

## 連携記事

# 連続鋳造用ノズルの変遷と 解析シミュレーションの進展

## History of Continuous Casting Nozzles and Advances in Analytical Simulation

(株) TYK 明智工場  
部長 (理事)  
連続鋳造用耐火物チーム チームリーダー  
**山内智玲**  
Noriaki Yamauchi

(株) TYK 明智工場  
顧問  
**高橋成彰**  
Shigeaki Takahashi

(株) TYK 明智工場  
プロセス技術部 部長  
**山田直樹**  
Naoki Yamada

(株) TYK 明智工場  
次世代耐火物開発チーム  
チームリーダー  
**階戸雅弘**  
Masahiro Shinato

(株) TYK 明智工場  
連続鋳造用耐火物チーム  
係長  
**川瀬正成**  
Masanari Kawase

### 1 連続鋳造に使用される 連続鋳造用ノズルの変遷

連続鋳造で使用されるノズル製品は取鍋-タンディッシュ-モールド間の溶鋼供給に使用される耐火物である。特に浸漬ノズルは凝固プロセスの最終工程に使用されるものであり、単に溶鋼をモールドに供給するだけでなく、溶鋼の酸化防止やモールド内での安定した溶鋼流動の維持、使用開始時の熱衝撃やモールドパウダーの侵食に耐えうる性能を求められ、鋼の品質に大きな影響を及ぼす重要な耐火物の一つである。連続鋳造用ノズルの使用位置を図1に示す。

1960年代に連続鋳造機が生産実機として国内に導入されて以降、暫くは海外から輸入された熔融石英質浸漬ノズル(鑄込み成形品)や、粘土-黒鉛質浸漬ノズル(抜き出し成形品)が主流を占めていたが、1960年代後半から国産品に置き換えられ始めた。1968年にCIP(静水圧加圧法)による成形法が適用され、1970年代以降ではそれらが主流となっていった<sup>1)</sup>。当社での導入初期のCIPはバイヨネット方式(蓋と圧力容器に契合用の突起を有する方式)であったが、以降CIPの大型化に伴いフレーム方式へと変更されている。また初期の浸漬ノズルでは箱型タイプのももあったが<sup>2)</sup>、1970年代中期以降の外観形状は現在のノズルに近いものとなっていった。導入初期のCIPと1970年代初期の浸漬ノズルを図2に示す。

1980年以降ではノズル内壁の閉塞防止策としてスリットからノズル内孔へアルゴンガスを噴出させ、物理的にアルミ

ナ付着を抑制する構造や、スリットを断熱目的で用い内壁への地金付着を抑制する構造が開発された<sup>3)</sup>。

使用されるバインダーも粘土質から耐食性の高いタール・ピッチへ、更に1970年代後半から更に耐食性の高いフェノール樹脂の採用が進んだ。これは耐火物のエアシール性能の向上ももたらし、鋼品質の向上に繋がっている。また、スラグライン部へのジルコニア-カーボン材質の適用により浸漬ノ

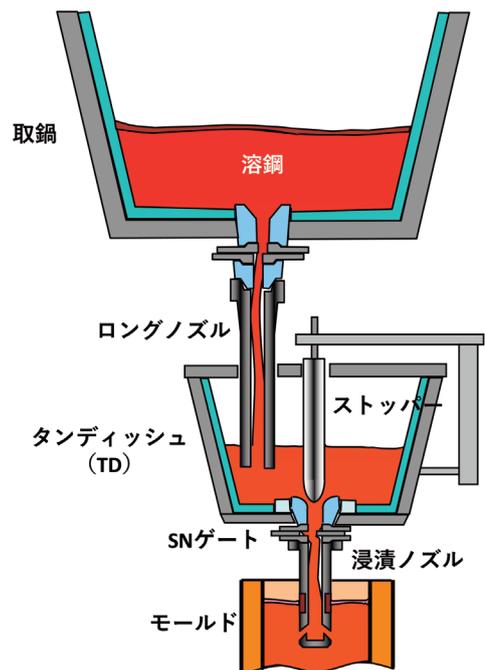


図1 連続鋳造用ノズルの使用位置 (Online version in color.)

