

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820381

研究課題名(和文) 正逆交互回転運動を利用した攪拌装置の動力・流動特性

研究課題名(英文) Power and Flow Characteristics of a rotationally reciprocating impeller

研究代表者

菰田 悦之 (KOMODA, YOSHIYUKI)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00397796

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：円筒槽内で平板翼を往復回転させる正逆交互回転攪拌翼の攪拌特性について軸トルクおよび速度場変動の観点から調査した。翼反転ごとに翼端付近に生じる渦は、レイノルズ数の増大とともに翼から離れて槽全体を流動化させ、慣性力支配のトルク変動特性が得られることがわかった。このような良混合条件における動力特性は一般に乱流で見られる性質を有していたが、軸方向の流動が無視できなくなるものの速度成分自体の摂動は極めて小さく、流動状態は層流であり続けることが判明した。

研究成果の概要(英文)：Mixing process in a cylindrical vessel induced by a rotationally reciprocating impeller was investigated in views of the variations of rotational torque and velocity field generated. A pair of vortices generated near the edge of the impeller is released from the impeller plate under a sufficiently large Reynolds number, resulting in a prompt fluid mixing everywhere in the vessel. Although the torque variation observed at the condition was similar to that under turbulent flow, the fluid flow generated was three dimensional but has very small fluctuation. It is suggested that the fluid flow keeps still laminar even at the superior-mixing condition.

研究分野：移動現象

キーワード：Laminar flow Torque PIV 3D flow

1. 研究開始当初の背景

攪拌槽内の流体混合促進のために非定常攪拌操作の有用性が指摘されている。本課題で対象とする正逆交互回転翼攪拌もその一つであり、円筒槽内で平板翼を低速で一回転以下の往復回転を行う。これまでに、非常に穏やかな攪拌条件下で流体が効率的に引き延ばし折り畳みを受け、高速かつ均一に混合が進行することが明らかになった。

しかしながら、一般的な攪拌槽の性能比較の指標として一般的な攪拌所要動力の測定が行えておらず、動力面からの優位性を示せていなかった。加えて、流動変形の様式については実験に観察し、数値計算によってある程度は再現できたが、実流動場の特徴と流体変形特性との関係について十分な議論ができていなかった。

2. 研究の目的

このような背景から、本課題では軸トルクおよび攪拌所要動力の測定を行い、動力を基準とした攪拌性能評価を行うことを一つの目的とした。一般的な攪拌翼では、動力測定から得られる動力数とレイノルズ数の関係（動力線図）が流動状態と密接に関係していることから、動力特性を指標として層流・乱流遷移や効率的に混合が進行する攪拌条件の動力特性を明らかにする。

もう一つの目的として、攪拌槽内の流動状態を明らかにすることがあげられる。攪拌条件としては、前述の動力線図を指標として、特徴的な流動状態を決定する。また、攪拌翼の動きから円筒槽内水平面内における二次元流動が支配的と考えられるので、槽内流動を底面から撮影して PIV 法による速度場計測を行う。

3. 研究の方法

一般には軸トルクと回転速度の積として所要動力は算出されるが、本攪拌方法ではいずれも正負に変動する。正逆交互回転するステッピングモーターから翼角度を取得し、軸トルクは攪拌軸に組み込んだ静トルクセンサーにより正負のトルクを計測した。これらを同時計測することで瞬時の所要動力を、それを一周期にわたって積分して平均所要動力を求めた。また、振動振幅・周期および様々な濃度のグリセリン水溶液を用いて幅広いレイノルズ数における動力測定を行った。

次に、周期的に変動する速度場を計測するため、粒子を懸濁した流体に対して側方からレーザーシート光を照射し、水平面内における流動状態を槽底からハイスピードカメラにより撮影した。この動画を PIV (Particle Image Velocimetry) 法により解析し、周期

変動する速度場を得た。また、レイノルズ数の増大とともに流動状態が3次元化することや槽底や液面の影響も考えられるので、異なる高さレーザーシート光を照射し、速度場の計測も行った。

