

溶融金属への気泡吹き込みを伴う大規模機械攪拌時の流動と 微細気泡ダイナミクスの解明

山本 卓也

東北大学大学院環境科学研究科

1. はじめに

金属材料プロセスにおける溶融金属内不純物除去処理は品質管理に重要なプロセスとなり、様々な操作により溶融金属の清浄化が行われる。特に溶融アルミニウムや溶鉄の場合、組成調整や不純物除去のために油滴や気泡、粒子を吹き込み、不純物を吸着、反応、浮上分離する¹⁻³。このようなプロセス操作では数トンから数百トンの溶融金属を高速に処理する必要があるが、これらの気泡や粒子挙動を実験的に可視化する手法はほぼない。このため、数値シミュレーションが非常に重要となるが、プロセスが大規模で計算機負荷が莫大であり、詳細なメカニズム解明は難しい。また、溶融金属を用いた気泡吹き込みを伴う機械攪拌時の気泡挙動を研究対象とするが、気液の密度比が2000を超えるため、計算が非常に難しい。さらに、機械攪拌は回転する攪拌翼で流れを発生させるため、回転体を取り扱う必要がある。このように、現象が複雑、且つ取り扱いにくい物性であるゆえに莫大な計算機負荷が必要である。

本研究では、このような大規模金属生産プロセス中での現象解明を目的とし、溶融金属への気泡吹き込みを伴う機械攪拌時の溶融金属の流動と微細気泡の挙動解明を行った。溶融金属中での気泡挙動を対象とするが、比較実験が困難であるため水を用いた実験と数値シミュレーションを比較し、その気泡分裂の根本的なメカニズムを解明した。気液界面挙動までを追跡するため、界面形状を直接追跡するVolume of Fluid法を用いた大規模流体計算を行い、攪拌翼下から導入された気泡が攪拌翼によって生じたせん断力によって破断、微細化される挙動を直接計算し、気泡のダイナミクスを詳細に追った。

2. 実験、数値解析手法

研究対象とする系をFig. 1に示す。水で満たした円筒容器内に攪拌翼を円筒容器中央に配置する。この際、攪拌翼は4枚パドル翼、もしくは、アルミニウム産業で利用されている6枚捻り翼⁴を利用した。液深 h は320 mm、容器高さ H は400 mm、容器内径 D は192 mm、ノズル高さ h_n は268 mm、翼端直径 d は60 mm、翼高さ w は12 mm、翼深さ H_1 は40 mmであるとした。まず、攪拌翼を300 rpm、400 rpmで回転させ流れを完全に発達させた後に単一の気泡を導入し、その分裂挙動をハイスピードカメラで観察した。ここでは、撮影速度は500 fps、シャッター速度は0.001 sとした。数値解析の場合でも同様の形状の計算領域を準備し、15秒間翼を回転させた後に単一の気泡を導入し、その分裂挙動を計算した。

数値解析には以下の支配方程式を利用した。

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_\sigma \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

ここで、 ρ は密度、 \mathbf{u} は速度、 t は時間、 p は圧力、 μ は粘度、 \mathbf{g} は重力加速度、 \mathbf{F}_σ は表面張力項である。これらの方程式を気液混相流として解くために、代数的 Volume of Fluid 法を利用した。以下の体積分率 α に対する移流方程式を解いた。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{u}) + \nabla \cdot ((1 - \alpha) \alpha \mathbf{u}_r) = 0 \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{u}_r は液体、気体間の相対速度である。詳細な数値モデルに関しては既報⁵を参照されたい。

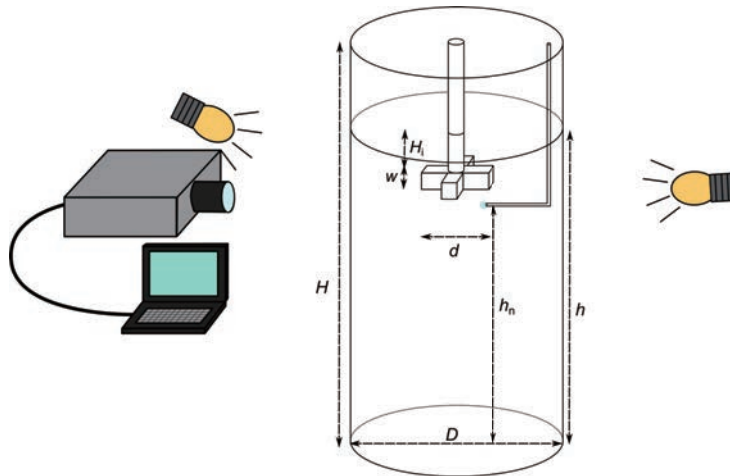


Fig. 1 Schematic representation of experimental setup of single-bubble fragmentation during mechanical stirring⁶.

