

## エアワッシャ内での水滴の運動

松 藤 久 良\*

### Motion of a Droplet in the Airwasher

Hisayoshi Matsufuji

Single particle which starts from the origin at an arbitrary initial velocity under the uniform flow is studied theoretically. Particle is assumed small in size and spherical in shape. Stokes drag law is used as the interaction between a particle and fluid. As a result, influence of the direction of initial velocity on the time required for a particle to move a certain distance downstream is small. Particle does not move so far in the direction perpendicular to the flow in spite of the initial velocity. Even if a particle starts at arbitrary initial velocity, particle motion becomes soon same as fluid one.

#### 1. はじめに

半導体の製造工場であるクリーンルームでは、室内を清浄空間にするため、いわゆる、ヘパ(High Efficiency Particulate Airfilter: HEPA)といわれる高性能フィルタで循環空気をろ過し、空気中の塵埃を除去している。半導体の集積度があがるにつれ、清浄度もクラス 100,000 からクラス 100、クラス 10 とより高清浄度を要求されている。さらに、今まではかえりみられなかった空気中に含まれるホウ素、アンモニア、硫黄酸化物、窒素酸化物などの微量なガス成分も歩留り低下の原因となるため、除去されるようになった。

一般には、これらのガス成分は活性炭やイオン交換樹脂からなるケミカルフィルタを用いて除去される。しかし混入量が微小とはいえ循環される空気の量が膨大なため、ケミカルフィルタの寿命が短いのが難点である。ケミカルフィルタの交換は空調の運転を停止する必要がある、24 時間運転のクリーンルームでは年間を通して工場の停止期間が極めて少なく、寿命が来たフィルタをすぐ交換できないことも多い。またケミカルフィルタのコストが高いこと、寿命がきたフィルタが産業廃棄物となり、処理費用がさらにかかることが問題となる。何よりも、環境対策が大切な現在において、廃棄物の量を極力少なくするための弊害になっている。

そこで、ガス成分のうちアンモニアや二酸化硫黄などの水溶性のガスに対してはエアワッシャが用いられるようになった。エアワッシャを単独で使う場合と、安全のためにケミカルフィルタを用いるが、その前段にエアワッシャを設置しケミカルフィルタの長寿命化を図る場合とがある。

エアワッシャは、もともとは、夏の冷房のために高温の空気中に水を噴霧し、蒸発熱により空気の温度を下げて室内に送り込むために使われた。しかし、空気の温度は下がるものの湿度が高くなるため、初期の空調用には使われたが、フロンの発明とともに現在の冷凍機やエアコンにとって替われ、地下水の豊富な地域の工場で大雑把に冷房するような、一部の特殊な用途にしか使われなくなった。

---

\* 機械工学科

半導体のクリーンルームでは、空気清浄度とともに温湿度管理も厳しく、たとえば室温 23℃、湿度 40% など一年中恒温恒湿が要求される。また、生産装置は高価な専用機が多く、水の使用がたいへん嫌われているのも現状である。しかし、空気中に含まれるアンモニアや硫酸化物の濃度は低いので、たとえば水を噴霧したとしても、水滴の大きさをできる限り小さくしたり、噴霧量を最小限におさえることにより、水溶性のガス成分を除去しても、空気の湿度をあまり上昇させないように工夫をすれば極めて有効な方法となる。

水を噴霧するノズルは散水用や加湿用など数多くの種類がある。ノズルメーカーも最近ではクリーンルーム用のノズルを作っている。クリーンルームを対象にエアワッシャを考えると、噴霧する水の量、水滴の粒径、初速度、噴霧する方向などは大切である。このような分野では、ノズルメーカーの研究開発は行われているが、ほとんどが実機の試作と性能テストに集中しており、基礎的な研究は行われていない。

そこで、エアワッシャ内の水滴の運動を取扱うことにする。一つのノズルからは粒径の異なる水滴がある角度の範囲で噴霧されるが、ここでは、単一の水滴粒子の運動を考える。エアワッシャ内の定点から単一の水滴粒子を打出し、その水滴粒子が、打出される初速度や打出される方向により、空気の流れによってどのような運動を行うかを調べる。

