

大気浄化システムの改良（脱硝前工程の加湿効率向上） Improvement of Air Purification System（Improvement of the humidifier efficiency before denitrifying）

小栗 利夫*

Toshio Oguri

仲松 宇大**

Udai Nakamatsu

浅井 靖史*

Yasufumi Asai

伊藤 忠彦***

Tadahiko Ito

要 約

1998年（平成10年）から研究開発に着手した、都市部交差点やトンネル換気所等に設置可能な大気浄化システムは、大気汚染物質である浮遊粒子状物質SPMおよび窒素酸化物NO_x（NO、NO₂）を同時に除去する機械式脱硝システムである。首都高速中央環状新宿線山手トンネルの換気所に採用され、平成19年12月に1換気所で供用を開始し、平成22年3月に4換気所を加えた5換気所で稼働している。今回、大気浄化システムの改良として、脱硝機能に重要な脱硝前工程の加湿効率の向上について、風洞実験および気流解析シミュレーションを実施し、現システムにおける最適な加湿方法を検討したので報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 西松式大気浄化システムについて
- § 3. 加湿効率の向上
- § 4. 風洞実験および気流解析手法の検証
- § 5. 加湿の最適化設計
- § 6. おわりに

§ 1. はじめに

大気浄化システムにおける加湿の目的は、取り込んだ大気を加湿することであり、脱硝装置内の脱硝材に吸着したNO₂の還元的離脱(NO)を抑制する効果がある。

本システムに組込まれている加湿装置は、脱硝装置の前段に配置され、電気集塵機を通過した大気を短時間で加湿し脱硝装置に送り込む仕組みとなっている。取り込んだトンネル大気の加湿に関して、設計で見込んだ加湿効率が低い場合、結果として浄化効率の低下、また、所定の湿度を確保するための使用水量の過多などにより、ランニングコストの上昇を招くこととなる。そこで、加湿装置に使用している噴霧ノズルの仕様、数量、配置、噴霧圧力、噴霧水量など基本条件についての見直しを行い、より効果的な加湿方法を検討した。

本稿では、噴霧ノズルメーカーの協力を得て実施した風洞実験および気流解析シミュレーション結果をもとに検討した、加湿方法の改良案について報告する。

§ 2. 西松式大気浄化システムについて

2-1 システムの概要

本システムの主な除去対象物質はSPMおよびNO_x（NOおよびNO₂）であり、①集塵、②加湿、③酸化および④脱硝の4つの要素から構成される。

システム全体の概念図を図-1に示す。大気浄化の処理フローは、①汚染大気が電気集塵機に最初に導入されることでSPMが除去され、②加湿装置において汚染大気は湿度50% RH以上に加湿後、③酸化装置でNO_x成分中の一酸化窒素（NO）をNO₂に酸化し、④脱硝装置でNO₂を吸着後、清浄大気を装置外に放気する手順となる。

