大空間を対象とした水ミスト噴霧による夏季の温熱環境改善に関する研究

新潟大学大学院自然科学研究科
環境共生科学専攻都市人間環境学教育群

峯田雅人
指導教員　赤林伸一教授

1　研究目的

1 研究目的

- 夏季の都市における屋外の気温上昇の緩和対策として、微小粒径の水滴(ミスト)を噴霧し、蒸発潜熱を用いて気温を下降させる手法が採用されている。
- 工場などの大空間では、夏季に冷房することが困難であるため、室内温熱環境の悪化による作業効率の低下が懸念される。
- 発電所建屋(タービン建屋)などの施設では、室内に蒸気タービン本体や熱交換器等の巨大な発熱機器が存在するため、作業環境の悪化や制御用の電子機器に対する影響が懸念される。また、今後の電力需要の変動や突発的な機器の不具合等により特に高温となる夏場に点検が行われることも考えられ、作業環境の改善が必要である。

1　研究目的

本研究では、まず最初に全国842都市において水ミスト噴霧を利用することで得られる温度低下の効果を明らかにし、水ミスト噴霧の地域毎の有効性を検討する。

次に、実在する工場を対象に水ミスト噴霧実験を行い、水ミスト噴霧前後の温湿度変化による工場内の温熱環境改善及び相対湿度上昇の影響について検討する。

更に、発電所建屋を対象に実測調査を行い、温熱環境の実態を把握する。建屋全体をモデル化し、数値流体解析により熱環境・換気状況を把握することで、建屋内の温熱環境改善効果を検討する。

2　全国の屋外における水ミスト噴霧の有効性

2　全国の屋外における水ミスト噴霧の有効性

- 解析対象は、全国842都市とする。
- 気象データには日本建築学会拡張アメダス気象データを用いる。
- 水ミストを噴霧した場合に乾球温度が外気温と相対湿度から算出された湿球温度まで低下すると仮定し、非暖房期間、非就寝時における湿球温度を算出する。

↓

①「外気温度30℃以上かつ外気温度と湿球温度の差が4℃以上」を水ミスト噴霧の条件とし、累積削減可能温度差を算出する。

※累積削減可能温度差は非暖房期間、非就寝時において１時間ごとに算出した温度差を積算したものとする

2　全国の屋外における水ミスト噴霧の有効性

水ミストを噴霧した場合、相対湿度が上昇するため、乾球温度が低下しても体感温度が必ずしも低下するとは限らない。

↓

SET*による検討を行う

↓

②水ミストを噴霧した場合のSET*と噴霧しない場合のSET*の温度差を求め、累積削減可能SET*温度差を算出する。

※累積削減可能SET*温度差は非暖房期間、非就寝時において１時間ごとに算出した温度差を積算したものとする

2　全国の屋外における水ミスト噴霧の有効性

- 仮想の屋根を想定し、直接、人体は日射の影響を受けないと仮定する。
- 人体周囲には壁は無いと想定し、人体は外部風速の影響を受けるものとする。

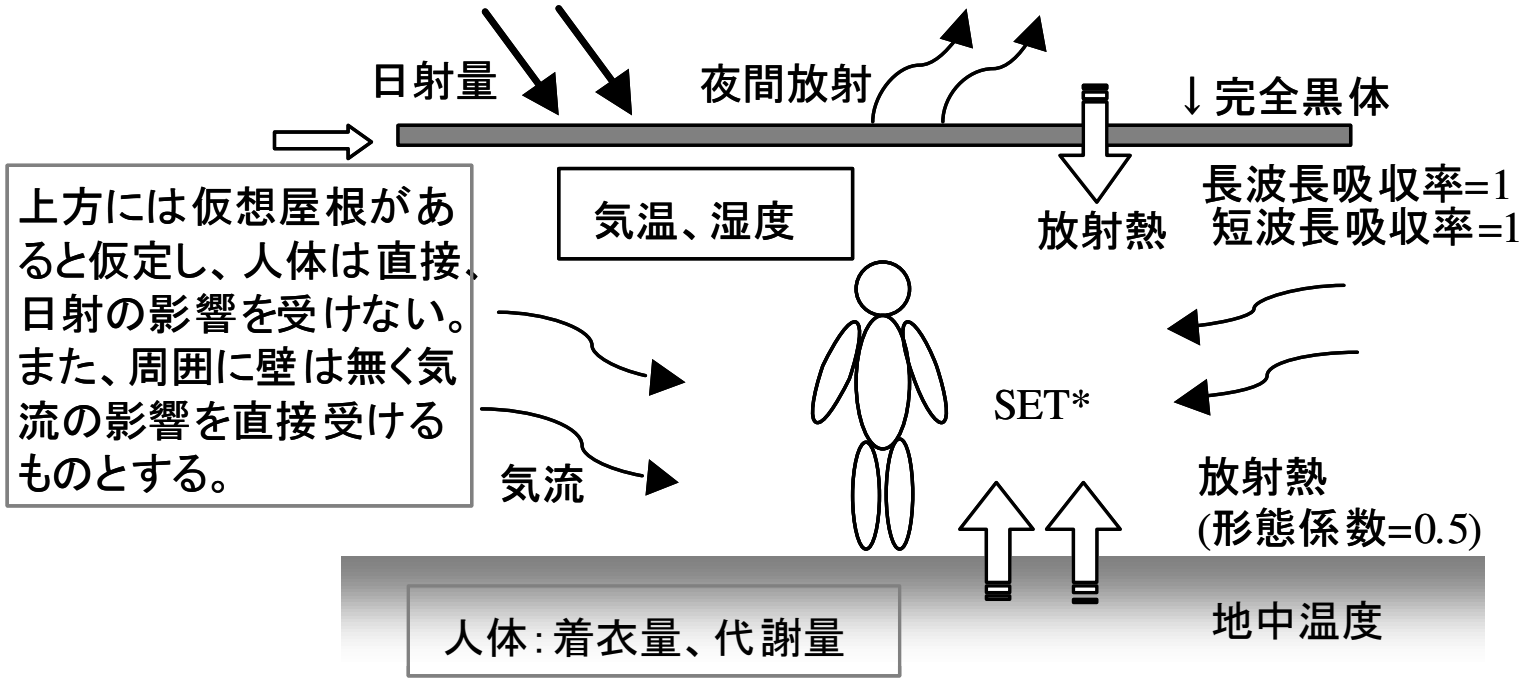


図１　人体が屋外気象条件から受ける影響

2　全国の屋外における水ミスト噴霧の有効性

表１　SET*の解析条件

気象データ	拡張アメダス気象データ （気温、風速、湿度等）
気流速度	高さ1.5mの風速 （風速0.3m/s以下は0.3m/sとする）
仮想屋根	完全黒体 長波長・短波長吸収率＝１
代謝量	１Met
形態係数	屋根0.5、地面0.5
MRT	0.5×屋根温度＋0.5×地中温度
地中深さ	25cm
土質	粘土（ベーシック、デフォルト）
着衣量	0.5clo（７～９月）
	1.0clo（12～２月）
	0.75clo（３～６、10、11月）
非暖房期間	日平均気温：18℃以上
非就寝時	６～23時

2　全国の屋外における水ミスト噴霧の有効性

※累積削減可能温度差は非暖房期間、非就寝時において1時間ごとに算出した温度差を積算したもの

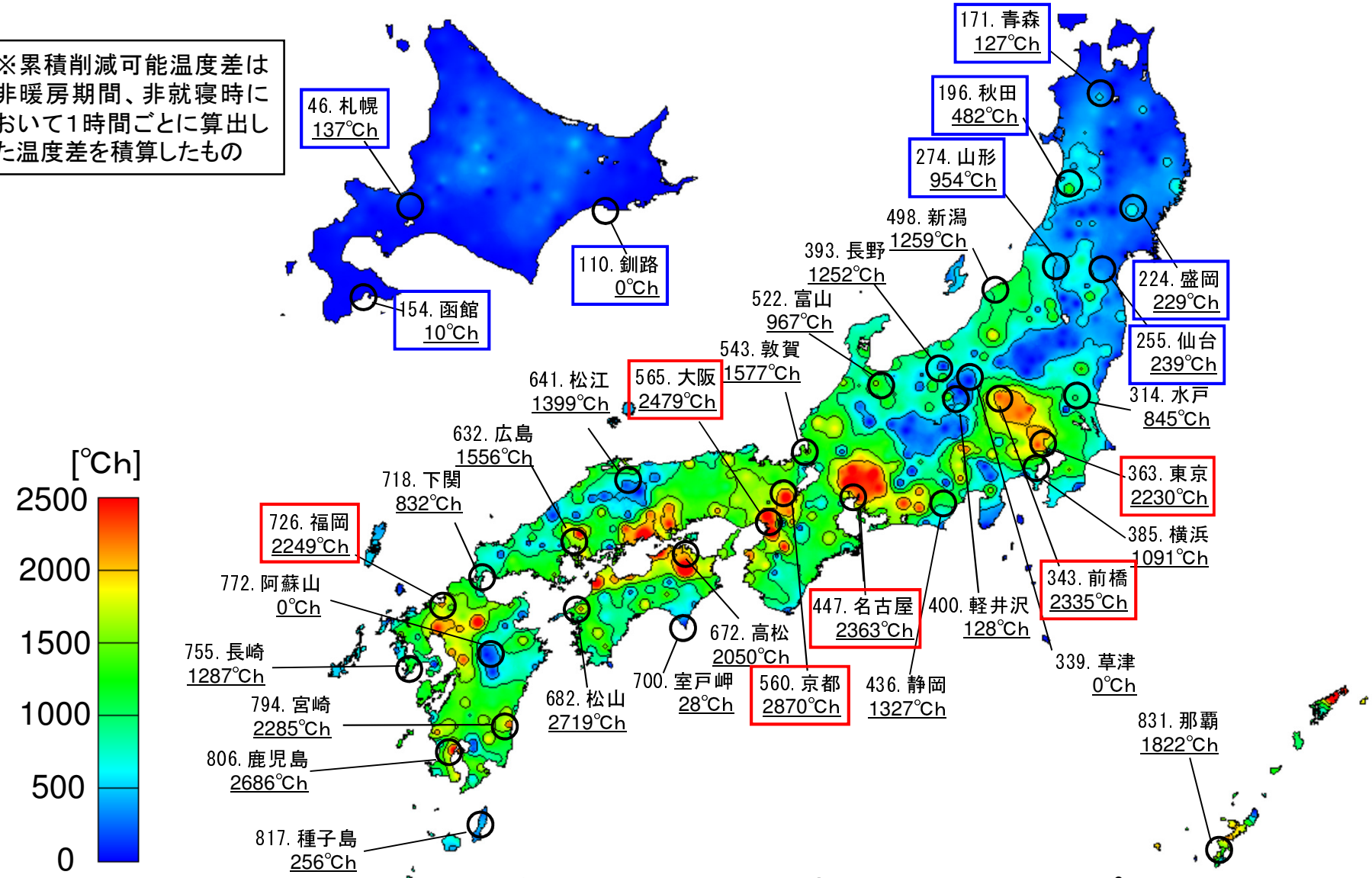
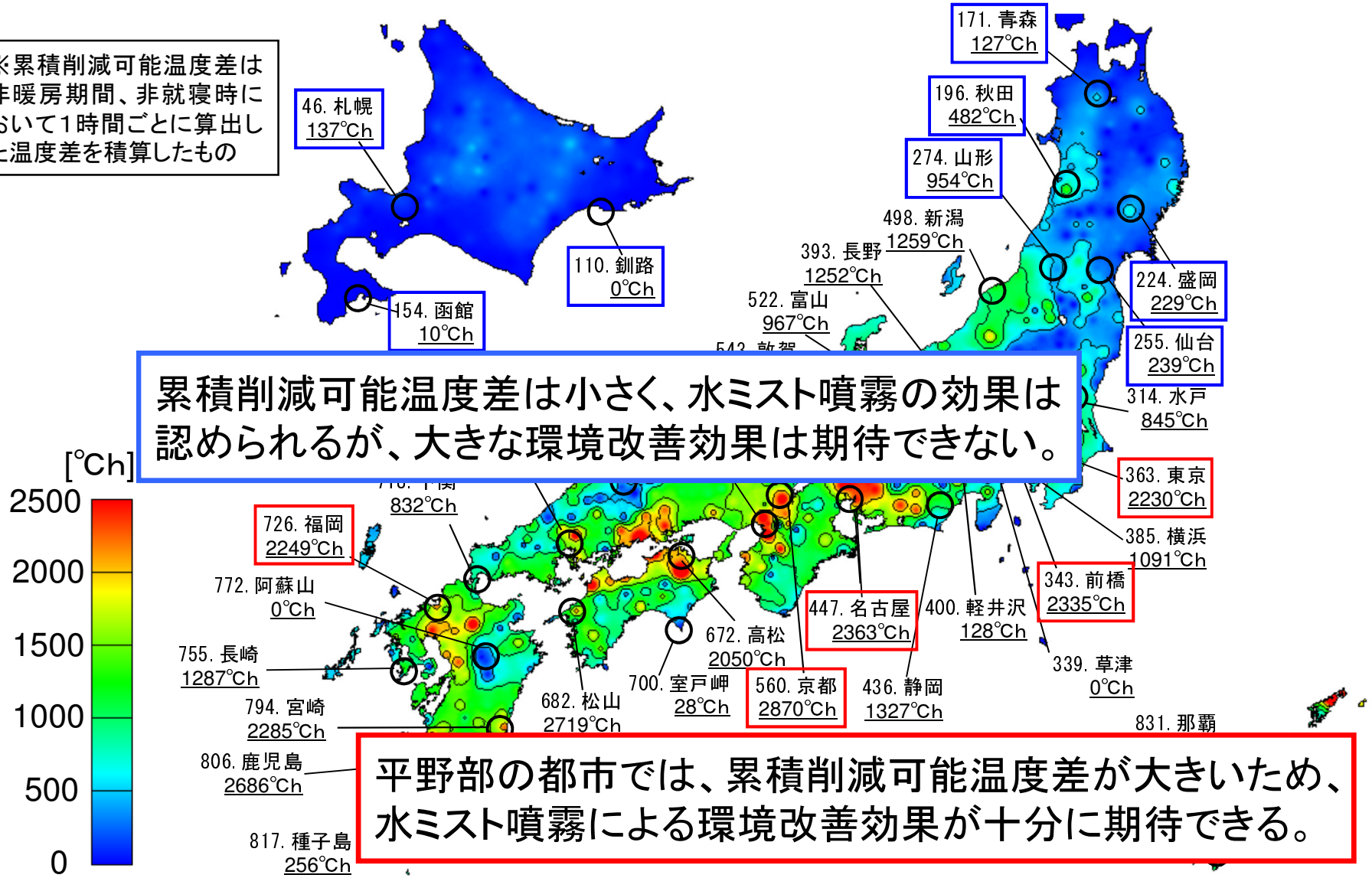


図２　水ミスト噴霧による累積削減可能温度差マップ

2　全国の屋外における水ミスト噴霧の有効性

※累積削減可能温度差は非暖房期間、非就寝時において1時間ごとに算出した温度差を積算したもの



累積削減可能温度差は小さく、水ミスト噴霧の効果は認められるが、大きな環境改善効果は期待できない。

平野部の都市では、累積削減可能温度差が大きいため、水ミスト噴霧による環境改善効果が十分に期待できる。

図２　水ミスト噴霧による累積削減可能温度差マップ

2　全国の屋外における水ミスト噴霧の有効性

表1　SET*の解析条件

気象データ	拡張アメダス気象データ（気温、風速、湿度等）
気流速度	高さ1.5mの風速（風速0.3m/s以下は0.3m/sとする）
仮想屋根	完全黒体 長波長・短波長吸収率＝1
代謝量	1Met
形態係数	屋根0.5、地面0.5
MRT	0.5×屋根温度＋0.5×地中温度
地中深さ	25cm
土質	粘土（ベーシック、デフォルト）
着衣量	0.5clo（7～9月）
	1.0clo（12～2月）
	0.75clo（3～6、10、11月）
非暖房期間	日平均気温：18℃以上
非就寝時	6～23時

※累積削減可能SET*温度差は非暖房期間、非就寝時において1時間ごとに算出した温度差を積算したもの

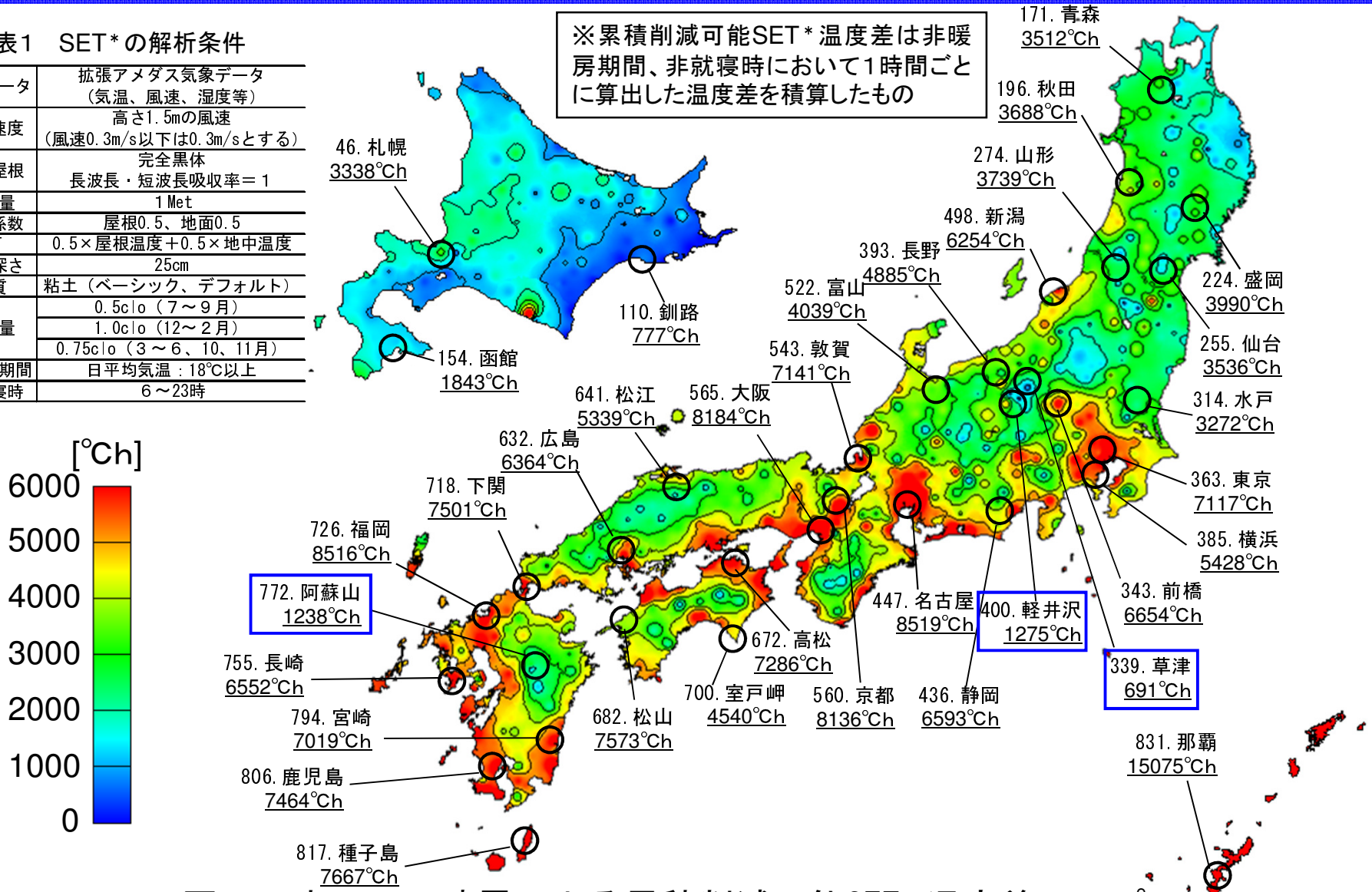


図3　水ミスト噴霧による累積削減可能SET*温度差マップ

2　全国の屋外における水ミスト噴霧の有効性

表1　SET*の解析条件

気象データ	拡張アメダス気象データ（気温、風速、湿度等）
気流速度	高さ1.5mの風速（風速0.3m/s以下は0.3m/sとする）
仮想屋根	完全黒体 長波長・短波長吸収率＝1
代謝量	1Met
形態係数	屋根0.5、地面0.5
MRT	0.5×屋根温度＋0.5×地中温度
地中深さ	25cm
土質	粘土（ベーシック、デフォルト）
着衣量	0.5clo（7～9月）
	1.0clo（12～2月）
	0.75clo（3～6、10、11月）
非暖房期間	日平均気温：18℃以上
非就寝時	6～23時

