交流電界の凝集促進効果を利用した液体用静電フィルタ* (モデルによる性能評価)

柳田 秀記^{*1}, 西山 恵以地^{*2}, 西村 直哉^{*3}

Electrostatic Liquid Filter Utilizing Coagulating Effect of A. C. Electric Field (Performance Evaluation of a Filter Model)

Hideki YANADA^{*4}, Keiichi NISHIYAMA and Naoya NISHIMURA

^{**} Department of Mechanical Engineering, Toyohashi University of Technology,
1-1 Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi-shi, Aichi, 441-8580 Japan

This paper presents experimental results of the performance of an electrostatic liquid filter model that utilizes an a. c. electric field to make minute contaminant particles be coagulated. The filter model consists of the coagulating cell for coagulating the particles and the collector for capturing coagulated particles. The effects of the electric field strengths in the coagulating cell and the collector and of the flow velocity are investigated. The effects of the type of electric field, a. c. or d. c., in the collector, the collector mesh size and of the zeta potential of particles are investigated as well. It is shown that the introduction of the coagulating cell to the upstream of the collector enhances the filter performance to a great degree. Useful data to develop a high-performance electrostatic liquid filter are obtained.

Key Words: Electrostatic Filter, A. C. Electric Field, Coagulation, Contaminant Particle, Velocity Gradient, Zeta Potential

1. 結 言

通常のメカニカルフィルタでは除去できない微細な汚染物の除去を可能とする静電フィルタには各種のものが実用されており^{(1)~(5)}, 油などの液体の清浄化とそれに伴う液体の長寿命化, さらに油圧システムをはじめとする各種機械の故障の大幅な低減に貢献している⁽¹⁾⁽⁶⁾. しかし, これまでに考案されている静電フィルタはいずれも外形寸法の割には処理速度が遅いという短所を有している. ろ過処理時間の短縮化や静電フィルタの小型化を可能とするためには, フィルタ性能の向上が不可欠である. 静電フィルタの高性能化により小型化が実現されれば, 航空機, 自動車, 建設機械などでも利用できるようになると思われ, それらのシステムの信頼性の向上と, 油の長寿命化による省資源化などにさらに貢献できるものと思われる.

これまでに実用されている静電フィルタの多くは直

流電界のみを利用しており, 汚染粒子(以下 粒子)を直接静電気力で電極またはコレクタに引寄せ, 捕捉しているが, 粒子を効率よく除去するには, 微細な粒子を凝集・粗大化させた後コレクタで捕捉するのが有効と思われる. 静電フィルタの中にはそのような観点から交流電界を用いているものもあるが⁽⁵⁾, 印加電圧が数十ボルトと極めて低く, そのような極めて低い電界では粒子を凝集させることは困難であり, 電界中に置かれたフィルタろ材表面の分極電荷と粒子との静電的な力により, 粒子が捕捉されているのではないかと推測される.

著者らは, 静電フィルタの高性能化を図る一つの方法として, 交流高電界を利用して微細な粒子を凝集・粗大化させることを検討しており, 油中の粒子を対象として凝集に及ぼす諸因子の影響を調べ, 有用な結果を得てきた^{(7)~(10)}. 本研究では, 著者らが考えている静電フィルタの高性能化の方法(凝集・粗大化の後に捕捉)の有効性を示すことを主な目的として, 交流高電界を印加して凝集を促進する前段部(凝集用セル)と, 凝集した粒子を捕捉する後段部(コレクタ)を有する形式の静電フィルタのモデルを試作し, 絶縁性液体である油を用いて, その性能に及ぼす諸因子の影響を調べ

* 原稿受付 2001年5月29日.

^{*1} 正員, 豊橋技術科学大学工学部(〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1).

^{*2} 正員, (株)本田技術研究所(〒321-3393 栃木県芳賀郡芳賀町下高根沢4630).

