

# EXPO2025 大阪・関西万博

## ガスパビリオン おばけワンダーランド

本提案は、設計・施工・運用の各フェーズにおいて環境シミュレーションを活用し、設計過程で生じたプラン変更や、設計時には想定されていなかった事象への対応手法を体系的に示すものである。万博という特殊かつ流動的な条件下において、設計期間の短さや周辺建物情報の未確定といった制約の中、環境性能を確保しつつ、柔軟かつ迅速に対応した設計事例である。

通常は公表されることのない設計上の判断や現場対応の実態も含めて紹介することで、環境技術の応用力と設計の可能性を示している。

仮設建築における実践的知見の共有を目的としつつ、一般建築にも通じる内容となっている。また、設計の流れを簡潔に把握できる構成とすることで、設計を志す学生のみならず、一般の読者にも理解・関心を持たれる内容としている。



**2025年大阪・関西万博**は、「いのち輝く未来社会のデザイン」をテーマに、持続可能性と技術革新を融合させた国際博覧会である。仮設建築や環境性能の実証を通じて、未来の都市・建築のあり方を提示する場として、国内外から注目を集め開催中である。



建築主：一般社団法人日本ガス協会(JGA)  
主用途：展示場  
所在地：大阪市此花区夢洲万博会場内  
敷地面積：2,126.26㎡  
規模：延べ1,557.77㎡(+2F)  
最高高さ：GL+17.57m  
最大収容人数：160人  
工期：2023.11-2024.10

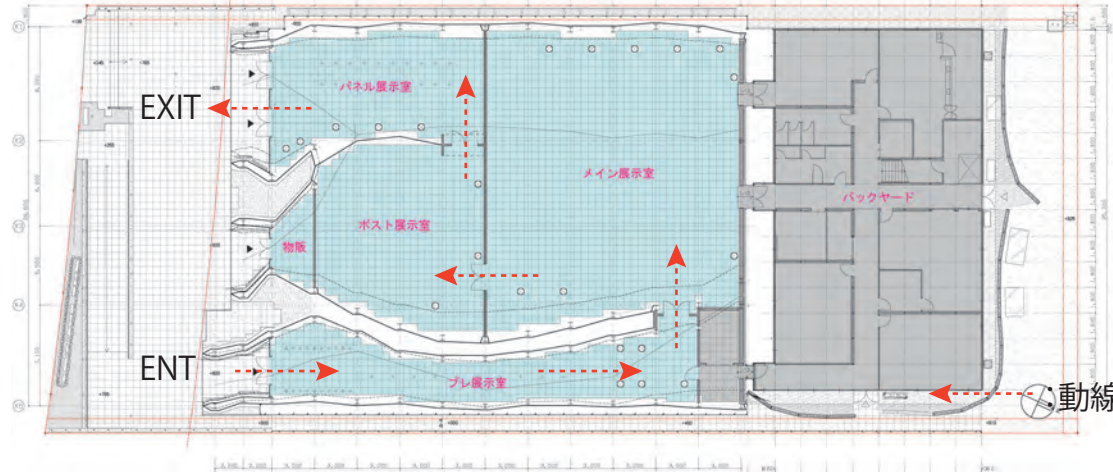


### 建物概要

ガスパビリオン「おばけワンダーランド」は、三角形断面の膜構造建築であり、ガスの炎の形状をモチーフとした外観を特徴とする。放射冷却膜「SPACECOOL」やリース鉄骨構造を採用し、CO<sub>2</sub>削減と3R (Reduce・Reuse・Recycle) を徹底した仮設建築である。

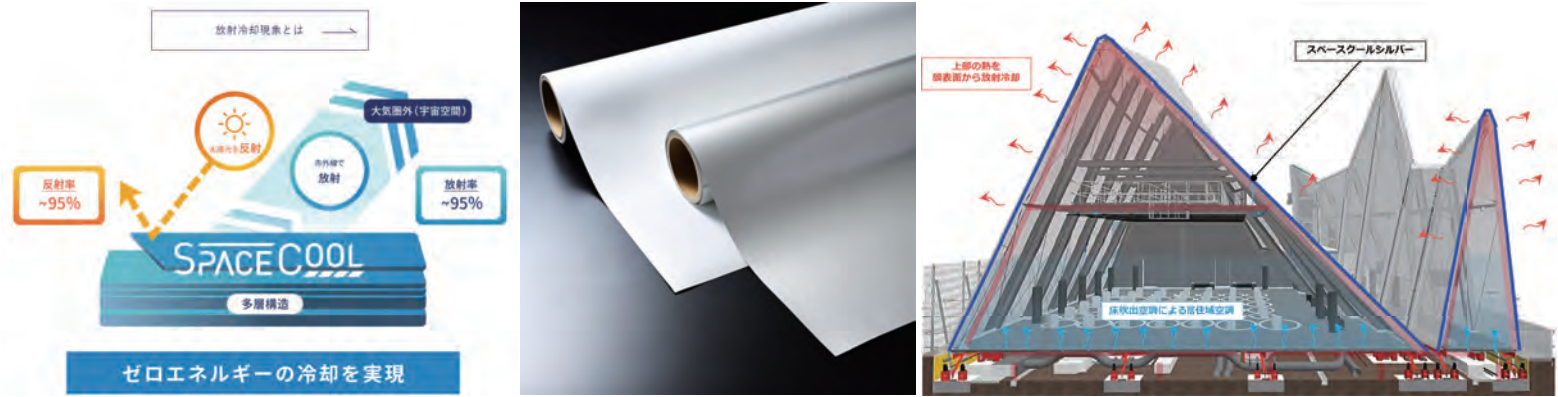
### 平面計画

三角形断面の建物形状とし、パビリオン内外を膜材一枚で区切ることで、膜の性能を最大限活用。建物上部から熱を効率的に排出するとともに、床吹出しの居住域空調方式との併用により、省材料・省エネルギーでパビリオンならではの特徴的な大空間を実現した



### 新規放射冷却膜材「SPACE COOL」の採用

この放射冷却素材は、世界最高レベルの反射率および放射率（いずれも最大約95%）を誇り、優れた冷却性能を発揮。さらに、屋外での耐候性にも優れており、10年以上にわたってその効果を維持することが可能。素材はしなやかな光学フィルムで構成されており、さまざまな用途に柔軟に施工・適用することができる。

