

エアワッシャ内での水滴の運動(対向流の場合)

松 藤 久 良*

Motion of a Droplet in the Airwasher (In the Case of Counter Flow)

Hisayoshi Matsufuji

Motion of a droplet in the airwasher in the case of counter flow is considered. Particle is assumed small in size and spherical in shape. Stokes drag law is used as the interaction force between a particle and fluid. Single particle which starts from the origin at an upward initial velocity under the uniform flow is studied theoretically. As a result, a particle does not move so far in the direction upward 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

半導体や液晶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、硫酸化合物、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が、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。

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。

* 機械工学科

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、打出される初速度の方向により、空気の流れによってどのような運動を行うかを調べる。今回は対向流のエアワッシャを想定し、上流に向かって水滴を打ち出す場合を調べる。

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の環境問題の改善にも貢献を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⁽¹⁾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⁽²⁾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⁽³⁾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い、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、粒子を打出す位置を原点とし、一様流の方向に x 軸をとり x 軸に垂直に y 軸をとる。粒子の位置座標を (x, y) とする。

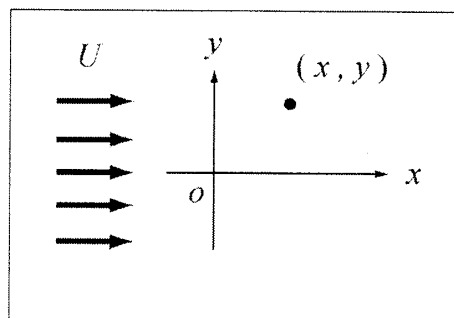


図1 座標系

2.3 支配する方程式

粒子の半径を R 、密度を ρ_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 μ 、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、

$$\begin{aligned} t = 0: \quad & x = 0 \\ & y = 0 \\ & u = u_0 \\ & v = v_0 \end{aligned} \quad (5)$$

となる。ここで、粒子の初速度を図 2 に示すように、初速度の大きさ V と x 軸からの打出す角度 θ とで与える場合を考える。

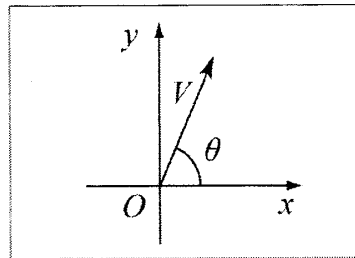


図 2 粒子の初速度

粒子の初速度は

$$\begin{aligned} u_0 &= V \cos \theta \\ v_0 &= V \sin \theta \end{aligned} \quad (6)$$