ズルの耐用が飛躍的に向上した。耐用の向上に伴い、ノズル内孔の付着防止が再度クローズアップされ、1990年代以降ではジルコニア-ライム-カーボン材質<sup>4)</sup>やノンカーボン材質等の難付着材質の開発が進んだ。

ノズル形状面でも1970年代後半からモールドパウダーの巻き込み防止、モールド内の整流化や鋼中の介在物浮上、増大するスループットのニーズに対応したノズル内部形状や吐出口形状について耐火物メーカー側からの提案も多くなっていった。この頃から耐火物メーカー側でもモールド内の流速分布可視化やモールドパウダー、ガス気泡の挙動確認が必須となっていった。

これらの解析手法について、主に当社の例を用いて初期の解析手法から現在に至るまでの流体解析シミュレーションの進展について述べる。

## 2 水モデル装置を用いた流体解析

### 2.1 水モデルの歴史

連続 casting 分野で溶鋼流動の水モデルによる模型実験は古くは1950年代後半に旧ソヴィエト連邦で始められ<sup>5,6)</sup>、日本でも1960年代末頃から行われている<sup>7,8)</sup>。

当社の実施例では、1970年代末より水を溶鋼に見立て、水槽をモールドとし、実際の浸漬ノズルを用いてモールド内の溶鋼流動を確認しようというものであった。主にはモールドパウダーの巻き込みの確認からスタートした。それまではお客様からの指定された形状でのノズル設計を行っていたが、この頃から水モデルを使用してお客様と複数の水準の水モデ

ル試験を実施しながら casting 条件に合った吐出口形状や浸漬深さの最適化を図るようになってきた。

### 2.2 初期の水モデル

当社での初期の水モデルは水の供給方法はポンプから吐出される水配管を直接浸漬ノズルへ接続していたものであった。この初期の方式は、配管経路で混入したエアが直接モールド内に吐出されてしまうことや、配管に設置された手動のゲートバルブで都度水量を手動調整しており、安定した吐出流量を得られにくい構造であった。

また、初期の水モデル用モールドサイズは実機寸法の1:1サイズの幅1800 mm、高さ1500 mmであったが、以降の連続 casting 機のモールドサイズの大型化や casting 速度の高速化に対応する必要が生じた。

### 2.3 水モデル用モールドの大型化

この対策として、実機での流量制御に対応して、ポンプから吐出された水を一旦タンディッシュ状の容器に受け、ここからストッパー制御によりモールドの湯面位置を維持しながらモールドへ注ぎ込むようになった。排水側に定量排出できるポンプを設置し、モールドの下面から多数の排水口を設置し、モールド下面からなるべく均等に水流を排出できる構造とした(図3左)。また解析に応じて上ノズルやSNゲートを設置し、より実機 casting に近い設備となっていった。

モールドについても、最初の装置は正面をガラスで作成したが、割れの問題からアクリルへ変更した。ただしアクリル板でも強度制約から、モールド幅と高さ規制があり、表面に



図2 (左) 1960年代後半に導入された初期の静水圧加圧プレス (Cold Isostatic Press : CIP)、  
(右) それを用いて製造された1970年代初期の浸漬ノズル (Online version in color.)  
明智セラミックス (株) 創立六十周年誌より抜粋

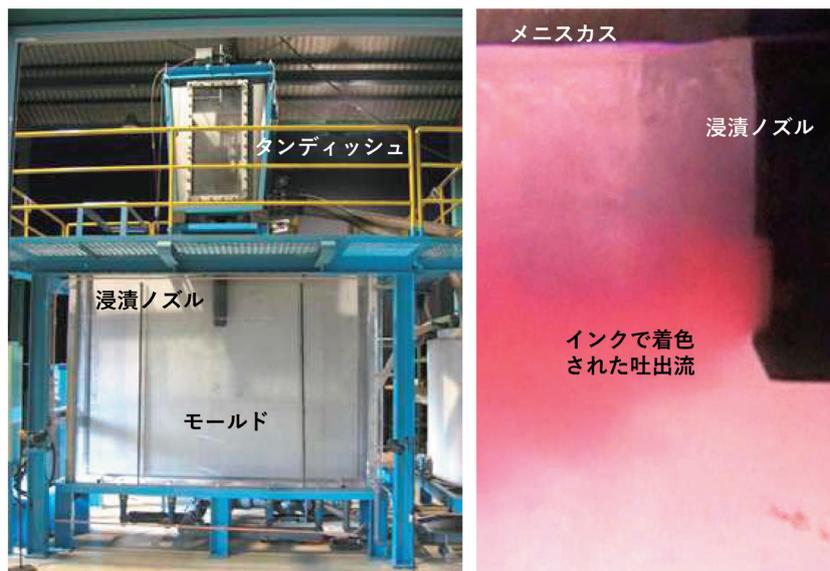


図3 (左) 現在の水モデル装置、(右) インクを使用して流れを可視化した例 (Online version in color.)

