

## 技術論文

## 数値解析による連続鋳造プロセスの現象解明と設備の最適化開発

## Numerical Simulation of the Continuous Casting Process and the Optimization of the Mold and the Strand

山崎 伯公\*  
Norimasa YAMASAKI嶋 省三  
Shozo SHIMA恒成 敬二  
Keiji TSUNENARI林 聡  
Satoru HAYASHI土岐 正弘  
Masahiro DOKI加藤 雄一郎  
Yuichiro KATO三木 大輔  
Daisuke MIKI中西 健雄  
Takeo NAKANISHI

## 抄 録

連続鋳造プロセスにおける凝固不均一生成現象を数値解析により解明した。鋳型内の鋳片変形解析モデルを開発し、コーナー部近傍で発生する凝固遅れについて解析した。短辺マルチテーパ鋳型を適用することにより、凝固遅れが解消することが、計算モデルと実測により明らかになった。開発したモデルを用いて鋳型形状最適化を検討し、実機適用した。また、2次冷却帯での幅方向凝固不均一発生メカニズムとして、スプレー水の流動挙動に着目した。自由表面流れの解析に粒子法を適用した。計算により、幅方向にスプレー水が不均一に流れ、幅中央部で強冷却になっていることが分かった。

## Abstract

The phenomenon of the uneven solidification in the continuous casting process was examined by the numerical simulations. The simulation model which analyze the distortion behavior of the solidifying steel shell was developed. The influence of the mold shape to the growth of the solidifying shell was studied. It was found that the multiple taper design is useful to the even solidification. The numerical model that simulate the free surface flow of the spray water in the secondary cooling of the strand was developed using a particle-based method. The uneven water flow in the width direction was examined, and the over-cooling around the center in width direction was found.

## 1. 緒 言

鉄鋼製造プロセスにおいて、連続鋳造(連鋳)は液体状態の溶鋼をスラブと呼ばれる固体状態に連続的に凝固させるプロセスである。溶鋼は、4面を冷却銅板で囲まれた鋳型内に耐火物性の浸漬ノズルを介して注入され、外周部から凝固していく。凝固した外周部はスラブの幅、厚みと比べて薄く、凝固シェルと呼ばれる。この状態では4面の外周部は薄く凝固しているが、内部には液相の溶鋼が存在する。鋳型の鋳造方向の長さは1m程度で、鋳型の下には、薄い凝固シェルをサポートするロールが複数配置されている。完全に凝固させるために、ロール間には冷却のためのスプレーノズルが配置されており、水や水とエアを混ぜたミストによる冷却が行われている。鋳型を1次冷却帯、鋳型下のスプレー冷却帯を2次冷却帯と称する。

1次冷却帯である鋳型の中では凝固シェルが薄く、凝固の不均一が生じて周囲と比べて更に薄い凝固シェル厚になった場合、凝固シェルが溶鋼の静圧に耐えられずに破断

する場合がある。シェルの破断は未凝固の溶鋼の流出に繋がり、最悪の場合は鋳型の下から溶鋼が漏れだすブ레이크アウトというトラブルになる。凝固シェルはシェル成長に伴って温度が低下し、熱収縮する。長方形型のスラブの場合、長辺側(スラブの幅方向と定義)が短辺側(スラブの厚み方向と定義)に比べて収縮量が多い。そのため、通常のスラブ連鋳機においては、幅を決めている短辺の鋳型銅板に傾き(テーパ)をつけ、鋳型下方にいくほど幅が小さくなるように設定されている。

しかし、このテーパを凝固シェルの収縮に完全に合わせることは難しく、長辺短辺の合わせ面であるスラブのコーナー部近傍で凝固シェルと鋳型の間に隙間が出来やすい。凝固シェルと鋳型との熱抵抗が増加することになり、抜熱は低下する。つまり、スラブのコーナー近傍の抜熱は低下するため、凝固の不均一が発生しやすい。特に鋳型テーパの不適は凝固不均一を助長し、最悪の場合は凝固シェルが破断するブ레이크アウトのトラブルが発生する。鋳型内の抜熱を均一にするために、鋳型のテーパ設計が重要であ

\* 設備・保全技術センター 設備保全企画室 上席主幹 東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071

るが、凝固シェルの状態を鋳型の中で実際に観察することは不可能であり、数値解析により現象を解明するのが有効である。そこで、鋳型内の凝固シェルの変形挙動を解析する数値解析モデルを開発し、鋳型形状が凝固シェル不均一生成に及ぼす影響を検討した。

2次冷却においては、鋳片を最終の支持ロールまでの間に完全に凝固させること、幅方向に均一に凝固させること、幅方向のエッジ部で横割れを発生させないようにすることが重要である。幅方向の均一化については、スプレーノズルの配置、スプレー単体での冷却範囲、幅切り水量の最適化等が行われてきているが、近年、ロールが幅方向に分割されたものが一般的に使用されている関係で、ロール上に溜まった水や、分割ロールの幅方向分割部の軸受部から流れる水等によって、幅方向に冷却の不均一が生じやすくなっている。

