

補助事業番号 2023M-303

補助事業名 2023年度 高効率攪拌装置の普及に向けたCFMアンソロジーの制作 補助事業

補助事業者名 呉工業高等専門学校 機械工学分野 教授 高田 一貴

## 1 研究の概要

これまでJKA補助事業において攪拌装置の性能評価・高効率化に関して研究開発を実施した(2018M-126、2020M-142)。その結果、高性能かつ高効率な汎用攪拌装置の提案を行い、動力特性と伝熱特性についての性能評価を行った。本事業では、提案した攪拌装置についてスケールアップをとまなう混合や異相系攪拌まで検討の対象を広げてその汎用性を実証し、普及に向けた動画(プロモーションビデオ、以下PV)の制作をおこなう。具体的には混合性能や気液・固液攪拌などの異相系攪拌を対象としたシミュレーションを展開してマクロな性能評価に基づく高効率攪拌装置の性能を示し、その汎用性を実証する。これらは実験およびシミュレーションの両面より実施され、最終的に本事業で開発された攪拌装置の普及を後押しするためのPVとしてまとめる。

## 2 研究の背景と目的

本事業の目的は、提案してきた高効率汎用攪拌装置が様々な条件の下で優位な攪拌性能を示すことを実験およびシミュレーションの両面より明らかにして、その技術的な優位性をPVとして制作し公表することにある。スケールアップ後の攪拌性能が一定の確度をもって予測できることを動画で示すことにより、設計現場へのシミュレーション技術の導入を促し、経験に頼ることなく現象解明に基づく装置設計や選定を容易にする。

本事業を実施する背景は、攪拌技術が設計や製造現場における熟練技術者によって対応がなされている現状を改善し若手技術者への技術継承という位置づけの下で、経験が少ない若手技術者でも汎用高効率攪拌装置というハードの活用によりプロセス改善へつなげることが出来る環境を創り出す。汎用かつ高効率な攪拌装置がプロセスの様々な課題を解決して、プロセスの生産性や品質を向上させ、日本のプロセス産業の競争力強化を目指すことに挑戦できるようにする。

## 3 研究内容

本研究では効率的な攪拌装置を提案し、その性能を可視化することにより様々な工業プロセスの課題解決へつなげることを目的としている。従来の攪拌装置よりも高機能かつ効率的な攪拌装置のコンセプトを広く知っていただくために、プロモーション動画を制作して普及の足掛かりとする。攪拌操作の中で検討の対象となる混合性能、気液攪拌性能、固液攪拌性能、スケールアップへの展開に焦点を当てて装置の検証を試みた。その結果、提案された装置は従来装置よりも極めて高機能かつ高効率な攪拌翼であることが実証され、その汎用性から様々なプロセス上の課題解決へ貢献するものと考えられる。以下にその概要を記す。

## (1) 混合シミュレーション

内径400mm、標準容積60リットルの可視化実験装置を対象とした攪拌流動および混合のコンピュータシミュレーションをおこなった。混合のシミュレーションでは、今回対象とする攪拌装置の汎用性・多機能性を鑑み、粘性係数を変化させた。具体的には、水（粘性係数0.001Pas）、粘性係数1Pasおよび10Pasの3種類とし、流動状態として乱流、遷移域、層流を設定した。今回、開発技術の優位性を確認するために、既存の攪拌装置についても同様のシミュレーションをおこない、両者を比較検討した。

シミュレーションには補助事業で調達したエンジニアリングワークステーションを活用、解析ソフトウェアは本技術を広く普及させることをめざして汎用の熱流体解析コードを活用した。今回、scFLOW（エムエスシーソフトウェアによるライセンス）を用いたが、概ね、市販の汎用の熱流体解析コードを使えば攪拌流動を再現できるレベルに達していることから、特にソフトウェアの限定はしなくても良いと考えられる。混合シミュレーションではまず攪拌流動のシミュレーションをおこない、その流れの中に仮想拡散物質を投入して拡散物質が流れに乗って攪拌装置内へ移流・拡散しながら混合が進行する様子を再現させた。具体的な例を図-1に示す。この結果を実際の流れと比較することによりシミュレーションの信頼性を評価した。その結果、両者のパターンはよく一致し、混合シミュレーションによる予測が可能であることがわかった。

