

# 連続铸造铸片品質向上のための非金属介在物低減技術の開発

## Improvement of Continuously Cast Slabs Quality by Decreasing of Nonmetallic Inclusions

中 島 潤 二\*  
Junji NAKASHIMA

藤 健 彦  
Takehiko TOH

### 抄 録

高品質铸片製造を目的に、連続铸造プロセスにおける溶鋼および連続铸造铸片の清浄性を評価し、清浄性悪化要因を明らかにした。铸片清浄性確保のためには、タンディッシュへの取鍋スラグ流出防止、タンディッシュ湯落ち部でのスラグの巻き込み防止、タンディッシュでの空気酸化防止が重要である。新日本製鉄にて開発した電磁力を利用した铸型内溶鋼流動制御技術(铸型内電磁攪拌およびLMF)の適用により、铸片表面および铸片内部の清浄性に優れた铸片が製造可能となった。

### Abstract

In order to achieve high quality slab production, to assess the cleanliness of the slab and the cleanliness of the molten steel in the tundish in continuous casting process, made it clear aggravating factor of cleanliness. To ensure the cleanliness of the continuously cast slabs, it is important to prevent the ladle slag outflow, tundish slag entrapment at the teeming point of tundish, and air oxidation. By the application of molten steel flow in mold control technology using electromagnetic force was developed by Nippon Steel Corporation (In-mold electromagnetic stirring and Level Magnetic Field), the slab can be manufactured with excellent internal cleanliness and surface cleanliness of slabs.

## 1. 緒 言

連続铸造铸片に要求される品質レベルは、需要家の生産効率化のための無欠陥指向や加工特性向上の要求を受け、近年特にその厳格さを増している。これら高品位かつ高機能材の製造を可能とするために必要な高品質铸片製造に対処するために、溶鋼の徹底的な清浄化、铸片の重手入れ化など、数々の対策が実施されてきた。

鋼中の非金属介在物(以下、介在物)は一般的には製鋼起因の品質欠陥を発生させる大きな要因の一つであり、鋼中に残存することにより直接的に製品の疵発生の原因になる場合と、ノズル詰まり等を発生する事により、铸型内溶鋼の偏流発生やパウダー巻き込み等の操業異常を引き起こすことにより間接的に疵発生の原因となる場合とがある。

一口に高品質鋼といっても、鋼材が使用される用途に応じて、要求される品質特性が異なるため、用途に応じて必要とされる介在物の大きさ、組成、量が異なる。内堀ら<sup>1)</sup>が、高品質鋼に要求される品質特性と製鋼工程での制御目標を整理しているように<sup>1)</sup>、製品の用途に応じて必要と

なる材質、材質評価方法が異なり、結果として、品質を決定する介在物の大きさ、量、組成も異なってくる。また、厳密に言えば、顧客の加工技術、評価方法によっても変化する。本報では、先ず、一般的な介在物低減の考え方を示し、次に、薄板材を例に、高品質铸片製造のための連続铸造工程での清浄性悪化要因の解析例を示し、基本的な介在物低減の考え方を示す。次に、電磁力を利用した介在物低減のための取り組みを示し、今後の課題を論ずる。

## 2. 介在物低減の考え方

介在物を低減し無害化する方法としては、大別すると、(1)介在物の量、サイズを低減する方法と(2)介在物の組成、形態制御を実施する事により無害化する方法との2つがある。

前者の例としては軸受鋼<sup>2,3)</sup>、ブリキ材、自動車用大外板などのアルミニウム脱酸鋼が知られており、二次精錬工程における処理時間確保、スラグ改質等による $Al_2O_3$ 系介在物の徹底した除去とタンディッシュにおける再酸化防止が図られている。後者の例としては、スチールコード<sup>4)</sup>、弁

\* プロセス研究開発センター 製鋼研究開発部 主幹研究員 環境科学博士 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

