

厚鋼板の高品質化を実現した 連続鋳造の凝固完了位置測定装置

JFEスチール株式会社

代表取締役社長 広瀬 政之

JFEスチール(株) 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	西澤 佑司
JFEスチール(株) スチール研究所 製鋼研究部	外石 圭吾
JFEスチール(株) 西日本製鉄所 (福山地区) 製鋼部	田中 智紘
JFEスチール(株) 西日本製鉄所 (福山地区) 制御部	竹中 秀同
JFEスチール(株) DX戦略本部	磯崎 健二
JFEスチール(株) スチール研究所	飯塚 幸理

はじめに

低炭素社会の実現に向けて、風力発電などと並び、環境負荷の小さい天然ガスは今後も需要増加が見込まれる。しかしガス田の多くは硫化水素などの腐食ガスを高濃度を含み、未精製ガスを運ぶパイプライン用鋼材も厳しい腐食環境に耐える性能が要求される(図1)。

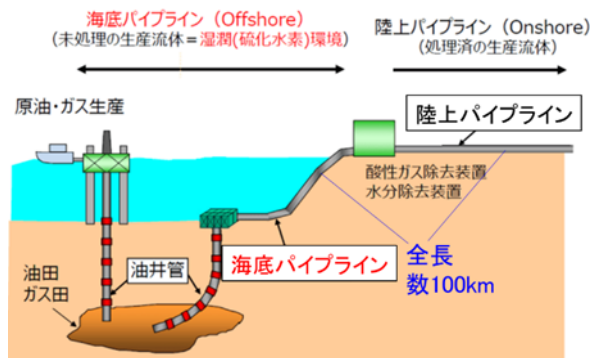


図1 海底パイプライン

厚鋼板の耐腐食性の向上には、溶鋼を連続的に凝固させる連続鋳造プロセスにおいて、凝固完了時に適切な圧下(軽圧下)を加えることが効果的である。しかし、その凝固完了タイミングを把握することは従来技術では困難だった。

そこで今回、連続鋳造における凝固完了位置を自動的に計測する装置を開発した(図2)。本

装置を活用し、凝固完了位置を把握して軽圧下を適正に行うことで、腐食環境下での割れの原因となる中心偏析の低減を達成し、厳しい腐食環境下で利用可能な厚鋼板の製造を実現した。

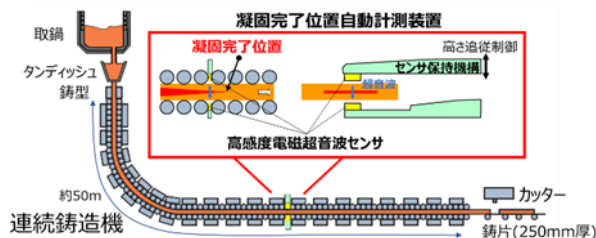


図2 開発した凝固完了位置測定装置

開発のねらい

鉄鋼製品は一般に、高炉、転炉、連続鋳造、圧延という製造プロセスを経て製造される。成分調整された溶鋼を連続的に凝固させる連続鋳造プロセスにおいて、厚み中央部に溶鋼中の添加元素が濃化し、中心偏析となる。中心偏析部に水素原子が凝集しガス化して割れが生じる現象を「水素誘起割れ」と呼び、パイプラインの内容物の漏洩などの大きなトラブルを生じさせる。

中心偏析改善のためには、凝固完了のタイミングで、凝固収縮に相当する圧下(軽圧下)を行

い、濃化溶鋼の流入・流動を防ぐことが効果的である。しかし、軽圧下の適用はタイミングが重要で、そのタイミングを外すと効果がないため、凝固完了位置の測定は非常にニーズが高かった。

