

今振り返ってみて、行間にこめた思い、エピソード

初期凝固シェルへの気泡・介在物捕捉シミュレーション (メカニズムの理解と工業的利用を目指して)^{*}

Numerical Simulation on Inclusion and Bubble Entrapment in Solidified Shell for Understanding Mechanism and Industrial Application

> 三木祐司 Yuji Miki

JFEスチール(株) スチール研究所 主席研究員 (理事)

し はじめに

鉄と鋼の論文「モデル実験およびDC磁場をもつ実機連鋳 における初期凝固シェルへの気泡・介在物捕捉シミュレー ション」で、2021年度に卓越論文賞をいただきました。同時 に、論文執筆に至る経緯等を紹介するお話をいただき、この ような栄誉ある賞をいただいたことへの感謝の気持ちから、 執筆させていただくことといたしました。私にとって、2010 年当時は、研究員から管理職になる直前でもあり、今読み返 してみると、書きたいことを満載し過ぎているようにも思い ました。しかしながら、連続鋳造スラブの表面欠陥について、 メカニズムの理解と工業的利用を目指して、初期凝固シェル への気泡・介在物捕捉シミュレーションモデルの構築に成功 し、和文にも関らず、海外でも数多く引用していただきまし た。本分野の関心が高かったことが窺えます。

私の論文

以下、本論文のエッセンスを記載し、最後に、改めて本論文 を読み直してみて、今思うことを述べさせていただきます。

2 本研究の背景

鋳造時の初期凝固シェルに捕捉された介在物や気泡は、最 終製品に残留して、表面欠陥や内部欠陥の起因となることが ある¹⁾。このため、連続鋳造鋳型内の溶鋼流動の制御によっ て、溶鋼流動を最適化すべく電磁流動制御技術が開発されて きた。たとえば、電磁ブレーキによって、鋳型内の流速や乱 流を低減し、介在物や気泡の浮上分離を促進する、あるいは、 電磁攪拌によって、凝固界面の流速を増加させて、凝固界面 の粒子を洗い流すこと(いわゆる洗浄効果)で、介在物や気 泡の捕捉を抑制する技術が開発されてきた。

一方、介在物や気泡が凝固界面に捕捉される機構について は、向井ら²⁰、あるいは、Zezeら³⁰は、粒子の周りの界面張力 勾配による引力を提案して、その溶鋼成分の影響を検討して いる。Stefanescuら⁴⁰や安田ら⁵⁰は、凝固速度や熱的な凝固 界面の形状の影響を指摘している。凝固界面の溶鋼流動によ る介在物捕捉抑制、いわゆる洗浄効果についても、これまで、 水/氷系、あるいは、銅系のモデル実験がなされ、流速の増 加とともに粒子の捕捉が抑制されることが知られている。山 田ら⁶⁰、岡澤ら⁷⁰、あるいは三木ら⁸⁰は、モデル実験や鋳片の 介在物調査によって、凝固界面流速の増加と共に捕捉される 介在物が減少することを定量的に示した。藤ら⁹⁰は、電磁攪 拌下での界面の速度境界層の流速を数値解析によって推定し ている。また、Esakaら¹⁰⁰は、溶鋼モデル実験によって凝固 シェルへの気泡の捕捉現象の観察をおこなっている。

しかしながら、いわゆる洗浄効果の素機構はいまだ明らか とは言えず、さらに、図1に示すように、実際の連続鋳造機の 鋳型内溶鋼流動は複雑であるから、上記のような理論的アプ ローチやモデル実験から、鋳型内の初期シェルへの気泡・介 在物捕捉挙動を定量的に予測できていない。特に、工業的に は、操業と欠陥発生の関連が重要であるが、未だ、定性的な 議論しかなされていない場合が多く、連続鋳造の鋳片の欠陥

* [今回の対象論文]