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調べることにする。

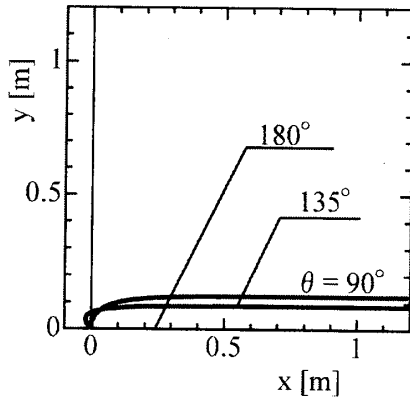


図3 代表的な粒子の軌跡

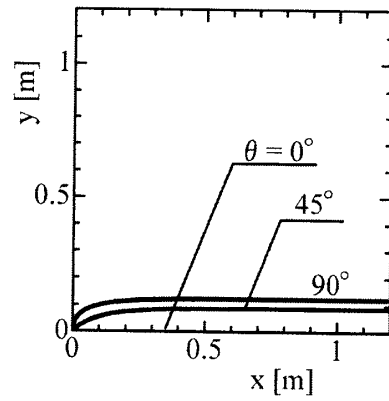


図4 代表的な粒子の軌跡

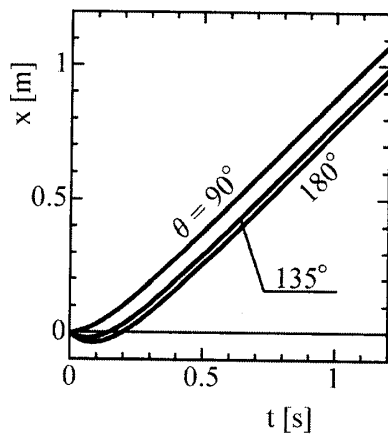


図5 代表的な粒子の x 方向
の位置座標

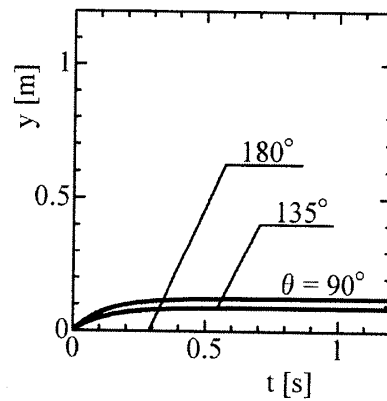


図6 代表的な粒子の y 方向の
位置座標

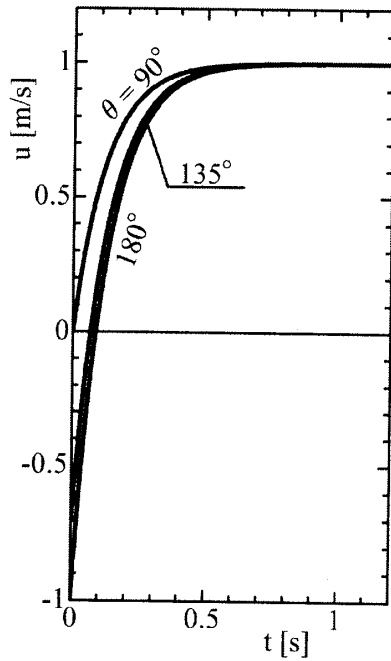


図7 代表的な粒子の
 x 方向の速度

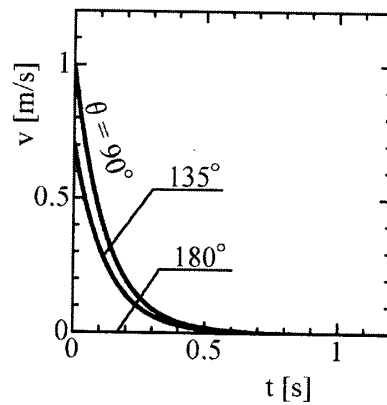


図8 代表的な粒子の
 y 方向の速度

3.1 代表的な粒子の運動

代表的な粒子の運動を図 3~8 に示す。初速度の大きさ $V = 1 \text{ m/s}$ で打出角度 $\theta = 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ を選んだ。

図 3 は粒子の軌跡で、 $\theta = 90^\circ$ 、すなわち、流れに垂直に打出した場合は、初めは y 軸方向に進むが、 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。 $\theta = 135^\circ$ の場合、最初は 135° 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。 $\theta = 180^\circ$ 、すなわち原点より x 軸負の方向に打出した場合、粒子は x 軸上を負の方向にさかのぼるが、まもなく流体の抵抗を受け x 軸上を運動する。参考のため、平行流で粒子を打ち出した場合⁽⁴⁾を図 4 に示した。打出角度 $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ を選んだ。

図 5 は粒子の x 軸方向の位置座標で、 $\theta = 135^\circ$ のときと $\theta = 180^\circ$ のときは初め x 軸の負の方向に進むが、すぐに押し戻され、 x 軸の正の方向に進む。

図 6 は粒子の y 軸方向の位置座標で、角度によらず、 y 軸方向にはそれほど離れないことが分かる。十分時間がたって後 $\theta = 90^\circ$ で y 方向に 0.12m 程度しか離れていない。

図 7 は粒子の x 方向の速度で、 $\theta = 90^\circ$ 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。 $\theta = 135^\circ$ のときは初速度 $u_0 = -0.707 \text{ m/s}$ であり、 $\theta = 180^\circ$ のときは初速度 $u_0 = -1 \text{ m/s}$ であるが、どんどん減速し 0 m/s に一旦なるが、その後加速され $u = 1 \text{ m/s}$ になる。

