

## 変調回転円筒容器内における渦構造の可視化

日大生産工（学部）○内海椋太 日大生産工 安藤努  
 物材機構 廣田憲之

### 1. 緒言

近年、超伝導磁石の発展により強磁場の安定的な発生が可能となり、その産業応用が急速に拡大している。特に 10 T 級の強磁場は研究室レベルでも利用可能となり、材料プロセスへの応用が注目されている。その代表例が磁場配向技術である。磁場配向とは、結晶や微粒子を外部磁場によって配向させることで材料に異方性を付与し、機能性を向上させる手法である。非接触的であり、脆性材料にも適用可能であることから、従来は困難であったセラミックス材料<sup>1)</sup>への応用が進展している。

さらに高度な配向制御手法として、変調回転磁場を利用した三軸配向が提案されている<sup>2)</sup>。この手法は、静磁場により磁化容易軸を磁場方向に配向させ、回転磁場により磁化困難軸を回転面垂直方向へ配向させることで、微粒子の完全な三次元配向を実現する。しかし、コロイド溶液中の配向過程では、容器回転有りの場合、回転に伴う流動が配向を阻害する要因となる。定常回転下における流動の研究は進展している一方で、変調回転下における流動特性の理解は依然として不十分であり、今後の課題として残されている。本研究では、変調回転円筒容器内の流動を対象とし、渦構造の可視化することを目的とする。

### 2. 実験方法および測定方法

#### 2.1 実験装置

実験装置は、レーザー本体、シート光学系、カメラ、レンズ、回転容器、およびモーターから構成される。レーザー本体には、日本カノマックス株式会社製 PIV(Particle Image Velocimetry)用可視化レーザーを用いた。波長は 532 nm の緑色レーザーである。撮影時には、カメラの画角内に回転容器の  $r$ - $z$  断面が収まるよう、容器の高さを昇降機で調整している。ステッピングモーターは専用ドライバを介して PC と接続されており、PC からのデータ送信により回転速度や停止条件を制御している。実験装置の構成を Fig. 1 に示す。

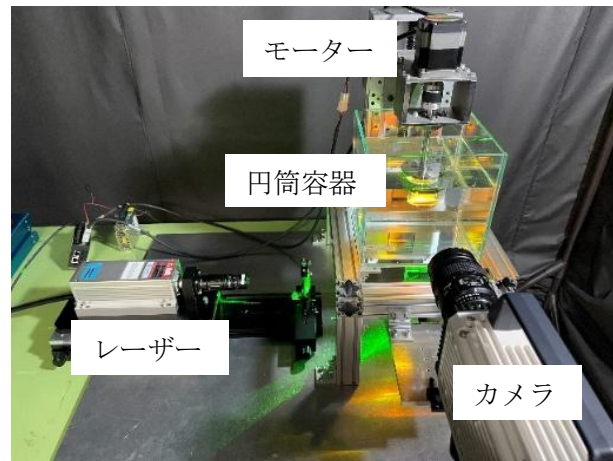


Fig. 1 実験装置の構成

#### 2.2 実験方法

円筒容器下部からレーザー光を入射し、トレーサー粒子を撮影することで流れ場を可視化した。得られた画像データに対して画像解析を行い、容器内の流動特性を評価した。回転条件は間欠回転とし、その概略図を Fig. 2 に示す。実験条件は Table 1 に示す。

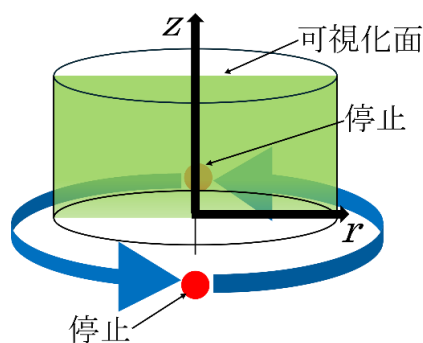


Fig. 2 間欠回転の概略図

Table 1 実験条件

|      |        |                                   |
|------|--------|-----------------------------------|
| 変動条件 | 回転速度   | $\frac{\pi}{4} \sim 2\pi$ [rad/s] |
|      | 停止時間   | 1 ~ 5 [s]                         |
| 固定条件 | 懸濁液の粘性 | 1 [mPa·s]                         |
|      | 粒子濃度   | 0.3 [g/L]                         |
|      | レーザー出力 | 0.5 [W]                           |

