$\text{総合吸収率: } \bar{\alpha} = 1 - (\tau_0 + \rho_0) = 1 - \left(\frac{x_{n,n+1}}{x_{0,1}} + \frac{x_{1,0}}{x_{0,1}} \right) \quad (10)$$

である。また、 i 層での吸収率は、以下の式により得られる。

$$i \text{ 層での吸収率: } \bar{\alpha}_i = \frac{\alpha_i \cdot x_{i-1,i} + \alpha_i \cdot x_{i+1,i}}{x_{0,1}} \quad (11)$$

・熱特性

膜構造の熱に関する特性として、熱伝導率、表面熱伝抵抗、熱コンダクタンスがある。

1) 熱伝導率

材料 A の熱伝導率を測定した結果を表 1 に示す。

表 1 熱伝導率

材料名	熱伝導率 W/(mK)
A	0.0575

測定機器：丸型サーモラボ II

表 2 に膜材料および一般的な材料の熱伝導率を示す。

表 2 熱伝導率

材料	熱伝導率 W/(mK)
膜材料(厚さ 0.5～1.1mm)	0.07～1.20
普通コンクリート $P^{7.2)P}$	1.3
板ガラス $P^{7.2)P}$	0.78

2) 熱貫流率

熱貫流率 U [W/($m^2 \cdot K$)] は式 12 により算出する。

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_j \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{c_a} + \frac{1}{\alpha_o}} \quad (12)$$

$\alpha_i = 1/R_{si}$: 室内側熱伝達率 [W/($m^2 \cdot K$)]

$\alpha_o = 1/R_{se}$: 室外側熱伝達率 [W/($m^2 \cdot K$)]

λ_j : j 番目の材料の熱伝導率 [W/($m \cdot K$)]

δ_j : j 番目の材料の厚さ [W/ $m \cdot K$]

c_a : 空気層の熱コンダクタンス [W/($m^2 \cdot K$)]

なお、SI 単位系で表示した熱貫流率は U 値と呼ばれる場合がある。一方で、従来の単位系で示した熱貫流率を K 値 [$\text{kcal}/(\text{m}^2\text{K})$] と呼ぶ。この K 値と U 値の対応は次式の通りである。

$$U = 1.163K \quad (K = 0.86U) \tag{13}$$

・表面熱伝達抵抗

室内側および室外側熱伝達抵抗（熱伝達率の逆数）はその膜材料表面位置における風速に依存する。ISO 6946 : 1996（JIS A 2101 : 2003）において、室内側および室外側熱伝達抵抗推奨値（表 3）が示されている。なお、この表面熱伝達抵抗は平らな表面で放射率が 0.9 の材料を対象としている。

表 3 において、それぞれの熱流方向に対応する表面熱伝達抵抗を示しているが、一般的には水平熱流の値を代表値として用いることが推奨されている。厳密に計算する場合は、熱流方向に応じて表 3 に示す値を使用する。ただし、熱流方向が水平と見なせるのは、熱流方向が水平面に対して $\pm 30^\circ$ までとなっている。

表 3 表面熱伝達抵抗 [$\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$] P7.1)P

表面熱伝達抵抗	熱流方向			放射率
	上向き	水平	下向き	
R_{si} (室内側)	0.10	0.13	0.17	0.9
R_{se} (室外側)	0.04	0.04	0.04	

備考：表 3 の値は設計値である。構成要素の熱貫流率の宣言及び熱流方向に依存しない値が要求される場合には、水平熱流の値を用いることが望ましい P7.1)P。

・熱コンダクタンス

空気層の熱コンダクタンス c_a は空気層の密閉度、空気層の厚さ、空気層に接する膜材料の表面特性に依存する。熱コンダクタンスを表 4 に示す。なお、熱コンダクタンスは文献の値を用いる。

空気層の熱抵抗 R_a は空気層の熱コンダクタンス c_a の逆数である。

表 4 空気層の熱コンダクタンスと熱抵抗

密閉度	面 I	面 II	熱コンダクタンス $c_a [W / m^2 \cdot K]$	熱抵抗 $R_a [m^2 \cdot K / W]$
密閉	樹脂面	樹脂面	4.76	0.21