しかし、冷却水の挙動は観察困難なため、流動解析によるスプレー水挙動の解析が有効である。そこで、自由表面流れであるスプレー水挙動を可視化出来る流動解析手法として粒子法に着目し、現象を可視化することを試みた。また、流れの可視化が出来れば、スプレー冷却の熱伝達係数を予測することが可能である。粒子法解析で得られた流動挙動を模擬した実験により熱伝達係数を測定し、凝固計算の境界条件として入力することで、幅方向凝固不均一の発生メカニズムについて検討した。

## 2. 凝固シェル変形解析による鋳型形状の最適化

### 2.1 鋳型内凝固シェルの変形解析

従来の凝固変形解析のほとんどは、座標系を鋳片の単位切片に固定した非定常的方法<sup>1)</sup>を用いている。時間を追って周辺の境界条件を変更しながら、温度や応力を計算する方法である。しかしながら、この方法は鋳造方向の温度勾配や応力勾配を考慮出来ない。こうした問題に対し、粘塑性挙動を考慮し、また圧延解析に用いられる剛塑性解析と同様に、空間固定座標系の下で、速度場で解析する方法が提案された<sup>2,3)</sup>。しかしこのモデルは一般化平面歪みを仮定した2次元モデルであり、実際の鋳片に発生する割れ等を表現するには不十分であった。そこで、鋳型内においては凝固シェル厚は鋳片サイズと比較し十分薄いこと、またシェル厚方向の温度分布も比較的単純な分布形状で表現出来ることに着目し、シェル要素を用いた定式化を行うことで、物質移動、凝固を含む相変態・熱収縮・粘塑性挙動まで考慮した3次元有限要素解析モデルを開発した。

凝固計算の方法としては、エンタルピー法、等価比熱法等の種々の方法があるが、ここでは、凝固シェル内の温度分布を2次式で近似出来るとして、熱伝導方程式をルンゲクッタ法で解く方法<sup>4)</sup>を採用した。粘塑性挙動を扱うことから、変形速度を考慮出来るように、歪み速度によるモデル化を適用した。全歪み速度は、下記の式で表現出来る。

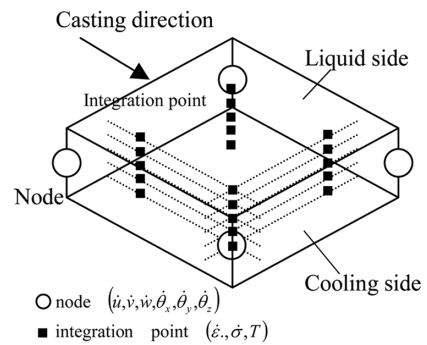


図1 FEM 4節点厚肉シェル要素  
FEM 4-nodes thick shell element

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^{vp} + \dot{\epsilon}^f + \dot{\epsilon}^m \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}^e$ は弾性歪み速度、 $\dot{\epsilon}^{vp}$ は粘塑性歪み速度、 $\dot{\epsilon}^f$ は熱歪み速度、 $\dot{\epsilon}^m$ は変態歪み速度を表す。

粘塑性歪みについては、王<sup>2)</sup>らが提案したモデルを用いた。計算の物性値は、高温引張試験結果<sup>5)</sup>を応力と歪速度の関係式を用いた。

次に有限要素法による定式化を述べる。凝固シェル厚が鋳片のサイズ（幅、厚みや鋳造方向長さ）に比べて薄く、凝固シェル内の温度分布も比較的単純に表現出来る（2次式近似）ことから、変形を有限要素法（FEM）で解析する際に、計算要素として、4節点の厚肉殻（シェル）要素を用いた定式化を行うこととした。図1に、本FEM計算で用いたシェル要素を示す。

温度分布や塑性変形領域は、要素の厚み方向のいくつかの積分点で考慮した。この要素を使用したFEM計算により、物質移動、凝固を含む相変態、及び高温域の粘塑性挙動までを考慮した3次元解析が可能になった。計算の手順は、前述の凝固計算で求めた温度分布を、要素内の各積分点（面内4点+シェル厚方向n点）に与え、剛性マトリクスは一定に保ったまま、荷重速度ベクトルを変更しながら反復計算により、変位速度が収束するまで繰り返し計算を行う。変位速度が収束し、変形状態が計算出来る時、鋳型と凝固シェル間の接触状態が分かる。ギャップがあいた所では、熱伝達が悪くなり、熱流束が小さくなる。小さくなった熱流束を考慮して、凝固を再計算し、上記の変形解析を繰り返す。この手順を反復して、最終的に温度分布、シェル変形挙動が収束するまで計算する。

