

純水の高速噴出時に発生する帯電霧の空間分布

浅野一明¹・下川博文²

¹ 大学院工学研究科電気工学専攻

² 電気電子工学科

Spatial Distribution of Charged Fog Generated from Water-jet

Kazuaki ASANO¹⁾, Hirofumi SHIMOKAWA²⁾

Abstract

When water stream is breaking up to tiny droplets, many charged particles are generated. In the previous report, authors described that the positively charged fog is generated from pure water ejected with higher velocity in turbulent flow region. It is considered that, for high-speed water jet, the streaming electrification of the jet is dominant for producing charged fog rather than Lenard effect. Studying for the charged fog distribution and its action is interested. The purpose of this paper is to consider the distribution by three variations that are measured with the induction current from the charged fog, the charge at Faraday cup and the space charge density by suction type Faraday cages. Assuming in the earthbox the calm is keeping, the charged fog distributes forming many groups with various polarity and floats for a long time.

Key Words: Water-jet technology, Charged Fog, Aerosol particle, Spatial Distribution

1. はじめに

水が分裂するときに発生する微粒子は、レナード効果により帯電することが知られている¹⁾。こうしてできた水滴は微小であるため、長時間にわたり空気中に浮遊し、大気中の固体粒子を帯電させると考えられる。近年の森林浴ブームではマイナスイオンの生体への影響が議論されているが、このイオン供給方法として水の分裂を使った装置も存在する。本報告で扱う帯電霧はこのような帯電微粒子の集まりである。

著者らは前報までに純水を高速で噴出したときに発生する帯電霧の発生電荷量について報告し、以下の結果を得た^{2), 3)}。

(1)純水をノズルから数10m/sの高速で噴出した場合、プラスに帯電したジェットから多量のプラスと少量のマイナスの帯電霧が同時に発生する。

(2)霧には粒径分布がありプラスの霧の方が大きい。

一方、発生した帯電霧の分布と動きは液体の噴出や噴霧を扱う場では無視できないものと考えられる。例えば、静電塗装技術では帯電した粒子が被塗装物付近の電界を弱め、塗料の使用量を増加

させている。そのため効率が悪くなるという問題が生じる。このように帯電霧が時間および場所に関してどのように存在し、またどのように動き消滅するかは、帯電霧が引き起こす障害や帯電霧の発生機構を知る上で重要である。しかし現在まで電荷の空間中の分布を測定した例はほとんどなく、測定方法が確立されていないのが現状である。本報告では帯電霧の分布と動きをつかむため、空間中の微小領域を対象とする測定を行い、帯電霧の分布と動きを予想することを目的とする。そこで帯電霧による誘導電流を測定する方法と、微小空間中の帯電霧を捕らえる方法の二通りを試みた。その結果、噴出停止後の拡散に相当する時間に興味深いデータを得たので考察する。