- ・ 日射熱取得率（日射進入率），日射熱除去率，日射遮蔽係数
日射熱取得率（日射進入率） η は次式によって算出する。

膜材料 1 枚の場合

$$\eta = \tau + \frac{R_{se}}{R - R_1} a \quad (14)$$

膜材料 2 枚（空気層 1 層）の場合

$$\eta = \tau_{12} + \frac{R_{se}}{R - R_1} a_1 + \frac{R_{se} + R_1 + R_{a1}}{R - R_2} a_2 \quad (15)$$

膜材料 3 枚（空気層 2 層）の場合

$$\eta = \tau_{123} + \frac{R_{se}}{R - R_1} a_1 + \frac{R_{se} + R_1 + R_{a1}}{R - R_2} a_2 + \frac{R_{se} + R_1 + R_{a1} + R_2 + R_{a2}}{R - R_3} a_3 \quad (16)$$

n 枚（ $n \geq 2$ ，空気層 $n-1$ 層）の場合

$$\eta = \bar{\tau} + \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{R_{se} + \sum_{j=1}^{i-1} (R_j + R_{aj})}{R - R_i} \cdot \bar{\alpha}_i \right\} \quad (17)$$

ここに，

R_j : j 番目の膜材料の熱伝導抵抗（ $= \delta_j / \lambda_j$ ）

R_{ak} : k 番目の空気層の熱抵抗

日射熱除去率は 1 から日射熱取得率（日射進入率） η を差し引いた値である。

日射遮蔽係数 SC は次式から求める

$$SC = \frac{\tau + \frac{R_{se}}{R - R_1} a}{\eta_0} \quad (18)$$

$$\eta_0 = \tau_0 + \frac{R_{se}}{R_0 - R_{01}} a_0 \quad (19)$$

ここに,

η_0 : 基準とする材料の日射熱取得率 (日射進入率)

τ_0, a_0 : 基準とする材料の日射透過率, 日射吸収率

R_0 : 基準とする材料の熱貫流率

R_{01} : 基準とする材料の熱伝導抵抗

2 照明エネルギー消費量の計算例

トレードオフ評価の目的関数の1つである「照明エネルギー消費量」の計算方法について述べる。

本研究における照明エネルギー消費量は、評価期間の代表日において、対象範囲全ての照明点灯時間と照明器具の消費電力を掛け合わせ計算する。

照明点灯時間は、光環境シミュレーション結果の昼光照度分布図より、照明点灯の制約条件により判断し、照明のスケジューリングを作成する。尚、建築用途や建物の運用条件などによっては、安全性等の理由により制約条件を満足して消灯する条件のところを点灯することも考えられる。ここでは制約条件を基にスケジューリングをする。

制約条件

たとえば JIS 照明基準の商業施設より照度が 1,000lx 以上、均斉度は想定で 0.4 以上とする。また、隣り合う照度差の大きい場合は、照度基準を満足していたとしても、バランスよく点灯する。

照明モードの設定

照明モードとは、ある設定時間の昼光の状況に応じて、電気照明を点灯したり、消灯したり、調光する照明パターンのことを示す。この照明モードを具体的に設定することで照明エネルギーを定量的に示すことが可能になる。たとえば、第2章の実測モデルでは、照明の平面配置図（図2）に対し、

- | | |
|-------------------|-------------|
| ① 電気照明を全く使用しないモード | (数字の 0 で表現) |
| ② 電気照明をフル点灯するモード | (数字の 1 で表現) |