三木祐司,大野浩之,岸本康夫,田中進也:「モデル実験およびDC磁場をもつ実機連鋳機における初期凝固シェルへの 気泡・介在物捕捉シミュレーション」,鉄と鋼, Vol. 97 (2011), No.8, pp.423-432 (第3回卓越論文賞受賞) を予測する数値解析モデルを構築することは困難であった。

そこで、本研究では、凝固シェルへの介在物・気泡の捕捉 に関するモデル実験を実施し、そのメカニズムを議論すると ともに、得られた結果を基に、連続鋳造機スラブの気泡・介 在物欠陥発生を予測するモデルを構築することで、連続鋳造 機における欠陥発生機構を検討した。

(3) モデル実験

溶鋼を用いた実験によって、流速と介在物捕捉の関係を把握 するためのモデル実験を行った。以下、浸漬回転実験と称す。

50kg真空溶解炉を使用し、極低炭素鋼を溶製した。実験 前の介在物を極力一定とするため、Al脱酸後に10分間溶鋼 を等温保持し、脱酸生成物のアルミナが浮上する時間を設 けた。そして、各浸漬実験前に、実験前の介在物量を一定と するため、再度100ppm分の酸素に相当する酸化鉄とAlを 添加した。凝固速度を揃えるため、浸漬実験前の溶鋼温度を 1595℃~1600℃に調整後、真空チャンバー上部からロッドを 回転させながら浸漬し、ロッドと溶鋼の間に相対的な流速を 与えた。同一溶鋼でロッドごとに、0から115rpmと回転数を 変化させ、浸漬・回転後、30秒後にロッドを引き上げた。

浸漬後のロッドに生成した凝固シェルの上端から50mm~ 75mmの断面を光学顕微鏡で観察し、アルミナクラスターの 面積を測定した。観察された全てのアルミナクラスターの面 積を総和し、測定した面積で割ることで、単位測定面積あた りの介在物面積を求め、また、回転前の溶鋼サンプル中のア ルミナクラスター面積で規格化することにより、初期の介在 物量の影響を排除し、シェルへの捕捉割合を直接評価した。

図2に流速と初期の溶鋼中の介在物量で規格化した介在物 面積比および代表的な介在物形態を示す。回転数が20rpm以 上では介在物面積比が1より小さく、もとの溶鋼の介在物面 積率よりも小さくなっている。回転数が40rpm以上になると 介在物面積比が大きく低減するが、一方で、回転しない場合 には、もとの溶鋼の介在物面積比よりも5倍程度大きくなっ



図1 鋳型内溶鋼流動と表面欠陥 (Online version in color.)



図2 溶鋼流速と捕捉された介在物量の関係

ていることから、介在物捕捉を促進する(介在物が凝固界面 に吸引される)駆動力が存在することが明らかとなった。観 察された介在物で面積率を決定しているのは、図2に示すよ うな、概ね数100 µm径のアルミナクラスターであった。

4 介在物捕捉のメカニズム

図3に、Thomas¹¹⁾らが整理した凝固界面の粒子に働く力 のうち、今回の回転凝固実験のシミュレーションで考慮した ものを整理した。ここで、反応、摩擦力に関する力について は十分な知見が得られていないので、介在物・気泡と凝固 界面の溶鋼の相対速度がデンドライトの成長速度以下であ れば介在物・気泡が界面に十分に滞留しているとして、介在 物・気泡は界面に捕捉されるとした。図4に計算結果の例を 示す。仮定①:均一分散して吸引力のみを考慮した場合、仮 定②: 仮定①に加えて、Saffman力と流体による抗力、浮力、 さらには、回転流れによる求心力(遠心力の反作用)を考慮、 仮定③: 仮定②に加えて、気泡が界面に十分に滞留すること を捕捉条件とした場合である。