2. 誘導電流による測定

簡単な装置を使い、発生した霧がある点に到達する割合を知ることを目的として、誘導電流の測定を試みる。

2.1 測定方法

図1(a)に誘導電流を測定する装置を示す。装置は加圧タンク、アースボックスで構成されてい

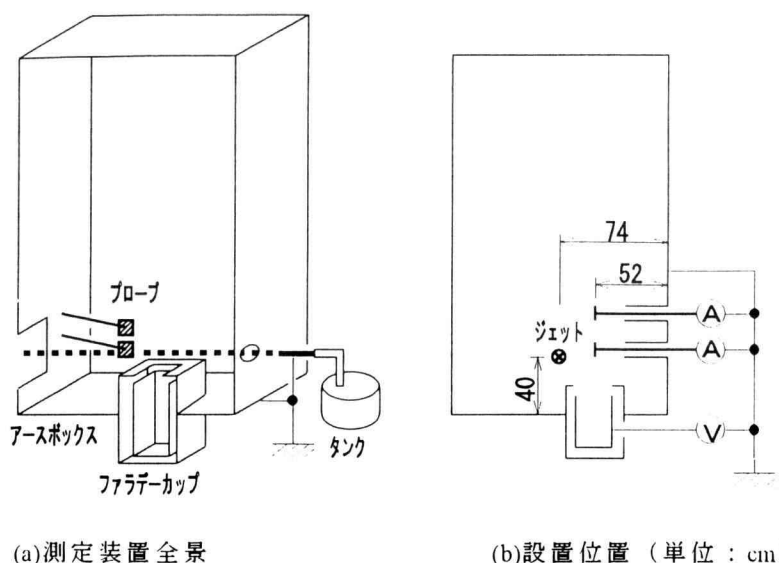


図1 誘導電流測定装置

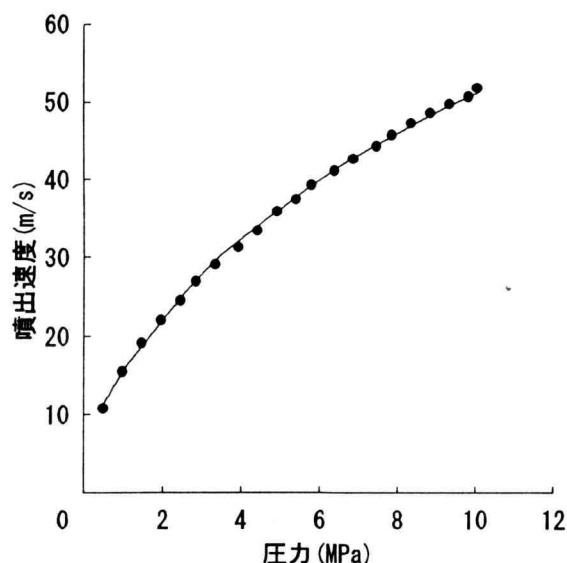


図2 噴出速度の圧力特性

る。内径0.3mmのノズルから高純水のジェットを噴出し、アースボックス中を通過中に帯電霧を発生させる。ボックス内の図1(b)に示す位置には、誘導電流を測定するためのプローブ2本と、沈降する帯電霧の電荷量変化を測定するためのファラデーカップを設置する。

アースボックスは幅94cm×奥行き146cm×高さ163cmのアルミニウム製である。

誘導電流を測定するプローブは真ちゅう製で、長さ20cmの棒の先端に2×2cm²の板をハンダ付けたものである。これを2本、アダプタを介して設置し、ジェット近傍の帯電霧を対象に測定する。設置位置が帯電霧の内部にあり、またプローブの棒部分はシールドしていないので、誘導源となる領域を限定することはできない。これらのプローブにはエレクトロメータ（上：ケースレー製

617, 下：アドバンテスト製TR8401）を接続し、電流レンジで誘導電流を測定する。

ファラデーカップは外容器が23cm×20cm×高さ42cmのアルミニウム製、内容器が19cm×16cm×38cmの真ちゅう製である。これにエレクトロメータ（川口電機製MMAⅡ-17A）を接続し、電荷量レンジで噴出停止後の電荷量の変化の様子を測定する。

加圧タンクは内径20cm、高さ45cmの円筒形で、バルブ、配管とともにすべてステンレス製である。

試料水は水道水をイオン交換器に通した後、蒸留し、さらに超純水製造器（ミリボア製）で精製した18.3MΩcmの超純水を使用した。加圧タンクに超純水を注入した時点では約13MΩcmになった。これは水が空気に触れた際に気体が急速に溶け込むことや、注入用パイプやタンクのわずかな汚れが原因と考えられる⁴⁾。噴出用ノズルは内径0.3mm、長さ15cmのステンレス注射針（日本理化学器械製）である。この先端を直角にカットし、切断面を超精密仕上げ用フィルム（スリーエム製）で研磨した。

水の加圧には窒素ガスを用いた。長さ15cmのノズルにおける圧力と噴出速度の関係を図2に示す。10MPaで最高52.5m/sの噴出速度が得られる。この速度におけるノズル内の流れはレイノルズ数から判断すると乱流である。