の2種類の照明モードを設定する。

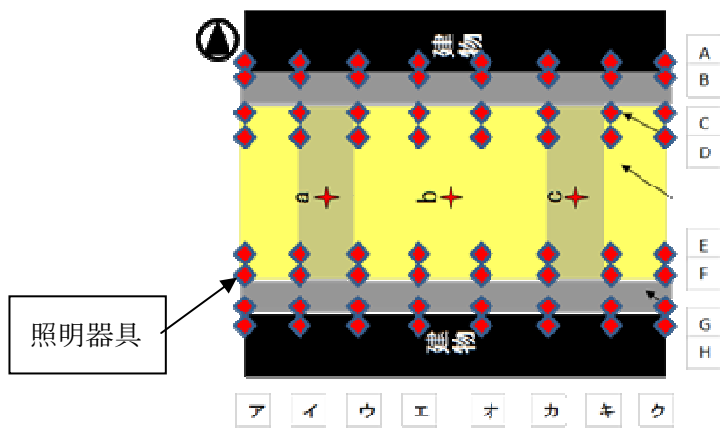


図2 照明モードの設定と照度分布図



図3 照明スケジューリングの設定例

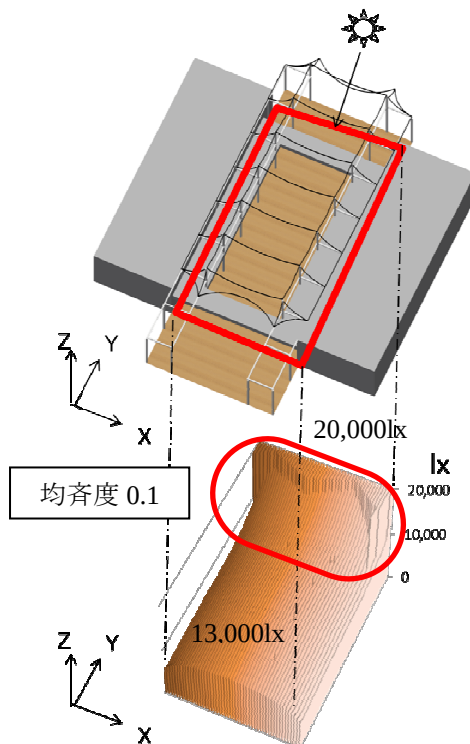


図4 照明分布図 (15時)

照明スケジューリング

季節や時刻、天候などの気象データや統計データを利用し、推定することにより、評価期間の照明スケジュールとして、季節毎、天候毎に割り付ける。以下に作成手順を示す。

- 1) 季節の代表日として、春夏秋冬のそれぞれの晴天日と曇天日の気象データを設定する。
- 2) 気象統計データより、各月あたりの晴天日率を設定する。晴天日以外は、すべて曇天日とする。
- 3) 設定した代表日の気象条件に対し、本予測ツールに昼光照度を計算し、24 時間分の昼光照度分布を出力する。また、膜下評価空間の昼光照度の最大値・最小値を把握する。
- 4) 膜下評価空間の均斉度を計算し、昼光照度環境の均斉度合いを把握する。
- 5) 各時刻に対し、昼光照度の最小値と均斉度の基準を上待っているか確認し、スケジュールリング表（図 3）を作成する。
 - ・基準を上まった場合、照明モードを 0 とする
 - ・基準を下回った場合、照明モードを 1 とする
 - ・隣り合う照明配置間で照度差が大きい場所については、照明モードの設定理由を明確にし、0 または 1 を設定する
- 6) 5) を季節毎、天候毎に計算し、評価期間の照明モード・スケジュールリングとして表を作成する。

