

学位論文題名

旋回噴流による堆積粒子巻き上がり特性に関する
実験的研究

学位論文内容の要旨

鉄鋼精錬プロセスにおける溶融金属のおもな攪拌法として、ガス吹き込み攪拌、機械式攪拌、電磁攪拌が挙げられる。このうちガス吹き込み攪拌は、他の攪拌操作に比べて溶融金属の汚染が少なく、また設備投資が比較的少ないことから最も多く使用されている。近年ではこの攪拌操作を応用し、熱および物質移動の促進、温度や成分の均一化などを目的とした気泡噴流による円筒容器内の旋回現象が幅広い工学分野で使用されつつある。

円筒容器内の旋回現象は、容器内の所定の深さまで液体を満たし、例えば容器内底部中央に取り付けた単孔ノズルから鉛直上方に気泡を噴出させることにより発生する。その際、浴底部および噴流をとりまく液体は、角運動量保存則によって気泡噴流の回転方向とは逆方向に回転をしつつ、上下方向に移動する。この旋回現象は、浴深 L_N を容器直径 D で除したアスペクト比 (L_N/D) が 0.30 を境に、浅水波型旋回現象 ($L_N/D \approx 0.1 \sim 0.3$) と深水波型旋回現象 ($L_N/D \approx 0.3 \sim 1.0$) に大別される。深水波型旋回現象は浅水波型旋回現象に比べて噴流の半径方向への広がりが大きく、非常に効率的な攪拌が可能である。

筆者の属する研究室では、上記諸特性を有する底吹きノズルによる円筒容器内の旋回現象の代わりに、J字型ランスによる底板の無い円筒容器内の旋回現象に着目し、閉鎖性水域における環境修復技術の開発を検討している。すなわち、旋回気泡噴流の攪拌効果によって水底に堆積した汚染物質および汚泥を浮上させておき、気泡内に微量のオゾンを混入することにより迅速な有機物の分解を目指している。この研究が成功すれば低コスト、省エネルギーで閉鎖性水域の環境浄化が期待できる。

本学位論文は、一連の研究の初期段階として、小型モデルを用いて旋回気泡噴流による堆積粒子巻き上がり特性に関する実験的研究を行った結果について述べている。以下に本学位論文の詳細を示す。

第1章 緒論

閉鎖性水域の現状と課題について述べるとともに、海洋環境修復の基本概念と社会的意義ならびに本学位論文の内容を示した。

第2章 底板のある円筒容器内のJ字型ランスによる旋回気泡噴流の特性

底板のある円筒容器内にJ字型ランスを設置し、ランスの支柱の存在が定常的な旋回現象に及ぼす影響について調査した。測定項目は(1)旋回発生領域、(2)旋回周期、(3)振幅、(4)旋回開始時間、(5)旋回終了時間である。また測定値を既存の底吹き込みで提案された実験式および理論式と比較しつつ、これら諸量の特徴について検討した。

第3章 底板の無い円筒容器内のJ字型ランスによる旋回気泡噴流の特性

従来の円筒容器とは異なる、底板の無い円筒容器を用いることから、底板の有無が旋回現象に及ぼす影響について、上記(1)～(5)の特性を既存の底吹き込みで提案された実験式および理論式と比較しつつ明確にした。

第4章 底板のある円筒容器内の底吹きノズルおよびJ字型ランスによる粒子浮上を伴う旋回現象の特性

底板のある円筒容器内に固体粒子を堆積させ、粒子浮上を伴う定常的な深水波型旋回現象が発生する領域を明らかにし、ガス吹き込み方法ならびにランスの支柱の設置位置が粒子の巻き上がりを伴う旋回現象に及ぼす影響について調査した。

第5章 底板のある円筒容器内のJ字型ランスによる粒子浮上を伴う旋回気泡噴流の粒子攪拌挙動

底板のある円筒容器内に汚泥を模擬した粒子を堆積させ、まず旋回運動の発生領域について調べた。ついで粒子群が浴内に均一に分散して攪拌される条件について、投入した粒子の体積に対する巻き上がった粒子の体積の割合、すなわち巻き上がり体積比を指標として明確にした。その際、旋回気泡噴流による粒子の攪拌挙動はアスペクト比 L_N/D ごとに異なり、 $L_N/D=0.5$ を境に2つのパターンに分類できることを明らかにした。

粒子群が巻き上げられるとき、浴深 L_N/D が0.5よりも小さい条件下では孤立渦が生じ、 L_N/D が0.5よりも大きい条件下では自走する一対の渦が生じた。これらの渦は大気中で発生する竜巻と類似していることを可視化の結果に基づいて述べた。

第6章 底板の無い円筒容器内のJ字型ランスによる粒子浮上を伴う旋回気泡噴流の特性

底板の無い円筒容器とJ字型ランスを組み合わせ、海水の密度と有機物の密度の差に比較的近い沈殿粒子を浮上させることに成功した。

粒子浮上を伴う定常的な深水波型旋回現象が発生する領域、ならびに第2章で述べた(1)～(5)の特性は、底板のある円筒容器のJ字型ランスによる粒子浮上を伴う旋回現象の測定値とほぼ同じであったことから、粒子巻き上がりの体積比も底板の有無に影響なく、ほぼ同じであることを示唆した。また実用化に向けて必要とされる相似則について述べた。

第7章 結論

本章では、第2～5章の成果を要約するとともに、実用化に向けての課題と展望について述べた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 井 口 学

