

データセンターにおける屋上チラーの熱波対策

木村 昌雄

屋上に空冷モジュールチラーが多数設置されているデータセンターにおいて、高い外気温度による高圧カットを回避し、運転の信頼性を確保するために熱波対策が必要となった。CFDを用いた対策検討案の立案、対策工事の実施、性能検証による効果の確認を行った事例を報告する。

1. はじめに

近年、データセンターはクラウド利用拡大と生成AIの普及により急速に大規模化・高密度化が進み、電力・冷却需要が増大している。こうした変化により空調設備の高度化と効率的運用が一層求められている。

今回報告する某データセンターは竣工以降、IT負荷の増強による実装を重ね、空冷チラーが191モジュール設置されているが、外気の高温化や過密な設置状況から、チラーの運転信頼性の確保のため熱波対策が必要となった。本報では、CFD (Computational Fluid Dynamics) を用いた対策検討案の立案、対策工事の実施、効果検証を行った事例を報告する。



写真1 熱波対策後（チラー、通路部）



写真2 熱波対策後（チラー、タンク）

2. 建物概要

建物用途	: データセンター
構造	: S造
延床面積	: 約30,00m ²
設計・施工（建築）	: 秘匿
施工（空調）	: 東洋熱工業（株）
工期	: 2024年2月～2024年10月

※本報は、建物や会社名が特定出来ない事を条件として掲載許可を得た。

3. 主要機器（既存）

空冷式冷専チラー・149kW（40HP）×191モジュール	
冷水バッファタンク	61 m ³ ×11基

熱波対策後の施工状況を写真1～3に示す。



写真3 熱波対策後（チラー間）

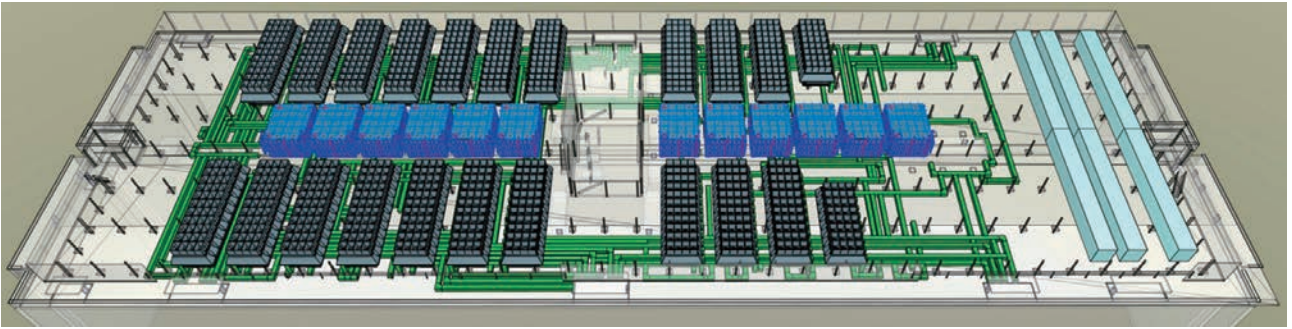


図1 CFDモデル（終局負荷時）

4. CFDを用いた対策検討

設置されているモジュールチラーは冷媒R410Aの機器で吸込み温度43℃以下が連続運転範囲で、これを超えると高圧カットで異常停止する可能性があった。

熱波対策の検討にあたり、現状と対策後の状況を比較するためCFDを用いた。複雑なモデル形状の反映、風向風速や日射負荷の影響の考慮、チラー吸込温度の計算などが必要だったため、当社のCFDソフト「T-FLOW」では計算困難と判断し、MSCソフトウェア（株）にCFDソフト「STREAM」での解析を委託した。

4.1. CFDモデルの作成

屋上の空冷チラーは、ファインフロア上部に設置され、下部には冷水配管や電気ラックなども配置されている。設置高さ、外周の防音壁、ファインフロアや床開口などもCFDに必要なため、新築時の施工図Tfasデータを利用して図1のCFDモデルを作成した。尚、チラー（吸込み、吐出とも消音器設置）、冷水バッファタンク、キュービクル等の架台上の設備の他、通風の障害となる架台下の配管やラックは疑似化して入力している。

