エリミネータによる水滴の捕集

Capture of a Droplet by the Eliminator

○正 松藤 久良 (福井工業大学)

正 植村 聡 (三機工業(株))

正 飯嶋 和明 (三機工業(株))

学 竹内 達哉 (福井工業大学)

Hisayoshi Matsufuji, Tatsuya Takeuchi, Fukui University of Technology
3-6-1 Gakuen, Fukui-city, Fukui Pref., 910-8505 Japan
Satoshi Uemura, Kazuaki Iijima, Sanki Engineering Co., Ltd.
1742-7 Shimotsuruma, Yamato-city, Kanagawa Pref., 242-0001 Japan

1. はじめに

半導体用のクリーンルームでは空気中の水溶性の化学物質を除去するためにエアワッシャーが使われている。

噴霧された超純水の水滴は化学物質を溶解するため、すぐにエリミネータで捕集し排水処理を行う必要がある。

エリミネータは効率よく水滴を捕集できることや圧力損失を少なくすることなどが大切で、実験による研究開発は行われているが、理論解析は少ない。そこで、エリミネータの基礎的な理論解析を行うことにする。

エリミネータとして、流れに垂直にワイヤーが一本張ってある場合を考える。ワイヤーを円柱と考え、円柱周りの流れをポテンシャル流れとして、円柱の上流から、気流と同じ速度で運動している粒子が円柱にどのような条件で衝突するかを調べることにする。

2. 仮定

- 1) 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受けるものとする。
- 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ものとし、また、粒子間の相互作用は無視する。
- 4) 重力は無視する。

2. 解析モデル

図1に座標系を示す。

Fig. 1 Coordinates system

一様流中に円柱がある場合を考える。円柱の中心に原点をとり、一様流に平行に x 軸をとる。 x 軸に垂直に y 軸をとる。粒子の位置座標を (r, θ) とし、粒子の初期位置を

(x_0, y_0) から、その位置の流速で出発するものとする。

4. 支配する方程式

解析にあたり、速度は一様流の速度 U で長さは円柱の半径 a で無次元化する。完全流体の二次元流れにおいて、静止円柱を過ぎる一様な流れは、流れの関数

$$\psi = \left(r - \frac{1}{r} \right) \sin \theta \quad (1)$$

で与えられる。

粒子の運動方程式はニュートンの第二法則で記述され

r 方向の粒子の運動方程式は、

$$\frac{d^2 r}{dt^2} - r \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 = \frac{1}{\sigma} \left(U_r - \frac{dr}{dt} \right) \quad (2)$$

となる。ここで σ はストークス数で、

$$\sigma = \frac{2R^2 \rho_p U}{9\mu a} \quad (3)$$

である。

θ 方向の粒子の運動方程式は、

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{dr}{dt} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{V_\theta}{r} - \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (4)$$

となる。

粒子の軌跡を定める方程式は、

$$\frac{dr}{dt} = u \quad (5)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \phi \quad (6)$$

となる。

5. 結果および考察

解析にあたり式(1)～(6)をルンゲクッタ法により数値解を求めた。

代表的な粒子の運動を Fig. 2 に示した。ストークス数 $\sigma = 1.0$ 、初期位置 $(-3, 0.8)$ の場合を選んだ。参考のため初期

Fig.2 The trajectory of a particle

位置を通る流線を細線で示してある。

粒子は流体と同じ初速度で出発したとしても、慣性力があるため、流体の流れに対し曲線の外側にずれる。

Fig.3 The trajectories of the particle in the case that $\sigma = 0.1$

粒子が円柱と衝突しない場合の粒子の軌跡を Fig. 3 に示した。ストークス数 $\sigma = 0.1$ を選んだ場合、初期位置 $y_0 = 0.01, 0.5, 1.0$ のときを示した。この場合初期位置が $y_0 = 0.0$ のよどみ線上以外から出発した粒子は円柱に衝突しない。

Fig.4 The trajectories of the particle in the case that $\sigma = 1.0$

粒子が円柱と衝突する場合の粒子の軌跡を Fig.4 に示した。ストークス数 $\sigma = 1.0$ を選んだ Fig.4 より、初期位

Fig.5 The trajectories of the particle in case of the critical initial position

置 $y_0 = 0.2, 0.3$ の場合は衝突するが、 $y_0 = 0.5, 1.0, 1.5$ の場合は衝突しない。よどみ線に近い初期位置から出発すると衝突し、離れた初期位置から出発すると衝突しないことがわかる。このことより、各ストークス数に対して、 y 方向の初期位置の限界値 y_{0cr} が存在し、 $y_0 \leq y_{0cr}$ だと衝突し、 $y_0 > y_{0cr}$ だと衝突しないことになる。

ストークス数 $\sigma = 1.0$ のときの衝突限界の初期位置から出発した粒子の軌跡を Fig.5 に示した。衝突限界の粒子の軌跡は、円柱に接するように衝突する。

Fig.5 で $-y_{0cr} \leq y_0 \leq y_{0cr}$ の範囲から出発した粒子は円柱に衝突するが、 $y_0 < -y_{0cr}$ 、 $y_0 > y_{0cr}$ の位置から出発した粒子は衝突しない。

Fig.6 The critical curve for collision

ストークス数 σ と限界初期位置 y_{0cr} による衝突限界曲線を Fig.6 に示した。図の曲線の下側が衝突領域で、上側が非衝突領域となる。よどみ線上すなわち、 $y_{0cr} = 0$ のときの衝突限界のストークス数は $\sigma = 0.125$ となる⁽²⁾。

6. おわりに

エリミネータによる水滴の捕集研究した結果、ストークス数と初期位置の衝突限界曲線が求まった。この曲線より、衝突する場合と衝突しない場合が明確になった。

参考文献

- 1) 今井 功 流体力学(前編) (桐叢華房 (2005-2).
- 2) J.Val.Healy : THE PHYSICS OF FLUIDS, 13-3(1979-3),p.551