

氏 名	澤 田 郁 夫
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 5 年 2 月 10 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 55 年 3 月 東京大学大学院工学系研究科化学工学 専攻修士課程修了
学 位 論 文 題 目	数値流体力学による製鋼工程における流動現象の解析
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 菊池 淳 東北大学教授 新山 英輔 東北大学教授 大宮司久明

論 文 内 容 要 旨

溶銑予備処理，転炉，二次精練，連続铸造等の製鋼プロセスの技術革新が行われてきた過程において，溶鋼や吹き込みガス等による流動・攪拌や溶鋼温度，溶質濃度等の移動現象に関する諸因子の制御がプロセスの効率化や铸片品質向上に大きな役割を果たしてきた。一方，近年の計算機ハードの飛躍的な進歩に伴い数値流体力学が製鋼工程での流動現象解析に不可欠なツールになりつつある。

本論文は数種類の製鋼工程の流動解析に数値流体力学を適用し，その有用性を確認するとともに実機で起こる諸現象について考察したもので，8章で構成される。その内容は，1) 連続铸造プロセスにおける溶鋼流動・介在物挙動解析，2) チャンネル型加熱炉における電磁流体解析，3) ガス攪拌鍋における気液二相流・粉体精練解析，からなる。

第1章では，本研究を実施した背景について論じ，近年の製鋼工程の技術開発の経緯，数値流体力学の現状，本研究の位置付けおよび目的について明確にした。

第2章では，製鋼工程での流動解析を行うのに先駆けて，各種レイノルズ数 (Re) 流れの差分解析手法における精度や乱流モデルの適用性に関する検討を行い，1) 安定で反復回数の少ない自主開発アルゴリズム NSMAC と三次精度上流差分法 (河村スキーム) の組み合わせにより Re 数が数百～数千の不安定振動流の解析が可能であること，2) ラージエディシミュレーション (LES) とフラクショナルステップ法 (Fractional Step) の組み合わせにより高 Re 数の乱流解析が適用可能であることを示した。

第3章では，LES を用いた連続铸造機内流動解析シミュレーターを作成し，それによる計算と

モデル実験値を比較検討した結果について示した。連铸機を模擬する1/1サイズ水モデル, 1/2サイズ水銀モデル実験での流速実験結果との対比により, 1) Fig. 1 に示すように時間平均流速値の計算値はモデル実験結果と良く一致し, 2) Fig. 2 に示すように乱流の時間変動の構造も計算結果は大略実験結果を記述できることを示した。

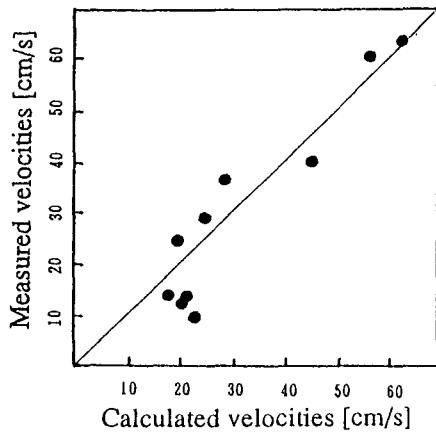


Fig.1 Comparison of time-averaged velocity between calculation and observation

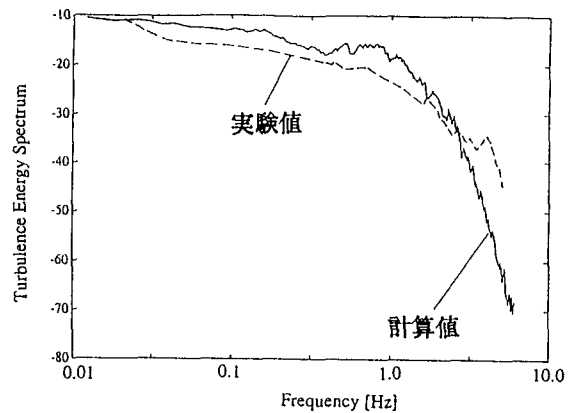


Fig.2 Comparison of turbulence energy spectrum between calculation and observation

第4章では, 第3章に引続き実機形状に対応できる曲線座標系での差分法とLESを用いて, 垂直曲げ型および湾曲型の実機連铸機内での溶鋼流動, 介在物浮上挙動, 電磁力(電磁攪拌, 電磁ブレーキ)印加の効果, 等について計算を行った結果について示した。流動計算結果の一例をFig. 3に示す。メニスカス近傍流速に関しては妥当な結果が得られたこと, 下降流の浸透深さに関して