仮定③まで考慮すると、計算による介在物捕捉率は、回転し ない場合にはもとの溶鋼の6倍程度が捕捉され、回転すると急 速に捕捉される介在物が減少し、図2の実測値と概ね一致する。 ここで、凝固界面での滞在時間を考慮しない仮定②では、回転 流による粒子の求心力によって回転数の増加とともに捕捉され やすくなるが、実現象ではこのような現象は観察されない。

すなわち、介在物・気泡捕捉には一定時間界面に滞留する ことが必要と推察され、表面張力勾配に起因する力と、介在 物に働く抗力、浮力、Saffman力、さらには介在物の滞在時 間の影響を考慮することで、実験における介在物捕捉現象を 説明することができた。



図4 捕捉された介在物量(モデル実験条件での計算値、介在物径 100 µm, t = 30 s)



図3 (a) 固液界面にある粒子に働く力、(b) 回転の有無における捕捉された介在物の分布の差異 (計算値、fs 0.2の位置) (Online version in color.)

捕捉の駆動力でいうと、凝固界面流速増加に伴う捕捉介在 物低減は、界面流速に依存する濃度境界層厚の変化に起因す るところが大きいと考えられる。いったん濃度境界層に入っ た気泡・介在物はSaffman力より数オーダー大きい吸引力 によって凝固界面に引き寄せられると考えられ、流速の増 加に伴う濃度境界層厚みの減少が、流速増加に伴う気泡・介 在物の捕捉抑制の起因と推定され、従来から言われていた Saffman力の影響は小さいと思われる。

(5) 従来研究との比較

図5に、モデル実験における界面流速と捕捉された最大の 介在物粒径の関係を、山田ら⁶⁰の結果とあわせて示す。ここ で界面流速は後述の数値シミュレーションより求めたfs~ 0.8の位置での流速とした。今回の数値シミュレーションに よる実験結果の整理は、高界面流速の領域では従来データと 傾向が一致している。山田ら⁶⁰は、流速を鋳造後のデンドラ イト傾角などによって特定しており、その測定精度上、低流 速領域の流速決定が困難であると考えられる。今回の検討で は数値シミュレーションにもとづき精度良く低流速の領域を 求めた結果、捕捉する介在物の最大径が従来の報告よりも低 流速領域で急速に減少することが明らかとなった。0.05m/s というような低流速でも捕捉最大径が大きく低減するという 結果は、後述するように、連続鋳造鋳型内における初期凝固 シェルへの介在物・気泡の捕捉に大きく影響する。

(6) 連続鋳造機鋳型内の介在物・気泡

3次元の流体解析によって流速を計算する際に、二次の風 上差分法によってエネルギー方程式を解いて、凝固シェルの 生成を流体計算と連成する。この際、凝固界面では、fsに応



図5 溶鋼流速と捕捉された介在物の最大径の関係(*鋳造速度)

じて溶鋼の粘性を変え凝固界面の流速を求める。流体計算で は、運動方程式、連続の式と、乱流モデルとしてk-εモデ ルを用いた。

凝固界面の取り扱いにおいて、凝固界面における最大流速 は当然にfs~0の位置となる。しかしながら、流速を決定する 粘性係数がfsが0~0.2までの範囲でほとんど変わらないた めに、流速が変化しないこと、また、界面でないバルク内で はfsは0となるから、界面を特定するためにfs~0.2の位置を 界面における流速と設定した。先に行ったモデル実験の結果 から、上記界面流速と介在物の捕捉確率の関係を計算モデル に組み込む。後述のように、モデル実験で介在物面積率を決 定する介在物径は数100 µmであったので、モデル実験の結 果を0.5mm径の気泡にも捕捉確率を拡張し、アルゴン気体 の体積膨張考慮後の密度0.24kg/m³を気泡密度として、溶鋼 流動と連成して気泡の分散を計算した。