4.2. 計算条件

(1) 外気条件

- ①新築時：34.4℃
- ②検討時：39.3℃（施主様より提示）

(2) 風向・風速

- ①無風
- ②気象庁データによる夏期卓越風の南風5.3m/s
- ③配置上結果が悪くなると想定される南西風5.3m/s
- ④隣接建物からの排熱を考慮した東風6.0m/s

(3) チラー台数

- ①191モジュール（現況台数）
- ②236モジュール（想定される終局負荷時の台数）

(4) チラー排熱（上部送風機排気）

「チラー製造熱量+圧縮機動力+送風機動力」で計算されるとし、想定されるIT負荷をチラー台数に均等分割し、CFDで計算される各チラーの吸込温度補正によるチラー製造能力に対する消費電力から、系統1は83.0kW/モジュール、系統2は85.9kW/モジュールを排熱量とした。

(5) 日射熱

「STREAM」のVENTと言われる体積発熱項を用いて、空間に熱量を与える方法を採用した。具体的には、

日射による熱量 = 屋外水平面日射熱量 (900W/m²) × 屋根面吸収率 (0.8) × [対流による放熱比率 (0.8) + チラー他の放射熱比率 (0.08)] = 634W/m²

ファインフロア面から3.5m上部までの空間の投影空間の大型機器（チラー、バッファタンク、キュービクル、動力盤等）を除いた部分は、634W/m² ÷ 3.5m = 181W/m³ を日射熱として付加する。但し、サンシェードが設置された投影部は、その下部は日陰になり日射熱が無いものと仮定し、サンシェード設置高さの2.5mH から上部の1.0mH に634W/m³ を日射熱として付加する。

4.3. 対策案の検討（STEP1）

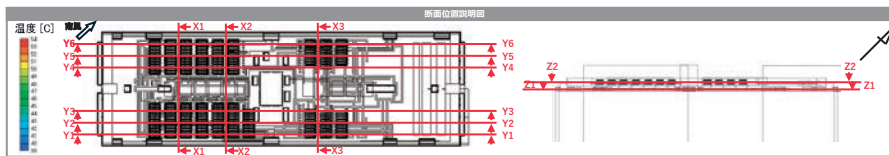
対策無しの状態、無風ケース・風有り（3パターン）での温度分布、風速ベクトル分布から、ショートサーキットの発生状況、発生箇所や温度上昇の度合いを把握。風有りの条件の方がショートサーキットを生じやすい傾向が明確に見られたため、以降の解析ケースでは無風ケースのCFDは見送りとした。代表して対策前現況台数時のCFD結果を図2に示す。

4.4. 有効な対策の絞り込み（STEP2）

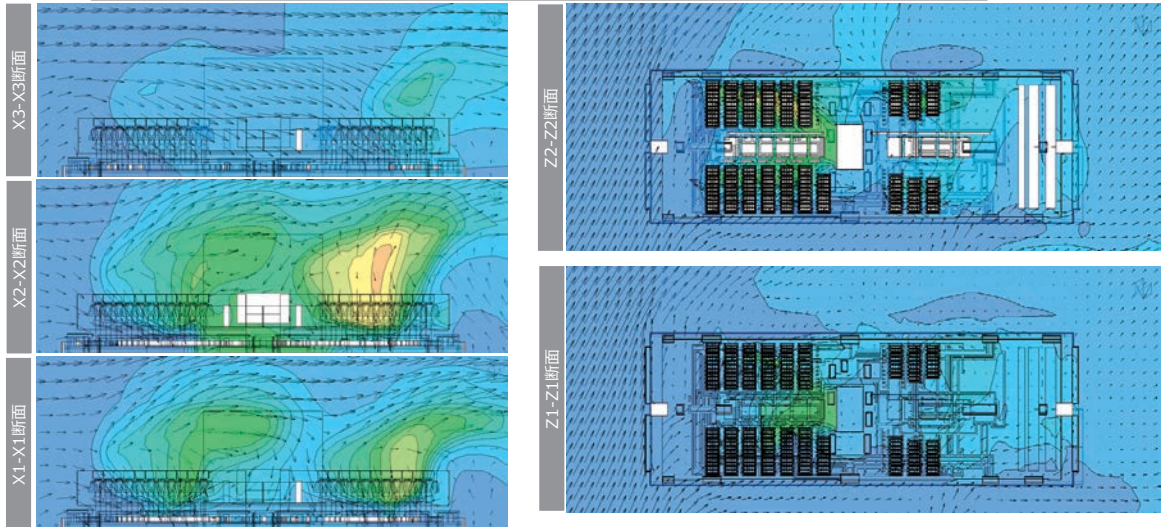
STEP1で得られた知見を基に、既往の知見から有効と考えられる対策を数パターン試行。本計画において有効な対策の絞り込みを行った。尚、チラー設置数は終局負荷時の236モジュールで検討した。

