

高感度電磁超音波法による連続鋳造の凝固完了位置 (クレーターエンド) 検知

Crater End Detection in Continuous Casting by Longitudinal and Shear Wave Hybrid Technique with High Sensitivity EMAT

西澤 佑司 NISHIZAWA Yuji JFE スチール スチール研究所 サイバーフィジカルシステム研究開発部 グループリーダー
外石 圭吾 TOISHI Keigo JFE スチール スチール研究所 製鋼研究部 主査研究員
田中 智紘 TANAKA Tomohiro JFE スチール 西日本製鉄所（福山地区） 第2 製鋼工場長
飯塚 幸理 IIZUKA Yukinori JFE スチール スチール研究所 主席研究員・博士（工学）

要旨

連続鋳造における凝固完了位置は、生産性および品質上非常に重要な指標であり、連続的な計測が求められる。電磁超音波法により凝固完了位置を計測する装置を開発した。デジタル信号処理とハルバッハ配列を用いた高感度電磁超音波法と、超音波の縦波、横波を利用した校正方法により、高感度・連続的な凝固完了位置測定を可能とした。操業改善に適用した結果、鋳造の引き抜き速度の向上による生産性向上や、パイプライン向け厚鋼板での中心偏析改善などの効果を得た。

Abstract:

The final solidification position in continuous casting is a very important index for productivity and product quality, and continuous measurement is required. An apparatus to measure solidification completion position by electromagnetic ultrasonic method was developed. High sensitivity electromagnetic ultrasonic sensor using digital signal processing and Halbach array, and calibration method using longitudinal and transverse waves of ultrasonic wave enabled high sensitivity and continuous measurement of final solidification position. As a result of the application to the operation improvement, the following effects were obtained: productivity improvement by the improvement of casting speed, and improvement of center segregation in the steel plate for pipeline.

1. 緒言

鉄鋼製品は一般に高炉および電気炉、転炉、連続鋳造、熱間圧延、冷間圧延などの各プロセスを経て製造される。高炉法では鉄鉱石をコークスで還元し溶けた鉄（溶鉄）を作り、転炉で成分調整したのち、連続鋳造によって連続的に溶鋼を固め、矩形の鋳片（スラブ）を製造する。鋳片の大きさは、工場・製品によってさまざまであるが、一般的には幅1~2 m、長さ4~8 m、厚さ200~300 mm程度である。その後、鋳片は圧延などの工程を経て最終製品となり出荷される。

連続鋳造プロセスにおいて、基本的に鋳片の厚み中央部分が最後に凝固するが、この凝固が完了する鋳造方向の位置（凝固完了位置）はクレーターエンド（Crater End）とも呼ばれる（図1）。

凝固完了位置は品質および生産性の観点で非常に重要な指標であり、計測ニーズが高い。

生産性の観点では、生産性向上のために、鋳片引き抜き

速度を過度に増加させると、凝固完了位置が連続鋳造機を抜けてしまい、鋳片が静鉄圧によって膨らむ、いわゆる機外抜けトラブルが発生してしまう。機外抜けが発生すると、操業停止や鋳片切断時の溶鋼漏出といった大きなトラブルにつながる。そのため、凝固完了位置を測定することで、生産性の最大化と機外抜けトラブル抑止の両立が可能となる。

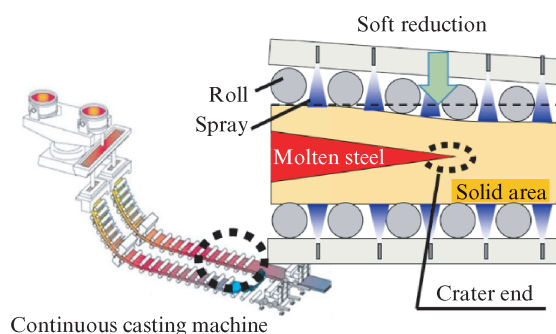


図1 連続鋳造における凝固完了位置と軽圧下

Fig. 1 Outline of crater end (Final solidification point) and soft reduction

2024 年 9 月 17 日受付

品質の観点では、中心偏析低減のための凝固完了位置測定による軽圧下の適正化が挙げられる。中心偏析とは、凝固中に濃化した合金元素や不純物が凝固時にスラブ厚み中央に集積する現象で、溶接性の低下や水素誘起割れといった最終製品での品質悪化の原因となる。