### 2.2 短辺テーパ形状が凝固シェル成長に及ぼす影響

凝固シェル変形解析モデルにて、鋳型短辺テーパ形状が凝固シェル成長に及ぼす影響を検討するに際して、凝固均一度を評価指標として新たに提案した。吐出流が短辺に衝突し、流れが反転する位置で生じたと考えられる鋳片の鋳造方向に垂直な断面のホワイトバンド形状から、コーナー部での凝固遅れ度合いを評価することが出来る。コーナー近傍の凝固遅れ部の最小シェル厚を正常部のシェル厚で除した値を、凝固均一度として定義した。この指標により、

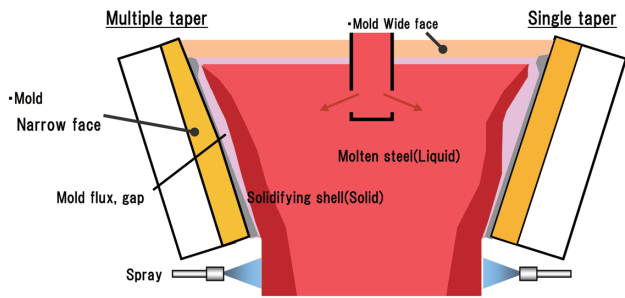


図2 1段テーパとマルチテーパ短辺鋳型の比較  
Comparison between single and multiple taper narrow face mold

鋳型の短辺テーパ形状が、凝固シェル成長に及ぼす影響について検討した。短辺テーパ形状は、長辺の熱収縮形状に近付けることで、鋳片と鋳型の間の接触状態が良くなり、凝固が均一になることが一般的に知られている。

図2に示すように、鋳型の短辺側は収縮に合わせて傾けて使用されるのが一般的で、通常は鋳型の上端から下端まで一定の勾配の1段テーパの鋳型(図2の右側短辺)が用いられている。しかし、熱収縮量は凝固初期に大きく、後期で小さくなるため、より収縮量に合わせた上部強テーパのマルチテーパ鋳型(図2の左側短辺)が提案されている<sup>9)</sup>。図2に示すように、マルチテーパ短辺により、凝固シェルと鋳型とのギャップ量が小さくなると考えられている。

このマルチテーパ短辺の効果を検証するために、開発した数値解析モデルにより、鋳造速度 1.5m/min、鋳片幅 1200mm、鋳片厚み 250mm の条件を解析した。対称性を考慮した幅厚み半分の 1/4 モデルとした。メッシュのサイズは幅方向厚み方向に 5mm、シェル厚み方向は 20mm 厚みを 20 分割した。図3(a)は短辺の傾き(テーパ)が一定である1段テーパ時の凝固シェル厚(上段)と、鋳型と鋳片間のギャップ量(下段)を示す。ギャップ量は鋳型と接触している範囲を接触力に応じた色付けをしている。コーナー部近傍にギャップが生じているため、長辺エッジ部で凝固遅れが発生している。

図3(b)は鋳型の上部を強テーパに、下部を弱テーパにしたマルチテーパ時の計算結果で、コーナー部のギャップが小さくなり、シェルの均一度が増加している。これは凝固の進行に伴う熱収縮速度が、鋳型上部で大きく、下部で小さいことが関係している。1段テーパでは傾きが上部から下部まで一定であるために、鋳造初期の収縮量大きい所でのテーパが不足している。そのためコーナー部でギャップが生成し、凝固が遅れている。これに対して、マルチテーパの場合は、初期の収縮量に対して十分なテーパがあり、コーナー部のギャップが小さくなり抜熱が改善されたと考えられる。