2-2 システムの特徴

(1) システムの除去性能は、SPM90%以上、NO₂90%以上、NO_x80%以上である。

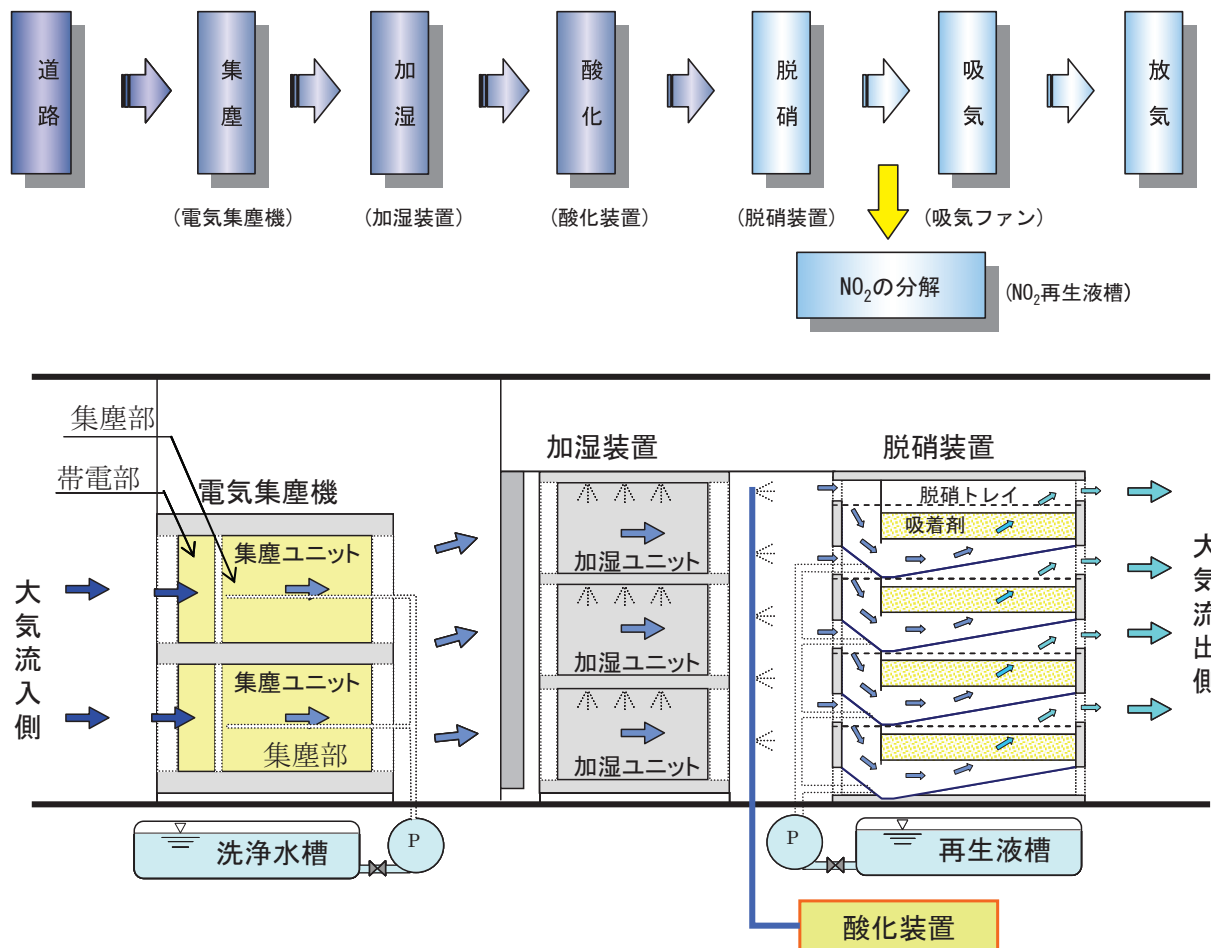
(2) 活性炭をベースに開発した吸着剤は、軽量で耐久性が高く、常温常圧のもとトンネル内空気の汚染物質を除去することができる。

(3) 再生液を使用した現地での吸着剤再生作業により、除去性能の維持ができる。また、人体および環境に無害な再生液を使用し、再生液は繰返し使用後、下水放流に

* 技術研究所環境技術課

** 土木設計部企画課

*** 技術研究所



図一 大気浄化システム概念図

より処理が可能である。

2-3 導入実績

- (1) 首都高速道路中央環状線・山手トンネル
- (2) 東京都環状第八号線・板橋相生陸橋

§ 3. 加湿効率の向上

3-1 加湿装置の仕組み

加湿装置概要図を図-2 に、噴霧ノズル設置状況を写真-1 に示す。

加湿装置は、空気を取り込み口にダンパー、内部に空気の湿度を上昇させるための噴霧ノズルおよび水供給用配管で構成され、流入してくる速度約 9 m/s の大気を湿度 50% 程度まで短時間で加湿し、脱硝装置に送り込む仕組みとなっている。

加湿のための噴霧ノズル数量は、処理風量による装置の大きさにより変わるが、脱硝トレイが 4 段で構成されている場合、計 200 個以上のノズルを装備し、現状使用している噴霧ノズルは、平均粒径 45~60 μm 、ノズル 1 個当たりの噴霧水量 2.64 l/h（噴霧圧力 1.5 MPa 時）の仕様である。

