

マイクロECミスト[®]の開発

Development of the Electrically Charged Micromist 'Micro EC Mist' System

高木 賢二 挾間 貴雅 池松 建治¹⁾
辻 利秀²⁾ 吉田 哲雄²⁾

要 約

空気中に浮遊した粉塵の除去は集塵機などを用いて集塵して除去するのが一般的であるが、開放空間に浮遊している粉塵は空気を集める方法が難しく有効な除去方法がない。そこで、開放空間に浮遊した粉塵に対して、特殊なノズルで帯電させた水粒子をミスト状に発生させ噴霧することにより、効果的に吸着し除去する技術を開発した。本報では、帯電したミストの発生・散布システム「マイクロECミスト[®]」の概要、粉塵除去原理、室内実験および実際の建設現場での粉塵除去効果確認の結果について報告する。

目 次

- I. はじめに
- II. システム概要
- III. 粉塵除去原理
- IV. 室内実験
- V. 現場実験
- VI. おわりに

I. はじめに

近年、高度経済成長期に建設されたインフラのリニューアルおよび増設工事の活性化に伴い、建設現場では周辺に人家が存在する状況が多くあり、そこでの重機走行や解体粉塵が周囲に影響を及ぼし易い状況下での作業を強いられることが多くある。そのため、一層の粉塵対策が求められている。

粉塵対策には、散水や粉塵飛散抑制剤など粉塵の発生を抑制する方法や防塵シートなど粉塵の拡散を抑制する方法は既にいくつかあるが、一度浮遊してしまった粉塵を開放空間において除去する技術は無いのが現状である。このため、様々な箇所が発生する工事粉塵の対策は限定的であり、特に、発生した後の浮遊粉塵を除去する方法が求められている。

粉塵の径が数 $10\mu\text{m}$ 程度であると重力による沈降速度は 10^{-3}m/s 程度となり、浮遊した状態で拡散する。解体工事や造成工事で発生する粉塵の粒径は、実測によると6割程度が $10\mu\text{m}$ 以下であり、発生した場合は浮遊するものが多いのが特徴である。一方、浮遊した粉塵を処理する手段は少ない。

粉塵対策技術には、粉塵を発生させない発生抑制、粉塵を拡散さ

せない拡散抑制、浮遊した粉塵を除去する粉塵除去に分類される。Table 1 に粉塵対策技術と効果の一覧を示す。特に、浮遊粉塵の除去には現状集塵機によるものしかない。集塵機は浮遊粉塵を含む空気を吸引してフィルターあるいは電気集塵で粉塵を除去するものであり、閉鎖空間のように粉塵を含む空気を吸引しやすい場所での粉塵除去に効果的である。しかし、開放空間では風の影響により空気の流れの変化が大きく、粉塵を含む空気を吸引することが困難で特殊な場合を除いて適用は難しい。

筆者らは、特殊なノズルで帯電させたミスト（水粒子）を発生させ噴霧することにより、開放空間に浮遊した粉塵をミストに吸着して除去する技術を開発した^{1), 2)}。これにより、これまで有効な除去方法がなかった開放空間での浮遊粉塵の効果的な除去が可能となる。

本報では、帯電したミストの発生・散布システム「マイクロECミスト[®]」の概要、ミストの帯電や静電気による粉塵の吸着など粉塵除去原理、チャンバーを用いた室内実験および実際の造成工事の建設現場における粉塵除去効果確認について報告する。

Table 1 粉塵対策技術と効果
(Dust Control Technologies and Effects)

目的	対策	開放空間; 屋外	閉鎖空間; 室内
発生抑制	放水、ミスト散布	○(1/10 減)	△(要処理)
	飛散抑制剤	◎(1/100 減)	△(要処理)
拡散抑制	防塵シート	○(1/2 減)	○
	仮囲い	○(1/2 減)	—
粉塵除去	集塵機	—	◎(1/100 減)
	マイクロECミスト	○(1/2 減)	○(1/2 減)

1) 土木技術本部 Civil Engineering Management Division

2) (株) ホーチキ Houchiki Co., Ltd.