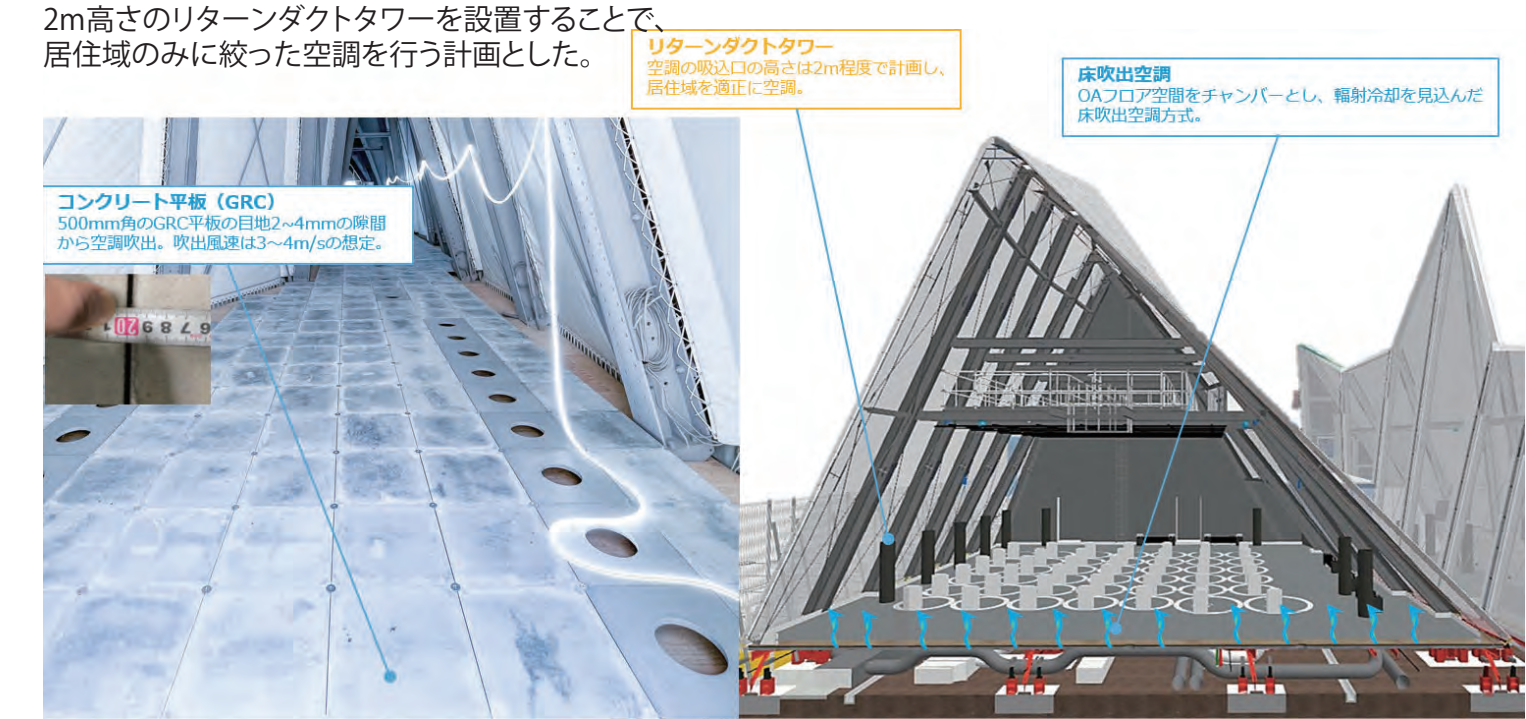


### 空調システム

床吹出空調方式：OAフロア空間をチャンバーとして利用し、GRC平板（500mm角）の隙間（2～4mm）から風速3～4m/sで空調を吹出。輻射冷却効果も考慮した。

リターンダクトタワー：高さ2mの吸入口を設置し、居住域の空調を最適化。

GRCパネルの活用：床材の隙間を空調吹出口として活用し、意匠性と機能性を両立。

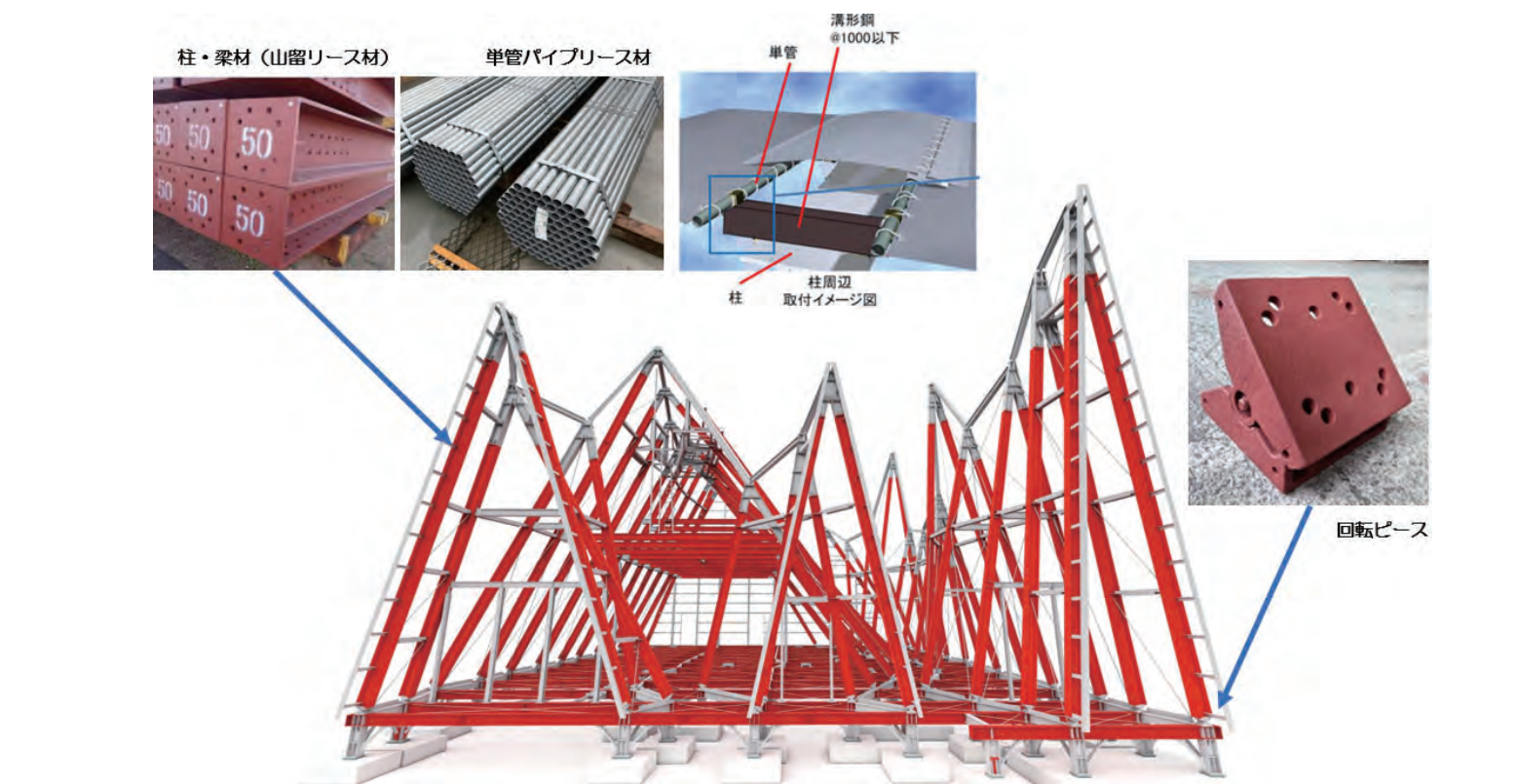


### 構造システム

リース鉄骨を活用した外装構造により、柱の傾きを調整して山脈のような外観を創出。

膜材のディテールで配線を隠し、省材料で洗練された内部空間を実現。

施工・開催・解体の各段階でCO<sub>2</sub>排出を削減し、膜材と鋼材は簡単に再利用可能。



3Rを徹底追求した持続可能なパビリオン

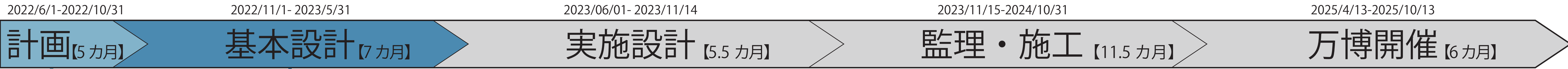


# 環境シミュレーションの試み

**万博開催決定直後の計画案において**、風環境の検討をいち早く開始した。埋立地特有の気候条件を考慮し、国交省の大阪湾水質定点観測データを用いて卓越風・風速・海水温を分析した。

設計当初は幾何学模様を基調とした計画であったが、**基本設計フェーズ**では万博の象徴である大屋根リングの計画が決定し、本施設はその外側に配置されることとなった。

万博特有の高さ制限(12m以下と20m以下)を満たしつつ床面積と空間体験を両立するため、三角形断面の形状を採用した。この形状は敷地の奥行きを強調し、非日常的な空間とガス火のイメージを表現する意匠的效果を有している。省エネルギー性を高めるため、局所空調の導入を提案し、居住域の快適性と空調効率の両立を図った。放射冷却膜の採用や3Rへの配慮も、基本設計段階で明確に方向付けられている。



## 気象分析

本敷地は埋立地であることから、万博会場は海上風の影響を受けやすいと推察される。このため、周辺海域における風向データの収集および解析を実施した。

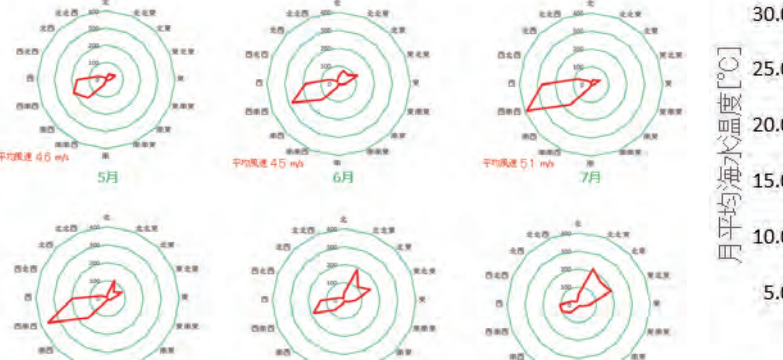


決定当時イメージ

分析データは、大阪湾における水質定点自動観測データを基にしている。万博開催期間である5月から10月にかけては、西南西の卓越風が吹いていることが確認された。また、海水利用の観点から水温を分析した結果、水深マイナス5メートルにおける水温は16～25℃の範囲で推移していた。



国土交通省 大阪湾水質定点自動観測データ配信システム 淀川河口

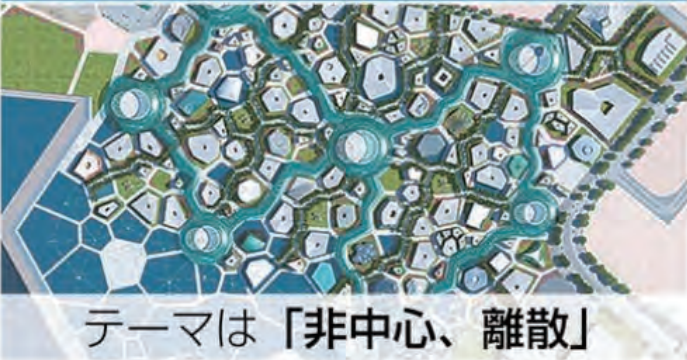


2016-18年平均  
開催期間中の海水温度(～5m) は16～25℃

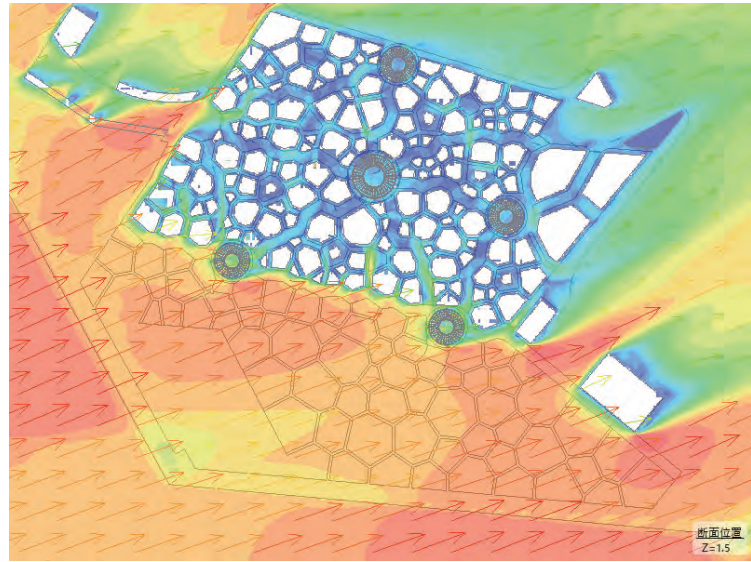
## 風シミュレーション

期間中に卓越風として観測された西南西の風に対し、会場内の風環境シミュレーションを実施した。その結果、海上では強風が吹く状況であっても、当時の建築配置計画により、敷地内では一定程度の風速低減効果が認められた。

