

303 アスペクト比の小さい Taylor-Couette 渦による固液混合相の濾過実験

The filtration experiment on solid-liquid separation by Taylor-Couette Vortex flow with small aspect ratio

○ 学 阿部 裕貴 (室蘭工大院) 正 河合 秀樹 (室蘭工大)
正 高橋 洋志 (室蘭工大)

Yuki ABE, Muroran Institute of Technology, 27-1, Mizumoto-cho, Muroran, Hokkaido
Hiroshi TAKAHASHI, Hideki KAWAI, Muroran Institute of Technology

Keywords : Taylor Vortex Flow(TVF), Filtration , solid-liquid separation , Cake layer

1. 緒言

同軸二重円筒の内円筒と外円筒の間に流体をみだし、どちらか一方の円筒に回転速度を持たせると軸方向にセル型でトーラス状の流れが複数個積み重なるように発生する渦流れを Taylor-Couette 流れ (TVF) という。

TVF は軸受などの流体を用いる機械に生じるもので、振動等の不安定挙動の原因となる一方、高せん断や局所せん断流れが発生せず、局所的な攪拌ムラが防止できる特徴も有する。この特徴を利用し、フィルターの目詰まりを抑制する回転濾過装置の開発が期待されている。本研究では、濾過における TVF の濃度分極抑制効果を様々な方向から検証することを目的としている。

2. 実験装置および方法

2-1 Taylor 渦発生装置

Fig.1 に固液分離装置の概要を示す。内円筒半径は $R_1=15\text{mm}$ 、外円筒半径は $R_2=40\text{mm}$ 、作動流体高さは $H=75\text{mm}$ である。これより円筒間の隙間 $d(=R_2-R_1)$ は 25mm 、内円筒と外円筒の半径比 $\eta(=R_1/R_2)$ は 0.375 、アスペクト比 $\Gamma(=H/d)$ は 3 となる。

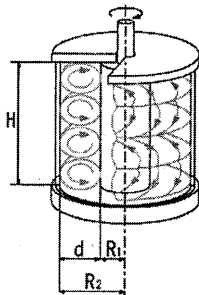


Fig. 1 Taylor vortex generator

回転 Reynolds 数は Ω 内円筒角速度 (rad/s) として、 ν を動粘性係数とすると $Re=d \Omega R_1/\nu$ と定義される。

2-2 固液分離装置

本実験装置では回転する内円筒を分離膜として使用する。そのため、内円筒に周方向に 16 個、軸方向に 30 個 (総計 480 個) の直径 1.3mm の孔を空け、その上に幅 95mm 、長さ 100mm 、厚さ 0.3mm の不織布を巻き、分離膜を模擬させた。循環にはマグネットギアポンプ (連続式吸引ポンプ)、トレーサー粒子は平均粒子径 $80\mu\text{m}$ のナイロンパウダー (ダイセル・デグサ製: WS200P, 粒子密度 1016kg/m^3) を使用した。作動流体には 68wt% グリセリン水溶液 (動粘性係数 $11.32 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 、密度 $\rho = 1178\text{kg/m}^3$) を使用した。ポンプの循環流量を 270ml/min として実験を行った。

Fig.2 に濾過実験装置の概略を示す。装置内に作動流体

にナイロンパウダー 2.5g を投入し懸濁させた後、TVF を発生させる。その後、ポンプを作動させて 120 分吸引し、実験終了時に粒子を回収して、質量を測定する。これより相対濾過量を算出して濾過性能を評価する。

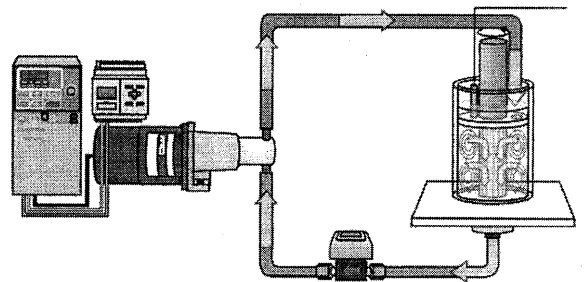


Fig. 2 Experimental device

2-3 超音波時間領域相関法 (UTDC) による流速測定

超音波時間領域相関法 (UTDC) による流速測定では、UTDC により実験中の TVF の粒子速度を測定する。測定流体にトランスデューサー (TDX) より超音波パルスを照射すると、懸濁しているトレーサー粒子の粒子群に反射し、信号を得る。これを再度、繰り返して、新たに信号を得ることによって、それらの自己相関から、流速を算出する。UTDC は最低 2 回のパルス波から速度分布を得ることができ、自己追従性が高い。

本装置はパルサレーサー (JSR 製: DPR300)、トランスデューサー (ジャパンプローブ製: 超音波プローブデジタルオシロスコープ (NI 製: PCI5112) よりなる。また、反射体には濾過実験と同様のナイロンパウダーを用いた。

3. 理論および評価方法

固定外円筒と回転内円筒間の粒子について、その半径方向の運動を遠心力と流体から受ける抵抗力のバランスから方程式を立てると

$$(\rho_p - \rho_f) \frac{\pi}{6} d_p^3 R_1 \Omega^2 = 3\pi d_p \mu (V_r - V_p) \quad \dots (1)$$

となる。これを変形すれば

$$V_r - V_p = \left[\frac{(\rho_p - \rho_f) d_p^2 g}{18\mu} \right] \frac{R_1 \Omega}{g} \quad \dots (2)$$

