

タンディッシュ内の気泡流れのシミュレーション

浅尾 慎一^{*1}, 原田 啓人^{*2}, 杉本 卓彌^{*2}

Simulation of Bubble Flow in Tundish

Shinichi ASAO^{*1}, Hiroto HARADA^{*2} and Takuya SUGIMOTO^{*2}

Synopsis : The composition of iron from the blast furnace is adjusted by the converter. Next, it is processed into various materials such as bloom and billet by a continuous casting machine. It is important to control inclusions and bubbles in the production of high quality steel. A tundish removes inclusions and bubbles by using the difference in buoyancy between molten steel and inclusions and bubbles. The tundish is equipped with a weir, which controls the flow of molten steel. However, the change in flow due to the difference in the position of the weir is not well known. Therefore, in this study, we simulated the flow in the tundish with a two-phase fluid of water and gas. We also investigated the relationship between the shape of the weir and the position of the weir and the change in flow. As a result, it was found that the larger the number of weirs, the higher the bubble floatation rate over time. It was also found that a low weir has a low effect on bubble floatation. When a fluid collides with the weir, a vortex is generated around the weir. This vortex makes it difficult for bubbles to flow over the weir into the outlet. It is possible to promote the floating of bubbles by controlling the flow in the tundish.

(Received Sep. 10, 2021)

Key words : tundish, computational fluid dynamics, two-phase flow.

1. 序 論

製鉄所の主要な工程の1つに連続鋳造がある。精錬工程にて成分調整を終えた溶鋼は、連続鋳造工程へ運ばれ、Fig. 1のような連続鋳造機にて一定の形の半製品である鋼片となる。連続鋳造プロセスで重要となるのは、鋼中の非金属介在物・気泡をさらに除去することである。非金属介在物(以降、介在物)とは、溶鋼接触面の耐火物やスラグ、溶鋼中に含まれる金属成分が空気中の酸素と反応して生じた生成物などが主な成分組織としてあげられる。介在物・気泡を含む溶融金属を連続鋳造機で鋳造した場合、製造された鋳片内に介

在物・気泡が残留し、鋳片に疵等の欠陥を生じる。従って、この介在物・気泡を低減させる技術は連続鋳造において良質な鋳片を得るための重要な技術であり、従来から連続鋳型への電磁力適用¹⁾など種々の介在物低減対策が実施されてきた。

タンディッシュはこの連続鋳造設備の一部である。連続鋳造機で取鍋から鋳型に注がれる溶鋼を途中で受け止め、介在物・気泡をさらに取り除く受け皿がタンディッシュである。溶鋼中の介在物・気泡を除去するため、容量の大型化による介在物・気泡浮上除去の促進や容器形状変更および溶鋼の流動状態の改善など様々な工夫が行われてきた。タンディッシュに設けられた堰はその工夫の1つである。堰を設けることによって

*1 産業技術短期大学 講師 博士(工学) 機械工学科

*2 産業技術短期大学 機械工学科 2020年度 卒業生

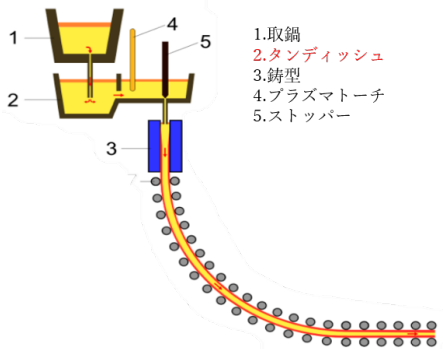


Fig. 1 Continuous casting machine⁹⁾.

溶鋼がタンディッシュ内にとどまる時間を長くし、介在物・気泡の浮上時間を稼いでいる¹⁾。湯面に浮上した介在物は、連続 casting パウダーに取り込まれて除去される。そのため、タンディッシュでは、溶鋼の滞在時間、介在物・気泡の浮上挙動が重要となる。

従来は、タンディッシュ形状 (容量を大型化せずに除去効率の向上²⁾³⁾、底部穴位置⁴⁾、容量一幅一深さの影響⁵⁾や真空脱ガス処理時の不活性ガス吹込み⁶⁾⁷⁾、注入ノズル高さ⁸⁾による介在物浮上挙動に関する研究が行われており、数値計算や水モデル実験にて研究が進められている。単相流やトレーサー粒子を用いたシミュレーション⁵⁾は行われていたが、二相流体にて観測する研究報告は見られなかった。鍋からタンディッシュへの注湯は、気泡を巻き込んだ気液二相の流れとなるが、計算の簡略化のため、気泡の乱れと速度の減衰は、注湯流の境界条件として乱れの運動エネルギー K 、散逸率 ε ¹⁰⁾の値を調整することにより単相流での解析が行われている⁵⁾。単相流で解析を行うことによる欠点がある。単相流の場合、介在物や気泡をメッシングによって作成する必要があるが、数が多い場合、作成には手間がかかる。また、流体の計算とは別に行う必要があるため、計算コストも大きくなる。以上の背景より、本研究ではシミュレーションソフトを用いて、堰の形状、高さ、数を変えた様々なモデルのタンディッシュにおける流れのシミュレーションを行う。堰の形状、高さ、数を変えることで、タンディッシュ内の流れを変化し、欠陥を低減することができるのではないかと考えた。二相流体で解析を行った場合どのような結果となるのか興味を持ち、溶鋼と介在物のモデルとして、水と気体の二相流体にて解析を実行した。

2. タンディッシュ内の流れのシミュレーション

2.1 形状モデルと流体モデル

本計算は Fig. 2 に示すような JFE スチールの公開特許 (国際公開番号: WO2013/190799)³⁾をベースとしている。

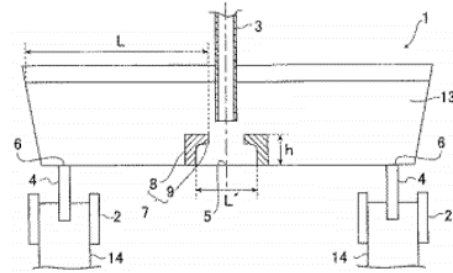


Fig. 2 I-type tundish³⁾.

これをもとに作成したモデルを Fig. 3 に示す。このモデルをモデル 1 と呼ぶことにする。Fig. 3 内の数値の単位は [mm] である。モデルの寸法は 10 分の 1 モデルに変更した。作成したモデルは 2 次元モデルであり、左右対称のものとしている。タンディッシュ内の流れと気泡の浮上挙動を確認するための解析であるため、まずは 2 次元モデルにて解析を行う。作成したモデルを元に次の Fig. 4 の 6 つのモデルを作成し、計 7 モデルで解析を行った。なお Fig. 4 内の数値の単位は [mm] である。

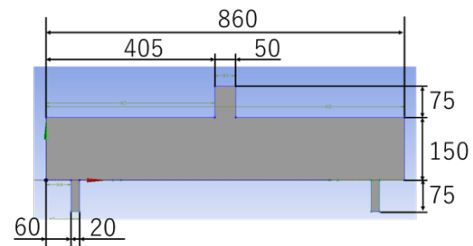


Fig. 3 Shape model of the tundish (model 1).

流体モデルは水モデルを用いた。また、二相流体の流動シミュレーションの計算方法として VOF 法¹¹⁾¹²⁾を用いた。

2.2 シミュレーションにおける各種条件設定

本ソフトウェアにおける各種条件設定について説明する。ソルバータイプは「圧力ベース」である。これは、非圧縮性流体の解法を用いている。乱流粘性モデ

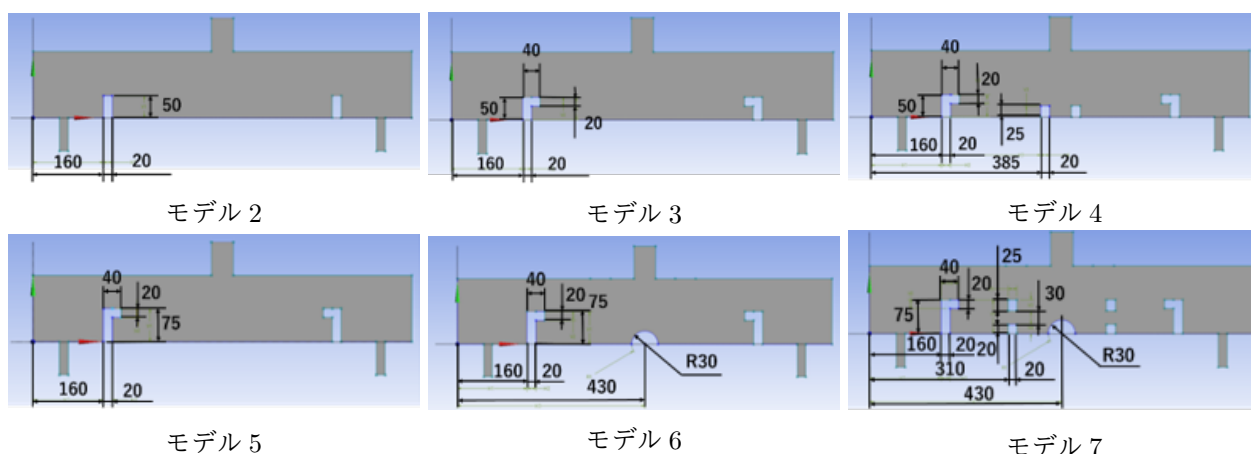


Fig. 4 Shape model of the tundish (model 2 ~ 7).

ル設定は $k-\epsilon$ (2 方程式) を用いており、壁近傍処理としてスケラブル壁関数を用いた。表面張力モデルは連続体表面力 (CSF) であり、表面張力係数を 0.072 N/m とした。境界条件の設定を Fig. 5 に示す。

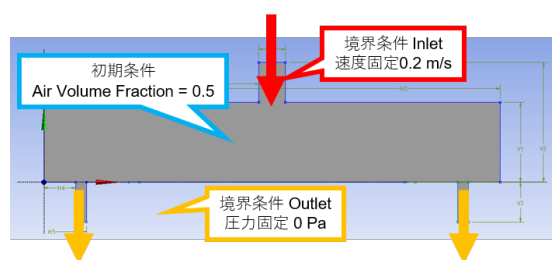


Fig. 5 Initial conditions and boundary conditions.

流入部においては、速度の大きさを 0.2 m/s とし、流出部においては、圧力の大きさをゲージ圧: 0 Pa とした。また、時間刻み幅は 0.005 s とした。

2.3 結果と考察

各モデルの時間変化の様子を Fig. 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 に示す。なお色は水の体積分率 (Volume fraction) を表しており赤色が水を表しており、青色は空気の存在を示している。赤色の中に青色もしくは緑色の部分が気泡である。

$t = 20 \text{ s}$ 以降の流れをみると、ほぼ同じ動きをしているため、準定常流れとして扱うことができると考える。Fig. 6 に示すモデル 1 は遮るものがないため、流入口から流出口に向かう流れが安定してきている。気泡浮上時間が短いため、流出口には多くの気泡が流

れ込んでしまっている。Fig. 7 に示すモデル 2 では、堰を設けたため、流れに変化が生まれている。しかし、高さが低く、単純な形状であったため、大きな変化を生むことはできなかったが、上方に向かう流れができていたことを確認できた。Fig. 8 に示すモデル 3 では、Fig. 7 に示すモデル 2 と同じ堰高さで形状のみを変化させた。その結果、タンディッシュ中心部に向かう気泡が増えていることが確認できた。Fig. 9 に示すモデル 4 では堰の数を増やすこととした。流入口下に堰を 2 枚追加したことにより、流れは大きく乱れた。しかし、流れに変化は生じたが流出口に向かう気泡の量は、低減できていない。Fig. 10 に示すモデル 5 では堰の高さをモデル 3 の 1.5 倍とした。堰高さを上げることによって、モデル 3 で確認した中心部に向かう流れをより確認することができるようになった。流入口下に気泡を集めることによって気泡流出を抑えることができると考える。Fig. 11 に示すモデル 6 では、中心部に向かう流れをさらに強めるべく、流入口下に干渉物を配置した。干渉物があることによって気泡は中心部により多く集まる結果となった。Fig. 12 に示すモデル 7 では気泡を流入口下から逃がさないよう、モデル 6 に追加で堰を配置した。その結果、流出口に向かう気泡は大幅に低減している。

次に、堰形状による流れの変化に注目する。 $t = 60 \text{ s}$ におけるモデル 1 (Fig. 6), モデル 2 (Fig. 7), モデル 3 (Fig. 8) において、堰形状を変更した場合の比較を行う。モデル 1 の結果は、堰を設けていない為、大量の気泡が流出していることがわかった。モデル 2 とモデル 3 の結果は、堰を設けたため、ある程度の気泡の

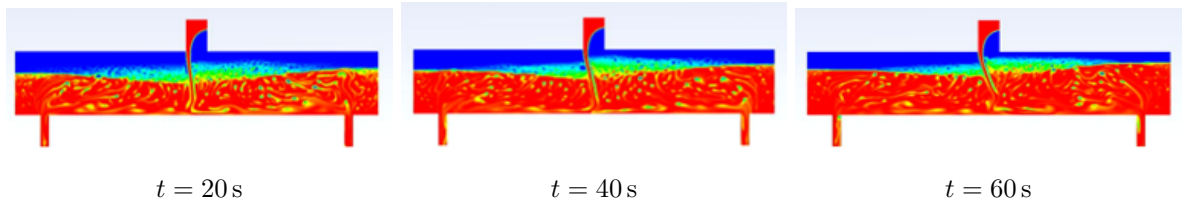


Fig. 6 The fluid flow at each time for model 1.

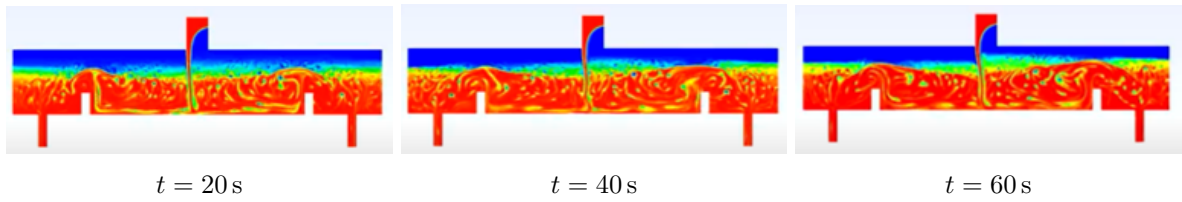


Fig. 7 The fluid flow at each time for model 2.

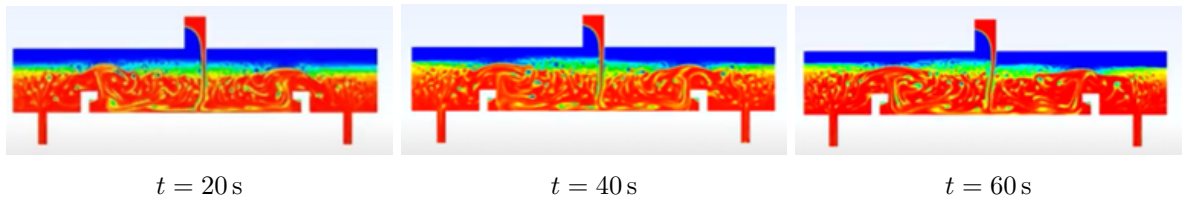


Fig. 8 The fluid flow at each time for model 3.

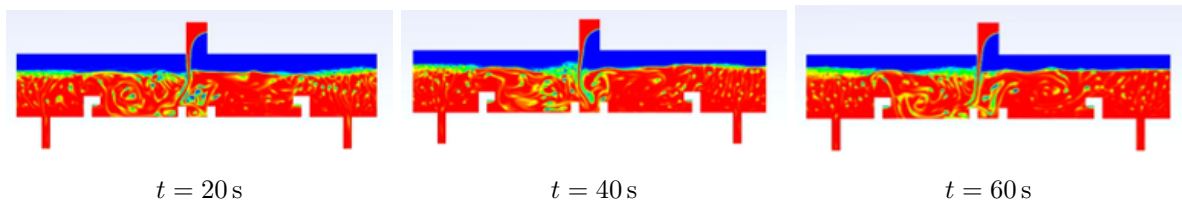


Fig. 9 The fluid flow at each time for model 4.

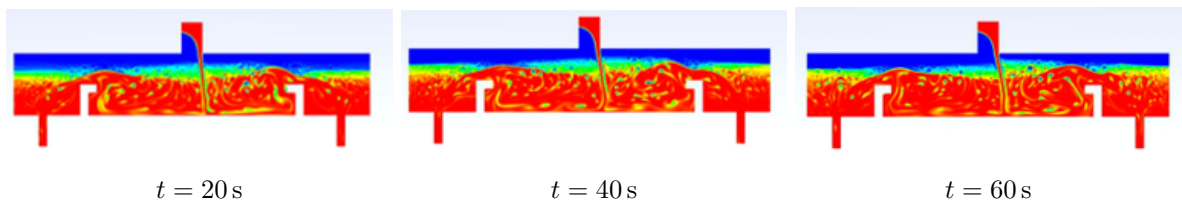


Fig. 10 The fluid flow at each time for model 5.

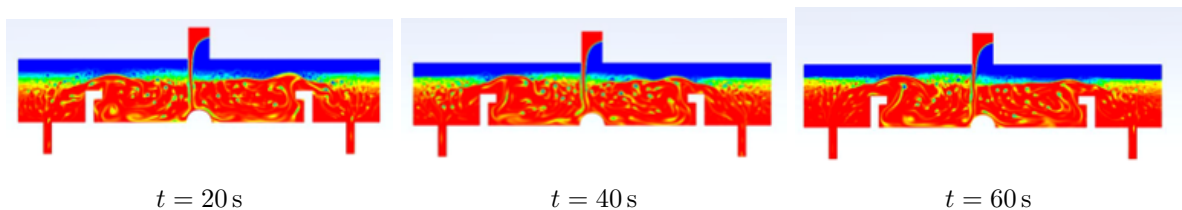


Fig. 11 The fluid flow at each time for model 6.

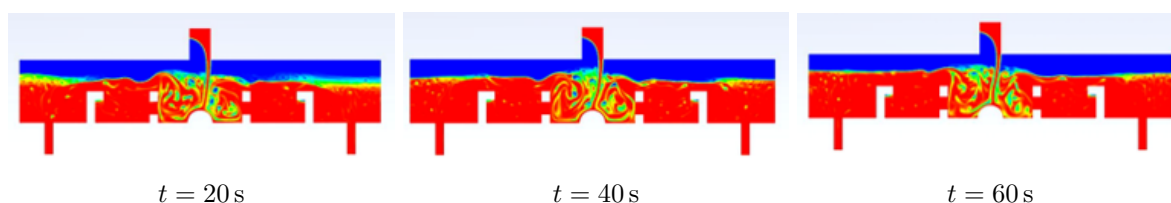


Fig. 12 The fluid flow at each time for model 7.

流出を減らすことができたが、モデル 2 とモデル 3 で堰の形状を変えたことによる気泡の流出量の変化はあまり見られなかった。

ここで、流れが堰に接触した時を考える。Fig. 13 に $t = 1$ s、つまりは流れが堰に接触した時のモデル 2 とモデル 3 の様子を示す。

返しを設けた逆 L 型のモデル 3 では、モデル 2 と比べると Fig. 13 のように水と堰が接触した際の、水の跳ね上がりが大きくなっていた。Fig. 13 のモデル 3 を見ると、堰と水の間に隙間ができています。返しを付けたことによって、水と堰の間に空間ができ、そこに気体が押し込まれることで反発力が発生しているためだと考えられる。また、堰に衝突した際、堰を乗り越える流れのほか、流入口方向に向かう流れが発生したことを確認した。

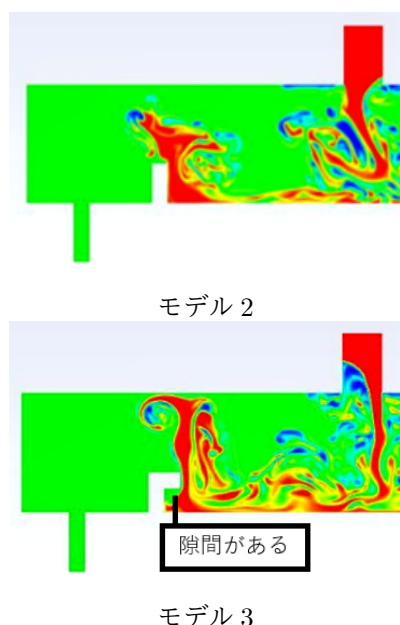


Fig. 13 Bouncing of the fluid when it contacts the weir ($t = 1$ s).

次に、堰数と堰高さによる流れの変化に注目する。 $t = 60$ s におけるモデル 3 (Fig. 8), モデル 4 (Fig. 9),

モデル 5 (Fig. 10) において、堰数を変化させた場合と高さを変化させた場合それぞれの比較を行った。モデル 4 の結果は、モデル 3 に堰を 2 つ追加して堰を計 4 つとしたが、流出口付近の気泡の数をみると、モデル 3 のときとほぼ同じである。高さの低い堰では水を貯めることができず、気泡の浮上時間を稼ぐことができなかったため、堰を追加した効果が少なかったと考えられる。よって、堰にはある程度の高さが必要であると考えられる。そのため、モデル 5 では、堰の高さをモデル 3 の 1.5 倍に設定し解析を行った。流出口付近の気泡の数をモデル 3・モデル 4 と比較すると、減少していることがわかる。堰を高くしたことにより、容積が増え、水の滞留時間が長くなり、気泡浮上時間を得ることができたため、気泡の流出量を減らすことができたと考えられる。

次に、干渉物による流れの変化に注目する。 $t = 60$ s におけるモデル 5 (Fig. 10), モデル 6 (Fig. 11), モデル 7 (Fig. 12) において、干渉物による流れの変化を比較する。モデル 4 (Fig. 9) で流入口下に、堰を配置すると、流れに乱れが生じることが確認できたため、モデル 6 では、流入口真下に球状の干渉物を配置し、流れの変化を確認することにした。その結果、モデル 5 と比較して、流入口付近に集まる気泡の数が増えたことが確認できた。このことから、流入口下に気泡を巻き込む流れを作ることによって、流出口に向かう気泡の数を減らすことができると考えられる。モデル 1 からモデル 6 まででわかったことを踏まえて作成したモデル 7 では、気泡の流出量を大幅に減らすことができた。

以上より、堰を設けることにより、タンディッシュ内での水の滞留時間が長くなり、気泡浮上時間を得られるが、高さの低い堰では効果が低いことがわかった。また、堰に流体が衝突した際に、堰の内側で渦が発生する。この渦により、気泡が堰を越えて流出口に流れ込み難くなると考えられる。気泡の流出量を低減するためには、堰高さを高くし、流入口下に気泡を掴む渦

を作ればよいと考えられる。つまり、タンディッシュ内の流れを制御することにより、気泡の浮上を促進することが可能であるとわかった。

3. 結 論

本研究ではタンディッシュ内の堰形状・配置7パターンを解析を実施した。堰数が多いほど、タンディッシュ内での水の滞留時間が長くなり、気泡浮上時間を得られるが、高さの低い堰では効果が低いことがわかった。堰に流体が衝突した際に、堰の内側で渦が発生する。この渦により、気泡が堰を越えて流出口に流れ込み難くなると考えられる。タンディッシュ内の流れを制御することにより、気泡の浮上を促進することが可能であることがわかった。

参考文献

- 1) 鋼を生み出す その3 連続鋳造の役割と挑戦, <<https://www.nipponsteel.com/company/nssmc/science/pdf/V13.pdf>>, (参照 2021-02-18)
- 2) 特開平 7-132354 連続鋳造用タンディッシュにおける介在物除去方法 (新日本製鐵) , <<https://www.j-platpat.inpit.go.jp/c1800/PU/JP-H07-132354/AEC1E99E-5157C067-6D469786-6FFFCD9E-607E30A6-D19C8E85-1D4E4D7D-C0867011/11/ja>>, (参照 2021-02-08)
- 3) WO2013/190799 高純度鋼鋳片の製造方法及びタンディッシュ (JFE スチール) , <<https://www.j-platpat.inpit.go.jp/c1800/PU/W0-A-2013-190799/83EA8C3A-B1144538-A8793CFC-08D92246-EB660C81-3F1F69F6-DFD95CBA-CD88AF03/50/ja>>, (参照 2021-02-08)
- 4) 特開 2018-89669 連続鋳造方法 (神戸製鋼) , <<https://www.j-platpat.inpit.go.jp/c1800/PU/JP-2018-089669/380DDC27-1A66177F-767D3D81-C4037D36-D6551D21-1B827DC6-B8C97A94-220EE232/11/ja>>, (参照 2021-02-08)
- 5) 中岡 威博, 三宅 俊也, 三村 毅, 田井 啓文, 介在物流出特性に及ぼすタンディッシュ形状の影響, 鉄と鋼, Vol. 86, No. 4, (2000)
- 6) 特開 2020-12157 高純度鋼の溶製方法 (日本製鉄) <<https://www.j-platpat.inpit.go.jp/c1800/PU/JP-2020-012157/2DB43125-2765B2CD-019756C0-0B77A827-805351B1-371985BE-C6DA63C5-9A1E39CE/11/ja>>, (参照 2021-02-08)
- 7) 特開 2020-12143 高純度鋼の溶製方法 (日本製鉄) <<https://www.j-platpat.inpit.go.jp/c1800/PU/JP-2020-012143/4E4C9944-A21049D9-CCAA6AF5-960F4309-8E380A82-5962ABA2-A61A0A76-51AFBCD9/11/ja>>, (参照 2021-02-08)
- 8) 特開 2002-1496 連続鋳造用ロングノズル (新日本製鐵) <<https://www.j-platpat.inpit.go.jp/c1800/PU/JP-2020-012143/6ABA75EF-F1940494-292134EB-40C94DB3-3F44D970-A7FFA393-87861334-CE3651DB/11/ja>>, (参照 2021-02-08)
- 9) 連続鋳造 <<https://ja.wikipedia.org/wiki/連続鋳造>>, (参照 2020-02-15)
- 10) k-εモデル コトバンク <<https://kotobank.jp/word/k-εモデル-168287>>, (参照 2021-03-01)
- 11) 自由表面モデル化の方法 <<https://www.flow3d.co.jp/resources/cfd-101/general-cfd/free-surface-modeling-methods.htm>>, (参照 2021-02-25)
- 12) [熱流体解析]Ansys Fluent : 有限要素法マルチフィジックス解析ツール Ansys : サイバネット <<https://www.cybernet.co.jp/ansys/product/lineup/fluent/>>, (参照 2021-02-25)