エアワッシャで噴霧される水はクリーンルームの性質上超純水が用いられる。さらに、使用後の水に対しては排水処理が必要となる。このため、使用する水の量を減らすことは、超純水設備と排水処理設備を小さくすることができ、ケミカルフィルタの寿命を長くするとともに工場環境問題の改善にも貢献するものと期待される。

## 2. 方程式系

### 2.1 仮定

- (1) エアワッシャ内の流れは十分発達した乱流であるが、ダクト内の流れであるので、ノズルの形状とエアワッシャの壁面近くの境界層は無視し、流体は非圧縮の完全流体とする。
- (2) 粒子は、球形で小さく、流体からストークスの抵抗法則をうけるものとする。
- (3) 粒子の混入数は少なく、流体運動は、粒子の混入に影響されないとする。
- (4) 粒子の混入数は少なく、粒子間の相互作用は無視する。
- (5) 粒子は水滴であるが、運動中に変形したり蒸発したりせず、一定半径の球形のままとする。
- (6) 粒子は小さく、また運動する距離も長くなく、重力は無視する。
- (7) エアワッシャ内の流れを取扱うが、エアワッシャの壁ははるか遠くにあるものとする。

### 2.2 解析モデル

図1に示すように一様流の方向に  $x$  軸をとり、粒子を打出す位置を原点とし、 $x$  軸に垂直に  $y$  軸をとる。粒子の位置座標を  $(x, y)$  とする。

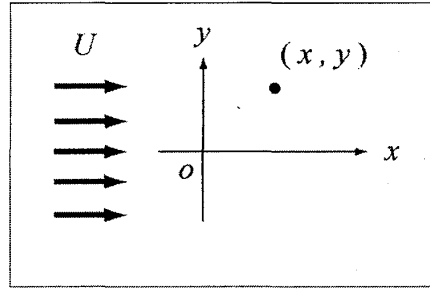


図 1 座標系

### 2.3 支配する方程式

粒子の半径を  $R$ 、密度を  $\rho_p$ 、粒子の  $x$  方向速度を  $u$ 、 $y$  方向速度を  $v$ 、流体の粘性係数を  $\mu$ 、流体の  $x$  方向速度を  $u_f$ 、 $y$  方向速度を  $v_f$  とする。粒子は流体からストークス抵抗をうけるとすると、粒子の運動方程式は、

$$\frac{4}{3}\pi R^3 \rho_p \frac{du}{dt} = 6\pi\mu R(u_f - u) \quad (1)$$

$$\frac{4}{3}\pi R^3 \rho_p \frac{dv}{dt} = 6\pi\mu R(v_f - v) \quad (2)$$

となる。

また、粒子の軌跡を定める方程式は、

$$\frac{dx}{dt} = u \quad (3)$$

$$\frac{dy}{dt} = v \quad (4)$$

となる。

### 2.4 初期条件

粒子は原点から、初速度( $u_0, v_0$ ) で出発することになると、初期条件は、

$$t = 0: x = 0$$

$$y = 0$$

$$u = u_0$$

$$v = v_0$$

(5)

となる。以下において、粒子の初速度  $u_0, v_0$  を任意の大きさと与える場合と、初速度の大きさ  $V$  と  $x$  軸からの打出す角度  $\theta$  とで与える場合を考える。後者の場合、粒子の初速度は

$$u_0 = V \cos \theta$$

$$v_0 = V \sin \theta$$

(6)

となる。

## 3. 結果および考察

以下では、流体は空気とし、 $\mu = 1.8 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ 、粒子は水滴とし、 $\rho_p = 1000 \text{ kg/m}^3$  とする。また、流速は  $u_f = 1 \text{ m/s}$ 、 $v_f = 0 \text{ m/s}$ 、粒子の大きさは、 $R = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m}$  として、粒子の初速度の影響について