図 8 は粒子の y 方向の速度で、 $\theta = 90^\circ$ のときは初速度 $v_0 = 1 \text{ m/s}$ であり、 $\theta = 135^\circ$ のときは初速度 $v_0 = 0.707 \text{ m/s}$ 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。 $\theta = 180^\circ$ のときは、初めから $v = 0 \text{ m/s}$ である。

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 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 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

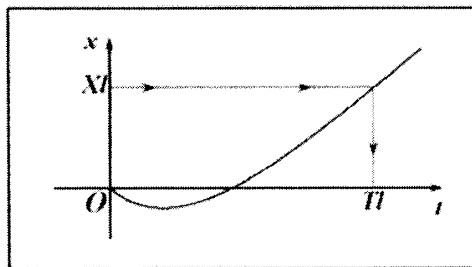


図 9 到達時間の概念

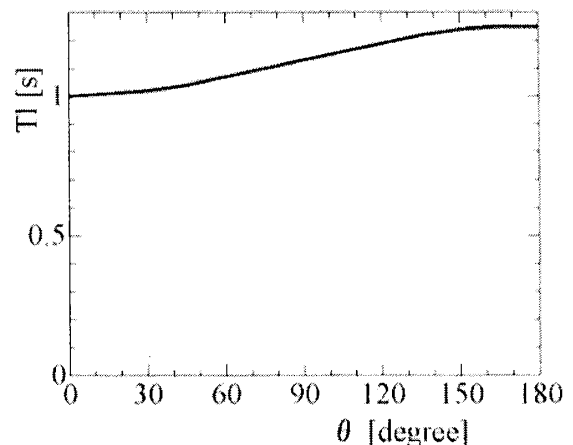


図 10 到達時間の角度依存性

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。すなわち、粒子の出発から x_1 下流までを考えることにして、粒子が原点より x 軸の x_1 に達するまでの時間を図 9 に示すように到達時間 T_1 と定義する。ここでは、 x_1 として、1 m を選んだ。

初速度の大きさ 1 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 10 に示す。 $\theta = 0^\circ$ のときは原点より流速 1 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。さらに、 $\theta = 90^\circ$ を過ぎると上流に一旦さかのぼり、その後下流にすすむので到達時間は大きくなる。しかし、最大の $\theta = 180^\circ$ のときでも 1.25 秒程度である。

3.3 到達距離

節 3.1、で粒子の運動を調べたが、初速度の大きさ V で x 軸からの打出す角度 θ と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 方向にも x の負の方向にも限りなく移動することはない。図 11 に示すように、 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。また、図 12 に示すように、 x の負の方向に移動する最大の距離がある。この距離を到達距離 x_{\min} と定義する。