補強を入れないと水圧によって亀裂がはいってしまう恐れがあり、このため観察する上で視界を遮る要因となっていた。

製鉄所での広幅モールドの増加や高速鋳造化によるモールド深部までの確認を行うにはモールドの大型化は必須であった。また後述されるPIV解析実施においては、補強の入ったモールド表面は解析の視野を遮るものであり、現在では専門の水槽施工業者に依頼し、幅2600mm、高さ2100mm、厚さ350mmの亚克力製モールドを特注で補強なしの構造で製作している。

## 2.4 初期の可視化方法

モールド内の流速分布を可視化する方法として、初期は色素(インク)を流す方法がとられた(図3右)。ただしこの方法はインクを投入した初期の短い時間内での確認となる。時間経過とともにモールド内のインクが濃くなり、長時間の観察では水が汚染される。またモールド全体の流速分布を定量的に表示することは難しかった。

定点での測定にはプロペラ流速計を所定の位置に配置し定量的な流速やその変化を測定し、補助的にタフト法(流れの中に置いた糸のなびき具合から流れを可視化)で水流の方向を確認した。

水モデル解析の撮影には当時はフィルムを用いた静止画の撮影やVHSのビデオカメラによる動画撮影が主流であった。現像した写真のピントが合っていなかったり暗く映っていたりすると撮影をやり直し、照明用のハロゲンライトが亚克力板に反射して画像が上手く見えない、ハロゲンライトを近づけすぎて熱により亚克力板を变形・破損させてしまった

りと、苦勞が絶えなかった。動画の編集も2000年代初頭までは2台のビデオデッキと格闘しながらお客様への提出用テープを作成していたものであった。

介在物の挙動シミュレーションには想定される介在物やパウダーに応じて発泡シリカや発泡ポリスチレン、オイルなどが用いられた。これらはモールドモデルだけでなく、タンディッシュの縮小モデルでも行われた。

現在でも行っている方法としてガス気泡をノズルから供給し、モールド内での気泡の分布を確認するものがある。これはノズル内孔径や吐出口の形状を変化させることにより気泡の到達深度や広さを確認するものである。ただしこの方法はあくまで気泡浮上の挙動確認であり、水モデル内全体の流速分布を正確に表すものではない。

## 2.5 PIVを用いた解析

現在モールド内の流速分布の確認には粒子画面流速測定法(PIV, Particle Image Velocimetry)を使用している。PIVでの解析は1980年代末には注入トレーサー法で粒子の動きをビデオカメラで撮影し、その画像をコンピューターで処理することにより流速を求める方法が開発され、連続鋳造のモールド内の流れ解析に適用されている<sup>9)</sup>。以降市販のコンピューター解析ソフトも入手しやすくなり、当社でも既にPIV設備を導入されていたお客様の実験設備を見学させていただき、2003年から導入を開始。その後撮影機材の更新を図り現在に至っている。

PIVは、流れ場における多点の瞬時速度を同時に得ることができる計測法であり、流体に追従するトレーサ粒子にレーザ

シートを照射し、これをカメラで撮影しフレーム間の微小時間 $\Delta t$ における粒子の変位ベクトルを画像処理により求め、流体の流速分布を把握する代表的な流体計測法となっている。

PIV装置は照明装置、撮影装置、同期装置、画像記録・解析装置からなる。この手法を用いるためには前述の水モデル用モードを使用するが、いくつかの変更点が必要であり、①レーザーシート照射側面（主にモールド短辺側）の透明化、②モールド装置を格納する部屋全体の暗室化、③モールド撮影面と撮影装置の距離の確保（カメラレンズ選定）、がその主なものとなる。当社でのPIV装置構成図を図4に、それにより解析した例を図5に示す。

本装置の採用により、モールド全面における流速分布が定量的に可視化され、従来の解析方法と比較し、流速分布の推移や撮影時間内での平均化、任意の測定点での流速の時間変化の抽出も容易となった。

主にレーザーシートはモールド厚み方向の中心位置に設置して吐出口中心面でのモールド全体の流速分布を確認するケースが多いが、場合によってはレーザーシートをモールド壁面とノズルの間に移動させ、反転流がぶつかりあう部分の流速分布を確認するケースや、モールド水平方向に照射し、カメラをモールド斜め下方から撮影することにより旋回流の確認に使用されることもある。