3. 結果と考察

高速度ビデオカメラによって撮影された気泡の分裂挙動を Fig. 2 に示す。気泡は攪拌翼の裏面へと移動した後、上下の 2 列に並びながら最終的に複数の気泡へと分裂する。この分裂挙動を解明するために、数値解析結果を利用する。Fig. 3 に気泡の分裂挙動を示す。まず、気泡は攪拌翼の後方へと移動し、翼後方で 2 列に並びながら多数の気泡へと分裂する。これらの挙動は実験で見られたものと同様である。気泡が最初に翼後方へと移動する理由は、翼前方では高圧、翼後方では低圧となるため、後方領域に向かって気泡が移動するためである。さらに、分裂挙動を解明するために、Fig. 4 に気泡分裂挙動と翼端渦構造を示す。ここでは、翼端渦は速度勾配ベクトルの第二普遍量の等値面を用いて可視化した。上昇する気泡ははじめに翼後方へと移動するが、後方には強い翼端渦が存在する。気泡はその翼端渦に巻き込まれ、最終的に微細な気泡へと分裂する。翼端渦は翼上側、下側に渦対として存在しているため、2 列に並びながら分裂した。

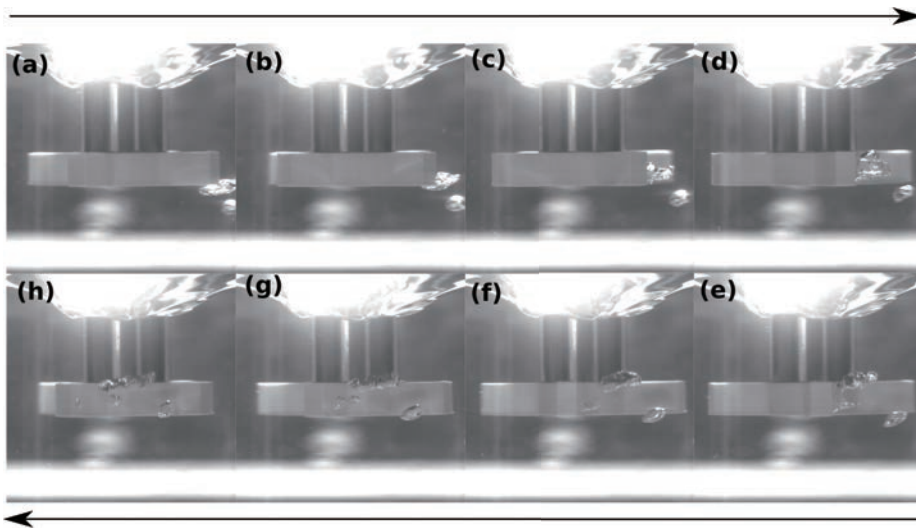


Fig. 2 Snapshots of bubble fragmentation at 300 rpm near the impeller obtained by a high-speed camera⁶.

