

電磁超音波を用いたスラブ内部温度測定

Measurement of Slab Temperature by Electromagnetic Ultrasonic Method

新日本製鉄(株)八幡製鉄所
光製鉄所
八幡製鉄所

平本祐二*
沖森麻佑巳
副島 薫・池崎英二

1. 緒 言

連続鋳造機と圧延工程の間では、省エネルギーを主な目的としてHDRやDHCRが行われている。HDRやDHCRでは、連続鋳造機で冷却水量を適正に制御して高温のスラブを安定して製造するとともに、スラブの装入温度や抽出温度に応じたエネルギーをエッジヒーターや加熱炉で投入する必要がある。このためには高温スラブの温度を精度良く測定する技術の確立が重要である。

上記ニーズを実現するための手段として、電磁超音波透過速度のスラブ温度依存性を利用したオンラインスラブ内部温度測定技術の開発を行い、可能性を見出したので報告する。

2. 従来の知見と開発課題

2.1. 従来の知見

電磁超音波は磁界と渦電流の相互作用によって導電材料中に直接超音波を発生させ、またその逆の原理で超音波を検出するものであり、これを利用し当社において連続鋳造機における未凝固スラブの凝固シェル厚み計を開発した^{1), 2)}。この開発結果によれば、スラブ温度の低下に伴い超音波透過速度は増加するとの知見が得られており、スラブ温度計として用いる際に残された以下の課題の検討を行った。

2.2. 開発課題

高温のスラブを対象にした超音波の送受信装置、データ処理装置に関しては前述した凝固シェル厚み計の開発において技術が確立しており、スラブ温度計として用いる際の課題は以下の通りである。

(1) 厚み方向に温度分布を有するスラブ平均温度の測定精度

Fig. 1には電磁超音波を用いたスラブ内部温度測定方法を、Fig. 2にはスラブ厚み方向の温度分布のイメージ図を示す。Fig. 1に示した送信センサーから発信した超音波のスラブ厚み方向透過速度が

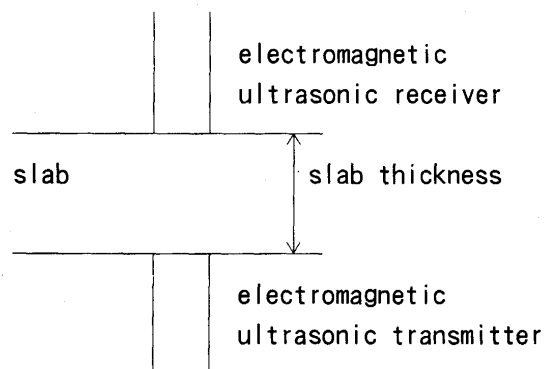


Fig.1 Measuring method of slab temperature by electromagnetic ultrasonics

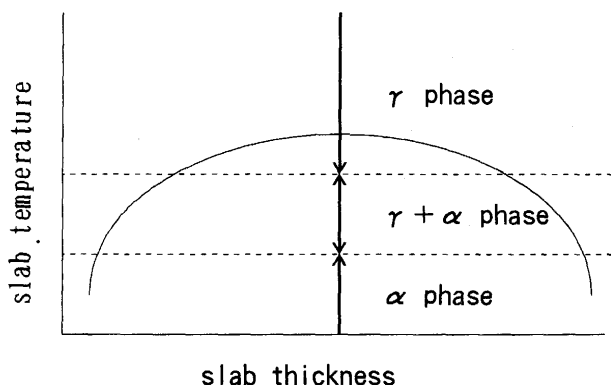


Fig.2 Distribution of slab temperature

Fig. 2に示した温度分布の平均値と対応が取れば、平均温度の測定が出来る。なお、スラブ幅方向や長手方向の温度分布を測定する場合には、Fig. 1に示した送信センサーと受信センサーをスキャンさせながら超音波を送受信させる。

Fig. 2に示すように高温スラブは厚み方向に温度分布を持ち、温度分布の状態によっては結晶構造が異なる γ 相と α 相が厚み方向に混在した状態になる。したがって、これらの相の超音波透過速度が大きく異なる場合、平均スラブ温度が同一でも温度分布に違いがあれば（厚み方向で γ 相と α 相の比率が異なる）、スラブ厚み方向の平均超音波透過速度に差が生じる可能性がある。

(2)スラブ表面に付着した酸化スケールの影響

高温のスラブでは表面に酸化スケールが発生し、厚くなるとスラブ表面から部分的に浮き上がり空隙を生じる。この結果、渦電流の大部分が酸化スケール内に発生し鋼の表面では減衰するために、鋼表面で微弱な超音波しか発生せず、受信側で超音波を検出出来なくなる懸念がある。