^{*3} 武蔵精密工業(株)(〒441-8560 豊橋市植田町大膳39-5).
E-mail: yanada@mech.tut.ac.jp

た。

主な記号

E_A : 凝集用セル内の交流電界強度

E_C : コレクタ内の電界強度

m : 粒子捕捉量

r : 粒子捕捉率

t : ろ過時間

v_m : 凝集用セル内平均流速

ζ_m : 平均ゼータ電位

2. 凝集と捕捉の機構

本章では、本論文で提案する静電フィルタのろ過原理について、前段部での粒子の凝集・粗大化の機構と後段部での粒子の捕捉の機構に分けて説明する。

2.1 粒子の凝集 一般に液体中にある粒子は正または負に帯電しており、粒子の周りには粒子表面の電荷と逆符号のイオンが拡散的に分布して、図1の上図に示すように、電気二重層が形成されている⁽¹¹⁾。そのため粒子間には静電的な反発力が作用し凝集しにくい状況にある。しかし、図1の下図に示すように、外部から電界 E を印加することで二重層が変形して粒子表面の電荷と二重層中の電荷が分極することにより静電反発力は低下し、粒子間に作用する van der Waals 引力が支配的となることで粒子が凝集すると考えられる。また、二重層の変形が大きいときには静電反発力は消滅し、逆に、一方の粒子と他方の粒子の二重層の間に静電引力が作用するようになると考えられ、粒子の凝集がより促進されると考えられる⁽⁷⁾⁽⁸⁾。交流電界を印加することにより、粒子が一方の電極に引寄せられることなく、液体中で凝集・粗大化が進行していく⁽⁸⁾。

凝集には速度勾配の存在が極めて重要であり、速度

Fig.1 Charged particles and electrical double layers

差によって相互に接近した粒子同士がお互いの引力圏に入ることににより凝集する⁽⁸⁾。粒子には交番的なクーロン力が作用するため電界方向に振動するが、粒子の振動振幅が凝集に大きく影響し、凝集を促進する振動振幅が存在すること⁽⁸⁾⁽⁹⁾、ならびに高電界の印加は凝集促進には必ずしも有効ではない⁽¹⁰⁾という実験結果を得ているが、それらの原因についてはまだ十分明らかになっていない。

なお、電気集塵機において荷電しにくい $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ のダストの凝集・粗大化のために交流電界や超音波が利用されるが、そこでは粒子同士の振動・衝突により凝集が進行する⁽¹²⁾。また、空気中や水中においては速度差による粒子同士の衝突により凝集が起こる⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。しかし、著者らの経験の範囲内では、それらの機構による粒子の凝集は油中ではなかなか見られない。

2.2 捕捉の機構 3章で示すように、本研究では粒子を捕捉するコレクタに再利用性を考慮して金属メッシュを用いる。金属メッシュに代えて、繊維層から構成される通常のフィルタを利用することも考えられる。コレクタを構成する金属線(あるいは繊維)1本を取り出して、電界の作用により粒子が捕捉される機構を以下に説明する⁽¹⁵⁾。

一様電界 E_0 中に垂直に置かれた円形断面の金属線あるいは誘電体繊維回りに形成される電界の半径方向成分 E_r と周方向成分 E_θ は式(1)、(2)により表され、電気力線の概略は図2に示すようになる。

$$E_r = \left(a \frac{r_c^2}{r^2} + 1 \right) E_0 \cos \theta \quad (1)$$

$$E_\theta = \left(a \frac{r_c^2}{r^2} - 1 \right) E_0 \sin \theta \quad (2)$$

ここで、 r_c は円柱の半径、 $a = (\epsilon_c - \epsilon_l) / (\epsilon_c + \epsilon_l)$ 、 ϵ_c は円柱の誘電率(導体の場合は無限大、すなわち $a=1$)、 ϵ_l は液体の誘電率である。

Fig.2 Electric lines of force around a single cylinder subjected to a uniform external electric field, E_0

液体中に円柱状の金属や液体よりも誘電率の大きい誘電体が置かれると、図 2 に示すように、円柱表面に現れる電荷と外部電界との相互作用により、円柱表面には外部の一樣電界よりも電界強度が強くなる領域が形成される。その高電界的作用により、円柱近くを通過する帯電粒子はクーロン力を受けて引寄せられ、捕捉される。帯電していない粒子でも誘電率が液体のそれよりも大きな粒子は、円柱近傍の電界のひずみにより生じる勾配力的作用により、円柱に向う力を受ける。ただし、勾配力はクーロン力に比べて一般的にかなり小さい。

なお、本研究で提案するように粒子を粗大化させることにより、コレクタメッシュへの捕捉が容易になると考えられる。

3. 実験装置と方法

3.1 フィルタモデル 図 3 は本研究で試作した静電

Fig.3 Schematic of filter model

Table 1 Physical properties of oil used at 297 K

Viscosity	Density	Conductivity
5.72 mPa·s	836 kg/m ³	2.47×10^{-12} S/m

Table 2 Mean zeta potentials of particles in test oils

Name	ζ_m [mV]
Test oil 1	-255
Test oil 2	-196
Test oil 3	-69

フィルタモデルの概略を示したものである。凝集用セルはポリカーボネイトで作製し、内部に金属の平板電極を平行に配置した。電界方向の速度勾配が凝集促進に効果的であることから⁽⁸⁾、電極間に金属製のスペーサを挿入し、流路断面内の速度勾配が全体的に大きくなるようにしている。なお、凝集用セルは図 3 (a) に示すものを直列に 2 個接続した。