※累積削減可能SET*温度差は非暖房期間、非就寝時において1時間ごとに算出した温度差を積算したもの

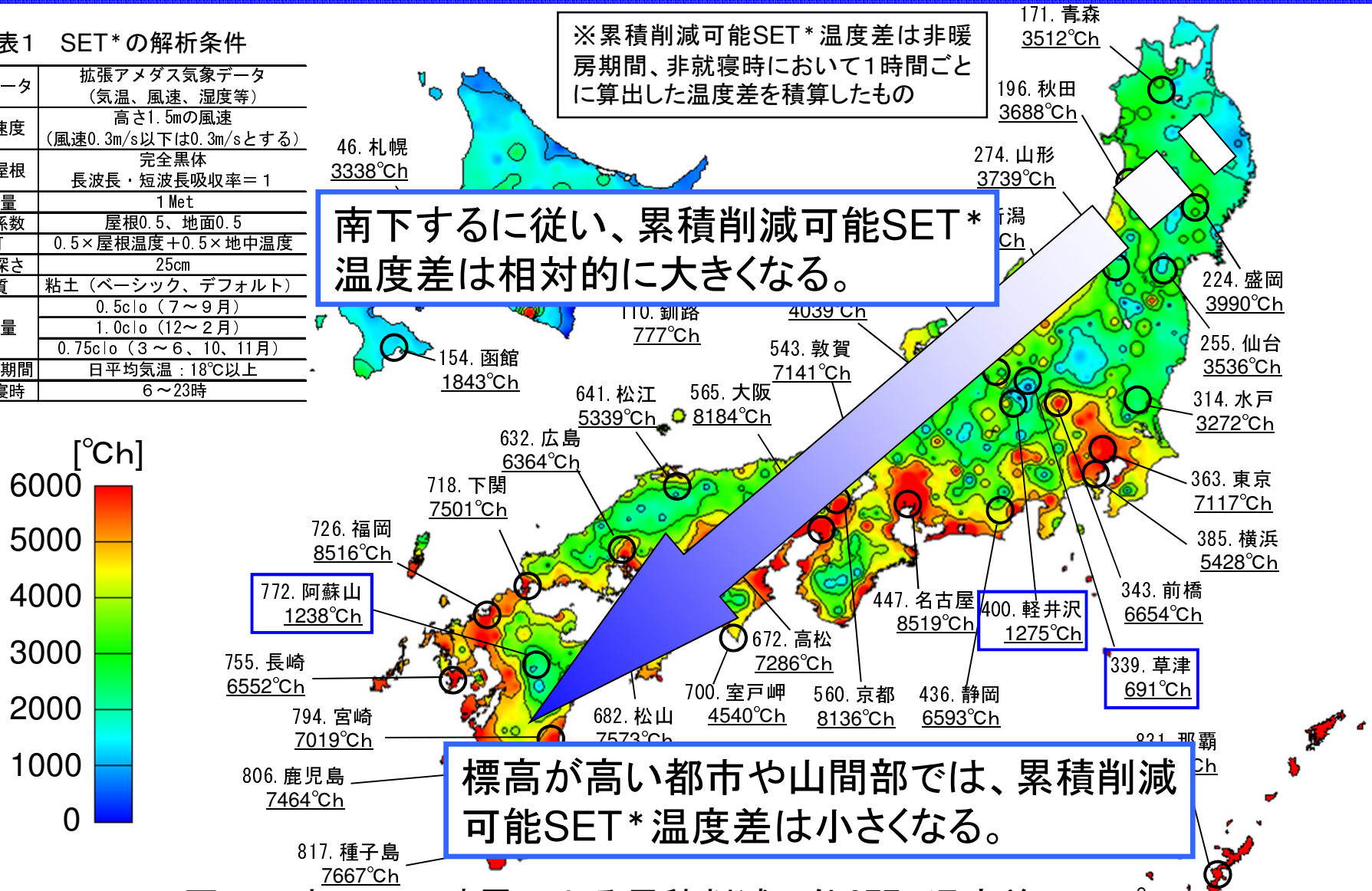


図3　水ミスト噴霧による累積削減可能SET*温度差マップ

3　工場内における
水ミスト噴霧の温度低下効果

3　工場内における水ミスト噴霧の温度低下効果

■ 解析対象は、新潟県長岡市に位置する金属屋根部品の加工工場とする。

図　対象工場の内部

3　工場内における水ミスト噴霧の温度低下効果

実験日時…2010年８月５日10：30～14：00

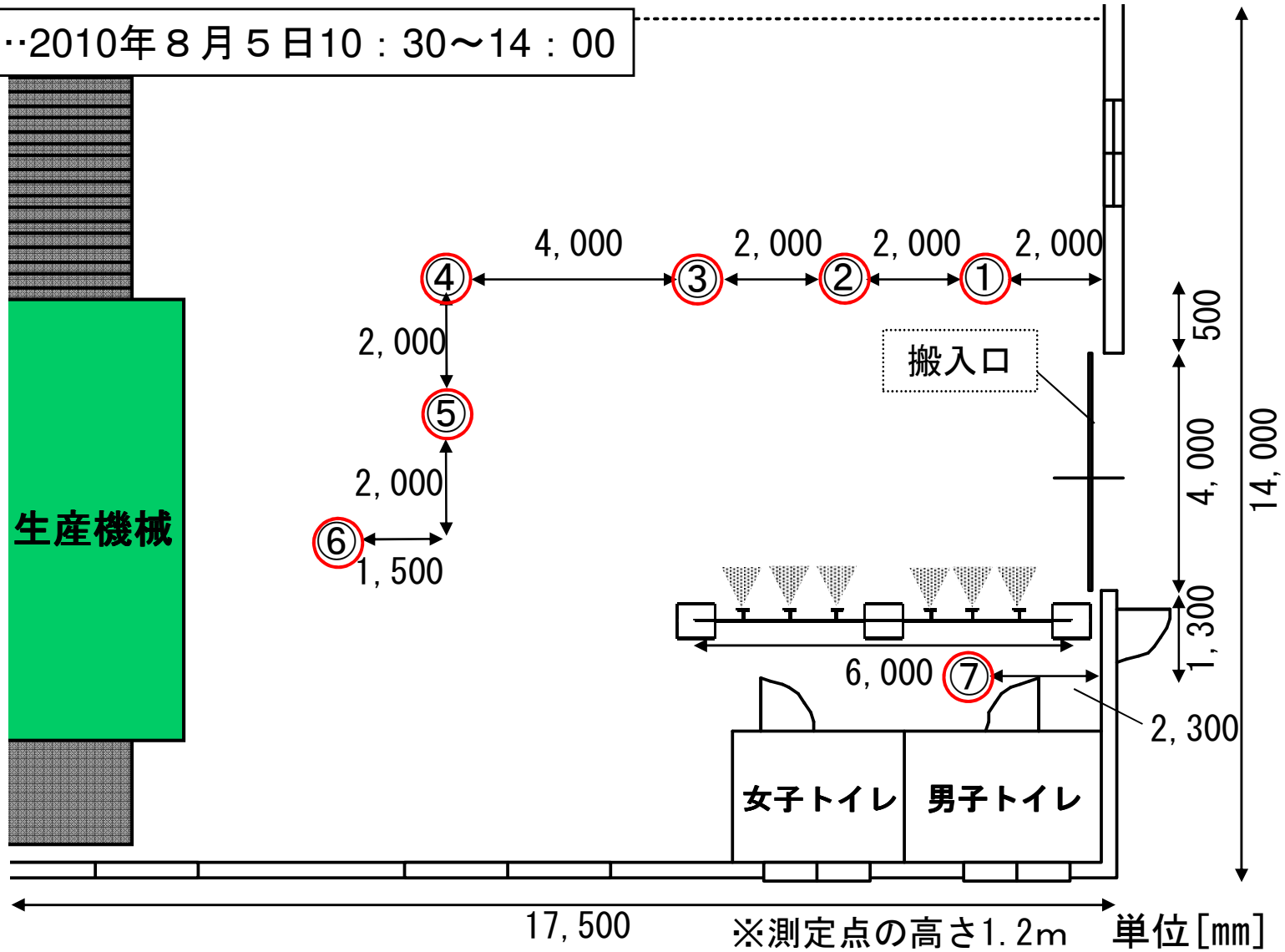


図４　対象工場平面の概要及び温湿度測定点

3　工場内における水ミスト噴霧の温度低下効果

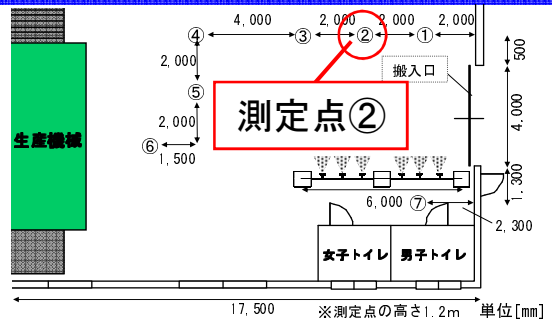
表２　実験case

実験case	水ミスト噴霧位置	時間帯	備考
case1	入口付近 （ノズル高さ3.0m）	10:40～11:05	水ミスト噴霧装置の最大高さ
case2	入口付近 （ノズル高さ3.6m）	11:08～11:15	水ミスト噴霧装置の下に製品ケース0.6m設置
case3	搬入口上端①	11:30～11:50	ノズルの向き…上（6個）、水平（3個）
case4	搬入口上端②	13:00～13:40	ノズルの向き…上45°（6個）、下45°（3個）

図6　水ミスト噴霧時の様子（case２）

3　工場内における水ミスト噴霧の温度低下効果

実験case	水ミスト噴霧位置	時間帯	備考
case1	入口付近（ノズル高さ3.0m）	10:40～11:05	水ミスト噴霧装置の最大高さ
case2	入口付近（ノズル高さ3.6m）	11:08～11:15	水ミスト噴霧装置の下に製品ケース0.6m設置
case3	搬入口上端①	11:30～11:50	ノズルの向き…上（6個）、水平（3個）
case4	搬入口上端②	13:00～13:40	ノズルの向き…上45°（6個）、下45°（3個）



