

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

峯田雅人
 指導教員 赤林伸一教授

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。近年開発された噴霧装置は、ミスト粒子の粒径が $4\mu\text{m}$ 程度と小さいため蒸発が速く、着衣や室内を濡らすことなく噴霧することができる。文献1)では空調機付きダクトを作成し、ダクト内で水ミストを噴霧したときの温度低下に関する実験を行い、水ミスト噴霧前の温湿度と湿球温度、水ミスト噴霧後の温湿度が空気線図上で一直線上に表示され、噴霧量に応じて湿球温度まで任意の温度低下を得ることが可能であることを明らかにしている。

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。

本研究では、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、水ミスト噴霧による温度低下効果を、冷房することが困難と考えられてきた大空間に適応することにより、夏季の温熱環境改善の効果を明らかにする。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

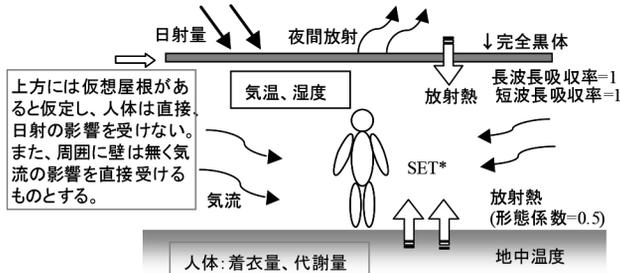


図1 人体が屋外気象条件から受ける影響

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

2.1 解析概要

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。解析に用いる気温、湿度、気流速度、日射量等は標準年の気象データ（1時間毎）を使用する。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。「外気温 30°C 以上かつ外気温と湿球温度の差が 4°C 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。また、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。そこで、SET*による検討を行う。水ミストを噴霧した場合

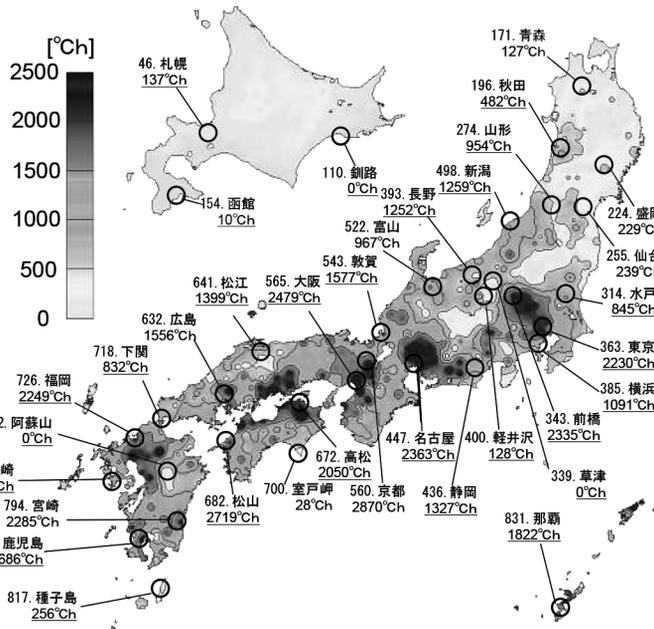


図2 水ミスト噴霧による累積削減可能温度差マップ

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。

SET*を算出する際には、文献2)の方法を用いる。図1に人体が屋外気象条件から受ける影響を示す。人体の上方には仮定の屋根(完全黒体:長波長・短波長吸収率=1)を想定し、直接、人体は日射の影響を受けないと仮定する。放射熱は、屋根面、地面の形態係数をそれぞれ0.5として算出する。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直接受けるものとする。SET*を算出する際の気流速度は、人体周辺の熱対流を考慮し、不感気流の限度として最小風速を0.3m/sとし、1/4乗則により人体の呼吸域付近である地上高さ1.5mに換算した値を用いる。SET*の算出は非暖房期間、非就寝時を対象とする。非暖房期間は日平均気温が18を上回る期間、非就寝時は6時~23時と定義する。表1にSET*の解析条件を示す。

2.2 解析結果

図2に「外気温度30以上かつ外気温度と湿球温度の差が4以上」を条件とした累積削減可能温度差マップを示す。北海道や東北地方では夏季でも外気温が低いため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。標高が高い都市でも外気温が低いため、累積削減可能温度差が小さくなる。草津や軽井沢では、同じ県の前橋、

長野より累積削減可能温度差が小さく、草津では0h、軽井沢では128hとなる。九州でも阿蘇山のように山間部では、累積削減可能温度差は小さくなる。また、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。