照明設備の設定

照明設備は、市販のカatalog等を参考に消費電力量を設定する。

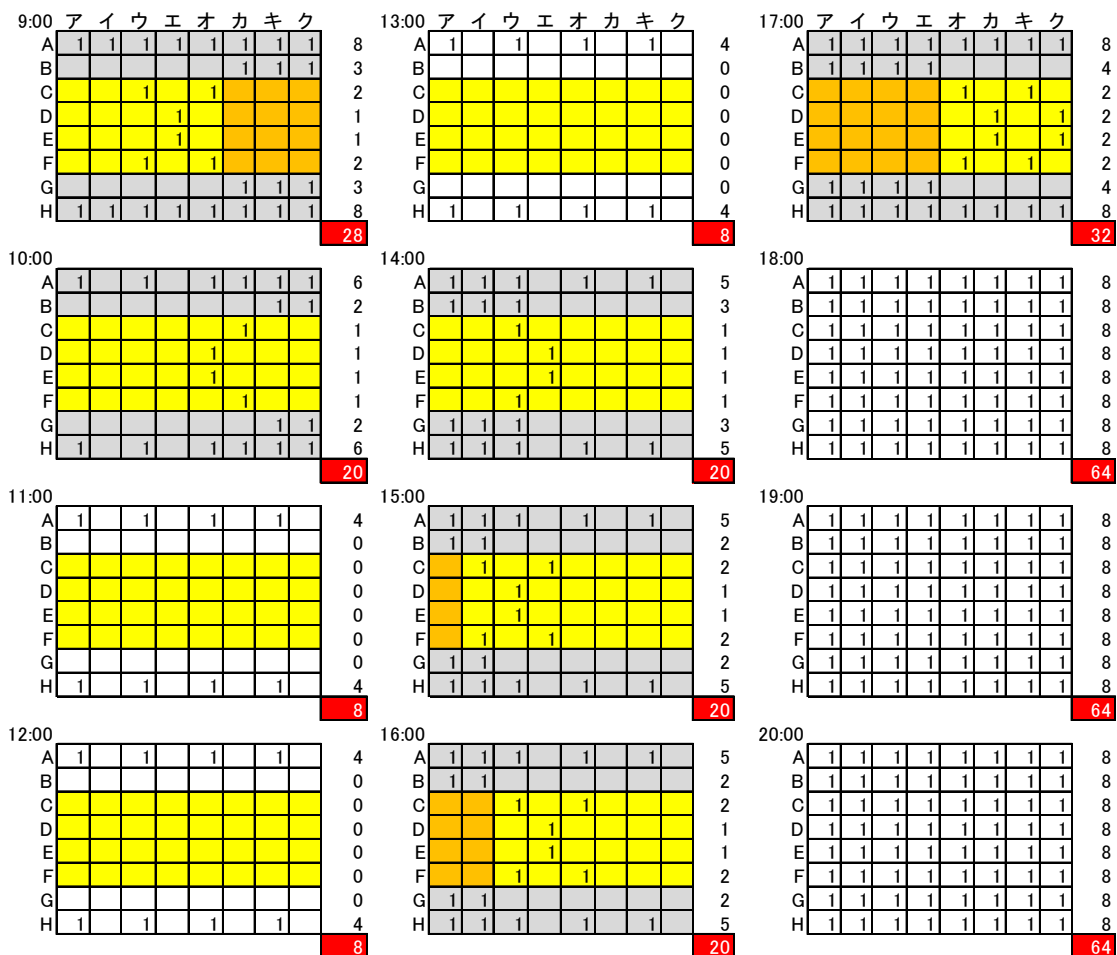
ランプワット数	FHF32W
器具全光束	8,878 lm
消費電力	92 W
エネルギー消費効率	96.5 lm/W
ランプ全光束	9,900 lm



たとえば9時における照度分布図（図4）より、照明スケジュールリングを設定する。

・透過率 30%：9時～20時

30%



透過率：30%，10%，0%の照明エネルギー消費量の3ヶ月の積算値

集計	30%	10%	0%
9:00	28	26	56
10:00	20	28	64
11:00	8	28	64
12:00	8	28	64
13:00	8	28	64
14:00	20	28	64
15:00	20	28	60
16:00	20	24	52
17:00	32	48	64
18:00	64	64	64
19:00	64	64	64
20:00	64	64	64