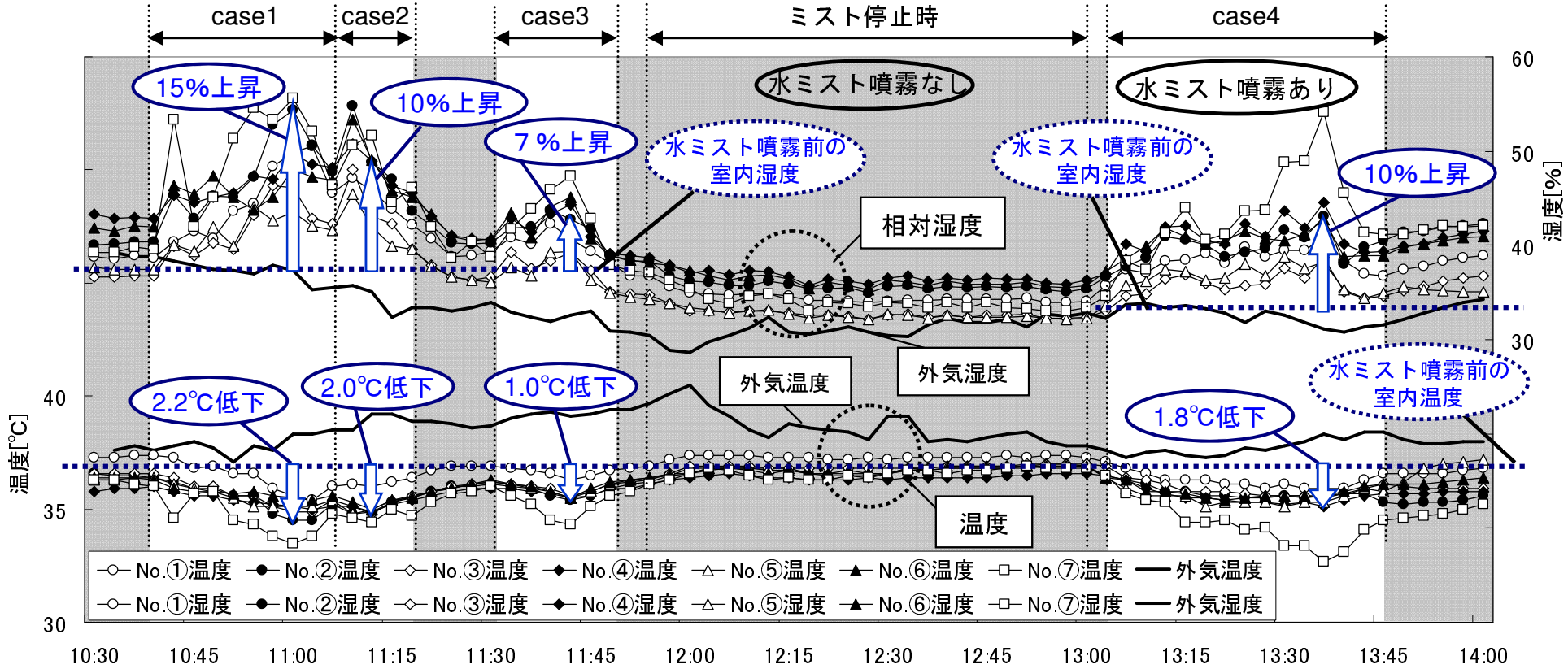


図７　各測定点の温湿度変化（全実験時間）

3　工場内における水ミスト噴霧の温度低下効果

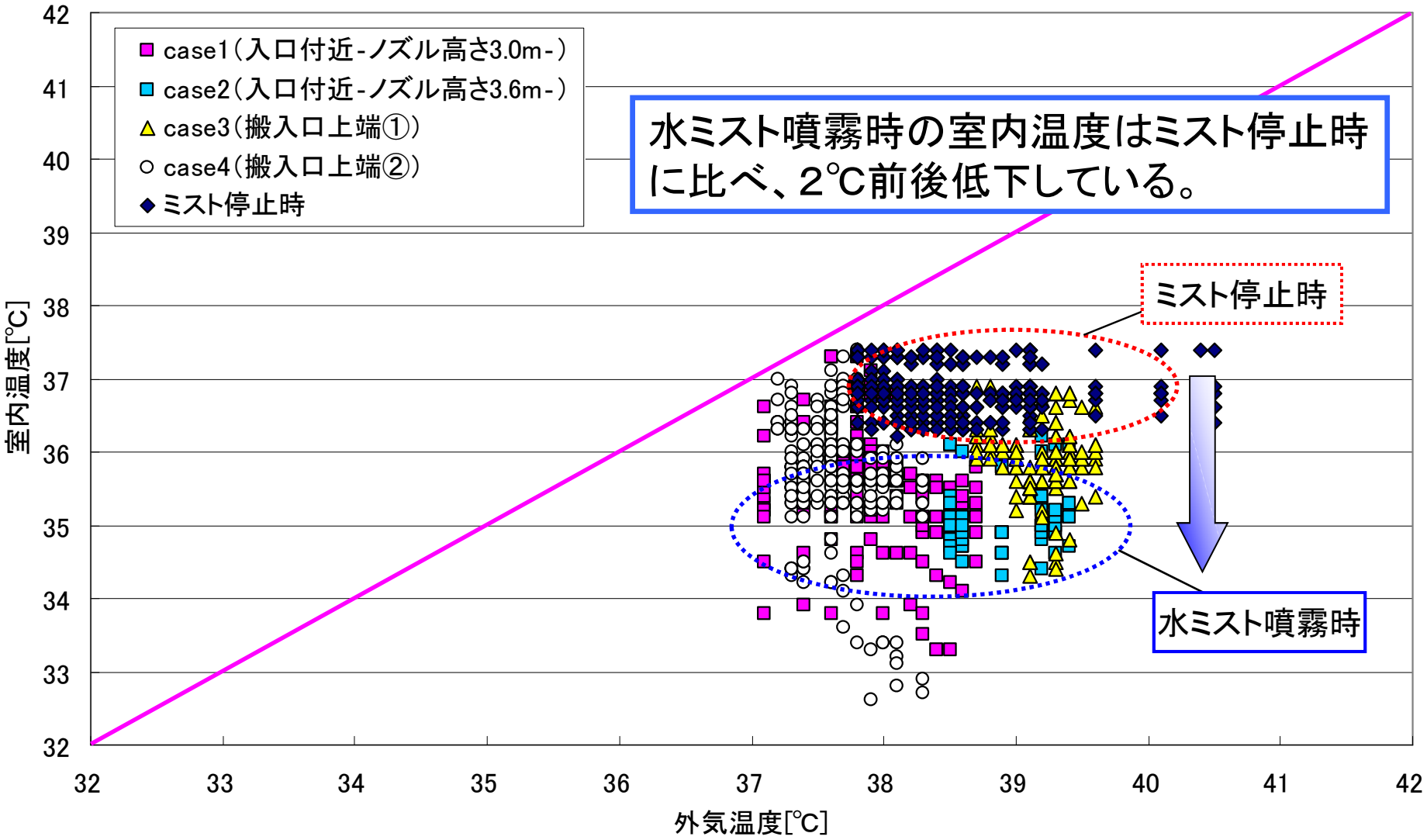


図８　各測定点の外気温と室内温度の関係（全実験時間）

3　工場内における水ミスト噴霧の温度低下効果

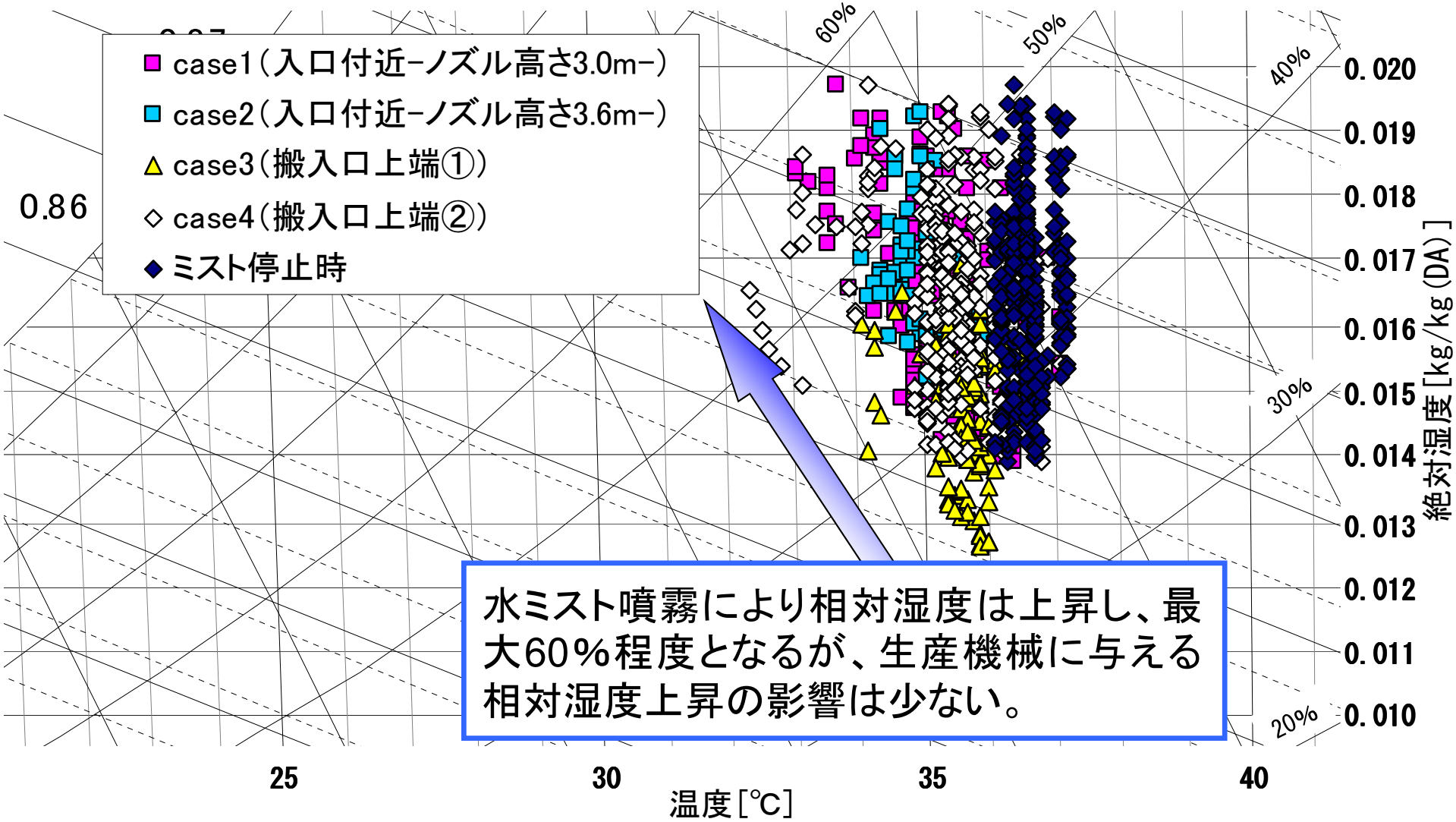


図９　水ミスト噴霧時の空気線図上の温湿度変化（全実験時間）

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境の解析

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析

測定期間…2010年５月13日～2011年１月17日

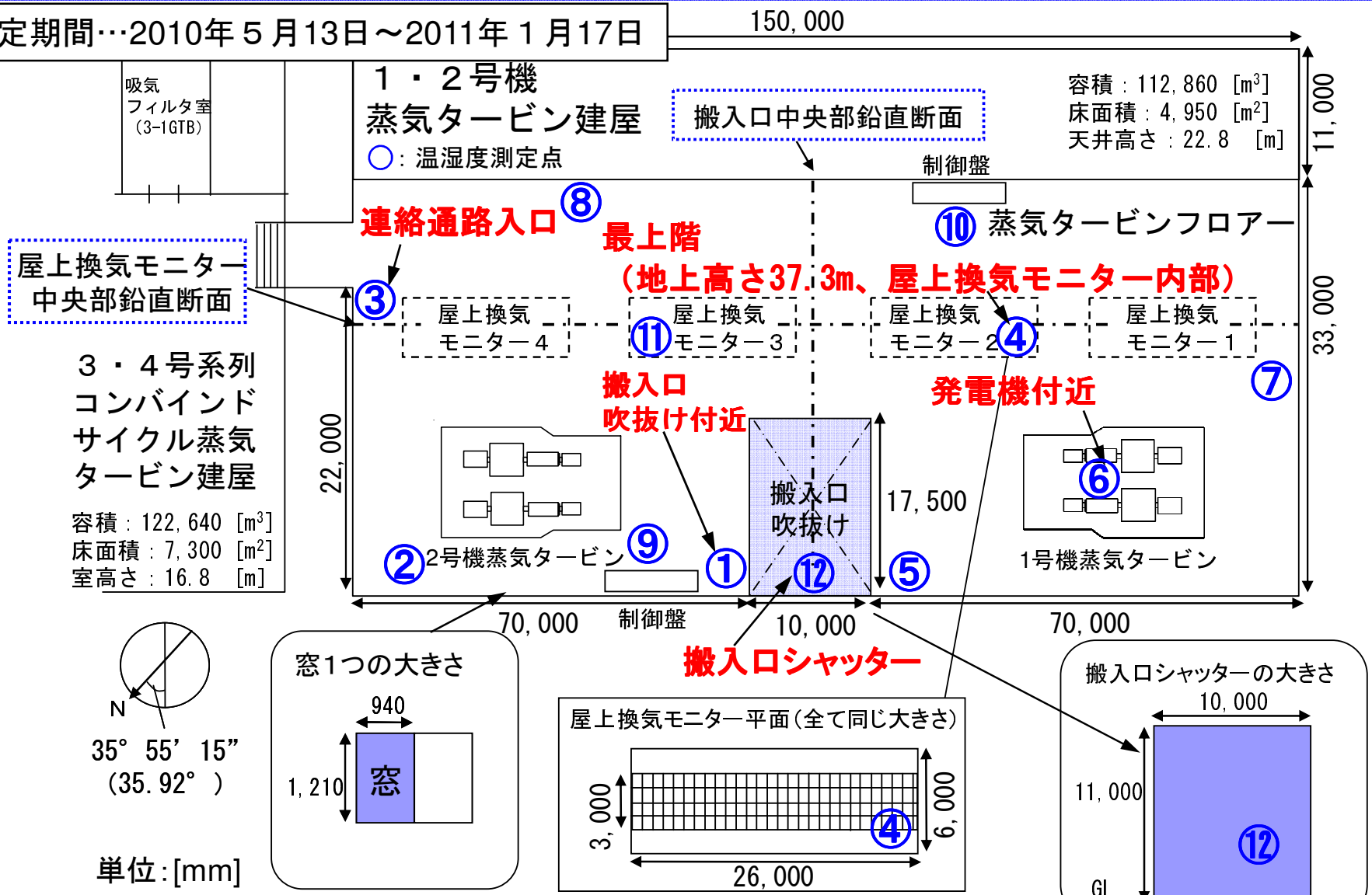


図10　対象建屋平面の概要及び温湿度測定点

表３　解析条件

解析条件			備考
解析対象日	2010年8月5日15時		
計算コード	ソフトウェアクレイドルSTREAM Ver.8		
乱流モデル	標準k-ε モデル		
移流項精度	QUICK		
解析領域	150m×33m×37.3m		1・2号機蒸気タービン建屋3F
メッシュ	263(X)×58(Y)×65(Z)＝991510		
気象条件	外気温度[℃]	33.0	
	相対湿度[%]	63.0	
	湿球温度[℃]	26.98	湿度100%まで加湿（水ミスト噴霧時）
	直達日射量（放線面）[W/㎡]	579	開口部においては、水平面の直達日射量を発熱面として与える
	天空日射量（水平面）[W/㎡]	281	
	全天日射量（水平面）[W/㎡]	681	
	風速[m/s]	3.1	発電所煙突上（200m）のデータ→建物高さ37.3mの風速に補正
	風向[degree]	315	
	太陽高度角[°]	43.22	気象データ標準年
	太陽方位角[°]	77.22	
	太陽定数[KJ/h・㎡]	4932	
	緯度（Latitude）[°]	37.9998	
	経度（Longitude）[°]	139.2397	
流体条件	重力加速度[m/s^2]	9.8	
	風量[m^3/s]	表4参照	搬入口より流入（TRNSYS算出）
		表4参照	北面窓より流入（TRNSYS算出）
		－	屋上換気モニターより流出（自然流出境界）
	水ミスト噴霧量[g/s]	表4参照	
	室内初期温度[℃]	33.0	
境界条件	壁厚[m]	0.18	
	壁面固定温度（東面）[℃]	表4参照	TRNSYS算出
	壁面固定温度（南面）[℃]	表4参照	TRNSYS算出
	壁面固定温度（西面）[℃]	表4参照	TRNSYS算出
	壁面固定温度（北面）[℃]	表4参照	TRNSYS算出
	壁面固定温度（床面）[℃]	表4参照	TRNSYS算出
	壁面固定温度（天井面）[℃]	表4参照	TRNSYS算出
建屋内条件	搬入口測定点温度[℃]	32.9	搬入口シャッター開放
	搬入口吹抜け付近温度[℃]	35.0	
	内外温度差[℃]	2.0	
	発電出力[MW]	201.6	2号機タービンのみ発電
	放熱面の面積[㎡]	700	TRNSYS算出
	放熱面の表面温度[℃]	161.54	TRNSYS算出
	放熱面の発熱量[W/㎡]	659.59	TRNSYS算出（1年間の平均）
	放熱面の熱伝達率[W/㎡・K]	4.083	表面温度・発熱量より算出

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析

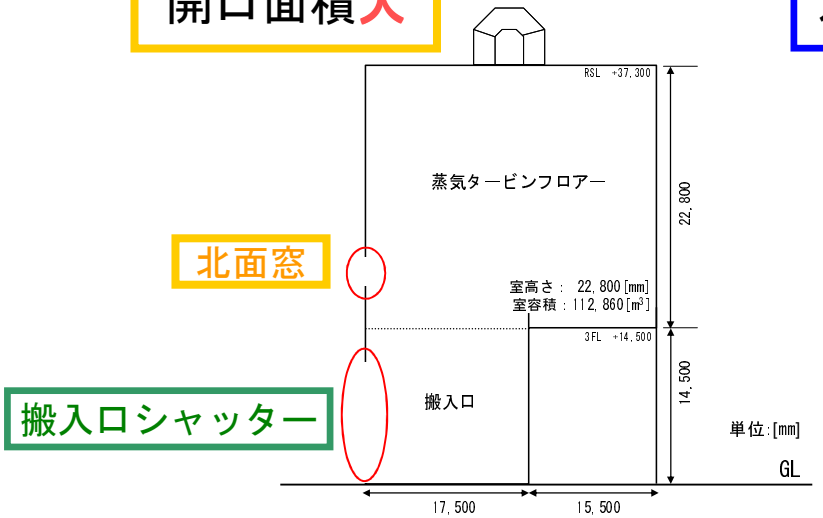
表４　解析case

解析case	北面窓開口面積[㎡]	流入量[m³/s] 北面窓	流入量[m³/s] 搬入口シャッター	水ミスト噴霧（搬入口シャッター）	水ミスト噴霧量[g/s]	壁面固定温度[℃] 東面	南面	西面	北面	床面	天井面
case1-1	0	0.00	171.49	×	－	42.54	40.93	40.50	40.26	45.03	45.03
case1-2		0.00	177.07	○	524.50	39.37	37.76	37.26	37.06	40.81	40.81
case2-1		11.68	165.58	×	－	42.54	40.93	40.50	40.26	45.03	45.03
case2-2		11.68	172.32	○	510.43	39.37	37.76	37.26	37.06	40.81	40.81
case3-1		26.43	153.32	×	－	42.54	40.93	40.50	40.26	45.03	45.03
case3-2		25.80	162.69	○	481.90	39.37	37.76	37.26	37.06	40.81	40.81
case4-1		39.49	142.34	×	－	42.54	40.93	40.50	40.26	45.03	45.03
case4-2		37.36	154.58	○	457.88	39.37	37.76	37.26	37.06	40.81	40.81
case5-1		52.47	131.28	×	－	42.54	40.93	40.50	40.26	45.03	45.03
case5-2		47.54	147.26	○	436.20	39.37	37.76	37.26	37.06	40.81	40.81
case6-1		56.42	126.65	×	－	42.54	40.93	40.50	40.26	45.03	45.03
case6-2		52.54	144.63	○	428.41	39.37	37.76	37.26	37.06	40.81	40.81

開口面積大

水ミスト噴霧有無

【噴霧時】



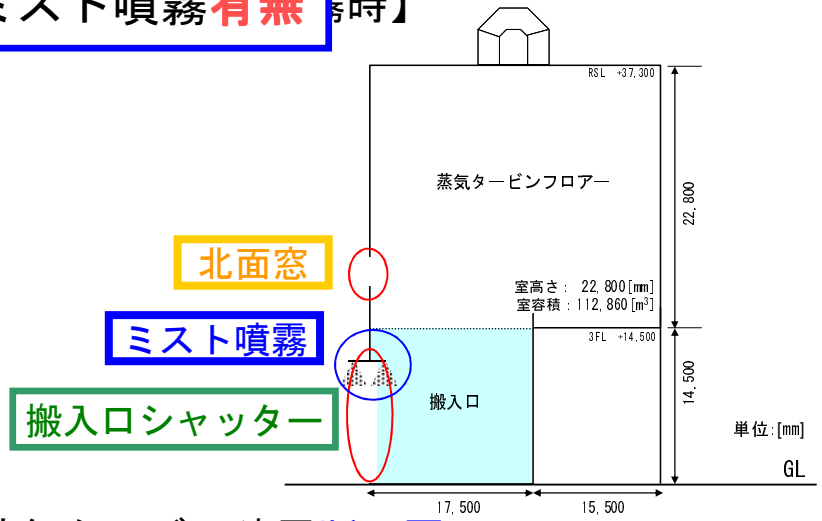


図　１・２号機蒸気タービン建屋断面図

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析

表４　解析case

解析case	北面窓開口面積[㎡]	流入量[m³/s] 北面窓	流入量[m³/s] 搬入口シャッター	水ミスト噴霧（搬入口シャッター）	水ミスト噴霧量[g/s]	壁面固定温度[℃] 東面	南面	西面	北面	床面	天井面
case1-1	0	0.00	171.49	×	－	42.54	40.93	40.50	40.26	45.03	45.03
case1-2		0.00	177.07	○	524.50	39.37	37.76	37.26	37.06	40.81	40.81
case2-1	[illegible]	11.68	165.58	×	－	42.54	40.93	40.50	40.26	45.03	45.03
case2-2		11.68	172.32	○	510.43	39.37	37.76	37.26	37.06	40.81	40.81
case3-1		26.43	153.32	×	－	42.54	40.93	40.50	40.26	45.03	45.03
case3-2		25.80	162.69	○	481.90	39.37	37.76	37.26	37.06	40.81	40.81
case4-1		39.49	142.34	×	－	42.54	40.93	40.50	40.26	45.03	45.03
case4-2		37.36	154.58	○	457.88	39.37	37.76	37.26	37.06	40.81	40.81
case5-1		52.47	131.28	×	－	42.54	40.93	40.50	40.26	45.03	45.03
case5-2		47.54	147.26	○	436.20	39.37	37.76	37.26	37.06	40.81	40.81
case6-1		56.42	126.65	×	－	42.54	40.93	40.50	40.26	45.03	45.03
case6-2		52.54	144.63	○	428.41	39.37	37.76	37.26	37.06	40.81	40.81