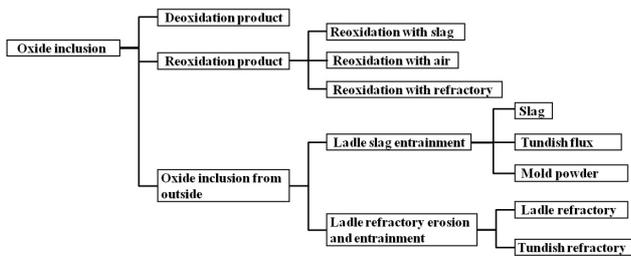


図1 介在物の生成起源<sup>1)</sup>  
Origin of inclusions

ばね材があり弱脱酸鋼の場合が多く、圧延時に延伸し易い、低融点かつ硬質介在物が析出しない介在物組成に組成制御されている。

図1<sup>1)</sup>に介在物の生成起源の考え方の一例を示すが、酸化物系介在物の生成起源は(1)脱酸剤投入時に生成する脱酸生成物、(2)スラグとの反応、空気酸化により生成する再酸化生成物、(3)取鍋、タンディッシュスラグの巻き込み、モールドパウダーの巻き込み等に起因する外来系介在物に大別される。高纯净鋼の究極の姿として軸受鋼<sup>2,3)</sup>が、介在物組成制御による無害化の例としてスチールコード<sup>4)</sup>、弁ばね材があるが、本報では汎用鋼の介在物除去の考え方、プロセス条件との関連を見る目的で、アルミニウム脱酸鋼である薄板材を例にして論ずる。介在物は表面清浄性と内部清浄性、定常部と非定常部とに大別され、鋳片内の厚み方向位置と、鋳造長さ方向の位置とに分けて考えられるが、これらの要因を考慮して、製品品質の確保と生産性との折り合いをつけているのが、現状である。

### 3. 連続鋳造プロセスにおける清浄化技術

#### 3.1 再酸化挙動

笹井<sup>5)</sup>らは、実機タンディッシュ (TD) のキャストスタート1鍋目の成分変化と空気による溶鋼再酸化モデルによって、溶鋼の再酸化量を注入初期と定常期に大別し、要因別に(a)空気によるTD注入点での空気酸化、(b)空気による表面からの溶鋼酸化、(c)取鍋詰め物による溶鋼酸

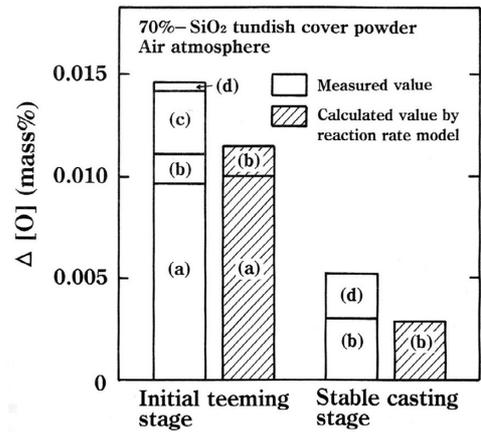


図2 再酸化要因別のTDでの溶鋼再酸化量<sup>5)</sup>  
Amount of oxidation of molten steel in the tundish by factor responsible for reoxidation

化、(d) TDフラックスによる溶鋼酸化、に分けて定量化した。その結果を図2<sup>5)</sup>に示す。注入初期には空気によるTD注入点での再酸化が、定常期では空気による溶鋼酸化とTDフラックスによる溶鋼酸化がほぼ同程度であることを明らかにしている<sup>5)</sup>。同様の試みは樋口ら<sup>6)</sup>、田中ら<sup>7)</sup>によっても実施されており、笹井は表1<sup>8)</sup>にその結果をまとめている。研究者間でデータの採取位置、評価手法に違いはあるものの、注入初期では空気による溶鋼酸化、鍋交換期には取鍋スラグによる溶鋼酸化、定常期には取鍋スラグ、TDフラックスおよび空気が主な再酸化要因とされている<sup>8)</sup>。