キーワード: 浮遊粉塵, 粉塵, ミスト, 帯電, ノズル

Keywords: Airborne dust, dust, mist, electrical charging, nozzle

II. システム概要

1. システム構成

本システムは、帯電ミストファン (Photo 1) とポンプ、水槽、電源などで構成される。帯電ミストファンは帯電ミストを発生するノズルを大型ファンと結合させたもので、気流に乗せてミストを噴射する。帯電ミストの発生は誘電帯電方式によるものであり、Photo 2 の帯電ミストノズルによって、1分間に10リットルの帯電ミスト(電荷量約 0.5mC/kg)を連続して安定的に噴射することを可能にした。ノズル部で発生した帯電ミストがファン部で生成された空気流によって粉塵空間に向けて送り込まれる。

2. 帯電ノズル

帯電ミストは、マイナスの電荷を載せた $200\mu\text{m}$ 以下の微細な水の微粒子群で形成された微噴霧である。帯電ミストは、通常のみストでは除去困難とされていた $10\mu\text{m}$ 以下の浮遊粉塵を静電気力により空間で吸着させて落下させることができる。

帯電ミストを発生させるために Photo 2 のような帯電ノズルを開発した。帯電ノズルはミストノズルの出口付近に円環の高電圧コイルを配して、高電圧領域を形成する。

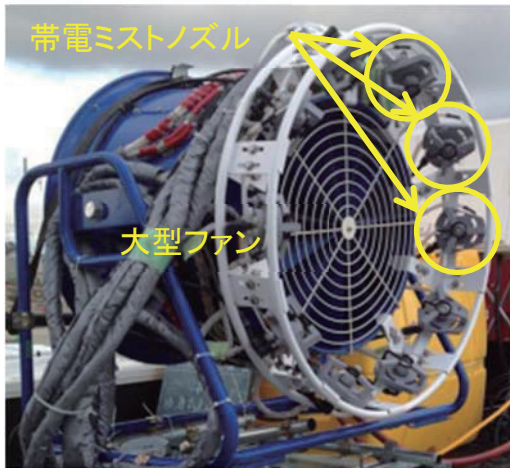


Photo 1 マイクロ EC ミスト概観
(Micro EC Mist Overview)



Photo 2 帯電ミストノズル (D=120mm)
(Charging Mist Nozzle (D = 120mm))

III. 粉塵除去原理

1. 帯電ミスト発生原理

帯電ミストの発生は誘電帯電方式による。ミスト発生にはスプレーノズルを用いる。スプレーノズルは小さな穴から高圧の水を噴出させるノズルである。ノズルの穴の出口付近では水の表面張力と水の噴出圧力のバランスにより円錐型の水柱が形成され、水柱表面で順次水が剥がれ出されることにより水滴 (ミスト) が形成される。帯電ミストノズルではスプレーノズルの出口付近で高電圧をかけたコイルにより高電圧領域を形成させて、この水柱の表面に電荷を与える。これにより電荷をもった表面の水が順次ミストになっていくために、帯電ミストを形成することができる。

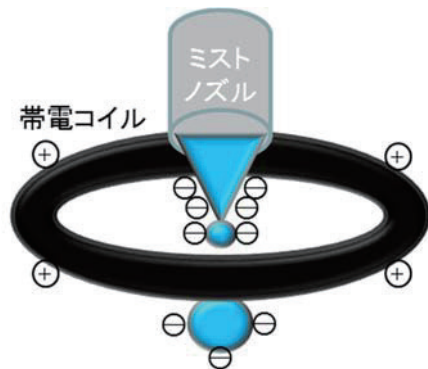


Fig. 1 帯電ミスト発生原理
(Electronical Charging Mist Generation Principle)

2. 粉塵吸着のメカニズム

現状、建設現場での粉塵対策は粉塵を発生させない目的で散水あるいは粉塵飛散抑制剤などの対策があるが、発生した浮遊粉塵はミスト散布や散水を施しても除去することは難しい。ミスト散布による粉塵除去が困難な原因は主に以下のようなものが考えられる。

- 粉塵とミストは風に乗って同様な速度と方向で移動し、粉塵とミストの相対速度はほぼ重力による終末速度の差になり、粉塵とミストの衝突速度および粉塵量 (個数) が極端に小さい。
- ミストと粉塵の相対速度が小さいため、粉塵のミストに対する挙動には乱れが少なく、粉塵はミストをよけて移動する。このため、粉塵がミストに接触する流れ直角方向の面積は極端に小さくなり、吸着しにくくなる。

c. 粉塵がミストに衝突する際に表面張力による抵抗を受けるため衝突速度と粉塵の粒径の関係で跳ね返される粉塵もあり、ミスト内部まで侵入してとどまる粉塵の数が減少する。

