

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04346

研究課題名(和文) 歳差回転運動を用いた遊星式攪拌の混合性能向上に関する研究

研究課題名(英文) Improvement of mixing performance of blade-free planetary mixer using precessing motion

研究代表者

山縣 貴幸 (Takayuki, Yamagata)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：50554284

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：羽根なし遊星式攪拌における流れ場の慣性振動モードと混合性能との関係を調査した。流れ場および混合性能は気液二相流の流動解析を用い、容器の歳差運動の影響は遠心力とコリオリ力を基礎式に追加することで考慮した。解析結果の検証のため、ミー散乱法を用いた混合の可視化計測を行った。流動解析では実験と定性的に一致する混合パターンが再現され、容器角度の混合性能への影響が大きく、角度が小さく比較的に高い歳差率で混合が促進した。流れ場のモード分解より、混合性能が高い流れ場では液面近傍に特徴的な空間モードが存在し、そのモードは時間的な減衰が小さいことが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、羽根なし遊星式攪拌における流れ場の数値解析データに対する振動モード解析に加えて、混合性能の評価を行う事で、流れの慣性振動と混合との関係を明らかにした。その中で、従来の理論解析や数値解析結果に基づき遊星式攪拌の混合性能の予測や性能向上の検討が可能であることが示された。また、流れ場の振動モードと混合性能との間に強い関係性が示されたことから、混合性能の向上において流れ構造のモード分解は有効な手段であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：The relation between inertial oscillation mode of flow field and mixing performance in blade-free planetary mixer was investigated. The volume of fluid (VOF) method was used to analyze the flow field and mixing performance, and the influence of the precession motion of the container was considered by adding centrifugal force and Coriolis force. In order to validate the analytical results, the mixing progress was experimentally visualized and measured using the Mie scattering method. Numerical analysis reproduced a mixing pattern that qualitatively agreed with the experiment. Proper orthogonal decomposition (POD) and dynamic mode decomposition (DMD) were applied to the flow field data. From the modal decomposition of the flow field, it was clarified that there is a spatial mode near the liquid surface in the flow field with high mixing performance, and this mode decayed slowly over time.

研究分野：可視化学

キーワード：遊星式攪拌 歳差回転流れ モード分解 混合

### 1. 研究開始当初の背景

工業製品の製造において材料の混合・攪拌は重要な工程の一つで、容器の回転運動のみで材料の混合を行う羽根なし遊星式攪拌という方式がある。この方式では、密閉した容器内で攪拌翼なしでの混合が可能であるため、不純物の混入が少ないことや材料の廃棄が少ないことが特徴である。遊星式攪拌は容器自体の自転と公転とは異なる回転軸による公転を組み合わせた歳差運動により容器の混合を行う攪拌方式である。その原理は、歳差回転によって容器内の回転流にコリオリ力が生じ、3次元的な流れや乱流が発生することで混合が促進される。歳差回転によって誘起される流れ場に関する研究は、地球科学や気象学の分野を中心に行われており、主に乱流特性やその生成機構の解明を目的としていた。そのため、どのような流れ場の構造や慣性振動モードによって混合性能が増加するのかは明らかになっていなかった。また、流れ場の時空間的特徴的構造を抽出する動的モード分解が、様々な流れ場に適用され始めており、歳差回転流れの慣性振動の特徴抽出にも有用であると考えられた。

### 2. 研究の目的

遊星式攪拌では、容器の歳差運動により攪拌翼なしで容器内に慣性振動による流れ場が形成され、高レイノルズ数では流れ場の不安定性により非定常流や乱流が生じることで、低レイノルズ数では慣性振動の作用によって混合が進展すると考えられる。しかしながら、これまでのところ、容器内の流れの慣性振動と混合性能との関係は十分に明らかになっていない。本研究では歳差回転流れにおける慣性振動と混合の関係、および歳差回転流れの自・公転比などの主要パラメータが、混合性能や慣性振動モードに及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。そこで、流れ場の数値解析データに対する振動モード解析に加えて、実験的に混合性能の評価を行うことで、流れの慣性振動特性と混合性能との関係を考察した。