中心偏析低減の方法の一つが軽圧下法¹⁾であり、凝固収縮量に一致する程度の軽圧下を凝固完了位置付近の鋳片に付与することで、凝固収縮による濃化溶鋼の吸い込みを防止する技術である（図1）。一方で、不適切なタイミングで軽圧下を行うと、効果が得られないばかりか、むしろ中心偏析を悪化させることもあるため、凝固完了位置を計測し、適切な位置に制御することが、中心偏析改善のためには重要となる。

そのため、従来より凝固完了位置を計測、推定する方法がいくつか報告されていたが、いずれの方法も課題があった。

その一つに鋳打ち法と呼ばれる、鋼製の鋳を鋳片に打込み、鋳の溶解の様子などから打込み位置での凝固の状態を判断する方法²⁾がある。しかし破壊試験であるため、測定に使用した鋳片は屑になるほか、凝固末期においては鋳の様子から凝固状態を推定するのは解釈が困難であるという問題があった。

また、電磁超音波法を用いて凝固シェルの厚さを測定した例も報告³⁾されている。これは縦波超音波の音速の変化⁴⁾から液相厚を推定する方法で、凝固完了位置を校正するためには鋳打ち等を行う必要があった。また電磁超音波の感度が低いため、タッチロールを用いてセンサを鋳片に実質的に接触させて計測する必要があり、センサの耐久性という観点でも課題があった。

さらに、電磁超音波法により発生させた横波超音波を鋳片に透過させ、測定位置での鋳片内部が凝固完了か否かの計測をオンラインで試行した例^{5,6)}も報告されている。しかし、この方法では横波超音波（せん断波）が液相を透過しないという特徴を利用するため、測定位置で完全凝固か否かは計測できるものの、凝固完了位置の計測は困難であった。

その他に、伝熱計算および凝固計算により、連続鋳造における凝固完了位置を算出する手法もある^{7,8)}。しかし熱伝達係数や物性値の精度の問題で、計算結果には誤差が生じていた。さらに、実際の連続鋳造機の操業においては、溶鋼温度や溶鋼成分等の伝熱計算結果に影響を及ぼすパラメータが変動するため、これらも誤差の要因となっていた。

そこで、連続鋳造の凝固完了位置（クレーターエンド）を連続的かつ高精度に計測することを目的とした技術開発を行ったので、その結果を報告する。

2. 縦波横波ハイブリッド式凝固完了位置計測装置（CE（クレーターエンド）計）による凝固完了位置計測

高温かつ移動する連続鋳造鋳片の凝固完了位置を計測するため、従来の非接触で超音波を送受信できる電磁超音波法を用いた計測方法を改良した。本方法は以下の要素技術からなる。

- ① 高感度電磁超音波法
- ② 縦波横波ハイブリッドセンサ
- ③ 横波消失を利用した凝固完了位置計測の校正方法

2.1 高感度電磁超音波法

電磁超音波センサは磁石とコイルからなり、測定対象の表面に静磁場を印加するとともに、送信コイルに大電流の高周波電流を印加する。その結果、対象材（導電体）表面に渦電流が誘起され、渦電流と静磁場の相互作用（ローレンツ力）により対象材が振動することで超音波が発生・伝搬する（図2）。受信センサは対向面に設置され、伝搬した振動を受信する。受信は電磁超音波発生との逆過程と考えることができる。ただし、従来の電磁超音波法は感度が低いという課題があり、測定対象に接近させて使用する必要があったため、センサの耐久性や測定の自動化が困難といった課題があった。

そこで、電磁超音波法の高感度化のため、デジタル信号処理技術であるチャープパルス圧縮法と同期加算法を適用した⁹⁾。チャープパルス圧縮法は、従来はレーダーなどの分野に利用されていた技術で、周波数が時間的に変化する波形を送信波形に用い、受信波形に対し送信波形との相関演算を適用することで、送信信号と相関の高い受信信号のみを高感度に抽出する手法である。この手法を用いると、送信信号に相関のないランダムノイズは除去されるので、同時にS/N比を向上させることができる。また、あわせて同期加算を適用することにより、従来のバースト波を用いた電磁超音波計測に対し、測定感度が10倍程度向上した。さらに、パルス圧縮処理により時間分解能を大幅に向上させることができるようになった。パルス圧縮後の信号の時間幅 T_p は、