コレクタの素材や形状・寸法の選択は種々考えられるが、本研究では凝集促進部導入の効果を見ることが主な目的であるので、コレクタは単純に 1 枚の金属メッシュ(100 または 200 mesh/inch)を用いて構成した。メッシュの諸元は、100 mesh/inch が線径 0.11mm, 目開き 0.143mm, 200 mesh/inch が線径 0.040mm, 目開き 0.087mm である。コレクタ部の面積が大きいほど多量の粒子を捕捉できるが、フィルタの大型化につながるため、あまり大きくすることはできない。コレクタ面積の確保とフィルタ全体の小型化という観点から検討する必要があるが、本研究では取りあえず凝集用セルとコレクタの流路面積比を 1 : 5 としコレクタの寸法を決定した。

既存の静電フィルタには目詰まりを防止するためにコレクタを流れに平行に配置する形式のものもあるが⁽¹⁾⁽³⁾、コレクタを流れに垂直に配置することにより粒子を捕捉しやすくなるため⁽¹⁶⁾、図 3 (b) に示すように、本モデルは流れと垂直に配置する構造とした。また、電界と流れが平行になるように電極を配置することにより、コレクタメッシュ表面上に粗大化した粒子が電界方向(流れ方向)に捕捉されていくと予想される。その結果、捕捉された粒子間に液体の通過する流路(隙間)が確保されることにより、目詰まりを抑制できると考えている。

3.2 試料油 市販の作動油に JIS 試験用粉体 10 種⁽¹⁷⁾ (フライアッシュ, 中位径の範囲 4.8~5.7 μm) を 1g/l の濃度で混入したものを試料油として用いた。粒子帯電量の指標となるゼータ電位(油のような絶縁性液体では表面電位にほぼ等しい)の大きさにより凝集状況が影響されるので⁽⁸⁾⁽⁹⁾、ゼータ電位の調整のために油を 150℃に加熱し、意図的に酸化させた。新油および加熱時間の異なる油 2 種類の合計 3 種類の試料油を実験に用いた。油の物性値と試料油中での粒子のゼータ電位を表 1 と表 2 に示す。なお、ゼータ電位は電気泳動法により、粒子 100 個について測定した。

3.3 実験装置と方法 図 4 は実験装置の概略を示したものである。タンク A(2)内の試料油は、脈動吸収用のダンパ(5)を出口側に取り付けたローラーポンプ(4)により凝集用セル(6)に供給され、その後コレク

タ(7)に流入し、タンク B(15)に流出する。タンク A とダンパ内の試料油は、粒子が沈降しないようにスターラ(1)で別々に常時攪拌されている。凝集用セルには交流電源(13)より交流電圧(周波数 60 Hz)を印加し、コレクタには直流あるいは交流の電圧が電源(16)から印加される。なお、図 4 では直流電界を印加する場合が示されている。直流電界を印加する場合には、電源と電極の接続の仕方により、電界の向きが流れの向きと同じ場合と逆の場合とが考えられる。表 2 に示したように試料油中では粒子は負に帯電しており、コレクタメッシュの前面側で粒子を捕捉するために、流れと逆向きに電界を印加した。なお、一般の油中での汚染粒子の帯電極性は一般的に正負両方であるが、いずれの極性の粒子もコレクタの前面側で主に捕捉するようにコレクタ部の形状を工夫することは可能である。

電界は先ず凝集用セルに印加し、その後セル内の体積分の油が流出した時点でコレクタに印加し、そのときをろ過の開始($t=0$)とした。これは、凝集用セルで十分な時間交流電界にさらされなかった粒子を性能評価の対象に含めないためである。コレクタから流出する試料油を所定の時間おきにサンプリングし、また、凝集用セル入口でも実験の前後でサンプリングした。サンプリングされた試料油中の粒子の質量濃度を

