

1501 Taylor-Couette 流による固液分離法

Experimental analysis of Taylor vortex solid-liquid separation

○正 河合秀樹 (室蘭工大) 学 岸川真吾 (室蘭工大) 正 木倉宏成 (東工大)
正 有富正憲 (東工大) 正 高橋洋志 (室蘭工大)

Hideki KAWAI, Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto-cho Muroran, 050-8585, Japan
Shingo KISHIKAWA, Muroran Institute of Technology
Hiroshige KIKURA, Tokyo Institute of Technology
Masanori ARITOMO, Tokyo Institute of Technology
Hiroschi TAKAHASHI, Muroran Institute of Technology

Key Words: Taylor vortex flow, Solid-liquid separation, Filtration, Rotating filter

It is known that rotating membrane filtration using a Taylor-Couette vortex flow(TCVF) system has an effect which reduces build-up of a cake layer on a surface of membrane filter. Although it is expected that the effect leads, for example to development of a new hemodialysis filter, fluid dynamic analysis is seldom performed. Here, TCVF is visualized by laser sheet device to study the fundamental vortex structure and then, by replacing the rigid inner cylinder with the filter, the particle-liquid separation through the inner rotating filter is performed with the TCVF. Supposing a future compact design, the aspect ratio, $\Gamma (=H/d$, H is the height of the device and d is the gap width between inner and outer cylinders) of the TCVF device is set up as small as about 3, which means that a vortex structure contacts with the upper or lower boundary-end is affected by the Ekman boundary layer.

1. 緒言

Taylor 渦(TCVF)を用いた内円筒回転型ろ過装置は、ケーキ層の軽減に大きな効果があることから、ろ過機能だけでなく、サスペンション溶液の濃縮にも有効であるといわれている。このため、せん断に弱い細胞を含んだ混合液の攪拌や固液の分離・濃縮など、バイオリアクターへの応用が期待される。しかし、その特性については、不明な点が多い。特に今後医療分野など、よりコンパクトへの要求が高くなる場合、低アスペクト比に伴う上下固定端から発するEkman境界の影響が懸念され、その解析は重要である。本研究では、固液分離装置へのTaylor渦の応用を目的として、内円筒をフィルターに改造したアスペクト比3の装置における粒子挙動と渦構造の基本的な性質について調べる。

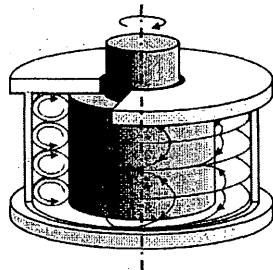


Fig. 1 Taylor vortex flow

2. 実験装置および実験条件

2.1 Taylor 渦発生装置と可視化装置 Fig.2に実験装置の概要を示す。内円筒半径(R_{in})は $R_{in}=15\text{mm}$ 、外円筒半径 (R_{out})は $R_{out}=45\text{mm}$ を用いた。これより内円筒と外円筒の半径比 ($\eta=R_{in}/R_{out}$) は 0.375 となる。また、円筒間の間隙(d)は $d=25\text{mm}$ である。アスペクト比 ($\Gamma=H/d$) は $\Gamma=3$ とし、Reynolds 数 ($Re=d U/\nu$: ν は作動流体の動粘性係数) については、100~1500 を範囲とした。作動流体にはグリセリン水溶液を用いた。

2.2 固液分離装置 (フィルター部と実験条件) 上記内円筒に、フィルターとして、直径 2mm の孔を周方向に均一に 12 個、軸方向に 5mm 間隔で 19 個空けた骨格材を作り、その上に厚さ 0.3mm の不織布 (紙製) を巻いて分離膜を模倣させた。循環流量(Q)はダイヤフラム式定量ポンプ (間欠式)