開口面積大

水ミスト噴霧有無

北面窓及び搬入口シャッターからの外気の流入量及び建屋の壁面固定温度は、熱負荷シミュレーションソフトTRNSYSにより算出した値を使用する。

北面窓

搬入口シャッター

水ミストを噴霧した場合には、搬入口シャッターから建屋内に流入する外気が、外気温と相対湿度から算出された湿球温度まで低下すると仮定し、解析を行う。

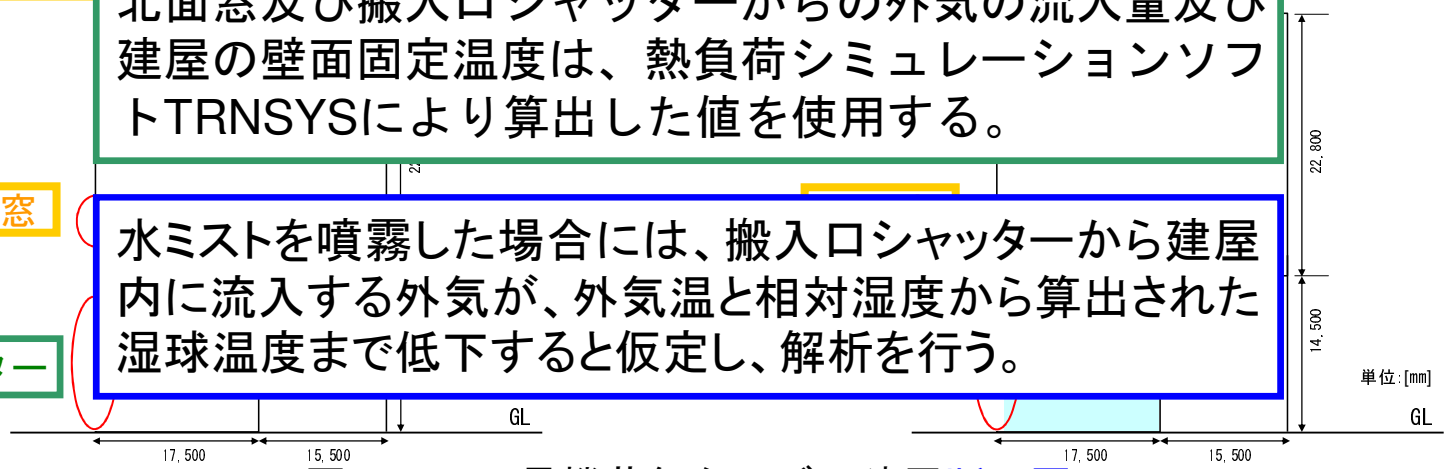


図　１・２号機蒸気タービン建屋断面図

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析

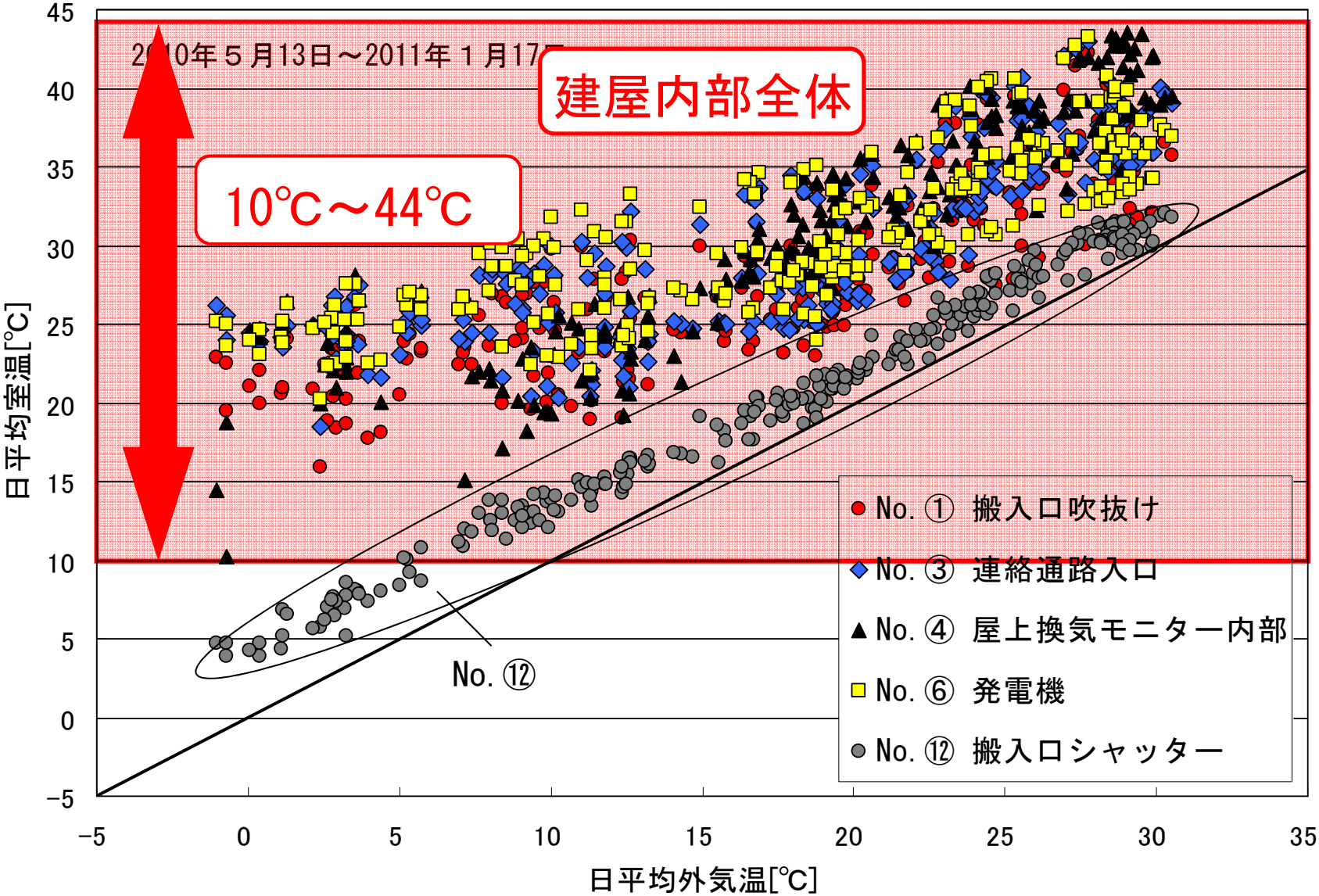


図12　代表的な測定点の日平均外気温と日平均室温の関係

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析

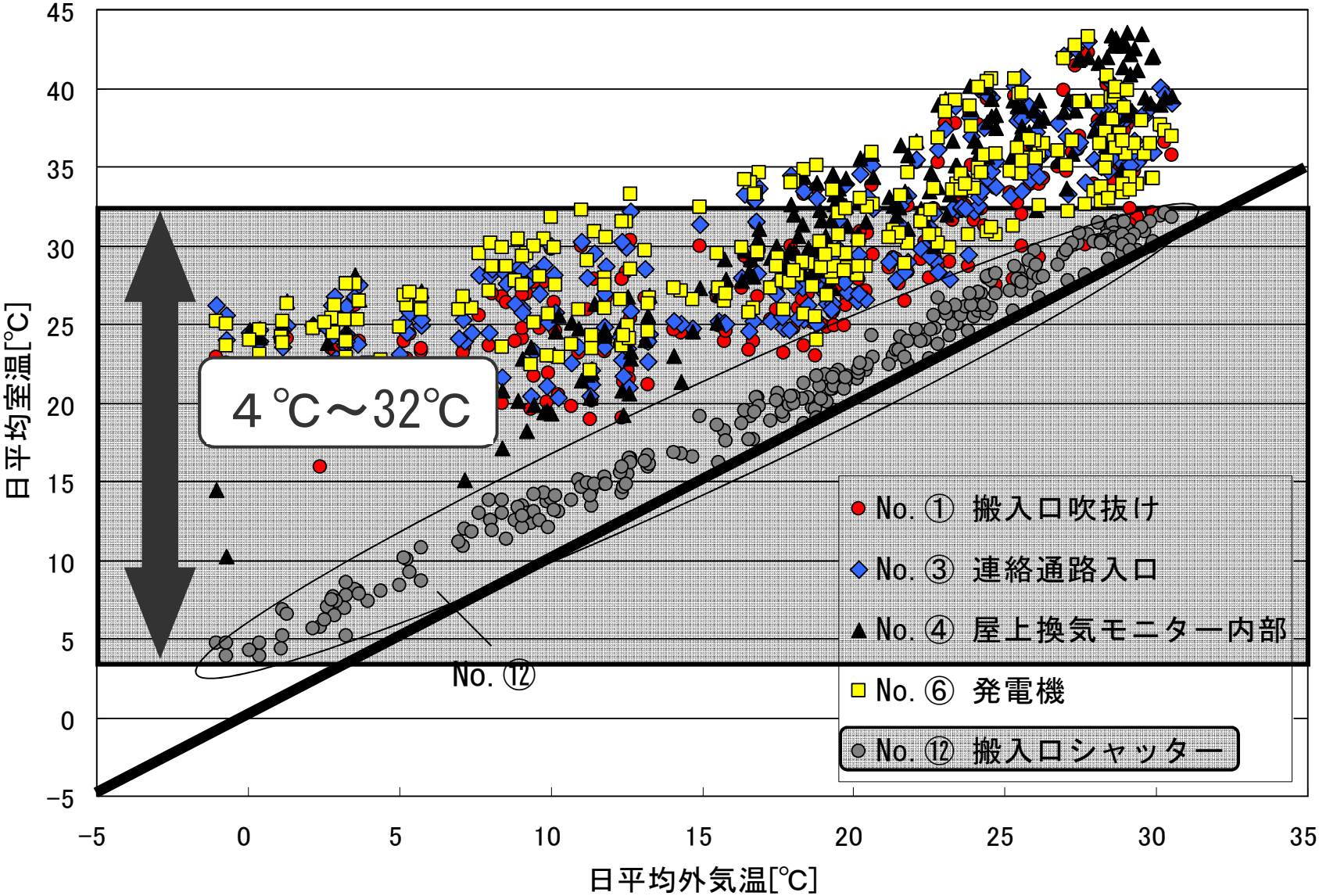


図12　代表的な測定点の日平均外気温と日平均室温の関係

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析

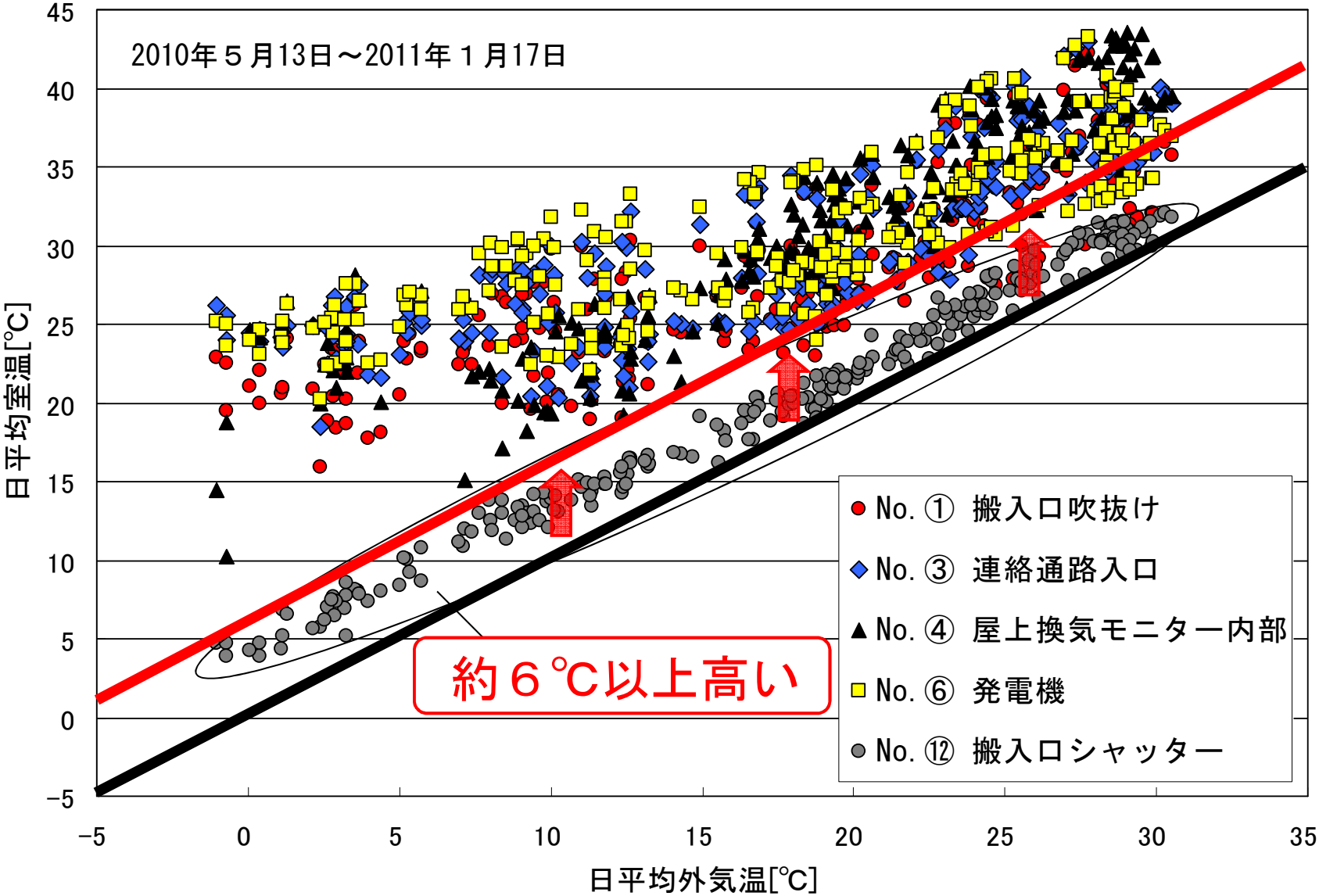


図12　代表的な測定点の日平均外気温と日平均室温の関係

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析

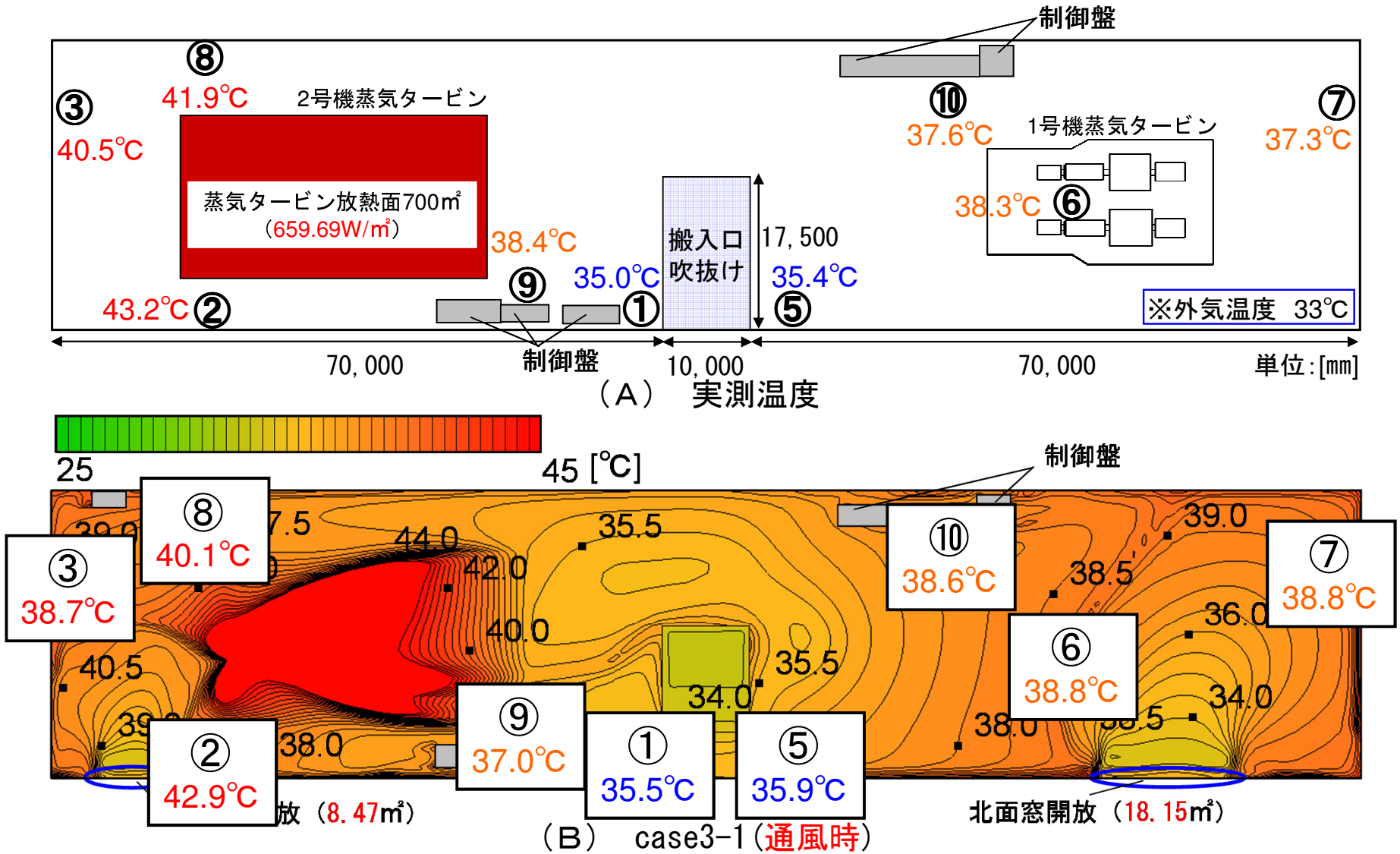
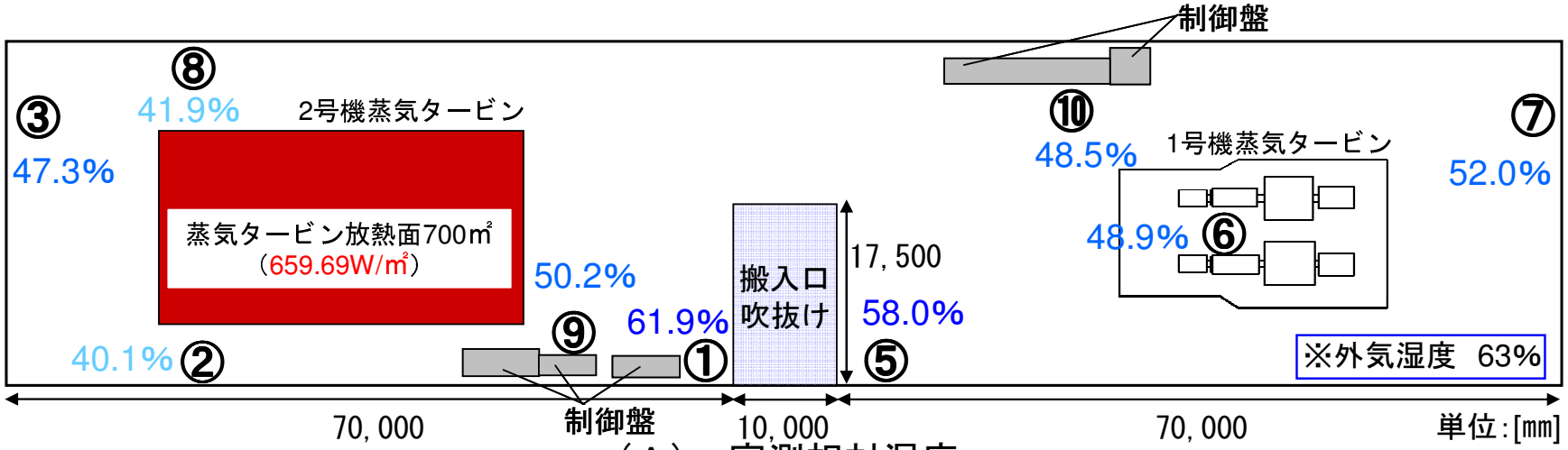
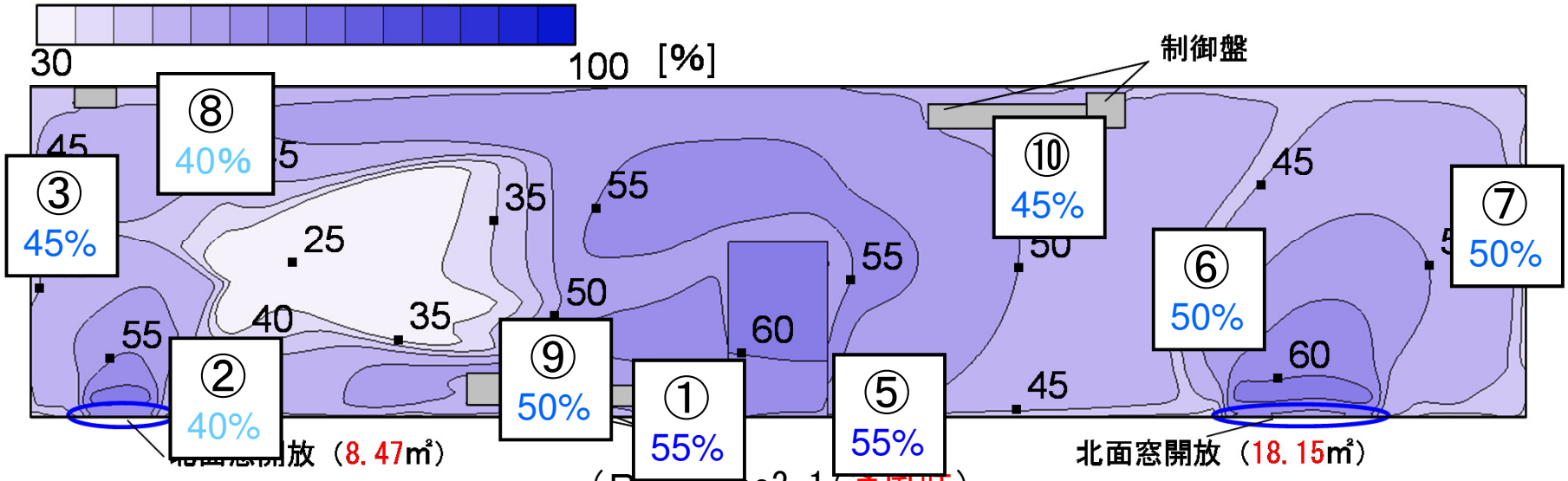


