

コロナ放電を利用しない電気集塵装置

- 電極板の堆積状態 -

片谷 篤史^{*1}, 細野 洋^{**}, 村田 光^{**}, 八幡 大志^{**}, 水野 彰^{***}

(2014年9月8日受付; 2014年12月8日受理)

Electrostatic Precipitator without Using Corona Discharge

- State of Collected Particles on Pole-plates -

Atsushi KATATANI^{*1}, Hiroshi HOSONO^{**}, Hikaru MURATA^{**},
Hiroshi YAHATA^{**} and Akira MIZUNO^{***}

(Received September 8, 2014; Accepted December 8, 2014)

Although electrostatic precipitators (ESPs) charge particles which are passing through corona-discharge space and collect them by Coulomb's force, the authors have thought that the power consumption in ESPs might drastically be decreased if particles could be charged "without using corona-discharge". To verify this idea, the authors have tried an experiment as follows. i.e. DC high voltage was applied to a one-stage ESP composed of parallel flat-plates without corona discharge-spikes. This ESP does not generate corona discharge but does form non-uniform electric field of +8 kV/cm. The ESP was operated for 18 h under the diesel-exhaust gas-flow condition of 9 m/s. After the exposure to diesel exhaust, the electrode-plates of the ESP were observed. The result showed that the ESP collected particles on the electrode-plates without corona discharge. This study implies the possibility of ESPs without using corona discharge to minimize the electrical power consumption.

1. はじめに

電気集塵装置 (ESP) は, 火力発電所等の排煙浄化用をはじめ, 道路トンネルの排気浄化用として広く用いられている¹⁻⁷⁾. トンネル用 ESP については, 設置スペースの削減が求められ, 小型化・高風速化が図られたが, その結果, ESP の消費電力が増大する傾向にあることが, 文献 8) と 9) で触れられている.

トンネル用 ESP の処理対象空気にはディーゼル排ガスが含まれるが, このディーゼル排ガス中の粉塵粒子の一部は, 正および負に帯電しているという研究¹⁰⁻¹⁴⁾ が報告されている.

また, ESP の不平等電界部では, グラディエント力が作用し, 粉塵付着を招くという報告¹⁵⁻¹⁸⁾ もある.

さらに, ESP に避けられない再飛散現象についての研究報告^{19,20)} もあり, 再飛散した粒子は, 誘導帯電により, 逆極性に帯電することに触れた報告^{8,21-25)} もある.

著者は, これら一連の報告を鑑み, 次のような考えを持つに至った. 即ち, 「ESP は従来から, コロナ放電を発生させ, この放電空間を通過する粉塵を帯電させ, クーロン力で粉塵を捕集するものであったが, コロナ放電を用いずに粉塵を帯電させることができれば, ESP の消費電力を大幅に低減できる可能性がある」という考えである. 具体的に述べると, コロナ放電しない程度の高電圧を, 放電突起のない電極板に印加して, 強電界部を形成し, これにディーゼル排ガスの粉塵粒子を通過させれば, もともと帯電していた粉塵を強電界部でのクーロン力により, 捕集することができるであろうし, また, 不平等電界部では, グラディエント力により粉塵を捕集することも可能かもしれないと考えた. さらに, 粉塵をいったん電極板上に捕集すれば, この捕集した粉塵が再飛散する時に, 誘導帯電により帯電した粉塵になるであろうから, このようにして得られた帯電粉塵をクーロン力で捕集することが可能なのではないかと考えた次第である.

今回の研究では, コロナ放電なしの状態では, 一時的に捕集した粉塵が再飛散し, その再飛散した粉塵が極板上

キーワード: 電気集塵, グラディエント力, 不平等電界部

* パナソニック環境エンジニアリング株式会社
(〒486-8524 愛知県春日井市鷹来町字上仲田3905番3)
Panasonic Environmental Systems & Engineering Co., Ltd
3905, Takaki-cho Kasugai-city, Aichi-pref., 486-8524,
Japan

** パナソニックエコシステムズ株式会社
(〒486-8522 愛知県春日井市鷹来町字下仲田4017番)
Panasonic Ecology Systems Co., Ltd 4017, Takaki-cho
Kasugai-city, Aichi-pref., 486-8522, Japan

*** 国立大学法人 豊橋技術科学大学
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)
Toyohashi University of Technology, 1-1, Hibarigaoka,
Tenpaku-ku, Toyohashi-city, Aich-pref., 441-8580, Japan