凝固均一度の計算結果と実測値の比較を図4に示す。シェル厚の実測の例を図5に示す。計算値、実測値ともに、マルチテーパ化で凝固均一度が向上している。テーパ設計に

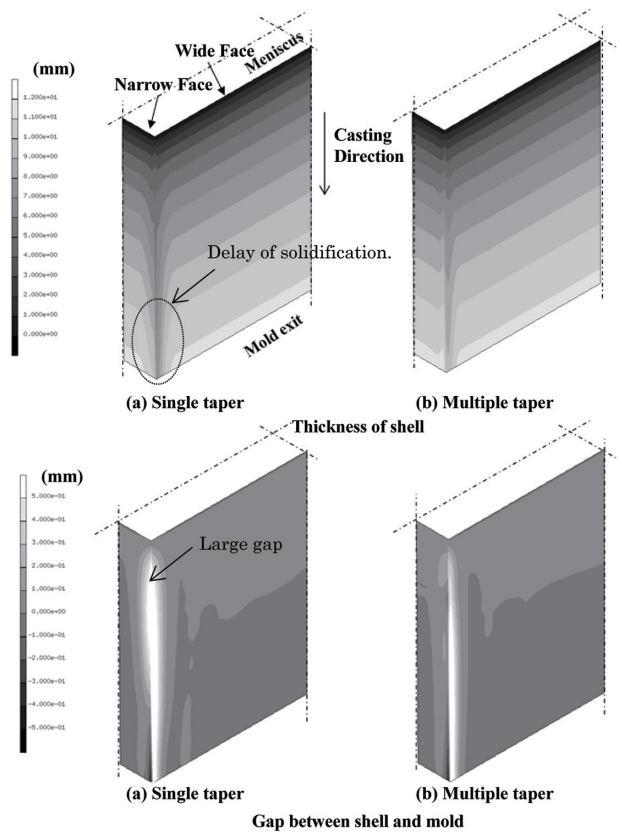


図3 凝固シェル厚と鋳型とシェル間のギャップ量の計算結果  
Calculated shell thickness and gap between shell and mold

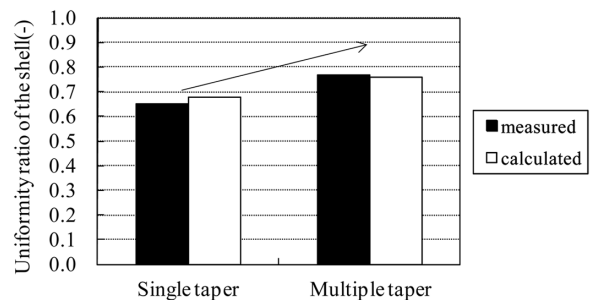


図4 凝固均一度の計算と実測の比較  
Comparison between calculated and measured uniformity ratio of the shell

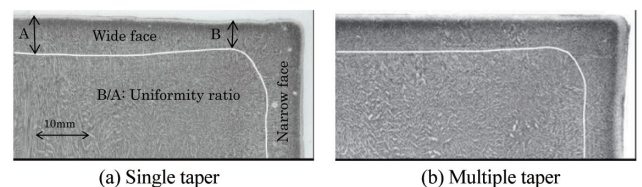


図5 コーナー部近傍の凝固シェル厚の測定結果  
Measured shell thickness near the corner

用いるには十分な精度であることが分かった。開発したモデルを用いて鋳型の短辺形状を最適化し、実機に適用した。

### 3. 粒子法による2次冷却スプレー水挙動の現象解明

2次冷却帯においては、ロール間に幅方向に複数配置し



たスプレーによる冷却が行われており、スプレー単体で幅方向の冷却の均一化を指向してきた<sup>7)</sup>。しかし、スプレー水の挙動、特に複雑に配置された分割ロール軸受部を通る垂れ水やロール上の溜まり水の挙動が十分定量的に解析された報告はなく、幅方向の冷却均一性が十分とは言えないという問題がある。近年、高速鋳造時の薄いシェル厚の鋳片を支持するために、連鋳機のロールピッチは縮小されてきた。これに伴い、ロールの径も小さくなり、剛性が低下しロールの変形が大きくなるという問題があった。そこで、幅方向に複数に分割された短いロールを使用し、ロールの撓み変形量を小さくしてきた。しかし、幅方向に複数の軸受を配置する必要があるため、鋳片を冷却するスプレー水が軸受部を伝って下流側に不均一に流れるという現象が生じた。

この流れが凝固不均一に及ぼす影響を解析するためには、スプレー水の流動挙動を定量的に把握することが重要である。流動解析が有効であるが、格子（メッシュ）を用いた従来手法では複雑自由表面の取り扱いが難しく、メッシュレス手法である粒子法<sup>8)</sup>の適用を考えた。解析で得られたスプレー水の挙動を用いて、種々の条件下で冷却水と鋳片間の熱伝達係数を測定した。測定した熱伝達係数を境界条件にして鋳片の凝固解析を実施した。従来の凝固解析<sup>9,10)</sup>は鋳片幅方向中心の1次元の計算や鋳造方向に垂直な断面の2次元の解析が一般的であるが、幅方向不均一を考慮した解析は十分定量的になされていなかった。そこで、スプレーやロールの一本一本、軸受位置、垂れ水溜まり水の影響を考慮出来るモデルを開発し、幅方向冷却不均一発生の原因について検討した。

### 3.1 鋳片温度不均一の実態

一般的な垂直曲げ型スラブ連鋳機のストランド内の鋳片表面温度を放射温度計により測定した例を図6に示す。鋳造速度は1.0m/minの一定速度において、鋳片サイズ300mm×2200mmの条件で、メナスカスから18mの位置に幅方向スキャン式の放射温度計を設置し、鋳片の表面温度を測定した。連鋳機の2次冷却帯は一般的にロールを複数配置したセグメントにより構成されており、鋳片の表面はセグメント間でしか観察することが出来ない。ロールのピッチも小さいことから、セグメントの整備時の抜き出しを考慮して比較的大きな隙間がある鋳片の曲げ戻しセグメントの上流側で測定した。放射温度計は走査式の単色放射温度計（測定波長1.0μm）を用いた。