式 (2) は右辺 [] 内は Stokes 沈降速度式 V_g であるので

$$V_r - V_p = V_g \frac{R_1 \Omega}{g} \quad \dots (3)$$

よって相対濾滓量 Δ は

$$\Delta = \frac{V_p}{V_r} = 1 - \left(\frac{V_g}{V_r} \right) \left(\frac{R_1 \Omega^2}{g} \right) \quad \dots (4)$$

$$\Delta = 1 - \varepsilon \quad \dots (5)$$

$$\varepsilon = \frac{V_g R_1 \Omega^2}{V_r g} \quad \dots (6)$$

と表される。ここで ρ_p を粒子の密度、 ρ_f は流体の密度、 d_p は粒子径、 μ は粘度、 Ω は角速度 [rad/s]、 R_1 は装置半径、 g は重力加速度、 V_r は半径方向の濾液速度、 V_p は粒子の半径方向速度である。相対濾滓量とは $\Omega=0$ のフィルター付着量に対する各回転数での付着量であり、相対濾滓量 Δ は流体と粒子の速度比でもある。式(5)より Δ との関係から、Couette 流のみではデータは傾き・1 の直線にのることがわかる。

4. 実験結果および考察

4-1 境界条件の違いによる濾過性能評価

装置上部に自由表面を有する自由端と固定面を有する固定端を用いて境界条件による濾過性能の違いを調べた。

ただし、固定端を用いた場合、渦は正規 2 セルモード、自由端を用いた場合、正規 3 セルモードが安定モードとなる。本実験でもこれらの渦モードが確認された。

Fig.4 に自由端と固定端の相対濾滓量のグラフを示す。縦軸は相対濾滓量 Δ 、横軸は ε である。ただし、 $\Omega=0$ の時、投入粒子全てが付着すると仮定し、式(5)は図中実線で示されている。

Fig.4 より自由端の場合、Couette 流のみが働く理論線に漸近することがわかった。これより自由端の場合、TVF のよる濃度分極抑制効果が弱いと考えられる。

一方固定端の場合、 $\varepsilon \leq 0.3$ までは理論線とほぼ同程度の値を取るが、 $\varepsilon \geq 0.3$ では、 Δ が理論線から離れ、急激に減少していることがわかる。これより TVF による濃度分極抑制効果が示唆され、濾過性能を向上させる可能性が考えられる。

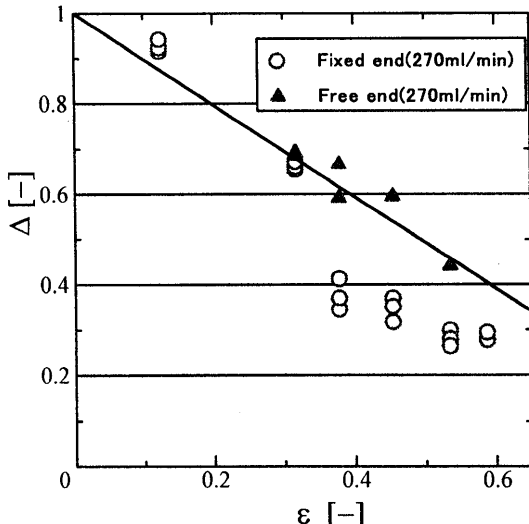


Fig.4 Relative accumulated volume with free end and fixed end

4-2 流速測定実験

Fig.5 に $Re=1000$ のポンプ作動前と作動 5 分後の内円筒から 6mm の位置の軸方向粒子速度を示す。

これより $Re=1000$ において作動前、作動中の粒子速度に大きな変化は生じていない。

すなわち速度の軸方向速度分布が循環流の影響をあまり受けていないことがこの結果から言えており、TVF は安定的に濃度分極抑制効果を発揮できる可能性を示唆している。より詳細なデータは半径方向速度分布の測定からさらにわかると考えられる。

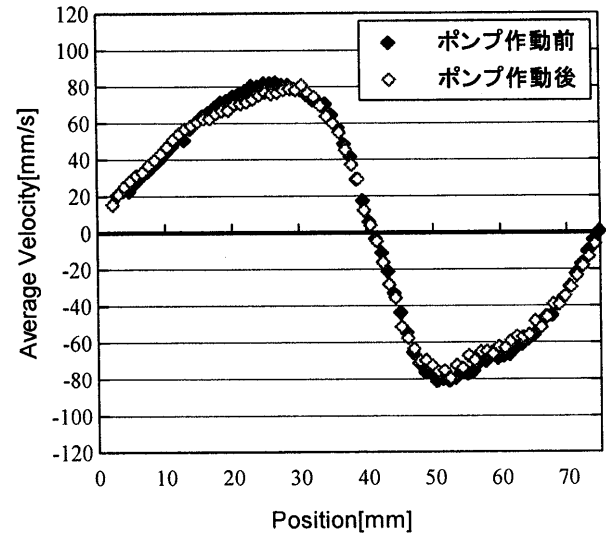


Fig.5 Mean velocity profile for $Re=1000$ by UTDC

5. 結言

固定端を用いた場合、TVF の渦流れが働くため、濃度分極抑制効果が生じるが、自由端を用いた場合では流れが弱く、その効果は低いと考えられる。

また TVF 中の粒子速度は吸引の影響をあまり受けていない。

6. 参考文献

- (1) 杉山・遠藤・新井 共著：流体力学 森北出版
- (2) 中村・戸谷・山下・植木：機械学会論文集(B 編) 54-504(1989) p1898 - 1905
- (3) 中村・戸谷・山下・植木：機械学会論文集(B 編) 58-546(1992) p305 - 312
- (4) 鈴木：Rotating Cylindrical Filtration の濾過機構について
- (5) J.A.Schwille, D.Mitra, R.M.Lueptow: 「Design parameters for rotating cylindrical filtration」 Journal of Membrane Science 204(2002) 53-65