¹ katatani.atsushi@jp.panasonic.com

に再捕集されてできる痕跡を観測し、誘導帯電と粉塵捕集のメカニズムを明らかにすることを目的とした。鮮明な粉塵痕跡を得るために、希釈したディーゼル排気ガス中に、コロナ放電を伴わない高圧電極板で構成されるESPを配置し、これに長時間電圧を印加して、粉塵を捕集する実験を行うこととした。

2. 実験装置および方法

図1に示す金属平板を電極板として用い、図2に示す極板配置のESPを構成する。接地に繋がれている6枚の極板が接地極板 (g-1 から g-6) である。直流が印加される5枚の極板が荷電極板 (e-1 から e-5) である。荷電極板の風上端を接地極板の風上端よりも80 mm 風下側にずらし、互い違いにかつ平行に配置し不平等電界を構成しやすい構造とした。隣接する極板の間隔は10 mm である。また、両サイドの接地極板だけは、図1のタイプ2を用いた。長さ110 mmの極板2枚を連結した構造の接地極板であり、全長220 mm である。両サイドだけ異なる極板を用いた理由は、全長200 mmのタイプ1極板の枚数が不足したからであり、他に理由は無い。

以上の構造のESPの荷電極板に、直流高電圧 +8 kV を印加するが、この電圧では放電電流は流れず、コロナ放電が発生しないことを、予め確認している。(注記：この点について補足説明する。本ESPへの印加電圧を変化させたときの電流値は、+8 kV で 0 μA (0 W), +9.5 kV で 0 μA (0 W), +10 kV で 5 μA (0.05 W) であった。また、ほぼ同じ大きさのコロナ放電方式のESPが、参考文献26) に掲載されており、このコロナ放電式ESPの放電電流は、2,500 μA と記されており、-7 kV 以上の電圧が印加されたと思われるので、この時の電力は少なく

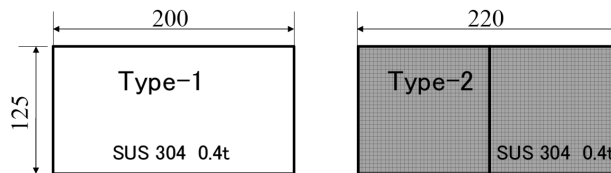


図1 実験で用いる電極板
Fig.1 Electrode-plates for experiment.

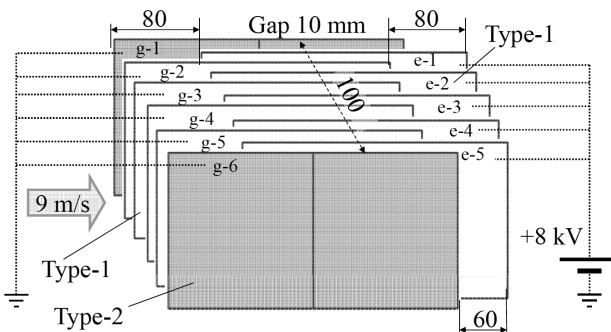


図2 電気集塵装置の電極板の配置
Fig.2 Layout of electrode-plates of ESP.

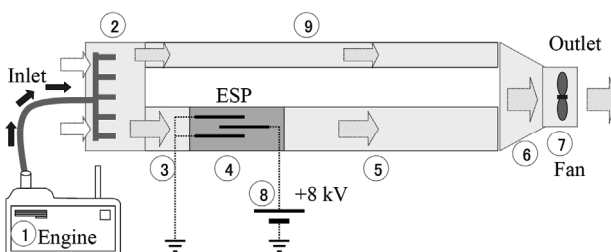


図3 実験の系統図
Fig.3 Schematic diagram of test equipment.

とも 17.5 W であったと思われる。)

図2における通風方向は左から右であり、通風速度は9 m/s である。

表1 実験装置の仕様
Table 1 Specifications of test equipment.