により、250ml/min とした(Fig.3)。

被除去物質として平均粒子径 $78\mu\text{m}$ のアルミナ粒子と平均粒子径 $80\mu\text{m}$ のナイロン粒子を用いた。アルミナ粒子に対してグリセリン水溶液の動粘度は、血液と同程度の $3.82 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ (密度 $\rho=1200\text{kg}/\text{m}^3$) とした。また、ナイロン粒子においては、グリセリン水溶液の動粘度を $1.29 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ (密度 $\rho=1170\text{kg}/\text{m}^3$) に調整し、粒子を中立浮遊させることに主眼を置いた。浮遊粒子は吸光度計にてその濃度を測定し、検量線にしたがって濃度の時間変化を求めた。

3. 濾過性能評価理論

回転フィルターを評価するためにフィルター表面における濃度分極の概念を入れて、槽内粒子濃度の時間的变化に関する方程式を次式のように表す。

$$V \frac{dC}{dt} = -C_i Q - C A v_g \quad \text{-----(1)}$$

ただし、 V は槽内の体積、 A は槽底面積、 C_i は内円筒フィルター近傍の局所濃度、 Q はフィルターを通過する流量、 t は時間、 v_g は沈降あるいは浮上粒子速度で、流れがない場合は、Stokes の沈降速度に相当する。

ここで C_i/C が一定であると仮定し、 $\alpha \equiv \frac{C_i}{C}$ とし、

Eq.(1) に代入し、 $t=0$ で $C=C_0$ の初期条件を考慮し解くと、

$$C = C_0 e^{-t/\tau} \quad \text{-----(2)}$$

となる。ここで、

$$\tau = \frac{V}{\alpha Q + v_g A}$$

であり、粒子の槽内からの除去時定数と呼ばれる。 α は装置内懸濁液の流動状態の影響を受け、内筒を回転させない通常のろ過では 1 となる。内筒の回転による TVF を発生させた場合、1 以下の値をとると予想される。今、時刻 t におけるフィルター表面の粒子堆積量を $x(t)$ とすると、

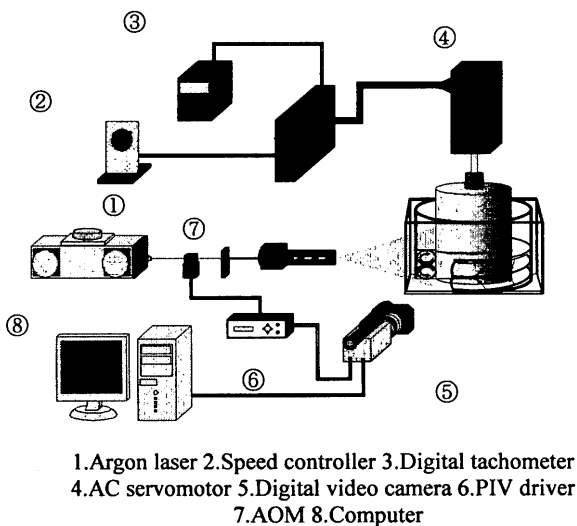


Fig.2 Experimental apparatus

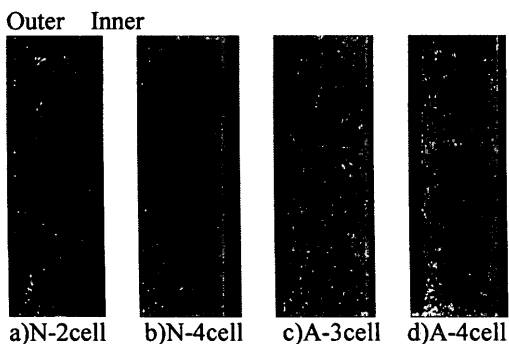


Fig. 4 Vortex mode($\Gamma=3$)

$$\frac{x}{C_0 Q} = \alpha \tau (1 - e^{-t/\tau}) \quad \text{-----(3)}$$

が得られる。C(t)は吸光度の時間変化を測定することにより求められ、この結果、 τ は(2)式から求められる。また実験終了時刻のxは粒子の乾燥重量から測定可能である。したがって、(3)式から α が決定される。

4. 実験結果

$\Gamma=3$ で発生し得る渦モードをFig.4に示した。左から正規2セルモード、正規4セルモード、変異3セルモード、変異4セルモードである。モードの説明は中村らの論文⁽¹⁾を参照されたい。ここでは最も安定なモードである、正規2セルを用いて、以後ろ過実験を行った。