副 査 教 授 荒 井 正 彦

副 査 准教授 大 参 達 也

学 位 論 文 題 名

旋回噴流による堆積粒子巻き上がり特性に関する 実験的研究

気泡噴流による円筒容器内の旋回現象は、円筒容器内の所定の深さまで液体を満たし、例えば容器内底部中央に設置した単孔ノズルから、鉛直上方に気泡を噴出させることによって発生する。この旋回現象はノズル出口から浴表面までの距離 L_N を容器直径 D で除したアスペクト比が $L_N/D \approx 0.3$ を境に次の2つに大別される。

(1) 浅水波型旋回現象

ノズル出口から浴表面までの距離 L_N が容器直径 D の約 0.1～0.3 倍の範囲で発生し、気泡噴流は容器内の中心近傍で旋回することから気泡噴流の半径方向変位が小さく、旋回周期は短い。

(2) 深水波型旋回現象

ノズル出口から浴表面までの距離 L_N が容器直径 D の約 0.3～1.0 倍の範囲で発生し、気泡噴流の半径方向変位は大きく、浴表面の液体は大きな振幅で旋回する。

深水波型旋回現象の場合、容器内の液体は気泡噴流に誘起される上下および周方向の流れによって非常に激しく攪拌されるだけでなく、他の攪拌手法に比べて設備投資が比較的少ないことから、近年では幅広い工学分野で使用されつつある。

筆者の属する研究室では、上記特性を有する円筒容器内旋回気泡噴流の攪拌力に着目し、従来の底板のある円筒容器とは異なる、底板の無い円筒容器内と J 字型ランスを組み合わせ、材料プロセス排水貯水池や閉鎖性水域に堆積した汚染物質および汚泥の浮上法を検討している。また気泡内に微量のオゾンを混入することにより迅速かつ、高効率に有機物の分解が可能であると考えられる。この環境修復技術が成功すれば低コスト、省エネルギーで閉鎖性水域の環境浄化が期待できる。

本学位論文は、一連の研究の初期段階として、小型モデルを用いて円筒容器内旋回気泡噴流による堆積粒子巻き上がり特性に関する実験的研究を行った結果について述べている。

以下に本学位論文の詳細を示す。

第 1 章 緒論

閉鎖性水域の現状と課題について述べるとともに、海洋環境修復の基本概念と社会的意義ならびに本学位論文の内容を示した。

第 2 章 底板のある円筒容器内の J 字型ランスによる旋回気泡噴流の特性

底板のある円筒容器内に J 字型ランスを設置し、ランスの支柱の存在が定常的な旋回現象に及ぼ

す影響について調査した。測定項目は (1) 旋回発生領域、(2) 旋回周期、(3) 振幅、(4) 旋回開始時間、(5) 旋回終了時間である。また測定値を既存の底吹き込みで提案された実験式および理論式と比較しつつ、これら諸量の特徴について検討した。

第3章 底板の無い円筒容器内のJ字型ランスによる旋回気泡噴流の特性

従来の円筒容器とは異なる、底板の無い円筒容器を用いることから、底板の有無が旋回現象に及ぼす影響について、上記 (1)～(5) の特性を既存の底吹き込みで提案された実験式および理論式と比較しつつ明確にした。

第4章 底板のある円筒容器内の底吹きノズルおよびJ字型ランスによる粒子浮上を伴う旋回現象の特性

底板のある円筒容器内に固体粒子を堆積させ、粒子浮上を伴う定常的な深水波型旋回現象が発生する領域を明らかにし、ガス吹き込み方法ならびにランスの支柱の設置位置が粒子の巻き上がりを伴う旋回現象に及ぼす影響について調査した。

第5章 底板のある円筒容器内のJ字型ランスによる粒子浮上を伴う旋回気泡噴流の粒子攪拌挙動

底板のある円筒容器内に海水の密度と有機物の密度の差に比較的近い粒子を堆積させ、まず旋回運動の発生領域について調べた。ついで粒子群が浴内に均一に分散して攪拌される条件について、投入した粒子の体積に対する巻き上がった粒子の体積の割合、すなわち巻き上がり体積比を指標として明確にした。その際、旋回気泡噴流による粒子の攪拌挙動はアスペクト比 L_N/D ごとに異なり、 $L_N/D=0.5$ を境に2つのパターンに分類できることを明らかにした。

粒子群が巻き上げられるとき、浴深 L_N/D が 0.5 よりも小さい条件下では孤立渦が生じ、 L_N/D が 0.5 よりも大きい条件下では自走する一対の渦が生じた。これらの渦は大気中で発生する2種類の竜巻に類似した現象であることを可視化の結果に基づいて述べた。

第6章 底板の無い円筒容器内のJ字型ランスによる粒子浮上を伴う旋回気泡噴流の特性

底板の無い円筒容器とJ字型ランスを組み合わせ、海水の密度と有機物の密度の差に比較的近い堆積粒子を浮上させることに成功した。

粒子浮上を伴う定常的な深水波型旋回現象が発生する領域、ならびに第2章で述べた (1)～(5) の特性は、底板のある円筒容器のJ字型ランスによる粒子浮上を伴う旋回現象の測定値とほぼ同じであったことから、粒子巻き上がりの体積比も底板の有無に影響なく、ほぼ同じであることを示唆した。また実用化に向けて必要とされる相似則について述べた。

第7章 結論

本章では、第2～6章の成果を要約するとともに、実用化に向けての課題と展望について述べた。

これを要するに、著者は、旋回気泡噴流を用いて材料プロセス排水貯水池や閉鎖性水域に堆積した汚染物質および汚泥を処理容器内へ効果的に浮上させる方法を見出し、汚染物質や汚泥の新しい処理方法開発の可能性を明らかにしており、材料科学ならびに環境工学に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。