図6に示すように、幅方向中央部の温度がエッジ部に比べて100℃以上低くなっていることが分かった。このような幅方向不均一の原因としては、従来から溶鋼流動や2次冷却特にエッジの過冷却防止の目的でエッジ部の水量を減らす操業の影響<sup>11)</sup>が考えられている。しかし、従来の考え方は本例のような中央部の極端な温度低下を説明することは出来ていない。そこで、不均一冷却の原因として、分

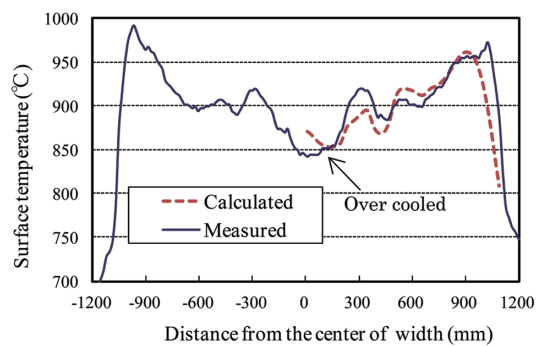


図6 メナスカスから18m位置でのスラブ表面温度の幅方向分布の測定値と計算値の比較

Comparison between the measured and the calculated surface temperatures at 18m below the meniscus

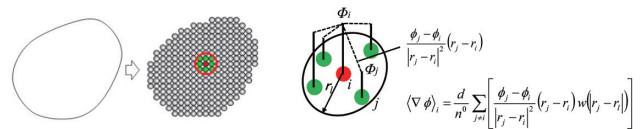


図7 MPS法と勾配φの定式化  
MPS method and formulation of gradient φ

割ロール軸受の配置や、そこを流れるスプレー水の挙動の影響を検討した。

### 3.2 スプレー水挙動のモデル化

スプレー水挙動を計算で求めるために、粒子法(MPS)<sup>12,13)</sup>を適用し、汎用粒子法流体解析ソフトウェア“Particleworks”<sup>14)</sup>に一部機能を追加して解析を行った。ここで解析に粒子法を用いたのは、スプレー水の挙動は自由表面が多く、流動解析に一般的に適用されている有限差分法や有限体積法といった空間に計算格子（メッシュ）を配置した手法では十分な解析が出来ないと考えたためである。粒子法はメッシュレス手法の一つで、計算空間をメッシュ分割する必要はない。そのため、自由表面の表現に優れる。適用したMPS法は、図7に示すように連続体を粒子の計算点として解く方法である。有限体積法等で流動を計算するのと同じ連続の式及びNavier-Stokes式(式(2))を解く際に、図7のような粒子間相互作用モデルを用いて勾配項の離散化を行っている。

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0, \quad \frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u + f \quad (2)$$

ここで、式(2)のuは流速、pは圧力、ρは密度、νは動粘性係数、fは外力(重力)、tは時間を示す。図7は粒子iの位置での物理量φの勾配ベクトルの離散化を示しており、rは粒子の位置、dは空間次元数、n<sup>0</sup>は粒子密度、wは重み関数で粒子間の距離が離れると影響が小さくなるように設定されている。〈 〉は粒子間相互作用モデルであることを表現する記号を示す。

計算において、粒子径3mm、水とロール・スラブとの接触角30°、スプレー噴射は楕円形状でモデル化すること

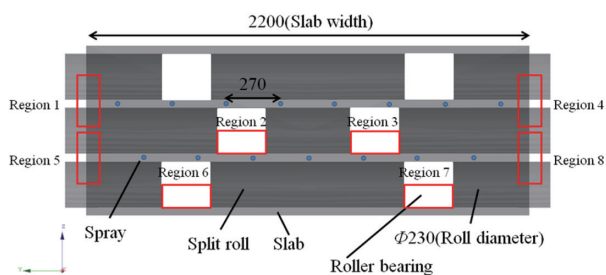


図8 ロール間のスプレー水挙動解析モデル (単位: mm)  
Simulation model for spray water flow between rolls (unit: mm)

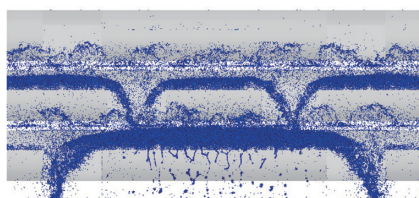


図9 スプレー水の流動挙動の計算結果 (スラブ側から可視化)  
Calculated spray water flow (view from slab side)

にした<sup>15)</sup>。

ストランド内の特徴的な軸受配置部位を抜き出し、ロール3段と、その間のスプレー2段をモデル化して解析することにした。図8に解析モデルを示す。スプレーは上段8本、下段7本で鋳造方向には千鳥で配置した。ロールは3本に分割されており、幅中心部に2箇所の間軸受が配置されている。スプレーとスラブの距離は155 mm、スプレーの噴射角度は幅方向100°、鋳造方向30°とした。