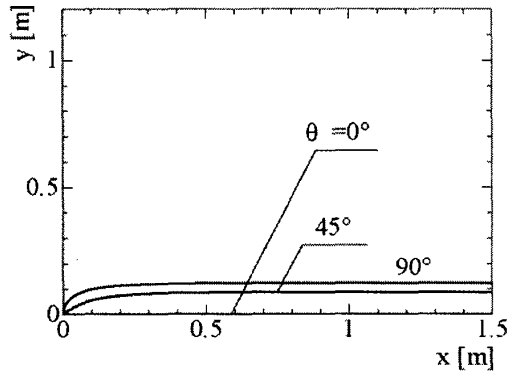


図2. 代表的な粒子の軌跡  
 $[\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ]$

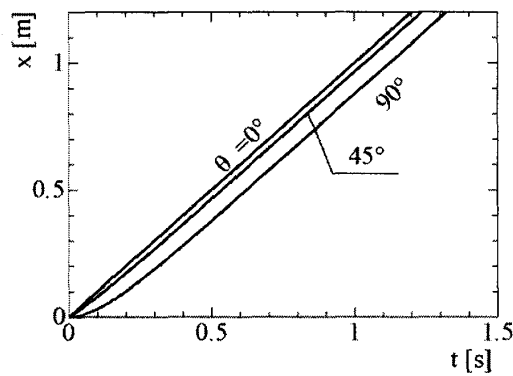


図3. 代表的な粒子のx方向の位置座標  
 $[\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ]$

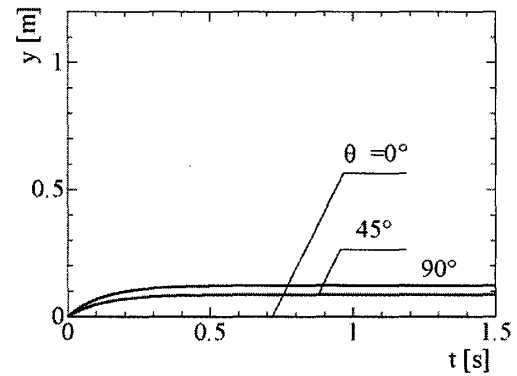


図4. 代表的な粒子のy方向の位置座標  
 $[\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ]$

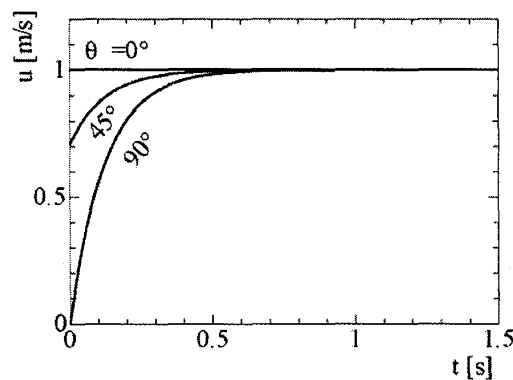


図5. 代表的な粒子のx方向の速度  
 $[\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ]$

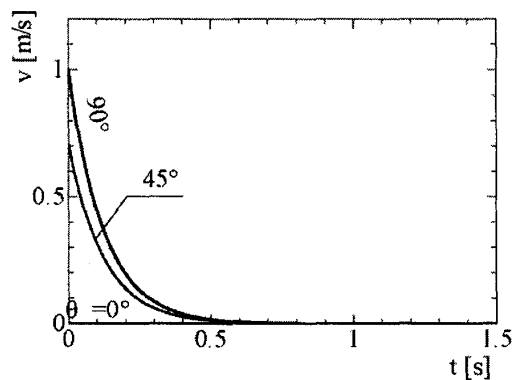


図6. 代表的な粒子のy方向の速度  
 $[\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ]$

調べることにする。

### 3.1 代表的な粒子の運動

代表的な粒子の運動を図 2~6 に示す。初速度の大きさ  $V = 1 \text{ m/s}$  で打出角度  $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  を選んだ。

図 2 は粒子の軌跡で、 $\theta = 0^\circ$ 、すなわち原点より  $x$  軸方向に打出した場合、粒子は  $x$  軸上を運動する。 $\theta = 45^\circ$  の場合、最初は  $45^\circ$  で出発するが、流体からストークス抵抗を受けしばらくすると  $x$  軸に平行に運動する。 $\theta = 90^\circ$ 、すなわち、流れに垂直に打出した場合も  $x$  軸からあまり離れないうちに  $x$  軸に平行に運動することがわかる。