従来の凝固完了位置把握方法には、様々な課題があった(表1)。スラブに金属製の鋏を打ちその鋏の溶解状況の断面観察から凝固/未凝固を判別する方法では、連続的な実施が困難であり、また実施した鋏片はスクラップとなっていた。伝熱計算により推定する方法では、計算モデルの誤差や操業ばらつきの影響が排除できなかった。超音波を用いた方法もあったが、感度が低く実質的には接触計測となるため、センサの耐久性などの課題があった。以上のように、凝固完了位置の連続的な把握は従来困難であり、製造上のばらつきを生じていた。

技術上の特徴

① 高感度電磁超音波法

表面温度 900°Cを超え、かつ移動する連続鋳造の鋏片の凝固完了位置を測定するため、非接触で超音波を送受信する必要がある。接触媒質を使わず超音波の送受信が可能な技術として電磁超音波法が知られるが、感度が低いという課題および、センサギャップをほぼ 0mm に近づけなければならないことによるセンサの耐久性の課題があった。これに対し、ハルバッハ配列と呼ばれる特殊な磁石配列を活用して磁場強度を向上させるとともに、デジタル信号処理(チャープパルス圧縮)を用いた高感度電磁超音波法を開発することにより克服した(図3)。

表1 凝固完了位置測定の前技術との比較

	本装置	従来電磁超音波	伝熱計算	鋏打ち
原理	電磁超音波 縦波→凝固位置 +横波校正 センサ保護機構 超音波高感度制御	縦波超音波の伝搬 時間→凝固位置 電磁超音波センサ タッチロー	伝熱モデルにより 凝固位置算出	鋏の溶解 →凝固/未凝固
破壊/非破壊	○非破壊	○非破壊	○非破壊	×破壊
連続測定	○連続測定可	△接触要 耐久性に難	○連続推定可	×点測定
測定精度	○横波利用の 絶対位置校正	△鋏打ち等による 校正必要	△鋏打ち等による 校正必要	○~△ 凝固末期で判定難
難点		△低感度	△モデルの誤差	×鋏取り扱い危険

装置の概要

鋏片の凝固完了位置を測定するため、本装置は、以下の三つの要素技術からなる。

- ① 高感度電磁超音波法
- ② 縦波超音波と横波超音波を利用した凝固完了位置算出・校正方法
- ③ スラブ厚み変動にあってもセンサ距離を一定にする機構部・自動制御機構

これらの開発により、凝固完了位置の自動・連続測定を達成した。本装置は、JFE スチール株式会社 西日本製鉄所(福山地区)製鋼工場に導入され、操業改善に活用されている。

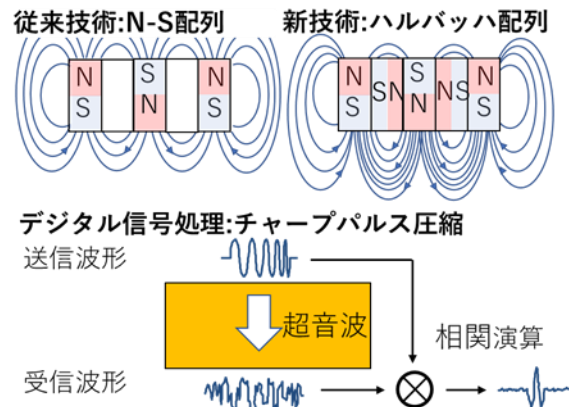


図3 高感度電磁超音波法の要素技術

ハルバッハ配列とは、図のように、主磁極の間に、それと直交するような向きの補助磁石を置くことにより、片側に磁束を集中させる技術であり、これを電磁超音波センサに適用した。従来、加速器などの強磁場利用分野に適用されていた技術であり、磁場強度を向上させ、電磁超音波の送受信感度を向上させた。

また、チャープパルス圧縮は、従来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送信波形を用い、かつ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、送信波形に相関のある信号のみを抽出する技術である。これにより、受信波形の感度(S/N