大阪・関西万博 会場案の変遷  
経済産業省が2019年に示した当初案



テーマは「非中心、離散」



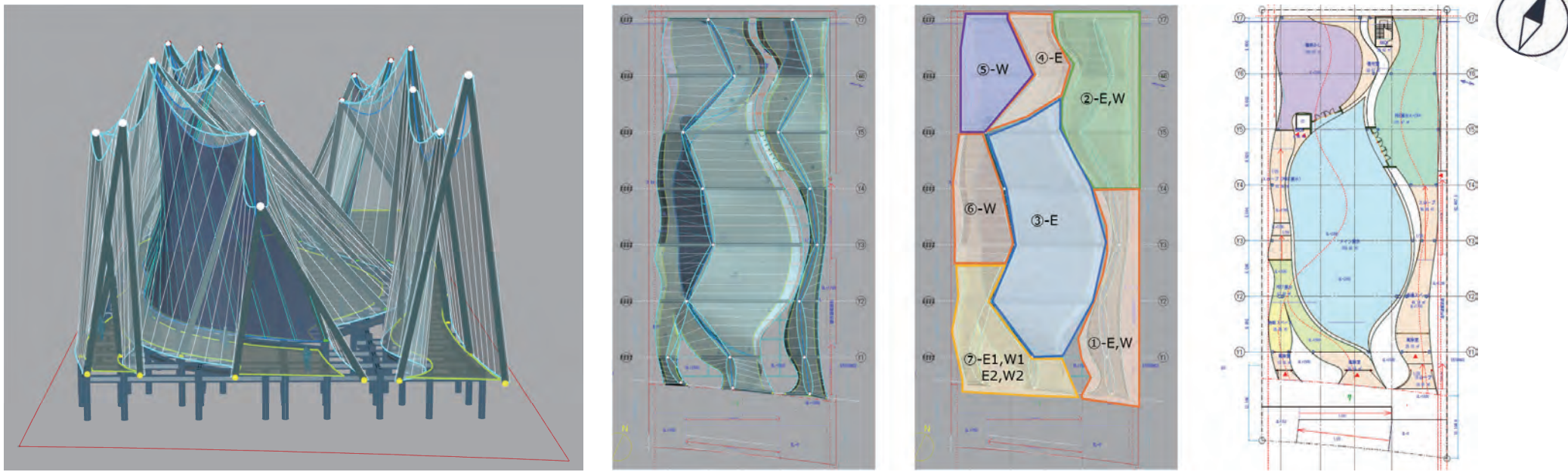
卓越風による風速分布図



デザインの理念  
「多様でありながら、ひとつ」

## 日射シミュレーション 1

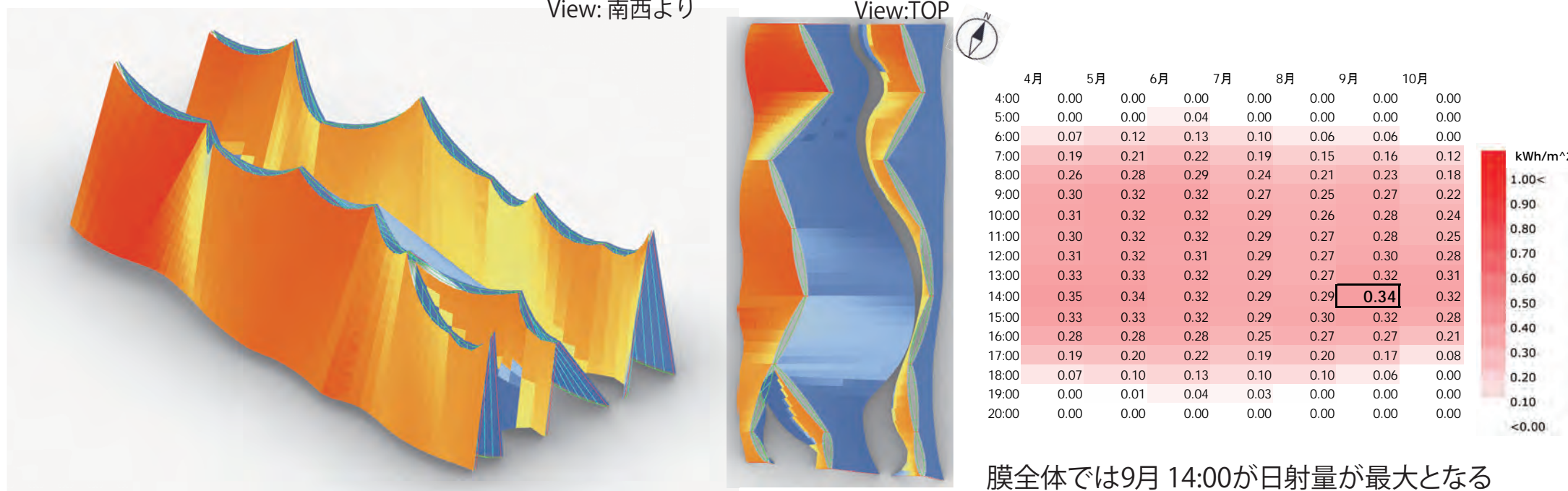
万博の開催期間 4月～10月において、膜面に対してどれ程の受熱量(表面にあたる日射量)があるか、シミュレーションで確認した。プランから7つのゾーンに分けて、各ゾーンの外皮となる部分の膜の、期間中の代表日の日射量を解析。傾斜のある三角形の膜エリアを1～7までに分けて、各エリアの膜屋根のピーク日射量を算出、隣棟パビリオンなしでは、東側のエリアは6月AM、中央エリアは6月お昼くらい、西側のエリアは9月午後建物全体は9月午後となった。隣棟パビリオンありでは、東側のエリアは9月PM、中央エリアは6月お昼くらい、西側のエリアは9月午後建物全体は5月午後となった。



### ●膜全体 ピーク時刻 日射シミュレーション

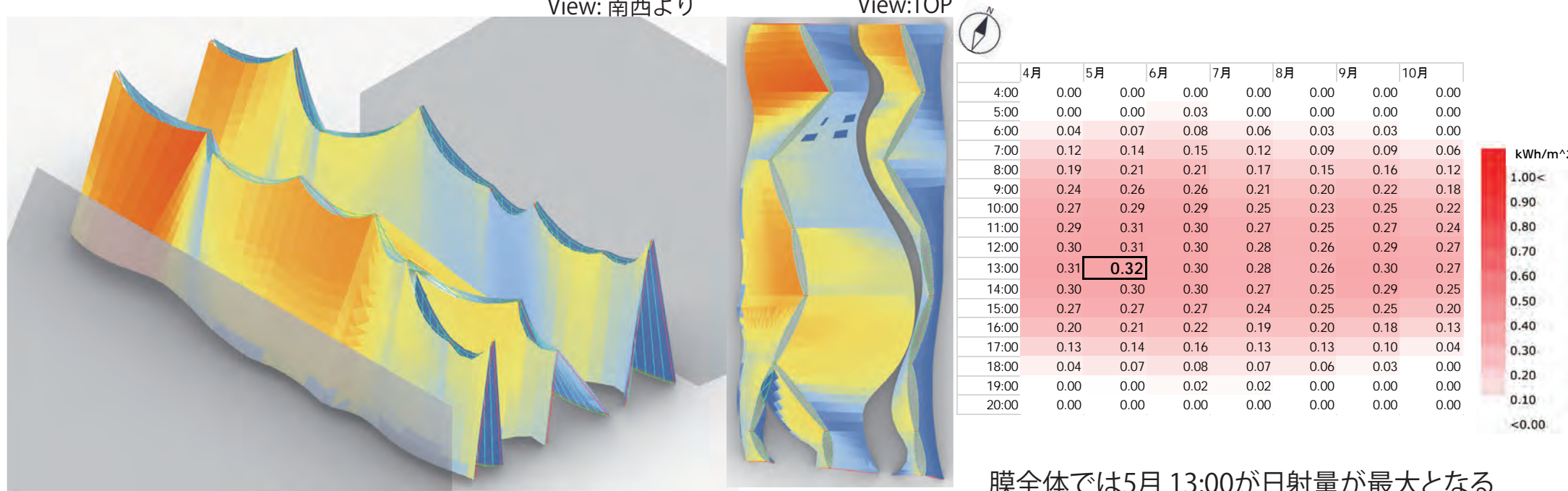
設計初期段階ではシミュレーション時では隣棟パビリオンの情報も少ない中で、ある程度の建物/形状を再現し、現実に近い日照シミュレーションを行った。