図 3 は粒子の  $x$  軸方向の位置座標で、 $\theta = 0^\circ$  のときは位置と時間とが正比例する。 $\theta = 45^\circ, 90^\circ$  のときは、はじめは時間の増加とともにゆっくり増えるが、1 秒程度後には  $\theta = 0^\circ$  の線と平行になっており、粒子は流体と同一の運動を行っている。

図 4 は粒子の  $y$  軸方向の位置座標で、横軸は異なるものの、図 2 と似た傾向がある。十分時間がたって後  $\theta = 90^\circ$  で  $y$  方向に  $0.12 \text{ m}$  程度しか離れていない。

図 5 は粒子の  $x$  方向の速度で、 $\theta = 0^\circ$  のときは初速度  $u_0 = 1 \text{ m/s}$  なので、初めから流体運動と一致している。 $\theta = 45^\circ$  のときは初速度  $u_0 = 0.707 \text{ m/s}$  であるが、すぐに加速され  $u = 1 \text{ m/s}$  になる。 $\theta = 90^\circ$  のときは初速度  $u_0 = 0 \text{ m/s}$  であるが、1 秒も経たぬうちに加速され  $u = 1 \text{ m/s}$  になる。

図 6 は粒子の  $y$  方向の速度で、 $\theta = 0^\circ$  のとき、初めから  $v = 0 \text{ m/s}$  である。 $\theta = 45^\circ$  のときは初速度  $v_0 = 0.707 \text{ m/s}$ 、 $\theta = 90^\circ$  のときは初速度  $v_0 = 1 \text{ m/s}$  であるが、流体運動により減速され、1 秒も経たぬうちに  $v = 0 \text{ m/s}$  となる。

今回はエアワッシャを念頭に置き粒子の半径を  $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}$  すなわち  $0.1 \text{ mm}$  とした。したがって、ストークス抵抗を強くうけ流体運動にすぐ追従していることがわかる。

### 3.2 流れに垂直方向の粒子の初速度を変化させた場合の粒子の運動

前節では  $\theta = 90^\circ$  で打出した粒子も  $x$  軸からどんどん離れるのではなく、しばらくすると  $x$  軸に平行に運動し  $y$  方向にはあまり移動しなかった。そこで、ここでは流れに垂直に粒子を打出すことにし、その初速度の大きさをかえて、運動を調べることにする。すなわち、 $u_0 = 0 \text{ m/s}$  とし  $v_0 = 1 \text{ m/s}$  から  $10 \text{ m/s}$  と  $1 \text{ m/s}$  おきを選んだ。粒子の運動を図 7~10 に示す。

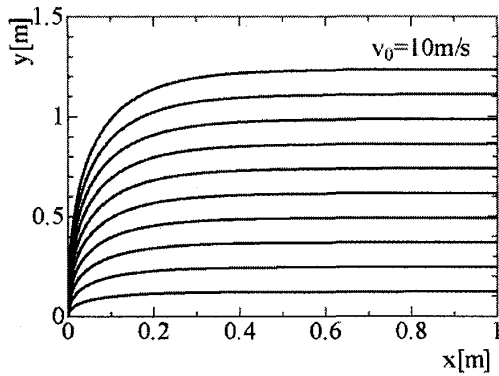
図 7 は粒子の軌跡である。 $y$  方向初速度が大きくなるにつれ、粒子の軌跡も  $x$  軸から離れる。しかし、今回選んだ一番大きな初速度  $v_0 = 10 \text{ m/s}$  のときでも  $y$  方向には  $1.2 \text{ m}$  程度しか移動していない。流れが  $x$  方向に  $1 \text{ m/s}$  で粒子の半径が  $0.1 \text{ mm}$  のときは、流れに垂直方向の初速度をかなり大きくしても粒子はそれほど移動しないことがわかる。