合計	356	458	744	点灯時間/日
×90日	32,040	41,220	66,960	点灯時間/3ヶ月

3 トレードオフ評価例

第2章の計算モデルを例に、膜材の透過率を最大で30%、最少で0%とし、10%との関係をレーダーチャートで示す。

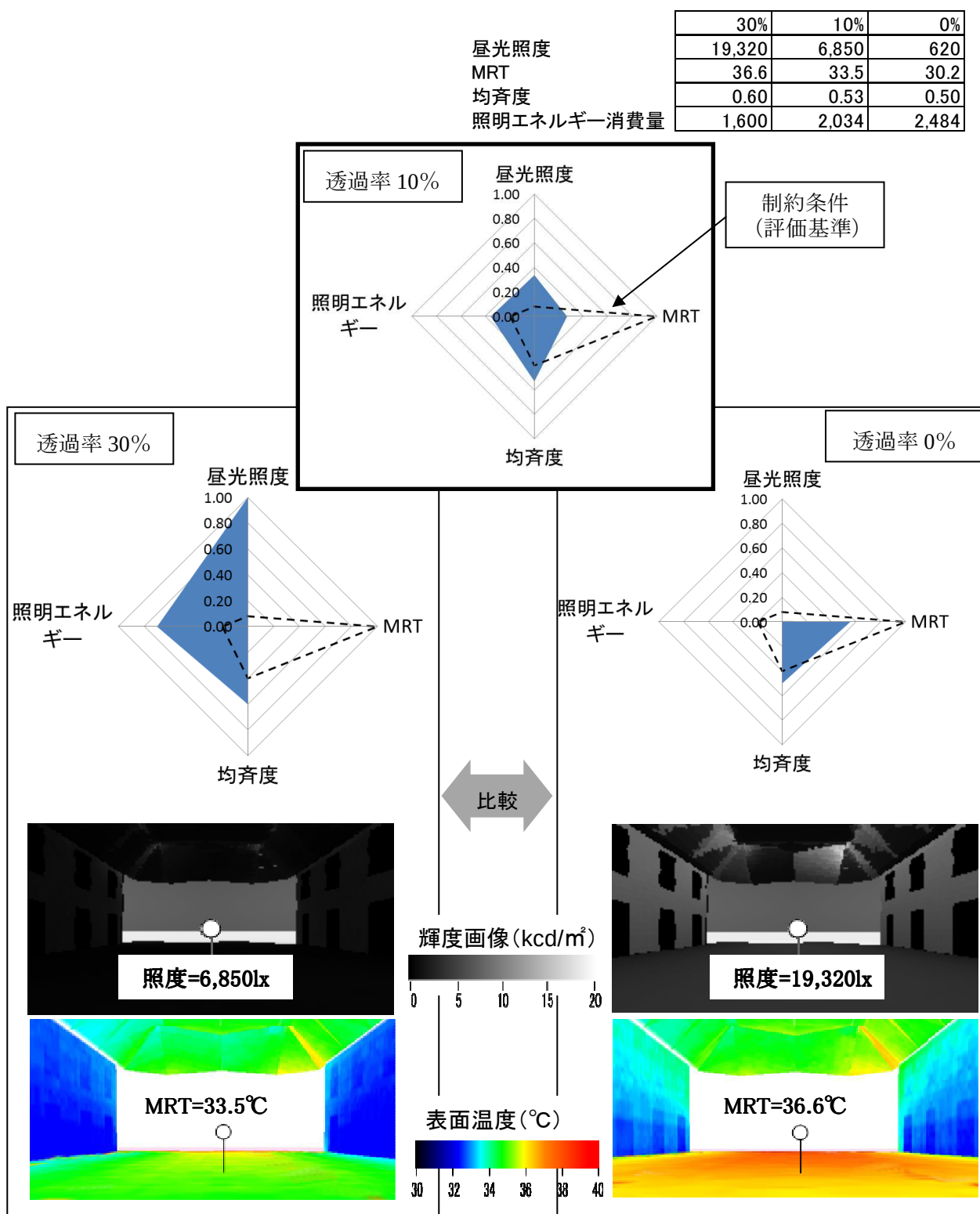
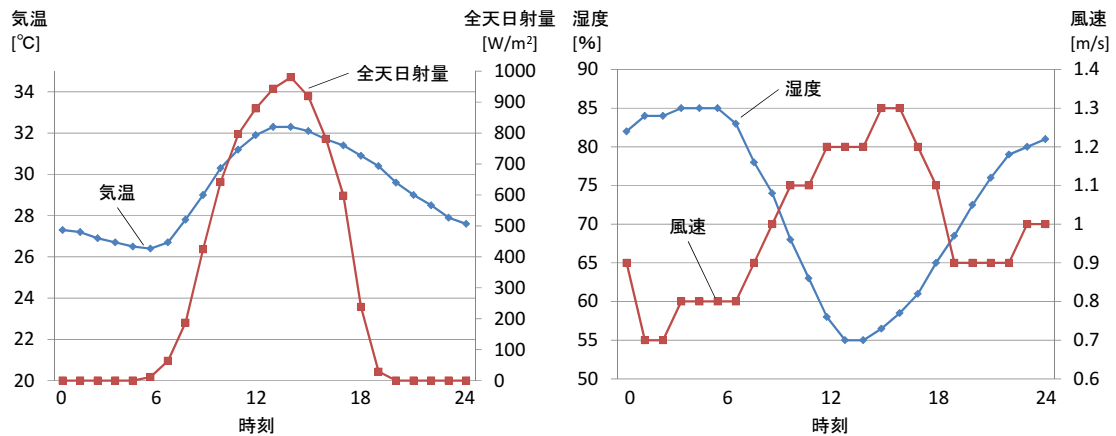