Case B

チラー吸込面の温度分布状況



Z2=RFL+4167mm;
チラー吸込みフード下面レベル
Z1=RFL+2000mm;
架台下ハト小屋天端レベル



対策前：ケースB

暑熱負荷	外気条件	風向	風速	日照射量	電力消費	平均電力	平均電力	平均電力
最大	39.3℃	南	6.0 m/s	有り	平均	42.16	kW	9,906
チラー最大能力+電圧降下					HFC-1相電圧76kV	3,553	充足	11,868
チラー最大能力+電圧降下					HFC-2相電圧76kV	3,412	充足	3,276
チラー最大能力+電圧降下					HFC-3相電圧76kV	1,888	充足	37.76

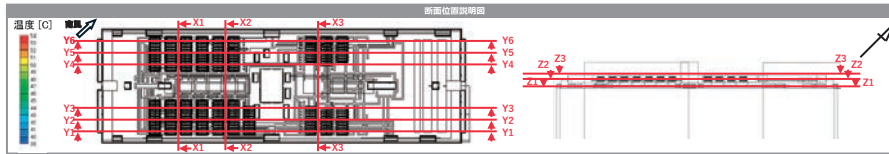
メーカー確認により、吸込み温度が43℃を若干超えたとしても直ちに停止する運転状態ではないことから、メーカーの温度範囲上限値43℃を極めて四捨五入で43℃までを能力値としてカウントして評価するものとします。43℃超のモジュールは、チラー最大能力にカウントしません。シミュレーションでは運転継続しており、その時の吸込み温度を記載しています。

1-2 温度℃	1-4 温度℃	1-5 温度℃	1-6 温度℃	1-10 温度℃	1-12 温度℃	2-2 温度℃	2-4 温度℃	2-6 温度℃	
40.37	41.30	41.56	41.41	42.60	43.61	42.31	41.79	42.86	
41.17	42.13	41.85	41.29	41.89	42.88	42.29	41.81	42.43	
42.17	43.92	43.96	42.81	43.74	43.38	42.27	42.50	42.77	
42.12	44.97	46.47	46.47	46.99	45.26	41.89	42.96	42.26	
41.45	44.46	46.45	48.76	47.46	44.55	41.27	43.60	43.27	
42.95	43.21	44.00	47.72	47.67	45.71	40.99	43.00	43.26	
40.71	42.31	43.66	46.03	46.75	45.28	40.79	41.65	42.99	
40.58	41.51	42.72	44.68	46.33	44.54	40.68	41.22	42.74	
40.12	41.12	42.22	44.06	45.98	44.70	40.52	41.00	42.76	
39.95	40.73	41.85	43.66	45.32	44.79	40.39	40.86	42.57	
39.95	40.45	41.64	43.35	45.07	44.78	40.29	40.74	42.36	
平均	42.38	平均	43.39	平均	45.12	平均	41.96	平均	42.73
チラー最大能力小計	1321.4	チラー最大能力小計	1094.3	チラー最大能力小計	407.3	チラー最大能力小計	1095.8	チラー最大能力小計	1224.8
上記消費電力小計	411.2	上記消費電力小計	228.6	上記消費電力小計	114.6	上記消費電力小計	302.5	上記消費電力小計	308.7