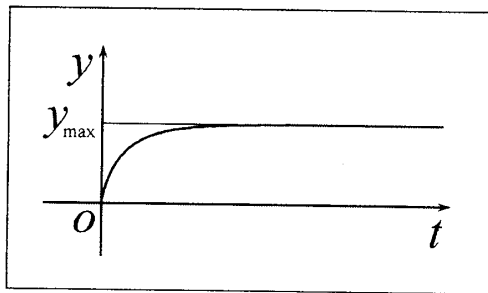


図 11 y 方向の到達距離の概念図

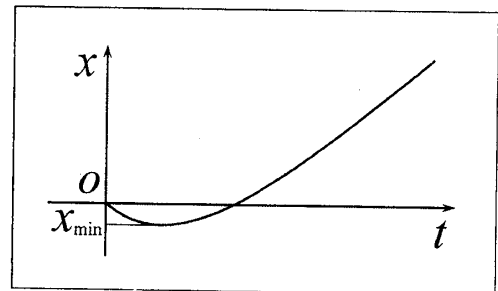


図 12 x 方向の到達距離の概念図

初速度の大きさ 1 m/s で打出された粒子の y 方向の到達距離の打出し角度依存性を図 13 に、 x 方向の到達距離の打出し角度依存性を図 14 に示す。

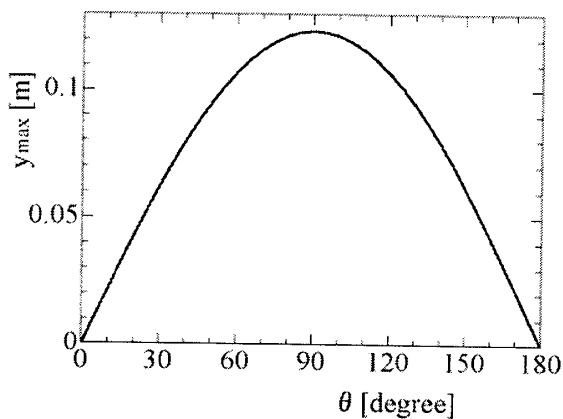


図 13 y 方向の到達距離の角度依存性

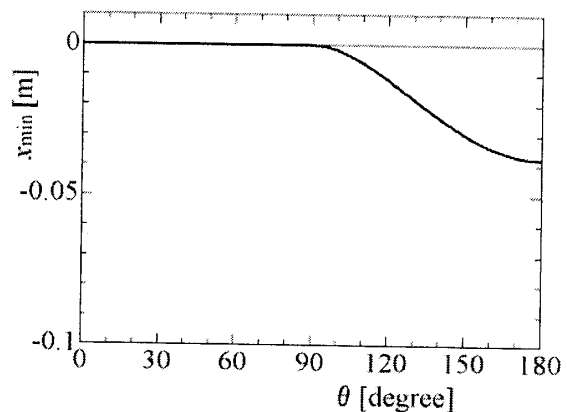


図 14 x 方向の到達距離の角度依存性

図 13 より、 $\theta = 0^\circ$ のときは原点より x 軸上を運動するので、 y 方向の到達距離は 0 m となる。打出し角度が $\theta = 0^\circ$ より大きくなるにつれ初速度の y 成分が大きくなるため y 方向の到達距離は大きくなる。 $\theta = 90^\circ$ のとき初速度の y 成分が最大となるので、 y 方向の到達距離は最大値 0.124 m をとる。さらに、 $\theta = 90^\circ$ を過ぎると初速度の y 成分が減少するので、 y 方向の到達距離は小さくなり、 $\theta = 180^\circ$ のとき 0 m となる。

図 14 より、 $\theta = 0^\circ$ のときから $\theta = 90^\circ$ までは平行流であり、粒子は原点より x 軸上の正の方向に運動するので、 x 方向の到達距離は 0 m となる。打出し角度が $\theta = 90^\circ$ より大きくなると対向流になり、粒子は原点より x 軸上の負の方向に打ち出されるため、 x 方向の到達距離は負の値、すなわち最小値として、存在する。 $\theta = 90^\circ$ を超えると初速度の x 成分が負の値で大きさが大きくなるため x 方向の到達距離は負の方向に大きくなる。 $\theta = 180^\circ$ のとき初速度の x 成分が負の最大値、すなわち最小値なので、 x 方向の到達距離も最小値 -0.038 m となる。