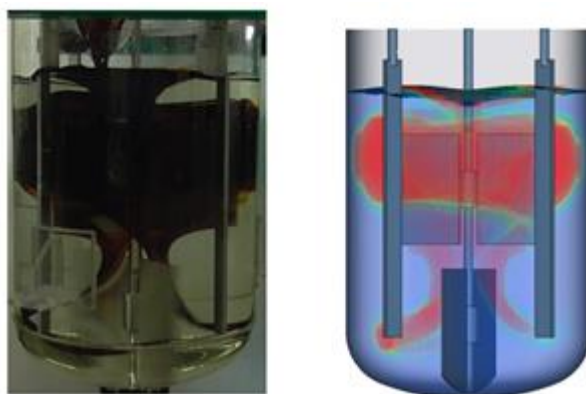


図-1 拡散物質が槽内へ拡散していく様子（任意の時間で切り取り）

## (2) 気液攪拌シミュレーション

気液攪拌の目的は、攪拌槽内の液中に酸素や水素などを効率よく溶解させるために行うものである。バイオインダストリーや化成品製造プロセスで良く見かける操作である。その手法としては主に、液中に気体を吹き込み攪拌翼で気体を切断・微細化して接触面積を大きくして溶解を促進させる方法や、液面から気体を吸い込ませて槽内へ取り込む方法の2種類が一般的である。ここでは、大型翼の特性が発揮できる後者の検討をおこなった。

混合シミュレーションと同じサイズの攪拌実験装置を対象とし、液面から空気を巻き込む様子を再現させるシミュレーションを実施した。このシミュレーションは、液面から酸素や水素などを槽内へ溶解させる操作を模擬したものであり、VOF法により液体と気体の界面を定義し、それぞれの流体割合を攪拌槽内で再現させた。図-2に、液面から気体が巻き込まれ、気体が槽内で保持される様子を示す。



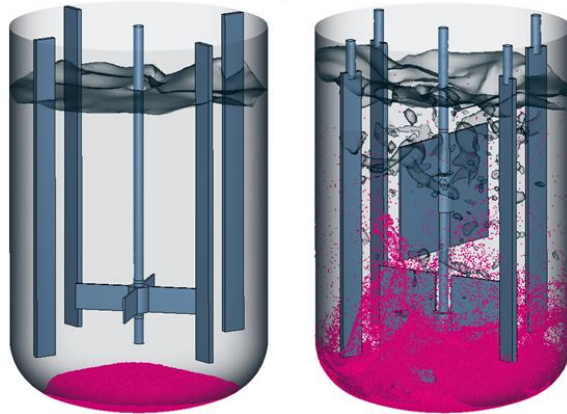
図-2 気液攪拌シミュレーション（液面からのガス吸収性評価）

### （3） 固液攪拌シミュレーションの実施

固液攪拌の目的は攪拌槽内に投入された固体の効率の良い溶解や均一分散などを行わせることであり、さまざまな工業プロセスの中で使用されている。通常、投入した固体は槽内、特に槽の底部で滞留させることなく浮遊させることが求められる。インペラによりその浮遊状況は異なることから、インペラ毎の性能把握が必要とされている。

この解析では粒子同士の衝突や摩擦を考慮した離散粒子法を用いて、攪拌翼によって影響を受ける粒子の挙動を可視化した。粒子はアルミナ粒子を模擬した直径1mm、比重3.9の球形粒子を充填率25wt%とした。比較対象として4枚パドル翼を選定した。図-3に粒子浮遊の様子を示す。投入動力はいずれも単位容積あたり

0.75kWである。ワイドパドルでは粒子が浮遊しているが4枚パドル翼では槽底に停滞した状態となり、攪拌性能の良否が明確となった。



図－3 粒子浮遊の固液シミュレーション（アルミナ粒子の浮遊）

#### （4）スケールアップシミュレーションの実施

攪拌装置のスケールアップは装置設計における最終の検討事項である。スケールアップ後の大型装置が、小型実験装置で得たプロセスの結果を達成しているかどうかを検証することは重要である。しかし、スケールアップ後の状態を把握することは困難な作業とされ、ましてや内部流動の実測による可視化は特に圧力容器内部では高温高圧であったりするなど、その可視化は難しい。このような場合にはコンピュータシミュレーションによる可視化手法は、どのような流動状態となっているかを概略把握することが出来る手法として有用である。

スケールアップ後の大型装置のシミュレーションは計算格子数が膨大となることから、コンピュータリソースの制限などにより実施するには工夫が必要である。乱流モデルの活用や大きな渦が形成される部分は計算格子を大きくするなど経験的な要素も必要である。

ここでは、槽内径2mの大型装置内のスケールアップ検討を行うために、乱流状態の流動機構を計算により求めることを試みた。乱流モデルにはDES (Detached Eddy Simulation) を採用し、装置内の渦スケールの違いを再現できる手法として近年、工学計算に活用されるようになったモデルである。図－4に槽内の流動状態を示す。本計算では回転数90rpm、流体是水である。混合時間を同一とするために90rpmに設定したが消費される動力は小型装置の90rpm時に比べて10倍

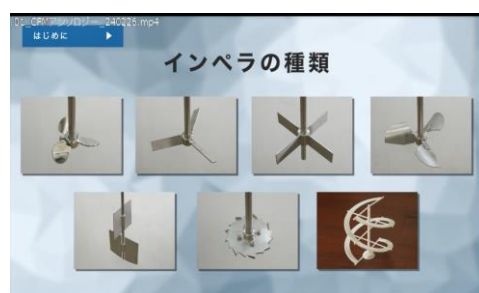
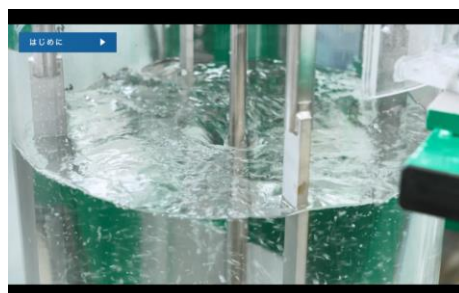
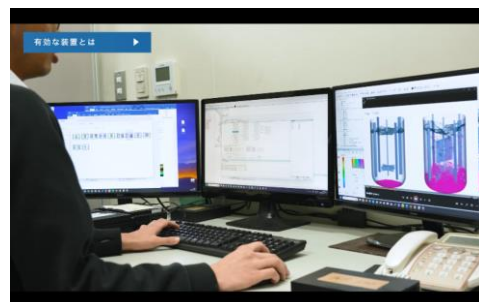
以上となり、液面からのガス巻き込みも激しく、スケールアップ後の流動状態を確認できる有用な手法になりうる事が確認された。

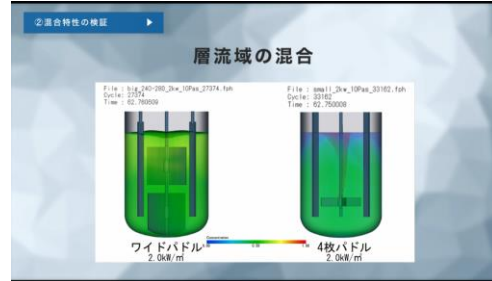


図—4 ワイドパドルのスケールアップ計算（流体：水，槽内径2m, 回転数90rpm）

#### （5） プロモーション動画の制作

本研究では、提案した高効率攪拌装置のコンセプトであるワイドパドル直を普及させることを目的としてプロモーション動画を制作した。攪拌装置をとりまく環境や技術的な背景を示しつつ高効率攪拌装置のコンセプトを提案し、混合、伝熱、固液、気液攪拌の性能評価を整理した。また数値流体力学（CFD）の手法を攪拌技術に取り入れる障壁を低くするために、主に担当した学生のインタビューも交えてCFDの有用性を発信するとともに、取り組みの容易さを示した。以下は動画より切り取った画面の抜粋である。