一方、ミストを帯電させることにより次のような効果が生じる。

- ミスト表面の電荷により表面張力が減少する。このため粉塵がミストに衝突し内部へ侵入する際の抵抗が減り、ミストに取り込まれる粉塵の数が多くなる。
- ミスト周辺での不均一な電界により電荷の無い誘電体である粉塵にグラディエント力 (5. で後述) が生じ、粉塵が電界の強い方向 (ミスト方向) へ誘引される。

これらの効果で、ミストに接触する粉塵の数 (粉塵量) が増大し、粉塵除去効果が生じる。

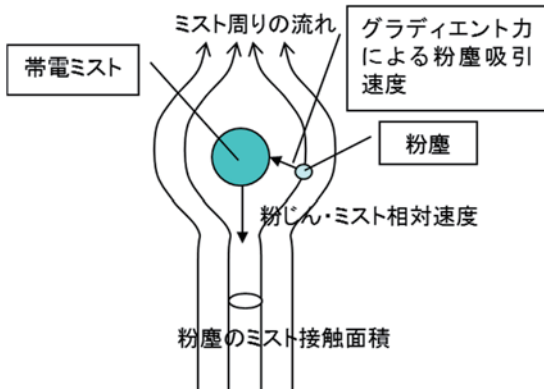


Fig. 2 帯電ミストの粉塵除去原理
(Charging Mist Dust Removal Principle)

3. 粉塵とミストの相対速度

ミストによる粉塵除去効果はミストとの衝突により粉塵がミスト内に取り込まれることにより生じると考えられる。粉塵やミストといった空気中の粒子は空気と共に運動するため、粒子に及ぼす力は空気の抵抗力と重力による体積力に主に支配され、次式のように表される。なお、式中の変数は Table 5 の記号表を参照されたい。

$$m_p \frac{du}{dt} = Cd \cdot S_p \cdot \frac{\rho_f \cdot u^2}{2} + m_p \cdot (\rho_p - \rho_f)g \quad (1)$$

ここで空気と粒子の相対速度が小さいとすると抗力係数はストークスの式 ($Cd=24/Re$) が適用でき、上式は以下の代表速度 u_0 と代表時間 t_0 で無次元化できる。

$$\frac{du'}{dt'} = 1 - u', \quad u' = \frac{u}{u_0}, t' = \frac{t}{t_0}, \quad u_0 = \frac{\rho_p g}{18\mu_f} d_p^2, \quad t_0 = \frac{u_0}{g} \quad (2)$$

上式から、粒子の相対速度の時間変化は Fig. 3 のように無次元時間 $t'=5$ 程度で無次元速度 $u'=1$ になる。ミストと粉塵の粒径をそれぞれ $100 \mu m$, $10 \mu m$ とすると、代表時間は 2.38×10^{-1} 秒, 8.96×10^{-4} 秒と非常に短く、瞬時に代表速度 (= 終末速度) に達することが分かる。

これから粉塵とミストの空気に対する相対速度は重力による終末速度であり、それぞれの終末速度の差で衝突すると考えられる。

4. ミストの粉塵除去モデル

ミストによる粉塵の除去は、ミストが単位時間に捕捉出来る粉塵の個数をもとに、粉塵のミストへの衝突速度 u_{wp} , 粉塵の数密度 (濃度) n_w などから、粉塵の数密度の収支に基づいてモデル化する。

$$\frac{dC}{dt} = -K \cdot C = - \left(A \cdot \gamma \cdot S \cdot u_{wp} \cdot n_w + \frac{u_{pt}}{h} \right) \cdot C \quad (3)$$

ここで、 A は実験係数, γ はミストが粉塵を捕捉する際の係数, u_{pt} は粉塵の終末速度, h は実験装置の高さ, S は粉塵がミストに接触する面積である。