噴出停止後はボックス内に外部から風が吹き込みことを防ぐ必要がある。そこでボックス出口にスライド式のシャッターを設置し、噴出を停止した直後、シャッターを閉じる。

2.2 測定結果

測定は噴出中と噴出停止後について行った。噴出中に測定された電流値はジェットから遠ざかる

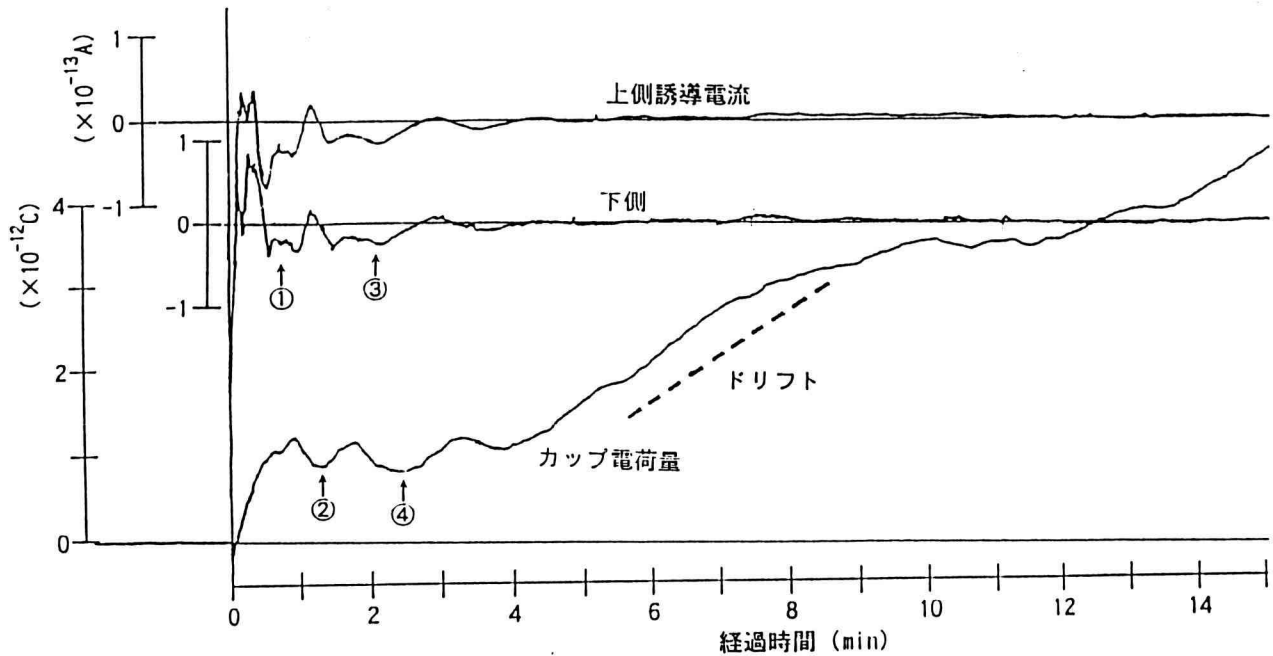


図3 誘導電流測定結果

につれて小さくなった。よって帯電霧はジェット付近に多量に分布することがわかった。

噴出停止後の誘導電流とファラデーカップの電荷量変化のレコーダ出力の例として、49m/sで噴出したときのものを図3に示す。横軸に噴出停止からの経過時間、縦軸に電流と電荷量をとったものである。データは上から誘導電流上プローブ、同下プローブ、ファラデーカップ電荷量である。

誘導電流は2本のデータともほぼ同じ変化を示した。電流は 10^{-14} Aオーダーである。噴出停止直後、誘導電流はマイナスに大きく振れた。これはプローブに影響する範囲の空間からプラスに帯電したジェットがなくなるためである。その後、1分程度の周期で正負に振動した。10分以上経過するとほぼ0Aに収束した。

ファラデーカップで測定した電荷量は、 10^{-12} Cオーダーでプラスの傾きをもった。よってプラスの霧の流入が示されている。また傾きは時刻により変化し、ときにはマイナスの傾きを示すこともあった。なおこのデータには測定環境の影響でドリフト電流（およそ 1×10^{-14} A）が含まれていた。これを図中に点線で示す。

2.3 考察

測定前、著者らは誘導電流が図4のようになると予想していた。まず噴出停止直後、プラスのジェットがなくなるためマイナスに大きく振れる。その後、プローブがジェットとほぼ同じ高さにあるため、それより上部にあるプラス電荷が沈降するにつれてプローブに近づきプラス電流が流れる。さらに霧がプローブより下に達すると、プローブから遠ざかるためマイナス電流が流れ、次第に0Aに収束する。