図6に、厚み中央および凝固界面(fs~0.2)における0.5mm 径の捕捉された気泡分布計算値を示す。上段は厚み中央の気 泡分布で、2段目が、凝固界面における気泡分布(本モデル実 験で得た流速と捕捉率の関係を仮定)、下段は、捕捉の臨界値 を0.15m/sと仮定¹²⁾した場合の凝固界面における気泡分布を 示す。また、左列は、FCモールドの直流磁界が0.1T時、右列 が0.2T時である。ノズルヘアルゴンガスを吹き込むために、 ノズル噴流の気泡密度が大きく、この噴流が鋳型内で広がっ て気泡の濃度分布を形成し、凝固界面近傍の流速が低い領域 で捕捉が起こっている。また、FCモールドによる直流磁界強 度が大きいとき(磁場強度0.2T)に、ノズル噴流に混入して いる気泡の浮上が促進されているが、これは、ノズル吐出孔 からの溶鋼流速と気泡の浮力によって決定されるノズル噴流 が直流磁界によって制動されて、結果、気泡浮力による上昇 流が促進されてノズル噴流が上方に歪曲されるためである。

図7に、幅方向の気泡・介在物分布を、左列に実測値、中 央列に本モデル実験に基づく計算値、右列に捕捉の臨界値を 0.15m/sとしたときの計算値を比較した。上段から、スラブ 表面から2.5mm (溶鋼上面から推定63mm深さ)、3.5mm (同 じく92mm)、4.5mm (同じく127mm)相当の結果となって いる。実測値および本モデル実験に基づく計算値では、短辺 付近に気泡分布が多く、かつ、スラブ表面から深くなるほど 気泡・介在物密度は低減しており、傾向がよく一致している。 一方、捕捉の臨界値を0.15m/sとしたときには、幅方向での 差異が小さくなり、かつ、深くなる方が捕捉密度が増加する など、傾向が一致しない。

以上の結果からも本計算モデルの妥当性が示唆された。本 研究によれば連続鋳造時の気泡の捕捉は0.15m/s以下よりも はるかに流速の小さい領域での洗浄効果に大きく影響されて いることがわかる。



図6 計算された0.5 mm 径のAr気泡分布 (磁束密度0.1T と0.2Tの比較) (幅1500 mm, 厚み260 mm, ス ループット量 4.5 ton/min) (Online version in color.)



図7 気泡・介在物の幅方向分布の計算値と実測値の比較(幅1500 mm, スループット量 4.5 ton/min, 磁 束密度 0.2T, 気泡径 0.5mm) (Online version in color.)



溶鋼を用いた凝固シェルへの介在物・気泡の捕捉に関する モデル実験を行い、介在物・気泡の捕捉条件および捕捉機構 を検討した。また、実連続鋳造機の鋳型内流動にその結果を 適用して、以下の知見を得た。 1. 凝固界面における0.05m/sというような僅かな流動の存 在によって、介在物の捕捉が大きく低減する。

2. 上記の介在物の捕捉に及ぼす界面流速の依存性は、界面流 速に依存する濃度境界層厚の変化に起因するところが大きい と考えられる。すなわち、いったん濃度境界層に入った気泡・ 介在物はSaffman力より数オーダー大きい吸引力によって凝 固界面に引き寄せられると考えられる。流速の増加に伴って 気泡・介在物の捕捉が抑制されるのは、流速の増加に伴い濃 度境界層厚みが減少し介在物・気泡が吸引力の影響を受けに くくなるためと推定される。