ASTM 規格 F 313⁽¹⁸⁾に準じた方法で測定し、フィルタの性能評価に用いた。さらに、CCD カメラを内蔵した顕微鏡(9)を用いて凝集用セルの出口で粒子の凝集状況を観察し、VTR(11)に録画した。流速、凝集用セル内交流電界強度、コレクタ内の電界の強度と形式(交流または直流)などを変化させて実験を行った。なお、本実験での流速や電界の値は、既存の静電フィルタで用いられている値とは関係なく設定した。

4. 実験結果と考察

フィルタの性能表示を行うために、以下に示す粒子捕捉率 r と捕捉量 m を用いた。

$$r = (C_{in} - C_{out}) / C_{in} \quad (3)$$

$$m = Q \int_0^t (C_{in} - C_{out}) dt = Q C_{in} \int_0^t r dt \quad (4)$$

ここで、 Q は流量、 C_{in} は凝集用セル入口での粒子の質量濃度、 C_{out} はコレクタ出口での質量濃度である。なお、電界が作用していない場合でも自重による粒子の沈降により、 C_{out} の値は C_{in} よりも数%程度低下する。測定された C_{out} の値に各流速について測定された自重による沈降分の補正を行うことで、電界の作用による捕捉率と捕捉量を求めた。

4.1 流速の影響 図 5 は、フィルタ性能に及ぼす流速の影響を調べた結果であり、コレクタに交流電界を印加した場合である。捕捉率(図(a))はいずれの流速においても電界印加直後が最も高く、時間の経過とともに低下してある値に収束していく傾向が見られる。時間に対する捕捉率の低下は、粒子がメッシュ表面に捕捉されるにつれて、捕捉された粒子と油中の粒子との間に静電的な反発力が作用し、コレクタに引寄せられる力が低下することが主な原因と考えられる。また、途中で捕捉率が急激に低下して、その後回復する挙動も見られるが、それは、一度捕捉された粒子が離脱することが原因と思われる。

一方、流速の増加に対する捕捉率の低下は、流速の増加に伴いコレクタメッシュに粒子を引寄せるとともに凝集用セル内での粒子の滞留時間がともに短くなることが主な原因と考えられる。図 6 は、凝集用セル出口での粒子の凝集状況を示しており、やや不明瞭ではあるが、流速の増加とともに凝集が進行しにくくなる傾向が見られ、流速の増加に対して捕捉率が低下する一因となることがわかる。しかし、図 5 (b)に示すように、捕捉量は本実験では $v_m = 6 \text{ mm/s}$ で最大となった。これは、流速の増加とともに捕捉率が低下するものの、式(4)に示されるように、一定時間内にコレクタを通

Fig. 4 Schematic of experimental apparatus

過する粒子の量は流速(流量)に比例して増加するため、両者の積が最大となる流速が存在することによる。このような結果は、コレクタを単繊維でモデル化した実験においても得られており⁽¹⁶⁾、フィルタ素材の最小単位を用いた基礎実験によってもフィルタ性能が定性的に評価できることが本実験によって確認できた。

(a) Effect of v_m on r

(b) Effect of v_m on m

Fig.5 Effect of flow velocity on filter performance (Test oil 2, $E_A=2\text{ kV/mm}$, $E_C=0.27\text{ kV/mm}$ (A.C.), 100mesh/inch)

Fig.6 States of coagulation at the outlet of coagulating cell (Test oil 2, $E_A=2\text{ kV/mm}$)

4.2 コレクタにおける電界の影響 実験条件により捕捉率などの値は変化するが、時間に対する変化の様子は図5とほぼ同様であったので、本節以降では $v_m = 6\text{ mm/s}$ のときの $t=60\text{ 分}$ における捕捉量の値を用いて性能比較を行う。ただし、コレクタに直流電界を印加した場合には、捕捉された粒子が離脱したと思われるような挙動はあまり見られなかった。

図7は、コレクタにおける電界形式(交流, 直流)と直流電界強度の影響を示したものである。同図中の左2本の棒グラフの比較より明らかなように、捕捉量は交流電界よりも直流電界を印加することにより格段に向上する。次に、直流の場合について電界強度の影響を見ると、図7中の右2本の棒グラフが示すように、電界強度の増加に対し捕捉量は向上しているものの、 $E_C = 0.27$ から 0.5 kV/mm へと約2倍の電界強度の増加に対し捕捉量はたかだか12%程度しか増加していない。単繊維を用いた実験⁽¹⁶⁾や電極表面での粒子の捕捉量を調べた実験⁽¹⁹⁾においても、捕捉量は約 0.6 kV/mm 以上で飽和するという結果が得られている。図7の結果はそれらの結果と符合するものであり、高電界の印加は必ずしも粒子の捕捉に有効ではないこと