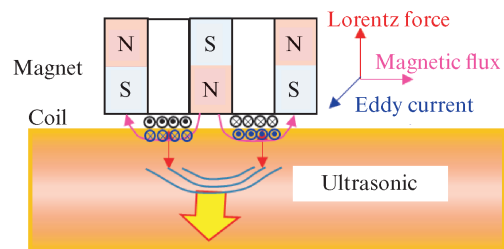


図2 電磁超音波発生モード図

Fig. 2 Generation of ultrasonic by electromagnetic acoustic transducer

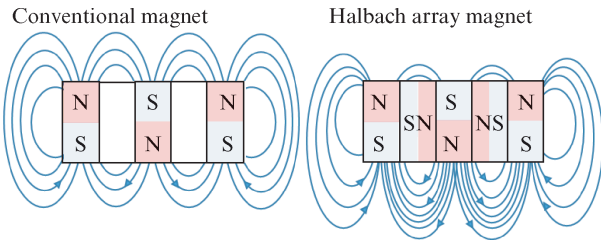


図3 ハルバツハ配列の磁石
Fig. 3 Halbach array magnet

チャープ波の周波数掃引幅 Δf を用いて $Tp \approx 1/\Delta f$ と表せ、単純なパルス波と比較して 10 倍程度の時間分解能を得ることが可能となった。

そして、電磁超音波法のさらなる感度向上のため、センサ内の磁石配列にハルバツハ配列を適用した。

ハルバツハ配列とは、従来のような単純な磁石配列ではなく、主磁極と直交するような磁極の向きを持つ補助磁石を主磁極間に入れることで、磁場を片側に集中させる技術である¹⁰⁾ (図3)。この技術は従来、加速器やリニアモーターなどの強磁場利用分野に用いられてきた。

電磁超音波の感度は、印加する静磁場の強さ（磁束密度）に比例するため、磁石を大きくすることでも強磁場を得ることができるが、センサを連続鋳造機の狭小なロール間（一般的には数 10 mm 程度の間隔）に設置・挿入する必要があるという寸法制約があった。そこで、工業用途の磁石の中で最も磁場の強いネオジウム磁石を用い、さらにハルバツハ配列を適用することで磁石のサイズを抑えながら磁場の強化を図った。単純な磁石配列の場合と比較して、同一の外形寸法で磁束密度を約 2 倍に向上させることが可能となり、それに伴い送受信感度も従来の約 2 倍に向上した。

以上のようなデジタル信号処理とハルバツハ配列の適用により、従来の電磁超音波法と比較すると大幅に感度が向上した結果、リフトオフ（センサと鋳片間の距離）5 mm での非接触計測を達成した。

2.2 縦波横波ハイブリッドセンサ

後述するように、本技術では、縦波超音波と横波超音波を用いて計測および校正を行う。そのため、前述したセンサ寸法制約の中で、縦波と横波を発生させられるセンサ構成とすることが必要であった。

電磁超音波は、利用する磁場成分を変えることで、縦波と横波をそれぞれ発生させることができる¹¹⁾ (図4)。そこで、磁石とコイルの位置を適切に選択し、縦波には磁場の水平成分が支配的な領域、横波には磁場の垂直成分が支配的な領域を利用し、その領域にコイルを配置するようにした。磁極とコイルの配置例（平面図）を図5に示す。これにより、センサ外形寸法を維持したまま、縦波、横波をそれぞれ送受信できる「縦波横波ハイブリッドセンサ」を具現化

した。

このセンサは、水冷ジャケットに格納されており、冷却水を常時循環させることでセンサを冷却する。前述したようにリフトオフを 5 mm 確保したことに加えて、この冷却水により、900℃を超える鋳片表面温度に関わらず、センサが焼損することなく計測できるようになった。

さらに、計測システムとして、縦波と横波を切り替え、送信、受信、信号処理を行うシステムを構築した。図6にシステム構成図を示す。

まず、波形発生器により発生させたチャープ信号を高出力アンプにより最大 2000 V まで増幅し、送信コイルに印加する。そして、切替器により縦波用コイル、横波用コイルそれぞれに印加することにより、縦波と横波を発生させる。発生した超音波信号は鋳片を厚み方向に伝搬する。次いで、鋳片の対向する面に設置した受信コイルにより受信した信

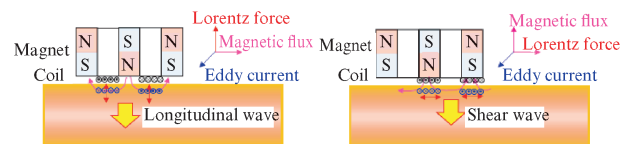


図4 電磁超音波発生における縦波および横波

Fig. 4 Generation of longitudinal wave and shear wave in EMAT

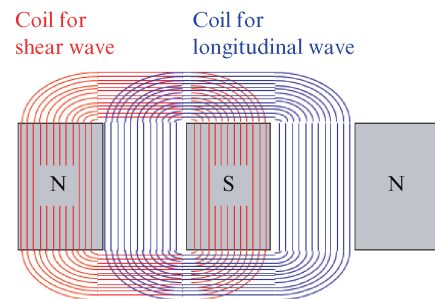


図5 「縦波横波ハイブリッドセンサ」の磁石とコイルの配置図

Fig. 5 Layout of magnet and coil in “L-S wave Hybrid EMAT sensor”