#### 【隣棟パビリオンなし】



膜全体では9月 14:00が日射量が最大となる

#### 【隣棟パビリオンあり】



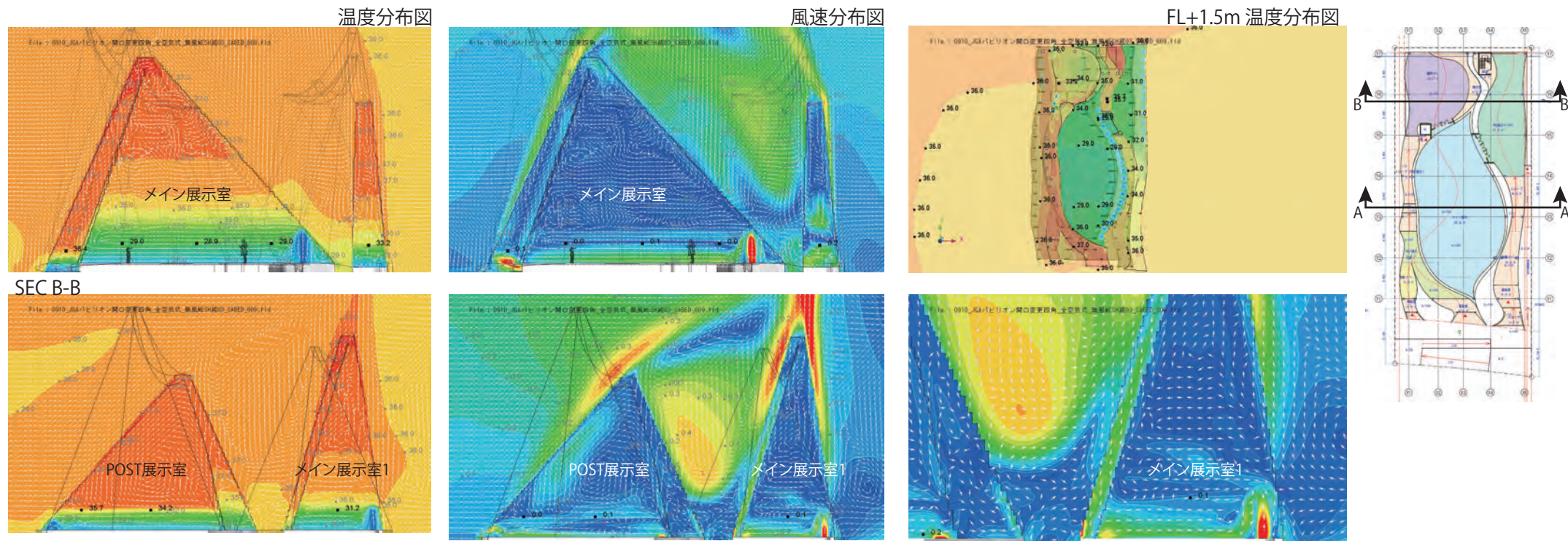
膜全体では5月 13:00が日射量が最大となる

## 温熱環境シミュレーション 1

### ●空調システム

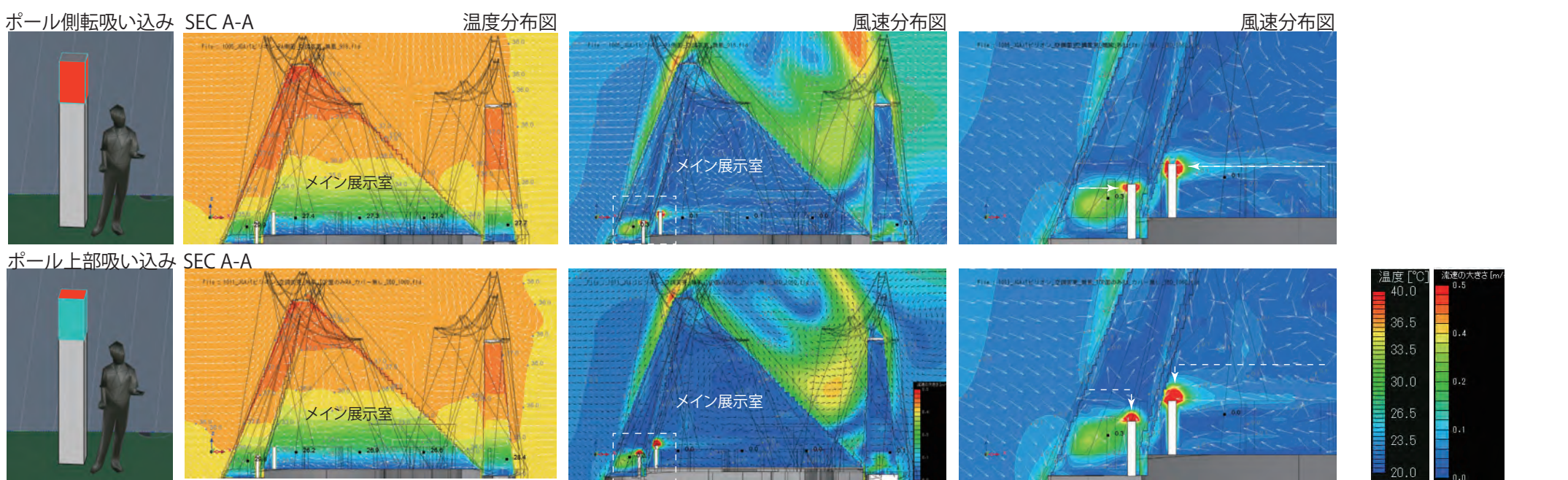
#### A. 全空気式床放射空調(床吹き床吸い込み)

足元でショートサーキットの発生が見られた。吹出温度20.8℃の冷気の流れが足元付近で吸い込まれます(吸込み時温度約26℃) その為人の頭高さは30℃近くの室温となる。床吹き床吸い込みでは、温熱環境的にも空調能力が足りていない結果となった。



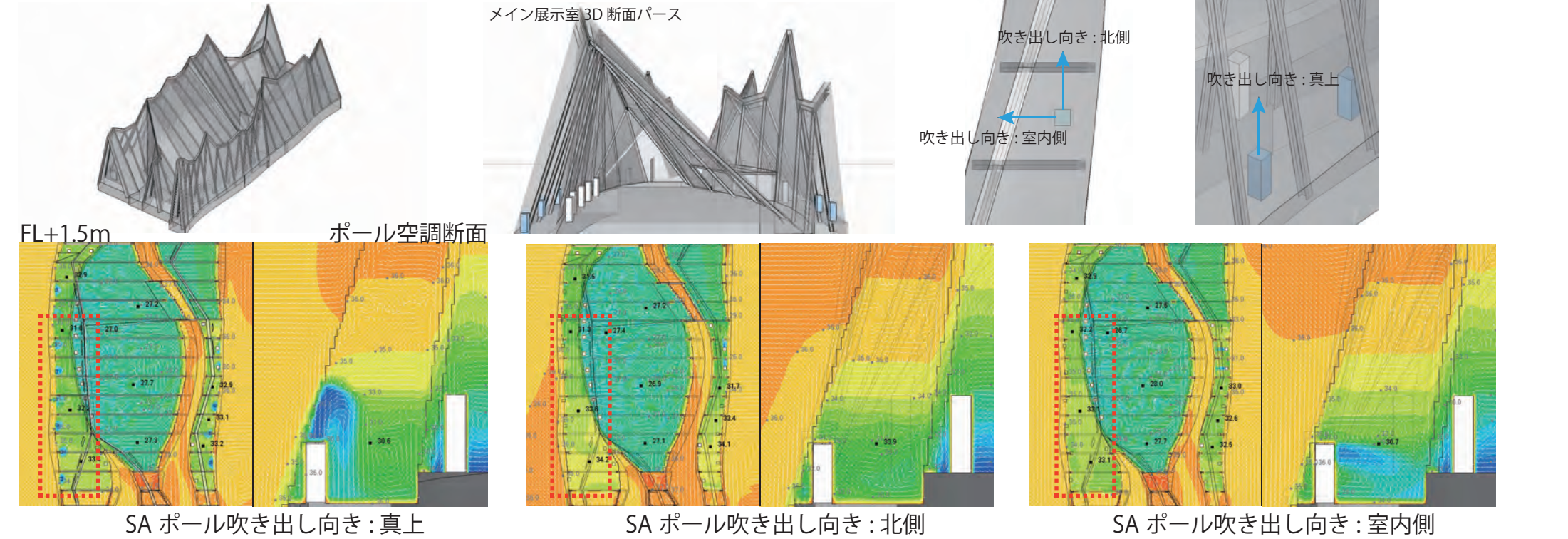
#### B. ポール空調(床吹きポール吸い込み)

足元でショートサーキット改善案としてより高い位置でRAを行う様ポール空調で検討を行った。RAに対してはポール側面から吸い込むパターンとポールTOPから吸い込むパターンの比較解析を行った。より高いポール高さ2m、人の頭上部付近で吸い込む計画とした。



#### C. SA ポール空調 吹き出し方向の検討

プレ展示室1、ポスト展示室2の温熱環境を改善する為、給気もポール型とし高い位置から吹き出す案も検討した。その際のポールからの吹き出す向きについて、「真上」、「北側」、「室内側」の3ケースを検討した。より高い位置で給気することでショートサーキットを避け、居住域高さの室内温度を下げる効果を確認したがより歩行空間確保する為、SAは床吹きで計画する方針とした。

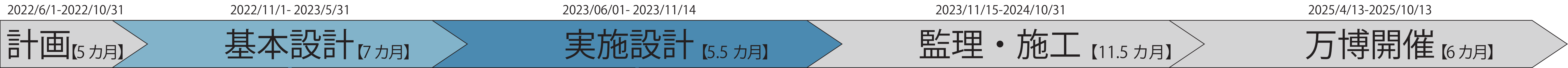
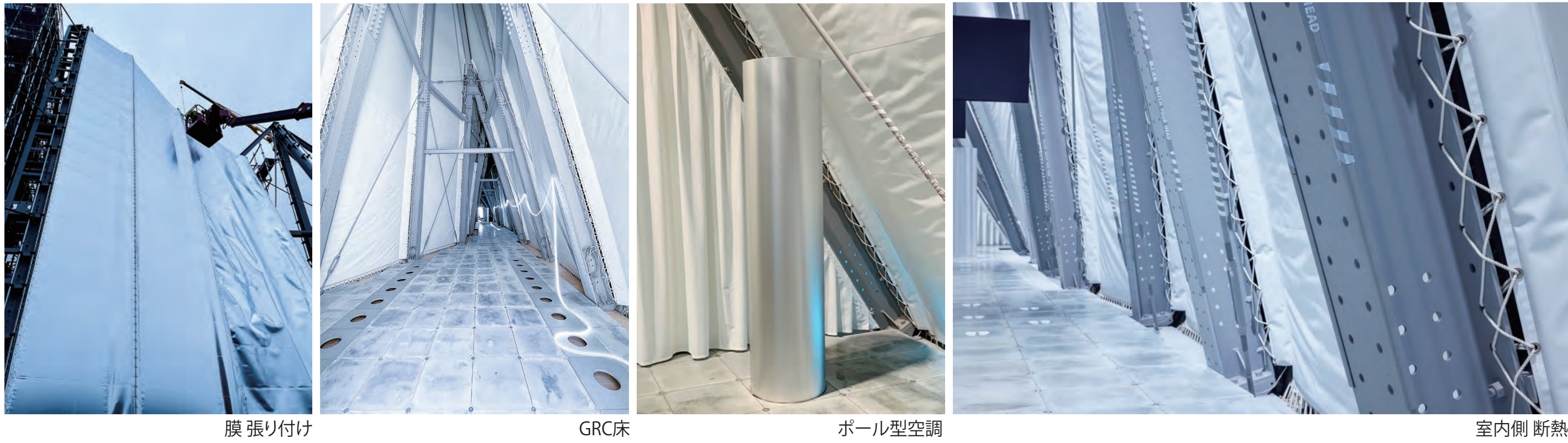




# 環境シミュレーションの試み

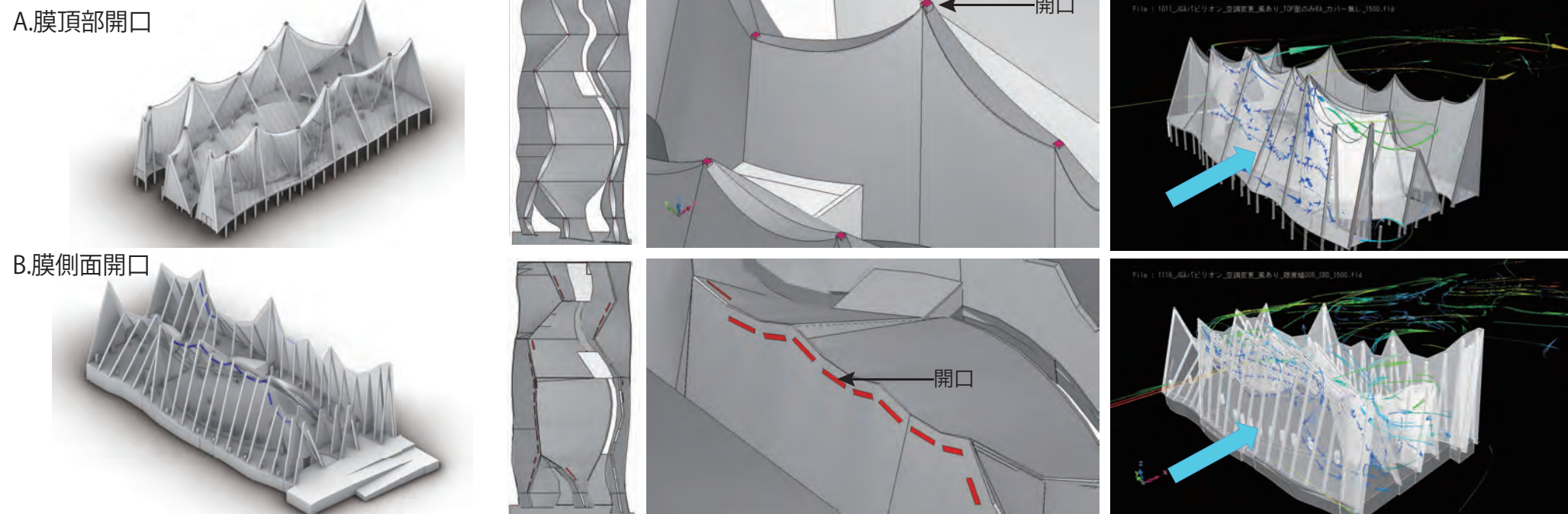
実施設計フェーズでは、空調システムの詳細化に伴い、温熱環境シミュレーションを再実施した。

