

液-液系における機械攪拌時の PIV 測定と流体解析

岡山大学大学院環境生命科学研究科環境科学専攻 教授 加藤嘉英

1. 緒言

攪拌操作は鉄鋼、食品、化学、医療、電子産業等、さまざまな産業に用いられる重要な単位操作であり、混合、分散操作、物質移動、反応、伝熱等を目的に行われることが多い¹⁾。実際の攪拌は異相系で行われることが多く、その中で液-液系攪拌は混合パターンによって現象が異なることから、現象の整理が煩雑となっている。Horiuchi ら²⁾は、同一攪拌エネルギー供給速度でガスと機械攪拌を行って液-液間の物質移動速度を測定し、流れのパターンによって物質移動速度が大きく異なることを示した。これは系を集中定数系で扱うことの限界を示しており、異相間物質移動操作時の攪拌装置固有の「攪拌の質」といった観点からバルク全体ではなく局所領域に焦点を当てた観測と比較検討することが必要であるといえる³⁾。

これを踏まえ本研究では機械攪拌の液-液系の流動特性を PIV (Particle Image Velocimetry)を用いて測定した。PIV は流れ場の解明に非常に有効な手段であり、高層ビルの風害や耐風性、医学における血流などの問題、航空機、船舶、自動車などの性能や安全性など幅広い分野に用いられている。また、数値流体力学(Computational Fluid Dynamics)を用いて気-液混相流における数値解析も行った。数値解析は攪拌層内部の実験では得にくい詳細な流動状況が得られ、インペラーや槽の形状を容易に変更できるためコストが抑えられるという利点がある。本研究では数値計算と PIV 測定結果を比較した。

2. 実験方法

2.1 2次元 PIV 測定

容器模式図を Fig. 1 に、実験条件を Table 1 に示す。アクリル製円筒容器に、底面からの高さが 300 mm になる液量を静止状態で装入した。攪拌に 4 枚羽根のインペラーを使用し、インペラーの底面が槽底面からの高さ 50mm となる位置にし、インペラー軸が容器中心になるように設置した。分散層には流動パラフィンを使用し、油水比は 0 と 0.23 に変更した。Horiuchi et al.⁴⁾は液-液界面状態が I. 液-液界面がインペラー上面に到達しない完全相分離域、II. 液-液界面がインペラー上面に到達して流動パラフィンが一部分散層となる液-液分散域、III. 液-液界面とともに気-液界面もインペラー上面に到達する液-液分散域の 3 領域に分けられるとした。本研究は I. 液-液界面がインペラー上面に到達しない完全相分離域で測定を行った。流動パラフィンが連続相であるイオン交換水に及ぼす影響を調べるために、インペラー横と容器底面からの高さ $H=200\text{mm}$ の位置の平均速度および乱流エネルギーを比較した。容器に微細なトレーサー粒子を混入させ、これをレーザーでシート状に照明し、トレーサー粒子からの散乱光を CCD カメラで介して記録媒

体に 2 時刻の瞬間的な粒子画像として記録し、イオン交換水のフローパターンを測定した。トレーサー粒子に比重 1.07、粒径 $300\ \mu\text{m}$ の非架橋ポリスチレンを使用した。レーザーはインペラー軸を通し、カメラはレーザーと直角になる位置に設置した。測定する際、しばらくの間攪拌し定常状態になったのを確認してから測定を行った。PIV 測定の模式図を Fig. 2 に示す。