Items	Details
Diesel engine #1	ISUZU 4BD1-1, 1200 rpm, fuel: diesel oil
Connection duct #2	Total length; 4 m (approx.) Accessory; exhaust-distribution-nozzles
Connection duct #3	W 121, H 140, L 150 mm (Inside), ABS resin
ESP duct #4	W 121, H 120, L 300 mm (Inside), ABS resin
Connection duct #5	W 121, H 140, L 150 mm (Inside), ABS resin
Connection duct #6	Total length; 4 m (approx.), Taper shape
Fan #7	Axial flow fan with inverter-control
High voltage power supply #8	Tunnel-ESP power supply (Origin Electric) Max. DC +13 kV (0.15 A) : Ripple; 5% or less
Bypass duct #9	W 121, H 140, L 600 mm (Inside), ABS resin
Microscope (Optical)	Digital microscope VHX-100F (KEYENCE) Lens; VH-Z100 (x100-1000)

図3は実験の系統図であり、表1は実験装置の仕様である。①ディーゼルエンジンで発生した粉塵を、⑦ファンで通風し、②③④⑤⑥のダクト系で構成されるESP系に導く。④のESPダクト中には図2で示したESPが収納され、⑧の直流高圧電源からdc +8 kVが印加される。ESPダクト内の通風速度は9 m/s一定値となるよう、ファンの回転数が調整されている。⑨はバイパスダクトであり過剰なディーゼル排ガスをバイパスさせるものである。このディーゼル粉塵の性状(粒径、成分、抵抗率、密度等)に特殊性はなく、参考文献(23), (25), (27), (28)等に記載されているものと同程度と考えられる。

ESPに流入する粉塵濃度を0.35 mg/m³に調整した後、18 hの連続運転を行った。運転後、ESPの接地極板面と荷電極板面の粉塵の付着・堆積状態を、表1に示す光学式顕微鏡を用いて観察した。

3. 結果および考察

対向する極板ペア「g-4」と「e-3」について考察する。

図4は、18 h連続運転後のESPの極板写真であり、2枚の極板は、図2における接地極板g-4と荷電極板e-3である。接地極板g-4の風上端を0 mmポイントとしており、荷電極板e-3の風下端が280 mmポイントである。これを分かりやすくするため、横方向に目盛が示される。いずれの極板においても、各部で粉塵付着の様子が一樣でないことが視える。

拡大写真により各部をより詳しく観察するために、各極板上に複数の観察点を定めた。接地極板g-4には、観察点A, B, C, D, E, F, GおよびHの8点を定めた。また、荷電極板e-3には、観察点J, K, L, M, N, P, QおよびRの8点を定めた。

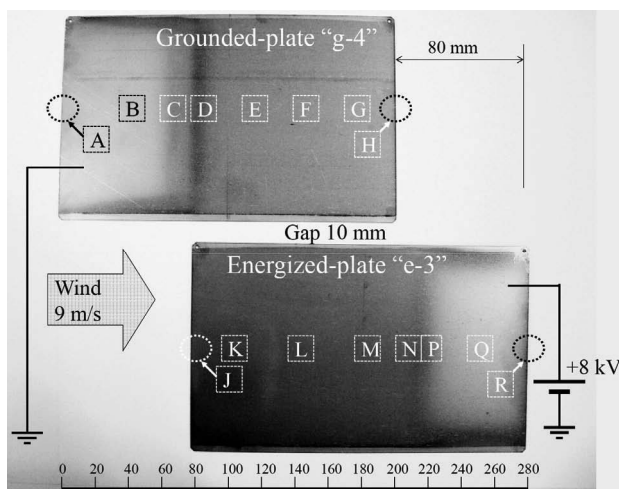


図4 18 h 運転後の電気集塵装置の極板 g-4 と e-3
Fig.4 Electrode-plates “g-4” and “e-3” of ESP after 18 h operation.

図5には、接地極板上の観察点AからHの拡大画像と、荷電極板上の観察点JからRの拡大画像を示す。これらは各点の顕微鏡写真(200倍)を、二値画像化ソフト(Photo Filter)を用いて白黒画像に変換したものである。(256階調中の160階調を閾値とした。)この処理を行うことで、粉塵が色濃く付着・堆積している黒色部と、そうではない白色部を区別し易くすることができる。

さらに、この白黒二値画像について、各画像中の全面積に対する「粉塵付着部分である黒色部の面積」の比率を黒色部比率(Black-area-ratio)と定義し、これを二値画像解析ソフト(Pixel Counter)により算出した。これが黒色部比率であり、観察点AからRの各二値画像中の右下に百分率で示した。