## 2.6 3Dプリンターの活用

水モデルに使用されるノズルの作成は、実物のノズルをそのまま使用することが多い。ただしその作成の為に耐火物の成形型から作成を開始していると水モデル用ノズルの作成だけで数週間かかってしまう場合もある。また複雑な内孔形状や吐出口形状の場合はサンプル加工にも多大なる時間を要してしまう。

1990年代からFDM法（Fused deposition modeling 熱溶解積層法）の3Dプリンターは商品化されていたが、当時は高価であった。2009年に入ってから一気に安価化が進み<sup>10)</sup>、

水モデルのサンプル作成に用いるケースが増加した。ただしノズル全体を3Dプリンターで作成するには大型のものが必要となるため、必要な部分のみを作成し、実物のノズルに接合する方法もある。かなり複雑な吐出口形状やプール部形状も容易に作成することが可能となり、サンプル作成期間やコストの削減に繋がっている。当社での作成例を図6に示す。

## 2.7 タンディッシュの解析事例

上記の測定方法を用いて、モールド内解析のみならず、タンディッシュ内面の溶鋼流速分布のシミュレーションも可能である。ただしタンディッシュの場合は実物サイズではモデルが大きいため、縮小モデルを用いている。またレーザーシートを透過させるため、タンディッシュ側面及びタンディッシュ内の堰も全て透明素材での作成となる。

## 2.8 PIV解析の今後

PIVで同時に得られる流速分布は基本的にはレーザーシート面の2方向速度成分である。3次元計測を行う手法としてステレオPIVがある。2台のカメラで角度をつけて視野の違

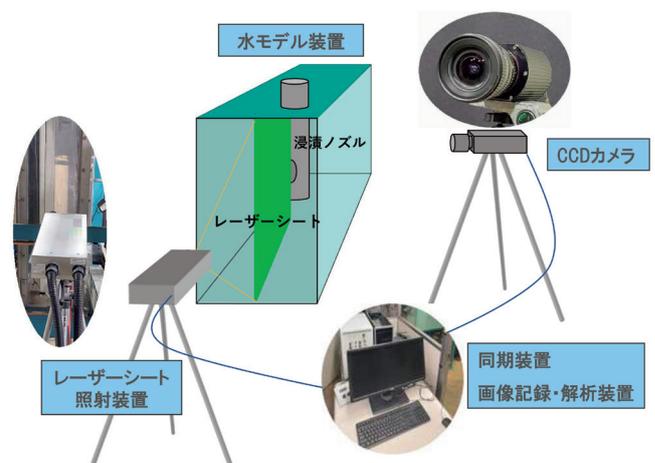


図4 PIV装置の構成図 (Online version in color.)

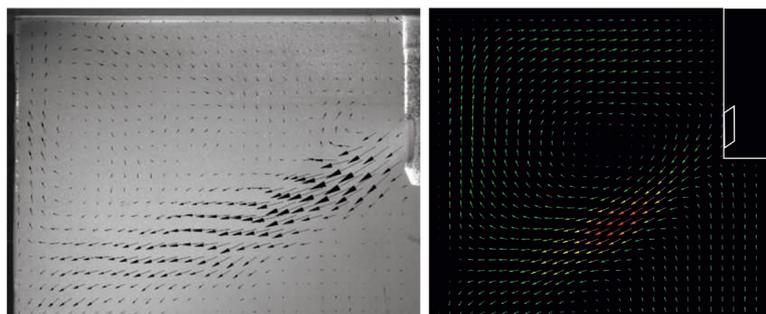


図5 (左) PIVによる瞬間的な流速分布の解析例 モールドサイズ厚み220 (mm) × 幅1600 (mm)、(右) PIVによる撮影時間内で平均化した流速分布の解析例モールドサイズ厚み220 (mm) × 幅1500 (mm) (Online version in color.)

