

## 論文の内容の要旨

論文題目 計算機シミュレーションを用いた連続鋳造における冷却過程での凝固不均一の改善に関する研究

氏名 山崎 伯公

### 1. 序論

鉄鋼製造プロセスにおいて、連続鋳造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。連続鋳造プロセスにおける操業上および品質上の課題には、1次2次冷却過程での凝固不均一生成が大きく影響している。凝固シェルの成長挙動を直接観察することは難しく、本研究では、連続鋳造プロセスの鋳型内および2次冷却過程における凝固不均一生成メカニズム解明とその改善を目的に、下記の計算機シミュレーションを用いた研究開発を行った。

鋳型内の凝固シェルの成長挙動を計算するために、一定鋳造速度の定常状態を仮定したオイラー座標系で凝固シェル変形を速度場で解く方法を適用した3次元FEM解析モデルを開発した。開発した数値解析モデルにより、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、鋳型の短辺テーパ形状の最適化による凝固不均一改善の検討を行った。

2次冷却過程での凝固不均一生成に影響しているスプレー水の挙動を計算するために、粒子法解析手法であるMPS法の汎用商用コードであるParticleworksを適用した。計算で用いる粒子径、表面張力等の影響を検討した。流動状態の解析精度について、水モデルを用いた流量測定結果との突合せを実施した。本計算モデルにより可視化した結果によりスプレー水挙動を把握し、不均一冷却生成のメカニズムについて検討した。

2次冷却過程での幅方向の不均一凝固を計算するために、鋳造方向に垂直な断面の2次元断面を、周囲の境界条件を時間に応じて変更しながら計算するモデルを開発した。幅方向に複数配置されているスプレー1本1本の水量を個別に考慮して熱伝達係数の境界条件として入力できるモデルを開発した。更に、鋳片の支持に用いられているロールによる冷却、分割ロールの軸受部を流れるスプレー水による冷却、ロール上に滞留する水による冷却、冷却水が全くかからない部位での輻射冷却を位置ごとに考慮できるモデルを開発した。実

際連続鋳造で用いられているスプレーを使って、熱伝達係数の実測を行った。開発した凝固解析モデルに、粒子法解析により得られたスプレー水挙動を模擬した実験で得られた熱伝達係数を境界条件として用いることで、幅方向の凝固不均一発生メカニズムを解明し、その改善方法について提案した。

これらの計算機シミュレーションにより、連続鋳造における冷却過程での凝固不均一生成メカニズムを解明し、その改善に関する研究を行った。

## 2. 鋳型内凝固シェルの変形解析を用いた凝固不均一の改善

連続鋳造鋳型内での凝固シェルの変形挙動を解析する計算モデルを開発し、鋳型短辺テーパ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。解析精度の検証方法や幅可変鋳型での短辺形状の最適化による凝固不均一の改善方法について検討した。

凝固シェル変形解析モデルの精度を検証する方法として、長辺側のコーナー近傍の凝固遅れ部のシェル厚を健全部シェル厚で除した値で定義した凝固均一度による評価を提案した。また、凝固シェルと鋳型間の接触力を評価する指標として計算で得られた接触力を短辺の面全体で積分した値を摩擦拘束力と定義し、限界値との比較を行うことで鋳片の鋳型による拘束の有無を判定することを提案した。

短辺テーパ形状が凝固シェル成長に及ぼす影響を解析し、短辺が1段テーパの場合はコーナー部近傍に凝固シェルと鋳型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（上部強テーパ）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、解析の精度が確認できた。

実際のスラブ連鋳機で一般的に使用されている幅可変型のスラブ連鋳機にマルチテーパを適用する場合、幅に応じて上下のテーパ率の変動することが分かった。幅が狭い場合は上テーパが強くなり、下テーパが弱くなる。また、上テーパと下テーパの傾きの変更位置が下流側になる程、鋳片と鋳型間の摩擦拘束力が大きくなることが分かった。凝固均一度は、幅が大きくなるほど上昇し、それに伴って摩擦拘束力も上昇することが分かった。幅拡大による凝固均一度の増加傾向は実測でも確認できた。鋳造する幅の範囲に応じて、テーパ形状を設計するのが有効であることが分かった。