Fig.7 Effect of electric field in collector on filter performance (Test oil 2, $E_A=2\text{ kV/mm}$, $v_m=6\text{ mm/s}$, 100 mesh/inch)

Fig.8 Effect of magnitude of E_A on filter performance (Test oil 2, $v_m=6\text{ mm/s}$, 100mesh/inch)

を示している。

4.3 凝集用セルにおける電界強度の影響 図8は、捕捉量に及ぼす凝集用セル内の交流電界強度の影響を示したもので、コレクタに直流電界を印加したときの結果である。図8に示されるように、凝集用セルに交流電界を印加しない場合($E_A = 0$)に比べて、交流電界を印加することにより、捕捉量が格段に増加することが明かである。 $E_C = 0.5$ kV/mm のときは、凝集用セル内の電界強度の増加とともに捕捉量が増加しているが、 $E_C = 0.27$ kV/mm では $E_A = 3$ kV/mm のときに捕捉量が少なくなっている。

図9は、粒子の凝集状況に及ぼす凝集用セル内の交流電界強度 E_A の影響を示した写真であり、観察領域の大きさは図6と同じである。図9に示されるように、 $E_A = 3$ kV/mm (図9 (b))では $E_A = 1$ kV/mm (図9 (a))のときより凝集は進行していたが、 $E_A = 2$ kV/mm (図6 (c))のときに比べてやや粗大化の程度が低かった。このことが $E_C = 0.27$ kV/mm のときの結果として現れたものと思われる。一方、 $E_C = 0.5$ kV/mm のときには、コレクタに引寄せる静電気力が強くなるため、個々の凝集体の大きさが全体的にやや小さい場合でも捕捉されやすくなり、 $E_A = 3$ kV/mm のときに捕捉量が最も多くなったものと思われる。また、本実験からも凝集促進に高電界の印加は必ずしも有利ではない⁽¹⁰⁾ことが示された。

4.4 コレクタメッシュ寸法の影響 図10は、コレクタのメッシュ寸法の影響を調べた結果である。100 mesh/inch のときに 200 mesh/inch のときよりも捕捉量が全体的に多かったが、比較的小さい凝集体が多く形成された $E_A = 3$ kV/mm のときには、捕捉量は両メッシュ寸法でほぼ同程度となった。この結果より、コレクタの目を細かくしても捕捉量は必ずしも増加せず、逆に減少することがあることがわかった。

図11は、両メッシュ寸法の場合について、メッシュを構成する素線周囲の電界が式(1)、(2)で示される単独円柱回りの電界によって表されると仮定したと

(a) $E_A = 1$ kV/mm (b) $E_A = 3$ kV/mm

Fig.9 Effect of E_A on coagulation of particles (Test oil 2, $v_m = 6$ mm/s)

Fig.10 Effect of collector mesh size on filter performance (Test oil 2, $E_C = 0.27$ kV/mm (D.C.), $v_m = 6$ mm/s)

Fig.11 Regions around cylinders where the electric field strength is greater than E_0

きに、外部の一樣電界よりも電界が強くなる領域(薄黒く塗られた所)を示したものである。また、凝集体が捕捉される様子を模式的に示した。100 mesh/inch のときは素線間隔が広く、素線表面に粒子が捕捉されるまでに移動すべき距離が全体に大きくなるため、粒子の捕捉には不利となるが、素線直径が大きいために高電界領域が広く、そのことは粒子の捕捉に有利に作用する。200 mesh/inch のときはその逆となる。全体として 100 mesh/inch のときに捕捉量が多くなったのは高電界領域の広さが有利に作用したためと思われる。

4.5 ゼータ電位の影響 粒子のゼータ電位は帯電量の指標となり、この値が高いほど粒子に作用するクーロン力が大きくなるため、コレクタで捕捉しやすくなると考えられる。一方、電気二重層の存在により粒子間に作用する静電反発力はゼータ電位の2乗に比例して増加するため、ゼータ電位が高い粒子同士ほど凝集しにくい⁽¹¹⁾。そこで本節では、表2に示した異な

Fig.12 Effect of zeta potential on filter performance ($E_A=2\text{kV/mm}$, $E_C=0.5\text{kV/mm}$ (D.C.), $v_m = 6 \text{ mm/s}$, 100mesh/inch)

Fig.13 Effect of zeta potential on coagulation of particles ($E_A=2\text{kV/mm}$, $v_m = 6 \text{ mm/s}$)