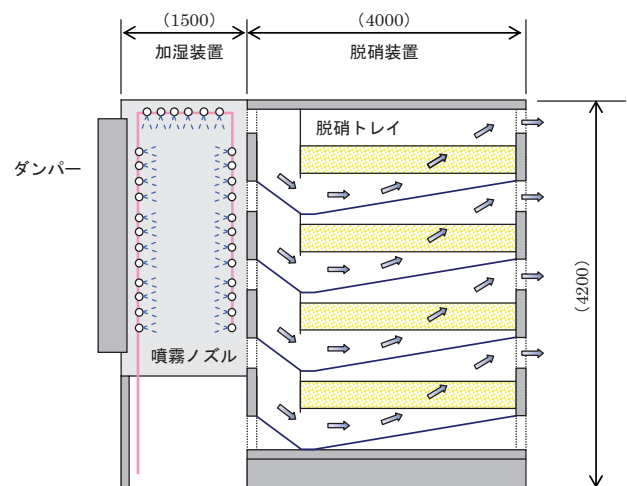


図-2 加湿装置概略図



写真-1 噴霧ノズル設置状況
(左：装置下方からの写真 右：ノズル拡大写真)

3-2 加湿効率向上への検討

(1) 現状における課題

現状の加湿装置は、気候の温暖な季節（春・夏・秋）では、噴霧した水粒子は速やかに蒸発するため、本来要求される目標値（50% RH 以上）を容易に達成するが、温度・湿度の低い冬季において、特に気温 10℃ 以下・湿度 30% RH 以下となる 1 月～2 月の時期においては蒸発が遅れ、加湿効率が落ちることがあった。

加えて、蒸発の遅れた水粒子がそのまま後段の脱硝トレイに流入し、その結果トレイ内の吸着剤に付着することにより、脱硝性能に影響を及ぼす場合があった。

(2) 課題解決のための方策

上記課題を解決するために、以下に示す方策を設定した。

① 噴霧ノズル仕様の見直し

現状の噴霧ノズルは平均粒子径が約 45～60 μm であるので、より粒子径の小さい水粒子を噴出可能な噴霧ノズルに変更する。その際、ポンプも高圧仕様に変更する。

② 噴霧ノズルの配置見直し

前述したように、現状の噴霧ノズル配置は加湿装置内周囲に配置されているため、均一な加湿が阻害されている懸念があった。したがって、噴霧ノズルの配置に関して見直しを行う。

③ 風洞実験の実施

アクリル製ダクトを用いた風洞実験設備内に噴霧ノズルを設置し、実環境により近い条件下での噴霧ノズルからの水粒子の蒸発率を実測する。実測結果は後述する気流解析シミュレーションの解析モデルに反映させる。

④ 気流解析シミュレーション手法の検討

上記風洞実験で求めた水粒子の蒸発率の実測値と気流解析結果を比較し、解析精度を検証する。その上で気流解析シミュレーションによって、実機の噴霧ノズルおよび配置変更による加湿効果を検証する。

以上の方策にしたがい、加湿効率の向上に関して検討を行った。

4. 風洞実験および気流解析手法の検証

4-1 噴霧ノズルの仕様と蒸発率

噴霧ノズルから噴出される水粒子は、一般的には粒子径が小さいほど蒸発が速いため、現状の噴霧ノズル（以下現状型ノズル）よりも粒子径の小さいノズル（以下提案型ノズル）を使用することとした。PDPA（レーザードップラー粒子計測定装置）を用いて計測した現状型および提案型ノズルにおける実際の粒径分布をそれぞれ図-3 および図-4 に示す。

現状ノズルの粒径分布は平均 33 μm であり、実際の仕様よりはやや小さい粒径を示した。提案型ノズルの粒径分布は平均 20 μm であり、実際の仕様通りの粒径を示した。図-5 に実験により求めた各温度における粒子径と