図 8 は粒子の  $x$  軸方向の位置座標である。この図より、 $x$  方向の運動は粒子の  $y$  方向の初速度に依存せず  $x$  方向の初速度（この場合は  $u_0 = 0 \text{ m/s}$ ）のみによって決まることがわかる。図 8 の曲線は図 3 の  $\theta = 90^\circ$  の曲線とまったく一致している。

図 9 は粒子の  $x$  方向の速度である。この図も図 8 と同様に粒子の  $y$  方向の初速度に依存せず、全て同一の

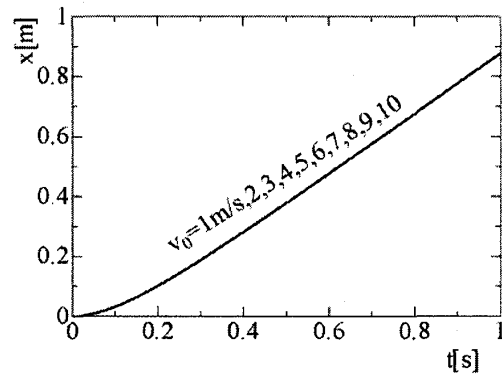
曲線になる。 $u_0 = 0 \text{ m/s}$  で出発したが、1秒後には流速と等しい  $u = 1 \text{ m/s}$  に加速されている。図9の曲線も図5の  $\theta = 90^\circ$  の曲線とまったく一致している。

図10は粒子の  $y$  方向の速度である。それぞれの初速度で打出された粒子は流体運動により減速され1秒後には  $y$  方向の速度は  $0 \text{ m/s}$  になることが分かる。



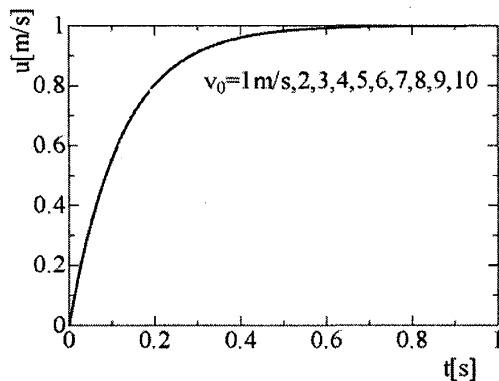
$u_0 = 0 \text{ [m/s]}$      $v_0 = 1 \text{ [m/s]} \sim 10 \text{ [m/s]}$

図7. 代表的な粒子の軌跡  
[初速度を変えた場合]



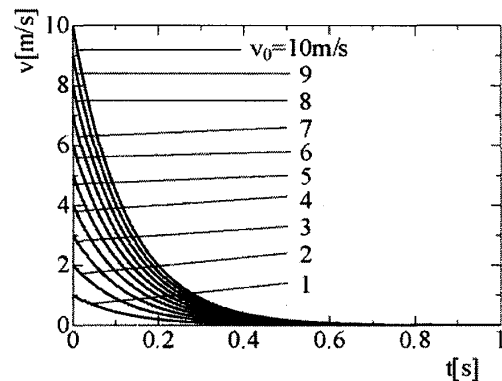
$u_0 = 0 \text{ [m/s]}$      $v_0 = 1 \text{ [m/s]} \sim 10 \text{ [m/s]}$

図8. 代表的な粒子のx方向の位置座標  
[初速度を変えた場合]



$u_0 = 0 \text{ [m/s]}$      $v_0 = 1 \text{ [m/s]} \sim 10 \text{ [m/s]}$

図9. 代表的な粒子のx方向の速度  
[初速度を変えた場合]



$u_0 = 0 \text{ [m/s]}$      $v_0 = 1 \text{ [m/s]} \sim 10 \text{ [m/s]}$

図10. 代表的な粒子のy方向の速度  
[初速度を変えた場合]

### 3.3 到達時間

エアワッシャでは噴霧された水滴が空気中のガス成分を吸収するために水滴と空気との接触時間が大切となる。エアワッシャは通常は下流側に水滴を除去するためのエリミネータを配置する。エリミネータでの気水の接触は無視して、ノズルからエリミネータまでの接触時間を考える。ここでは、粒子の出發から  $1 \text{ m}$  下流までを考えることにして、粒子が原点より  $x$  軸の  $1 \text{ m}$  に達するまでの時間を到達時間  $T_1$  と定義する。