コスト制約によるプラン変更に対応し、快適性を確保するための設計検証を行った。展示内容と来館者動線の確定により自然換気を中止し、解析範囲を絞ることで設計への迅速なフィードバックを実現した。温熱環境の評価には、単なる温度ではなく、活動量・着衣量・気流などを考慮したSET\* (Standard Effective Temperature)を導入し、より実態に即した快適性評価を行った。日射・温熱環境の再解析を通じて、設計精度と環境性能の両立を図った。仮設建築でありながら、精緻な環境設計を実現するための技術的工夫が随所に施されている。



## ●自然換気+空調

パビリオンの三角形状を利用して頂部から熱抜きを考慮した空調+自然換気の検討を行った。開口は山となる頂部のパターンと膜側面に開口を開ける2パターン



開口：膜頂部のパターンでは外部風に引っ張られTOP開口から排気する傾向が見られた  
開口：膜側面のパターンでは、計画上、風上側に開口を設けるため、室内に屋外の熱風の流入傾向が見られた

## 【Value Engineering対応】

実施設計段階において、万博パビリオン特有の建設コスト上昇により、当初計画の見直しを迫られた。これに伴い、以下の設計条件変更を行い、環境性能と空調計画の再検討を実施した。

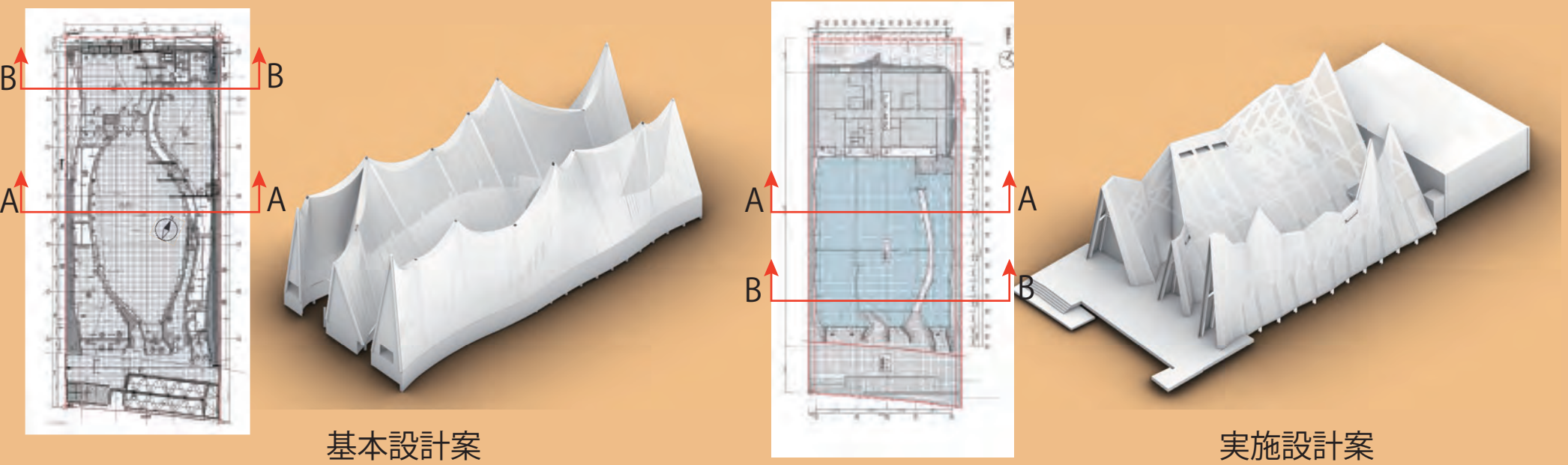
- 建築面積の縮小により、裏方部分の膜構造を廃止
- コスト削減による膜構造 二重膜からシングル膜へ変更したことで居住域高さFL+4m範囲の断熱性能を上げる膜構造とした
- 空調システムを再構築し、床吹き出し+ファンによる性能向上を図った
- 展示内容の確定により自然換気を不採用とした
- 猛暑を想定し、設定外気温を引き上げた
- 温熱環境評価指標をPMVからSET\*へ変更

## 【建物プランの見直し】

実施設計フェーズに入る段階で入札を行い施工者を決定する際、建設業界全体での急激な物価上昇により、展示室を2/3まで圧縮、加えてバックヤードをプレファブ化することで大幅な減額変更を行った。

## プラン変更

実施設計フェーズに入り、コスト削減を考慮したプラン変更を行った。パビリオン配置を見直し、運営側待機室をバックヤードとして北側に計画し膜形状、架工計画の変更も行った。

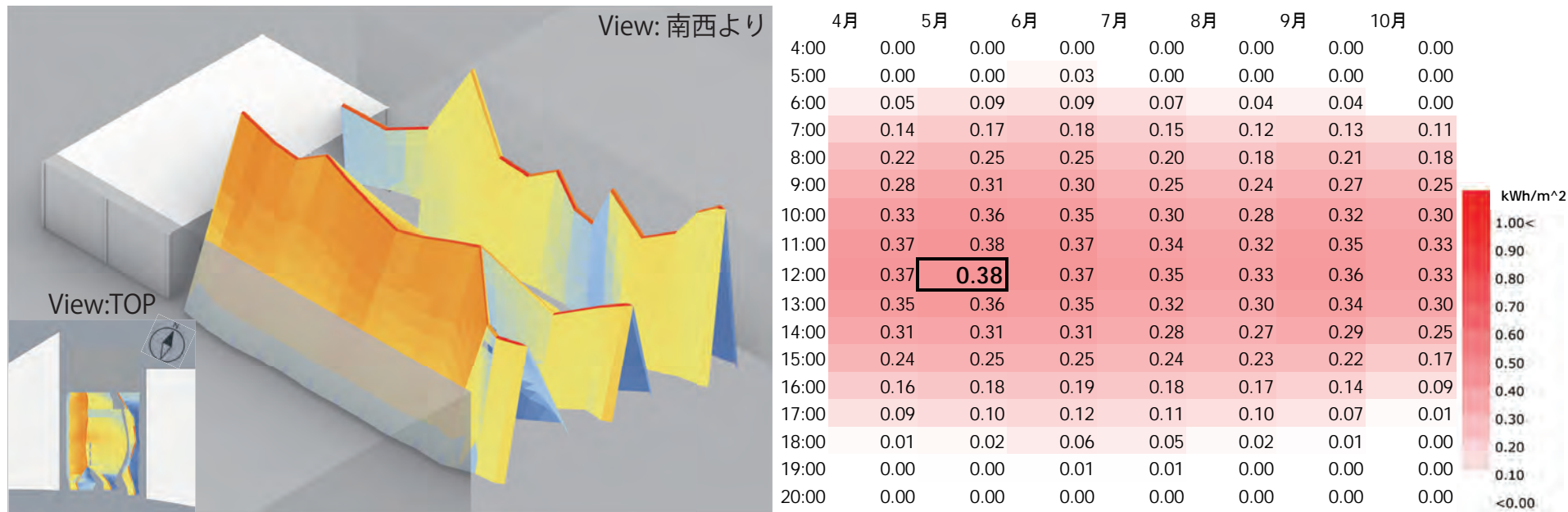


\*断面キープランはCFD結果の断面図に対応

## 日射シミュレーション 2

建物設計の深度化によりヴォリュームが縮小された為、膜屋根の日射量シミュレーションを再度行った。初期検討と比較し、周辺建物の有無による影響も評価した結果、いずれのケースでも午後に西面の膜屋根が高い日射量を受けることとなった。この結果からも特に西側に計画されているメイン展示室の温熱環境には配慮が必要となった。