#### 3.2 継ぎ目部非定常部鋳片における介在物の起源

3.1で述べたようにタンディッシュ内での溶鋼清浄性悪化要因の調査、解析が実施され<sup>5-8)</sup>かなり明確にされている。しかしながら、実操業では、タンディッシュ以降に浸漬ノズル、鋳型を経て鋳造されるために、浸漬ノズルへの介在物付着<sup>9,10)</sup>および脱落、鋳型、連続鋳造ストランド内での介在物の凝集、合体<sup>11)</sup>、浮上の可能性も考えられ、タンディッシュでの介在物挙動がどのように鋳片清浄性に反

表1 鋳造中の溶鋼再酸化要因別の溶鋼酸化の影響<sup>8)</sup>  
Influence of oxidation of molten steel by reoxidation factors during casting

Reoxidation factors		Author et al.		Higuchi et al.		Tanaka et al.	
		Stable casting stage	Initial teeming stage (transition stage)	Stable casting stage	Ladle exchange stage (transition stage)	Stable casting stage (1st. ladle)	Stable casting stage (3rd. ladle)
Air	Reoxidation at teeming point		66			80	60
	Reoxidation at molten steel surface	57	10		24		
	Reoxidation with TD flux	43	3	27			
Slag	Reoxidation with ladle slag			73	76		
	Ladle slag entrainment into TD					20	40
	Reoxidation with silica sand		21				
	Reoxidation with refractory						

映されているかを確認する事が重要である。しかしながら、铸片の清浄性評価には多くの作業を要し、清浄性が劣位である部位の評価には特に時間を要する事等のために、取鍋交換部位の実铸片での介在物挙動で評価した清浄性の違いは必ずしも明確になっていない。

著者らは一般的な舟形タンディッシュを有する垂直曲げ連続铸造設備の取鍋交換部位铸片の清浄性をスライム法により評価<sup>12)</sup>した。表2<sup>12)</sup>に示すような铸造条件で铸造した铸片を铸造長さ方向に採取し調査に供した。図3<sup>12)</sup>に示すように取鍋交換部位の铸片では大型の球状介在物が増加しており、铸片介在物の組成分析および熱力学計算により(図4<sup>12)</sup>)、取鍋スラグの流出、タンディッシュスラグの巻き込みに起因し、再酸化によりアルミナクラスターが粗大化している事が明らかになり(図5<sup>12)</sup>)、3.1で述べた、タンディッシュ内溶鋼の調査結果と定性的に一致した。

以上の結果より、実铸片の評価によっても、同鋼種連続铸造(連々铸)時の継ぎ目部铸片に代表される非常常部铸

表2 铸造条件<sup>12)</sup>  
Casting conditions

Casting velocity	1.2 m/min
Strand width	1.12 - 1.16 m
Strand thickness	0.24 m
Tundish capacity	40 × 10 <sup>3</sup> kg

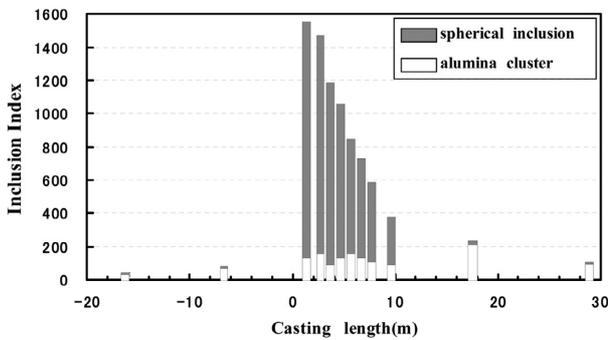


図3 再酸化要因別のTDでの溶鋼再酸化量<sup>12)</sup>  
Distribution of inclusion index

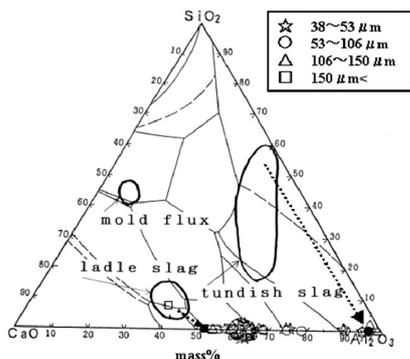


図4 熱力学計算結果による介在物の起源<sup>12)</sup>  
Thermodynamic calculation results (+3.8m)