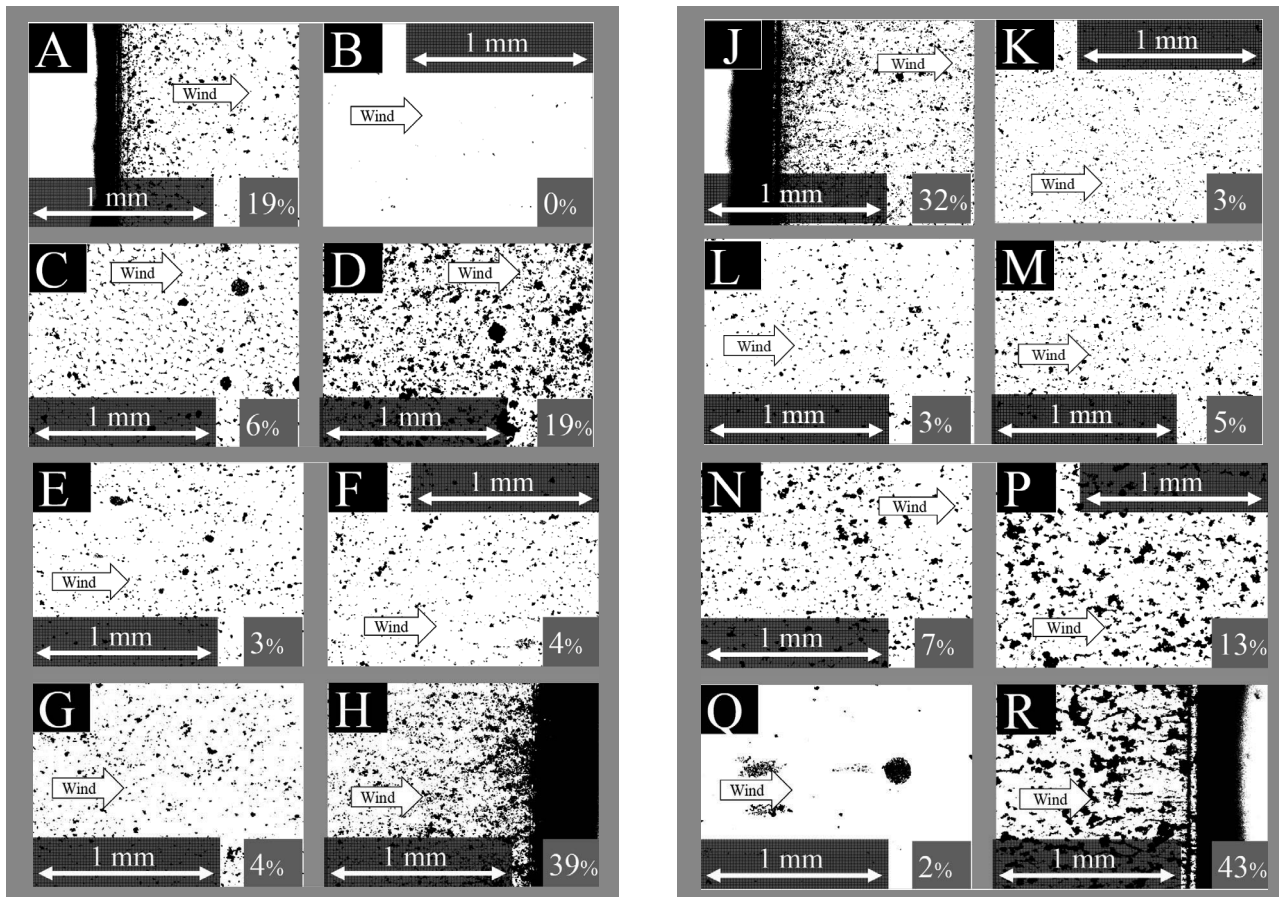
図5のA点は、接地極板の風上端であり、端部に粉塵が色濃く付着している。A点は、荷電極板の風上端から更に80 mm風上に離れた位置にある。A点に粉塵が堆積した理由のひとつとして、上流から飛来した粉塵が、風上端に衝突して付着したことが考えられる。また、B点では粉塵付着は見られず、黒色部比率は概ね0%である。

D点およびD点近傍のC点では、黒色部比率が最大で19%に達し、B点よりも粉塵付着が多い。これは、対向する荷電極板の風上端J点とD点近傍の間の空間で形成される不平等電界が強いために、J点に多く付着した粉塵(黒色部比率32%)が再飛散する時、誘導帯電で正に帯電し、その再飛散粉塵がD点とその近傍に捕集されたからと考える。