### 3. 研究の方法

遊星式攪拌における流れ場と混合性能の数値解析の妥当性を検証するために、混合性能の実験的な評価を行った。図1は本実験で用いた遊星式攪拌装置の概略である。装置には円筒容器の自転軸が公転軸に対して45°傾いた状態で取り付けられており、公転軸のモータにより回転速度を制御した。容器ホルダーに取り付けられたリングは、装置外周のリングと接触しており、公転と同時に容器自体が自転する構造となっている。容器の公転回転速度と自転回転速度の比である歳差率  $\Omega = n_{rev}/n_{rot}$  ( $n_{rev}$  は公転回転速度、 $n_{rot}$  は自転回転速度) は、 $\Omega = 0.48$  で固定である。ただし、攪拌が効果的に行われるように、自転と公転の回転方向は互いに反対方向とした。実験に用いた攪拌容器は容器直径が  $d = 36$  mm であり、公転半径は 120 mm である。混合実験における公転回転速度は、 $n_{rev} = 700$  rpm とした。この時の容器内流れのレイノルズ数は、自転による容器壁面の回転速度と容器半径を基準とするとレイノルズ数は  $Re = 2.4$  である。ただし、作動流体には動粘度  $\nu = 10,000$  mm<sup>2</sup>/s のシリコンオイルを用いた。混合実験では、トレーサとしてでんぶん粒子 (平均粒径 30 μm、密度  $1.5 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>) を使用し、同期したカメラおよびストロボ光により回転中の混合の進展を記録した。混合性能の評価にはトレーサによる散乱光の輝度を元に以下の式で定義される混合度  $I_m$  を用いた。

$$I_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{I_i - I_0}{I_{max} - I_0} \quad (1)$$

ここで、 $I_i$  は局所輝度、 $I_0$  は初期の輝度、 $I_{max}$  は輝度の最大値、 $N$  は計測範囲内の画素数である。

羽根なし遊星式攪拌の容器内の流れ場の解析には Volume of fluid (VOF) 法を用いて、実験と同様にシリコンオイルと空気を仮定した流体により自由表面を有する流動場のシミュレーションを行った。シミュレーションには OpenFOAM V8 を使用し、ニュートン流体を対象とした非圧縮性流れの非定常ソルバを使用した。ただし、容器の歳差運動の影響は、コリオリ力と遠心力の効果を支配方程式に追加することで考慮した。図2は、解析対象の模式図を示している。数値解析では、より詳細に各種パラメータの影響を評価するために、実験とは若干異なるパラメータを用いている。円筒容器の直径は  $d = 35$  mm、高さは  $h = 35$  mm である。液面の高さ  $h_l$  は、静止した水平状態で  $0.5h$  とした。容器の自転回転速度は  $n_{rot} = 210$  rpm で、歳差率を  $\Omega = 0 \sim 2$  の範囲で変化させた。本条件におけるレイノルズ数は  $Re = 6.7$  である。

容器内の流れ場が持つ特徴的な構造と混合性能との関係を明らかにするため、流れ場のモード分解を行った。一つは Proper Orthogonal Decomposition (POD) 解析で、これは流れ場がもつ特徴的なモードの空間的な構造を抽出する方法である。もう一つは Dynamic Mode Decomposition (DMD) で、時間と空間に関する特徴的なモードを抽出する方法である。

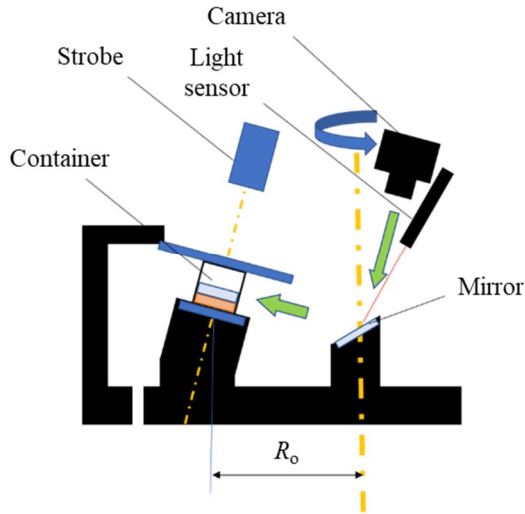


図1 実験装置の構成

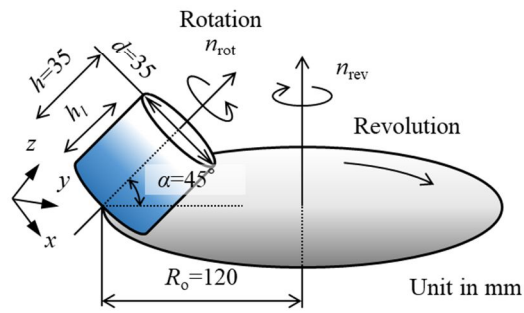
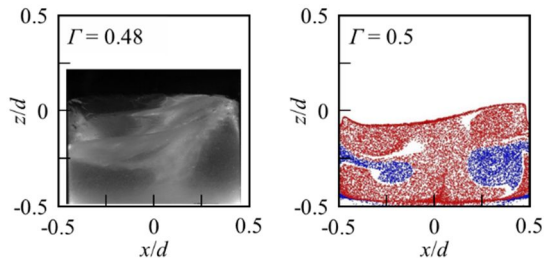