図15　case3-1及びcase3-2の３階床上1. 2m水平断面の解析結果及び実測値

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析



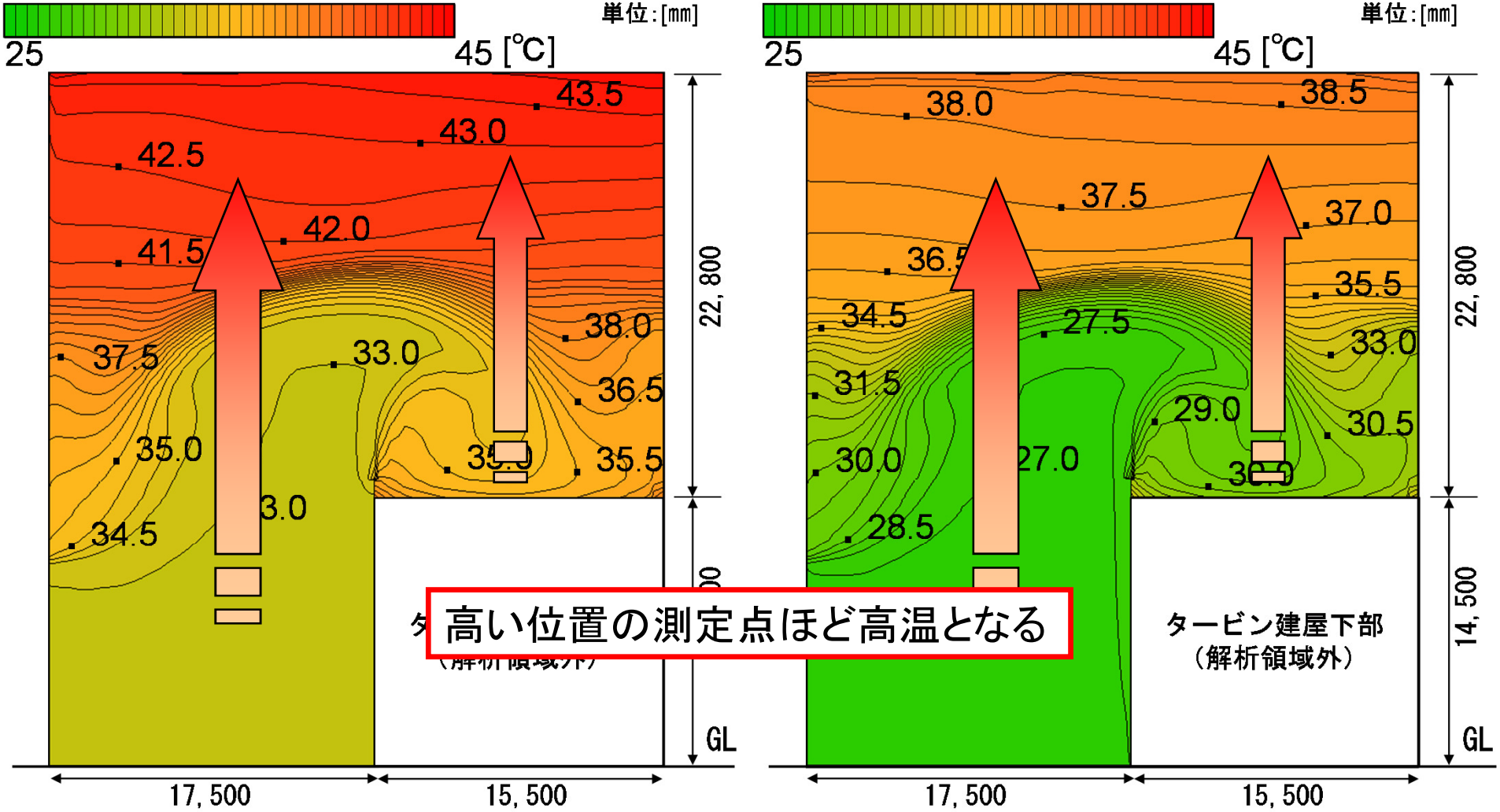
（A）　実測相対湿度



（B）　case3-1（通風時）

図15　case3-1及びcase3-2の３階床上1.2m水平断面の解析結果及び実測値

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析

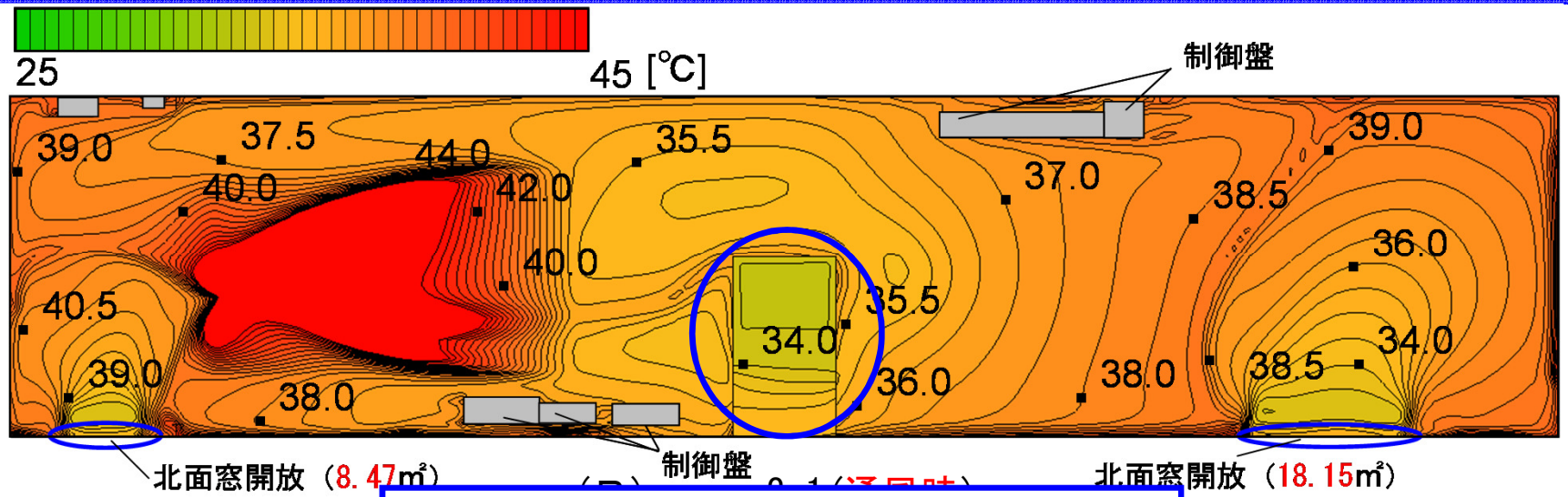


高い位置の測定点ほど高温となる

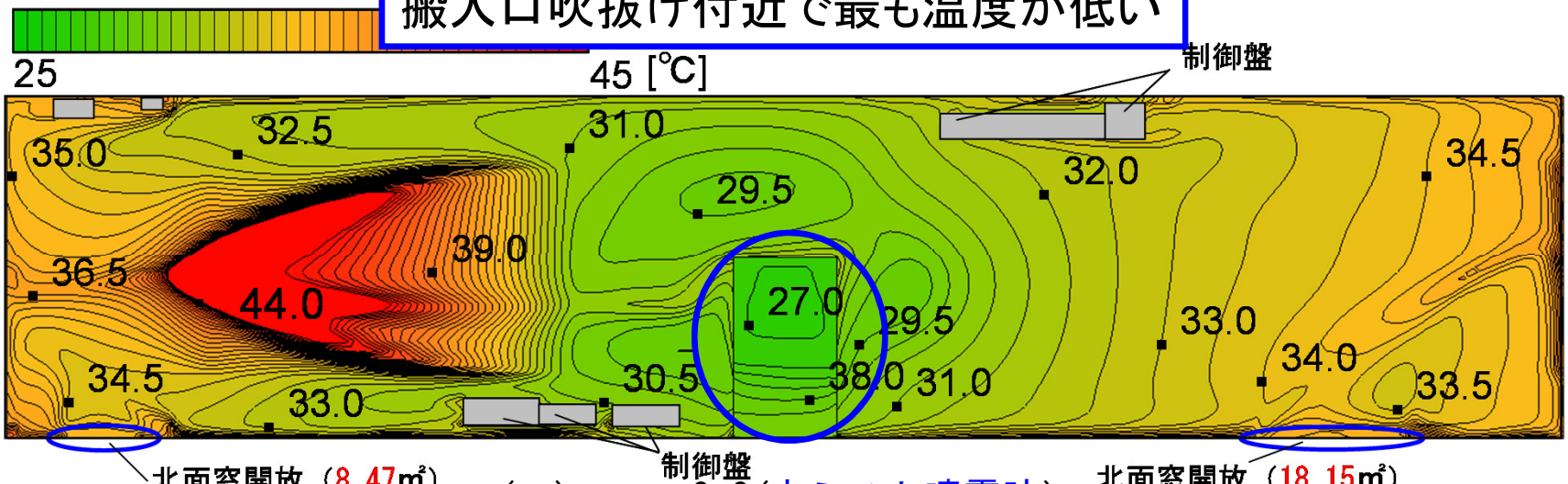
（A）　case3-1（通風時）　　（B）　case3-2（水ミスト噴霧時）

図13　case3-1及びcase3-2の搬入口中央部鉛直断面の解析結果

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析



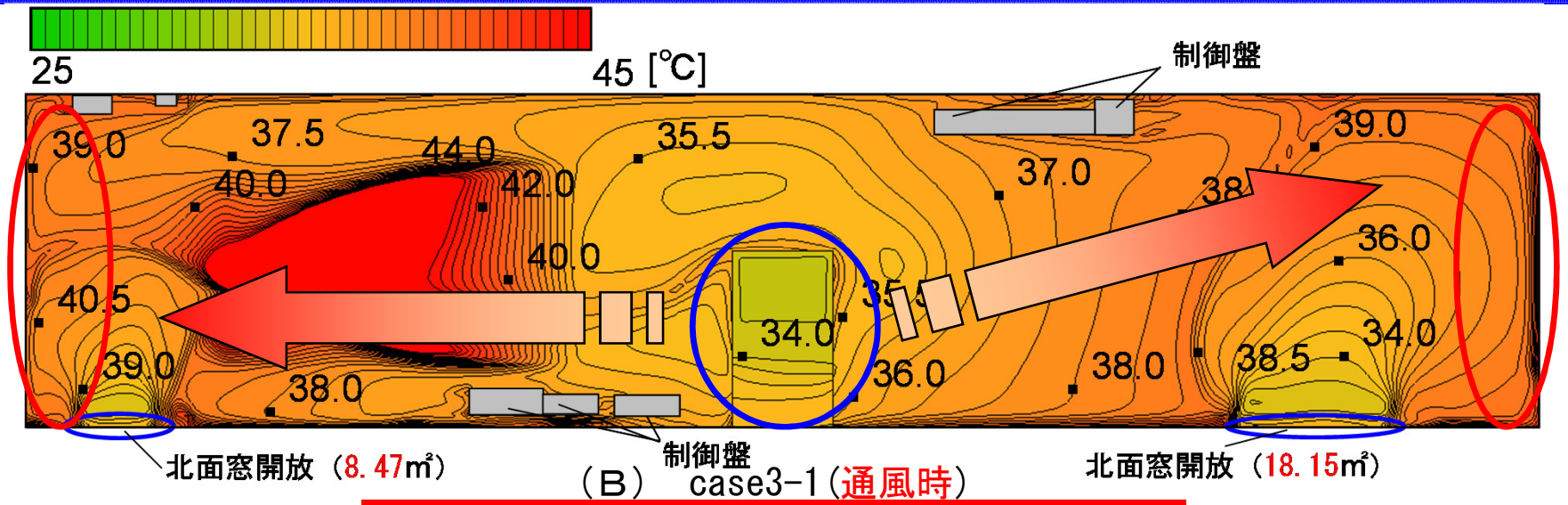
搬入口吹抜け付近で最も温度が低い



（C）　case3-2（水ミスト噴霧時）

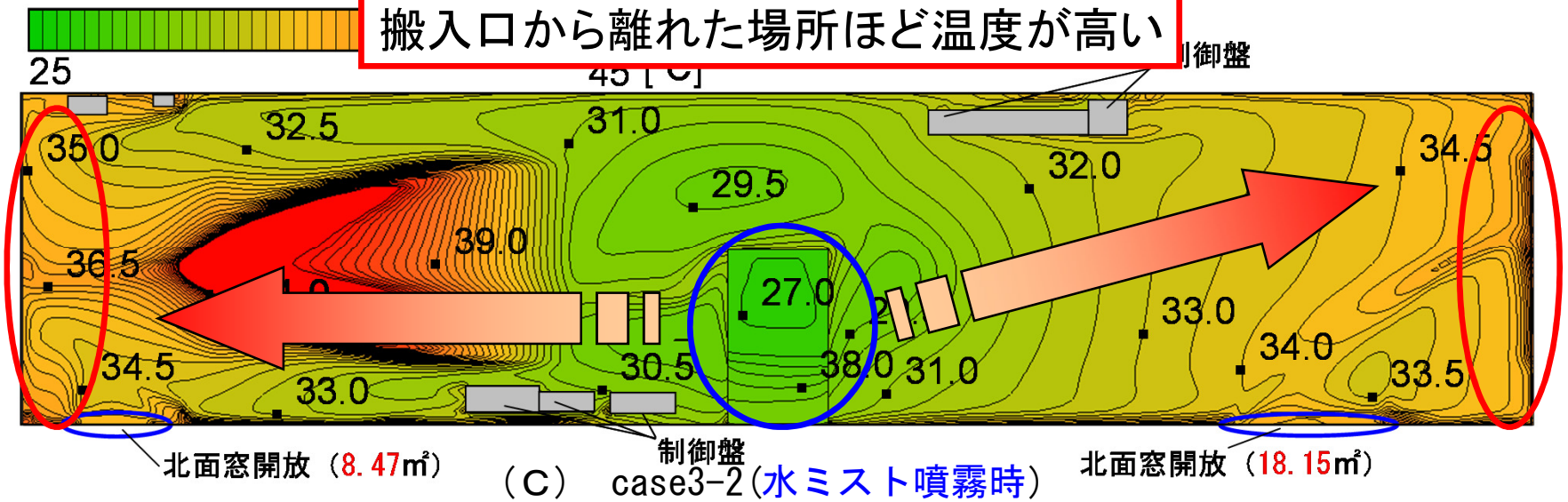
図15　case3-1及びcase3-2の３階床上1.2m水平断面の解析結果及び実測値

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析



（B）　case3-1（通風時）

搬入口から離れた場所ほど温度が高い



（C）　case3-2（水ミスト噴霧時）

図15　case3-1及びcase3-2の３階床上1.2m水平断面の解析結果及び実測値

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析

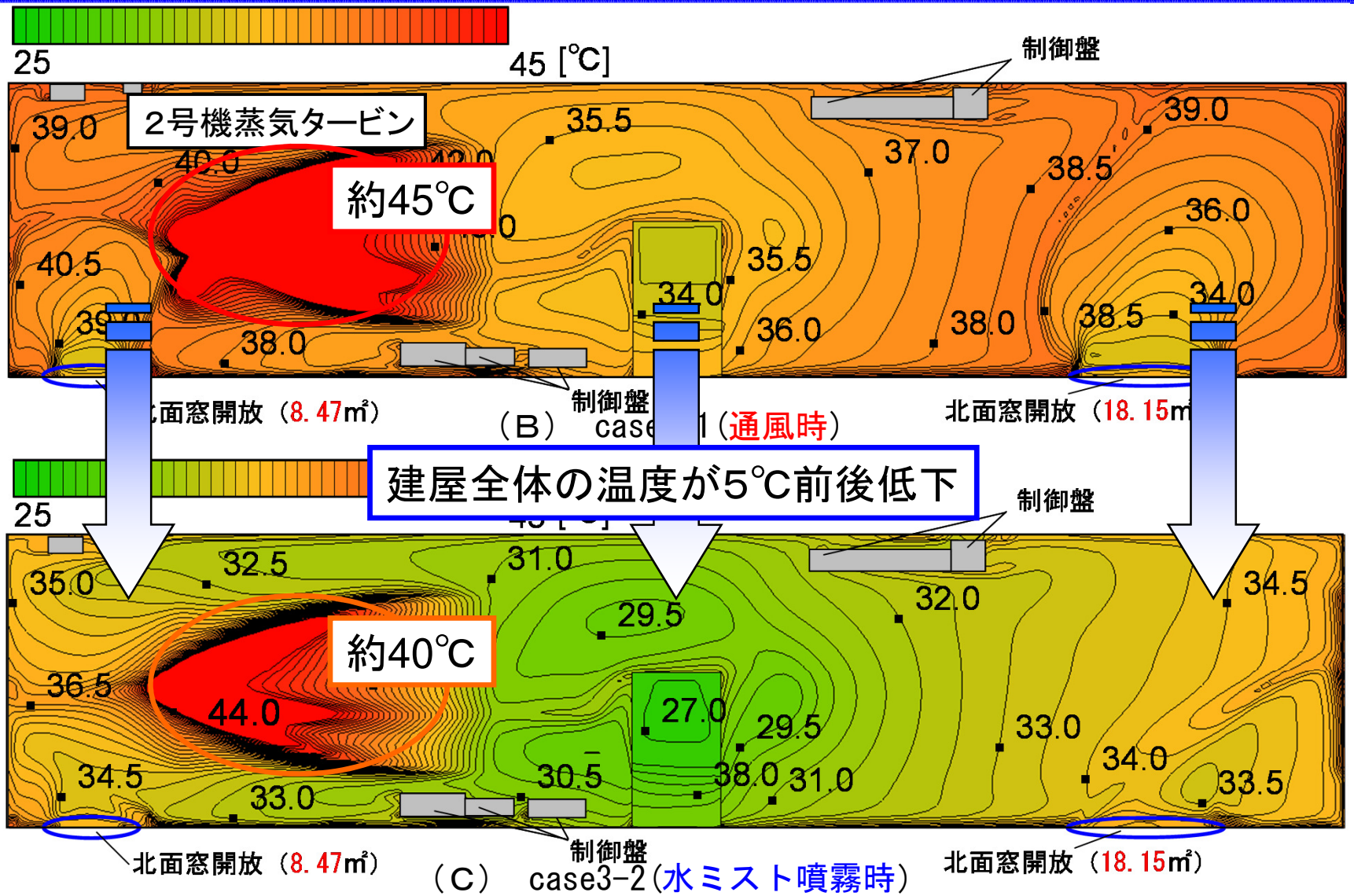
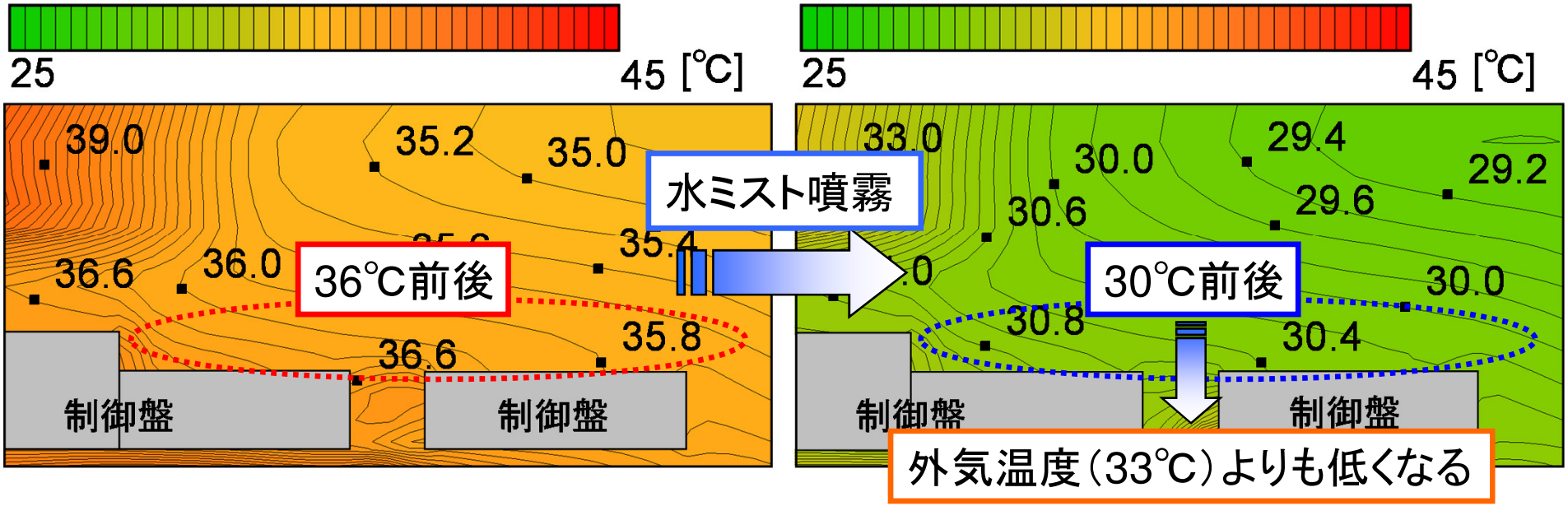


図15　case3-1及びcase3-2の３階床上1.2m水平断面の解析結果及び実測値

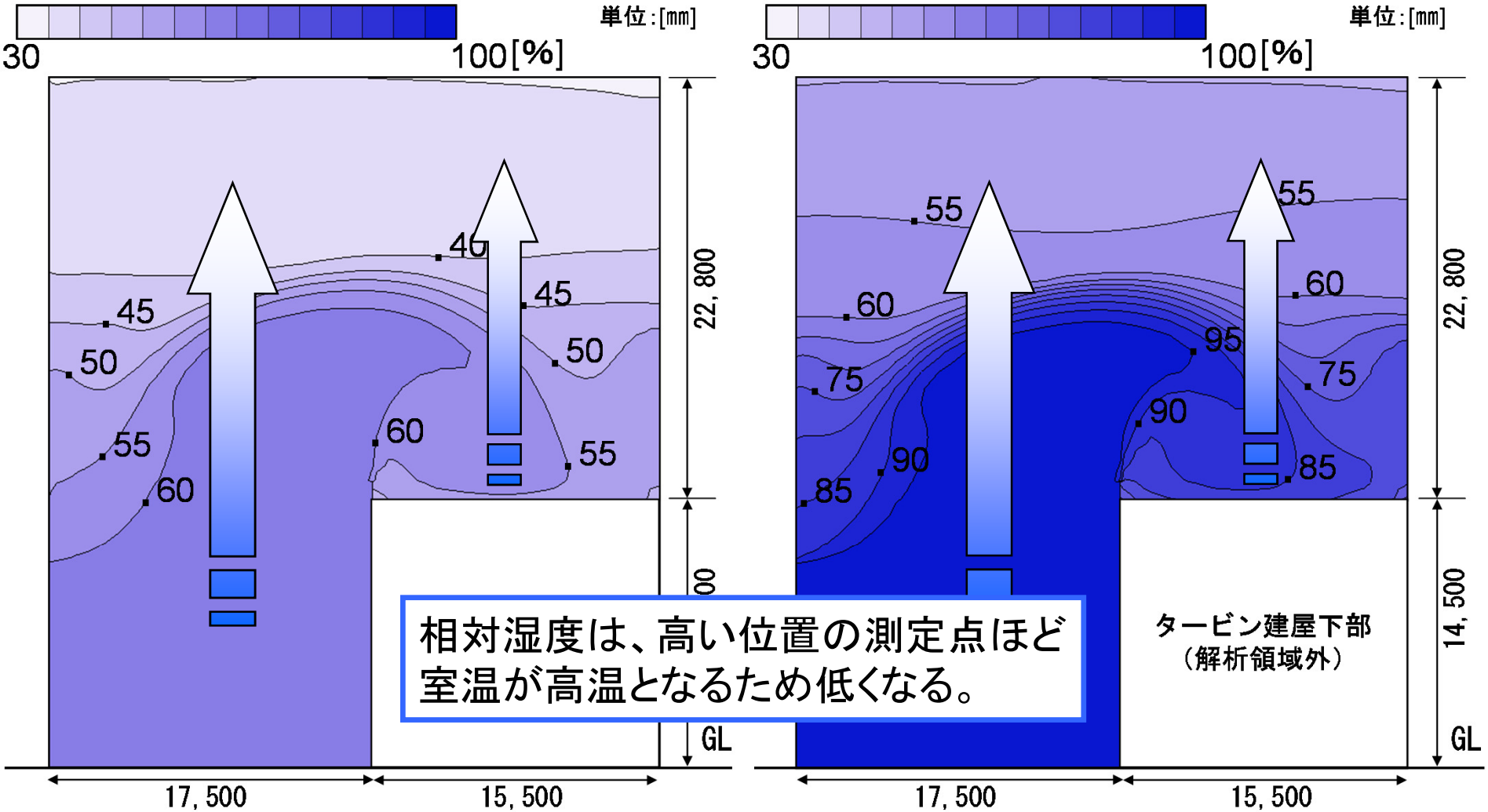
4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析



