

学位論文題名

濡れ性の悪い固体壁における気液界面の動的挙動に関する研究

(Study on dynamic behavior of gas-liquid interface on poorly-wetted solid wall)

学位論文内容の要旨

西山ら(統計データからみる地球環境・資源エネルギー論)によると,2007年度に我が国から排出された温室効果ガスの約95パーセントを占める二酸化炭素排出量は全体で13億tとなっており,排出量の内訳を列挙すると,産業部門から42.5パーセント,運輸部門から19.1パーセント,業務その他から18.1パーセント,家庭から13.8パーセントが排出されており,産業部門からの排出量が最も大きい。さらに産業部門での業種別の内訳を見てみると,最も排出量の多いのは,鉄鋼業(32パーセント)で,続いて化学(11パーセント),機械(7パーセント),窯業土石(6.5パーセント)となっている。この数字から分かるように,鉄鋼業は日本全体の二酸化炭素排出量の13.6パーセントも占めている。鉄鋼業の中でも,上工程に位置する製鉄,製鋼プロセス分野による二酸化炭素排出量が大きく,逼迫した地球環境を顧みると,上工程における二酸化炭素排出量の削減は喫緊の課題となっている。

二酸化炭素排出量の削減には,プロセスの高効率化が必要不可欠である。そのためには,反応容器内の化学反応および流動などの正確な把握が必須となるが,溶鉄,溶鋼は非常に高温であり,実際の反応容器内を直接観察することは困難である。そこで,水を用いた水モデル実験に基づく研究が世界的に活発に行われてきた。製鋼分野を対象とした水モデル実験では,反応容器内の溶鋼や吹き込まれたガスの流動特性ならびに均一混合時間などについて様々な有用な知見が得られている。しかしながら,それらは主として,反応容器内部の流れ場を対象としており,容器壁近傍を対象とした研究は限られている。容器壁近傍を対象とする場合には,溶鋼と耐火物の濡れ性は悪いことから,溶器壁の濡れ性を考慮しなければならない。そこで,本研究では今まであまり考慮されてこなかった製鋼プロセスに関わる濡れ性に着目し,濡れ性が影響すると予想できる箇所,例えば,気泡が耐火物近傍を上昇するRH脱ガス装置,スピッチングによって生じた溶鋼滴が耐火物に衝突する転炉,さらには脱硫剤が溶鋼に侵入する溶鉄予備処理装置などに焦点をあて,可視化実験および数値計算によって固体壁近傍における気液界面の動的挙動について検討した。

本論文の構成を以下に示す。

第一章では,我が国の鉄鋼業における二酸化炭素排出量と今後の対策,それに関わるプロセスの高効率化を目的とした既存の水モデル実験と濡れ性について記述し,本研究の意義と内容について述べた。

第二章は,鉛直に設置した濡れ性の悪い平板に沿って上昇する気泡群の動的挙動について,可視化実験によって検討したものである。気泡の上昇速度,気泡の長軸長さ,短軸長さ,気泡噴流の広がり,厚みを測定し,平板の濡れ性の違いによる比較をするとともに,ノズルからの高さによってこれら気泡の動的挙動がどのように変化するかについて調査した。気泡が上昇するにつれて,濡れ性の影響は小さくなることが分かった。

第三章は,濡れ性の悪い固体壁に衝突する単一気泡の動的挙動について可視化実験によって検討したものである。すなわち,気泡体積と平板(固体壁)の傾斜角が気泡の上昇速度および水平方向へ

の気泡長さに与える影響について調査した。気泡体積が小さい場合には、濡れ性が気泡の動的挙動に及ぼす影響は大きいですが、平板の傾斜角の影響は小さかった。気泡体積が大きい場合には、平板の傾斜角が大きくなるにつれて濡れ性の影響は小さくなることが分かった。

第四章では、傾斜した濡れ性の悪い固体壁に沿って降下する液滴の動的挙動について実験的に検討した。液滴には、イオン交換水、水銀、炭酸カルシウム含有液を用いた。濡れ性の悪い固体壁に沿って降下する粘度の小さい液滴には壁面の摩擦の影響は少なく、その加速度は重力加速度の傾斜平板成分とほぼ等しいことが分かった。液滴の粘度が大きくなると、粘性によるエネルギー散逸により、降下加速度は小さくなった。液滴の降下加速度と固体球の降下加速度との比として定義される降下加速度比を導入し、降下加速度比に対する実験式をモルトン数の関数として導出した。

第五章では、濡れ性の悪い固体壁に衝突する液滴の動的挙動について可視化実験および数値計算によって検討した。液滴にはイオン交換水、水銀を用いた。平板の傾斜角は0度、15度である。濡れ性の悪い固体壁に液滴が衝突するとバウンドする様子が観察された。この現象は数値計算でも確認された。液滴の扁平率と反発係数に関する実験式を提案した。

第六章では、水面に衝突する濡れ性の悪い固体球の動的挙動について実験的に検討した。水よりも密度の大きい球だけでなく、密度の小さい球も用いた。単一球、水平方向に設置した複数の球、鉛直方向に設置した複数の球で実験を行い、最大気柱深さ、気柱破断時間、最大到達距離などを測定し、実験式を提案した。

第七章は、撥水平板上にある薄い水膜の上に水滴を滴下したとき水膜が破れて後退していく挙動を、高速度カメラを用いた可視化実験によって検討した。水面に水滴が衝突したことを契機として、水膜が後退していく過程は、三つの段階を経ることが分かった。後退していく水膜の速度に対する実験式を水膜厚さの関数として導出した。