3.4 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、図 15 に示すように、 x 方向

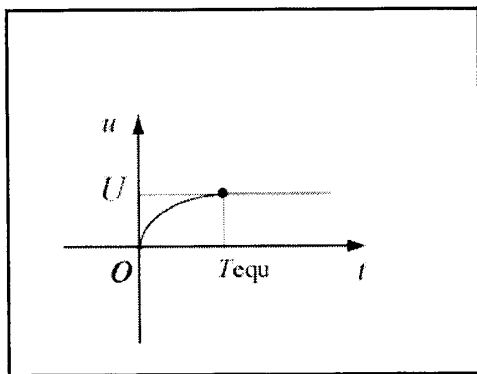


図 16 x 方向の平衡時間

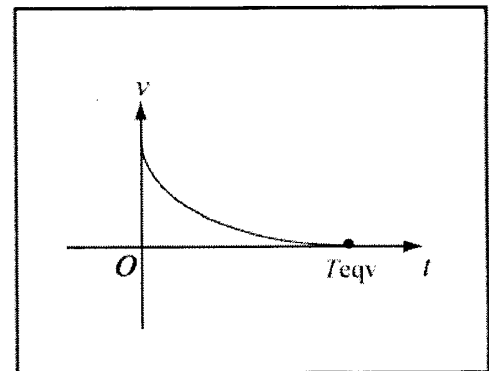


図 15 y 方向の平衡時間

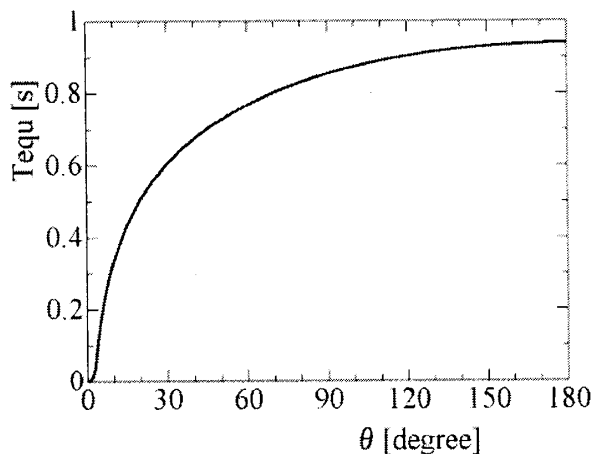


図 17 x 方向の平衡時間の角度依存性

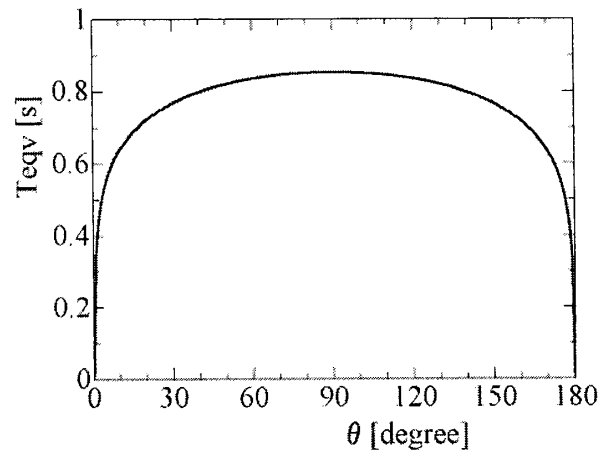


図 18 y 方向の平衡時間の角度依存性

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_{equ} とし、図 16 に示すように、 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_{eqv} とする。

初速度の大きさ 1 m/s で打出された粒子の平衡時間の角度依存性を図 17、図 18 に示す。

図 17 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。 $\theta = 180^\circ$ のとき x 方向の平衡時間は 0.94 秒となった。

図 18 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 方向の平衡時間は最大の 0.86 秒となり、 $\theta = 90^\circ$ を超えると減少し $\theta = 180^\circ$ のときは再び 0 秒となった。 y 方向の平衡時間は 90° を対称軸に対称となっている。

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の角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° で 1 秒だったのに対し最大の 180° でも、 1.24 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いえる。
- (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° でも 0.124m 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) 粒子を流れの上流の方向に打ち出しても、あまり上流までさかのぼらなかった。これは、今回の初速度が小さかったからで、実機を想定し、もっと大きな値にする必要がある。
- (5) 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° 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° 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) Landau, L.D. and Lifshitz, E.M. *Fluid Mechanics*, (1958), Pergamon Press.
- (2) 今井 功 「流体力学 (前編)」 裳華房 (1979-5) .
- (3) Saffman, P.G., *J. Fluid Mech.*, 13-1 (1962-5), p.120.
- (4) 松藤久良：福井工業大学研究紀要 第 37 号 (第一部) (2007) , p.61.

(平成 20 年 3 月 31 日受理)