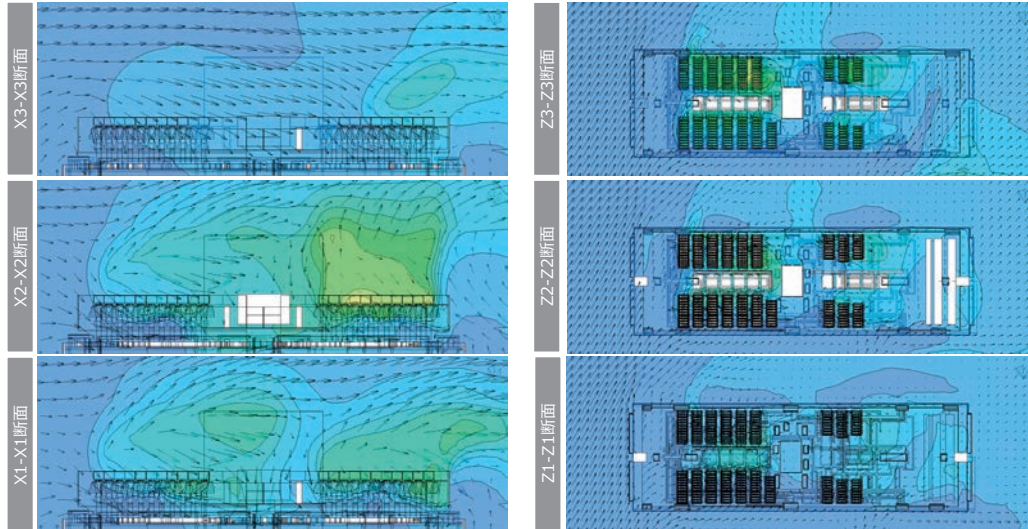
図2 対策前現況台数時のCFD結果（南風）

Case B-2

テラ吸込面の温度分布状況



Z3=RFL+5840 :
サンシェード上部+約500
Z2=RFL+4167mm :
テラ吸込みフード下面レベル
Z1=RFL+2000mm :
架台下ハット小屋天端レベル



対策後：ケースB-2

室外気温	風速	日照熱負荷	Case B-2	必要冷	運転平均	テラ-予備機追加集計
39.3℃	6.0 m/s	有り	7.0℃ 41.11	kW	50	198.4
テラ-最大電力+4.6kW			HPC-1最大電力kW 37.29 充足	9,306	137.26	4,518
			HPC-2最大電力kW 6,892 充足	3,417	137.8	6,616 充足
			HPC-3最大電力kW 1,877		37.54	1,802

吸込温度平均▲1.05℃

メーカー確認により、吸込み温度が47℃を若干超えたとしても直ちに停止する運転状態ではないことから、メーカーの温度範囲上限値47℃を鑑みて、除却五人で47℃までを能力値としてカウントして評価するものとしています。
47℃超のモジュールは、テラ-最大能力にカウントしませんが、シミュレーションでは運転継続しており、その時の吸込み温度を記載しています。

1-2 温度℃	1-4 温度℃	1-6 温度℃	1-8 温度℃	1-10 温度℃	1-12 温度℃	2-2 温度℃	2-4 温度℃	2-6 温度℃
40.19	42.49	43.65	43.08	43.34	42.48	41.48	41.11	42.48
40.16	41.70	42.76	42.70	41.88	42.20	41.20	41.14	42.27
40.08	41.33	41.77	41.77	41.19	42.40	41.16	41.29	42.61
40.05	40.91	41.14	41.14	41.06	42.80	40.95	41.39	42.55
40.10	40.57	40.58	40.58	41.60	43.28	40.76	41.16	42.42
40.25	40.34	40.79	40.79	42.08	43.74	40.65	40.98	42.50
40.04	40.40	41.20	41.20	42.09	44.30	40.60	41.34	42.70
40.04	40.60	41.53	41.53	42.76	44.78	40.58	41.10	42.88
40.05	40.74	41.85	41.85	43.88	45.16	40.56	41.20	42.85
40.05	41.00	42.03	42.03	44.17	45.27	40.56	41.30	42.70
40.01	40.74	42.04	42.04	44.38	45.28	40.56	41.00	42.88
平均 40.68	40.97	41.78	41.84	42.46	43.77	40.92	41.13	42.56
テラ-最大電力+4.6kW	テラ-最大電力+4.6kW	テラ-最大電力+4.6kW	テラ-最大電力+4.6kW	テラ-最大電力+4.6kW	テラ-最大電力+4.6kW	テラ-最大電力+4.6kW	テラ-最大電力+4.6kW	テラ-最大電力+4.6kW
1538.4	1538.7	1326.6	1499.4	1590.0	673.7	1105.2	1226.6	1079.0
406.0	376.5	304.4	304.4	192.6	299.5	338.2	307.8	