第八章では、第二章から第七章までの成果を要約するとともに、実用化に向けての課題と今後の展望について述べた。

学位論文審査の要旨

主 査	特任教授	井 口	学
副 査	教 授	岩 井	一 彦
副 査	准教授	大 参	達 也

学位論文題名

濡れ性の悪い固体壁における気液界面の動的挙動に関する研究

(Study on dynamic behavior of gas-liquid interface on poorly-wetted solid wall)

2007年度に我が国から排出された温室効果ガスの約95パーセントを占める二酸化炭素排出量は全体で13億tとなっており、そのうち鉄鋼業は13.6パーセントも占めている。鉄鋼業の中でも、製鉄・製鋼プロセス分野による二酸化炭素排出量が大きく、逼迫した地球環境を顧みると、この分野における二酸化炭素排出量の削減は喫緊の課題となっている。

二酸化炭素排出量の削減には、プロセスの高効率化が必要不可欠である。そのためには、反応容器内の化学反応および流動などの正確な把握が必須となるが、溶銑、溶鋼は非常に高温であり、実際の反応容器内を直接観察することは困難である。そこで、水を用いた水モデル実験に基づく研究が行われてきた。製鋼分野を対象とした水モデル実験では、反応容器内の溶鋼や吹き込まれたガスの流動特性ならびに均一混合時間などについて様々な有用な知見が得られている。しかしながら、それらは主として、反応容器内部の流れ場を対象としており、容器壁近傍を対象とした研究は限られている。容器壁近傍を対象とする場合には、溶鋼と耐火物の濡れ性は悪いことから、容器壁の濡れ性を考慮しなければならない。そこで、本研究では今まであまり考慮されてこなかった製鋼プロセスに関わる濡れ性に着目し、可視化実験および数値計算によって固体壁近傍における気液界面の動的挙動について検討した。

本学位論文は次の8つの章から構成されている。

第一章では、我が国の鉄鋼業における二酸化炭素排出量と今後の対策、それに関わるプロセスの高効率化を目的とした既存の水モデル実験と濡れ性について記述し、本研究の意義と内容について述べた。

第二章は、鉛直に設置した濡れ性の悪い平板に沿って上昇する気泡群の動的挙動について検討したものである。気泡の上昇速度、長軸長さ、短軸長さ、気泡噴流の広がり、厚みを測定し、平板の濡れ性の違いによる比較をするとともに、ノズルからの高さとともに気泡の動的挙動がどのようにに変化するのかについて調査した。気泡が上昇するにつれて、濡れ性の影響は小さくなることが分かった。

第三章は、濡れ性の悪い固体壁に衝突する単一気泡の動的挙動について検討したものである。すなわち、気泡体積と平板(固体壁)の傾斜角が気泡の上昇速度および水平方向への気泡長さに与える影響について調査した。気泡体積が小さい場合には、濡れ性が気泡の動的挙動に及ぼす影響は大きい。平板の傾斜角の影響は小さかった。気泡体積が大きい場合には、傾斜角が大きくなるにつれて濡れ性の影響は小さくなることが分かった。

第四章では、傾斜した濡れ性の悪い固体壁に沿って降下する液滴の動的挙動について検討した。濡

濡れ性の悪い固体壁に沿って降下する粘度の小さい液滴には壁面の摩擦の影響は少なく、その加速度は重力加速度の傾斜平板方向成分とほぼ等しいことが分かった。液滴の粘度が大きくなると、粘性によるエネルギー散逸により、降下加速度は小さくなった。液滴の降下加速度と固体球の降下加速度との比として定義される降下加速度比を導入し、降下加速度比に対する実験式をモルトン数の関数として導出した。

第五章では、濡れ性の悪い固体壁に衝突する液滴の動的挙動について可視化実験および数値計算によって検討した。濡れ性の悪い固体壁に液滴が衝突するとバウンドする様子が観察された。この現象は数値計算でも確認された。液滴の扁平率と反発係数に関する実験式を提案した。

第六章では、水面に衝突する濡れ性の悪い固体球の動的挙動について実験的に検討した。水よりも密度の大きい球だけでなく、密度の小さい球も用いた。単一球、水平方向に設置した複数の球、鉛直方向に設置した複数の球で実験を行い、最大気柱深さ、気柱破断時間、最大到達距離などを測定し、実験式を提案した。

第七章は、撥水平板上にある薄い水膜の上に水滴を滴下したとき水膜が破れて後退していく挙動を、高速度カメラを用いて検討した。水面に水滴が衝突したことを契機として、水膜が後退していく過程は、三つの段階を経ることが分かった。後退していく水膜の速度に対する実験式を水膜厚さの関数として導出した。

第八章では、第二章から第七章までの成果を要約するとともに、実用化に向けての課題と今後の展望について述べた。

これを要するに、著者は、鉄鋼プロセス反応容器内の流動現象の中でも、従来あまり研究されていなかった反応容器内の固体—液体—気体からなる界面近傍の流動現象に着目し、特に固体表面と溶銑や溶鋼との濡れ性が流動現象及ぼす影響についてモデル実験と数値計算を行い多くの有用な知見を得た。これらの知見は既存の鉄鋼プロセスの効率改善や新しいプロセスの開発はもとよりのこと、材料工学の発展に寄与すること大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。