図3に水ミスト噴霧の有無によるSET*の温度差から求めた累積削減可能SET*温度差マップを示す。北海道から南下するに従い、累積削減可能SET*温度差は相対的に大きくなる。標高が高い都市や山間部では累積削減可能SET*温度差は小さくなる。累積削減可能SET*温度差は、北海道では2,500h前後、東北では3,500h前後、関東では5,000~7,000h、中部では6,000~9,000h、近畿、中国、四国では5,000~8,000h、九州、沖縄では7,000~15,000hの範囲に分布している。

3 工場内における水ミスト噴霧の温度低下効果

3.1 実験概要

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。工場の搬入口付近に水ミスト噴霧装置を設置し、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。図4に対象工場平面の概要及び温湿度測定点を示す。室内に7点、室外(日陰)に2点、計9点の温湿度記録計を床上1.2mの位置に設置し、水ミスト噴霧前後の温湿度変化より水ミスト噴霧の効果

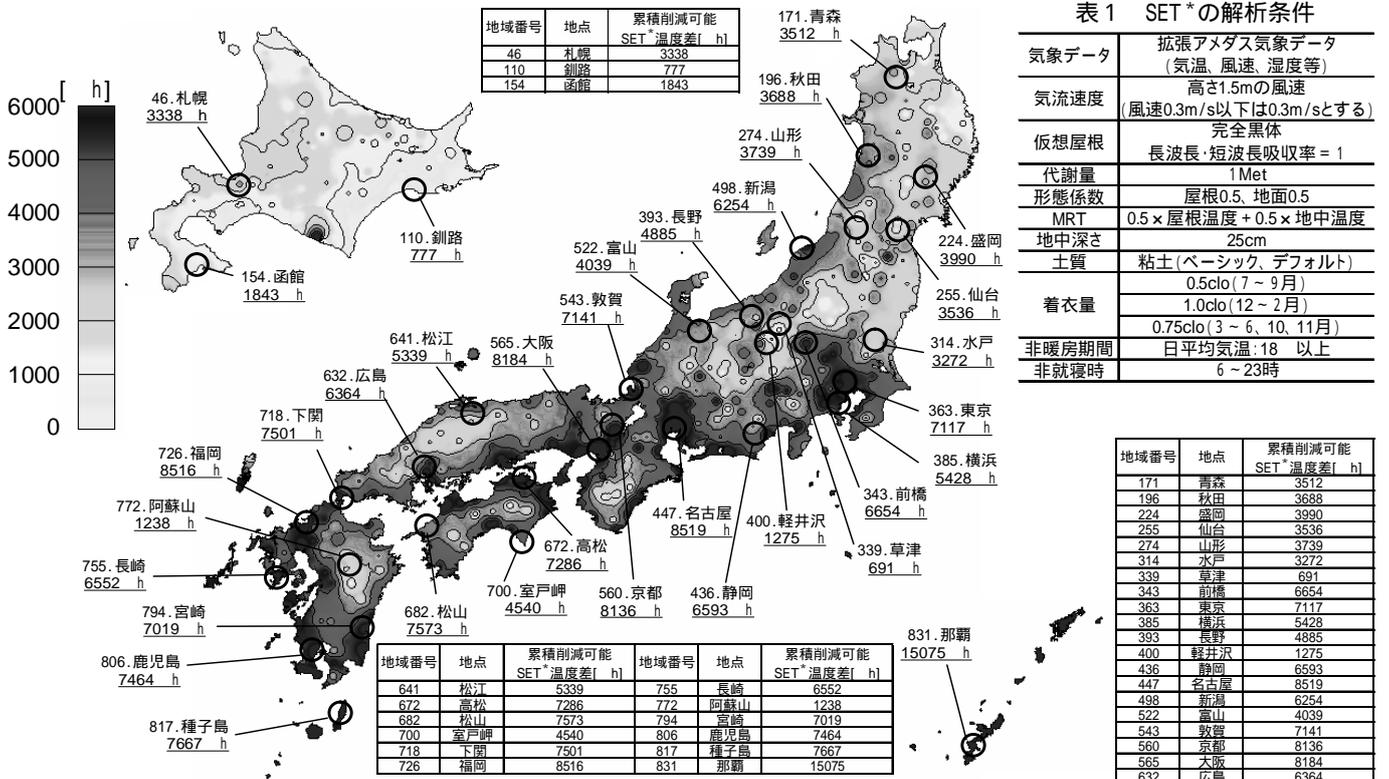


図3 水ミスト噴霧による累積削減可能SET*温度差マップ

らかにする。実験日時は2010年8月5日10:30~14:00である。図5に水ミスト噴霧装置の概要を示す。ミストノズルは計9個設置し、ミストノズル1個当たりのミスト噴霧量は概ね3.7g/sとする。表2に実験caseを、図6に水ミスト噴霧時の様子を示す。