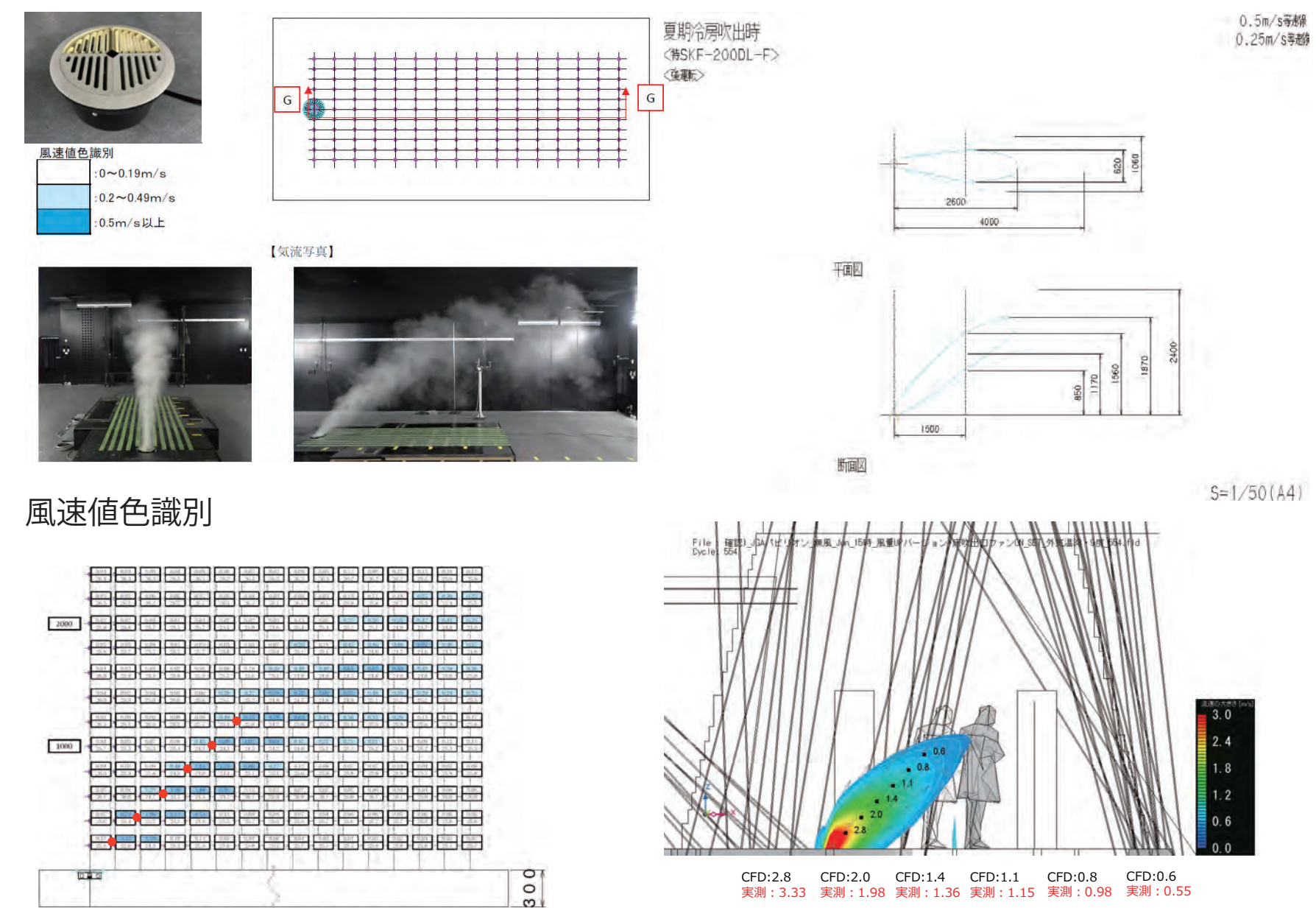
【隣棟パビリオンあり】



## 温熱環境シミュレーション 2

### ●空調システム(床吹き出し)の実測とCFD比較検討

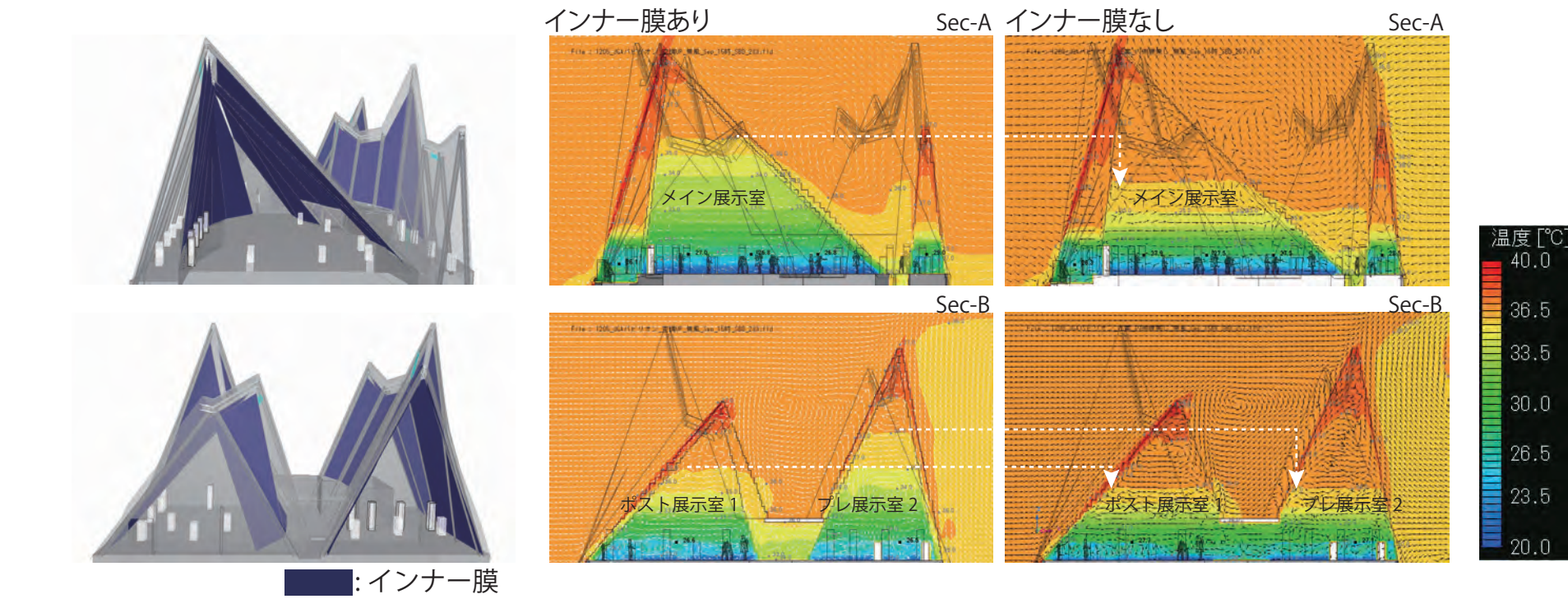
CFDで設定した一方向床吹き出しの気流表現が実測値と大差がないか数値、風速分布で気流の再現性を確認した。



CFDでは吹き出し口近傍の初速が実測より弱く、到達距離も短くなっている。これは実物のファン開口の粗密がCFDで再現できず、単純な四角形開口で設定しているため勢いが不足していることが原因と考えられるが、高さ別の実測値とCFDの結果は概ね近い再現性であることを確認した。

### ●膜の仕様：VE/CDによる二重膜 有り無し 検討

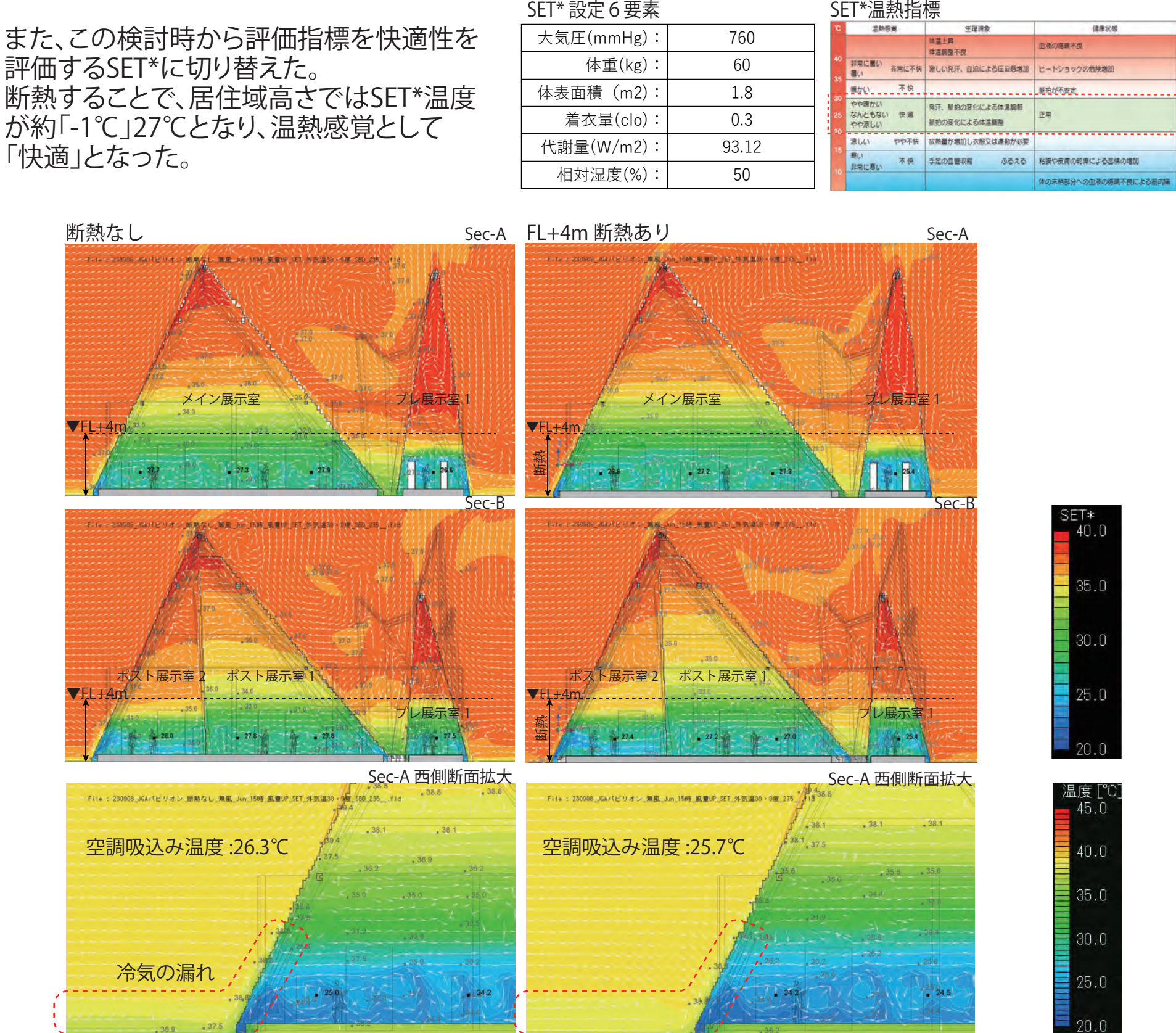
設計も後半に入り、コスト削減案を検討しました。二重膜から室内側の膜をなくしたシングル膜としても、室内の温熱環境的に快適性を確保できるか、室内側の膜のあり/なしを比較検討した。



膜頂部の熱溜まりは低下してくるものの、居住域空調エリアまで、多大な影響がないと判断し、内側膜は無くす方針とした。

### ●膜の仕様：VE案での断熱効果の検討

外皮膜の高い熱還率率により、居住域で冷却された空気が外部へ流出する傾向が確認された。これに対し、膜構造の低いレベルに断熱処理を施す計画とし、シミュレーションにより断熱の有無による室内温熱環境への影響を比較検討した。