るゼータ電位を与える3種類の試料油を用いて行った実験の結果を示す。

図12はその実験結果であり、粒子の捕捉量はゼータ電位によらずほぼ同程度となった。凝集状況を観察した結果を図13に示すが、粒子の凝集はゼータ電位が高い $\zeta_m = -255 \text{ mV}$ のときにはあまり進まず(図13(a)), $\zeta_m = -69 \text{ mV}$ のとき(図13(b))には $\zeta_m = -196 \text{ mV}$ のとき(図6(c))よりも細長い凝集体が多数見られた。コレクタ内部は観察できないため粒子の捕捉状況は不明であるが、次のように考察できるものと思われる。ゼータ電位が比較的低く凝集体が大きい場合には、コレクタへ引寄せられる速度は小さいものの、コレクタ表面に到達するまでに移動すべき距離が全体的に小さくて済む。また、凝集体がコレクタ表面に捕捉されることにより、その捕捉された凝集体回りには高電界領域が形成されるが、その領域は凝集体が大きいほど広がるため、大きな凝集体が捕捉されることにより、その後流れて来る粒子あるいは凝集体が捕捉され易くなる。一方、ゼータ電位が高く凝集体が小さい場合には、コレクタ表面まで移動すべき距離が全体的に長くなるが、電気泳動速度が大きいため一定時間内に長い距離を引寄せられることができる。以上のように、凝集体の大きさの効果と電気泳動速度の効果の和がほ

ぼ同程度となったために、ゼータ電位の違いによらず粒子の捕捉量がほぼ同程度になったものと思われる。

5. 結 言

本研究により、交流高電界を印加して凝集を促進させる凝集促進部を前段部として導入し、後段部のコレクタに直流電界を印加することにより、静電フィルタの性能が大幅に向上することが示された。フィルタ性能に及ぼす電界や流速などの影響についても調べ、フィルタ性能を高めるのに適した流速や電界強度が存在することを確認するとともに、高性能フィルタの開発に際して有用な指針を得ることができた。また、個々の粒子のゼータ電位(帯電量)がフィルタ性能にあまり影響しないという特長を有していることも明らかとなった。

本研究ではコレクタを金属メッシュ1枚という単純な構成としたが、低い圧力損失でより高い捕捉率を実現するコレクタ形状について検討していく必要がある。また、本静電フィルタ方式の導電性液体への適用について検討することも重要である。

文 献

- (1) 飛栖虎男, 潤滑, 29-12(1984), 881-884.
- (2) 岡上公彦, 油空圧技術, 28-7(1989), 31-40.
- (3) 谷山実, 油空圧技術, 27-12(1988), 51-54.
- (4) Lee, C. H., Gidaspo, D. and Wasan, D. T., *Ind. Engng. Chem. Fundam.*, 19-2(1980), 166-175.
- (5) Lauer, L., *Ölhydraulik und Pneumatik*, 37-5(1993), 430-433.
- (6) Sasaki, A., Sasaoka, M., Tobisu, T., Uchiyama, S., and Sasaki, T., *Lubric. Engng.*, 44-3(1988), 251-256.
- (7) Yanada, H. and Okumura, R., *Proc. Instn. Mech. Engrs., Part C*, 211-C6(1997), 451-461.
- (8) Yanada, H., Kikuchi, M. and Nishimura, N., *Proc. Instn. Mech. Engrs., Part C*, 215-C2(2001), 201-209.
- (9) 西村直哉・柳田秀記, 機講論, No.005-1(2000), 121-122.
- (10) 今川智哲・柳田秀記, 機講論, No.014-1(2001), 8-11-8-12.
- (11) 北原文雄・渡辺昌, 界面電気現象, (1972), 共立出版.
- (12) 静電気学会, 静電気ハンドブック, (1998), オーム社.
- (13) Flidlander, S. K., *Smoke, dust and haze. fundamental of aerosol behavior*, (1977), John Wiley & Sons.
- (14) Spicer, P.T. and Prastinis, S.E., *AIChE Journal*, 42-6(1996), 1612-1620.
- (15) Zebel, G., *J. Colloid Science*, 20 (1965), 522-543.
- (16) Yanada, H. and Takikawa, Y., *Proc. Instn. Mech. Engrs., Part C*, 208-C6(1994), 387-393.
- (17) 日本規格協会, JIS Z-8901, (1995).
- (18) ASTM Standards, F313, (1983).
- (19) 若澤靖記・他3名, 機論, 65-639, B(1999), 4572-4578.