3.2 実験結果

図7に全実験時間における各測定点の温湿度変化を示す。水ミスト噴霧により測定点の温度は、case1で最大2.2、case2で最大2.0、case3で最大1.0、case4で最大1.8低下する。図8に全実験時間における各

測定点の外気温度と室内温度の関係を示す。水ミスト噴霧時の室内温度はミスト停止時に比べ、2前後低下している。図9に全実験時間における水ミスト噴霧時の空気線図上の温湿度変化を示す。水ミスト噴霧により相対湿度は10~20%上昇し、最大60%程度となるが、ミスト停止時は室内温度の低下、相対湿度の上昇は見られない。水ミスト噴霧装置に近い測定点ほど相対湿度及び絶対湿度は上昇し、温度低下効果大きい。水ミスト噴霧により相対湿度は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と考えられる。

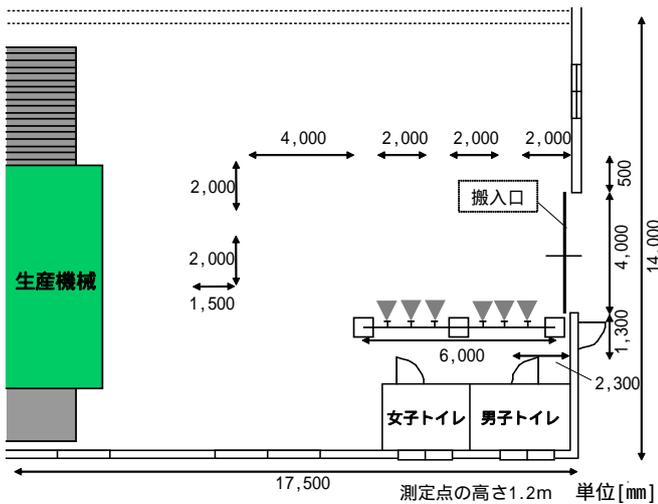


図4 対象工場平面の概要及び温湿度測定点

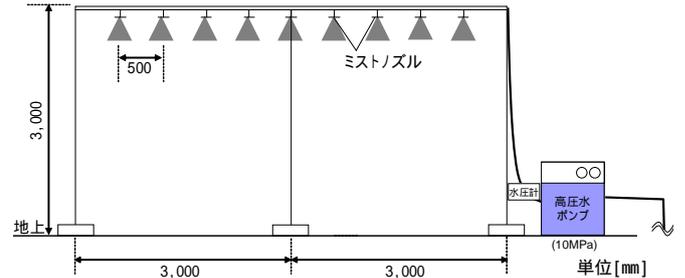


図5 水ミスト噴霧装置の概要

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	11:30~11:50	ノズルの向き...上(6個)、水平(3個)
case4	搬入口上端	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)

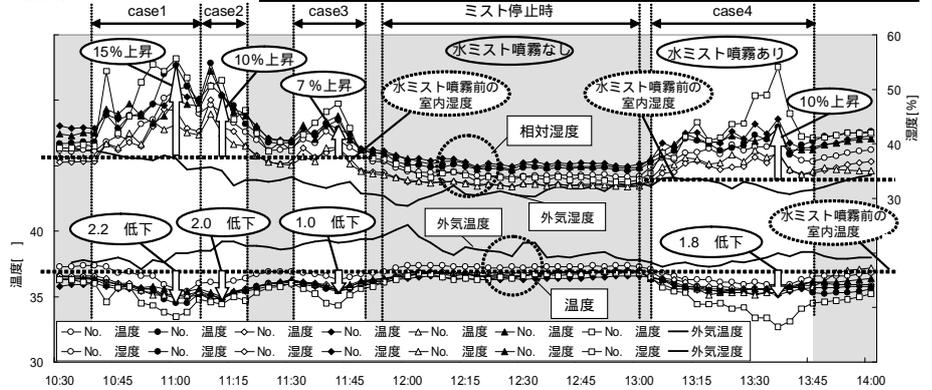


図7 各測定点の温湿度変化(全実験時間)