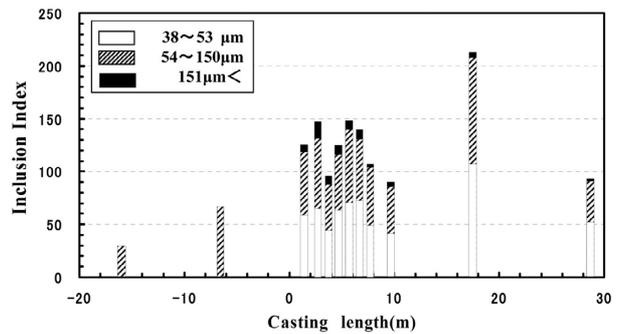


図5 介在物指数(アルミナクラスター)の铸造長さ方向の推移<sup>12)</sup>  
Distribution of inclusion index (alumina cluster)

片の清浄性向上のためには、タンディッシュへの取鍋スラグ流出防止、タンディッシュ湯落ち部でのスラグの巻き込み防止、タンディッシュでの空気酸化防止が重要である事が確認された。

### 3.3 溶鋼再酸化の防止対策

図6に溶鋼~TD~連続铸造モールドにいたる溶鋼再酸化の考え方を概略図で示す<sup>13)</sup>。図示した再酸化要因の各々の寄与率は前述のように铸造時期によって大きく異なる。

再酸化要因に応じた、再酸化防止対策の考え方は概略以下の通りである。

- (1) 空気による溶鋼酸化防止: TDの密閉化かつArシール、溶融フラックスによるタンディッシュ内溶鋼被覆
- (2) 取鍋スラグによる溶鋼再酸化防止: TDへの取鍋スラグ流出防止(電磁式)およびスラグ組成制御(低(FeO + MnO) + 高CaO/SiO<sub>2</sub>化)
- (3) TDフラックスによる溶鋼再酸化防止: 高CaO/SiO<sub>2</sub>かつ低SiO<sub>2</sub>化
- (4) 連々铸時のTD浸漬開孔: 鍋交換時のTD内溶鋼量確保
- (5) 取鍋詰め物: 低SiO<sub>2</sub>二層構造化

以上のような考え方にに基づき、連々铸時の操業条件の見直し<sup>14-18)</sup>、タンディッシュ形状の見直し<sup>18-21)</sup>も実施され定

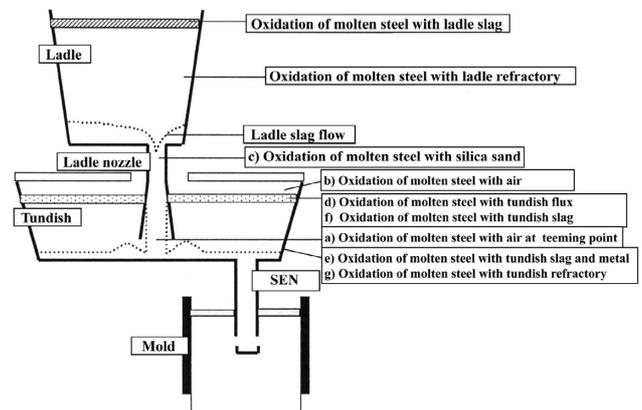


図6 溶鋼再酸化の概念図<sup>13)</sup>  
Schematic diagram of molten steel reoxidation

常部の鋳片品質は格段に向上した。しかしながら、非定常部での清浄性のばらつきは定常部に比較して大きく、製品に求められる品質は年々厳格化していることから非定常部を含めた鋳片品質向上技術の開発が必要とされた。

### 3.4 介在物挙動の電磁力による制御

#### 3.4.1 電磁場利用技術

鉄鋼業では、電磁誘導もしくはアークを利用した加熱を始めとして、多くの工程で電気エネルギーを利用している。特に連続鋳造工程では高温環境下で種々の遠隔作用を必要とすることから、電磁気が有する種々の機能を多く活用している。