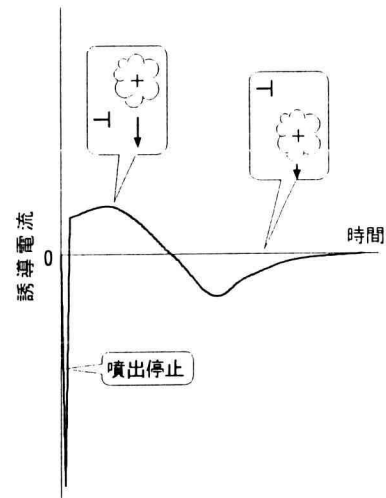


図4 誘導電流の予想

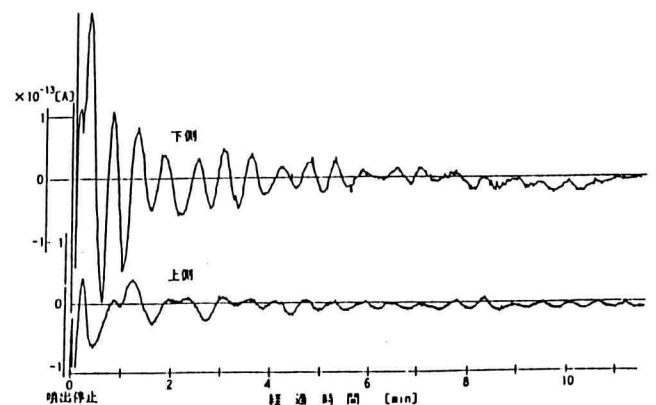


図5 振動の顕著な例

しかし実際の誘導電流は複雑で、数分間にわたってプラス、マイナス電流が周期を持って流れた。図5にこの振動が顕著に現れた例を示す。このときのプローブはボックスの壁面から30cmの位

置とし、下側をジェット付近（床から40cm）、上側をジェットから70cm上空に設置したものである。噴出速度は42.7m/sである。このときの周期は30～45秒で、安定するまでに10分以上要する。このように長時間電流が流れることから、帯電霧は比較的長時間空間を漂っていることが示されている。波形が振動する要因として、

- ①帯電霧がいくつかの層になっている。
- ②アースボックス内を1周するのに40秒ほどかかる対流がある。

などが考えられる。仮に霧が無風状態のアースボックス内を重力により沈降しているとすれば、この振動から霧の分布は空間中一様ではなく多数の層になっていることがわかる。

図3の結果では、プローブは4cm離して上下に設置した。振動の最大値となるところに注目すると数秒であるが時間差がみられた。上プローブのピークから数秒遅れて下プローブにピークが現れる。よって霧がゆっくり沈降していると予想できる。

一方、ファラデーカップの測定では電荷量変化が緩やかに蛇行していたことから、霧が空間に一様に分布していないことがわかる。

そこで誘導電流と電荷量の変化を比較する。図3の時刻①において誘導電流がマイナスとなっている。このときプローブ前面をマイナス電荷が通過していると考えられる。プローブとファラデーカップ上面は10cm程度離れているため、微小な粒子が移動するためにはかなり時間が必要である。そこでこのマイナスの霧がカップに到達したのが時刻②であると考えられる。同様に時刻③のマイナス電流は時刻④に対応している。数回の実験の傾向として、誘導電流がプラスになった後は、電荷量変化もプラスの傾きが大きく、誘導電流がマイナスのときには、傾きが小さくなるどころがみられる。またドリフトより傾きが小さくなる、あるいはマイナスの傾きを持つようなときにはファラデーカップにはマイナスの霧が入ってきていることを示している。

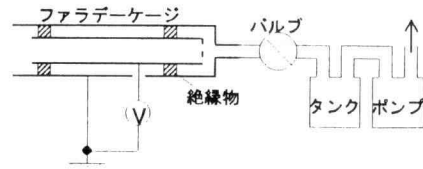
3. 吸引形ファラデーケージによる測定

前章の考察の証拠をつかむため、空間中の微小体積における電荷密度を測定する。

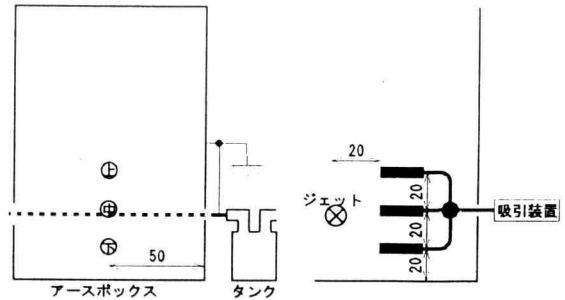
3.1 測定方法

図6に測定装置を示す。図6(a)に示す小型の吸引形ファラデーケージ3本を図6(b)のようにアースボックス内に設置し、3本同時に等量吸引する。測定は噴出停止後から数分間隔で連続して行う。このとき得られた電荷量から電荷密度を算出し評価する。