開発したモデルを用いて、すべての幅で凝固均一度が1段テーパよりも大きくなり、摩擦拘束力が限界値以下になるようにマルチテーパ短辺形状を設計し、実機に適用し凝固不均一が改善することが分かった。

## 3. 粒子法による鉄鋼連続鋳造のスプレー水挙動解析による凝固不均一生成の現象解明

2次冷却過程のスプレー冷却の不均一性に着目し、鋳片に噴射されたスプレー冷却水がロール上に溜まったり、軸受と鋳片の間を不均一に垂れたりする流動現象を、粒子法による流体解析により検討した。

2 次冷却水の挙動を粒子法で検討する場合、計算に使用する粒子直径は $\phi 3\text{mm}$  が計算精度および計算時間を考慮した時に最適であることが分かった。また、水とロール・スラブ間の接触角がスプレー水の挙動に及ぼす影響は小さいことが分かった。

ロール 3 段とその間に配置された 15 本のノズルをモデル化し、1 本あたりの流量を 5~20L/min の条件で粒子法による流動解析を実施した。計算された軸受け部を不均一に流れる流れやロール上に溜まった水が溢れだす流動パターンが、水モデル実験の可視化結果と定性的に良く一致することが分かった。

粒子法解析の精度について、水モデル実験にて検証した。その結果、軸受を垂れる水や端部に流れるスプレー水の流量は計算と実測で定量的に良く一致した。スプレー水のスラブに衝突してからの流動挙動を解析する手法として粒子法が有効であることが示された。

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。また、垂れ水とスプレーが衝突することによって、水量密度がスプレー単体の時と比べて大きくなることが計算で示された。水量密度増加は熱伝達係数増加につながり、軸受部で過冷却になっている可能性がある。また、ロール上の溜まり水はスプレーが衝突することで流れが乱されていることが計算された。この部位でも熱伝達係数が増加し過冷却になっていると考えられる。

解析結果を CG 化することで、実機では見ることができないスラブに衝突したスプレー水の流れを水モデルよりも詳細に観察することができるようになった。

粒子法解析の計算時間は、GPU を使用することで、4 段のスプレーのケースにおいて粒子数約 56 万個で 5 秒計算するのに約 60 時間必要であった。定常状態になる 2 秒程度の計算の場合は 24 時間での計算が可能であり、実用上十分な計算速度である。

#### 4. 2 次冷却の凝固解析を用いた凝固不均一の改善

連続鋳造の 2 次冷却で生じる鋳片幅方向の凝固不均一発生原因の究明と、その改善の方法を検討するために、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。これらの結果から以下のことが明らかになった。

粒子法による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。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スプレー水と干渉したり、分割ロール中央部の溜まり水とスプレーが干渉したりして熱伝達係数が増加したことによると考えられる。

中心部過冷却を防止し均一な凝固を実現するために、垂れ水と干渉するスプレーを止水したり、ロール上の溜まり水を除去するためにロールにスリットを設置したりする対策を実施した。スリットロールの効果を開発した凝固解析モデルで検討した結果、スラブの幅

方向で従来 100℃以上の温度差が発生していたが、スリットロールによる対策により、その温度差は 50℃程度に低減することが分かった。実際にスリットロールを導入した試験を実施し、中心過冷却が緩和され、幅方向に均一に凝固することが確認できた。スプレーや分割軸受位置を新規に設計する際には、これらの干渉が生じないように考慮することが重要であることが分かった。

## 5. 結論

連続鋳造における凝固不均一の生成現象を、計算機シミュレーションを用いて明らかにした。開発した数値解析モデルにより凝固不均一改善策について検討し、1次冷却では鋳型短辺形状の最適化を実施しマルチテーパ短辺を実機化し、鋳型内の凝固不均一が改善した。2次冷却では、幅中心部の過冷却現象を明らかにし、その改善策として、スプレーと垂れ水や溜まり水との干渉を回避した冷却方法を提案し、実機にて凝固が均一化することを確認した。