電磁力を多用する理由は、基本的な品質作り込みのためにクリーンな遠隔作用が必要であることに加えて、連続鋳造用鋳型寸法が1 mのオーダーであり誘導コイルや電源などの装置の製作可能な寸法であること、もともと鋳型など水冷された環境があり熱的な不安要素が少ないこと、同一の作用をもたらす他の技術と比較して効果及びコスト上優位である等による。新日本製鐵の連続鋳造工程においても渦流レベルセンサーやスラグ流出検知等の検知技術、タンディッシュの加熱や鋳型内流動制御等実用技術に加えて軟接触鋳造やプラズマ表面処理等のより高機能な技術開発において多種多様な電磁場の機能を活用しているが、本稿では、鋳片の介在物品質を最終的に決定する鋳型内流動の制御技術について詳述する。

#### 3.4.2 鋳型内電磁攪拌

スラブ鋳造に関しては、新日本製鐵では、リムド鋼の連続鋳造化を狙いとして最初にリアモーター式電磁攪拌(EMS)が導入された。未脱酸鋼のCO管状気泡の生成を流動の付与により抑制する目的であった<sup>22)</sup>。その後、凝固均一化による縦割れ抑制、鋳片表層への気泡・介在物捕捉抑制による薄板表面品質向上の効果(図7)<sup>23)</sup>が得られ、

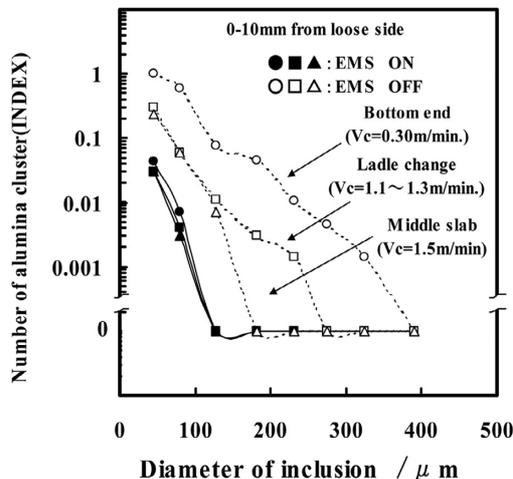


図7 アルミナクラスターの粒子径分布に及ぼすEMSの効果<sup>23)</sup>  
Effect of EMS on diameter distribution of alumina clusters

各所への装備が進んできている。

鋳型内電磁攪拌では、臨界流速を超える流動を鋳片表層に均等に付与することが重要であるため、初期の導入以降、均一攪拌性を指向した技術開発を継続している。スラブの連続鋳造は扁平な矩形の鋳造空間内に単一の2孔吐出口を有する浸漬ノズルで注入し、電磁攪拌流と注入流の干渉が均一攪拌を阻害する。鋳型内メニスカス部を中心に水平旋回攪拌を付与するが、注入流との干渉を極力少なくする。

電磁場の点では、3相リアモーターを使用し、交流移動磁界であるため、制御パラメータは寸法、周波数、ポール数、位相、波形と多数ある。新日本製鐵では、辺要素有限要素法を使用した電磁場解析技術を開発し、最大推力と可能な限りの均一性を有する設計を行っている<sup>24,25)</sup>。

鋳片表層部凝固シェル前面の鋳片周方向の均一な流動を得るため、電磁流体解析による条件設計を行っている。移動磁界の場合には、磁気レイノルズ数が比較的小さいことから、流れと磁場の干渉により発生する誘導磁場の影響を無視し、電磁場解析から求めたローレンツ力をナビエ・ストークス式の外力項に代入して流動解析を行う。なお、凝固均一性の評価や自由界面挙動が必要な場合には、熱、相変化、自由界面を連成したマルチフィジックス解析を行う。