### 3.3 粒子法によるスプレー水挙動解析と実測による検証

図8のモデルにて解析した結果を図9に示す。スプレー噴射開始5秒後をスラブ側から可視化した。

スプレー1本あたり20L/minの水量で噴射した結果であるが、鋳片に噴射された冷却水が軸受部を通って下流側に垂れ水として不均一に流出し、その水が下流側ロールの上部に溜まり背面に溢れ出ることが分かった。モデルの精度については、水モデルにより確認した。水モデルは、アクリル製のパイプをスラブを模擬したアクリル板に押し当て、パイプの間に設置したスプレーから水を噴射した。実験結果の可視化例を図10に示す。スプレー1本あたりの流量は20L/minであり、図9の計算と同じである。

軸受を通してスプレー水が下部に流出する挙動や、ロール上に溜まる水の挙動が計算で良く表現出来ていることが分かった。より定量的に解析結果を評価するために、軸受部やスラブ端から流出する水の流量を計算と実験と比較した。その結果を図11に示す。

図8で定義したRegion 1～8の位置において、計算と実測で得られた流量は定量的にも良い一致を示した。3つのグラフはそれぞれ、スプレー1本あたりの流量が5, 10, 20L/minの場合を示す。Region 6, 7の流量が高水量側で実

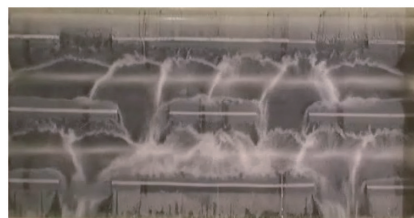


図10 スプレー水の流動挙動の水モデルによる確認結果 (スラブ側から可視化)

Measured spray water flow from the water model (view from slab side)

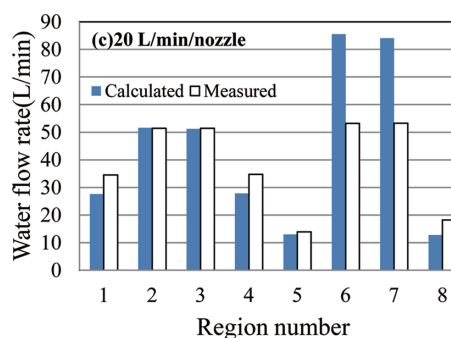
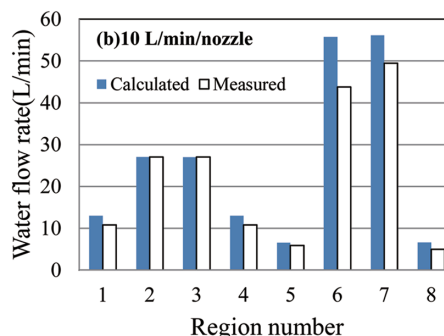
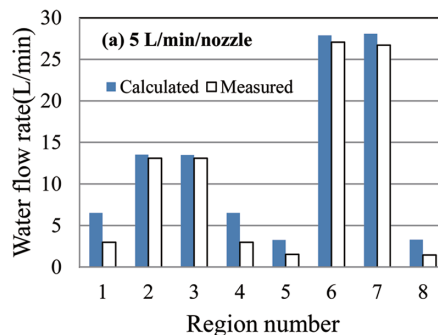


図11 流量の計算と水モデル実験の比較

(a) スプレー1本あたりの流量5L/min (b) 10L/min (c) 20L/min

Comparison between the calculated and the measured water flow rates

(a) Water flow rate of each nozzle is 5L/min. (b) 10L/min. (c) 20L/min.

測と計算に差が出ているが、これはアクリルパイプの径が計算で用いたロール径と若干異なるため、ロール上に溜まる水の量が異なり、系外にあふれ出る水の量に差が生じたためと考えている。

本解析により、分割ロールの中間部のロールで溜まり水

が多く発生していること、軸受位置でロールに溜まった水が下方に流れることが分かり、これらの冷却水の挙動がスラブ幅中心部近傍の過冷却に影響しているのではないかと考えた。そこで、スプレー水挙動を考慮した凝固解析を行うことにした。

### 3.4 2次冷却帯の凝固計算による幅方向温度不均一の評価

2次冷却帯の凝固状態を把握するためには、上述の垂れ水等を考慮した凝固計算が必要である。熱電対を複数設置した鋼板を加熱し、垂れ水や溜まり水を模擬してスプレー冷却による熱伝達係数測定実験を行った<sup>16)</sup>。図12にスプレー単体での熱伝達係数測定の様子を示す。雰囲気制御された炉で900℃に加熱した鋼板を炉から取り出した後にすぐにスプレーで冷却し、測定した温度を逆解析<sup>17)</sup>して熱伝達係数を求めた。