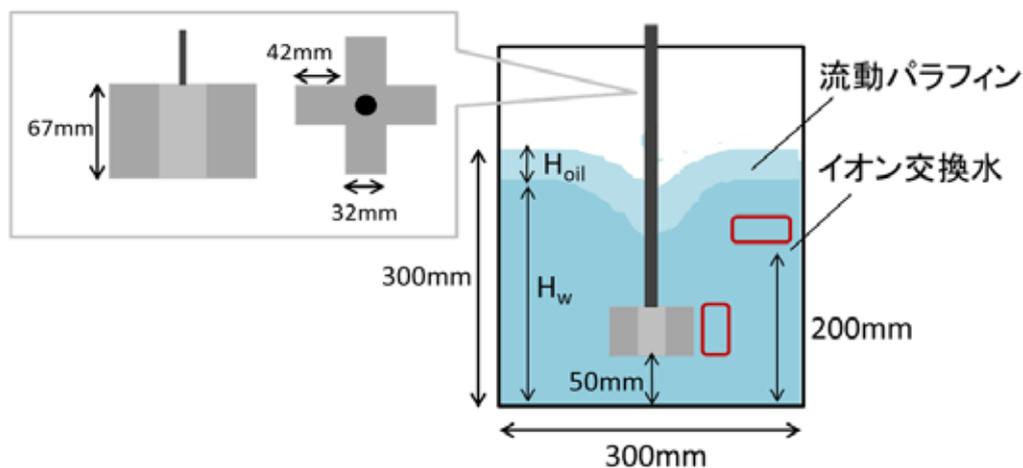


Fig.1 容器およびインペラーの模式図

Table 1 実験条件

Vessel inner diameter (mm)	300
Bath depth (mm)	300
Impeller diameter (mm)	116
Impeller thickness (mm)	67
Impeller width (mm)	31
Rotating speed (rpm)	50, 80, 100
Impeller depth (mm)	50
Liquid/liquid ratio (-)	0, 0.23
Dispersion phase	Liquid paraffin

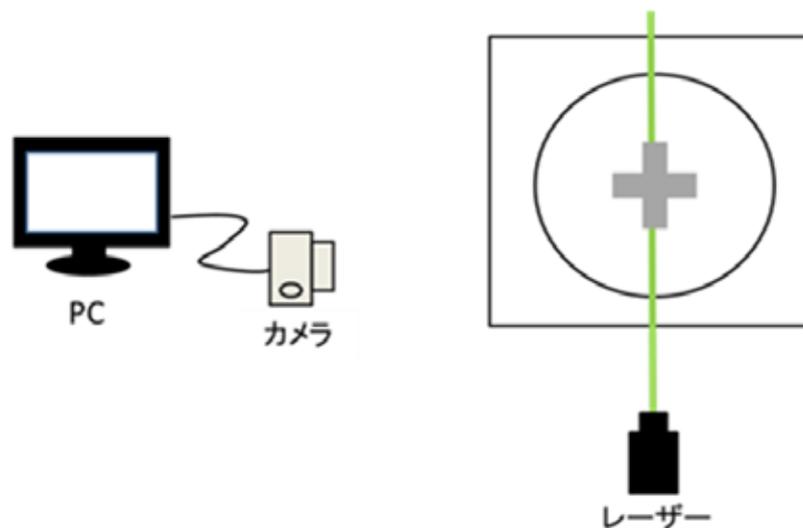


Fig.2 PIV 測定の模式図

2.2 数値解析

アクリル製円筒容器内での機械攪拌時における気-液混相流の計算を行った。流体解析ソフト ANSYS Fluent 15.0 を用いた。液体の高さは実験同様 300 mm とし、液体は水とした。気相には理想気体の空気を使用した。インペラーの回転数は 350rpm とした。その他の計算条件に関しては PIV 測定と同様である。気-液の混相流では三次元非定常解析を行うのは計算コストが非常に高いため二次元に縮退し非定常解析を行った。計算を行う際のタイムステップ数は 10^{-2} s とした。乱流モデルには回転系に有効だとされる $k-\omega$ モデルを使用した。気-液界面の計算には VOF (Volume of fluid) モデルを使用した。