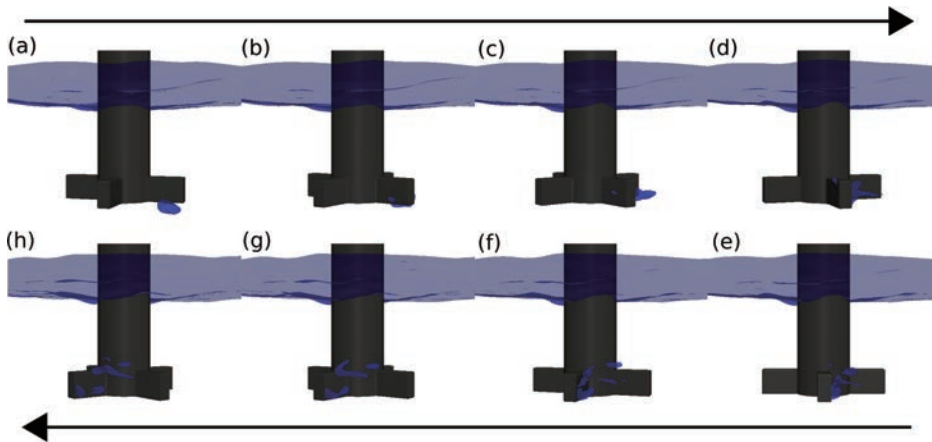


Fig. 3 Snapshots of bubble fragmentation near the impeller obtained by numerical simulation⁶.

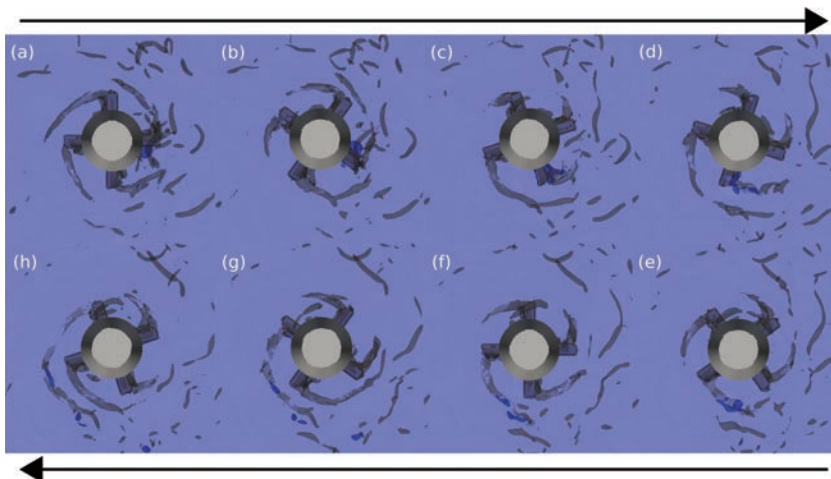


Fig. 4 Snapshots of bubble fragmentation and trailing vortices near the impeller⁶.

アルミニウム産業に利用される翼を用いた際にも同様に翼端渦によって気泡が分裂する。Figures 5,6 にアルミニウム産業で利用される翼を用いた場合の気泡分裂挙動の一部を示す。ここで、緑、黒色のひも状のものは回転方向の違う翼端渦を示す。気泡は翼端渦によって分裂するが、単一翼端渦によって分裂する場合は単一渦による切断、渦の回転流による分断が発生する。また、翼端渦対の場合にはその渦対間での剪断流によって分裂する。今回の計算条件ではほとんどが、Fig. 6 に示したパターンで気泡が分裂した。

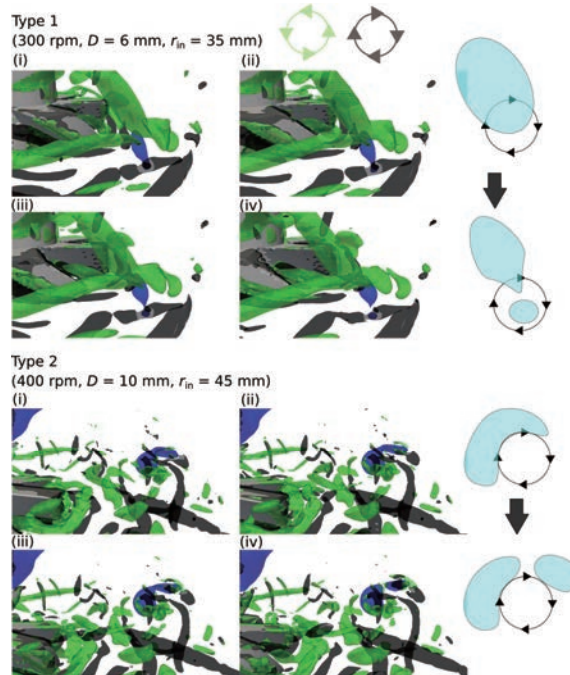


Fig. 5 Snapshots of bubble dynamic behavior fragmented by a trailing vortex⁷.