種々のスプレー水量や鋼板温度で実験を行い、熱伝達係数を、スプレー局所水量密度、鋼板表面温度、スプレー衝突圧の関数として整理した。

垂れ水の影響は、スプレーの上部から軸受垂れ水を模擬した水流を付与して熱伝達係数を測定した。垂れ水の水量は、粒子法の解析で得られた流量(図11)を参考にして設定した。溜まり水の影響については、鋼板にロールを模擬した鉄板を付加して冷却試験を実施した。水がロール上に溜まっているだけでは冷却効果はあまりないが、溜まり水とスプレー水が干渉すると、干渉部位での水が攪拌されて冷却が促進されることが分かった。これらの試験により、スプレー単体、垂れ水溜まり水とスプレーの干渉部位等の熱伝達係数が計測出来たので、その値をストランド内の凝固計算の境界条件とした。熱伝達の境界条件は、ロール間を4つの領域に分割した(図13)。

Iはロール冷却領域、IIは空冷あるいは軸受垂れ水領域、IIIはスプレー冷却領域、IVはロール溜まり水あるいはスプレー垂れ水領域を示す。スラブの幅方向については、垂れ水とスプレー水の干渉部位(II)に、垂れ水だけの時と比べて1.1倍の熱伝達係数を与えた。同様に、溜まり水とスプレー水の干渉部位(IV)に、溜まり水だけの時と比べて1.5倍の熱伝達係数を与えた。この倍率は前述の垂れ水と溜まり水を考慮した熱伝達係数測定試験より算出した。

その結果、スラブの幅中心部で過冷却になっていることが分かり、凝固が幅方向で不均一になっていることが示された(図14)。図14(a)は表面温度、図14(b)は熱伝達係数、図14(c)はスラブ厚みの中心固相率を示す。図14(b)の熱伝達係数は、メナスカスから5m近傍位置の幅中心部で、前述のロール溜まり水とスプレー水の干渉により大きくなっている。この影響でメナスカスから5m程度の位置の表面温度は低下し、図14(c)の中心固相率分布から、幅中心部がスラブのエッジ近傍よりも先に凝固が完了している

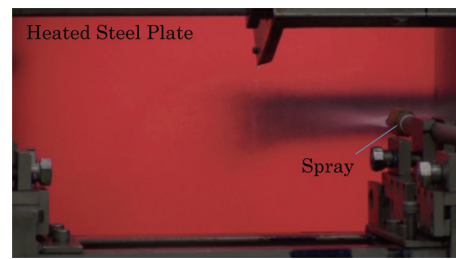


図12 実験の様子(高温に加熱した鋼板をスプレーにより冷却)

Experimental image (water is sprayed on the heated steel plate)

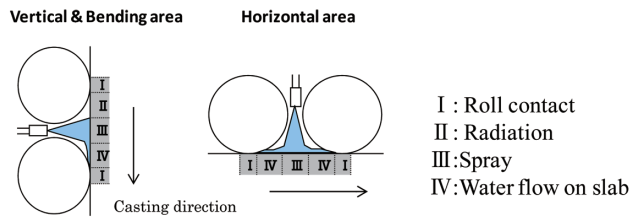
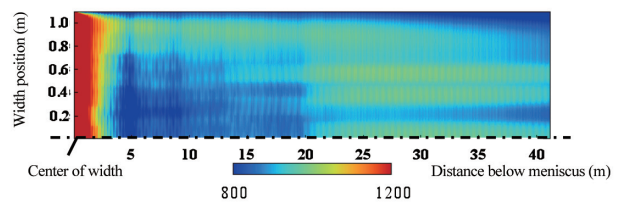


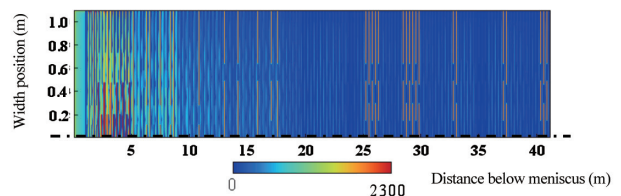
図13 凝固計算の境界条件

Boundary conditions for the simulation model of solidification

(a) Surface temperatures (°C)



(b) Heat transfer coefficients (W/m²K)



(c) Center solidus ratios (-)

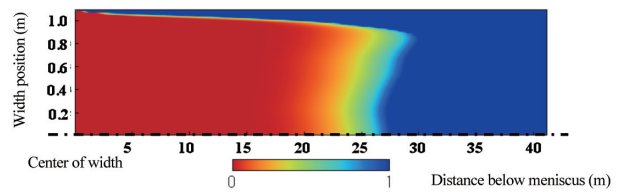


図14 凝固計算結果

(a) 表面温度 (b) 熱伝達係数 (c) 厚み中心固相率  
Calculated results of solidification

(a) Surface temperature. (b) Heat transfer coefficients. (c) Solid fraction at the center of the slab in thickness.