比)を飛躍的に向上させるとともに、パルス圧縮効果により時間分解能を高めることができ、センサギャップ 5 mm での完全非接触超音波計測を達成した。

② 縦波超音波と横波超音波を利用した凝固完了位置算出・校正方法

凝固完了位置を高精度に測定するために、縦波超音波と横波超音波を組み合わせた校正方法を開発した。従来の縦波超音波法では、鋳打ち等の方法により凝固完了位置の校正を行う必要があった。また横波超音波法では、測定位置が凝固か未凝固かを判別できるのみで、凝固完了位置を算出することはできなかった。

この課題に対し、横波超音波が液相を透過しないという特徴を用いた校正方法を開発した。具体的には、横波信号が消失した瞬間をとらえ、この時に凝固完了位置がセンサ直下にあるということを検知し、縦波超音波計測の算出式を校正する(図4)。

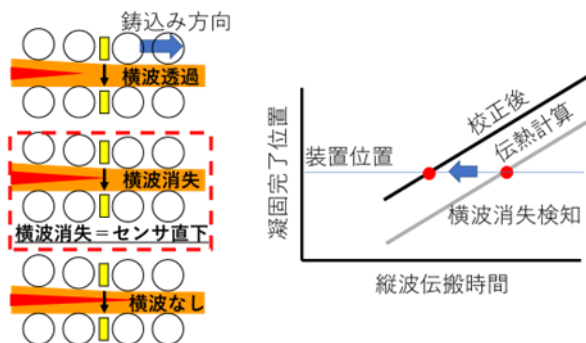


図4 横波消失を活用した位置算出の校正方法

この方法によって、鋳打ち等によらず、凝固完了位置を高精度に測定できるようにした。

③ スラブ厚み変動にあってもセンサ距離を一定にする機構部・自動制御機構

電磁超音波センサと水柱式超音波式距離計を組み合わせることで、鋳片の厚み変動やその他の外乱にあってもセンサと測定対象である鋳片の距離を一定に保ち、センサ接触・破損を防止するとともに、また感度を一定化することで安定した自動計測を達成した(図5)。

鋳片の厚みは、操業中の速度変動など操業条件によって数 mm 程度変動することがある。

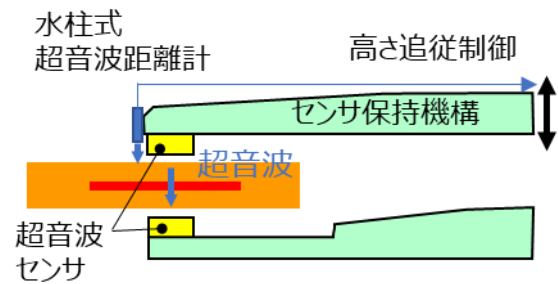


図5 センサ保持・自動制御機構

高感度電磁超音波法によりセンサギャップ 5 mm での非接触計測が実現したものの、鋳片の厚み変動による接触・破損のリスク、感度変動のリスクがあった。接触した場合、センサが破損・焼損するのみならず、センサが破断・脱落し、製品への傷や連続鋳造機の設備の破損といった大きなトラブルに至るリスクがあった。

そこで、連続鋳造機の中という過酷な環境でも利用可能な「水柱式超音波距離計」を用いて、鋳片とセンサの間隔をリアルタイムで計測し、その結果に基づきセンサを自動的に昇降制御する機構部および自動制御機構を開発した。水柱超音波距離計は、ノズルから水を噴射し、超音波を水中に伝搬させ、鋳片表面からの反射波の伝搬時間をもとに距離を測定する技術である、水柱を用いることで、厳しい輻射熱、水蒸気や冷却ミストのある連続鋳造機内でも利用可能であり、高い精度でセンサと鋳片の距離を測定できる。この測定値をもとに、センサを保持・昇降させる自動制御機構を開発した。鋳片の厚み変動した際には追従し、また急激な厚み変動がある場合には自動退避するなどの制御アルゴリズムを実装し、センサの破損およびセンサの接触等による品質トラブルを抑止する。