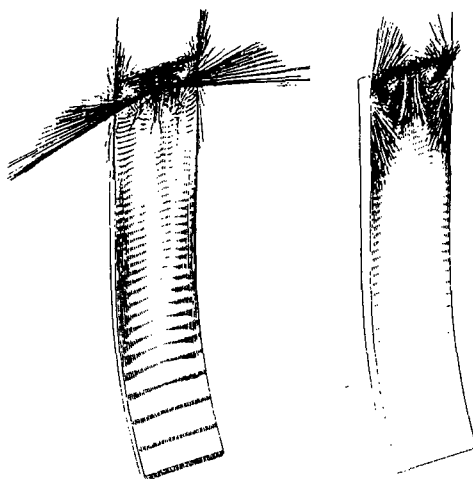


Fig.3 Calculated fluid velocity in a vertical bending caster

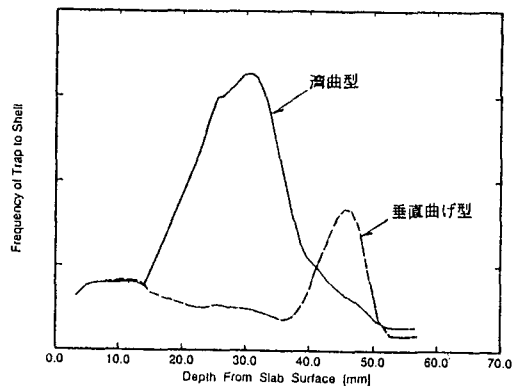


Fig.4 Calculated inclusion distribution in a slab

は機の湾曲形状の影響を受け垂直曲げ型の方が湾曲型よりも大きいことが示された。鋳片に捕捉される介在物の集積挙動の計算結果をFig. 4に示す。溶鋼中介在物の凝固シェルへの捕捉現象は浮力と乱流拡散による移動により説明される。湾曲型ではL面側で強い集積ピークがみられること、垂直曲げ型では集積ピークが小さくなり表面から深い位置にずれること等、実鋳片での観察結果と同様の結果が得られた。

また、メニスカス近傍に電磁攪拌を印加した場合には浸せきノズル-長辺側凝固シェル間に特徴的な強い流動を生ずること、浸せきノズル下部に水平均一磁界による電磁ブレーキを作用した場合には短辺近傍を除き均一な下降流を生ずること等を示した。

第5章では、チャンネル型加熱炉内の電磁場、流動場の数値計算手法を確立し、計算結果とVivesらの実験結果とを比較検討した結果について示した。コイル、フェライトコア、熔融金属が三次元的に配置される系における電磁場計算結果はVivesらの実測値と良く一致すること、熔融金属流動はVivesらの実測値と大略一致することが確認された。また、熔融金属流動の計算結果をFig. 5に示すがチャンネルコーナー部で耐火物溶損に不利となる激しい外向き流が形成されており、この流れの生成機構についても述べた。

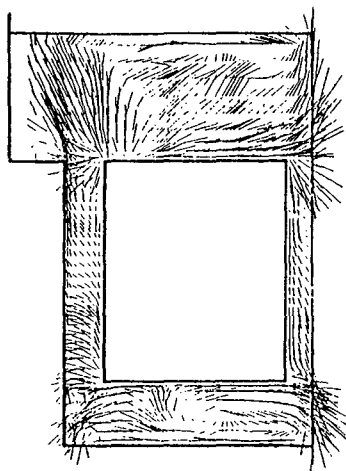


Fig.5 Calculated fluid velocity in a channel furnace

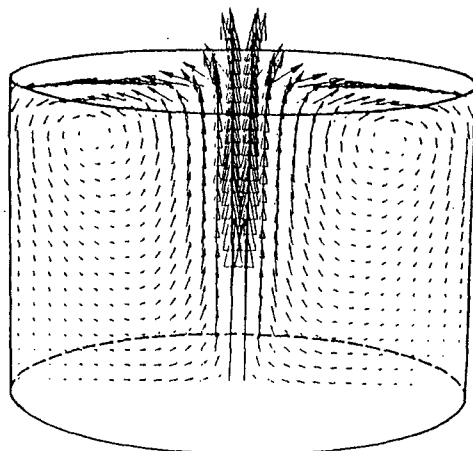


Fig.6 Calculated fluid velocity in a water model equipment

第6章では、底吹きガス攪拌鍋内気液二相流の数値解析結果について示した。k-εモデルと気液両相の収支を取るモデルに基づく計算結果とレーザドップラー流速計による水モデル内流速の実測結果を対比することにより、時間平均流速の計算値が実験値と良く一致することを確認した。水モデル内流速計算結果の一例をFig. 6に示す。また、数値計算により実機の底吹きガス攪拌鍋内気液上昇領域の平均液流速を与える式を得た。

第7章では、第6章で得られた溶鋼流動の知見のもとに多元系の物質移動、熱力学平衡を解析する総合精錬モデルMACSIMを構築し、実機粉体インジェクション鍋内の精錬反応挙動を解析した

結果について示した。Fig.