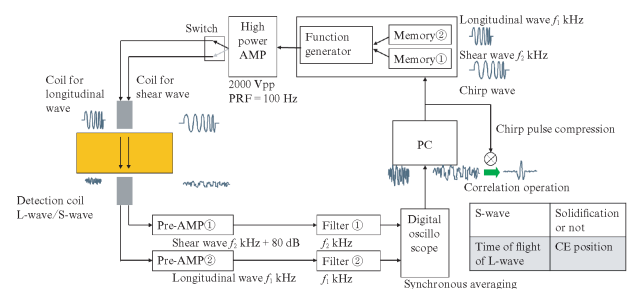


図6 縦波横波ハイブリッド電磁超音波を用いたクレーターエンド計測システム

Fig. 6 System configuration of L/S Hybrid EMAT-Crater end measurement system

号を、チャープ帯域で約 80 dB の増幅度を持つ広帯域プリアンプによって増幅し、同期加算処理を行ったうえで、PC に取り込む。PC では、元信号との相関演算を含むチャープパルス圧縮処理を行い、検出波形として記録する。その後、検出波形を用いて横波透過信号の有無による完全凝固か否かの判定および、縦波伝搬時間からの凝固完了位置の算出を行う。

以上のとおり、デジタル信号処理を含む高感度電磁超音波法および計測システムの実装により、表面温度 900℃ の鋳片に対してリフトオフ 5 mm の完全非接触状態での超音波計測が可能となった。

2.3 横波消失を利用した凝固完了位置計測の校正方法

計測した超音波信号を用いて凝固完了位置を算出するにあたり、従来の縦波超音波計測のみでは、算出過程で行う伝熱計算の誤差が含まれるため、別途、鋳打ち等による校正が必要であった。また、横波計測では、測定位置の鋳片内部が完全凝固であるか、未凝固部分が残存するかの判定のみ可能であり、定量的な凝固完了位置の算出はできなかった。そこで、1) 縦波超音波を用いた凝固完了位置算出方法と、2) 横波を用いた凝固完了位置の校正方法、を組み合わせることで電磁超音波計測のみで凝固完了位置を高精度に計測する方法を開発した。

1) 縦波を用いた凝固完了位置算出方法

縦波超音波の伝搬時間から凝固完了位置を算出する方法は以下のとおりである。

まず、あらかじめ、いくつかの代表的な鋳片引き抜き速度における凝固完了位置を伝熱計算により計算しておく（図 7 の①）。次に、それぞれの鋳片引き抜き速度における縦波伝搬時間（Time of Flight (ToF)）を実測する（図 7 の②中の●プロット）。これらの二つの関係を組み合わせることで、縦波伝搬時間と凝固完了位置の関係を実験式として算出できる（図 7 の③、Calculation の破線プロット）。ただし、この方法のみでは伝熱計算の誤差に起因して、算出される凝固完了位置には誤差が含まれることに留意する。

2) 横波を用いた絶対値校正方法

前述のとおり、縦波のみを用いた凝固完了位置の算出方法には誤差があり、実用には校正が必要である。そこで横波超音波を用いて、1) で示した縦波伝搬時間と凝固完了位置の関係を校正する手法を開発した。

前述したように、横波超音波（せん断波）は、液相を透過できない。そこで、まず、横波信号が検出されるように、センサ位置が完全凝固であると想定される低い鋳片引き抜き速度で鋳造する。そして、鋳片引き抜き速度を徐々に増加させると凝固完了位置は連続鋳造機の下流に移動するので、凝固完了位置がセンサ位置を通過することになり、ある時から横波が消失し、検出されないことになる。つまり、横波が消失した瞬間は凝固完了位置がセンサ位置の直下にあると判断できる（図 8）。

実用上は、鋳片引き抜き速度を変化させ、縦波伝搬時間と横波信号強度を取得する（図 7 の②図）。そして、横波が消失した時の縦波伝搬時間が「センサの直下に凝固完了位置があるときの縦波伝搬時間」となり、凝固完了位置と縦波