接地極板上のE点、F点およびG点と、荷電極板上のK点、L点およびM点は、いずれも平行平板空間内の平等電界中にあり、黒色部比率は4%前後である。平等電界中のこれら各点に粉塵付着が見られる原因として、主に次の二つが挙げられる。

- (1) ディーゼルエンジン内で、正負それぞれに帯電した粉塵が、平等電界中で、クーロン力により両極板に付着する。
- (2) 平等電界中を誘電分極しながら通過する粉塵が、極板に接触することにより付着する。もしくは、誘電分極した粉塵が、空中で電界の力を受けて分断されることにより電荷を帯び、クーロン力で極板に付着する。

上記の要因などが考えられるが、そのいずれが主要素なのか、またそれらの複合によるものなのかは、現状不明である。



接地極板 g-4 の観察 (A から H 点)
Observation on grounded-plate "g-4" (from A to H point).

荷電極板 e-3 の観察 (J から R 点)
Observation on energized-plate "e-3" (from J to R point).

図5 電圧印加 18 h 後の接地極板と荷電極板の観察 (%数値は黒色部比率を示す)
Fig.5 Observation of grounded-plate and energized-plate after applying voltage for 18 h. (Each %-value shows "black area ratio".)

接地極板の風下端部 H 点には、粉塵が多く付着しており、黒色部比率は 39% である。この値は、前述の接地極板の風上端 A 点 (19%) や荷電極板の風上端 J 点 (32%) より大きい。その理由は、H 点の上流側には、対向する荷電極板上の一面に粉塵が付着しており、再飛散して正に帯電する粉塵が多く存在する。よって、H 点への粉塵付着が促進されたものと推察する。

接地極板の風下端部 H 点から再飛散した粉塵は、対向する荷電極板上の P 点およびその近傍の N 点に付着している。(黒色部比率は 7% と 13%) しかし、もう少し下流側に離れた Q 点では粉塵付着は少なく、黒色部比率は 2% である。これは、負電荷を持つ再飛散粉塵を捕えるに十分な電界強度が、Q 点近傍の空間に、もはや存在しないからと考えられる。ただし Q 点の画像を見ると、粉塵の塊りとしては他の画像と比較して大きいものが捕えられており、H 点から再飛散する粉塵は、大きいサイズのものが多くあることが覗える。

荷電極板の風下端部 R 点は、粉塵を多く捕集できており、黒色部比率は、最高値の 43% であった。ここで、Q 点よりも下流側に離れた位置にある R 点で最高値となったことについて、対象位置にある A 点と比較しながら考える。

A 点の粉塵付着の要因として、粉塵の衝突を挙げたが、A 点の対象位置にある R 点で黒色部比率が最大となったことから、R 点での付着要因は、単なる力学的衝突によるものとは考えにくい。しかも、R 点に付着した粉塵は、他と比較して大きな粉塵の塊りであることが伺えるので、これは接地極板の上流側から再飛散した粉塵が R 点に付着したものと考えられる。この再飛散した粉塵は誘導帯電により、電荷を持つので、R 点に最も多く粉塵が付着した理由として、静電気力が作用した可能性があると考えられる。今回は、電界計算による極板各部の電界値をシミュレーションしておらず、この点は今後の検討課題である。

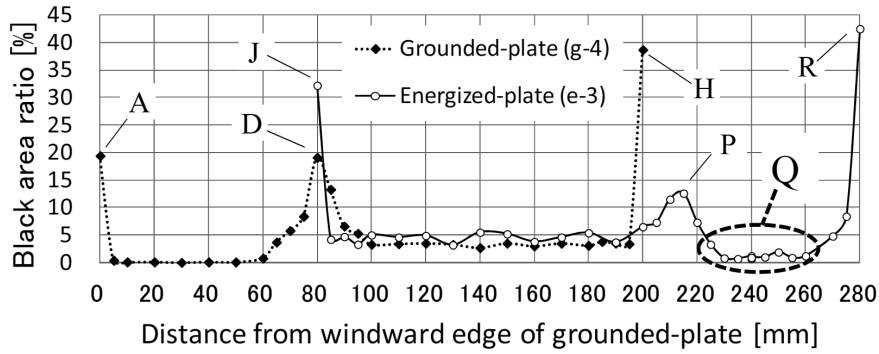


図6 接地極板 g-4 と荷電極板 e-3 における各観察点の黒色部比率
Fig.6 "Black area ratio" of observation points on grounded-plate "g-4" and energized-plate "e-3".