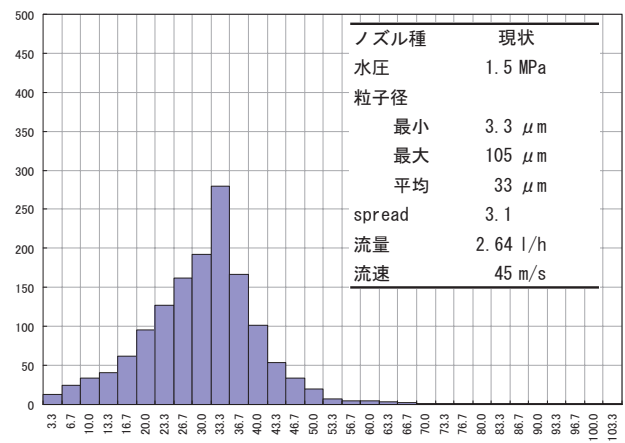


図-3 現状ノズル粒径分布図

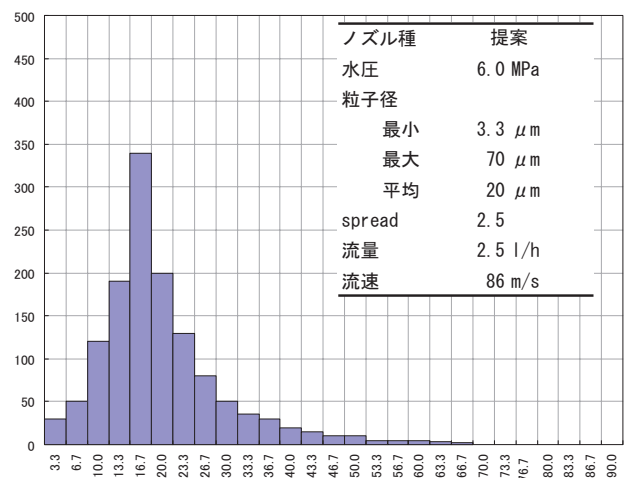
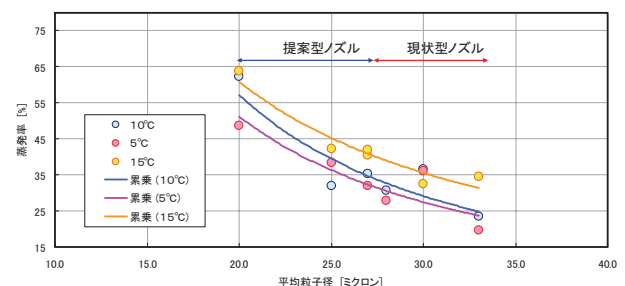


図-4 提案ノズル粒径分布図



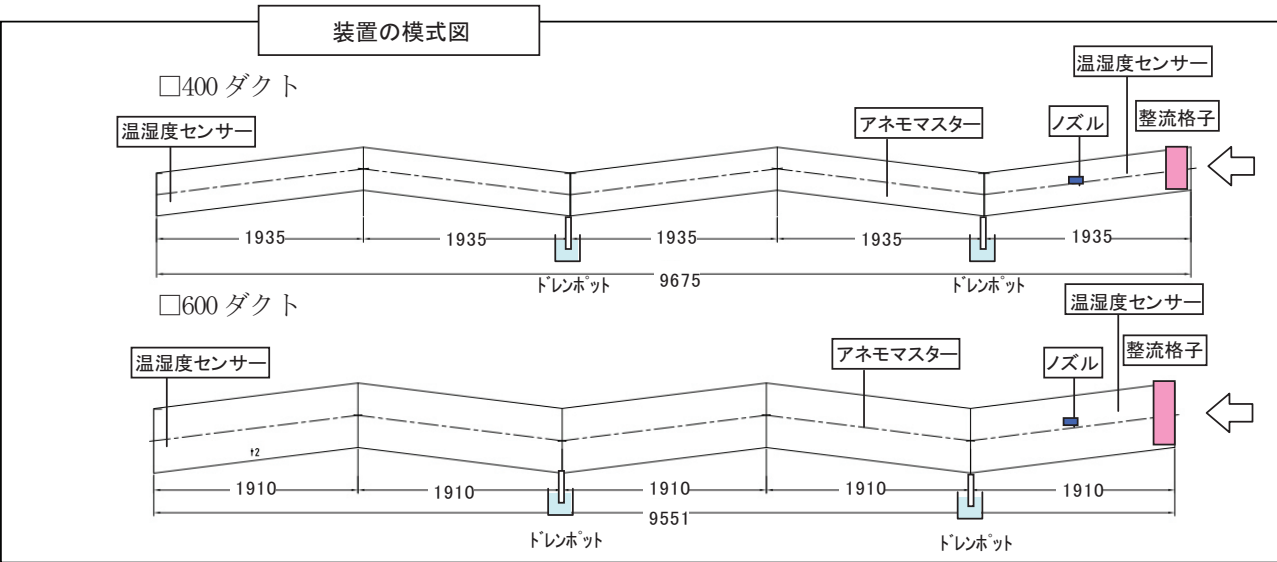
$$\text{蒸発率 (\%)} = (\text{噴霧水量} - \text{ドレン排水}) / \text{噴霧水量} \times 100$$