いによる奥行き方向の速度成分の計測が出来るようになる。同様に光幅の広いレーザーを照射し4台以上のカメラを利用してPIVを構成する方法があり、これをトモグラフィックPIVまたはレーザートモグラフィと呼ぶ<sup>11,12)</sup>。

しかしながら水モデル試験の実施には多くのマンパワーが必要であり、ノズルの作成、ノズルセット、モールドの幅、厚み変更、水位監視、カメラ撮影、動画編集、装置の保守点検には多くの時間が掛かる。特にノズル、モールド交換は肉体的負荷も大きい。また実際の溶鋼とは液比重や粘性が異なる事と、電磁攪拌効果を反映した流動実験は困難である。

### 3 コンピューターシミュレーションを用いた流体解析

#### 3.1 CFDの歴史

数値計算による流体解析は1960年代後半からスタートし、連続鋳造プロセスへの適用に関しては、1970年代初期にモールド内の二次元流動解析が開始され、1980年代後半よりスーパーコンピューターに代表される計算機の処理速度の飛躍的な向上に支えられ、3次元解析が行われるようになった<sup>13)</sup>。

#### 3.2 市販ソフトを利用した解析

当社でも2002年よりモールド内流速分布の3次元解析に市販のソフトを利用してCFD (Computational Fluid Dynamics : 数値流体力学) による解析をスタートしている。最初の頃は市販のPCを用いて解析を行っていたが、メニスカスの自由表面解析の為ソフトを更新しVOF (Volume of Fluid) 法による解析を実施したところ、たちどころに計算時間が延長されてしまい、市販のPCでは全く歯が立たなくなってしまった。最終的にはコア数を数十倍に増加させた専用のエンジニアリングワークステーションにより計算を行っている。VOF法解析を追加したCFD解析例を図7に示す。

また、水モデルでの解析が難しかった電磁攪拌等のモールドへの印加の影響をローレンツ力として流体解析に連成させるシミュレーションも可能となった(図8)。これらの他に離散粒子法 (Discrete Particle Method : DPM) による介在物のモールド内での挙動解析、モールド内のアルゴンガスの浮上解析など、各種の数値流体解析を幅広く実施できるようになってきている。

ただし解析が複雑になるほど、計算負荷も莫大なものとなってしまい、所有するローカルリソースの能力によって解

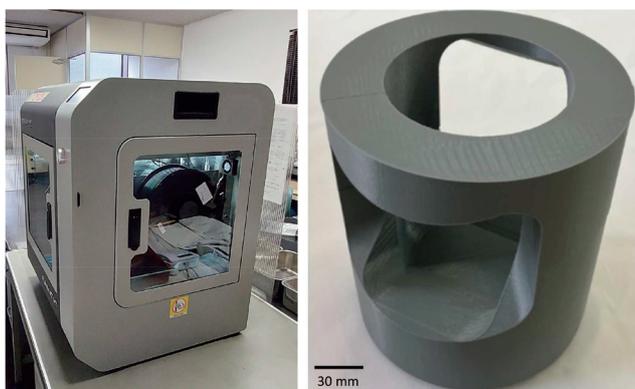


図6 (左) 3Dプリンター、(右) 3Dプリンターを用いて作成された浸漬ノズルの吐出口部 (Online version in color.)

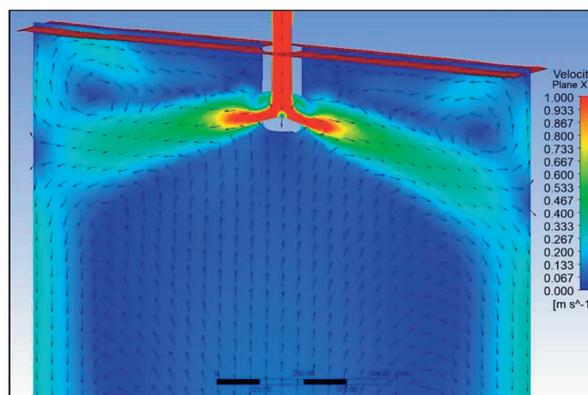


図7 CFDによる流速分布解析例 モールドサイズ厚み200 (mm) ×幅1650 (mm) (Online version in color.)

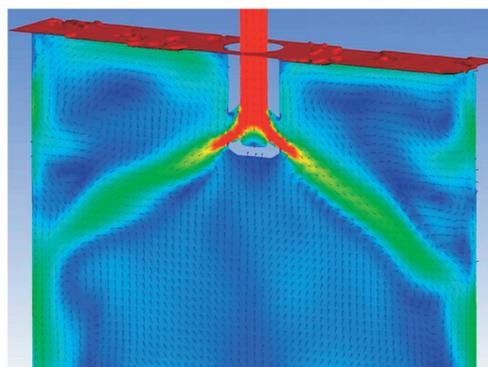
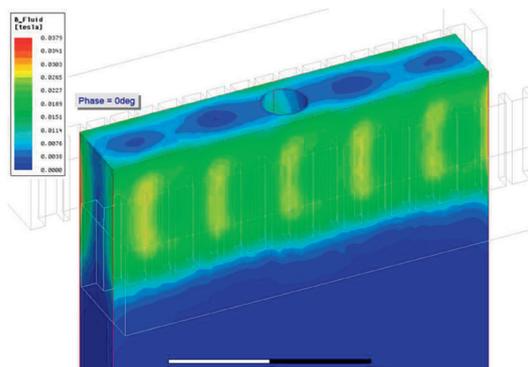


図8 (左) モールド内の磁束密度解析例、(右) ローレンツ力を連成させたCFD解析例  
モールドサイズ厚み230 (mm) ×幅1250 (mm) (Online version in color.)