3. モデル実験および数値解析によって、いわゆる洗浄効果は、 上記の界面張力勾配に起因する吸引力に加えて、抗力などの 粒子に流体力学的に働く力、さらには、凝固速度に依存する凝 固界面での粒子の滞留によって決定されていると推察される。 4. 実際の連続鋳造機においては、ノズルから吹き込まれる気 泡の噴流が拡がることにより、鋳型内溶鋼内に気泡の高い濃 度分布を有する場所が発生し、その位置の凝固界面流速が小 さい場合に介在物・気泡が捕捉される。モデル実験に基づく 凝固界面流速と介在物・気泡の捕捉率の関係を考慮した新し い数値計算モデルにより、初めて定量的に再現・説明するこ とができた。すなわち、0.05m/sといった極めて小さい界面流 速の存在が、介在物・気泡の付着現象に大きく影響を与える。 5. 上下二段ブレーキのFCモールドでは、直流磁界強度が大 きいとき (磁場強度0.2T) に、ノズル噴流に混入している気 泡の浮上が促進される。これは、ノズル噴流が、直流磁界に よって制動され、気泡浮力により上方に歪曲されるためであ る。磁界強度が大きくすることにより界面流速が均一化し、 大きな気泡・介在物捕捉が抑制できる。

6. 電磁攪拌や電磁ブレーキ等の影響も含めた鋳型内溶鋼流 動は非常に複雑であるため、対象とする介在物・気泡の径を 明らかとした上で、本研究のような数値計算モデルによって 凝固シェルへの気泡・介在物捕捉を予測し、欠陥を低減する 条件を見出すことが重要である。

8 おわりに

数値シミュレーションに必要な界面流速と凝固シェルへの 介在物の捕捉率の関係をラボ実験で実測することで、ラボ実 験の現象を説明し、かつ、実際の連鋳機の気泡捕捉分布の予 測に成功したことが本論文の成果となります。冒頭でも述べ ましたが、海外でも比較的引用数が多かったのは、世界的にも 鋼板の表面品質への関心が高まっていたからだと思います。

鋳型内の溶鋼流動は、表面品質に直接影響しますが、非定 常・不安定な現象であり、古くからシミュレーション計算が 行われてきました。本論文は10年以上前の研究成果であり、 近年のコンピューターの高速化と計算スキームの向上ととも に、年々精緻な計算が報告されています。将来には、図8に例 示しましたように、連続鋳造プロセス全体をシミュレーショ ンで再現するサイバーフィジカルシステムにより、品質予測





や異常判定が行われるようになるものと思っています。

本研究もその一つですが、物理現象を正確に再現するため には、地道ではありますが、シミュレーションと実測値の比 較・検討が必要です。この分野における研究がさらに深化し ていくことを願っております。最後になりましたが、本研究 遂行にご協力いただきました共著者並びに関係各位に深く御 礼申し上げます。

参考文献

- 1) Y. Miki and S. Takeuchi : ISIJ Int., 43 (2003) 10, 1548.
- 2) 向井楠宏, 林偉: 鉄と鋼, 80 (1994) 7, 533.
- K. Mukai, L. Zhong and M. Zeze : ISIJ Int., 46 (2006) 12, 1810.
- 4) D. M.Stefanescu, R.V. Phalnikar, H. Pang, S. Ahuja and B.K. Dhindaw : ISIJ Int., 35 (1995), 700.
- 5) 安田秀幸, 大中逸雄, 定司英明: 超清浄鋼研究の最近の 展開 超清浄鋼研究会最終報告書, (1999), 303.
- 6)山田亘,清瀬明人,中島潤二,福田淳,岡沢健介,宮沢憲 一:CAMP-ISIJ, 12 (1999), 682.
- 7) 岡沢健介:超清浄鋼研究の最近の展開超清浄鋼研究会最 終報告書,(1999),286.
- 8) 三木祐司, 山根功士朗, 竹内秀次: CAMP-ISIJ, 17 (2004), 847.
- T.Toh, H. Hasegawa and H. Harada : ISIJ Int., 41 (2001) 10, 1245.
- H. Esaka, Y. Kuroda, K. Shinozuka and M. Tamura : ISIJ Int., 44 (2004) 4, 682.
- 11) Q. Yuan and B. G. Thomas : MCWASP XI Conf., France, (2006), 745.
- A. M. Mollinger and F.T. M. Nieuwstadt : J. Fluid Mech., 316 (1996), 285.

(2022年9月26日受付)

34