図-5 粒子径と蒸発率の関係

蒸発率の関係を示す。

この結果から、温度が低いほど蒸発率が小さく、平均粒子径は蒸発率に大きな影響を及ぼすことが確かめられた。具体的には、ノズル単体の蒸発率に関して、提案型ノズルは現状ノズルに対し約 3 倍近く効率が良いことを確認した。また、噴霧水量と蒸発率の関係については殆ど影響を受けないことを確認した。

以上の実験により求めた各ノズルの粒径分布は気流解析シミュレーションのインプットとして使用する。



図－6 風洞実験設備模式図



写真－2 風洞実験設備外観

表－1 風洞実験条件

RUN	ダクト径 (m)	流速 (m/s)	ノズル 種類	ノズル 本数	ポンプ圧 (MPa)
1	0.4	2.2	現状	1	1.5
2	0.4	2.2	提案	1	6.0
3	0.6	0.95	現状	1	1.5
4	0.6	0.95	提案	1	6.0

4－2 風洞実験結果

風洞実験は、実際の加湿槽内の低温および気流条件を想定した水粒子の蒸発効率を実測し、気流中における低温（10℃以下）での水粒子蒸発の基礎データを採取することを目的とした。なお、湿度は自然条件下とした。

W400×H400×L2000 または W600×H600×L2000 のアクリルダクトを5つ繋ぎ、2種類の風洞設備を構築した。その概要および外観写真をそれぞれ図－6 および写真－2 に示す。風洞入口に整流格子を設置し、噴霧ノズルは入口から1m離れたところの風洞上部に1個を取り付けた。なお、気流は風洞出口側に設置した誘引ファン（風量；最大 3,000 Nm³/h）によって発生させた。

図－6 の風洞設備を使用し、表－1 の実験条件（RUN1～4）における噴霧水の蒸発効率を求めた結果を表－2 に示す。ここで噴霧水量（a）＝ドレン水量（c）

表－2 風洞実験結果

RUN		単位	1	2	3	4
設定値	ダクト径	mm	400	400	600	600
	流速	m/s	2.2	2.2	0.95	0.95
	ノズル種類	-	現状	提案	現状	提案
	ノズル個数	-	1	1	1	1
	噴霧水量(a)	l/h	2.64	2.5	2.64	2.5
	L/G	-	0.00174	0.00164	0.00179	0.00169
	目標ΔRH	%RH	30	30	30	30
入口	温度	℃	8.5	7.9	8.3	7.5
	湿度	%RH	53.8	56.2	59.7	61.4
出口	温度	℃	6.9	5.5	6.2	4.6
	湿度	%RH	70.1	81.4	78.6	86.7
変化量	温度	℃	-1.6	-2.4	-2.1	-2.9
	湿度	%RH	16.3	25.2	18.9	25.3
理論蒸発水量(b)		l/h	1.02	1.56	1.31	1.81
噴霧水の行方	ドレン量(c)	l/h	1.48	0.53	1.46	0.62
	有効水量(d)	l/h	1.16	1.97	1.18	1.88
蒸発効率		(b)÷(a)	38.5	62.2	49.5	72.5