介在物や気泡のシェルへの捕捉は図8<sup>26)</sup>から、流速低下が起こる部位で顕著になることは明らかであるが、流動干渉部は熱的な不均一性の原因ともなる。パウダーも含めた自由界面を伴う熱連成の電磁流体解析の例を示す<sup>26)</sup>。図9<sup>26)</sup>は攪拌推力が弱く注入反転流と電磁攪拌流が干渉している

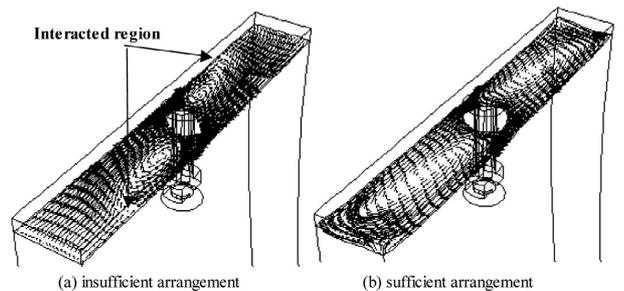


図8 メニスカス流速ベクトル分布比較<sup>26)</sup>  
Distribution of molten steel velocity in the mold meniscus

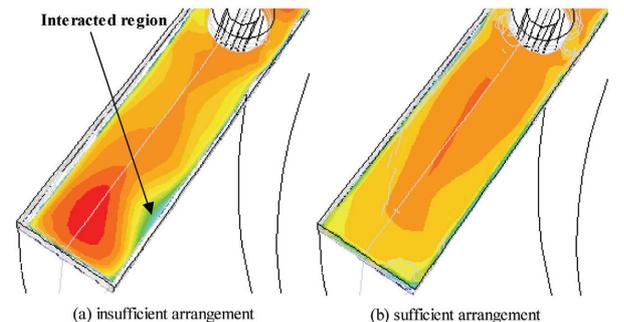


図9 メニスカス温度分布比較<sup>26)</sup>  
Distribution of molten steel temperature in the mold meniscus

場合と推力が強く干渉を抑制している場合のメニスカス流動と温度の比較を行った例である。干渉部では、温度むらも発生し、均一流動の重要性が判る。

### 3.4.3 鋳型内電磁ブレーキ

連続鋳造鋳型内流動の制御を狙いとして、電磁ブレーキが導入されたのは1980年代初頭に遡る。浸漬ノズルからの吐出流を制動するために電磁ブレーキが開発された。歴史的には、後に第1世代と呼ばれた2極の局所磁場が最初用いられ、制動効率を向上させる狙いから、第2世代と呼ばれる均一磁場に移行してきた。第2世代の均一磁場は制御思想の違いからいくつかのバリエーションを生み、今日に至っている。新日本製鐵では、ノズル下端付近に配備した1段の均一磁場(LMF: Level Magnetic Field)を実機適用しており、磁場強度としては鋳型中心で最大値が0.3T程度である。効果として、注入流の内部侵入を抑制することから鋳片内部の介在物、気泡欠陥を低減、流動抑制効果により異鋼種連々鋳の継目溶質混合長を短縮できること、注入流速低減により高速鋳造に資する<sup>27)</sup>。

流れと磁場が干渉して誘導電流を発生し、誘導電流と磁場が干渉して制動力を生むという原理的には単純な作用であるが、吐出流が速度分布を持つこと、直流磁場が完全に一様でなく分布を持つこと、この2点から鋳型の溶鋼プール内には実際には複雑な流体挙動が生まれる。溶融金属は電気の良い導体であるから、吐出流と直流磁場により発生した誘導電流は保存されるように回路を作る必要がある。鋳型内ではフラックスにより絶縁に近い境界条件となっており、鋳型内で発生する電流はほぼ凝固シェルで取り囲まれた溶鋼プール内で閉じたものとなる。このことから、流動制御上は非常に重要な2つの現象が現れる。