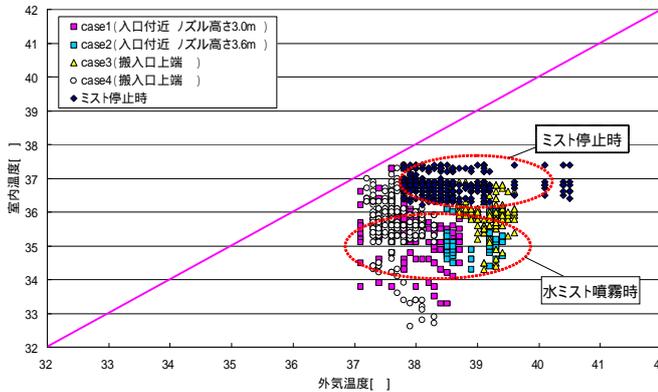


図8 各測定点の外気温度と室内温度の関係(全実験時間)

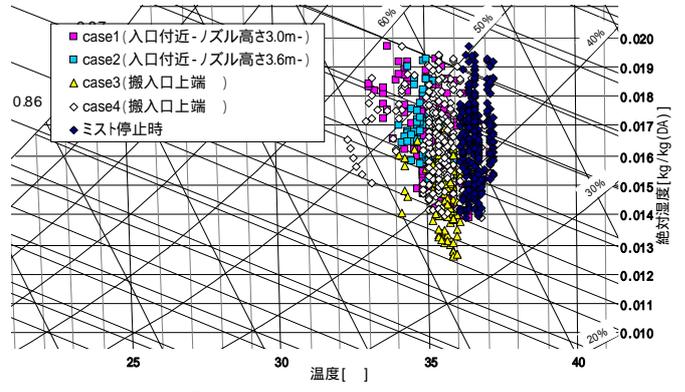


図9 水ミスト噴霧時の空気線図上の温湿度変化(全実験時間)

4 数値流体解析を用いた発電所建屋の温熱環境の解析

4.1 調査概要

解析対象は、聖籠町に位置する東新潟火力発電所1・2号機蒸気タービン建屋とする。図10に対象建屋平面の概要及び温湿度測定点を示す。1・2号機蒸気タービン建屋内の搬入口吹抜け付近、連絡通路入口付近、最上階(地上高さ37.3m、屋上換気モニター内部)発電機付近、搬入口シャッター等に計12点の温湿度記録計を床上1.2mの位置に設置し、乾球温度と相対湿度の測定を行う。測定期間は2010年5月13日~2011年1月17日である。