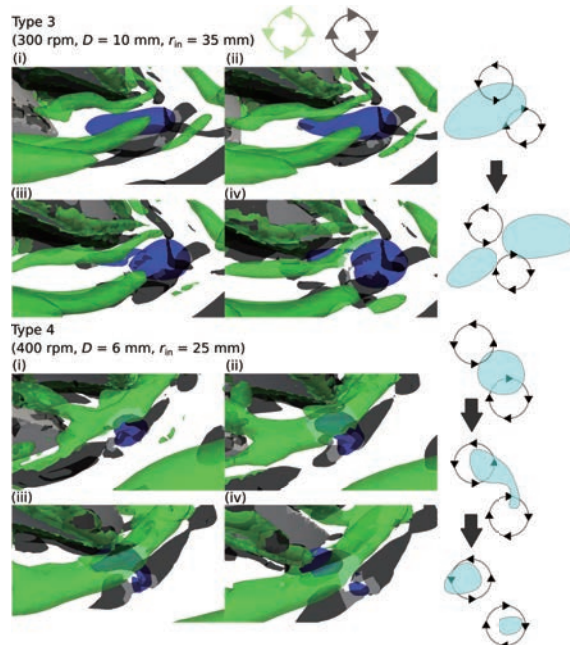


Fig. 6 Snapshots of bubble dynamic behavior fragmented by a trailing vortex pair⁷.

今回の条件では翼端渦の分裂の他にも翼前面の速度境界層での分断、翼との衝突との分断パターンも発生したものの、ほとんどが翼端渦による分裂であった。特に翼の回転数が大きくなり、Reynolds 数が大きい場合には翼端渦以外の分裂はほとんど見られなかった。このため、実際の金属産業プロセスではより Reynolds 数が大きいため、ほとんどの気泡分裂は翼端渦由来になると考えられる。今回の調査では、Reynolds 数がそれほど大きくなかったため、最も大きい渦である翼端渦によってのみ気泡が分裂した。しかしながら、さらに Reynolds 数が大きい条件では翼端渦だけではなく、エネルギーカスケードによって生じたより小さい乱流渦によっても気泡が分断される可能性があり、今後の調査が必要である。

4. 結論

数値解析を利用して機械攪拌中の微細気泡の分裂挙動を解明した。2種類の攪拌翼を利用して気泡分裂挙動を調査したが、どちらの場合においても翼端渦によって気泡が分裂する場合がほとんどであった。分裂パターンは複数確認されたが、ほとんどが翼端渦による剪断が気泡を分裂するという分裂機構であった。

引用文献

1. V. S. Warke, S. Shankar, M. M. Makhlof, Mathematical modeling and computer simulation of molten aluminium cleansing by the rotating impeller degasser Part II. Removal of hydrogen gas and solid particles, *Journal of Materials Processing Technology*, 168 (2005) 119-126.
2. S. T. Johansen, S. Graadahl, T. F. Hagelien, Entrainment of inclusions from the dross in stirred reactors for melt treatment, *Applied Mathematical Modelling*, 28 (2004) 63-77.
3. B. B. Wan, W. P. Chen, M. Mao, Z. Q. Fu, D. Zhu, Numerical simulation of a stirring purifying technology for aluminum melt, *Journal of Materials Processing Technology*, 251 (2018) 330-342.
4. T. Yamamoto, A. Suzuki, S. V. Komarov, Y. Ishiwata, Investigation of impeller design and flow structures in mechanical stirring of molten aluminum, *Journal of Materials Processing Technology*, 261 (2019) 164-172.
5. T. Yamamoto, Y. Fang, S. V. Komarov, Surface vortex formation and free surface deformation in an unbaffled vessel stirred by on-axis and eccentric impellers, *Chemical Engineering Journal*, 367 (2019) 25-36.
6. T. Yamamoto, Y. Fang, S. V. Komarov, Mechanism of small bubble breakup in an unbaffled stirred vessel, *Chemical Engineering Science*, 197 (2019) 26-36.
7. T. Yamamoto, S. V. Komarov, Single-bubble fragmentation in a mechanically stirred liquid bath under trailing vortex conditions, *Chemical Engineering Science*, 207 (2019) 1007-1016.