ことが分かる。

前述の放射温度計での表面温度測定結果と計算結果との比較を図6に示す。中心部がエッジ部近傍に比べて100℃以上温度が低くなっている傾向が良く説明出来た。中心部過冷却の原因は、ロール軸受を通るスプレー垂れ水が分割ロール中央部に溜まり、溜まり水とスプレーが干渉



して熱伝達係数が増加したことによると考えられる。

#### 4. 結 言

- 連続鋳造鋳型内の凝固シェル変形挙動を解析する3次元モデルを開発し、鋳型短辺テーパー形状が凝固シェル成長に及ぼす影響を定量的に評価した。短辺が1段テーパーの場合はコーナー部近傍に凝固シェルと鋳型の間にギャップが生じて凝固遅れが発生することが分かった。マルチテーパー(上部強テーパー)を採用することで、コーナー部のギャップが減少し、凝固が均一になることが分かった。凝固均一度の実測値は計算値と定量的に一致し、解析の精度が確認出来た。本モデルを用いて短辺鋳型形状を最適設計し実機適用した。
- 連続鋳造の2次冷却で生じる鋳片幅方向の凝固不均一現象の発生原因を究明するために、ストランド内のスプレー水の挙動を粒子法で数値解析した。またスプレー水の流動挙動が鋳片冷却の熱伝達係数に及ぼす影響を考慮した凝固解析を行った。粒子法によるスプレー水挙動解析により、軸受部でスプレー水が下流側に流出する垂れ水挙動や、ロール上にスプレー水が溜まる挙動が明らかになった。流動解析で明らかになった垂れ水、溜まり水とスプレー水の干渉を模擬した熱伝達係数の測定試験を実施した。実測した熱伝達係数を用いて凝固計算した結果、ストランド内の2次冷却軸受間の垂れ水及びロール溜まり水は凝固シェルの幅方向不均一に影響していることが分かった。解析で得られた幅方向の温度分布は、放射温度計を用いた測定値と良く一致した。幅中央部での極端な温度低下は、ロール中央部に溜まる溜まり水とスプレー

水の干渉による強冷却が影響していると考えられる。

#### 参考文献

- 1) Thomas, B.G. et al.: Modeling of Casting and Welding Processes IV. Metals & Materials Society, 1988, p. 287
- 2) Wang, Z. et al.: Transactions of the JSME, Series A. 53 (492), 1739 (1987)
- 3) Tatsumi, N. et al.: Transactions of the JSME, Series A. 55 (514), 1389 (1989)
- 4) Ohnaka, I.: Introduction of Computer Simulation of Heat Transfer and Solidification. Maruzen, 1985, p. 184
- 5) Matsumiya, T. et al.: Tetsu-to-Hagané. 68, 1782 (1982)
- 6) Matoba, Y. et al.: Transactions of the JSME, Series A. 66 (646), 1127 (2000)
- 7) Matsukawa, T. et al.: Kawasaki Steel Giho. 19, 7 (1987)
- 8) 越塚誠一: 粒子法. 丸善, 東京, 2005
- 9) Petrus, B. et al.: Metall. Mater. Trans. 42B, 87 (2011)
- 10) Kimura, M. et al.: CAMP-ISIJ. 2, 1154 (1989)
- 11) Yoshida, T. et al.: CAMP-ISIJ. 1, 168 (1988)
- 12) Koshizuka, S. et al.: Nucl. Sci. Eng. 123, 421 (1996)
- 13) Koshizuka, S. et al.: Fluid Dynamics J. 4, 29 (1995)
- 14) Particleworks Ver.4.0.1 User's Manual. Prometech Software Inc., 2012
- 15) Yamasaki, N. et al.: Tetsu-to-Hagané. 99, 593 (2013)
- 16) Kubori, S. et al.: AISTech. 2010
- 17) Beck, J.V.: Inverse Heat Conduction. Wiley-Interscience Publication, Hoboken, 1985



山崎伯公 Norimasa YAMASAKI  
設備・保全技術センター  
設備保全企画室 上席主幹  
東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071



土岐正弘 Masahiro DOKI  
君津製鉄所 設備部 プロセス開発室 主幹



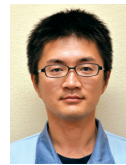
嶋 省三 Shozo SHIMA  
設備・保全技術センター  
プラントエンジニアリング部  
連铸エンジニアリング室 上席主幹



加藤雄一郎 Yuichiro KATO  
君津製鉄所 製鋼部 製鋼品質技術室 主幹



恒成敬二 Keiji TSUNENARI  
機材調達部 設備調達室 主幹



三木大輔 Daisuke MIKI  
名古屋製鉄所 生産技術部 主幹



林 聡 Satoru HAYASHI  
プロセス研究所 プロセス技術部  
熱プロセス技術応用開発室 主任研究員



中西健雄 Takeo NAKANISHI  
大分製鉄所 製鋼部 製鋼技術室 主査