3. 実験結果と考察

3.1 2次元 PIV 測定結果

油水比が 0.23 で回転数を 100 rpm とした場合の平均速度分布、乱流エネルギー分布をそれぞれ Figs.3,4 に示す。平均速度、乱流エネルギーの最大値はインペラー横の位置で見られた。また乱流エネルギーは、Wadnerkar et al.⁵⁾による固-液系の計算結果と同様に、インペラーから放射状に小さくなった。容器底部、中央部および界面付近では旋回流が確認できた。

着目したインペラー横、高さ 200mm の位置を Figs. 5,6 に示す。各回転数におけるインペラー横の平均速度、乱流エネルギーを比較して Figs. 7, 8 に示す。インペラー横では、回転数を上げると平均速度、乱流エネルギーともに増加したが、油水比による変化は見られなかった。これはインペラー横の位置では、インペラーの攪拌動力が直接水に伝わる位置であるためと考えられる。

次に高さ 200mm の位置での平均速度、乱流エネルギーを比較して Figs. 9, 10 に示す。

インペラー横とは異なり、油水比を増加させるとそれぞれの値は減少した。これは分散層である流動パラフィンの粘度が連続相であるイオン交換水より高いためと考えられ、流動パラフィンが連続相であるイオン交換水の流動を抑えられることがわかった。

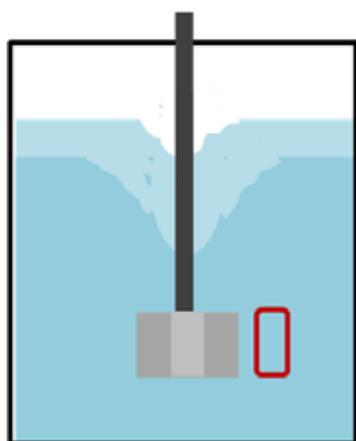


Fig.3 インペラー横

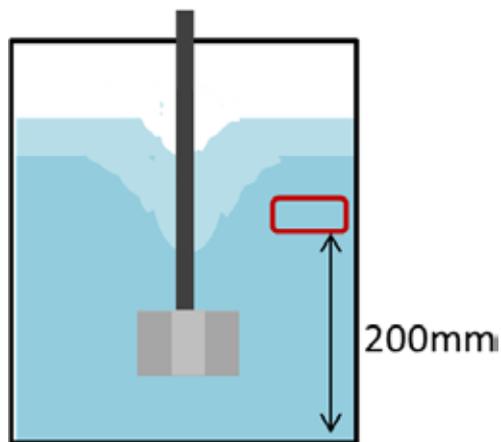


Fig.4 高さ 200mm

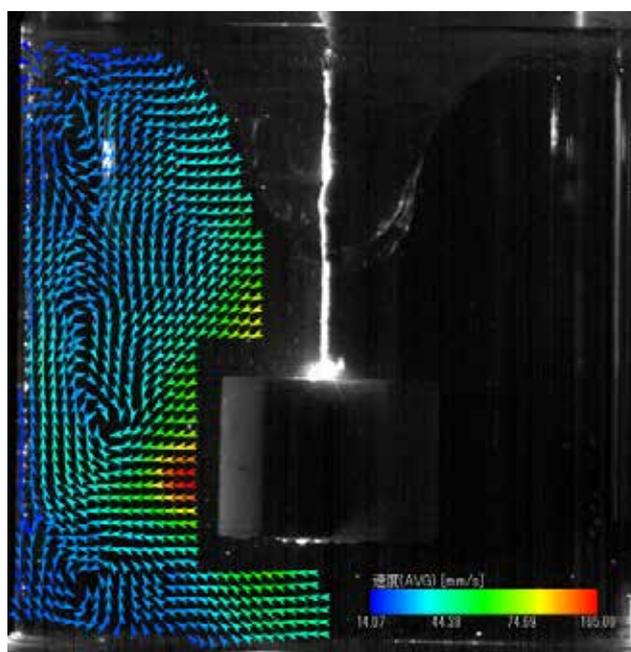


Fig.5 油水比 0.23、回転数 100 rpm における平均速度分布

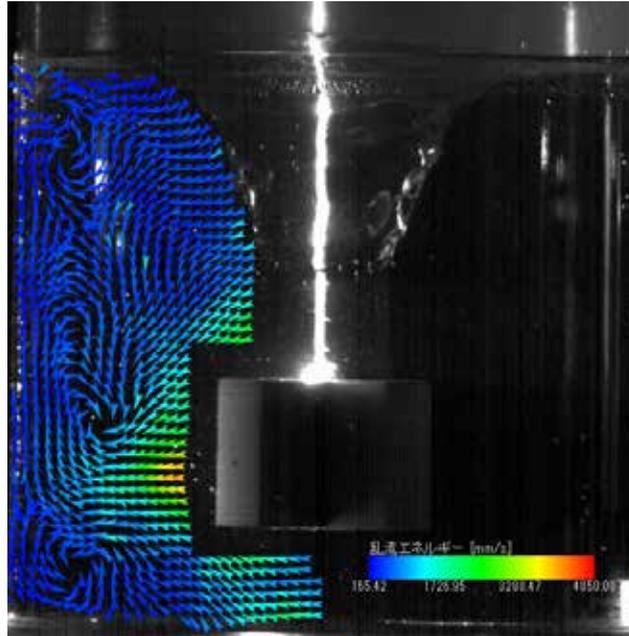


Fig.6 油水比 0.23、回転数 100 rpm における乱流エネルギー分布

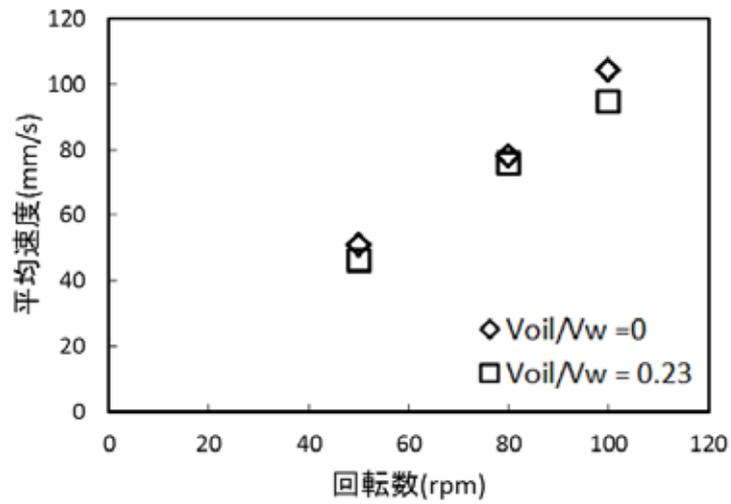


Fig.7 各回転数における平均速度(インペラー横)

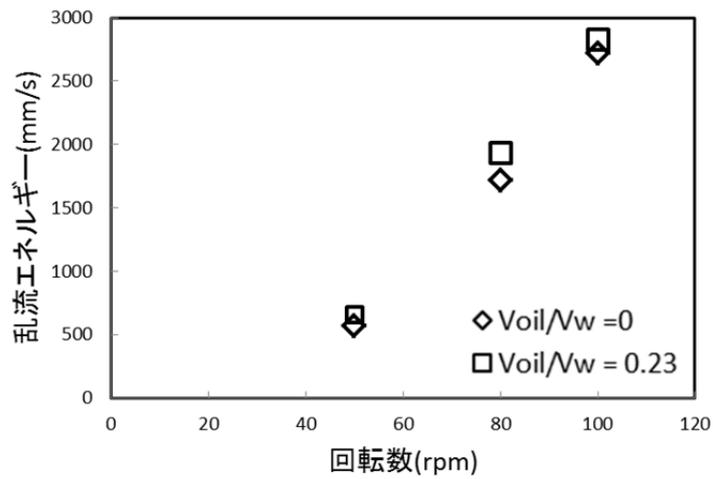


Fig.8 各回転数における乱流エネルギー(インペラー横)

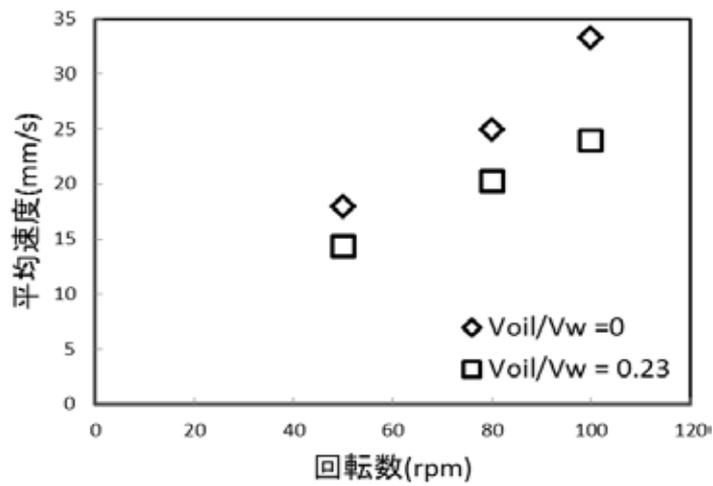


Fig.9 各回転数における平均速度(高さ 200mm)

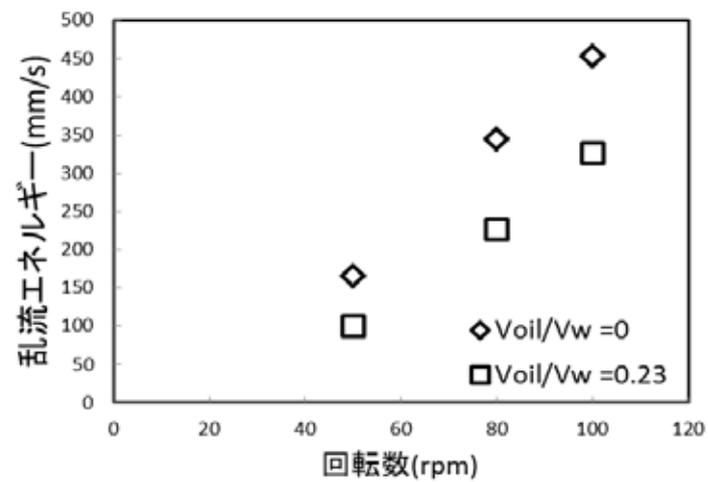


Fig.10 各回転数における乱流エネルギー(高さ 200mm)

3.2 数値解析結果

3.2.1 フローパターン

Fig. 11 にインペラーの回転数 350rpm における数値解析の結果を示す。全体的なフローパターンは再現できており、容器底部および気-液界面に旋回流が確認できた。