析速度が律速されてしまう問題がある。

### 3.3 CFD解析の今後

上記解析は主に時間平均モデルである定常流向きの Reynolds-Averaged Navier-Stokes モデル (RANS) で解析を行っているが、近年のノズル形状の複雑化により、剥離流や旋回流、時間的な変化 (非定常流) を考慮し Large Eddy Simulation モデル (LES) での解析も実施している。しかしながら RANS と比較すると LES モデルを使用した場合、計算負荷がかなり高くなる。このため計算負荷の高い部分を RANS で計算し、全体の計算負荷を抑えるハイブリッドモデルの Detached Eddy Simulation (DES) 等の適用も有用であろう。

また増大する計算負荷に対しても、ローカルリソースの使用だけでは限界がある為、解析をクラウド化することによりクラウド上の豊富な CPU、メモリ、アプリケーションを利用できることとなり、計算時間の短縮や、リモートでの解析も可能となる。

## 4 終わりに

一耐火物メーカーで水モデル装置やコンピューター解析に掛けられる設備規模やマンパワーには限度があり、また解析したデータと実機 casting 結果との照合もなかなか難しいものがある。ただし解析結果に基づいたノズル形状の採用により鋼品質の向上に繋がった事例を耳にすると解析に掛けた労力が報われ、開発者のモチベーションの向上にも繋がる。

最近では水モデル解析よりも労力の掛からないコンピューター解析の比率が増えているが、モールドパウダーの巻き込みや浸漬ノズル内孔の異常溶損に繋がる Vortex (図9) の発生状況、気泡のモールド内での分布確認、モールド内の溶鋼流スイングを長時間にわたり確認をする場合は水モデルの観察は欠かすことはできない。また水モデルセット時に生じたノズルやモールドのミスアライメントが流動に与える影響も体感できるであろうし、CFD の計算結果の妥当性を水モデルで確認することは重要である。

特に若手技術者には労力がかかるが、水モデルでの実物大の流体シミュレーションモデルを体感したうえで CFD 解析に繋げて欲しいものである。

### 謝辞

IDT ジャパン株式会社の安藤幸司様には PIV の学術的なアドバイスを頂きました。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。



図9 水モデルにて浸漬ノズル近傍に生じたVortexの例 (Online version in color.)

### 参考文献

- 1) 杉野太加夫, 川村俊夫: わが国における鋼の連続 casting 技術史, 日本鉄鋼協会編, (1997), 638.
- 2) 三宅重夫: 明智耐火煉瓦40年のあゆみ, 明智耐火煉瓦株式会社編, (1978), 58.
- 3) 杉野太加夫: わが国における鋼の連続 casting 技術史, 日本鉄鋼協会編, (1997), 607.
- 4) 中村俊夫, 青木孝文, 奥村尚丈, 近藤良之: 耐火物, 42 (1990), 52.
- 5) K.I. Afanaseva and T.P. Iventsov: Stal, 18 (1958) 7, 599.
- 6) A.A. Skvortov and A.D. Akimenko: Izvert. VUZ-Chern Met., (1958) 3, 21.
- 7) H. Nemoto and T. Kawawa: J. Metals, 21 (1969) 8, 62.
- 8) 占部正美, 石橋政衛, 島田道彦: 鉄と鋼, 55 (1969), S502.
- 9) 村上英樹, 高浜秀行, 森田光宣: 材料とプロセス, 2 (1989), 296.
- 10) 吉村忠与志: J. Technology and Education, 21 (2014) 2, 54.
- 11) 豊田国昭: ながれ, 36 (2017) 421.
- 12) 石間経章: 日本燃焼学会誌, 61 (2019) 197, 227.
- 13) A.D. Gosman, W.M. Pun, A.K. Runchal, D.B. Spalding and M. Wolfshtein: Heat and Mass Transfer in Recirculating Flows, Academic Press, London, (1969).

(2022年10月31日受付)