4.2 解析概要

1・2号機蒸気タービン建屋の蒸気タービンフロア(150m×33m×22.8m)及び搬入口・吹抜け部分(10m×17.5m)を対象とし、数値流体解析を行う。解析

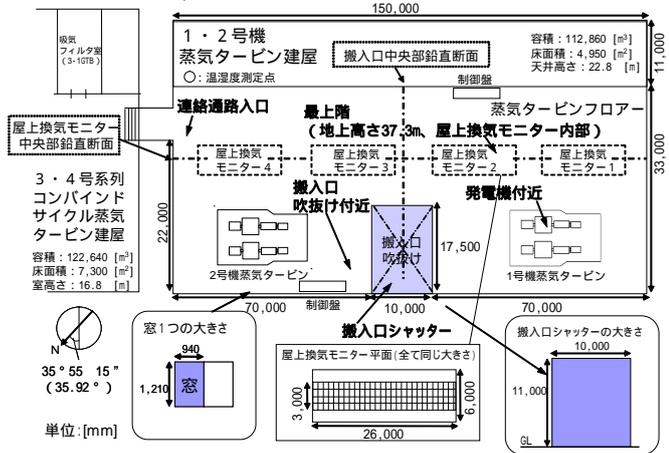


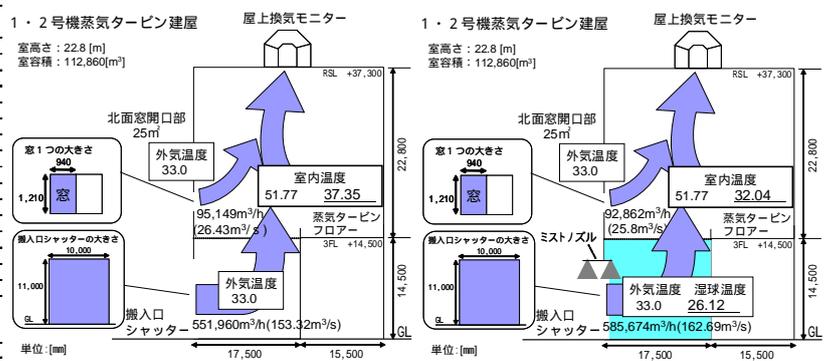
図10 対象建屋平面の概要及び温湿度測定点

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[℃]	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/m ²]	579	
	天空日射量(水平面)[W/m ²]	281	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
	全天日射量(水平面)[W/m ²]	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	
	太陽方位角[°]	77.22	気象データ標準年
太陽定数[KJ/h·m ²]	4932		
緯度[Latitude][°]	37.9998		
経度[Longitude][°]	139.2397		
重力加速度[m/s ²]	9.8		
流体条件	風量[m ³ /s]	表4参照	搬入口より流入(TRANSYS算出)
	水ミスト噴霧量[g/s]	表4参照	北窓より流入(TRANSYS算出)
境界条件	室内初期温度[℃]	33.0	
	壁厚[m]	0.18	
	壁面固定温度(東面)[℃]	表4参照	TRANSYS算出
	壁面固定温度(南面)[℃]	表4参照	TRANSYS算出
	壁面固定温度(西面)[℃]	表4参照	TRANSYS算出
	壁面固定温度(北面)[℃]	表4参照	TRANSYS算出
	壁面固定温度(床面)[℃]	表4参照	TRANSYS算出
	壁面固定温度(天井面)[℃]	表4参照	TRANSYS算出
	搬入口測定点温度[℃]	32.9	
	内外温度差[℃]	2.0	搬入口シャッター開放
建屋内条件	発電出力[MW]	201.6	2号機タービンのみ発電
	放熱面の面積[m ²]	700	TRANSYS算出
	放熱面の表面温度[℃]	161.54	TRANSYS算出
	放熱面の発熱量[W/m ²]	659.59	TRANSYS算出(1年間の平均)
	放熱面の熱伝達率[W/m ² ·K]	4.083	表面温度・発熱量より算出

表4 解析case

解析case	北窓開口面積[m ²]	流入量[m ³ /s]		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[℃]					
		北窓	搬入口シャッター			東面	南面	西面	北面	床面	天井面
case1-1	0	0.00	171.49	x	-	42.54	40.93	40.50	40.26	45.03	45.03
case1-2	0	0.00	177.07	-	524.50	39.37	37.76	37.26	37.06	40.81	40.81
case2-1	6.84	11.68	165.58	x	-	42.54	40.93	40.50	40.26	45.03	45.03
case2-2	6.84	11.68	172.32	-	510.43	39.37	37.76	37.26	37.06	40.81	40.81
case3-1	25	26.43	153.32	x	-	42.54	40.93	40.50	40.26	45.03	45.03
case3-2	25	25.80	162.69	-	481.90	39.37	37.76	37.26	37.06	40.81	40.81
case4-1	50	39.49	142.34	x	-	42.54	40.93	40.50	40.26	45.03	45.03
case4-2	50	37.36	154.58	-	457.88	39.37	37.76	37.26	37.06	40.81	40.81
case5-1	100	52.47	131.28	x	-	42.54	40.93	40.50	40.26	45.03	45.03
case5-2	100	47.54	147.26	-	436.20	39.37	37.76	37.26	37.06	40.81	40.81
case6-1	150	56.42	126.65	x	-	42.54	40.93	40.50	40.26	45.03	45.03
case6-2	150	52.54	144.63	-	428.41	39.37	37.76	37.26	37.06	40.81	40.81



() case3-1(通風時)

() case3-2(水ミスト噴霧時)

図11 建屋内の換気状況

対象日は搬入口シャッターを開放していた2010年8月5日15時とする。解析には汎用流体解析ソフトSTREAMを用いる。通風時及び水ミスト噴霧時における建屋内の温度分布、相対湿度分布を標準k-εモデルにより解析する。表3に解析条件を、表4に解析caseを示す。搬入口シャッターは開放しているものとし、北面窓開口面積の変化及び水ミスト噴霧の有無による計12ケースを解析する。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。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11に2010年8月5日15時におけるTRNSYS解析時の建屋内の換気状況を示す。通風時のcase3-1では、北面窓開口部から95,149m³/h(26.43m³/s)、搬入口シャッターから551,960m³/h(153.32m³/s)の外気が流入する。水ミスト噴霧時のcase3-2では、北面窓開口部から92,862m³/h(25.8m³/s)、搬入口シャッターから585,674m³/h(162.69m³/s)の外気が流入する。