吸引形ファラデーケージは真ちゅうのパイプを材料とし、外側が直径2cm、長さ15cm、内側が直



(a)吸引形ファラデーケージ



(b)設置位置（単位：cm）

図6 局部吸引の測定装置

径1cm、長さ13cmで、リング状のテフロン(PTFE)を挟み絶縁する。電荷を捕らえるために内部に真ちゅうメッシュ50を2枚付けてある。吸引は真空ポンプによりタンク内をあらかじめ減圧しておき、ファラデーカップとタンクの間にあるバルブを開放することで行う。それぞれにエレクトロメータ（上：ケースレー製TR8411、中：同TR8401、下：川口電機製MMAⅡ-17A）を接続し、吸引される電荷量を測定する。吸引量は3本合計で約200cm³とし、吸引終了までにおよそ2秒を要する。ケージ内の風速の変化や、ケージに吸引される領域などは不明である。一回の噴出につき1分間隔で5分程度まで測定した。

なお帯電霧の発生方法は2章で述べたものと同様である。

3.2 測定結果

図7に噴出停止から10秒後に測定した電荷密度の噴出速度依存性を示す。縦軸の電荷密度は、測定された電荷量を吸引体積で除算した値である。低速域においてマイナスの霧が検出され、速度上昇とともに右上がりのカーブでプラスの霧を検出した。またケージの高さにより電荷密度に差が現れた。

図8に電荷密度の経過時間依存性の一例として噴出速度45.8m/sのときのものを示す。噴出停止直後の電荷密度は $0.4 \sim 0.8 \times 10^{-15} \text{C/cm}^3$ で、時間とともに減少し、わずかな増減はみられるものの、 $0.1 \times 10^{-15} \text{C/cm}^3$ 程度で安定した。減衰時間や安定した値には位置による差がみられる。また噴出速度が上がると初期の電荷密度が大きくなる。しかし安定した値は、いずれの速度でも上記の値程度だった。

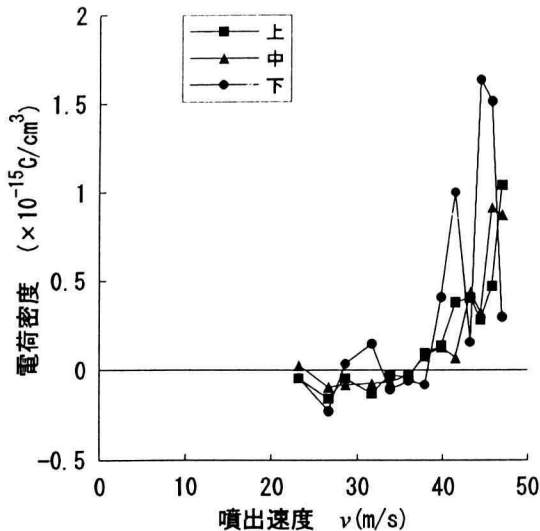


図7 電荷密度の噴出速度依存性

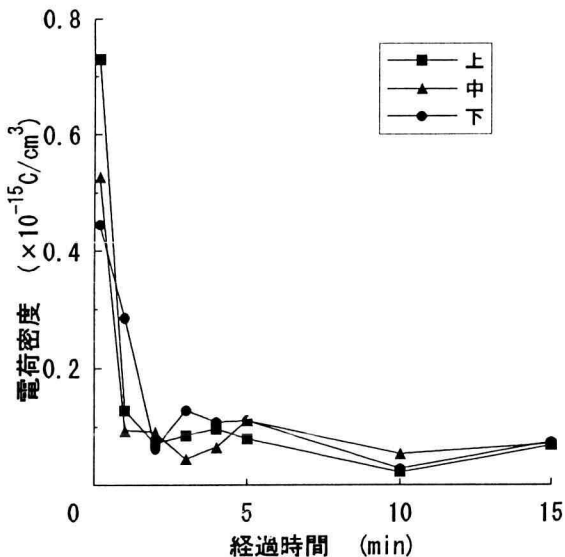


図8 電荷密度の経過時間依存性

3.3 考察

図7に示した噴出速度依存性は右上がりのカーブとなったが、速度によるばらつきは大きい。カーブからはずれて極端に小さい値（例：下の42m/s付近）となる理由は、その場所に電荷が存在しなかったことが考えられる。これは前述した帯電霧が固まりとなって分布していることを支持している。