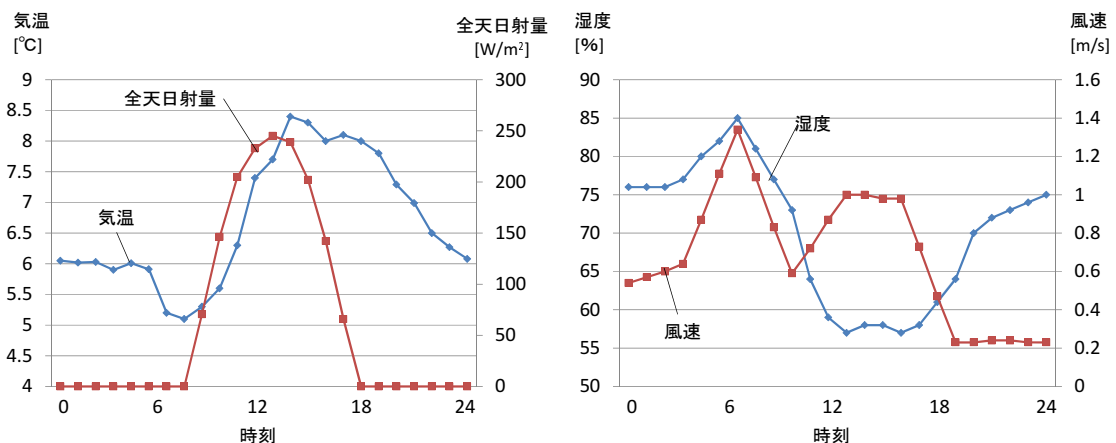
図5 トレードオフ評価例

4 駅プラットホームモデルにおける膜材の透過率の変化が光・熱環境に及ぼす影響

第5章の駅プラットホームの設計計画の中で、膜材の透過率が膜下空間の光・熱環境にどの程度影響するかを知る上での知見をまとめておくに設計判断に役に立つ。そのため膜屋根に囲まれた空間を想定し、南北軸・北東軸・東西軸・南東軸の4つの方角に軸を持つモデルで計算を行い、モデル変更の設計資料としてまとめた。尚、計算で用いる気象条件は、空気調和・衛生工學方式による東京の気象データから、夏季の晴天日として2000年8月5日、冬至の曇天日として2002年12月22日を用いた。



東京夏季晴天日気象条件(2000年8月5日)



東京冬至曇天日気象条件(2002年12月22日)