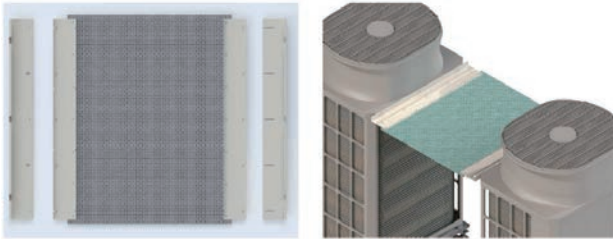
図5 対策後現況台数時のCFD結果（南風）

- (1) サンシェード（遮蔽シート）をチラー吐出消音器上端部へ水平に設置
- (2) サンシェードをチラー吐出消音器下端部へ水平と断面に設置+バッファタンクへ水平に設置
- (3) (2) に合わせ床開口率0%部分を追加
- (4) (3) に合わせサンシェードをメンテ通路部分の3か所へ断面に設置
- (5) (4) に合わせファインフロアの一部を開口率50%から80%に変更

4.5. サンシェード（遮蔽シート）

水平遮蔽と断面遮蔽には、(株) ヤブシタのサンシェードを採用するものとして計画した。図3に製品仕様、図4にモジュールチラーの連結設置イメージを示す。メッシュシート取付金具の片側が長穴になっており、強風や積雪による大きな荷重が掛かった際は、片側が外れてぶら下がる状態となり、チラー本体や電装部に触れない構造となっている。

製品名称	Short-circuit Stopper & Sun Shade (サンシェード)		
対応室外機	トップフロー型 空調冷熱用室外機		
構成名	鏡板製	金具部分	溶融亜鉛メッキ鋼板+粉体焼付塗装
	BSG製	ビス	SWCH 鉄ジnPイ+ジオメット処理仕上げ
	SUS製	金具部分	SUS 304-2B
		ビス	SUS410 ステンレスジnPイ+ジオメット処理
メッシュシート部分	ポリエチレンメッシュシート (ポリエチレン繊維+ステンレス薄膜蒸着)		
外形寸法	室外機間距離	500mm~1500mm	
	対応する室外機幅	室外機に合わせ設計	
梱包仕様	エアキャップ巻き + ダンボール		



耐風圧基準	<p>対応基準風速 46m/s</p> <p>※計算条件 地上高さ90m設置 地表歪相度区分Ⅱ 室外機間距離 500~1000mm 水平設置の場合</p>
積雪基準	<p>垂直積雪量：40cmまで</p> <p>※積雪単位荷重 1cmあたり20N/m ※室外機間距離500mm~1000mmの場合</p>
耐候性基準	<p>耐用年数：約10年~15年</p> <p>※設置環境により耐用年数は異なります。 ※海岸部などの塩害地域はSUS製やBSG仕様をご検討下さい。</p>

図3 製品仕様

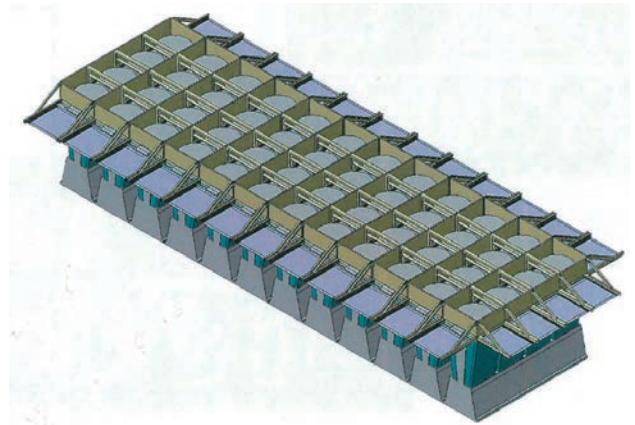


図4 モジュールチラーの連結設置イメージ

4.6. 対策ケースの有効性確認 (STEP3)

STEP2で立案した対策ケースで有効性を確認し、「(4) サンシェードをチラー吐出消音器下端部へ水平と断面に設置+バッファタンクへ水平に設置+メンテ通路部分の3か所へ断面に設置+床開口率0%部分を追加」が総合的に一番優れる結果となり、所定の性能が確認できたため、本案にて実施設計図を作成した。対策後現況台数時のCFD結果を図5に示す。

5. 対策工事の実施

5.1. サンシェードの仕様確認

(1) 遮蔽シート及び取付金具の強度

メーカー強度試験報告書の確認によりOK

(2) 取付鋼材の応力解析

設計最大風速46m/sにおける風荷重と鋼材自重による荷重が掛かる際の応力解析を下記3ケースに実施し、応力、たわみともに基準値以下となりOK。

- ①チラーへの取付鋼材をZAM鋼板としていることで軽量化と高強度、高耐食性を確保している。(図6)
- ②タンクの補強部材にL形鋼を取付(図7)
- ③通路遮蔽は、建築鋼材にZAM鋼板を取付(図8)

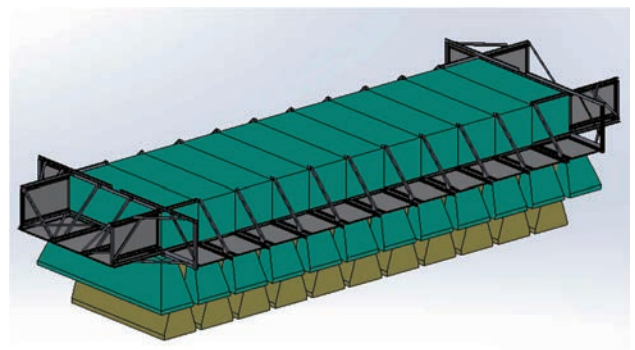


図6 チラーへのサンシェード取付図

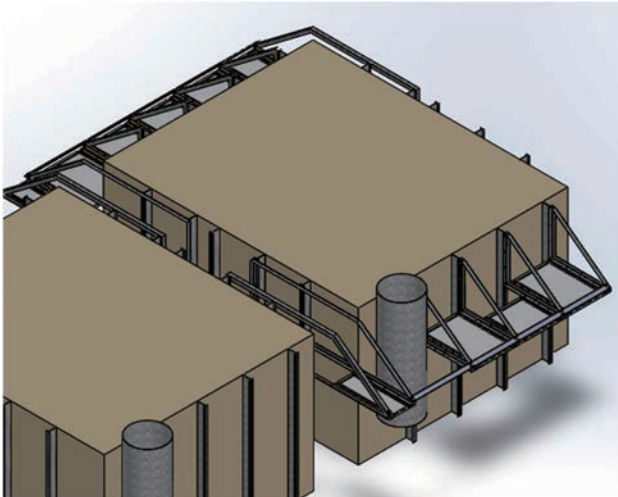


図7 バッファタンクへのサンシェード取付図



図8 通路遮蔽部のサンシェード取付図

5.2. サンシェードの取付工事

(1) 先行工事

取付対象がチラー19群、バッファタンク6基、通路部3組あるが、製作図通りに設置できるか、修正部材が必要となる可能性を考慮し、各1組ずつ先行で製作し取付ける工程とした。CFDで一番高温となったチラー群とその隣接を先行工事の対象とした。

(2) 仮設足場

ファインフロア下部にボルト等の落下無きように作業エリアにメッシュシートを敷いたうえで、チラーへはローリングタワーにて、タンクや通路遮蔽へは立ち馬や単管足場にて部材の取付を行った。(写真4)