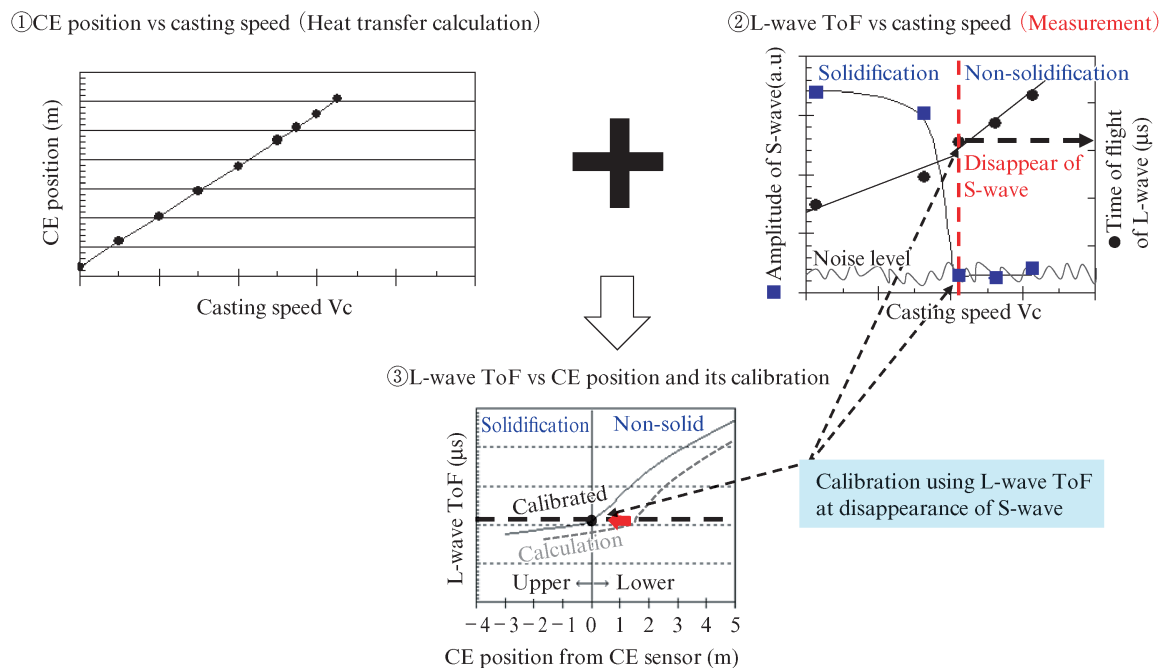


図 7 凝固完了位置測定およびその校正手順

Fig. 7 Concept of CE position measurement and its calibration

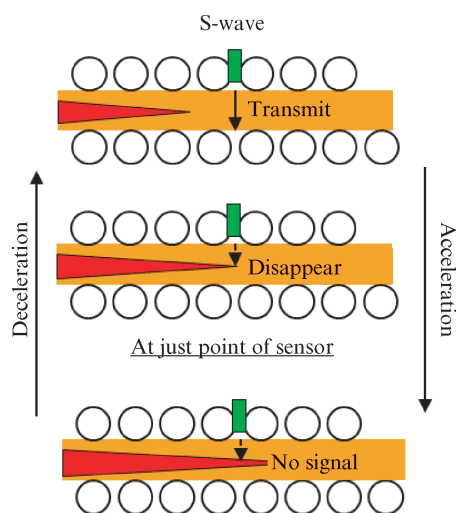


図8 凝固完了位置と横波信号有無

Fig. 8 CE position and shear wave signal detection

伝搬時間の関係式を校正できる（図7の③，Calibratedの実線プロット）。そして，校正済の関係式を用いて，実測した縦波伝搬時間から凝固完了位置を算出する。

なお，横波を用いた凝固・未凝固の検知の可否を確認するため，事前にラボで小型鋼塊実験を実施した。溶製した種々の成分の溶鋼を鋳型に注入し，凝固を進行させつつ，温度計測と横波超音波計測を実施した。その結果，成分によらず中心部の温度が凝固点を下回った時点以降に横波透過信号が得られることを確認し，横波超音波により凝固/未凝固の検知・判定が可能であることを確認した。