その1つは、鋳型短辺付近で発生する制動低下の現象である。これは、電流の保存のために、電流ループができるため、同方向の磁場に対し反対向きの電流が発生し流れを制動している部分の近くに加速する部分が発生する現象である<sup>28)</sup>。もう1つは、吐出流の周囲に現れる逆向き流れである<sup>29)</sup>。これも、強い流れの吐出流の周りに逆向きの電磁力が作用する結果発生する現象である。流れが、溶鋼中の介在物や気泡を輸送すること、また、フラックスの巻き込みを支配することから、前者は、電磁ブレーキの重要な狙いである連続鋳造鋳片の内部品質向上に影響し、後者は鋳片表層品質に関連する湯面近傍の流動特に鋳型中央での流体挙動に大きく影響する。鋳型短辺で発生する加速流れは、幸い、加速力としての電磁力を受けても流動しない凝固シェルの存在がこの現象を緩和することから悪影響は抑えられる。以上を、数値解析を用いて示したものが、図10である<sup>30)</sup>。

電磁ブレーキの制御条件については、狙いとする鋳型内の流動条件によるので複雑ではあるが、第一義的には、電

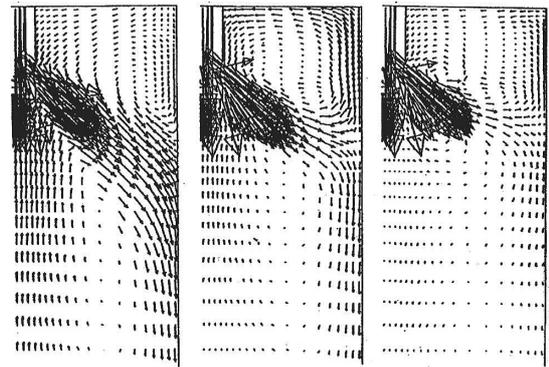


図10 均一電磁ブレーキ作用下の鋳型内流動場<sup>30)</sup>  
Change in calculated flow vector distribution with Magnetic flux density: changed views of the meniscus

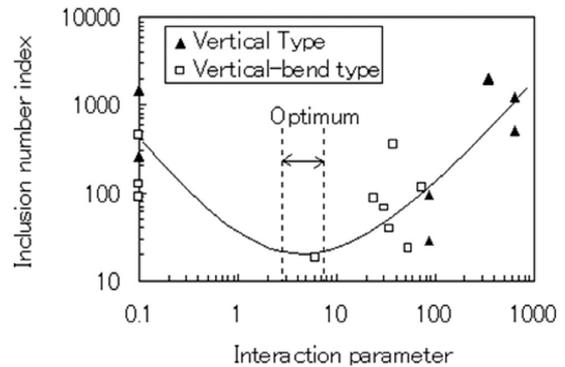


図11 インタラクションパラメータと介在物個数の関係<sup>30)</sup>  
Relation between interaction parameter and inclusion number

磁力と慣性力の比であり、以下に定義される無次元数であるインタラクションパラメータ(スチュアート数)で整理できる。電磁力は、電気伝導度を $\sigma$ 、磁束密度を $B$ 、流速を $u$ 、代表長さを $L$ とした時、 $\sigma B^2 u / L$ で現され、慣性力は密度を $\rho$ とすると $\rho (u/L)^2$ で現されるので、その比は、 $\sigma B^2 L / \rho u$ となり、これがインタラクションパラメータである。同一の寸法であればスループットを上げると、その平方根に比例して磁束密度を上げていくのがマクロ的には相似な条件となる。

図11に示すように、鋳片の介在物品質を調査してみると、磁場を適度にかける場合に介在物品質が最良となる傾向が見られ、種々の寸法や速度、磁場条件をまとめて整理できるのは、電磁ブレーキを用いた流動制御さらには介在物品質を支配する現象が複雑でありながら、電磁制動の基本パラメータに支配されていることを示しており興味深い<sup>30)</sup>。

## 4. 結 言

連続鋳造鋳片における清浄性の実態を定常部から非定常部にわたって溶鋼再酸化の観点から明らかにし、タンディッシュにおける基本的な介在物低減技術に関して論じた。更なる連続鋳造鋳片の清浄性向上技術として、鋳片の