図2 解析対象の模式図

#### 4. 研究成果

初めに数値解析結果の妥当性を検証するために、混合の進展について実験との定性的な比較を行った。図3は容器角度  $\alpha = 45^\circ$ 、歳差率  $\Gamma = 0.5$  の場合における実験と数値解析での混合状態を比較している。実験では容器底部に配置した白いトレーサが、容器の側壁側から液面側に移動し、液面の中央から容器の下部に向かって流れる様子が観察された。数値解析においても、2種類の液体の混合の様子が定性的に再現されている。図4は数値解析で得られた混合度について、歳差率と容器角度による変化を示している。混合度は公転回転速度が増加する  $\Gamma = 1$  以上において増加し、容器角度が小さい場合に混合性能が増加することが明らかとなった。これは、容器内の液面が遠心力の影響で大きく傾き、縦方向の回転流が発生することが関係している。



(a) 実験

(b) 数値解析

図3 混合の様子の可視化

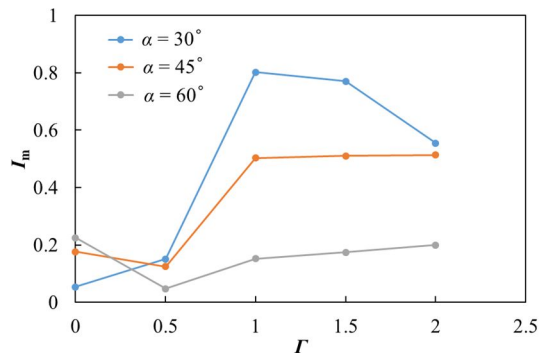
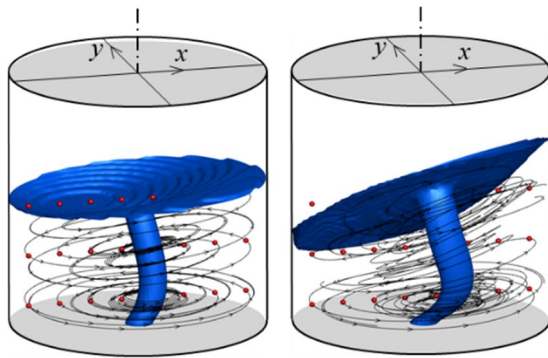


図4 混合度と歳差率の関係

図4は容器角度  $\alpha = 45^\circ$  における流れの3次元構造を示しており、流脈線と低速領域の等値面を示している。低速領域の等値面は、容器内に生じる回転流れの回転軸に相当する。混合度が低い  $\Gamma = 0.5$  (a) の場合は、流れの回転軸がわずかに歪んでいるものの流脈線の軌道の変化は小さく、ほぼ同じ平面を回転している。歳差率が増加する  $\Gamma = 1$  (b) の場合は、流脈線が回転ごとに異なる位置を通過しており、特に液面近くでの変化が大きい。これは、歳差の影響により回転軸の歪みが増加するとともに液面の傾きが増加することによって生じていると考えられる。

図5は容器角度  $\alpha = 45^\circ$  の場合について流れ場のモード分解を行った時の主要な4モードのエネルギーと歳差率の関係を表している。流れ場がもつ空間的な構造は2つのモードが支配的であり、歳差率の増加と共にエネルギーが増加している。このエネルギーの増加は、混合度と同様な変化を示しており、流れ場の空間的な変化が大きいと混合性能が高くなることを示している。



(a)  $\Omega = 0.5$  (b)  $\Omega = 1$

図5 容器内の3次元流れ構造

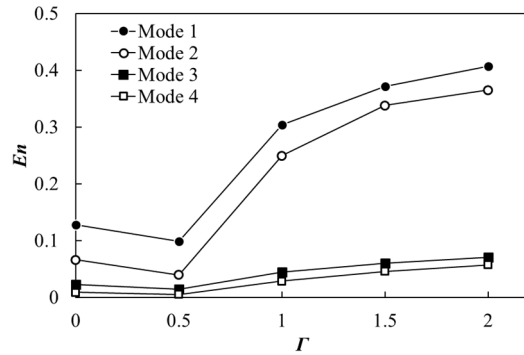
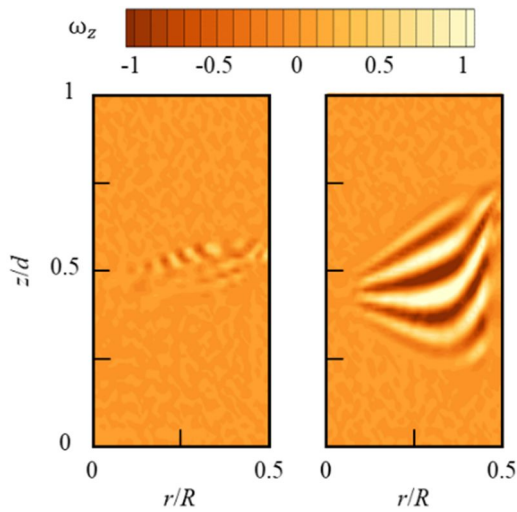


図6 PODモードエネルギー

図6は、第1 DMD モードの渦度等高線を示しており、2つの歳差率の結果を示している。どちらの場合でも、液体の自由表面近くで DMD モードの変化が観察される。特に自由表面の傾きが大きい  $\Omega = 1$  (b) ではモードの空間構造が広い範囲で変化している。さらに、 $\Omega = 1$  では渦度の強さが増加しており、回転に伴う流れ場の変化が大きいことがわかる。図7は、第1 DMD モードの時間係数を示している。歳差率が  $\Omega = 0.5$  (a) の場合、時間係数は急速に減衰している。これは、DMD モードの振動が流れ場に及ぼす影響がわずかであることを示唆している。一方、 $\Omega = 1$  (b) の場合、時間係数はゆっくりと減少しており、流れ場の変化の影響が時間的にも継続することになる。時間係数の周期的な変動は、容器の回転による周期性を反映しているため、振動周波数は容器の回転速度と同じであった。この結果は、流れ場の時間発展が容器の回転による自由表面運動の変化に影響されていることを示している。

以上の結果より、羽根なし遊星式攪拌における混合性能と流れ場の振動モードは密接な関係があり、空間的なモードの変化が大きだけでなくモードの時間的な減衰が小さい方が、混合性能が増加することが明らかになった。



(a)  $\Omega = 0.5$  (b)  $\Omega = 1$

図7 第1 DMD モードの渦度コンター

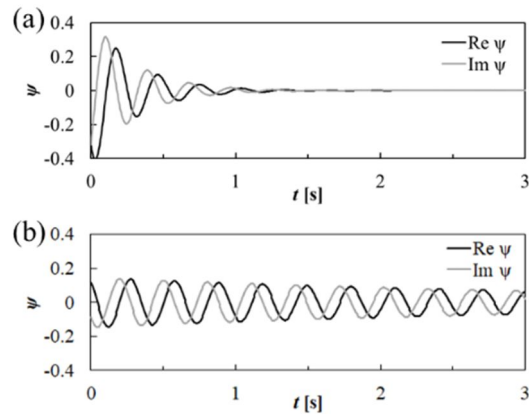


図8 第1 DMD モードの時間係数:

(a)  $\Omega = 0.5$ , (b)  $\Omega = 1$

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yamagata T., Sugisawa H., Fujisawa N.	4. 巻 62
2. 論文標題 Experimental study on laminar mixing in planetary mixer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Experiments in Fluids	6. 最初と最後の頁 28
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00348-021-03146-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Takayuki Yamagata, Tsubasa Igarashi
2. 発表標題 Modal decomposition of fluid motion in blade-free planetary mixer
3. 学会等名 Nineteenth International Conference on Flow Dynamics（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takayuki Yamagata, Kota Sato, Tsubasa Igarashi
2. 発表標題 Visualization of mixing and flow structure in blade-free planetary mixer with free surface
3. 学会等名 The 13th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 猪股慶太郎, 山縣貴幸
2. 発表標題 円筒容器内の歳差回転流れの可視化
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2022年合同講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takayuki Yamagata, Kota Sato, Nobuyuki Fujisawa
2. 発表標題 Effect of free surface on fluid motion in blade-free planetary mixer
3. 学会等名 Seventeenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤剛太, 山縣貴幸
2. 発表標題 遊星式攪拌機における自由表面を有する混合の数値解析
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 第58期総会・講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------