3. 実機試験結果

スラブの連続鋳造機で実機試験を行った。実機試験は，JFE スチール西日本製鉄所（福山地区）製鋼工場第5連続鋳造機（福山5CC）および第6連続鋳造機（福山6CC）で実施した。福山5CCは，薄板材を中心とする最大幅1700mm，最大厚260mmの垂直未凝固曲げ式の2ストランド連鋳機である。福山6CCは，厚板材を中心とする最大幅2100mm，最大厚300mmの垂直未凝固曲げ式の単ストランド鋳造機である。いずれも，JFE スチールの主力連鋳機であり，凝固完了位置測定による品質向上，生産性向上のニーズが高い。

まず，福山5CCで実施した横波超音波測定の波形例を図9に示す。あらかじめ鋳片内部の状態が凝固か未凝固かが明確になっている操業条件で計測した結果であり，未凝固と考えられた操業条件では横波信号が検知できないのに対し，完全凝固と考えられた操業条件では横波信号が検知された。

さらに，福山5CCにおいて，鋳片引き抜き速度を変えて鋳打ち試験も実施し，横波超音波の測定結果と比較した。

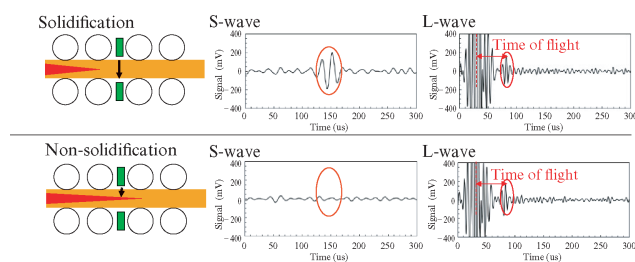


図9 実鋳造での検出波形例

Fig. 9 Detected waveform on actual plant test

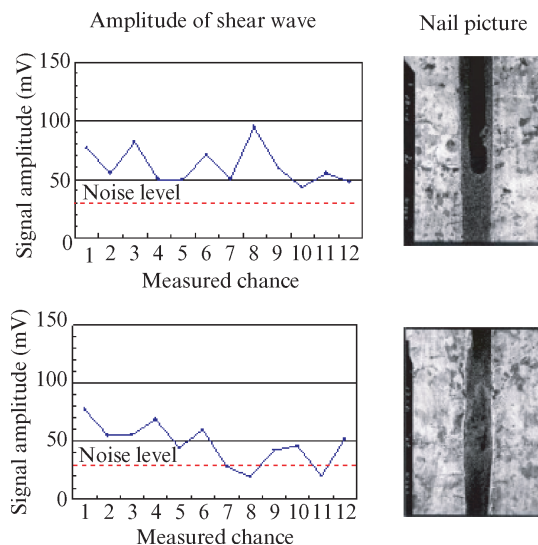


図10 横波を利用したCE検知結果と鋳打ちの比較

Fig. 10 Comparison of crater end measurement using shear wave and nail method

鋳打ち試験では，鋳片断面を研削して鋳を面出しした後にエッチングを行い，鋳の溶融具合を観察した。

それぞれの結果を図10に示す。

図10上段では，横波信号振幅は定常的にノイズレベルを超えており，完全凝固と判断された。この時の鋳は原形を維持しており，鋳の観察結果からも完全凝固と判断された。

また下段では，ほとんどの測定波形では凝固であるが，一部の測定波形では未凝固と判断され，凝固完了前後であると判断された。この時の鋳は，わずかに溶解・浸食があり，凝固完了直前の状態と判断された。このように，凝固・未凝固の関係と，横波測定結果はよく一致しており，連続鋳造機においても，非破壊かつ連続的に計測可能な電磁超音波法の優位性が確認された。

また，福山5CCにおいて連続測定した事例を図11に示す。図11には横波振幅と，縦波伝搬時間から算出した凝固完了位置を示す。本計測例では，鋳片引き抜き速度の増加に伴って，凝固完了位置のセンサ位置の通過が2度確認された。

また縦波計測の結果からは，鋳込み速度の増速に伴い凝固完了位置が下流に移動し，凝固完了位置計測装置を通過

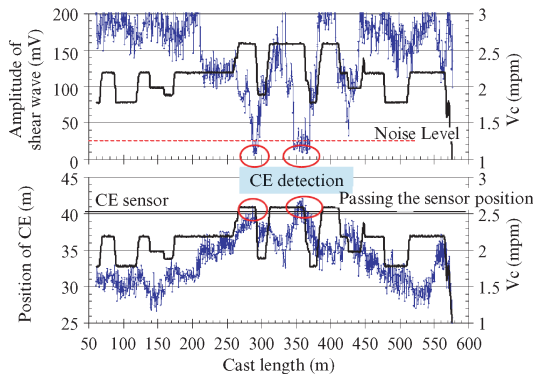


図 11 凝固完了位置の連続計測と通過検知例

Fig. 11 Continuous measurement of CE position and detection of CE

する様子が観察された。このような連続的かつ高精度な凝固完了位置の測定は、従来技術では不可能であった。

4. 凝固完了位置計測装置の活用

前述のとおり、連続鋳造において、凝固完了位置を連続鋳造機の最下流に制御することで、鋳片引き抜き速度を最大化し、生産性を向上させることができる。

本技術により凝固完了位置の測定が可能となったことで、機外抜けを生じさせることなく福山 5CC の鋳片引き抜き速度を従来の上限であった 2.45 m/分から 2.6 m/分まで上昇させることができた。