図8の局部吸引における時間経過に関して細かく分析する。噴出停止直後の値が電荷密度の大きい順に、上・中・下とプロットされている。1分後では下・上・中となり上と下の減少率に大きな差が現れた。このことは粒子が落下している証拠である。噴出停止直後に上に分布していた帯電霧が1分間で40cm以上落下し、下のケージに濃度の濃い部分として捕らえられたと考えられる。

以上のことから図9に示すイメージのように、

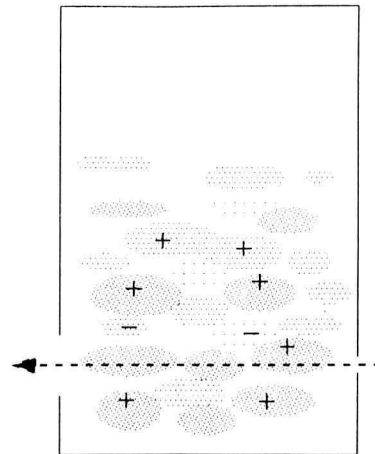


図9 帯電霧の空間分布イメージ

空間中には極性別の電荷密度の濃い部分、薄い部分がランダムに存在していると考えられる。

4. 考察

4.1 帯電霧の発生機構

前述したように帯電霧は極性ごとの固まりとなって空間に分布していると考えた。この分布が作られるのはその発生機構に要因があると考えられ、以下にその機構を説明する。

噴出中のある時点でプラスの霧がジェット周囲に存在していれば、その霧は次のプラスの霧の発生を抑制する。この霧がジェットから遠ざかると、次の霧が発生し、これが繰り返されるため空間中に帯電粒子密度の濃淡ができる。

また先に発生したプラスの霧がマイナスの霧を誘導する可能性がある。こうしてプラス、マイナス交互に発生していれば、発生直後に一部が中和される。よって電荷密度の濃淡が空間中に現れる。

ジェットから発生する粒子には大きささまざまなものが含まれている。噴出中にこれらの粒子が自由落下により分離され、大きい粒子は下方に落下し、小さい粒子が上空に残留するということで分布が生じる可能性もある。

4.2 蒸発と沈降速度

本研究で対象にしている帯電霧は粒径が数10～数100 μm という微小な水滴である。今回の測定では最長15分の長時間の測定を行った。この際測定されたものが水滴かどうかという疑問が生じる。水滴の蒸発については過去に研究されており、その寿命は直径40 μm で2.3秒（20℃、50%RHの空気中において）という値が計算される⁵⁾。

誘導電流測定においてプローブ間で電流変化の

時間差が現れた。この時間差から帯電霧の沈降速度 v を求めることができる。前述したようにプローブは4cm離して設置してある。このとき5秒程度の時間差が現れたので、 $v=8\text{mm/s}$ となる。一定速度で落下している粒子の半径 r は次式で与えられる。

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v}{2g\rho}}$$

ここで η は空気の粘性係数、 ρ は液体の密度、 g は重力加速度である。これを計算すると直径約 $16\mu\text{m}$ となる。しかしこの粒径の寿命はおよそ1秒と速いので、測定したものが水滴である可能性は低く、蒸発によって残った電荷が空気中の固体粒子と結合した可能性が示唆される。

5. まとめ

帯電霧発生後の分布と挙動について、無風状態を仮定し、次のように考察した。

- (1) 帯電霧は最長10分程度まで空間を漂う。
- (2) 極性ごとに濃淡をもったいくつかの固まりと

なって分布し、ゆっくり落下してする。

今回は考察する上での仮定が極端なため、複雑な物理現象の解明には至っていない。実際にはジェットや粒子の運動が対流を生じさせ、ジェットの分裂も時々刻々変化しているため、定性的な評価は困難である。

また空間分布の測定は試みの域にあり指向性などの点を十分検討していないが、このような装置でも測定点を増やし、場所を適当なところへ選べば空間分布の可視化が可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 静電気学会編：静電気ハンドブック，p.104，オーム社 (1981)
- 2) 浅野一明・下川博文：神奈川工科大学研究報告 B，22 (1997) 45
- 3) 浅野一明・下川博文：静電気学会誌，22 (1998) 204
- 4) 半導体基板技術研究会編：超純水の化学，p.54，329，392，リアライズ社 (1990)
- 5) ウィリアム C・ハインズ：エアロゾルテクノロジー，p.241，井上書院 (1985)