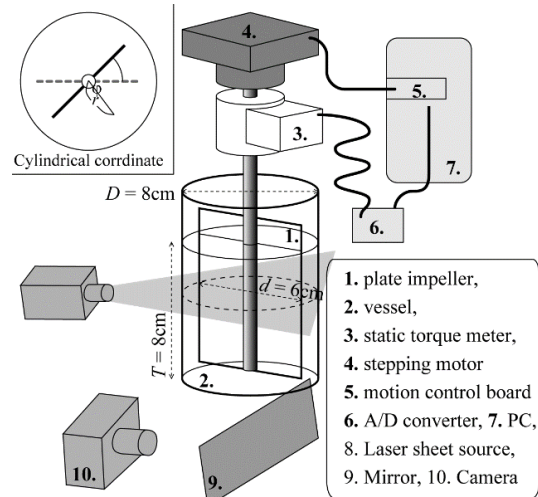


図1 実験装置概要

4. 研究成果

(1) 動力測定

様々な攪拌条件にて計測した攪拌所要動力を平均回転速度と翼径により無次元化した動力数とレイノルズ数の関係として図2に示した。これより、一般的な攪拌翼と同様に、低レイノルズ数では動力数はレイノルズ数に反比例し、高レイノルズ数ではほぼ一定の値を示した。また、低レイノルズ数領域の動力数は定回転操作の推算値 (Nagata の式) と同等であった。一方、レイノルズ数が大きくなると定回転操作よりも一桁以上大きな動力数を示し、その値は振幅によって異なる値であった。反転時は定回転翼のスタートアップに相当するので、振幅が小さいほど反転頻度が高く、所要動力が増大したと考えられる。さらに、定回転操作の動力線図からの乖離が正逆交互回転翼攪拌の特徴と考えられ、振幅が小さいとその時のレイノルズ数は低下した。すなわち、小振幅の方が本攪拌手法の特徴が強く表れることが示唆された。

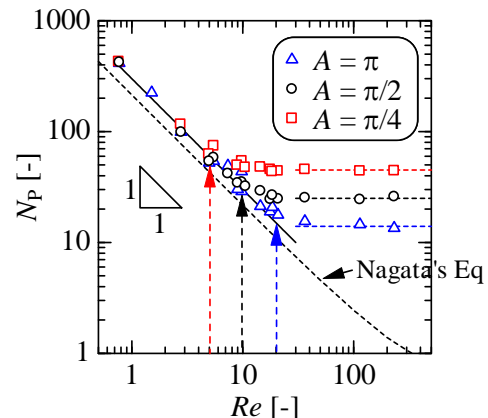


図2 動力線図

(2) 速度場測定

振幅 $A = 1/2$ において、動力数がレイノルズ数に反比例する $Re=2.3$ および一定となる $Re=43$ において測定された速度場および渦度分布を図3に示す。低レイノルズ数領域では、翼先端にのみ渦度の強い領域が存在し、これは翼端に発生した渦流が翼と共に回転することに相当する。従って、翼端から離れた領域では翼と共に回転する旋回流が支配的である。これに対して、高レイノルズ数では翼端から渦が乖離することで渦度が高い領域が翼後方に広がり、流体を槽壁から槽中央部へと引き込む効果がある。さらに、翼に沿った強い渦度領域は翼面におけるせん断流れを意味しており、これが流体を翼端に輸送する役割を担っている。この二つの流動様式の共存によってこのレイノルズ数において優れた混合性能を示したと考えられる。

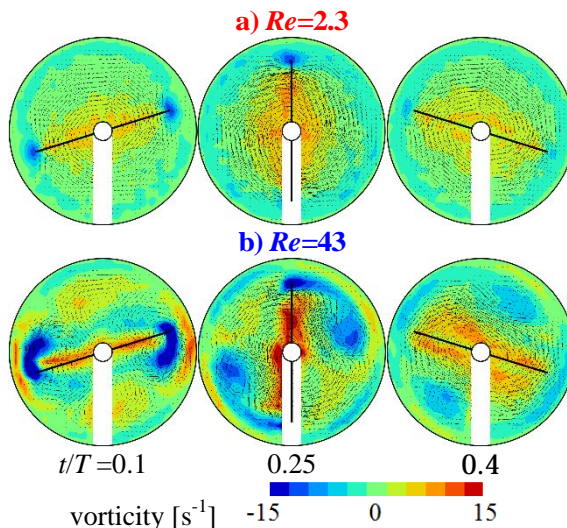


図3 速度場および渦度分布の推移

また、異なる高さにレーザーシート光を照射して速度場を計測したところ、低レイノルズ数では高さによる違いが見られないが、高いレイノルズ数では槽底および液面近くの流動状態は中央高さとは著しく異なり、いずれの高さにおいても鉛直方向の速度成分が存在することが示唆された。従って、 $Re=43$ では流動状態が三次元化していることが明らかになったが、速度変動は摂動成分が極めて小さく完全な周期性を有していたことから、流動状態は依然として層流であることが判明した。

(3) 動力と流動状態の関係

図2に見られるように動力特性は流動状態と密接に関係しているが、本攪拌方法では平均所要動力のみならず軸トルク変動が流動状態の違いを反映していると考えられる。すなわち、粘性支配であれば翼速度と軸トルクは同位相で変化し、慣性支配になると位相差を生じることになる。そこで、位相差のレイノルズ数依存性(図4)を調べたところ、動力数がレイノルズ数に対して一定となる領

域であっても $Re > 1$ ではレイノルズ数の増加とともに位相差は増大し、動力数が一定になると位相差はそれ以上増大しなくなった。すなわち、 $Re=2.3$ でも翼に対して僅かな非対称性を有する流動が生じており、一方で動力数が一定となる領域では渦流が翼から完全に乖離するので慣性力の寄与に上限があると考えられる。