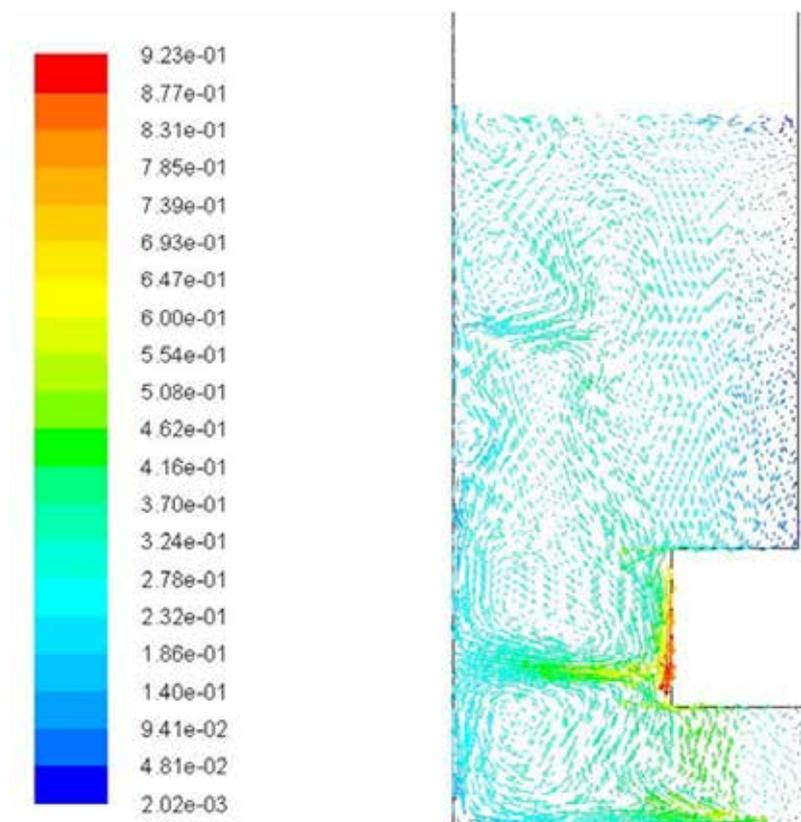


Fig.11 350rpm における数値解析

3.2.2 平均速度と乱流エネルギー

インペラー横における平均速度を PIV 測定と数値解析結果を比較し、Fig. 12 に示す。両者のフローパターンは概ね一致した。

インペラー横における乱流エネルギーを PIV 測定と数値解析の結果を比較して Fig. 13 に示す。PIV 測定は 2 次元で、数値解析は 3 次元となるので絶対値の比較は意味がないが、カラーで示される大きさの傾向は一致した。

このように、数値計算は定性的に PIV の速度および乱流エネルギー分布の傾向に一致しており、今後液-液系の計算への展開を図る。

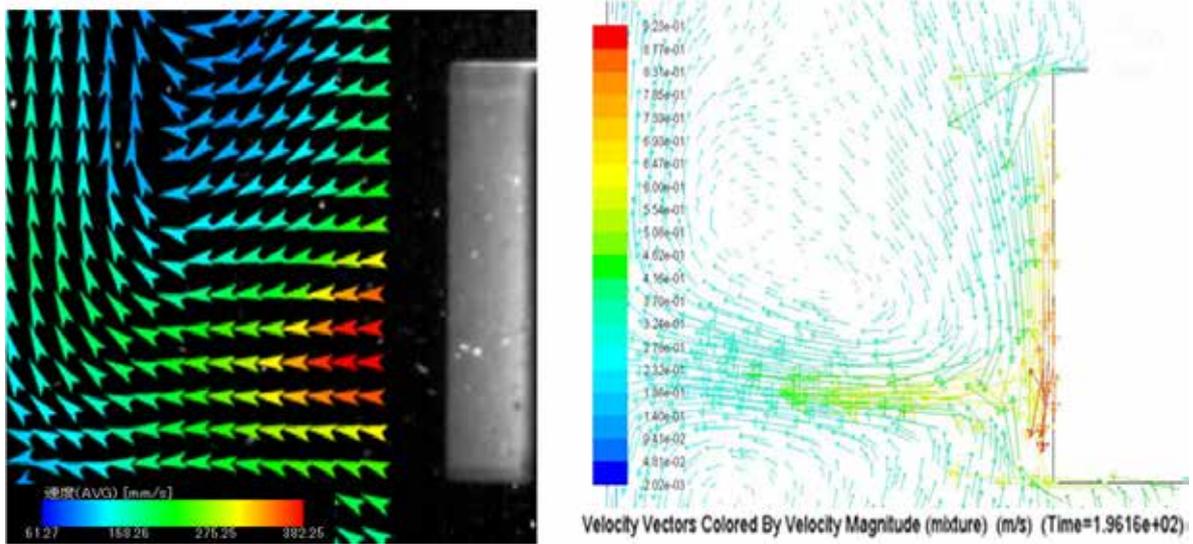


Fig.12 回転数 350rpm における平均速度 PIV 測定(左), 数値解析(右)