図6は両極板上の黒色部比率を、5から10mm間隔で観測しグラフ化したものであり、観察点A点からR点までの全点を含んでいる。横軸は、接地極板の風上端を0mm起点とし、そこから風下側各点までの距離を示している。ここで注目すべきは、接地極板では、両端部を除くと黒色部比率が最大値となるD点だが、荷電極板の風上端J点と同じ位置にあるのに対し、荷電極板では、両端部を除くと黒色部比率が最大値となるP点だが、接地極板の風下端H点よりも約15mm風下側にずれていることである。このような差異が生じた原因を考える。

図7の上部に、今回用いたESPの全極板を上部から眺めた様子を示す。前記差異が論じられる箇所は、四角で囲ったU部（荷電極板の風上端Jの周辺）とS部（接地極板の風下端Hの周辺）であり、それぞれの部分拡大図が示される。U部では、J点に付着した粉塵は再飛散する時、誘導帯電作用により正に帯電し、電気力線に沿って対向極板g-4に向かって移動するが、9m/sの通風によって風下側に戻されるように流される。即ち、太

い矢印で示すような再飛散の軌跡をたどる。到達点はD点である。一方、H点に付着した粉塵は再飛散する時、負に帯電し電気力線に沿って対向極板e-3に向かって移動するが、通風によってより風下側に流され、矢印で示す再飛散の軌跡となる。到達点はP点である。これが前述の差異の原因と考えられる。

4. 結論

接地極板と荷電極板を、互い違いに平行に配置し、不平等電界部分を有する電気集塵装置を構成した。この電極に、コロナ放電が発生しない程度の直流高電圧を印加し、濃度0.35g/m³のディーゼル排ガスを18h通風し、極板に付着・堆積した粉塵の痕跡を観察した。その結果、以下が判明した。

- (1) 不平等電界部では、いったん付着した粉塵が再飛散する時に、誘導帯電作用により帯電し、電界中のクーロン力で捕集されることが確認された。
- (2) 平等電界部でも粉塵が捕集されることが確認された。
- (3) 全極板中で最も風下にある端部近傍において、粉塵付着を表わす黒色部比率は最大となった。

参考文献

- 1) 杉田直記：2段荷電式電気集塵装置の集塵率。静電気学会誌, 31 [4] (2007) 154
- 2) R. Brandt and I. Riess : Possibilities and limitations of tunnel-air filtration and portal-flow extractions, presented at the 13th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels (conducted by British Hydrodynamics Research Group). New Brunswick, NJ, [1] (2009) 37
- 3) PIARC Technical Committee C3.3 Road Tunnel Operations : A guide to optimizing the air quality impact upon the environment, the World Road Association (PIARC) (2008)

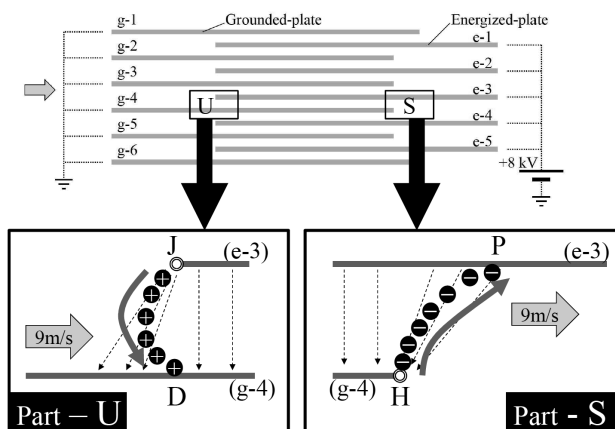


図7 風上端部と風下端部における再飛散のイメージ
Fig.7 Image of re-entrainment at both edges of windward and leeward.