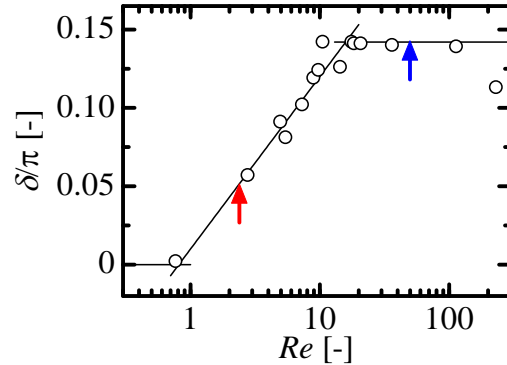


図4 軸トルク変動と翼速度の位相差

さらに、 $Re > 20$ においては軸トルクが摂動を伴いながら変動することが明らかになったので、軸トルクの周波数解析も試みた。その結果、レイノルズ数が高くなるほど翼の振動周波数の3および5倍の振動数を有するトルク成分が含まれることがわかった。この高次高調波成分のレイノルズ数依存性を調べると、動力数がレイノルズ数に対して反比例の関係から逸脱すると3次高調波が、動力数が一定になると5次高調波が、顕著に表れることがわかった。

従って、本攪拌手法においては、動力数がレイノルズ数に対して反比例の関係から逸脱し始めると飛躍的に混合性能が向上することから、翼端に生じた渦流の乖離がその役割を大きくになっており、トルク変動の周波数解析によってその流動の特徴を詳細に理解できる可能性が示された。さらに高いレイノルズ数では動力数やトルク変動の位相差が僅かに減少する挙動が見られていることから、高レイノルズ数領域における詳細な調査を進め、本攪拌装置の実用化に向けた基礎検討を積み重ねる必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3 件)

S. Senda, Y. Komoda, H. Takeda, Y. Hirata, R. Hidema, H. Suzuki, Fluid Deformation Induced by a Rotationally Reciprocating Impeller, Journal of Chemical Engineering, Japan, 査読有, 47, 2014, 151-158

S. Senda, N. Yamagami, Y. Komoda, Y. Hirata, R. Hidema, H. Suzuki, Power Characteristics of a Rotationally

Reciprocating Impeller, Journal of Chemical Engineering, Japan, 査読有, accepted
S. Senda, Y. Komoda, H. Takeda, Y. Hirata, R. Hidema, H. Suzuki, Characteristics of fluid Deformation Induced by a Rotationally Reciprocating Impeller, Proceedings of AIChE Annual Meeting 2013, 査読無, 2013

〔学会発表〕(計 9 件)

S. Senda, Y. Komoda, H. Takeda, Y. Hirata, R. Hidema, H. Suzuki, Characteristics of fluid Deformation Induced by a Rotationally Reciprocating Impeller, AIChE Annual Meeting 2013, サンフランシスコ(アメリカ)

仙田早紀, 菰田悦之, 竹田宏, 平田雄志, 鈴木洋, 日出間るり, 正逆交互回転翼が引き起こす渦流れが流体変形に与える影響, 化学工学会第 45 秋季大会, 2013, 岡山

仙田早紀, 菰田悦之, 竹田宏, 平田雄志, 日出間るり, 鈴木洋, 正逆交互回転翼の混合過程に対する槽底クリアランスの影響, 化学工学会第 79 年会, 2014, 岐阜
山上典之, 菰田悦之, 竹田宏, 平田雄志, 鈴木洋, 日出間るり, 正逆交互回転翼攪拌の動力特性に及ぼす攪拌条件の影響, 化学工学会第 79 年会, 2014, 岐阜

山上典之, 仙田早紀, 菰田悦之, 平田雄志, 鈴木洋, 日出間るり, 周期的混合パターン解析による正逆交互回転翼攪拌の混合性能評価, 化学工学会第 46 秋季大会, 2014, 福岡

富樹文登, 菰田悦之, 平田雄志, 鈴木洋, 日出間るり, 粘弾性流体を対象とした正逆交互回転翼の攪拌特性, 化学工学会姫路大会, 2014

山上典之, 菰田悦之, 平田雄志, 鈴木洋, 日出間るり, 変色反応および脱色反応を用いた正逆交互回転翼攪拌における混合過程に評価, 化学工学会第 80 年会, 2015, 東京

菰田悦之, 仙田早紀, 山上典之, 平田雄志, 鈴木洋, 日出間るり, 正逆交互回転翼攪拌の流動・動力特性, 化学工学会第 80 年会, 2015, 東京

Y. Komoda, S. Senda, N. Yamagami, Y.

Hirata, H. Takeda, H. Suzuki, R. Hidema, Torque variation of a rotationally reciprocating plate impeller and its relationship with fluid flow in a cylindrical vessel, 15th European Conference on Mixing, 2015

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菰田悦之 (KOMODA, Yoshiyuki)
神戸大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号:

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: