

補助事業番号 2023M-321

補助事業名 2023年度 粒子に覆われ安定化された気泡の掩蔽状態と揚力機構の解明 補助事業

補助事業者名 神戸大学 工学部 機械工学科 混相流工学研究室 林公祐

1 研究の概要

さまざまな工業装置において気泡が活用されています。例えば浮選機は粉碎した鉱石を水に混ぜて気泡を吹き込み、鉱粒を気泡に付着させて分離・回収します。また、製鉄工程では、溶鉱から不純物を除去するために気泡による浮上分離が用いられています。一方で、粒子に覆われた(掩蔽)状態の気泡が潰れにくくなる特性を利用した技術が最近注目されています。疎水性の粒子が気泡表面に付着するのですが、実際に粒子がどのような分布で気泡表面上に付着しているのか、粒子に覆われた(掩蔽)状態の気泡はどのように運動するのかなど、実はよく分かっていません。そこで本事業では、(1)粒子に覆われ気泡が完全な掩蔽状態となったときの粒子の配位、粒子数を、さまざまな気泡サイズ、粒径分布、濡れ性について予測できる式を導きました。(2)また、気泡には抗力や揚力などの流体力が作用し、力のかかり方が機器のなかの気泡分布を決定づけますので、粒子に覆われた気泡に働く流体力を調べるのが重要です。そこで、粒子付着気泡に作用する流体力を調べるための数値シミュレーション技術を開発しました。(3)さらに(1)(2)で得られた計算技術と知見をもとに、気泡に働く流体力を調べるための数値シミュレーションを実施しました。

2 研究の目的と背景

気泡を安定化・強化(壊れにくく)する物質に界面活性剤があり、乳化剤や化粧品など様々な場面に用いられますが、工業用途においても気泡運動に及ぼす影響がよく研究されており、代表研究者もその理解に取り組んできました。一方、粒子が付着した気泡は、鉱物資源浮選回収技術、溶鉱内不純物浮上分離技術などにおいて重要な役割を果たすにも関わらず、粒子付着状態の一般的な予測式や粒子が付着した状態の気泡の運動特性の理論が欠けています。関連機器の効率化や新規応用にはこれらの理解が不可欠です。このような背景のもと、本研究は、(1)粒子付着状態の予測手法を確立すること、(2)気泡運動のシミュレーション技術を開発すること、(3)これら2つの技術を結集して気泡に働く流体力を流体力学的に理解することを目的としています。これらを達成することにより、学問分野としての発展はもちろんのこと、鉱物資源浮選回収技術、溶鉱内不純物浮上分離技術、曝気による湖沼環境浄化技術、界面活性剤・エマルション分離技術など多岐にわたる資源・環境関連技術に携わる技術者にとって有益な知見を提供することを目指しています。

3 研究内容(<https://www.lab.kobe-u.ac.jp/eng-mfd/doc/jka2023m321.pdf>)

(1)粒子付着状態に関する研究

所定の気泡径・粒子径に対して粒子付着状態を求める計算技術を開発しました。本計算技術では、はじめ粒子の付着していない気泡にひとつずつ粒子をランダムに配置します。粒子同士の接触判定を行い、接触している場合は粒子の配位を調整します。再配位により接触のない状態が実現できる最大の粒子数を、気泡が完全に掩蔽された状態の粒子付着数とします。開発技術を用いて、気泡径と粒子径を変更して付着状態を予測する計算を実施しました(図1)。また、本計算結果をもとに、粒子付着数の計算式を開発しました。気泡は流体の物性や周囲の流れの速度、また気泡の大きさによって、球形ではなく楕円の形状をとることも多いため、開発技術は楕円形の気泡にも用いることができるようにしています。さらに、粒子の大きさがさまざま(多分散)である場合についても、本計算技術を拡張しました。

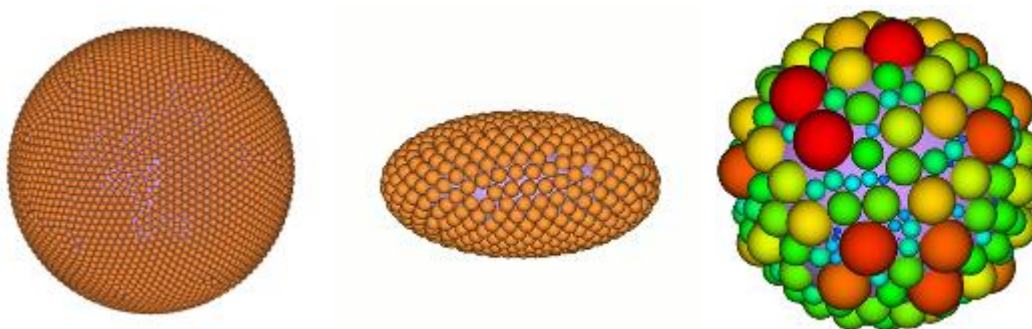


図1 粒子付着状態のシミュレーション結果

粒子付着状態に関する研究でシミュレートした粒子付着状態を埋め込み境界法による気泡計算技術に組み込み、粒子付着気泡周りの流れ場をシミュレートできる計算技術を開発しました。粒子付着気泡周囲の速度と圧力を図2に例示します。

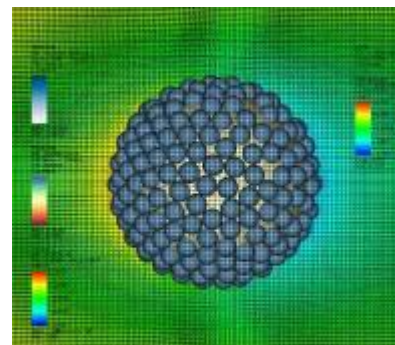


図2 粒子付着気泡のシミュレーション(粒子付着気泡と周囲の速度・圧力場)

(2) 気泡に働く流体力の研究

① 抗力のモデリング

粒子付着気泡の水中上昇速度及び抗力係数を計測する気泡実験を実施しました。粒子付着気泡の運動を高速ビデオカメラにより撮影し、画像処理により、そのサイズと上昇速度を評価し、上昇速度と見かけ密度を用いて抗力係数を得ました。図3に気泡抗力係数を示します。

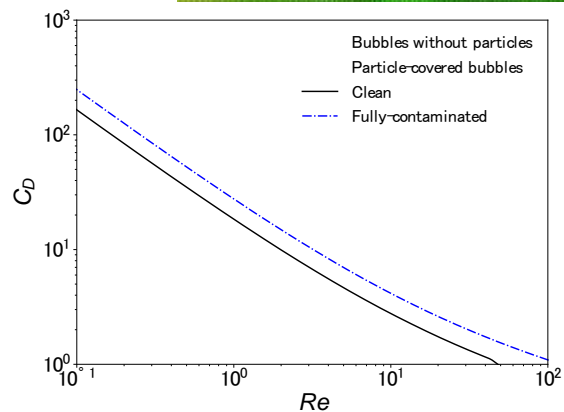


図3 抗力係数

図中の Re_l は気泡レイノルズ数です。比較のため、固体粒子と同じ抗力特性を示す汚染系気泡の速度と抗力係数も示しています。サブミリサイズ気泡は完全掩蔽状態において抗力係数が単純な球形固体粒子よりも大きな抗力を示すことを明らかにしました。

②揚力のモデリング

開発した気泡計算技術により、揚力の数値シミュレーションを実施しました。抗力モデリングにより、粒子付着気泡は固体粒子に近い振る舞いをする事が明らかとなったため、界面活性剤に汚染された液滴を粒子付着気泡のモデルと設定し、汚染系液滴に働く揚力を調べました。図4にシミュレーション用格子設定を例示するとともに、界面活性剤により表面が固体的に振る舞う液滴のシミュレーション結果を示します。本シミュレーションにより、界面汚染度の増加とともに、液滴の揚力係数が低下すること、また界面活性剤が液滴の内部にある場合と外部にある場合ではそれほど揚力係数に差がないことを明らかにしました。汚染度の高い液滴の揚力係数は固体粒子の揚力係数に漸近する傾向にあり、粒子付着気泡も固体粒子と概ね同様にモデル化できると考えられます。

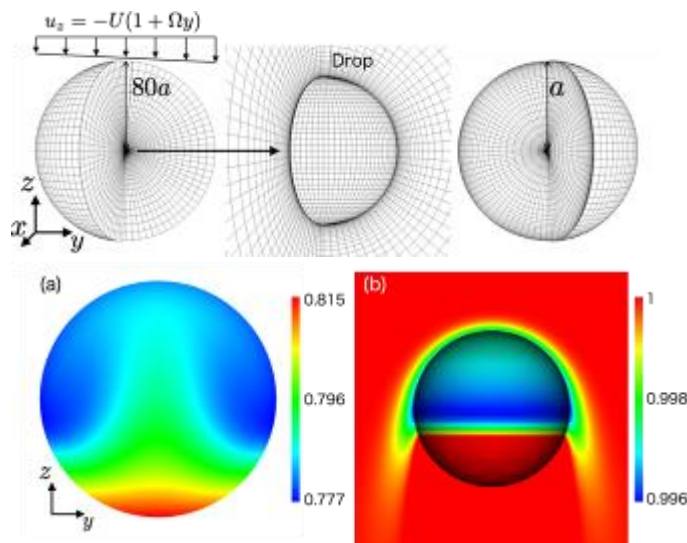


図4 液滴揚力の数値シミュレーション

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究の次のステップは、実条件への展開に向けて、複数の粒子付着気泡の相互作用問題に、ここで得る技術と知見を活かして取り組むことです。また、各要素研究で得られる成果には基本的な重要性があり、関連分野で広く活用できます。(1)粒子付着気泡を用いる技術では完全掩蔽状態を知るために付着状態予測式を用いることができ、(2)粒子により複雑になった気泡表面の数値的な取り扱い一般的な境界条件の適用法として利用でき、(3)流体力に関する知見は粒子付着気泡を実際に応用する上で気泡運動を予測するのに用いることができます。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

代表研究者はこれまでに混相流工学に関する研究に継続的に従事してきました。特に気泡力学に関する実験及び数値シミュレーションによる研究と力学モデルの開発に力を入れています。気泡は工業機器など様々な応用されていますが、その振る舞いは複雑です。さらに、固体粒子が混在する流れにおいては、気泡表面に付着した粒子が気泡運動を変化させます。そのような状況は、溶鋼からの介在物除去や鉱物選鉱のほか、粒子で気体を完全に覆うことによるガス分離や輸送

など、広い応用分野に現れます。今回の研究は、これまでの研究を踏まえて、気泡力学の新しい展開を目指すものです。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

Kosuke HAYASHI, Takumi MORI, Koya CHUJO, Ryota IGARASHI, Ryo KURIMOTO, Akio TOMIYAMA, Surface Coverage of Bubbles with Surfactant or Particles, IUTAM Symposium on Dynamics and Interface Phenomena of Bubbles and Droplets at Multiple Scales, December 3–5, 2023, Tokyo, Japan, 1 page

Kosuke HAYASHI, Koya CHUJO, Ryo KURIMOTO, Akio TOMIYAMA, Drag Coefficients of Particle-Covered Bubbles Produced Using a Microchannel, 12th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flow Tokyo, Japan, 27th–30th November 2023, 4 pages

林公祐, LEGENDRE Dominique, 富山明男, 球形気泡の抗力と表面渦度に及ぼす界面活性剤の影響, 日本混相流学会混相流シンポジウム2023, 札幌, 2 pages

中條光野, 林公祐, 栗本遼, 富山明男, 微細流路を用いた粒子付着気泡の生成と抗力係数の評価に関する研究, 日本混相流学会混相流シンポジウム2023, 札幌, 2 pages

林公祐, 富山明男, 液滴に働く揚力の粘性比依存性に関する数値的研究, 東京, 3 pages
(Under Review) Kosuke HAYASHI, Yuya MOTOKI, Dominique LEGENDRE, Akio TOMIYAMA, Drag and Interfacial Vorticity of Spherical Bubble Contaminated with Soluble Surfactant
(発行予定) 日本混相流学会 学会誌「混相流」2024年12月の口絵写真として掲載予定

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

該当なし

(2) (1) 以外で当事業において作成したもの

該当なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 神戸大学工学学部(コウベダイガクコウガクブ)

住 所: 〒657-8501

兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1

担 当 者 役職名 准教授 林 公祐(ハヤシ コウスケ)

担 当 部 署: 混相流工学研究室(コンソウリュウコウガクケンキュウシツ)

E - m a i l: hayashi@mech.kobe-u.ac.jp

U R L: <https://www.lab.kobe-u.ac.jp/eng-mfd/>