図6 気象データ

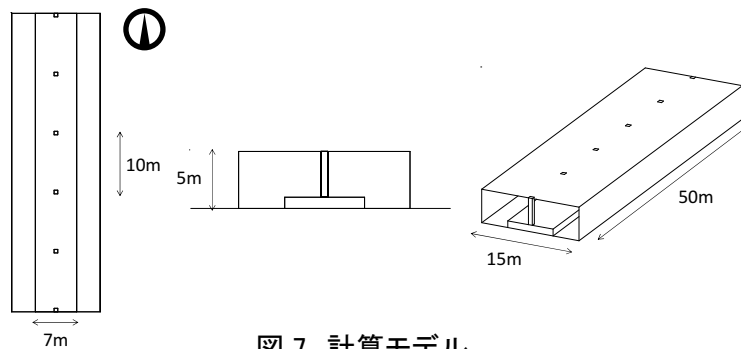


図 7 計算モデル

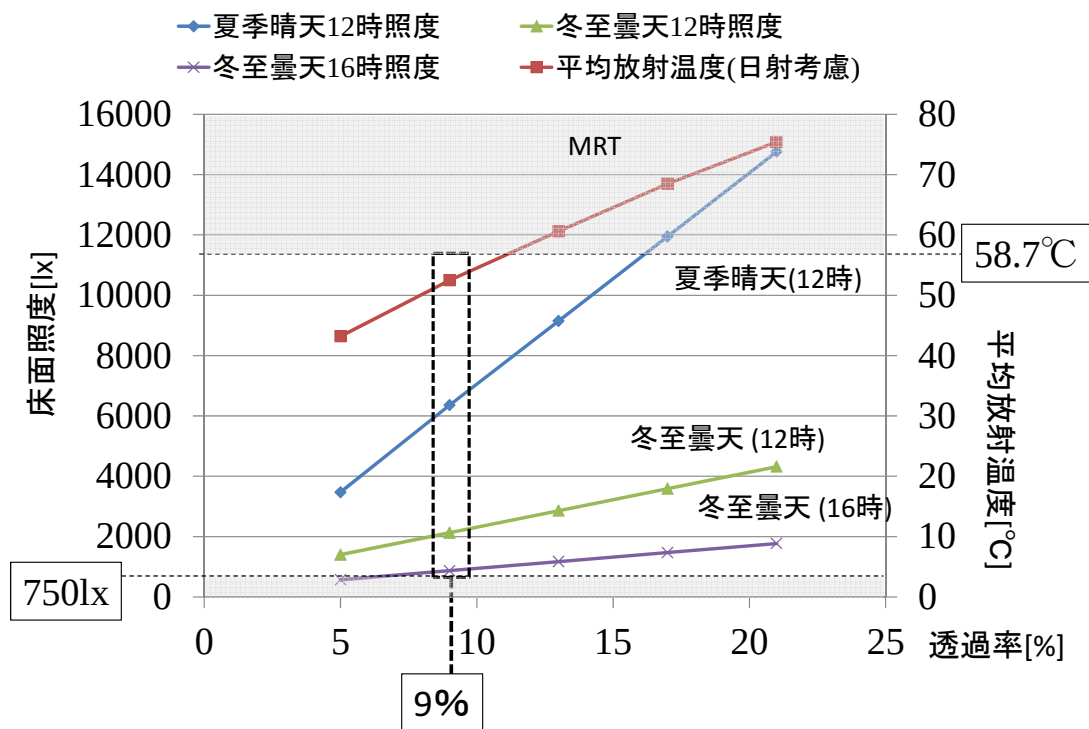
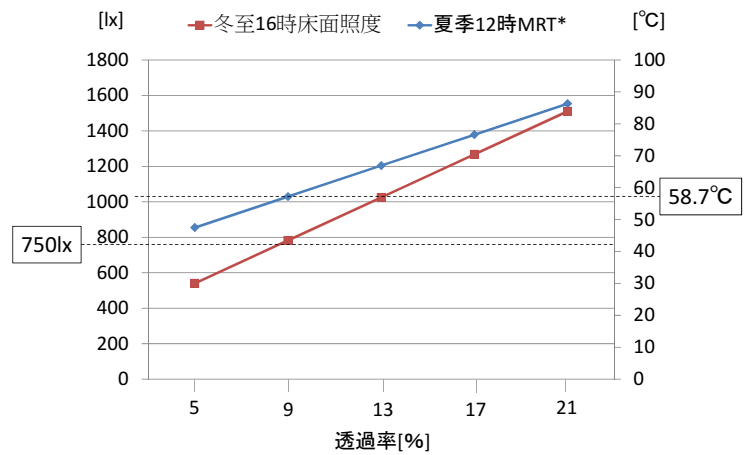
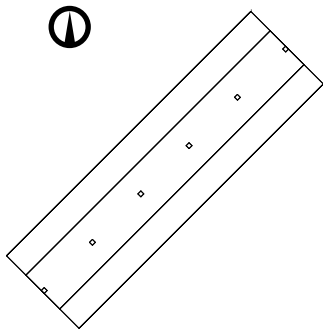
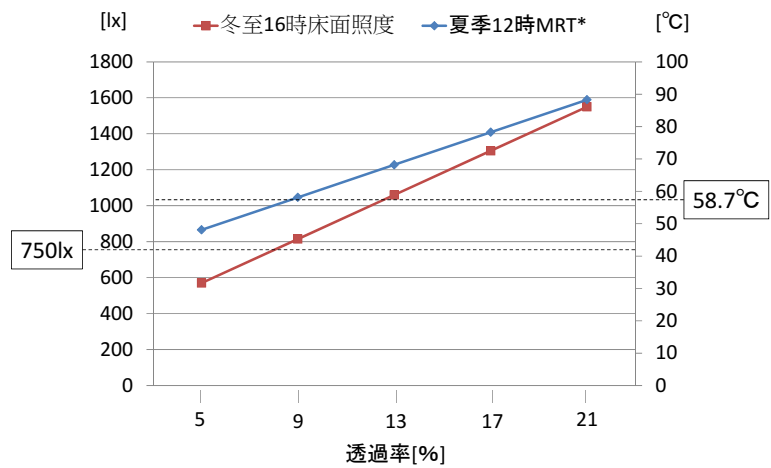
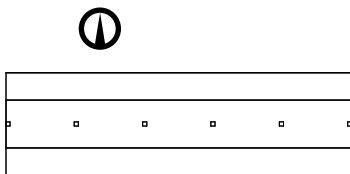