初速度の大きさ  $1 \text{ m/s}$  で打出された粒子の到達時間の打出し角度依存性を図11に示す。 $\theta = 0^\circ$  のときは原点より流速  $1 \text{ m/s}$  と等しい速度で打出するので、到達時間は1秒となる。打出し角度が大きくなるにつれ初速

度の  $x$  成分が小さくなるため到達時間は大きくなるが、 $\theta = 90^\circ$  のときでも 1.13 秒程度であり、あまり大きな差はない。このことから、到達時間の角度依存性は今回の範囲では小さいことが分かる。

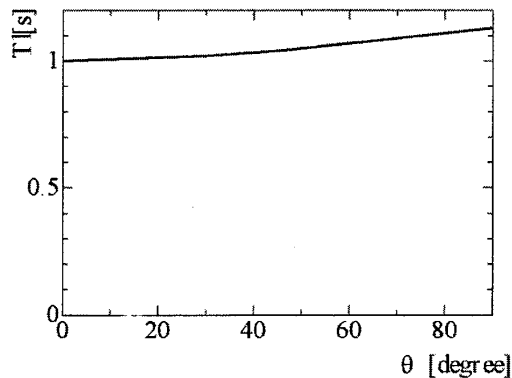


図11. 到達時間の角度依存性

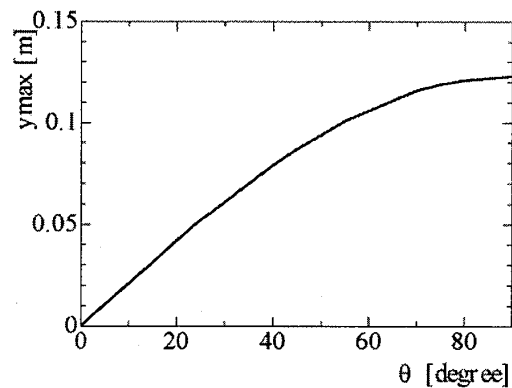


図12. y方向の到達距離の角度依存性

### 3.4 到達距離

節 3.1、3.2 で粒子の運動を調べたが、 $y$  方向の初速度  $v_0$  で打出した粒子もストークス抵抗によりいずれ流体と同一の運動を行い  $y$  方向に限りなく移動することはないことが分かった。したがって、 $y$  方向に移動する最大の距離がある。この距離を到達距離  $y_{\max}$  と定義する。

初速度の大きさ 1 m/s で打出された粒子の到達距離の初速の打出し角度依存性を図 12 に示す。 $\theta = 0^\circ$  のときは  $x$  軸上を運動するので、到達距離は 0 となる。打出し角度が大きくなるにつれ到達距離は大きくなる。今回の場合流れに垂直な  $\theta = 90^\circ$  の場合でも 0.12 m までしか到達しなかった。このことから、エアワッシャでは水滴はあまり横には移動しないので、水と空気との接触を良くするためには流れに垂直方向にノズルを複数設置する必要があることが分かる。

### 3.5 平衡時間

初速度 ( $u_0, v_0$ ) で出発した粒子もある時間の後に流体の速度 ( $u_f, v_f$ ) で運動することが分かった。ここでは粒子の速度が流体の速度に等しくなるまでの時間を平衡時間と呼ぶことにし、 $x$  方向の初速度  $u_0$  で打出した粒子が  $u_f$  に等しくなるまでの時間を  $x$  方向の平衡時間  $T_{\text{equ}}$  とし、 $y$  方向の初速度  $v_0$  で打出した粒子が  $v_f$  に等しくなるまでの時間を  $y$  方向の平衡時間  $T_{\text{eqv}}$  とする。

初速度の大きさ 1 m/s で打出し角度  $0^\circ \sim 90^\circ$  で打出された粒子の平衡時間の角度依存性を図 13、図 14 に示す。