4.3 温度実測結果

図12に2010年5月13日~2011年1月17日の代表的な測定点の日平均外気温と日平均室温の関係を示す。この期間における日平均室温は、搬入口吹抜け付近(No.)で15~43、連絡通路入口付近(No.)で18~44、屋上換気モニター内部(No.)で10~44、発電機付近(No.)で20~44となり、建屋内部全体とし

て10～44の範囲に入る。また、搬入口シャッター(No.)における日平均室温は4～32となり、他の測定点に比較して低い。どの測定点でも外気温が上昇すると室温も上昇し、ばらつきが少なく相関が高い。測定点No. を除きどの測定点でも日平均外気温に比較して約6以上高くなっている。特に運転している発電機付近は日最高室温が45.3、日平均室温が40を超える日もあり労働環境としても劣悪である。

4.4 数値流体解析結果

図13にcase3-1及びcase3-2の搬入口中央部鉛直断面の解析結果を、図14に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を、図15並びに図16に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を示す。解析値と実測値はよく一致している(図15)。建屋内において高い位置の測定点ほど高温となる。搬入口吹抜け付近で最も温度が低く、搬入口から離れた場所ほど温度が高い。2号機蒸気タービン

放熱面付近で相対的に温度は高く、通風時で約45である。水ミスト噴霧時は通風時より建屋全体の温度が5前後低下し、放熱面付近で約40である。制御盤付近の温度は通風時で36前後であるが、水ミスト噴霧時では30前後で外気温度(33)よりも低くなる。