ミストが粉塵を捕捉する係数 γ はミストの表面張力 ($\sigma=0.0727N/m^2$) に抗してミスト内に侵入するのに必要な速度³⁾から以下のようにモデル化する。

$$\gamma = \frac{u_{wp}}{u_{wt}} = \frac{u_{wp}}{\left(8\sigma/\rho_p \cdot d_p\right)^{1/2}} \quad (4)$$

粉塵がミストに衝突する速度 u_{wp} は、ミストの終末速度 u_w と粉塵の終末速度 u_{pt} の相対速度 ($=|u_w - u_{pt}|$), 粉塵が接触する面積 S はミストの断面積とする。

実験係数 A はミストの周りの流れに大きな影響を受けると考えられ、ミストや粉塵の形状、濃度により変化するものと考えられる。

5. 帯電効果のモデル化

電気的に中性な粒子 (粉塵) が帯電ミストに近づくとミスト表面の電荷により生じる電界が生じ、粉塵には誘電分極による微小な正負の電荷が誘導される。粉塵の正の電荷は帯電ミストによる電界の負極側へ、負の電荷は正極側へ引かれる。このとき電界が一様であれば両者の力は打ち消しあうが、帯電ミストによる電界は不均一なため強い電界のかかるミスト側へ引力が生じ、これはグラデエント力と呼ばれる⁴⁾。

粉塵を球形と仮定し、1次近似として均一な電界による分極率を用いて粉塵に作用するグラディエント力と流体抵抗から帯電による粉塵の衝突速度 u_e を求める。

$$\frac{\pi \cdot d_p^3}{4} \cdot \frac{\epsilon_p - \epsilon_f}{\epsilon_p + 2\epsilon_f} \cdot \epsilon_0 \nabla E^2 - Cd \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \frac{\rho_f u_e^2}{2} = 0 \quad (5)$$

また、帯電ミストによって生じる電界 E は球状に分布し、

$$E = Q^2 / \pi \cdot \epsilon_0 \cdot d_w^2 \quad (6)$$

とし、粉塵の抗力係数をストークスの式を用いると、帯電ミスト表面での速度は以下ようになる。

$$u_e = \frac{Q^2}{96\pi^2 \cdot \mu_f \cdot \epsilon_0} \left(\frac{\epsilon_p - \epsilon_f}{\epsilon_p + 2\epsilon_f} \right) \frac{d_p^2}{d_w^5} \quad (7)$$

これらから粉塵がミストに衝突する速度は、

$$u_{wp} = |u_{wt} - u_{pt}| + u_e \quad (8)$$

となる。

これから、式(2)で求められるミストと粉塵の終末速度から粉塵がミストに衝突する速度が求められ、帯電によるミストと粉塵の衝突速度の増加の効果を考慮できる。

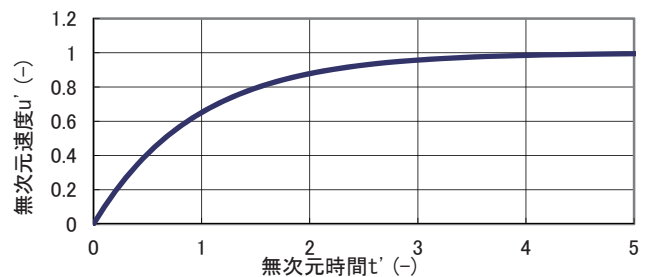


Fig. 3 粒子の速度変化
(Change in Velocity of the Particles)

IV. 室内実験

1. 実験装置

室内実験では、ドラフトチャンバーを用いて閉鎖空間を形成し、風などの外乱がない状況下における粉塵洗い落と室内実験を実施した。ドラフトチャンバーは Photo 3 のように縦 3m, 横 3m, 高さ

3m の区間を帯電防止シートで囲っている。帯電ミストは、上部に設置した帯電ノズル5個から噴霧させた。浮遊させる粉塵はダストフィーダ（柴田科学製，MF-2）から散布し，チャンパー内の上部に設置したファンで循環させた。粉塵濃度の計測はチャンパー内4か所にデジタル粉塵計（柴田科学社製，LD-5）を設置し，吸引口にアルミ管を装着して，管内でミストを吸着させて混入を防止している。これによりミストの有無によるデジタル粉塵計の計数値への影響がないことを確認した。