#### 4 本研究が実社会にどう活かされるか一展望

本研究では、2018年度、2020年度の補助事業で提案した攪拌装置の性能評価を踏まえ、この攪拌装置の諸性能を動画集(PV)として見える化をおこない、攪拌装置に関わる技術者によって活用できる知見となることを期待する。また、本研究では攪拌装置の設計や開発にコンピュータによる移動現象のシミュレーション手法を用いた性能評価の手法も広く啓蒙し、この手法が設計現場で活用されることにより複雑な攪拌流動およびその性能予測が明らかにされ、現状を変更し改善に繋げる検討にも役立つと考えられる。

## 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

代表研究者は攪拌装置メーカーでの開発、設計、商品化などの企業実務に27年間携わった。その後、9年間の教育・研究現場における汎用的な評価手法の実用化に向けて研究活動を展開した。特に後者の期間中、攪拌装置内の現象を可視化できるCFDの手法を活用し、様々な攪拌流動を可視化することを試みた。層流から乱流に至る広い流動領域、熱や物質などのスカラー量の移動を伴う流れの解明、さらに固体や気体を含む混相流動の可視化まで適用範囲を広げてCFD適用の可能性を追究した。産業上の実務においてCFDの活用は希求されているものの、具体的な活用についてはいまだハードルがあることが、講習会等を通じた交流の中で確信することとなった。このような状況のなかで、理論(コンピュータシミュレーション)と実験を活用した可視化の具体的な事例を示すことにより、ユーザーにとって課題解決の契機になることを期して取り組んだ。教育の面でも、本研究を助勢した学生からこの技術の意義を理解することができたとの声も聞くことが出来、学術研究の成果を実務に展開するうえでの技術継承の一端を担うことが出来たと考えている。

## 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

- 1) Kai Ogata, Kazutaka Takata, Development of a high-efficiency mixing equipment with a large projected area, Proceedings of 17<sup>th</sup> European Conference on Mixing, 140-142 (2023)
- 2) 尾方凱, 攪拌翼の回転投影面積を増大させた高効率攪拌装置の開発, 呉工業高等専門学校プロジェクトデザイン専攻特別研究論文 (2024)
- 3) 谷岡波矢斗, 高効率攪拌装置の流動・混合性能評価, 呉工業高等専門学校機械工学科卒業論文 (2024)
- 4) 高田一貴, 攪拌(ミキシング)～攪拌技術の基礎、攪拌機の最適選定・各種性能評価法、スケールアップ法とそのポイント～, 技術情報協会セミナーテキスト (2023)

## 7 補助事業に係る成果物

プロモーションビデオ「CFMアンソロジー ～高性能ミキシング装置の開発と実証～」

公表URL [3月22日 \(kure-nct.ac.jp\)](https://kure-nct.ac.jp)

8 事業内容についての問い合わせ先[川相1]

所属機関名： 呉工業高等専門学校 （クレコウギョウコウトウセンモンガッコウ）

住 所： 〒737-8506

広島県呉市阿賀南2-2-11

担 当 者： 大江 勇人

担 当 部 署： 企画広報係

E - m a i l： [kikaku@kure-nct.ac.jp](mailto:kikaku@kure-nct.ac.jp)

U R L： <https://www.kure-nct.ac.jp/>（呉高専TOPページ）

または

所属機関名： 大和大学 （ヤマトダイガク）

住 所： 〒564-0082

大阪府吹田市片山町2-5-1

担 当 者： 高田 一貴

担 当 部 署： 理工学部機械工学専攻

E - m a i l： [takata.kazutaka@yamato-u.ac.jp](mailto:takata.kazutaka@yamato-u.ac.jp)

U R L： [機械システム工学専攻 | 大和大学 \(yamato-u.ac.jp\)](#)

[ヤマト大学 教員紹介ページ\\_高田一貴](#)