- 4) V. Ferro, H. Aigner, and C. Barbeta : Air filtration system in an urban tunnel, presented at the 12th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels (conducted by British Hydrodynamics Research Group), Portoroz, Slovenia, **2** (2006) 547
- 5) T. Baba, H. Ohashi, F. Nakamichi, and N. Akashi : A new longitudinal ventilation system using electrostatic precipitator for long vehicular traffic tunnel, presented at the 3rd International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels (conducted by British Hydrodynamics Research Group). Sheffield, UK, (1979) 201
- 6) T. Baba and K. Okano : Ventilation system of Tsuruga Tunnel, presented at the 4th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels (conducted by British Hydrodynamics Research Group). York, UK (1982) 367
- 7) T. Baba, H. Ohashi, F. Nakamichi, E. Inami, and I. Akita : Recent trends in ventilation systems of long vehicle tunnels in Japan, presented at the 5th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels (conducted by British Hydrodynamics Research Group). Lille, France (1985) 371
- 8) 瑞慶覧章朝, 安本浩二 : 富士電機システムズのトンネル用電気集塵装置 - 再飛散の防止とナノ粒子の集塵性能. 静電気学会誌, **32** [5] (2008) 192
- 9) 片谷篤史, 細野洋, 村田 光, 水野 彰 : 電気集塵装置からのオゾン発生の抑制技術. 静電気学会誌 **32** [5] (2008) 222
- 10) B.L. Wesborg, J.B. Howard and G.C. Williams : Physical mechanisms in carbon formations in flames, in: Proceeding of the 14th Symposium on Combustion (1973) 929
- 11) D.B. Kittelson, J. Reinertsen and J. Michalski : Further studies of electrostatic collection and agglomeration of diesel particles, SAE technical paper 910329 (1991)
- 12) M.M. Marieq : On the electrical charge of motor vehicle exhaust particles. Journal of Aerosol Science **37** [7] (2006) 858
- 13) J. B. Gajewski and K. Gatner : Interpretation of the results of research on tribocharging in a rotating shaft-oil-lip seal system. Journal of Electrostatics 67 (2009) 365
- 14) E. dela Cruz, J.S. Chang, A.A. Berezin, D. Ewing, J.S. Cotton and M. Bardeleben : Electrical effect of soot depositions in a co-axial wire pipe flow. Journal of Electrostatics 67 (2009) 128
- 15) 福田節雄 : 電気収塵法と其応用. 電気学会雑誌, January (1930) 1
- 16) 静電気学会 : 新版 静電気ハンドブック, オーム社 (1998)
- 17) 増田閃一 : 電気集塵に関連した粉体の電気的性質 (I). 粉体工学研究会誌, **5** [4] (1968) 1238
- 18) 成 奉祚, Ahmed Aly, 李 成華, 高島和則, 桂 進司, 水野 彰 : 静電植毛電極を用いた電気集じん装置におけるサブミクロン粒子の捕集効果. 静電気学会誌, **30** [2] (2006) 89
- 19) 安本浩二, 瑞慶覧章朝, 高木康裕, 江原由泰 : 交流電界型電気集塵装置における再飛散防止と下流壁面への粒子付着防止. 粉体工学誌, **43** (2006) 198
- 20) H. Kawakami, Zukeran, K. Yasumoto, M. Kuboshima, Y. Ehara and T. Yamamoto : Diesel exhaust particle reduction using electrostatic precipitator. IJPEST, **5** (2011) 179
- 21) Harry J. White: Industrial Electrostatic precipitation. Addison-Wesley Publishing Company (1963)
- 22) 増田閃一 : 電気集塵に関連した粉体の電気的性質 (II) 集塵空間に関連した諸性質. 粉体工学研究会誌, **6** [2] (1969) 121
- 23) T. Yamamoto, T. Mimura, T. Sakurai, Y. Ehara, A. Zukeran and H. Kawakami : Novel EHD-assisted ESP for collection of low resistive diesel particles. IJPEST, **5** (2011) 151
- 24) H. Kawakami, Zukeran, K. Yasumoto, T. Inui, Y. Ehara and T. Yamamoto : Diesel PM collection for marine emissions using double cylinder type electrostatic precipitator. IJPEST, **5** (2011) 174
- 25) 増田閃一, 文在徳 : カーボンスト捕集用電気集じん装置における放電線肥大現象. 静電気学会誌, **6** [5] (1982) 320
- 26) Y. Ehara, R. Nakano, T. Yamamoto, Zukeran, T. Inui and H. Kawakami : Performance of high velocity electrostatic precipitator for road tunnel. IJPEST, **5** (2011) 157
- 27) 齊藤敬三 : ディーゼル排気微粒子の計測技術と捕集低減技術について. 粉体工学誌, **38** (2001) 493
- 28) トンネル用集じん便覧委員会 : 道路トンネル用集じん便覧, 社団法人建設電気技術協会 (1979)