最終品質を決定する鋳型内溶鋼流動に電磁攪拌技術と電磁ブレーキ技術を適用することにより、操業条件の変動に依存する事無く鋳片表層の清浄性および内部の清浄性を確保する事が可能となることを示した。

連続鋳造鋳片内の介在物の挙動は、鋼種の数だけ、また製造プロセスの違いによっても様々に異なり、各鋼種の脱酸の特徴を把握し、各工程での律速段階を明らかにしておくことが重要である。一般的に高潔浄化、品質安定化と生産性の向上とは相反する場合が多く、一見すると矛盾する結果となることも多い。非定常な状態を把握するためにも定常な状態を把握しておくことが重要である。そのためには鋳造技術だけでなく、鋳片清浄性を迅速にかつ正しく評価することが可能な介在物評価技術の開発も重要である。これからも顧客の介在物低減を含めた高品質化の要望は高く、高潔浄鋼の易製造化のための技術開発が望まれる。

#### 参考文献

- 1) 内堀秀男:第126・127回西山記念技術講座. 日本鉄鋼協会, 1988, p. 1
- 2) 福本一郎:第126・127回西山記念技術講座. 日本鉄鋼協会, 1988, p. 121
- 3) 川上 潔:第182・183回西山記念技術講座. 日本鉄鋼協会, 2004, p. 151
- 4) 三村 毅 ほか:神戸製鋼技報. 39, 77 (1989)
- 5) Sasai, K. et al.: ISIJ Int. 40, 40 (2000)
- 6) 樋口善彦 ほか:鉄と鋼. 85 (5), 375 (1999)
- 7) 田中宏幸 ほか:鉄と鋼. 79 (11), 1254 (1993)
- 8) 笹井勝浩:CAMP-ISIJ. 16, 820 (2003)
- 9) 笹井勝浩 ほか:CAMP-ISIJ. 13, 968 (2000)
- 10) 笹井勝浩 ほか:CAMP-ISIJ. 14, 76 (2001)
- 11) 山田 亘 ほか:CAMP-ISIJ. 12, 682 (1999)
- 12) 中島潤二 ほか:鉄と鋼. 93 (5), 348 (2007)
- 13) 笹井勝浩, 私信
- 14) 田中宏幸 ほか:鉄と鋼. 78, T201 (1992)
- 15) 磯野 潔 ほか:CAMP-ISIJ. 6, 1164 (1993)
- 16) 塗 嘉夫 ほか:CAMP-ISIJ. 6, 1165 (1993)
- 17) 中島潤二 ほか:CAMP-ISIJ. 8, 1060 (1995)
- 18) 岩崎正樹 ほか:CAMP-ISIJ. 1, 1279 (1988)
- 19) 森正 晃 ほか:CAMP-ISIJ. 1, 1280 (1988)
- 20) 木村秀明 ほか:新日鉄技報. (351), 21 (1993)
- 21) 三浦龍介 ほか:鉄と鋼. 81, T30 (1995)
- 22) 竹内栄一 ほか:鉄と鋼. 69 (14), 1615 (1983)
- 23) 中島潤二 ほか:新日鉄技報. (376), 57 (2002)
- 24) Fujisaki, K. et al.: Proc. Int. Symposium on Electromagnetic Processing of Materials. 1994, p. 272
- 25) 藤崎敬介 ほか:新日鉄技報. (379), 54 (2003)
- 26) Toh, T. et al.: Proc EPM. ISIJ, Sendai, 2006, p. 21
- 27) Ishii, N. et al.: CAMP-ISIJ. 9, 206 (1996)
- 28) Zeze, M. et al.: Iron and Steelmaker. 20, 53 (1993)
- 29) 岡澤健介 ほか:鉄と鋼. 84, 490 (1998)
- 30) Yamamura, H.: ISIJ Int. 41, 1229 (2001)



中島潤二 Junji NAKASHIMA  
プロセス研究開発センター 製鋼研究開発部  
主幹研究員 環境科学博士  
千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511



藤 健彦 Takehiko TOH  
先端技術研究所 数理科学研究部  
主幹研究員 環境科学博士