以上述べた要素技術の実装により、鋳片の凝固完了位置を自動的に・連続的に測定する装置を確立した。高感度電磁超音波法により完全非接触を実現し、かつ、縦波超音波と横波超音波を組み合わせた算出・校正法により、鋳打ち等によらず、凝固完了位置を連続的に把握できるようになった。また鋳片の厚み変動等にあってもセンサの接触・破損なく、安定して測定できる。

実用上の効果

本装置は、JFE スチール株式会社 西日本製鉄所(福山地区)製鋼工場に導入されている。本装置を用いて測定した凝固完了位置をもとに操業改善を行い、次のような効果を挙げた。

① 中心偏析低減

凝固完了位置を測定し、最適な軽圧下を行えるように凝固完了位置を制御した結果、鋳片の中心偏析低減を達成した。

図6に本装置の導入前後での偏析粒個数の分布を定量的に評価した結果を示す。厚み中央部に合金成分の濃化した領域を偏析粒と呼び、水素誘起割れの起点となる。そのため、偏析粒の個数低減は水素誘起割れの抑止に寄与する。

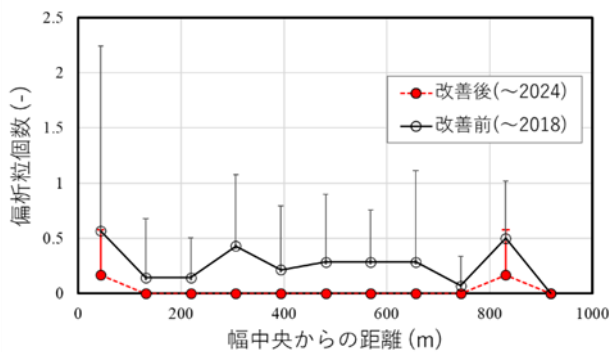


図6 操業改善による鋳片の偏析粒個数の変遷

図6から明らかなように、偏析粒個数について、その平均値でも、ばらつきでも大幅な低減を達成した。連続的かつ自動的な凝固完了位置の測定が可能となったことで、これまで避けられなかった操業上のばらつきも含めて制御できるようになった結果である。

これらの操業改善の結果、厳しい腐食環境である天然ガス用パイプライン向け鋼材の安定製造を達成した。

② 海底パイプライン向け鋼材の受注・出荷

本技術により過酷な腐食環境においても水素誘起割れを起こしにくい鋼材を安定して製造できるようになったことで、東南アジアの海底ガ

ス田開発プロジェクトに採用された。当該案件は鋼材重量8万6千トンの大型プロジェクトであり、当社で単独受注した。

知的財産権の状況

本開発装置に関する主要な特許登録は下記の通りである。

① 日本国特許第5051204号

名称:連続鋳造鋳片の凝固完了位置検知方法及び検知装置並びに連続鋳造鋳片の製造方法

概要:超音波の横波消失を用いて凝固位置の算出式を校正する方法に関する。

② 日本国特許第7318848号

名称:凝固位置計測装置、凝固位置計測方法、金属材料の品質管理方法、鋳造設備、金属材料の製造設備及び金属材料の製造方法

概要:自動的に凝固完了位置を測定する装置及び方法に関する。

他、国内特許30件、外国出願7件を出願した。

むすび

今回、連続鋳造における凝固完了位置を自動的・連続的に測定する装置を世界で初めて開発・実用化した。製鉄、特に鋳造分野における長年の課題の一つであった凝固完了位置計測を可能とする技術である。

開発した本装置を活用し、凝固完了位置の把握、操業改善を行い、天然ガス用パイプライン向け厚鋼板の品質向上を達成した。

本装置を用いて製造した高品質厚鋼板は、2023年から2024年にかけて東南アジアの海底ガス田開発プロジェクトに採用され、鋼材重量8万6千トンを出荷するなど、世界のエネルギー需要に応えるとともに、CO₂削減に寄与している。

当社は、製鉄プロセスにおける課題を克服し、CO₂削減、環境調和製鉄を通じ、持続可能な社会の実現に貢献していく所存である。