図 13 より、 $\theta = 0^\circ$  のときは出発時から粒子の速度は流体と等しい速度であるため  $x$  方向の平衡時間は 0 秒となる。打出し角度が大きくなるにつれ  $x$  方向の平衡時間は大きくなる。 $\theta = 90^\circ$  のとき  $x$  方向の平衡時間は 0.86 秒となった。

図 14 より、 $\theta = 0^\circ$  のときは出発時から粒子の速度は流体と等しい速度であるため  $y$  方向の平衡時間は 0 秒

となる。打出し角度が大きくなるにつれ  $y$  方向の平衡時間は大きくなる。 $\theta = 90^\circ$  のとき  $y$  方向の平衡時間は 0.86 秒となった。

ここで、 $\theta = 0^\circ$  と  $\theta = 90^\circ$  の場合には図 13、図 14 の平衡時間は  $x$  方向と  $y$  方向とで等しくなるが、それ以外の角度では一般に  $x$  方向と  $y$  方向の平衡時間は異なることを指摘しておく。

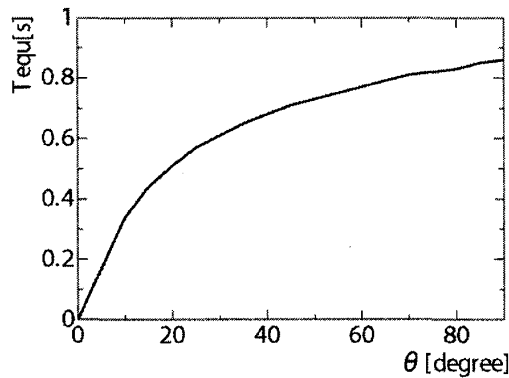


図13. x方向の平衡時間の角度依存性

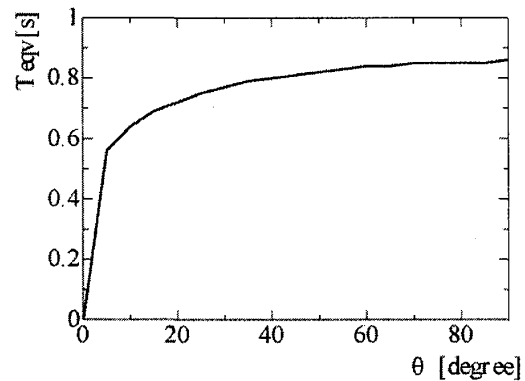


図14. y方向の平衡時間の角度依存性

#### 4. おわりに

エアワッシャ内での水滴の運動を水滴の初速度依存性について調べた結果今回の条件の範囲では以下のことが分かった。

- (1) 粒子は流体と異なる初速度をもって出発したとしても、ストークスの抵抗法則により、粒子の速度は徐々に流体の速度に近づいていって最後には流体と同一の運動を行う。
- (2) 初速度の大きさを一定にして、打出し角度を変えて粒子を運動させた場合、粒子が下流 1m に達するのにかかる時間は打出し角  $0^\circ$  で 1 秒だったのに対し最大の  $90^\circ$  でも、1.12 秒程度であり、あまり大きな変化はないと言える。このことから、下流に一定距離進む時間すなわち気液接触時間の打出し角度依存性は小さいと言える。
- (3) 初速度の大きさを一定にして、打出し角度を変えたときの粒子は、角度を大きくしていくにつれて、流れに垂直方向に遠くまで飛んでいくが、最も遠くまで飛んだ打出し角度  $90^\circ$  でも 0.12m 程度である。したがって、水と空気の接触をよくするためには、流れに垂直方向にノズルを複数設置する必要がある。
- (4) 粒子が流体と同一の速度になるまでの時間に及ぼす打出し角度の影響は打出し角度が  $0^\circ$  のときは 0 秒で、打出し角度が大きくなるにつれ大きくなる。打出し角度  $90^\circ$  が流体の速度と等しくなるのにもっとも時間がかかるが、それでも 0.86 秒程度である。したがって、今回の場合には、粒子は任意の初速度で運動を始めても 1 秒程度で流体と同一の運動を行う。

#### 参考文献

- (1) 今井 功 「流体力学（前編）」 裳華房 （1979-5）.

（平成19年 3 月22日受理）