（A）　case3-1(通風時)　　（B）　case3-2(水ミスト噴霧時)

図16　case3-1及びcase3-2の３階床上1.2m水平断面の解析結果(制御盤付近)

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析

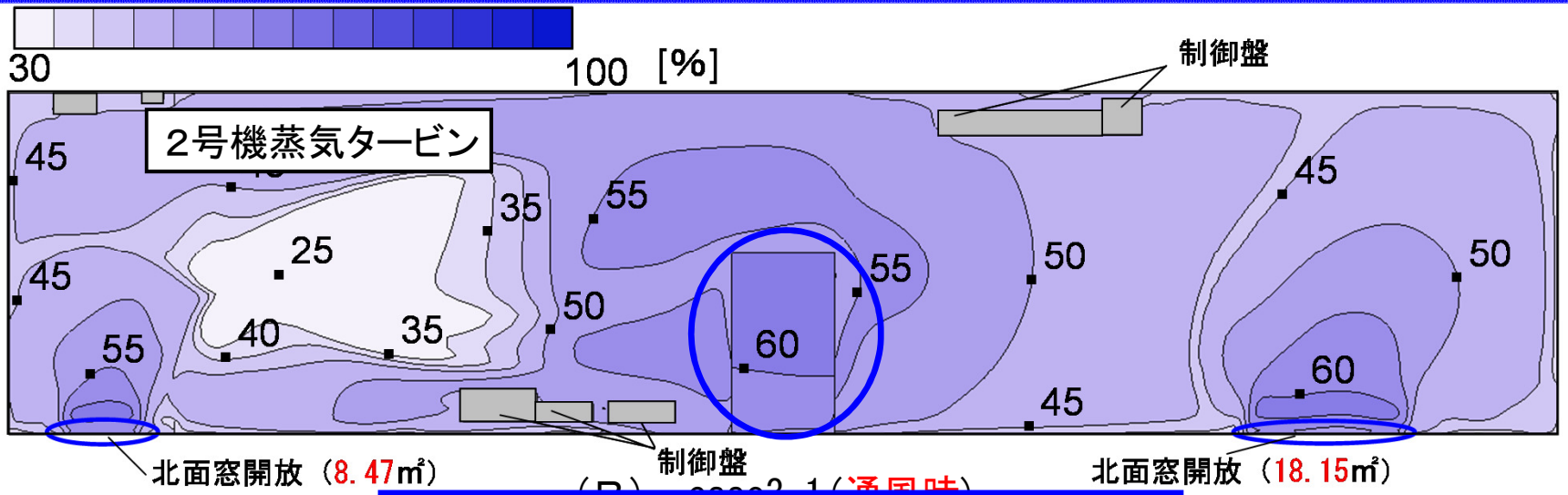


相対湿度は、高い位置の測定点ほど室温が高温となるため低くなる。

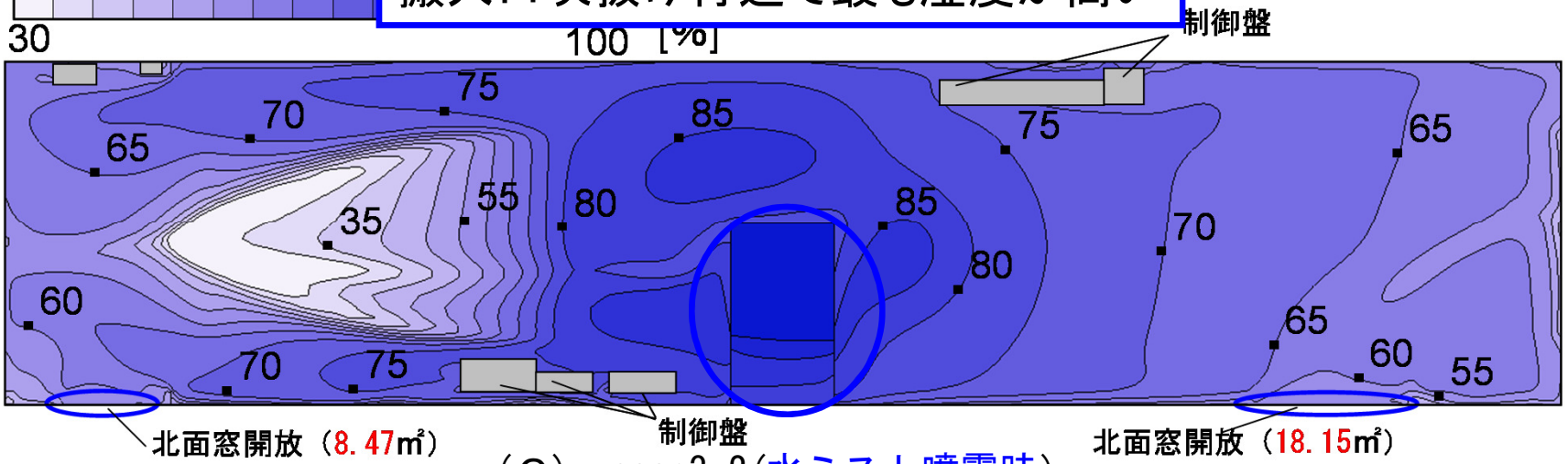
（A）　case3-1（通風時）　　（B）　case3-2（水ミスト噴霧時）

図13　case3-1及びcase3-2の搬入口中央部鉛直断面の解析結果

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析



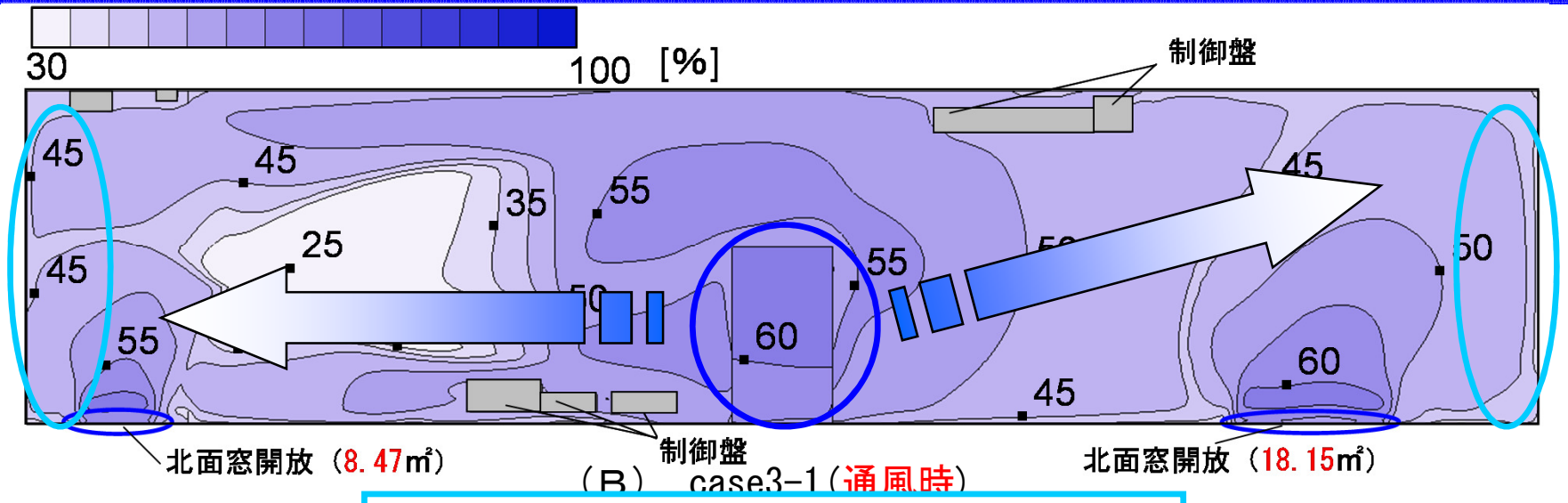
搬入口吹抜け付近で最も湿度が高い



（C）　case3-2（水ミスト噴霧時）

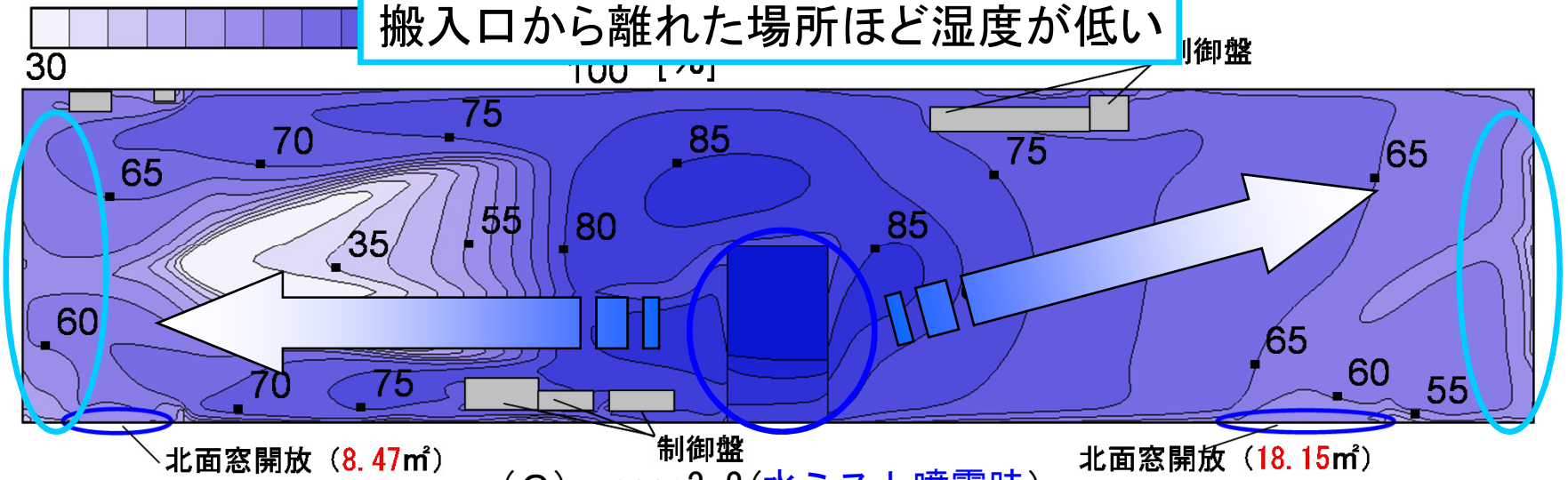
図15　case3-1及びcase3-2の３階床上1.2m水平断面の解析結果及び実測値

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析



（B）　case3-1（通風時）

搬入口から離れた場所ほど湿度が低い



（C）　case3-2（水ミスト噴霧時）

図15　case3-1及びcase3-2の３階床上1.2m水平断面の解析結果及び実測値

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析

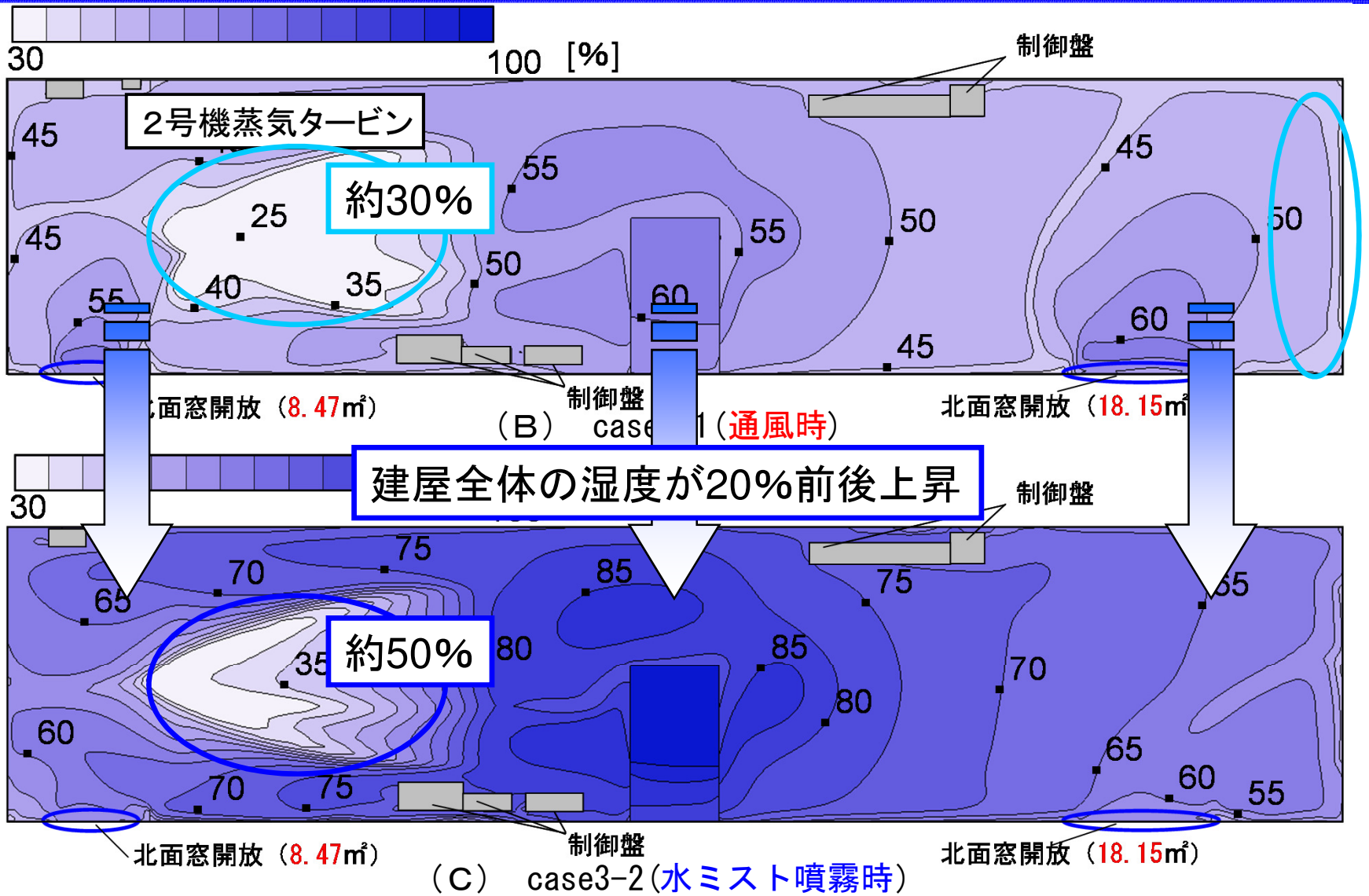
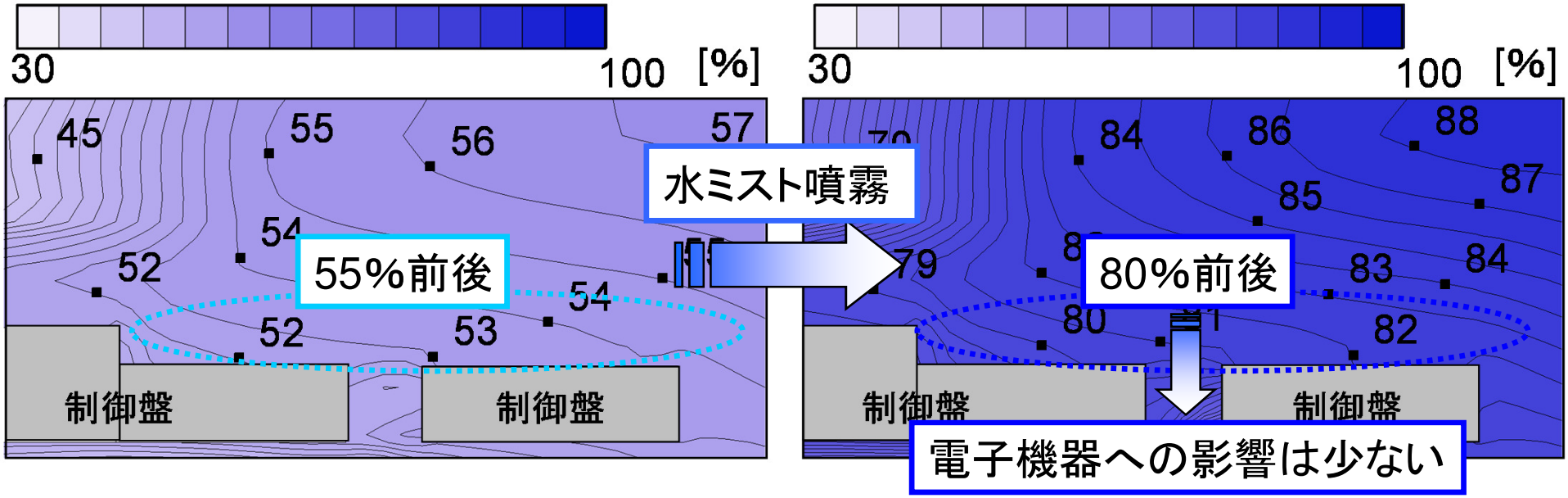


図15　case3-1及びcase3-2の３階床上1.2m水平断面の解析結果及び実測値

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析



（A）　case3-1（通風時）　　（B）　case3-2（水ミスト噴霧時）

図16　case3-1及びcase3-2の３階床上1.2m水平断面の解析結果（制御盤付近）

5　結論

5　結論

（１）全国の屋外における水ミスト噴霧の有効性

①水ミスト噴霧による累積削減可能温度差は北海道から南下するに従い、相対的に大きくなる。また、平野部では大きく、山間部では小さい。

②北海道や東北地方では、水ミスト噴霧による累積削減可能温度差が小さく、大きな環境改善効果は期待できない。東京、前橋、名古屋、京都、大阪、福岡といった平野部の都市では、累積削減可能温度差が大きいため、水ミスト噴霧による環境改善効果が十分に期待できる。