(3) 本工事

風下側で高温となりやすいチラー群への取付を優先し、建築の縞鋼板とファインフロア敷込み工事とラップしないよう取付順序を調整して作業を実施した。



写真4 チラーへの取付作業用ローリングタワー

6. 効果検証

効果検証は、暑熱対策後のチラー吸込温度を測定して、現況チラー台数でのCFD解析の結果と現地が同等と見なせるか確認する事である。

計測期間：6/1~8/31（本計測期間は8/10~8/31）

施工期間：4/10~8/26（工程的に最暑期の計測前に全施工完了ができなかったため、風下側の施工優先）

6.1. 検証方法

(1) ハンディ温度計によるサンシェード上下温度計測

CFD解析にて、チラー吸込温度平均値が高いチラー群（HPC-1-10と1-12）に対し、各々サンシェード上下とチラー周囲をハンディ温度計で36点計測する。温度分布図にて、CFD解析時とチラー運転状況の確認と、測定値とCFD気温補正值との比較を行った。

(2) 日最高気温時の計測記録と気象条件・工事進捗照合

計測期間中の中央監視データで日最高気温時における計測値の推移と、工事進捗を表にまとめ、気象条件、工事進捗との相関性を確認した。測定は、代表的な箇所24点で防水型携帯型データロガーによる連続温度測定を行った。

(3) CFD補正值と計測値の比較

CFD解析条件を現地で同時に満たすのは不可能であるため、測定日の気象条件や負荷状況に応じて、適宜補正して評価した。暑熱対策工事後に、晴れ、東風/南風に近い風向条件の中で、外気温の高い時刻を抽出した。

6.2. 検証結果

(1) ハンディ温度計によるサンシェード上下温度計測

8/9 (外気温度34.1℃) に計測実施。各温度はCFD気温補正值と近い温度分布となった。CFDでは上下温度差は3℃前後となっていたが、実測で5℃差以上取れている箇所が多く、平均でもHPC-1-10群で4.5℃、HPC-1-12群で3.6℃取れていた。サンシェードによるショートサーキット抑制だけでなく、遮蔽シートの日射遮蔽効果が大きかったものと考察された。(図9)

計測	2024/8/9 14:20 口ガ-[0]外気温度 34.1℃				精測[気象庁前中14:20]10分間平均風速=北東2.3m/s, 気温=35.2℃			
系統名	HPC-1-10				HPC-1-12			
製造熱量	671.4kW		中央監視 681kW		651.1kW		中央監視 805.6kW	
計測点	サンシェード上部 500mm(℃)	サンシェード下部 1373mm(℃)	上下温度差	測定時間	サンシェード上部 500mm(℃)	サンシェード下部 1373mm(℃)	上下温度差	測定時間
1	40.6	37.8	2.8	14:25	39.9	39.4	0.5	14:30
2	44.5	38.2	6.3	14:25	45.3	37.0	8.3	14:00
3	42.7	35.8	6.9	14:20	44.9	35.8	9.1	14:00
4	43.0	36.3	6.7	14:20	46.2	37.5	8.7	14:00
5	42.6	35.8	6.8	14:20	40.8	36.7	4.1	14:05
6	42.9	36.8	6.1	14:15	44.3	38.7	5.6	14:05
7	40.6	37.7	2.9	14:15	44.4	38.7	5.7	14:05
8	37.2	38.7	▲1.5	14:10	40.4	36.8	3.6	14:10
9	40.0	37.4	2.6	14:25	39.4	38.7	0.7	14:30
10	36.7	36.6	0.1	14:10	36.4	35.7	0.7	14:45
11	38.3	37.3	1.0	14:25	37.6	35.7	1.9	14:30
12	44.5	36.3	8.2	14:00	40.2	34.6	5.6	14:35
13	45.0	35.9	9.1	14:00	39.1	36.6	2.5	14:35
14	44.3	38.4	5.9	14:00	37.8	36.5	1.3	14:40
15	42.1	35.6	6.5	14:05	38.4	36.2	2.2	14:40
16	45.8	39.7	6.1	14:05	36.6	35.2	1.4	14:40
17	40.4	34.7	5.7	14:05	36.2	35.4	0.8	14:45
18	35.8	37.4	▲1.6	14:10	36.9	36.6	0.3	14:45
全平均	41.5	37.0	4.5		40.3	36.7	3.6	