# 環境シミュレーションの試み

**施工・監理フェーズでは**、開発中の膜材「SPACECOOL」の高い反射率により、周辺への影響を検討する必要が生じた。短期間施工という制約の中、反射シミュレーション・実験・実測を迅速に実施し、適切な対策を講じた。運用フェーズでは、温熱環境や空調負荷の実測を通じて設計時の検証を行った。スタッフの快適性向上を目的に、給気温度の調整やサーキュレーターの併用など、環境に応じた柔軟な対応が図られた。来館者は屋外からの入館により快適性を感じやすい一方で、長時間滞在するスタッフには、きめ細やかな配慮がなされている。

また、特殊膜の性能を簡易に検証するため、特殊膜製の日傘と通常の日傘の比較実験も実施し、膜材の効果を示した。



## 【反射光への配慮と対応】

外装膜に採用したSPACECOOLは、太陽光を反射しつつ、地表の熱を赤外線として宇宙へ放出する放射冷却技術を応用した素材である。設計時は反射の影響は想定していなかったが、太陽の位置によっては隣接パビリオンの来館者に反射光が届く可能性が判明した。周辺情報が不明な中でも、環境への配慮を行うため、現地での反射光の実測、3Dシミュレーションによる影響評価、膜表面への塗装による反射率低減の実験と検証を迅速に行った。

## 【日射負荷の再評価と空調対応】

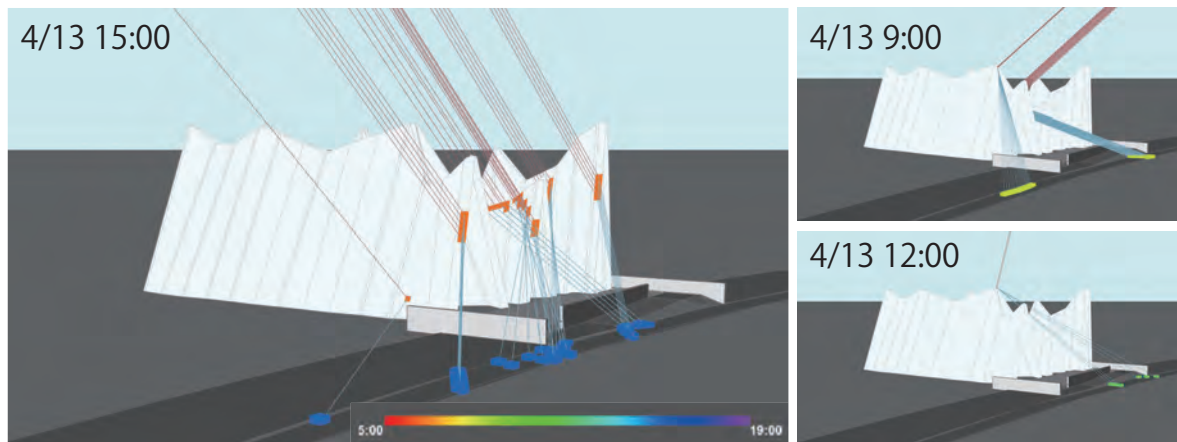
設計段階では、外装膜が受ける日射量を解析したが、周辺建物の情報が未確定だったため、仮想ボリュームを用いたシミュレーションを実施した。現場で周辺状況が判明した後、放射環境を考慮した再シミュレーションを行い、設計時の想定値との差異を検証した。近年の猛暑を踏まえ、日射負荷の増加による空調性能への影響も念のため確認した。

## 膜の反射シミュレーション

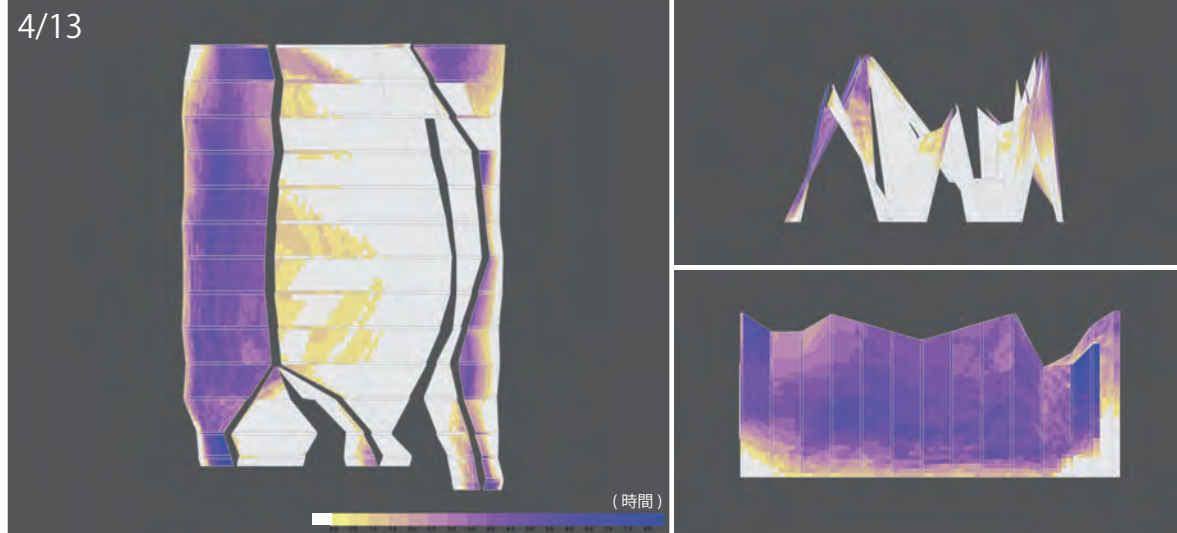
SPACECOOL が反射する太陽光は、その入射角度によって空に反射する場合と地面に反射する場合がある。現場段階ではどの季節・時刻にどの方向に反射していくかをシミュレーションによって明らかにすることで、周辺への影響の可能性のある屋根面には反射対策を行うこととした。

万博会期期間における時刻毎の膜屋根の反射光のうち敷地周辺（空を除く）に反射する反射光の方向と反射元の膜位置を特定し、その影響度とともに下図のように示した。この検討により、反射防止の対処が必要な最小限の範囲とすることができた。

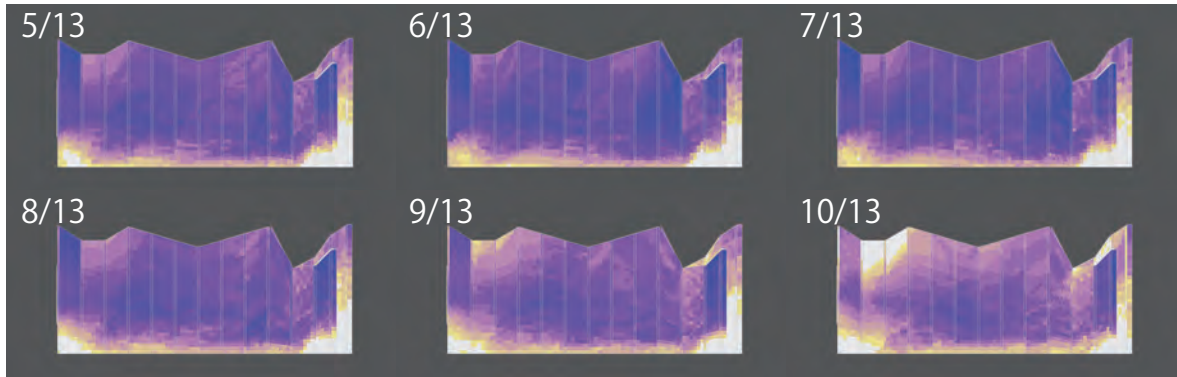
また、現場段階において、シミュレーションの傾向が実態と一致することも現地を確認しながら検討を進めた。



ベクトル検討による時刻ごとの反射光シミュレーション



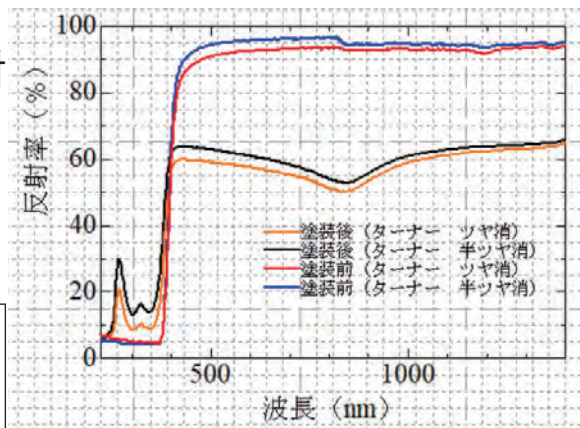
膜屋根の各部分が周辺に反射している累積時間の可視化



## 反射実験

外装材に採用されたSPACECOOLは正反射成分が高い素材である。他パビリオンや歩行者への影響も考慮し、つや消し塗装を施すことより正反射成分を低下させる検討を行った。塗装前後の素材の反射率を計測することで、つや消し塗装により正反射成分を十分に低下させることが分かった。

反射率、放射率共に、各色のグラフは下記の試料に対応しています。  
緑：塗装後（ターナー半ツヤ消/シルバー塗装/ターナー半ツヤ消/膜材300G）  
赤：塗装後（ターナー半ツヤ消/シルバー塗装/ターナー半ツヤ消/膜材300G）  
青：塗装前（ターナー半ツヤ消/膜材300G）  
黄：塗装前（ターナー半ツヤ消/膜材300G）