（２）工場内における水ミスト噴霧の温度低下効果

①水ミスト噴霧により２℃前後の温度低下が得られる。

②水ミスト噴霧装置に近い測定点ほど、相対湿度・絶対湿度が上昇し、温度低下効果が大きい。

③水ミスト噴霧により湿度は60%程度まで上昇するが、生産機械に与える相対湿度上昇の影響は少ない。

（３）数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境の解析

①実測の結果、どの測定点においても外気温の上昇に伴い室温も上昇する。

②水ミスト噴霧により、通風時に比較して建屋全体の温度を５℃程度低下させることが可能である。

③水ミスト噴霧により、通風時に比較して建屋全体の湿度が20%前後上昇するが、制御盤付近での湿度は80%前後であり電子機器への影響は少ない。

3　工場内における水ミスト噴霧の温度低下効果

- ミストノズルは計９個設置する。
- ミストノズル１個あたりのミスト噴霧量は概ね3.7g/sである。

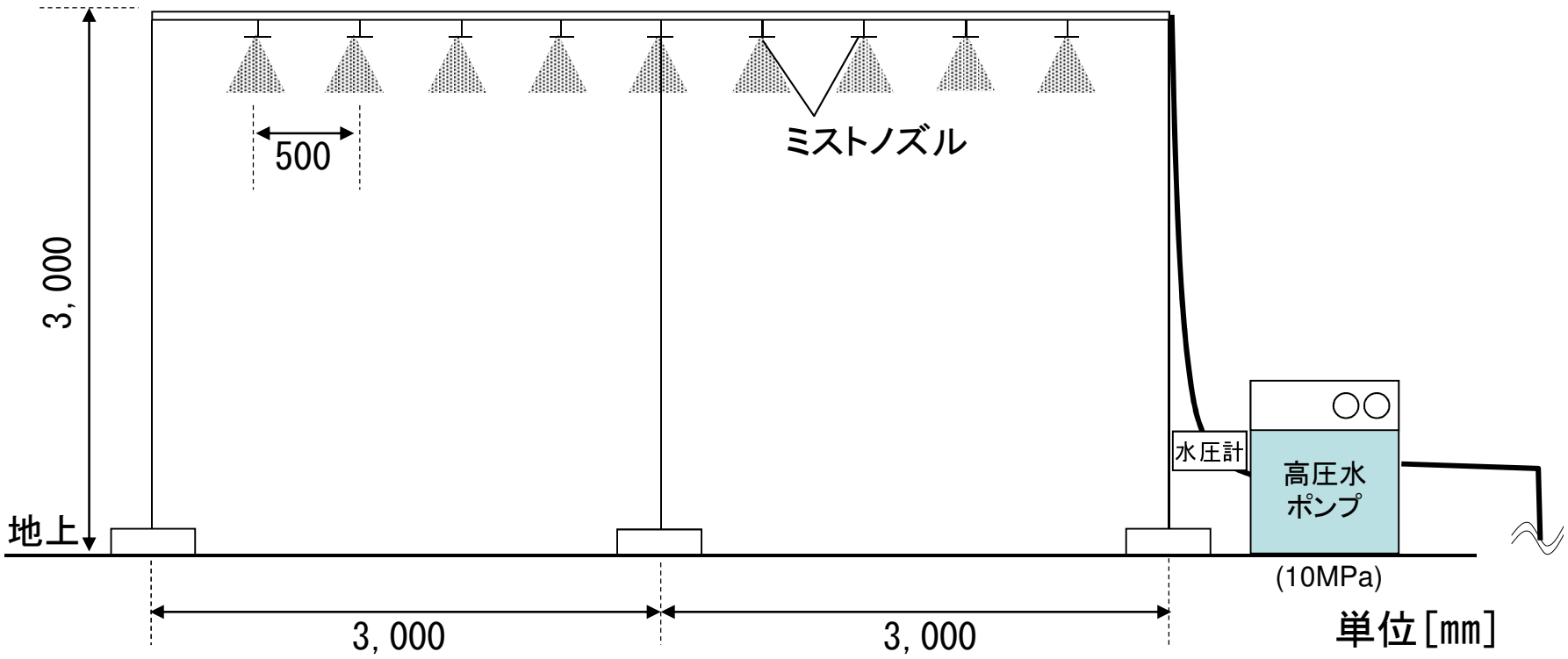


図５　水ミスト噴霧装置の概要

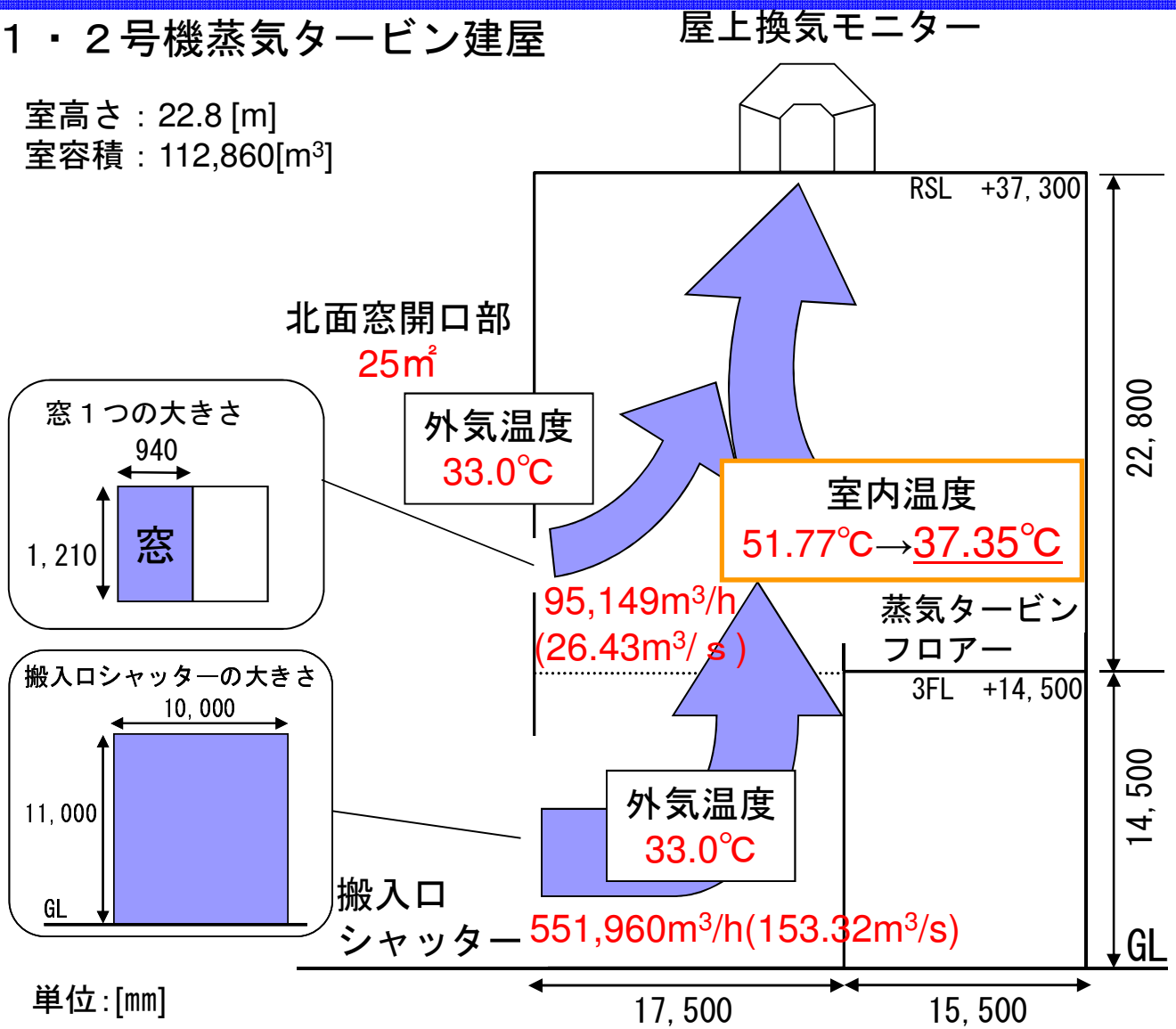


図11　建屋内の換気状況　-（ｉ）case3-1（通風時）-

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析

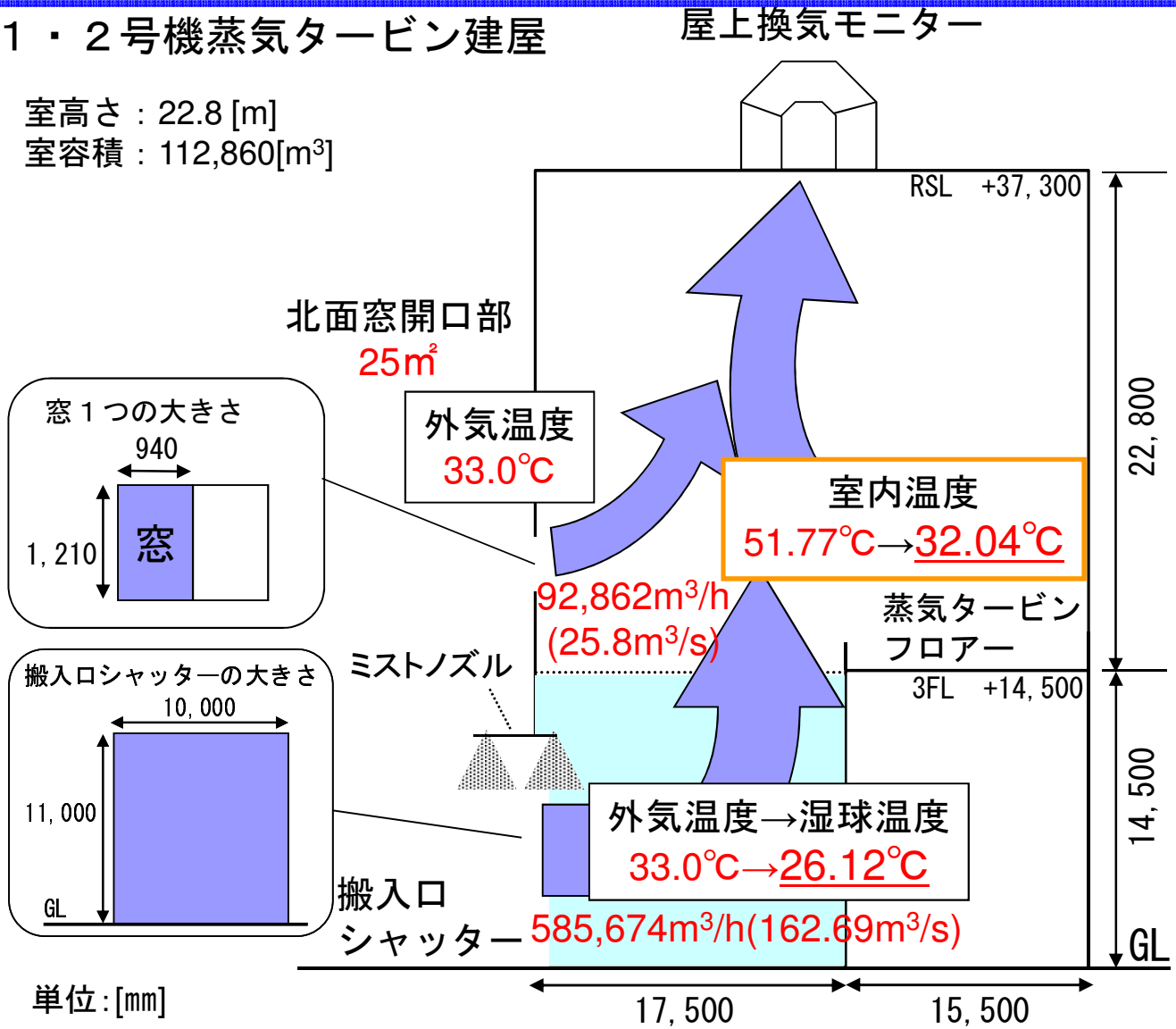


図11　建屋内の換気状況　-（ⅱ）case3-2（水ミスト噴霧時）-

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析

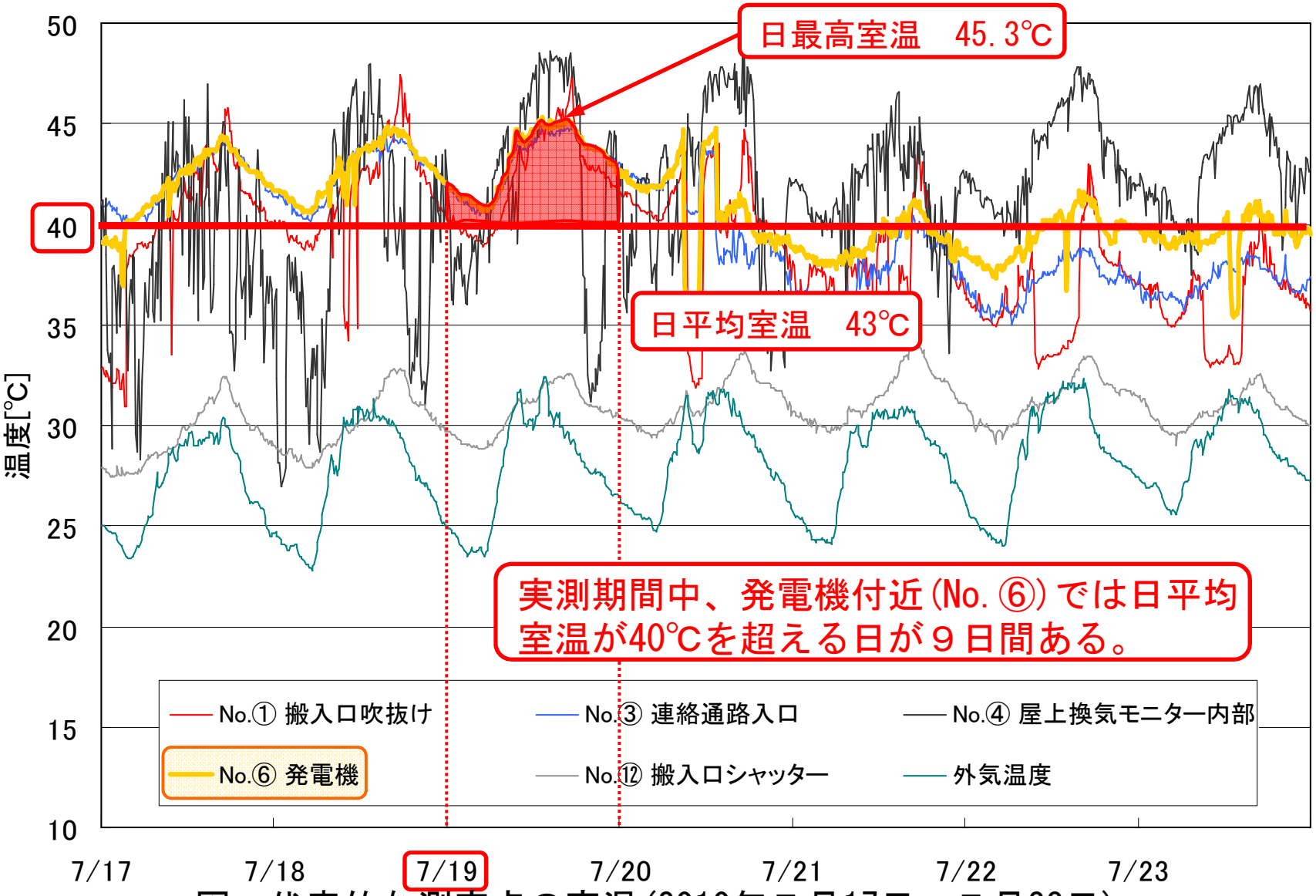
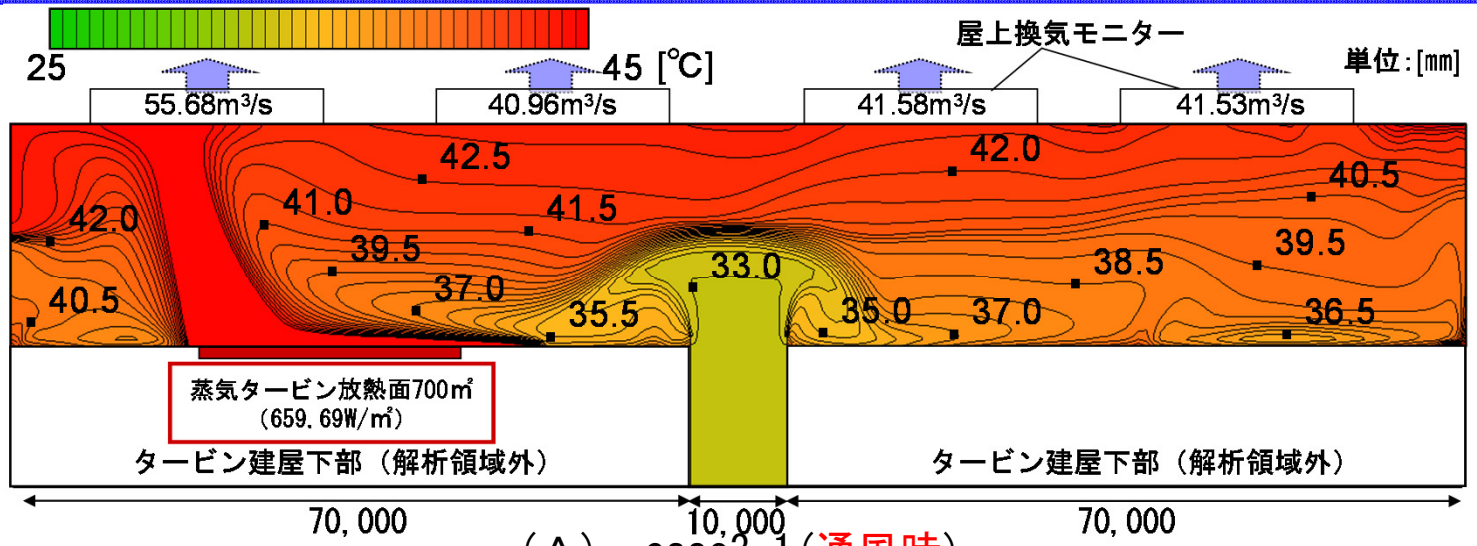
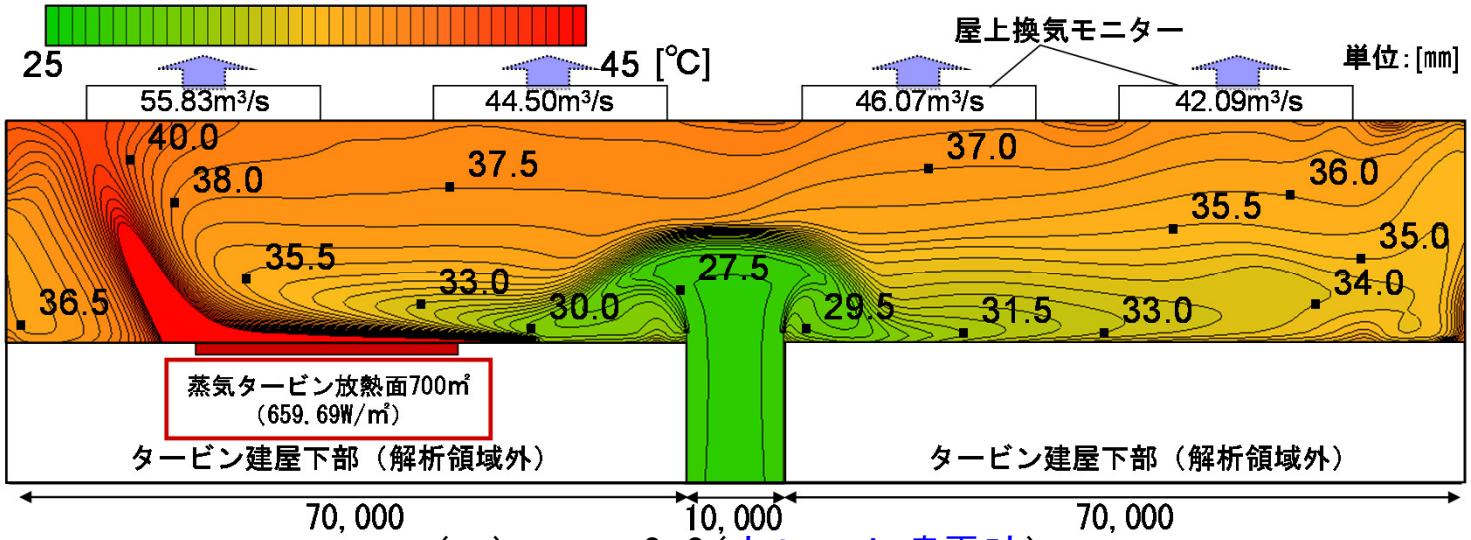