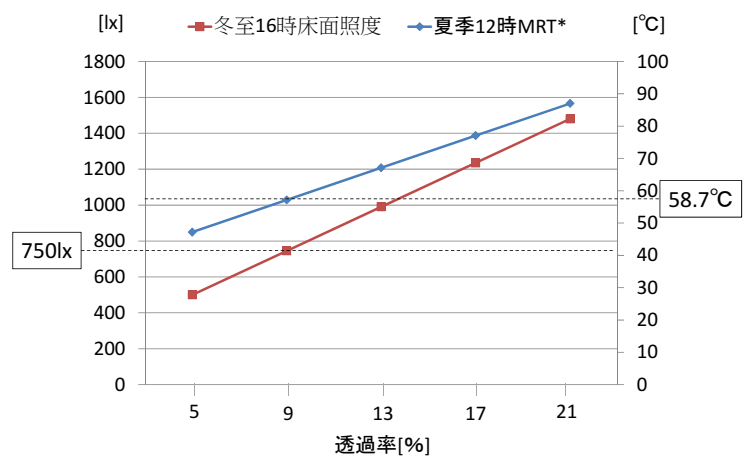
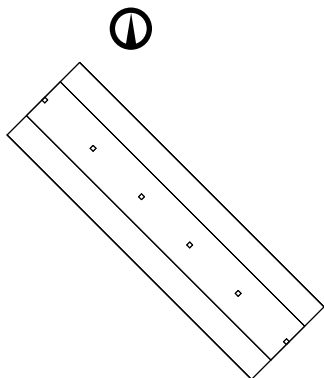
図 8 膜材による平均放射温度と床面照度への影響比較



夏季 12 時 MRT*と冬至 16 時床面照度



夏季 12 時 MRT*と冬至 16 時床面照度



夏季 12 時 MRT*と冬至 16 時床面照度

図 9 膜材による平均放射温度と床面照度への影響比較