蒸発効率（％）＝理論蒸発量／噴霧水量×100

表－3 蒸発効率実測値と気流解析結果との比較

RUN		単位	3	4
設定値	ダクト径	mm	600	600
	流速	m/s	0.95	0.95
	入口	温度	℃	8.3
		湿度	%RH	59.7
	ノズル種類	-	現状	提案
	噴霧水量	l/h	2.64	2.50
実測結果	出口	温度	℃	6.2
		湿度	%RH	78.6
	ドレン量	0～3m	l/h	1.02
		3～7m	l/h	0.44
		合計	l/h	1.46
解析結果	出口	温度	℃	6.0
		湿度	%RH	82.5
	ドレン量	0～3m	l/h	1.02
		3～7m	l/h	0.50
		7～9m	l/h	0.00
		合計	l/h	1.52

+有効水量（d）の関係がある。また、ここでの理論蒸発水量とは、水の蒸発エンタルピーと蒸発前後の温度差より求めた値である。この結果から、以下の知見が得られた。

① ノズルによる蒸発効率の比較

蒸発効率は、目標加湿（ ΔRH が 30%）に対し、現状ノズルは 40～50% 程度の達成率に対し、提案ノズルは 60～70% 強であり、提案ノズルの方が高い達成率を示した。

② 流速による蒸発効率の比較

現状型ノズルおよび提案型ノズル間の蒸発効率の差は流速の速い条件（RUN1,2）の方が、流速の遅い条件（RUN3,4）に比べ差が大きいことを示した。このことから、実機の加湿槽内の流速の方が今回の風洞実験における流速に比べ速いため、実際にはこれらノズル仕様間の蒸発効率の差はより開くと考えられる。

4-3 蒸発効率実測値と気流解析結果の比較

表-3 に蒸発効率実測値と気流解析結果との比較の一部を示す。なお、設定値（インプット）には図-3 および図-4 の各ノズルにおける粒径分布値を入力し、気流解析ソフトには FLUENT を使用した。その結果、実測値と解析値は良く一致し、FLUENT を用いた気流解析シミュレーションによる加湿効率の検証に問題ないことを確認した。

5. 加湿の最適化設計

上述で検証の有効性を確認した気流解析シミュレーションにより、実機モデルの現状解析（現状型ノズルおよび現状配置）および改善解析（提案型ノズルおよび改善配置）を行い、現状および改善型の加湿効率を比較しつつ加湿の最適化設計を行い、その効果を検証した。

5-1 解析条件

(1) 計算条件

計算条件を表-4 に示す。

表-4 計算条件

	現状解析	改善解析
入口温度	10℃	10℃
入口湿度	20%RH	20%RH
ノズル種類	現状型ノズル	提案型ノズル
噴霧（冷却）水量	280～290 L/h	105～111 L/h
ノズル本数	112本	42本

(2) 解析モデル

- ① 解析ソフトには FLUENT V6.3 を使用した。
- ② モデルは定常／熱間計算／ガス組成考慮として熱計算を行い（但し、放熱の影響は無視）、水粒子の気流中での挙動を計算した。
- ③ メッシュは非構造格子とし、メッシュ数は約 80 万個で形状作成を行った。
- ④ 境界条件：入口／出口は出口から吸引させ、壁面は断熱とし、壁面に付着した水粒子は対象外とした。