図　代表的な測定点の室温(2010年７月17日～７月23日)

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析



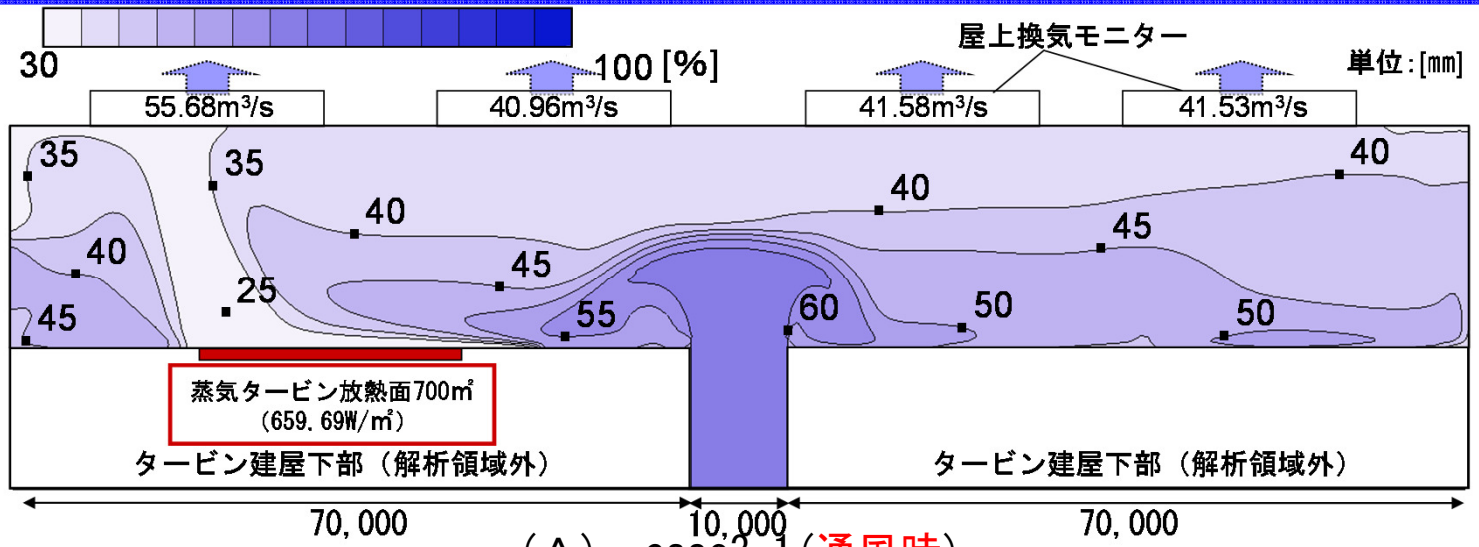
（A）　case3-1（通風時）



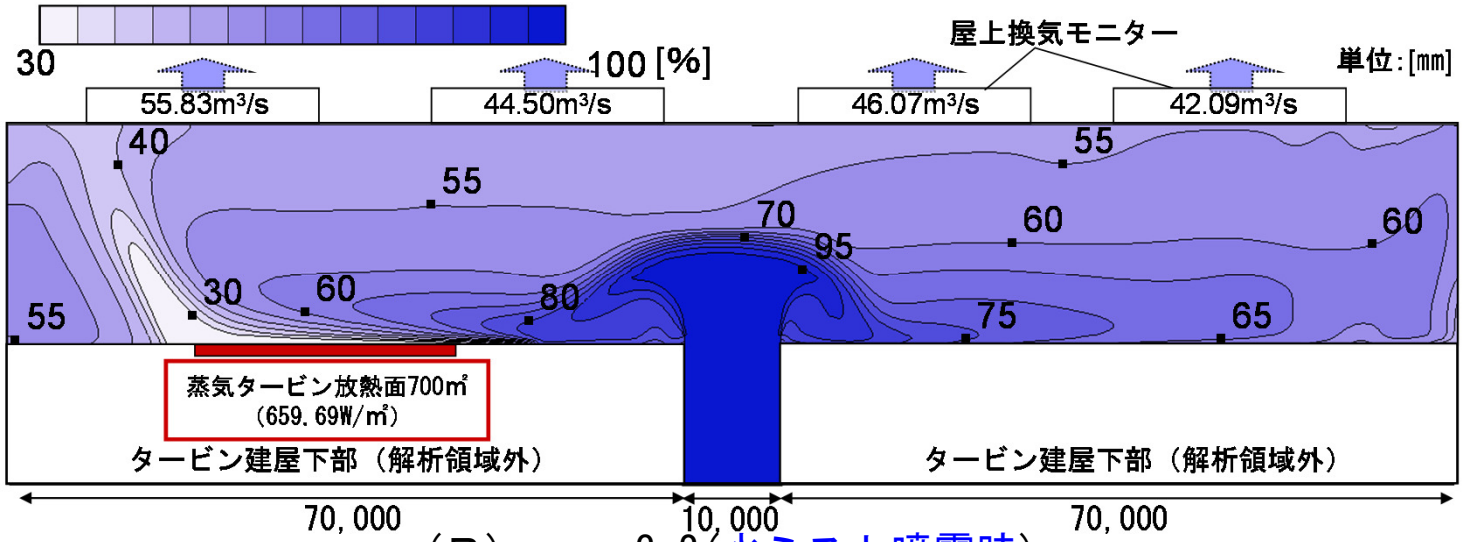
（B）　case3-2（水ミスト噴霧時）

図14　case3-1及びcase3-2の屋上換気モニター中央部鉛直断面の解析結果

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析



（A）　case3-1（通風時）



（B）　case3-2（水ミスト噴霧時）

図14　case3-1及びcase3-2の屋上換気モニター中央部鉛直断面の解析結果

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析

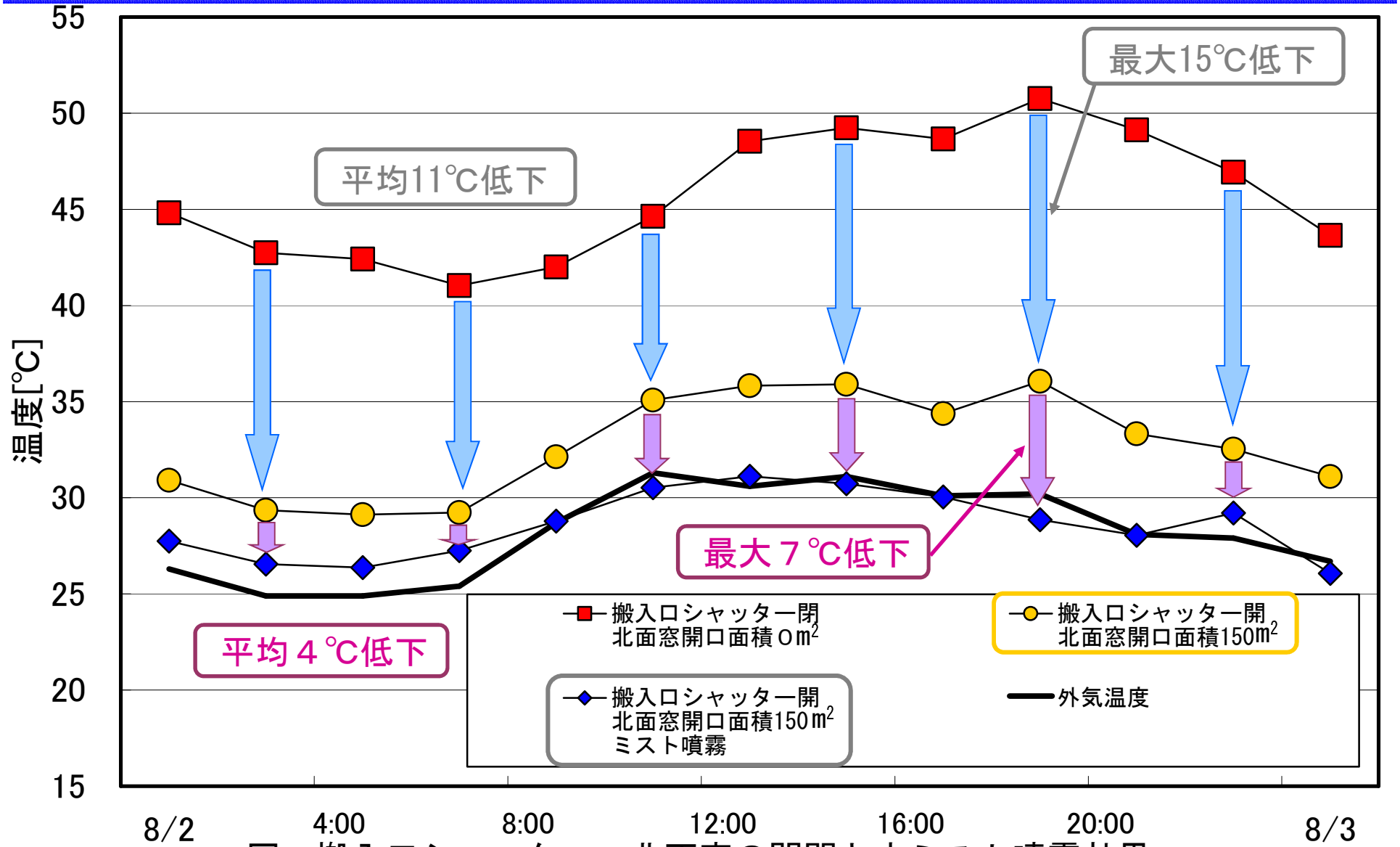


図　搬入口シャッター・北面窓の開閉と水ミスト噴霧効果

＊　図は２時間ごとの値

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析

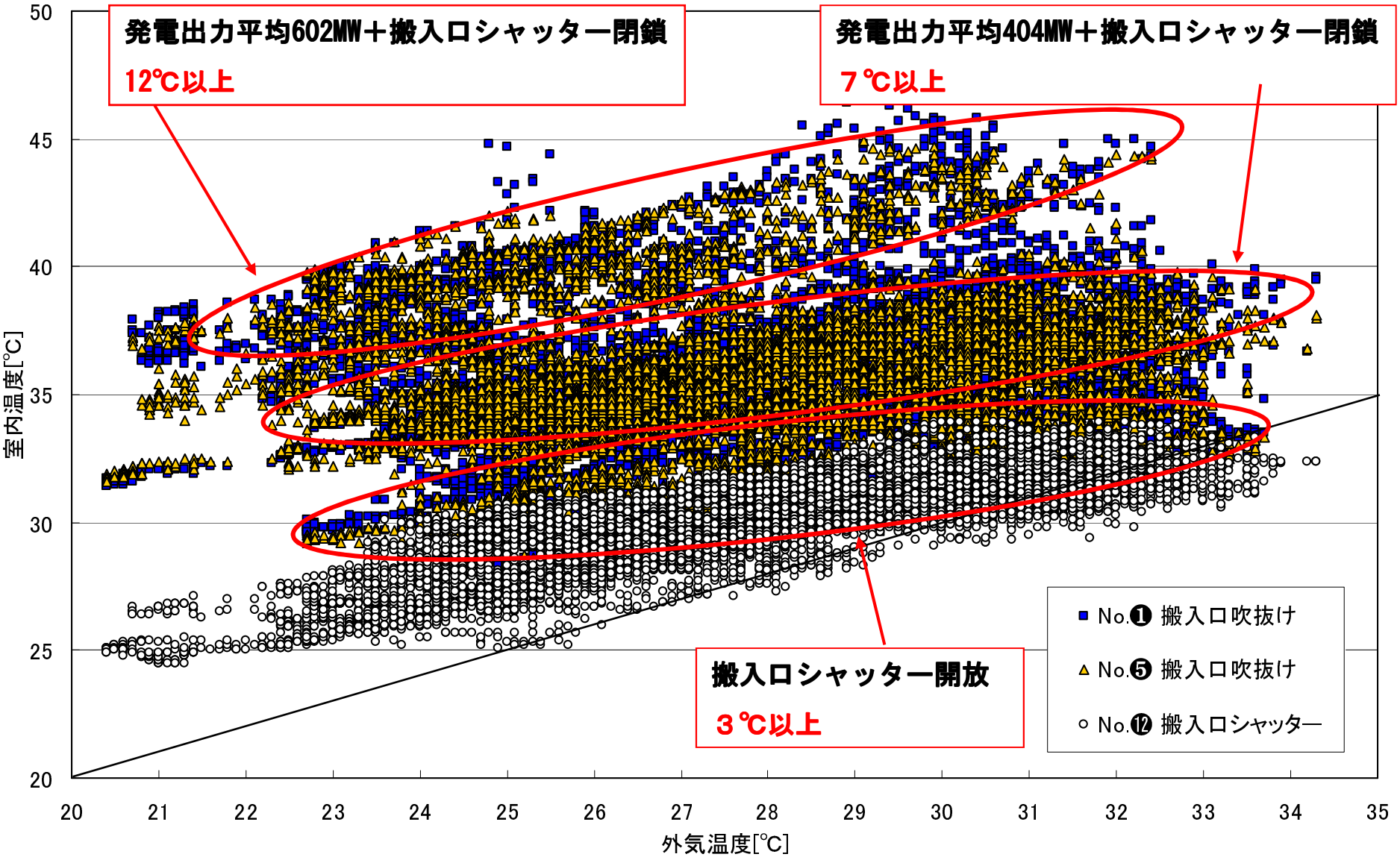
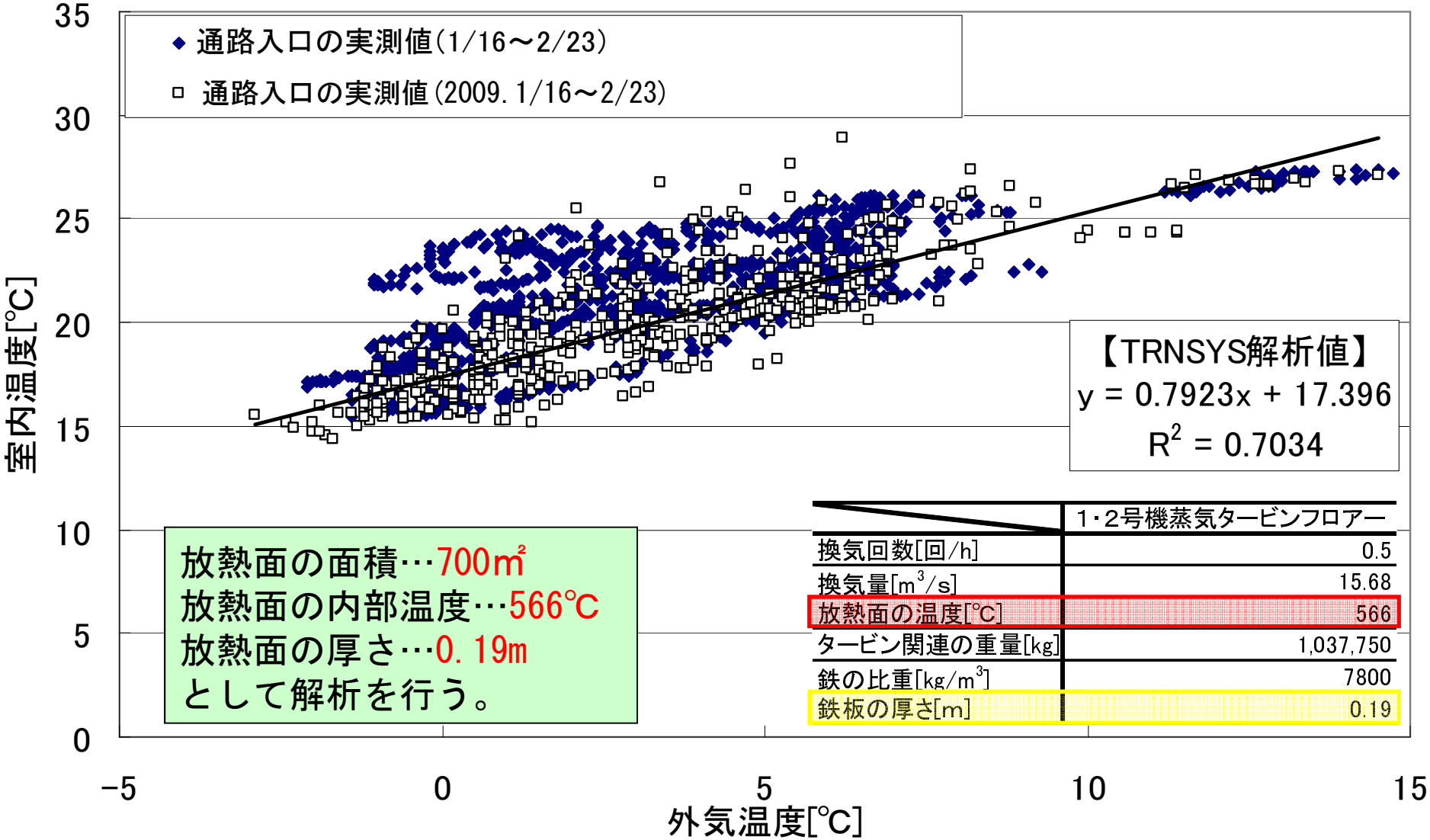


図　外気温度と室内温度の関係（2010年５月13日～10月22日）

※10分ごとにプロット

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析



放熱面の面積…700㎡
放熱面の内部温度…566℃
放熱面の厚さ…0.19m
として解析を行う。

	1・2号機蒸気タービンフロアー
換気回数[回/h]	0.5
換気量[m^3/s]	15.68
放熱面の温度[℃]	566
タービン関連の重量[kg]	1,037,750
鉄の比重[kg/m^3]	7800
鉄板の厚さ[m]	0.19

図　TRNSYSによる解析値(放熱面の面積700㎡)と実測値の比較

4　数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境解析

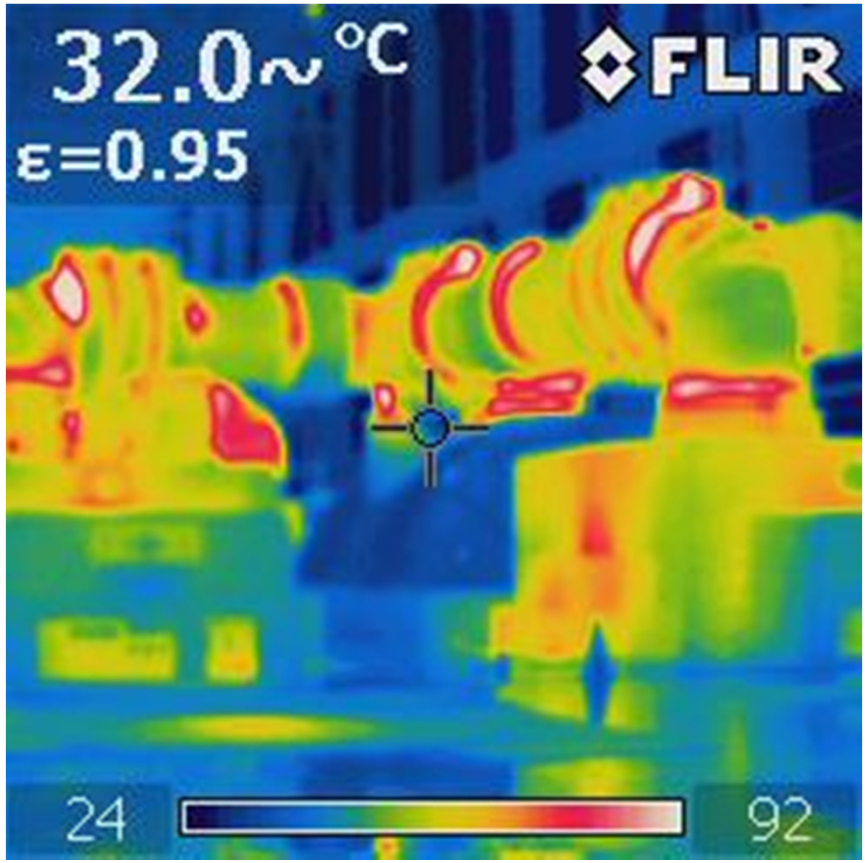


図　発電機の発熱状況