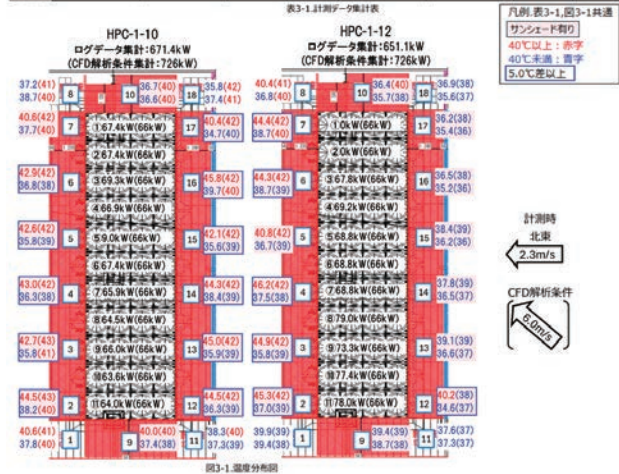


図9 サンシェード上下温度計測結果

(2) 日最高気温時の計測記録と気象条件・工事進捗照合

工事の進捗に伴い、特に風下側でチラー吸込温度と外気温度の差が小さくなっていることが確認され、熱波対策の効果が確認された。

(3) CFD補正值と計測値の比較

- ・チラー吸込温度は、夏期卓越風となる南風系の方がチラー吸込温度と外気温度の差が小さくなる傾向を示した。
- ・チラー吸込温度は、外気温度と平均して同等レベル、最大でも外気温度+4℃以下の空気を吸込むことが出来ていた。
- ・チラーはCFD解析結果を補正した吸込み温度よりもだいぶ低い温度の空気を吸込むことが出来ている。

以下、表1参照

表1 各風向におけるチラー吸込温度の結果集計

NO	風向	風速 m/s	気温[0] ℃	HPC-1系統				HPC-2系統			
				外気温[0]との差		CFD補正值との差		外気温[0]との差		CFD補正值との差	
				平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大
③-1-1	南	3.4	36.2	0.0	3.6	▲2.1	0.0	▲0.8	0.9	▲2.2	▲0.8
③-1-2	南南東	4.3	36.5	▲0.2	2.9	▲2.3	▲0.8	▲1.0	0.9	▲2.5	▲0.8
③-1-3	南南西	4.4	36.3	▲0.3	3.5	▲2.5	▲0.1	▲0.8	0.9	▲2.3	▲0.8
③-1-4	南東	4.4	36.5	▲0.2	3.3	▲2.3	▲1.0	▲1.1	0.6	▲2.5	▲1.1
③-2-1	東	2.3	34.7	1.1	3.7	▲2.0	▲0.2	0.0	0.8	▲2.8	▲1.8
③-2-2	東南東	4.4	34.5	1.2	3.7	▲1.9	▲0.4	0.2	1.2	▲2.6	▲1.4
③-2-3	東北東	2.1	34.9	1.4	4.2	▲1.6	0.4	0.2	0.6	▲2.6	▲2.0

・チラー吸込温度は、各風向ともにCFD補正值の温度分布に近く、計測値がCFD補正值と乖離して高い温度となっている箇所(ウィークポイント)は検出されなかった。代表して対策後(南風)の比較結果を図10に示す。

(4) 総括

以上より、各チラーは外気温度と平均して同等レベルの空気と熱交換することに成功している。

また、チラー吸込温度はCFD解析結果補正值よりだいぶ低い温度となっており、且つCFD結果の温度分布と近くなっており、これから乖離して高い温度となっている箇所(ウィークポイント)は検出されなかった。

サンシェード設置によるショートサーキット抑制効果も見られた。

これら検証結果より、今回工事の効果は十分発揮していることが確認された。

7. おわりに

対策案の検討からCFD、設計、工事、効果検証を通して携わり、チラー給排気の気流を適切に保つことで運転環境が大きく変化させられることを実感した。

また、効果検証にてCFDと実測結果が近いことを確認でき、CFDの信頼性と重要性を認識できた。

翌年に施主様から快適な夏を過ごせたと感謝のお言葉を頂くことができ、大変喜ばしく感じている。

謝辞

今回の熱波対策工事のCFD、設計、工事、効果検証にあたり、施主様、元請会社様に多大なるご指導とご支援頂きましたことを、深く御礼申し上げます。