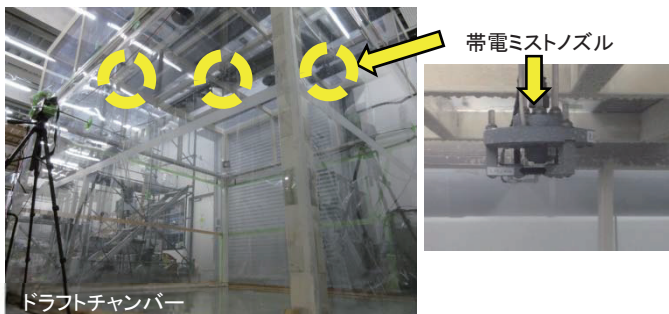


Photo 3 実験装置概観
(Laboratory Equipment Overview)

2. 実験結果

実験に用いた粉塵は，試験用の標準粉塵（JIS Z 8901）の中で「関東ローム7種」，「関東ローム11種」，「珪砂3種」，「フライアッシュ5種」，「黒炭12種」を用いた。

これらの微細な粉塵に対して，ミスト散布によるチャンパー内粉塵濃度を計測した。一方，粉塵濃度の低下は式(3)から，

$$\frac{dC}{dt} = -K \cdot C, \quad \frac{dC}{C} = -K \cdot dt, \quad \frac{C}{C_0} = \exp(-K \cdot t) \quad (9)$$

となり，計測した粉塵濃度の時間変化から濃度の減衰時定数 K を求めることができる。

(1) 帯電ミストの粉塵除去効果の検討

粉塵濃度の時間変化の一例を Fig. 4 に示す。帯電ミスト噴霧による粉塵濃度の減衰が大きいたことがわかる。また，帯電のないミストのみのケースでは，重力沈降のみの粉塵の減衰（図中；ミスト無し）とほぼ同程度の効果であることを確認した。

粉塵濃度の減衰時定数の一覧を Table 2 に示す。帯電していないミストのみの結果と帯電ミストの結果を比較すると，減衰時定数が2倍以上となっており，帯電ミストのケースでの減衰速度が大幅に向上したことが確認できる。

また，数種類のミスト径についての実験も行い，帯電に最適なミスト径は $200 \mu\text{m}$ 以下であることが分かった。

(2) 帯電効果モデルの検討

III.5の帯電による粉塵の除去効果モデルを検証した。Table 2 に示す実験係数 A は帯電の無いミストのみのケースでの減衰時定数 K の実験値，ミストと粉塵の粒径，数密度などから式(3)により算出した。式(5)～(8)から求められる帯電による粉塵とミストの衝突速度を算出し，式(3)から帯電ミストのケースでの減衰時定数 K を推定して，実験値と比較した。その結果を Fig. 5 に示す。推定される帯電ミストの減衰時定数 K は実験値とおおむね一致しており，本

モデルで帯電ミストによる除去効果をおおむね説明できることが分かった。

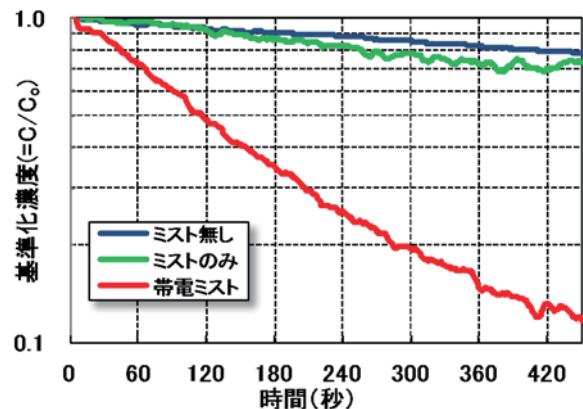


Fig. 4 粉塵濃度時間変化実験結果（関東ローム11種）
(Experimental Result of Dust Concentration Time Change ; Kanto loam11 species)

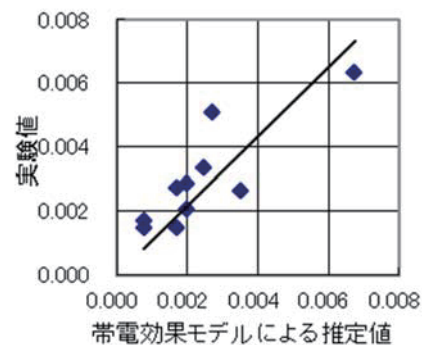


Fig. 5 帯電効果モデルによる減衰時定数の推定
(Estimation of the Decay Time Constant due to Charging Effects Model)