7にMACSIMの概念図を示す。MACSIMでは、吹き込まれたフラックス粒子の浮上中の反応領域（トランジトリー反応）およびトップスラグの反応領域（パーマメント反応）の各々においてメタル、スラグ側境界膜内物質移動とスラグ-メタル界面での熱力学平衡を経時的に計算している。Fig. 8には、100ton溶銑鍋で脱

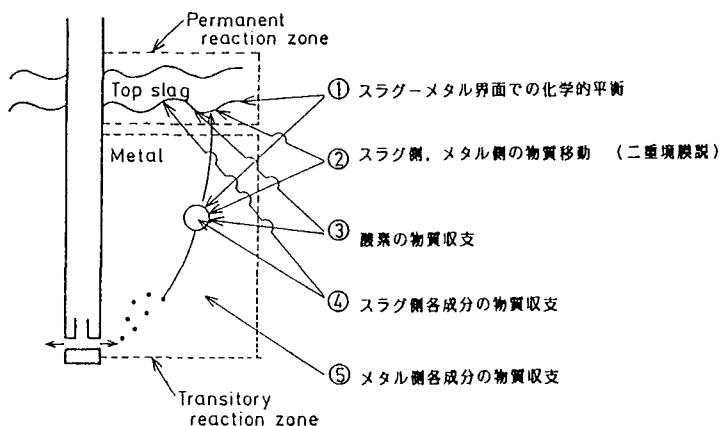


Fig.7 Schematic illustration of MACSIM

後S, P, Mn組成の計算結果と実験結果の対比を示すが、両者は良く一致している。その他、脱Si処理操作においても計算結果と実験結果が良く一致することを確認した。また、各種操作において浮上中フラックス粒子による反応寄与分が大きく、粒子の浴内滞留時間の適切な制御が重要であることを示した。

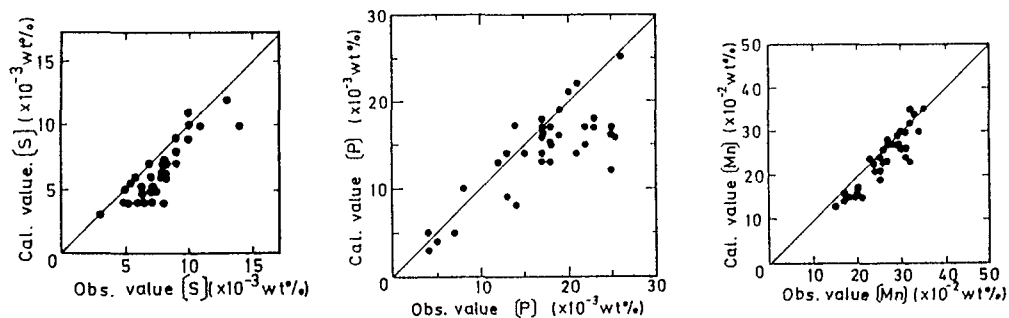


Fig.8 Comparison of S, P and Mn contents between calculation and observation

第8章は結論であり、本研究の成果を総括した。

審査結果の要旨

鋼の連続铸造工程等の製鋼工程内における流動現象に関する研究は工程の設計指針および操業指針を得るうえで重要な課題となっている。本論文は数種の製鋼工程内の流動解析に数値流体力学を適用した結果をまとめたもので全編8章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景や目的を述べている。

第2章では数値計算法および乱流モデルの適用性について検討した結果を示している。レイノルズ(Re)数が数百~数千の場合の不安定振動流の解析には三次精度の上流差分法が有効であること、またRe数が数千以上の場合の非定常流の解析にはラージ・エディ・シミュレーション(LES)が有効であることを示している。

第3章では垂直型連続铸造機内の流動現象を直角座標系を用いLESにより解析した結果およびモデル実験により流速を測定した結果について示している。時間平均流速および乱流エネルギー Spektrumに関する計算結果は実験結果と良く一致することを示している。

第4章では垂直曲げ型および湾曲型の連続铸造機内の溶鋼流動、介在物浮上挙動等について曲線座標系を用いLESにより解析した結果を示している。垂直部を設けることにより、下降流が深くなること、介在物の鑄片への移行量が低減すること、またメニスカス部に電磁攪拌を作用することで鑄型上部の凝固シュル長辺近傍の流動が強くなること等を示している。

第5章ではチャンネル型加熱炉による流体の誘導加熱工程内の流動現象をLESにより解析した結果について示している。工程内の磁場および誘導電流の三次元分布および流体の渦構造に関する計算値は実験値と良く一致することを示している。

第6章ではガス攪拌型取鍋精錬工程内の定常流動現象を上流差分法、 $k-\epsilon$ および二相流モデルを用いて解析し、時間平均流速および乱流エネルギー分布を求めている。また、計算結果とモデル実験結果とを対比することにより気一液上昇領域における液の上昇速度に関する半理論式を得ている。

第7章ではフラックス・インジェクションを伴う精錬炉内の反応挙動を記述するために、乱流場におけるガス・メタル・スラグ各異相間の精錬不均一反応を伴う多成分系物質移動に関する総合モデルを構築し、そのモデルの妥当性を示している。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、数種の製鋼工程内における流動現象の解析に数値流体力学を適用し、その有用性を確認したもので、金属工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。