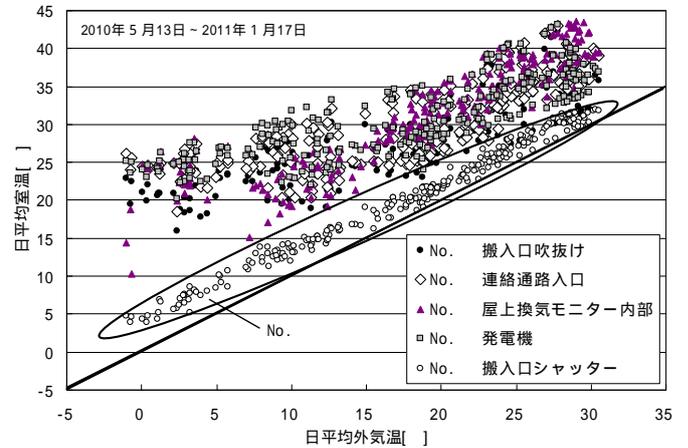


図12 代表的な測定点の日平均外気温と日平均室温の関係

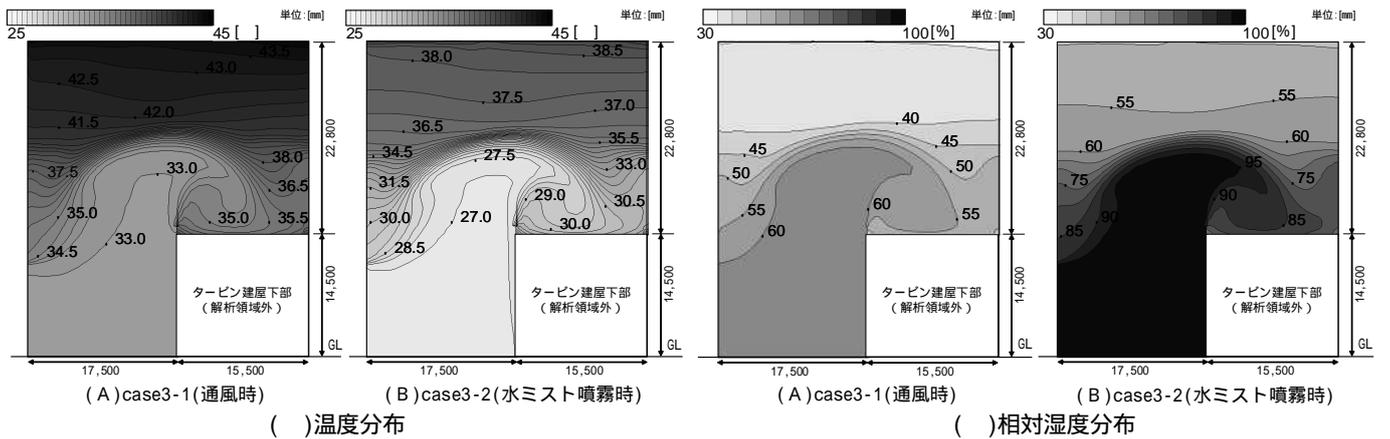


図13 case3-1及びcase3-2の搬入口中央部鉛直断面の解析結果

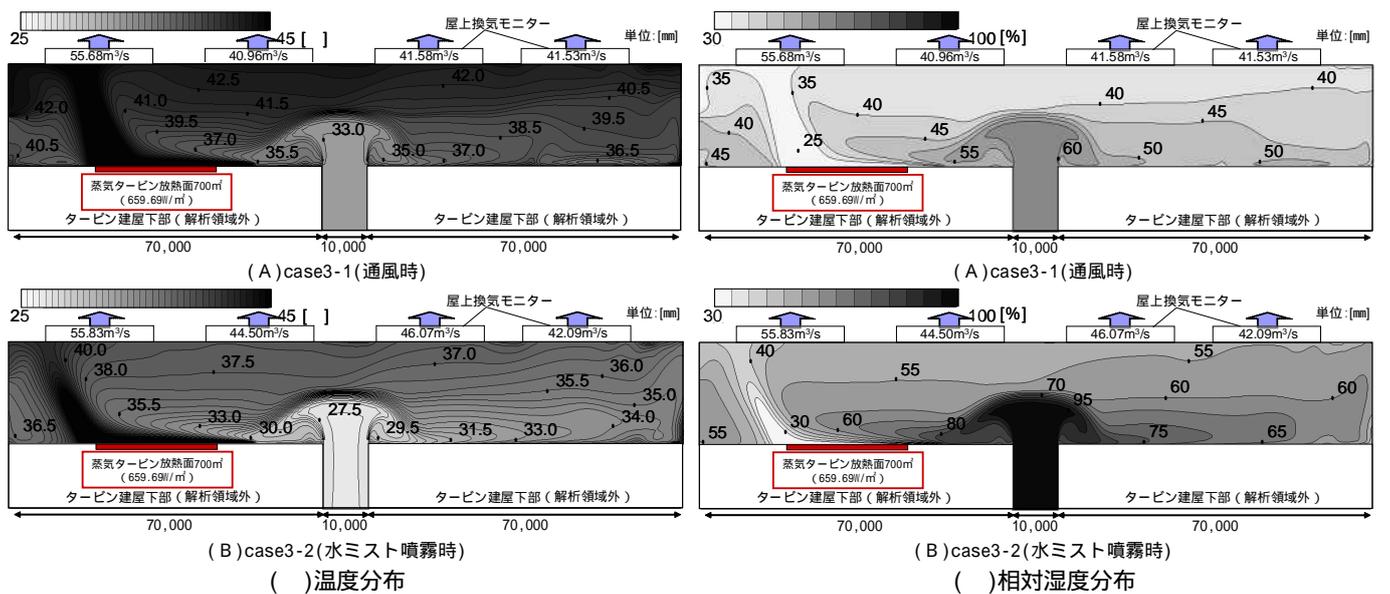


図14 case3-1及びcase3-2の屋上換気モニター中央部鉛直断面の解析結果

相対湿度は、建屋内において高い位置の測定点ほど室温が高温となるため低くなる。搬入口吹抜け付近で最も湿度が高く、搬入口から離れた場所ほど湿度が低い。2号機蒸気タービン放熱面付近で相対的に湿度は低く、通風時で約30%である。水ミスト噴霧時は通風時より建屋全体の湿度が20%前後上昇し、放熱面付近で約50%である。制御盤付近の湿度は通風時の55%前後から水ミスト噴霧時で80%前後となるが、電子機器への影響は少ないと考えられる。

5 結論

(1) 全国の屋外における水ミスト噴霧の有効性

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。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

水ミスト噴霧により2 前後の温度低下が得られる。水ミスト噴霧装置に近い測定点のほど、相対湿度・絶対湿度が上昇し、温度低下効果大きい。

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。

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。

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。

【参考文献】

- 1) 赤林, 坂口, 富永, 中澤, 石川, 南: 水ミスト噴霧による冷却効果に関する研究その1 ダクト内にミストを噴霧した場合の温度低下効果に関する実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2008年9月
- 2) 赤林, 佐々木, 坂口, 富永: 通風性能の定量的評価指標に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第568号, 2003年6月, pp.49-56