Table 2 減衰時定数実験結果
(Decay Time Constant Experimental Results)

粉塵種類	中心粒径 (μm)	減衰時定数 K (1/s)		実験係数 A (-)
		ミストのみ	帯電ミスト	
関東ローム7種	8.6	0.00079	0.00145	0.36
		0.00192	0.00271	
関東ローム11種	2.3	0.00067	0.00148	0.74
		0.00021	0.00171	
		0.00080	0.00509	
珪砂3種	7.6	0.00104	0.00335	0.70
		0.00183	0.00632	
フライアッシュ	5	0.00173	0.00286	1.18
			0.00203	
黒炭	15	0.00231	0.00265	0.38

V. 現場実験

実際の建設現場でのマイクロECミストの粉塵除去効果を検証するために，造成現場での作業時に発生する粉塵を対象に現場実験を行った。実験の対象は，Photo 4 に示すバックホウ作業時，Photo 5 に示すダンプトラック走行時とした。粉塵が発生している箇所にファンによりミストを噴霧し，発生箇所周辺での粉塵濃度を複数台のデジタル粉塵計（柴田科学社製 LD-5）で計測して粉塵発生箇所周辺での粉塵濃度の分布を測定した。バックホウ作業およびダン

ブ走行を数回行った平均濃度を Fig. 6, Fig. 7 に示す。いずれの作業でも、帯電ミストによる粉塵除去効果が無帯電ミストに比べて著しく高いことが確認された。

また、効果を定量化するために、パフモデルを用いた計算から粉塵発生個所周辺の粉塵拡散性状を仮定し、各実験結果をフィッティングさせることで推定した粉塵飛散量を Table 3 に示す。ここで、パフモデルの式は以下のとおりである。

$$C = \frac{Q}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \delta_x \delta_y \delta_z} \exp\left(-\frac{(x-u \cdot t)^2}{2\delta_x^2} - \frac{y^2}{2\delta_y^2}\right) \times \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\delta_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\delta_z^2}\right) \right] \quad (10)$$

ここで、 C は粉塵濃度(g/m^3)、 Q は粉塵飛散量(g/s)、 x は風下方向距離(m)、 y は風下直角方向距離(m)、 z は鉛直方向距離(m)、 H : 発生源高さ(m)、 δ_x : 風下拡散パラメータ(m)、 δ_y は風下直角拡散パラメータ(m)、 δ_z は鉛直拡散パラメータ(m)である。

室内実験の結果から浮遊粉塵除去性能は約 50%程度と算定しており、現場実験で得られた飛散量と同等であることから、ほぼ設計どおりの性能が確認された。一方、風の影響で粉塵とミストが十分な時間接触できない場合は除去効果が低下することが分かった。

また、造成工事のほか、各種建設工事での粉塵除去効果確認のための実験を行っている。これらの実験からマイクロECミストの適用対象を明確にすることができた。Table 4 にマイクロECミストの適用対象を示す。マイクロECミストの効果は粉塵が誘電分極によりミストへ吸着されることから、導電性のある粉塵には効果がなく、水分を多く含むモルタルや溶断の際に発生するヒュームなどには適さない。

VI. おわりに

帯電ミストによる浮遊粉じん除去システムであるマイクロECミストを開発し、その除去原理を明らかにして除去効果を定量化するモデルを構築した。次に室内実験を行いマイクロECミストの粉塵除去効果を定量化するとともにそのモデルの妥当性を検証した。さらに、実際の造成現場においてマイクロECミストの実用上の性能を確認した。一方、風向きが除去効果に大きな影響を及ぼすため、現場においては最適な帯電ミストの噴霧方法を検討する必要がある。

今後は、粉じんの種類(粒径、誘電率、濡れ易さ)やミストの帯電量などをパラメータにした実験を行いモデルの精度検証を図り、各種の粉塵に対応するための設計手法を構築して、実際の解体現場などでの実証試験を行う予定である。さらには、空気と粉塵とミストの挙動を予測し現場での最適な噴霧方法を検討する手法の開発も行っていく。

Table 3 実測結果に基づいたパフモデルによる飛散量推定結果 (The Amount of Scattered Estimated Result by Puff Model based on the Measurement Result)