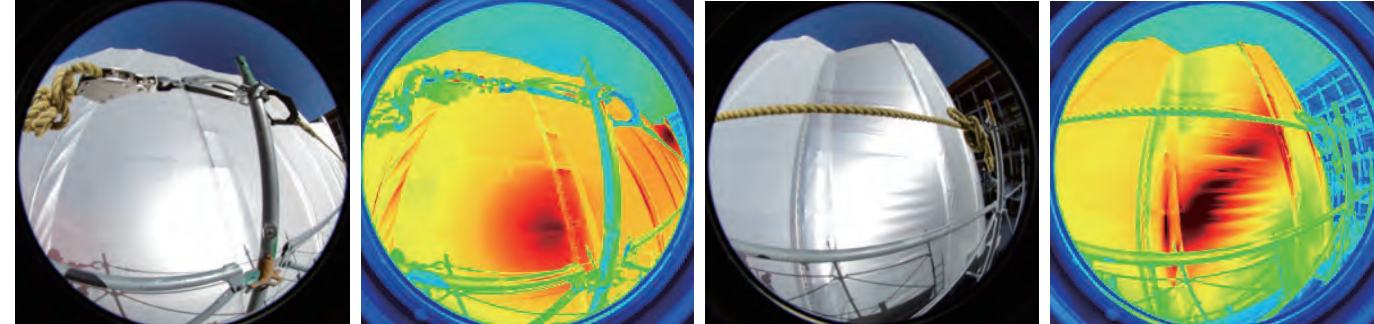
しかし、一般的に素材の反射特性は、完全な正反射や拡散反射で記述できるものではなく、複雑な反射特性（BRDF）を有している。そのため、シミュレーション上で反射が及ぼす眩しさの影響を正確に把握することは困難な可能性もあるため、人工太陽灯を使用した実験室実験により、塗装の違いによる反射光の影響を評価した。そして実験結果より、耐久性、及び膜材の放射冷却性能への影響、審美性能について最適と思われた塗装材を選定した。最終的には選定された塗装を現場で行い、反射光の影響を輝度実測により確認し、実験室実験で想定した反射光低減効果が実際に得られていることを確認した。

社内実験シーン



人口太陽灯による素材の反射光実測の様子（左図）と測定結果（右図）

現地実測結果



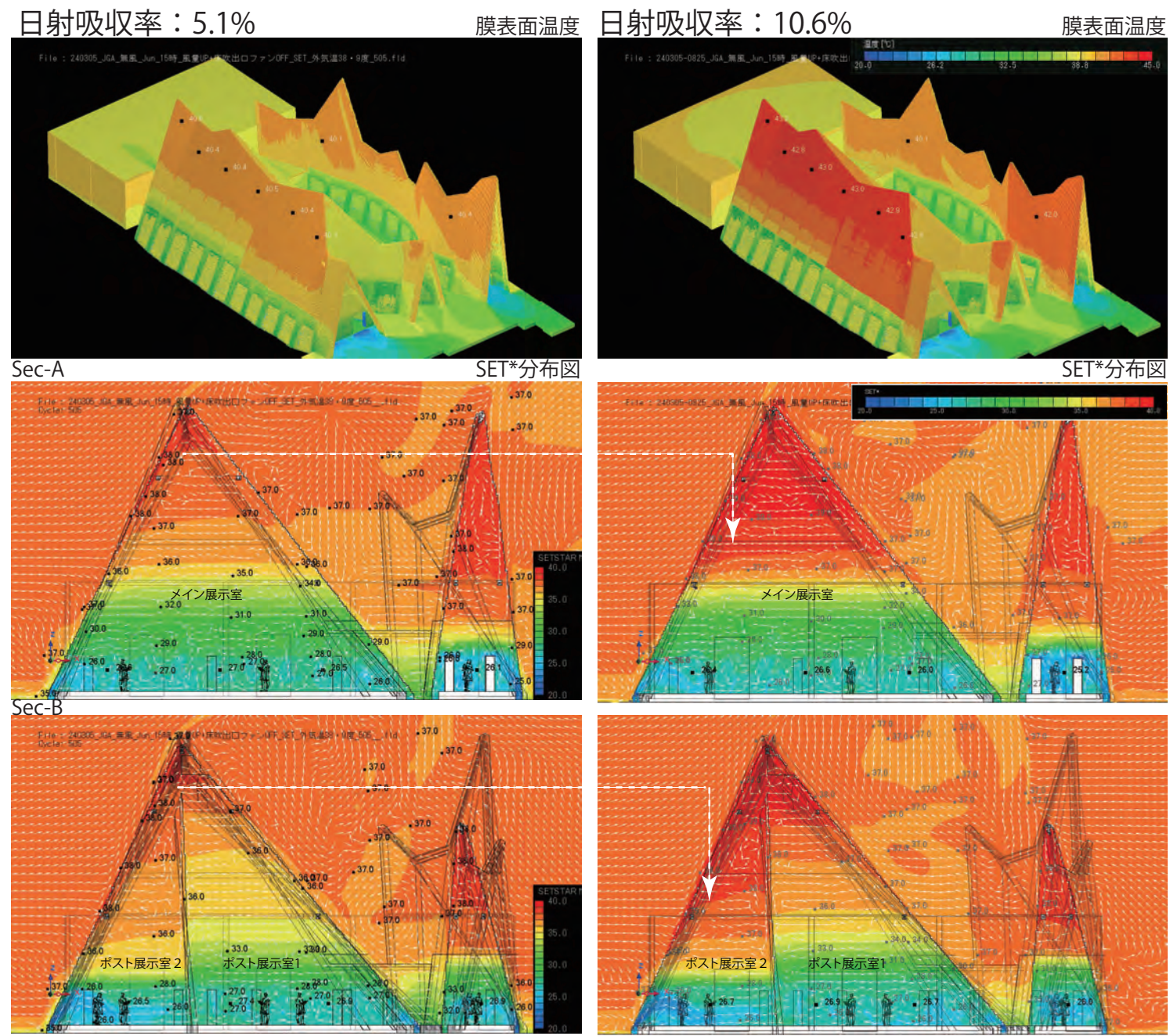
現場で確認した反射光輝度。つや消し塗装後の外装（左図）と3分つや塗装後の外装（右図）

## 温熱環境シミュレーション 3

膜に塗装することで、当初の膜の日射吸収率5.1%→**10.6%**と上がる為、パビリオン内の温熱環境がどれ程影響があるか、快適性評価軸のSET\*で確認した。

- ・日時：8月15:00(西日)
- ・風向：西南西
- ・外気温：38.9℃(2021年8月5日大阪最高気温)

膜面に艶消し塗装することで、総合反射率が5.5%少なくなる。その為、日射吸収率が高くなり、室内膜上部の暑い温度成層の降下が見られるが居住域エリアは断熱しているので、室内の温熱環境への影響はそれほど大きくない結果となった。



## 柔軟な運用

### ● 来館者の暑さ対策

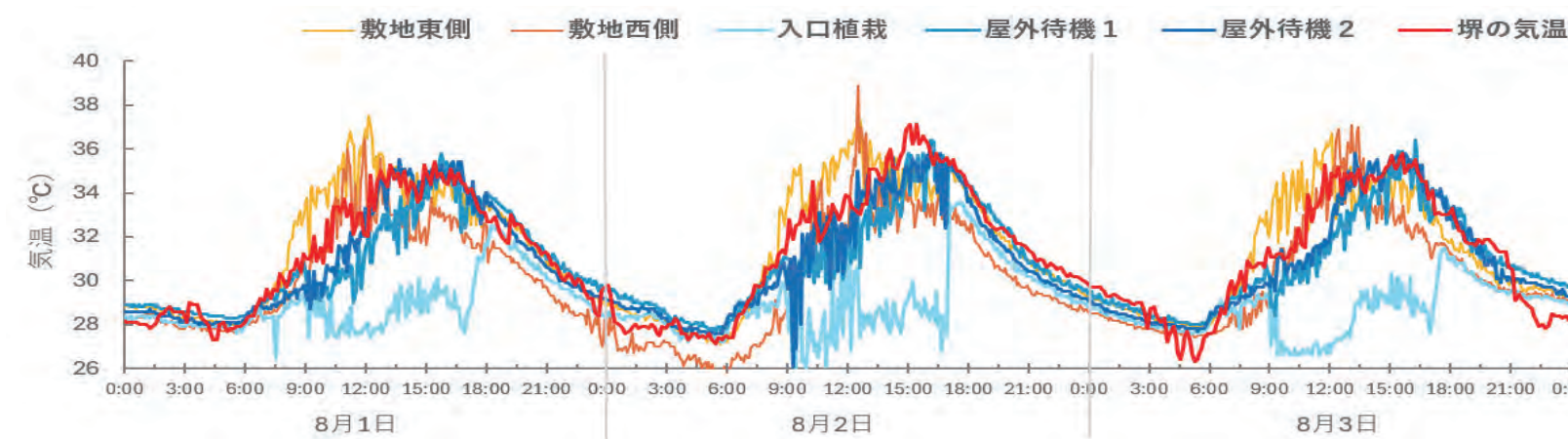
猛暑日が続いた今年の夏、屋外で待機する来館者への暑さ対策として、ミストの散布に加え、日傘の貸し出しやスポットクーラーの設置が行われた。天候や状況に応じた柔軟な対応がなされており、現場では来館者への細やかな配慮が随所に感じられた。



## 環境実測

### ● ミスト散布

屋外の来館者待機エリアにおいてミスト散布を行い、外気温の変化を測定した。散布時間は天候に応じて調整されていたが、開始時刻の8時頃から気温が低下する傾向が見られた。風向きによって効果に差はあるものの、暑さが厳しい中で来館者の体感温度を下げる有効な手段として、ミスト散布は現場で高い効果を発揮していた。



### ● 居住域空調

万博開催中に温熱環境の測定を実施した。サーモカメラによる幕の表面温度の測定により、断熱層のない高さ4m以上の膜部分が40℃を超えていることが確認された。一方で、居住域は適正な温度が保たれており、本施設が居住域空調として機能していることが明らかとなった。

### ● 膜の簡易測定

晴天日にSPACECOOL素材の日傘と一般的な日傘を比較したところ、日陰部分の温度に大きな差が見られた。一般日傘が31.0℃に対し、SPACECOOL素材では26.3℃と、透過日射量の低減効果が簡易な測定でも確認された。

### ● 空調制御

設計時には、SET\*を用いて快適性を評価し、満足度の高い温熱環境を計画していた。しかし、来場者とスタッフでは代謝量や着衣量が異なり、屋内スタッフの待機場所が風の弱いエリアとなったため、循環ファンの設置や給気温度の調整など、体調管理に配慮した柔軟な運用が行われた。

### ～ひとこと～

省エネルギーを意識した設計ではあるものの、実際に現場を訪れて感じたのは、柔軟な運用の大切さだった。近年の厳しい暑さの中、多国籍の来場者や、子どもから高齢者、障がいのある方まで、様々な人が訪れる万博パビリオンでは、快適さの感じ方も人それぞれ。1日だけの来場者ではなく、毎日働くスタッフが気持ちよく対応できる環境こそが建築の役割なのかもしれない。省エネだけで本当に十分なのだろうか、そんな素朴な疑問を現場の運用を見て改めて考えさせられた。環境エンジニアとして、現場でしか得られない気づきがあった。