現状配置およびノズル

1) 解析モデル

- ① 形状 3D
- ② 乱流モデル $k-\epsilon$
- ③ 定常／非定常 定常
- ④ 熱計算 有り

2) 解析条件

① ダクト形状

入口寸法 1200×1400

② 送風条件

入口流速 8.92 m/s

入口湿度 20.0 RH%

入口水分量 0.24 vol%

入口温度 10 ℃

③ ノズル

平均粒子径 33 μm

最大粒子径 105 μm

冷却水量 2.64 l/hr・本

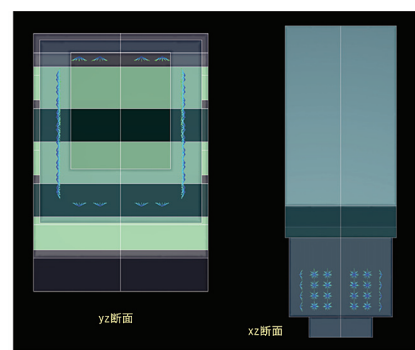
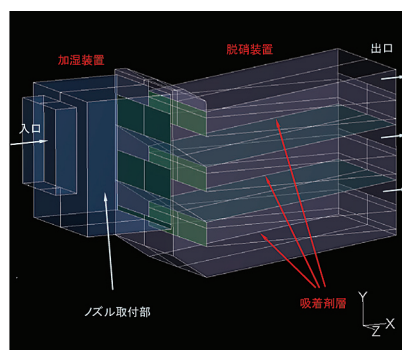
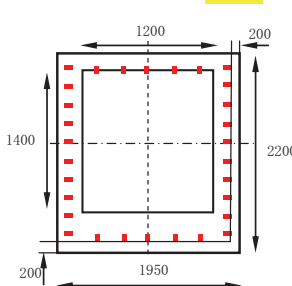
タイプ 1 流体空円錐〔赤〕

噴霧角度 90 度

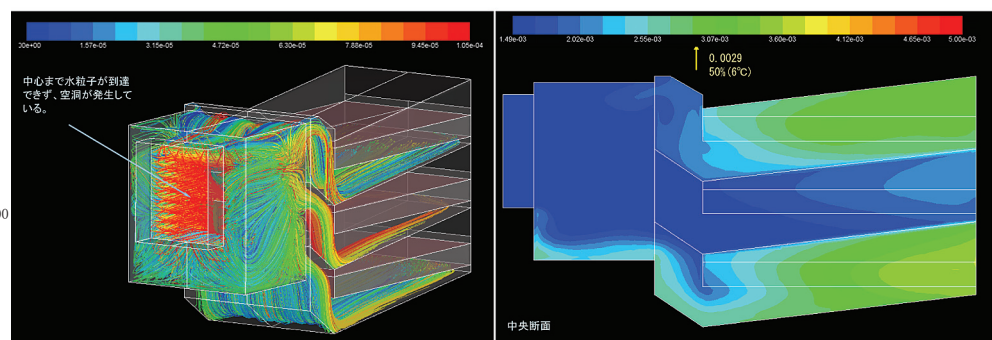
ノズル本数 112 本

④ ノズルレイアウト

現状



ノズル配置図



水粒子の軌跡（色は滞留時間：sec）

湿度分布（色は緑から 50% RH 以上を示す）

図-7 気流解析シミュレーション結果（現状解析）

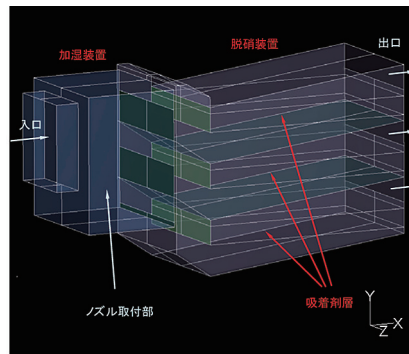
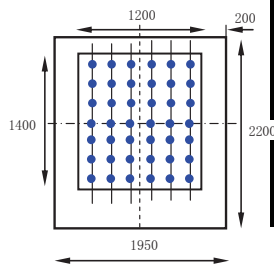
改善配置およびノズル