また、鋳片引き抜き速度が上昇したことにより、タンディッシュの耐火物寿命に律速される連々数の向上などのメリットも得られ、これらの取り組み以外の改善も含め、福山 5CC では、最大月産 400 千トン/月の高能率生産を達成した。

開発した凝固完了位置測定装置により凝固完了位置を計測・制御できるようになり、適切な軽圧下を付与できるようになったことで、中心偏析を改善した。具体的には、凝固完了位置を測定し、軽圧下帯の指定の範囲内に位置するように、鋳片引き抜き速度や 2 次冷却のスプレーパターンを制御した。その結果、軽圧下を適切に付与することが可能となり、中心偏析が改善された。さらに、凝固完了位置を連続的かつ自動的に計測できるようになったことにより、操業上、回避が困難であったバラツキ因子に起因する品質上のバラツキも抑制できるようになった。

凝固完了位置測定装置を用いた操業改善の前後のスラブサンプルを採取し、改善効果を評価した。図 12 に、中心偏析評価のために、スラブの断面を温塩酸で腐食した結果を示す。従来はスラブのほぼ全幅にわたって中心偏析線が生じていたが、本装置により軽圧下を適正化した結果、中心偏析が低減し、偏析線は消失した。

また、EPMA（電子プローブマイクロアナライザー

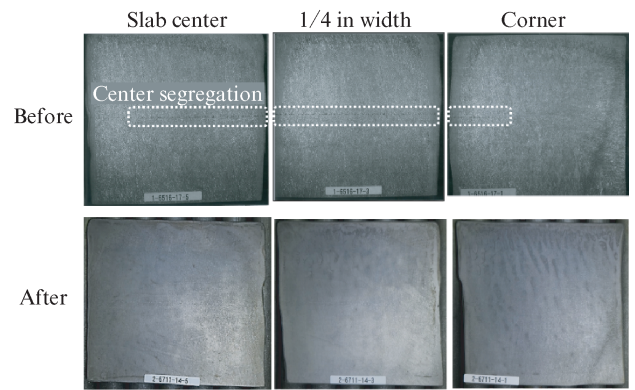


図 12 スラブのマクロエッチングサンプルによる中心偏析評価

Fig. 12 Macro etched sample of slab for center segregation evaluation

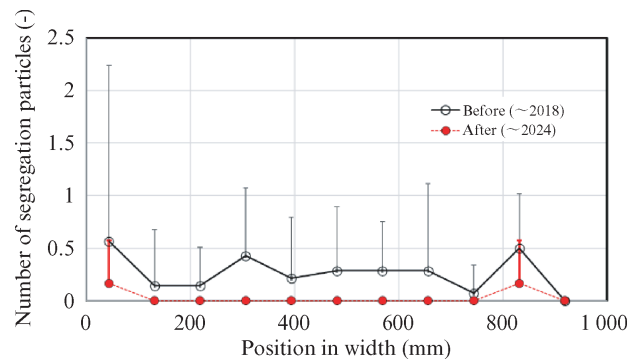


図 13 スラブにおける偏析粒個数分布の変遷

Fig. 13 Distribution of segregation particles on slab samples

(Electron Probe Micro Analyzer)) による定量的評価も実施した。偏析の指標として、偏析粒の個数を採用した。ここでの偏析粒とは、EPMA で定量分析した結果に基づき、偏析度およびサイズが閾値以上となった溶質濃化スポットを指す。図 13 に、幅方向の偏析粒個数の平均値とバラつきを示す。図 13 より、偏析粒個数が減少し、バラつきが低減したことが分かる。

従来より、天然ガスのパイプライン用の厚鋼板には優れた耐 HIC（水素誘起割れ）特性が求められてきたが、HIC は鋼中に侵入した H 原子が偏析粒を起点にガス化し、割れが生じる欠陥であるため、偏析粒の低減は HIC 特性向上に寄与する。