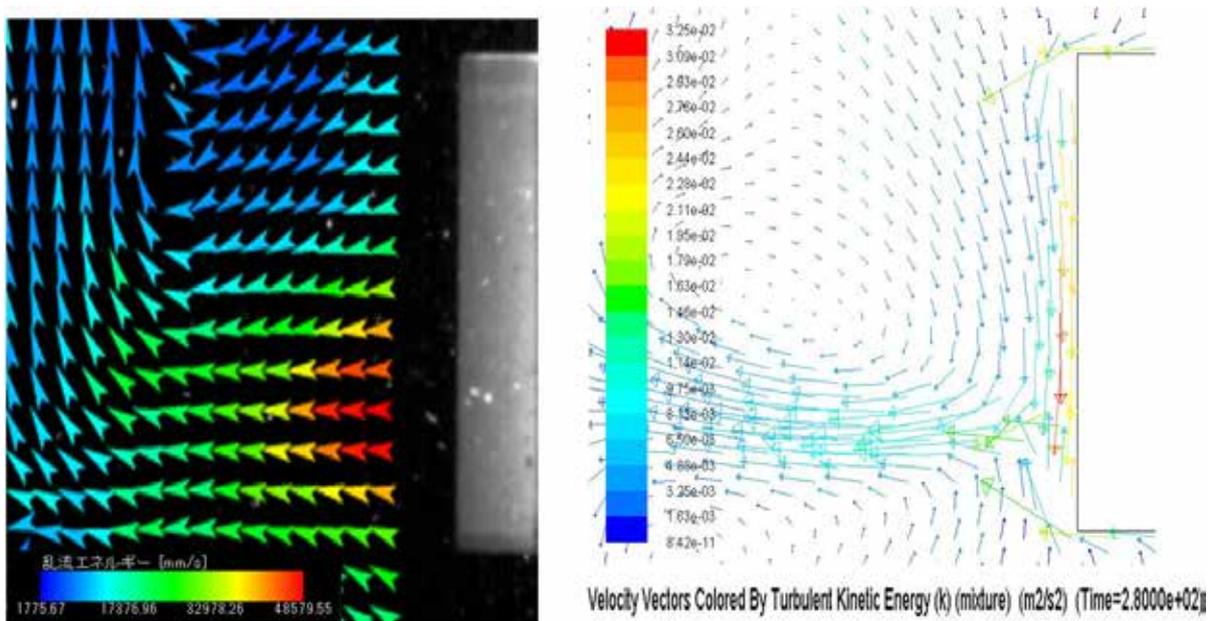


Fig.13 回転数 350rpm における乱流エネルギー PIV 測定(左), 数値解析(右)

4. 結言

機械攪拌による 2 次元 PIV 測定および流体解析を行い、次の結果を得た。

- (1) 水より粘度の高い流動パラフィンを装入し、液-液比を変えることにより、インペラ一横では平均速度、乱流エネルギーは変わらなかったが、容器上部ではそれぞれ減少した。

- (2) PIV 測定と数値解析の両方で容器底面および気液界面、液-液界面で旋回流を確認した。
- (3) 数値計算結果はフローパターンを再現できた。
- (4) 平均速度および乱流エネルギーの分布も数値計算結果は 2 次元 PIV 測定結果を定性的に再現できた。

謝辞

本研究は、公益財団法人 JFE21 世紀財団の助成を受けて行われた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 化学工学会編：化学工学便覧（改定 7 版），丸善（東京）， p.332
- 2) S. Horiuchi et al. : ISIJ Int., 54(2014), p.87
- 3) R. Shiba et al., ISIJ Int., 54(2014), p.2754
- 4) S. Horiuchi et al., : ISIJ Int., 54(2014), p.82
- 5) D. Wadnerkar et al.;Advanced Powder Technology, 23(2012) p.445