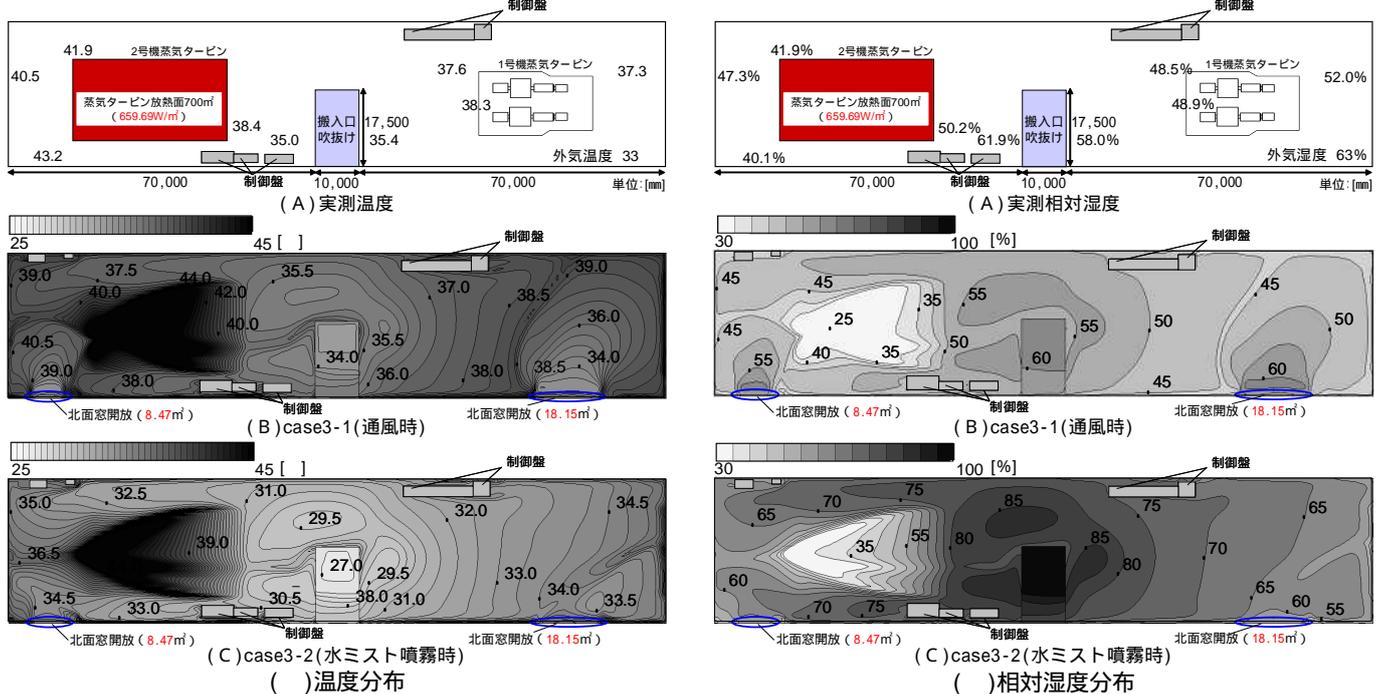


図15 case3-1及びcase3-2の3階床上1.2m水平断面の解析結果及び実測値

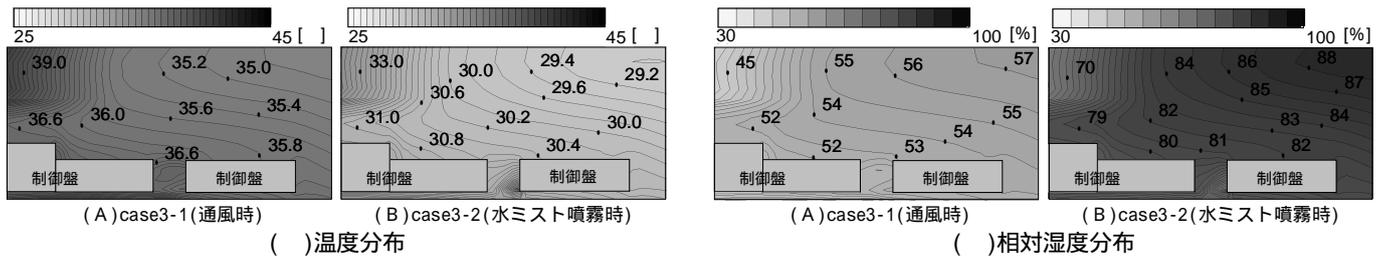


図16 case3-1及びcase3-2の3階床上1.2m水平断面の解析結果(制御盤付近)