	ミストのみ	帯電ミスト	低減率
バックホウ作業発生量 (g/回)	0.74	0.37	51%
ダンプ走行発生量 (g/m/台)	1.29	0.63	49%



Photo 4 バックホウ作業時の噴霧状況 (Spray Situation at the Time of Backhoe Work)

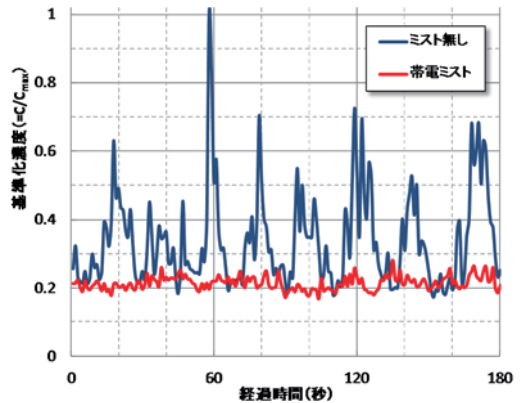


Fig. 6 バックホウ作業時の粉塵濃度変化 (Dust Concentration Change at the Time of Backhoe Work)



Photo5 ダンプ走行時の噴霧状況 (Spray Situation at the Time of the Dump Traveling)

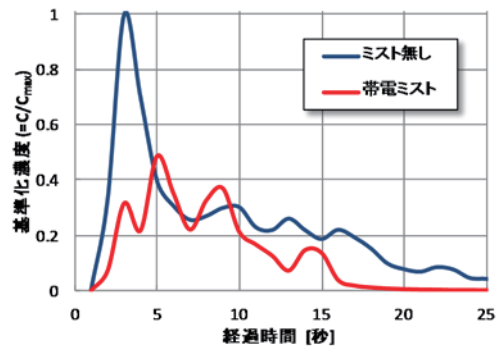


Fig. 7 ダンプ走行時の粉塵濃度変化 (Dust Concentration Change at the Time of the Dump Traveling)

Table 4 マイクロECミストの適用対象
(Applies of 'Micro EC Mist')

対象	粉じん種類	効果
RC解体工事	コンクリート	○
土工事	砂、土	○
走行車両	砂、土	○
吹き付け工事	モルタル、水	×
溶断	ヒューム、煙	×
花粉	スギ花粉	○

Table 5 記号表
(Symbols Table)

記号表					
A	実験係数(-)	d	粒径(m)	ρ	密度(kg/m ³)
Cd	抗力係数(-)	h	高さ(m)	ϵ_0	真空の誘電率(F/m)
C	濃度(-)	n	数密度(個/m ³)	σ	表面張力(N/m ²)
E	電場(V/m)	m	質量(kg)	μ	粘性係数(Pa・s)
K	減衰時定数(1/s)	t	時間(s)		添え字
Q	電荷(C)	u	速度(m/s)	f	空気
S	面積(m ² /個)	ϵ	比誘電率(-)	p	粉じん
g	重力加速度(m/s ²)	γ	捕捉係数(-)	w	ミスト

参考文献

- 1) 池松ほか；帯電ミストによる粉じん除去システム（マイクロECミスト）の開発，土木学会全国大会第68回年次学術講演会，2013.
- 2) 高木ほか；帯電させたミストによる浮遊粉じん除去効果の検討－粉じん除去効果のモデル化－，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），（2013），pp.887-888.
- 3) Pemberton, C. S. ; *Int. J. Air Pollution*, 3, 168, 1960.
- 4) 静電気学会；静電気ハンドブック，2006.

Development of the Electrically Charged Micromist 'Micro EC Mist' System

Kenji Takagi, Takamasa Hasama, Kenji Ikematsu¹⁾, Toshihide Tsuji²⁾ and Tetsuo Yoshida²⁾

Until now, the only means of removing airborne dust was to use a dust collector, and there was consequently no means of removing any airborne dust in open spaces. The author has therefore developed a technology for removing dust in open spaces whereby the dust is absorbed by a mist generated by and sprayed from a special water particle nozzle. This paper provides an overview of the mist generation and dissemination system of 'Micro EC Mist' and describes the principle and effect of dust removal after testing in the laboratory and at an actual construction site.