本技術により中心偏析を改善したスラブは、天然ガスのパイプライン用の厚鋼板として世界各国のパイプラインプロジェクトに採用・出荷されており¹²⁾、世界のエネルギー需要に応えるとともに、CO₂ 排出の少ないエネルギー源である天然ガスの利用拡大により、世界の CO₂ 排出削減にも寄与している。

5. 結言

電磁超音波法による凝固完了位置計測技術の開発に取り組み、以下の成果を得た。

- ・縦波・横波ハイブリッド式の凝固完了位置計測計を開発し、デジタル信号処理とハルバツハ配列を適用した高感度電磁超音波法により、リフトオフ 5 mm での凝固完了位置（クレーターエンド）の連続計測を実現した。
- ・縦波伝搬時間を利用した凝固完了位置算出方法と、横波消失を利用した校正方法を開発した。
- ・本装置を操業に活用し、凝固完了位置の連続測定、連続監視による鋳片引き抜き速度の向上、生産性の向上を実現した。また、凝固完了位置の測定・制御により軽圧下を適切な条件で付与できるようになったことで、パイプライン向け鋼材などの高級厚板材で、中心偏析改善を実現した。

参考文献

- 1) Ogibayashi, S.; Kobayashi, M.; Yamada, M.; Mukai, T. Influence of Soft Reduction with One-piece Rolls on Center Segregations in Continuously Cast Slabs. *ISIJ International*. 1991, vol. 31, no. 12, p. 1400–1407.
- 2) 川和高穂, 佐藤秀樹, 宮原忍, 小谷野敬之, 根本秀太郎. 高速鋳打込法による連鋳スラブの凝固厚み測定について. *鉄と鋼*. 1974, vol. 60, no. 2, p. 206–216.
- 3) 吉田透, 厚見直, 大橋渡, 加賀谷幸司, 椿原治, 曾我弘, 川島捷宏. 電磁超音波法によるオンライン連鋳凝固シェル厚み測定とクレーターエンド推定. *鉄と鋼*. 1984, vol. 70, no. 9, p. 1123–1130.
- 4) Papadakis, E. P.; Lynnworth, L. C.; Fowler, K. A.; Carnevale, E. H. Ultrasonic Attenuation and Velocity in Hot Specimens by the Momentary Contact Method with Pressure Coupling, and Some Results on Steel to 1200 °C. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1972, vol. 52, p. 850–857.
- 5) 高田一, 市川文彦, 北岡英就, 桃尾章生, 西川廣. 横波電磁超音波による連続鋳造鋳片のクレーターエンド測定. *材料とプロセス*. 1989, vol. 2, p. 1214.
- 6) Iizuka, Y.; Awajiri, Y. High Sensitivity EMAT System using Chirp Pulse Compression and Its Application to Crater End Detection in Continuous Casting. *Journal of Physics. Conference Series* 520. 2014, 012011.
- 7) Meng, Y.; Thomas, B. G. Heat-Transfer and Solidification Model of Continuous Casting: CON1D. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2003, vol. 34B, p. 685–705.
- 8) 山崎伯公, 嶋省三, 恒成敬二, 林聡, 土岐正弘. 粒子法による連鋳2次冷却のスプレー水挙動解析. *鉄と鋼*. 2013, vol. 99, p. 593–600.
- 9) 飯塚幸理. チャープ波パルス圧縮法の超音波計測への応用. 非破壊検査. 2014, vol. 63, no. 3, p. 135–141.
- 10) Halbach, K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material. *Nuclear Instruments and Methods*. 1980, vol. 169, no. 1, p. 1–10.
- 11) Hirao, M.; Ogi, H. *Electromagnetic Acoustic Transducers: Noncontacting Ultrasonic Measurements using EMATs*. 2nd Ed., Springer, 2016, 672p.
- 12) 表層硬さ厳格仕様サワーラインパイプ用 UOE 鋼管を初出荷. *JFE スチール. ニュースリリース*, 2024 年 5 月 30 日.
<https://www.jfe-steel.co.jp/release/2024/05/240530.html>

本稿は、主執筆者が同じく執筆した下記論文の一部表現を改変して作成されたものであり、P42 および P48 枠外の記載にかかわらず、原論文の著作権は（一社）日本鉄鋼協会に帰属する。

高感度電磁超音波による縦波横波ハイブリッド式連続鋳造クレーターエンド検知：鉄と鋼 *Tetsu-to-Hagané Advance Online Publication Version* 2 月公開, ©2025 日本鉄鋼協会