Fig.5ではQ=250ml/minで循環させた時の、Re=0(内円筒静止。ただし、循環流量あり)および、Re=600における粒子の内円筒附着状態を示した。粒子の初期投入量は、0.4gである。吸引時間はRe=0の場合、5分、Re=600の場合は20分である。これより、静止状態では粒子の内円筒表面への附着が顕著に観察されるのに対して、Re=600では20分経過しても、附着はほとんど目視されなかった(槽内では粒子はTaylor渦のために粒子が均一に分布している)。

この定性実験を踏まえ、一定時間濾過させた後のフィルター表面の附着粒子重量を計量した。また槽内の濃度分布を逐次吸光度計で測定して、理論式から α をもとめ、Re数の関数としてFig.6に示した。これよりRe数の増加に伴って α の減少が顕著であり、ケーキ層の堆積が軽減されている。更に、その減少曲線には、Re=600を境界に変曲点が見られる。

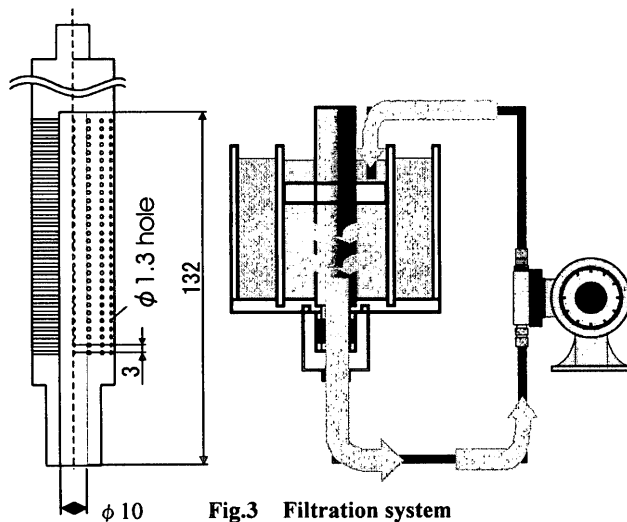


Fig.3 Filtration system

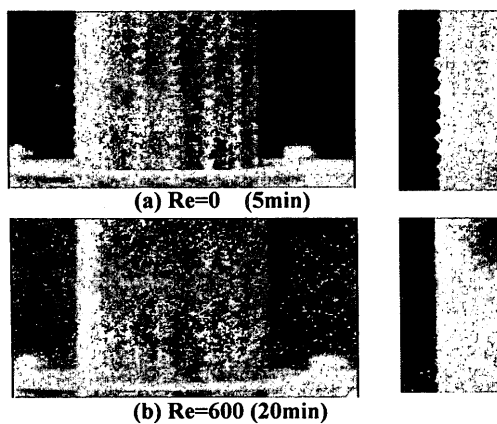


Fig. 5 Cake on the inner rotating filter

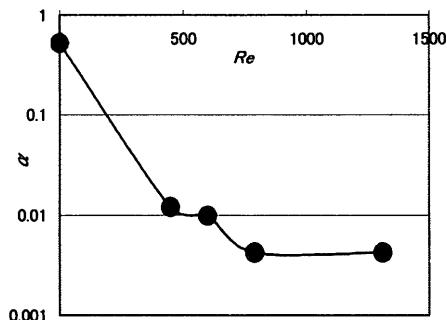


Fig.6 α vs. Re

このRe数は、波動Taylor渦領域への遷移Re数と一致するため、Taylor渦がフィルターのケーキ低減効果に何らかの影響を与えている可能性がある。

5. 結言

粒子のケーキ量を表すパラメータとして α を導入し、Taylor渦が、ろ過性能に影響を及ぼす可能性を言及した。

文献

- (1) 中村・ほか3名, 機論, 56-522, B(1990), 307
- (2) John A. Schwille, et al., J.of Membrane Sci., 204 (2002) 53-65