1) 解析モデル

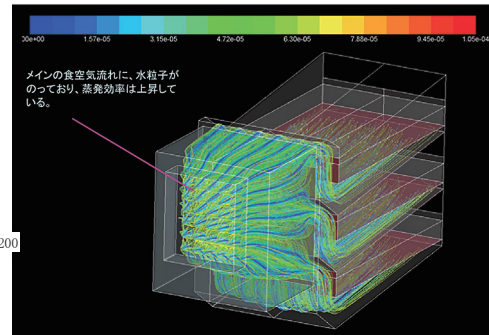
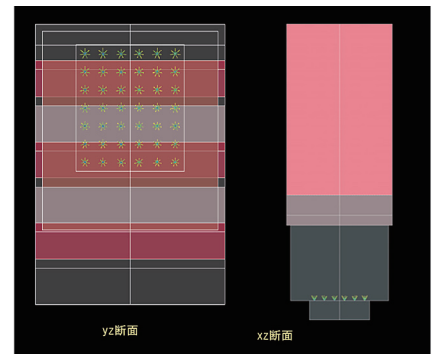
- ① 形状 3D
 ② 乱流モデル $k-\epsilon$
 ③ 定常/非定常 定常
 ④ 熱計算 有り

2) 解析条件

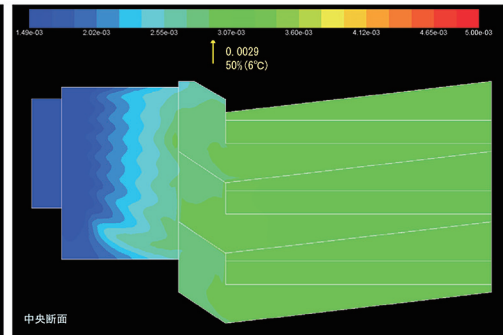
- ① ダクト形状
 入口寸法 1200×1400
 ② 送風条件
 入口流速 8.92 m/s
 入口湿度 20.0 RH%
 入口水分量 0.24 vol%
 入口温度 10 °C
 ③ ノズル
 平均粒子径 20 μm
 最大粒子径 70 μm
 冷却水量 2.50 l/hr・本
 タイプ 1流体空円錐〔青〕
 噴霧角度 0 度
 ノズル本数 42 本
 ④ ノズルレイアウト



ノズル配置図



水粒子の軌跡（色は滞留時間：sec）



湿度分布（色は緑から 50% RH 以上を示す）

図一8 気流解析シミュレーション結果（改善解析）

5-2 気流解析シミュレーション結果

(1) 現状解析結果

図一7に現状解析結果を示す。水粒子の軌跡は流入する気流によって中心が空洞になっている。そのため、湿度分布は中段の脱硝トレイ部分に関しては殆ど加湿が行われていない状況が明らかとなった。

(2) 改善解析結果

図一8に改善解析結果を示す。ノズルを格子状に配置することにより、水粒子の軌跡は加湿槽全体に均等に噴霧されている。その結果、湿度分布は全ての脱硝トレイにおいて目標加湿（50% RH 以上）を達成する結果となった。

5-3 最適化設計による効果

表一5に現状および改善解析結果のまとめを示す。現状解析では、加湿効率は約38%であり、大部分は加湿に使われないまま壁面および脱硝トレイ中の吸着剤に付着する結果となった。

一方、改善解析結果では、ノズル自体の蒸発効率の良さ、ノズルをメッシュ配置によって最適化した結果、現状よりノズル数を1/3、かつ噴霧水量を1/3に削減しながら蒸発効率はほぼ100%を達成し、加湿効率と加湿水量の大幅な削減を両立する結果となった。

表一5 気流解析シミュレーション結果

		項目		現状解析	改善解析
解析結果	水量	蒸発	l/h	112.1	102.2
		壁面付着	l/h	67.1	1.1
		吸着剤	l/h	116.5	1.7
	割合	加湿(蒸発)効率	%	37.9	97.3
		壁面付着	%	22.7	1.0
		脱硝トレイへの付着	%	39.4	1.6
	出口温度		℃	5.69	6.32

6. おわりに

今回、噴霧ノズル仕様およびノズル配置の検討にあたって気流解析シミュレーションによって加湿効率および噴霧水量の最もバランスの優れた条件を見出すことに成功した。また、風洞実験により今回の気流解析手法に関しては高精度を有することを検証できた。今後、本解析手法を活用し、更に効率的な加湿手法を検討していく。

謝辞。本開発は（株）いけうちとの共同研究開発の成果の一部である。関係各位に深く感謝いたします。