### 3. 実験結果および検討

間欠回転における円筒容器内の流動をFig. 3に示す。Fig. 3は、Fig. 2の可視化面における流動のスナップショットである。

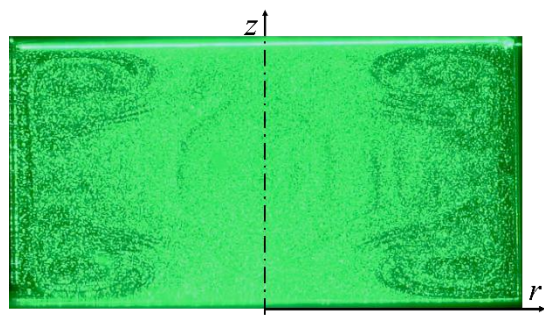


Fig. 3  $r$ - $z$  断面での流動

Fig. 3に示すように、間欠回転において円筒容器内には上下左右対称な渦構造が観測された。これは、容器回転によって発生する遠心力とエクマン境界層における粘性流の作用により、容器上下で対称的な渦が生成されたためと考えられる。

スピニングアップ過程の速度ベクトルと流線をFig. 4に示す。なお、対象流のため円筒容器右半面のみ示す。一方、スピニングダウン過程の速度ベクトルと流線をFig. 5に示す。

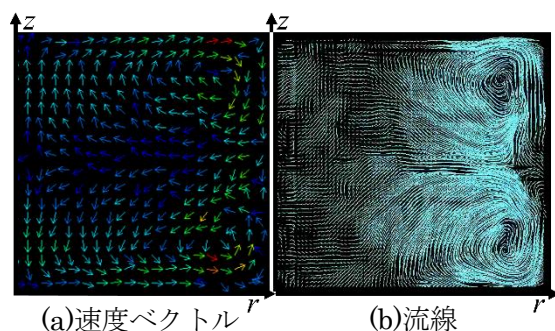


Fig. 4 スピニングアップ時の速度ベクトルと流線

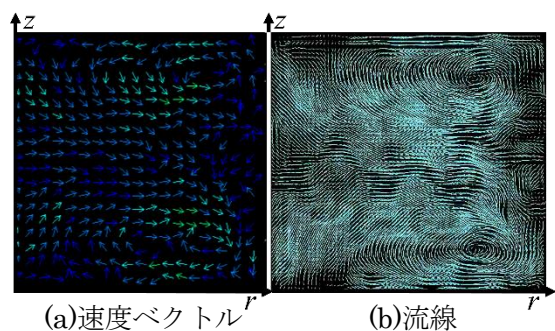


Fig. 5 スピニングダウン時の速度ベクトルと流線

Fig. 4より、容器の回転開始に伴い、上下壁面近傍では、半径方向の速度成分が確認された。この流れは側壁に到達した後に側壁に沿った流れに変化し上下中心で衝突する。一方、回転軸近傍では反転した流れが生成されている。その結果、容器内には上下対称の渦構造が生成され、時間経過とともにその形状が安定する傾向を確認した。これらの観察結果から、スピニングアップ過程には上下壁面近傍から側壁を経由して渦が生成する特徴的な流動場があることがわかる。Fig. 5より、容器の回転停止に伴い、上下壁面近傍ではスピニングアップ過程とは反転方向の渦が生成された。このとき、生成渦が伸長する様子が観測された。これらのことから、スピニングアップ過程とスピニングダウン過程との生成渦が反転方向の渦のため、渦構造が消滅していくと考える。

### 4. 結言

本研究では、変調回転円筒容器内における間欠回転時の流動を可視化し、渦構造を確認した。可視化結果より、スピニングアップ過程では上下壁面から半径方向に流動が発生し、側壁近傍を経て渦構造が生成されることを確認した。一方、スピニングダウン過程では生成渦の向きが反転し、渦中心が回転軸方向へ移動することが観測された。これらの結果から、変調回転に応じて円筒容器内の生成渦が周期的に反転することが示された。現段階では、速度を示しておらず、定性評価に留まっている。そのため、今後の展望としては画像解析結果と数値解を比較し、定量的に生成渦を評価する。

### 参考文献

- 1) 鈴木達, 打越哲郎, 目義雄, 強磁場を用いた反磁性セラミックスの配向制御, まてりあ, 第48巻, 第6号, (2009), pp.321-326
- 2) 堀井滋, 3軸結晶配向手法としての磁場配向法の最近の進展, 応用物理, 89巻, 12号, (2020), pp.715-718.
- 3) M.Ungarish. Spin-up from rest of a light-particle suspension in a cylinder: theory and observations. Int. J. Multiphase Flow, Vol.17, No.1, (1991), pp. 131-143