(3)鋼の成分の影響

成分が異なるとスラブ内部の結晶組織や相の状態が変化し、同一温度でも超音波透過速度が変わってくる可能性がある。

3. 実験内容

3.1. 実験装置の概要

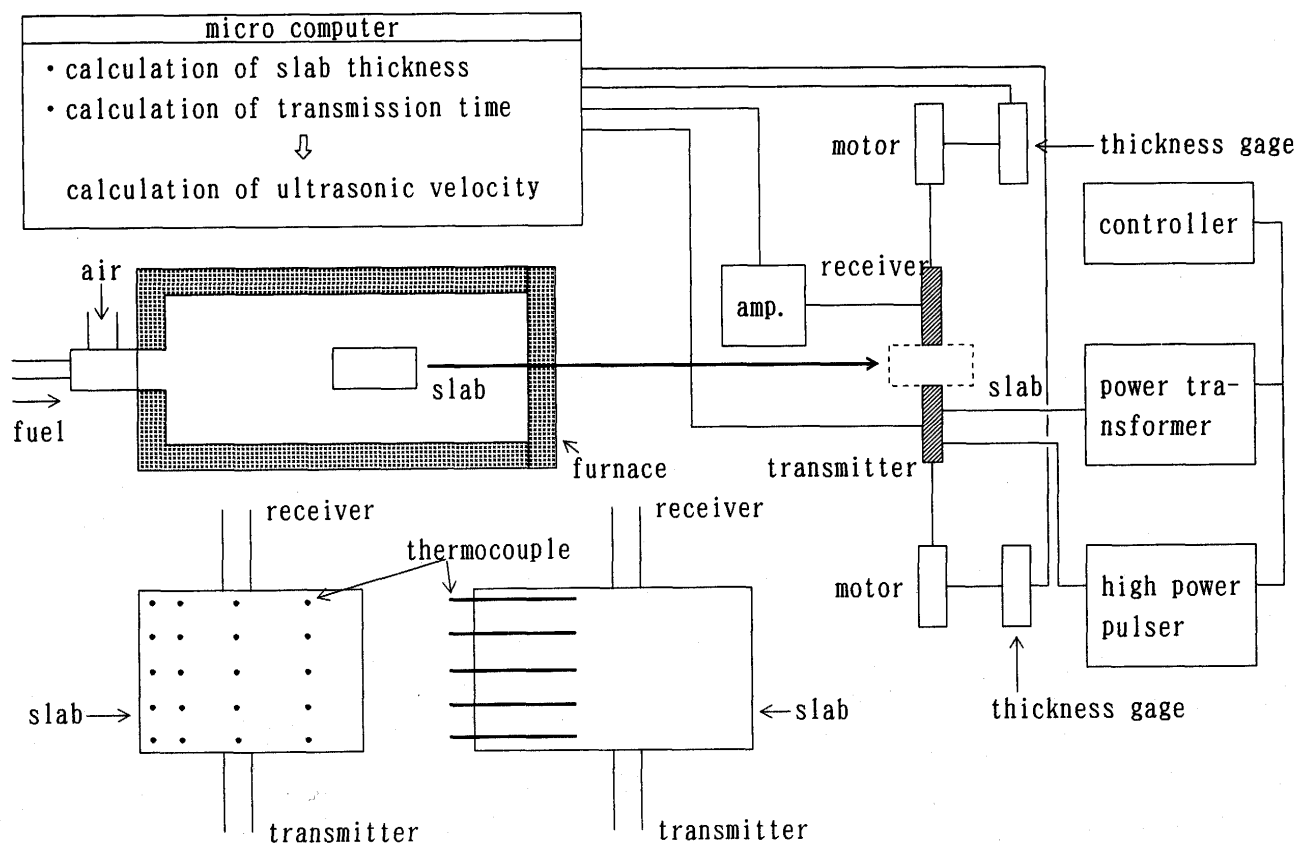


Fig.3 Outline of laboratory equipment

Fig. 3に今回の実験に用いた装置の概要及びデータ処理フローを示す.

3.2. 実験方法

Fig. 3に示す装置において加熱炉で1200℃までスラブを昇温・均熱の後, 取り出してスケールを除去し, 送信・受信センサー間にセットした. その後スラブを自然放冷させながら間欠的に超音波の発信・受信を行い, 同時にスラブ温度分布を測定した.

なおスケールの影響を評価する際は, 昇温時に発生したスケールを除去せずにそのまま実験を行い, 実験後スケール厚みを測定した.

実験には低炭素鋼, 方向性電磁鋼 (Si鋼) の2鋼種を用いた.

4. 実験結果

4.1. 実験中のスラブ温度降下と温度分布について

Fig. 4に低炭素鋼のスラブ厚み方向5点の温度経時変化の一例を示すが, 厚み方向にはほぼ放物線状の温度分布を持ちながら冷却されている.

したがって, 前述したように厚み方向で γ 相 $\Rightarrow$ α 相の変態が発生するタイミングが異なっており, 厚み方向に異なった相が混在することが超音波透過速度に与える影響に対して注意する必要がある.

4.2. 超音波透過速度のスラブ温度依存性

Fig. 5にスラブ厚み方向平均温度と超音波透過速度の関係を示す. 凝固シェル厚み計における知見と同様に, スラブ温度が低下するに従い超音波透過速度は増加するが, 以下の新たな知見が判明した.

(1) 厚み方向に温度分布を有するスラブの場合, 温度低下に伴う相変態が表層部で先に起こり厚み方向

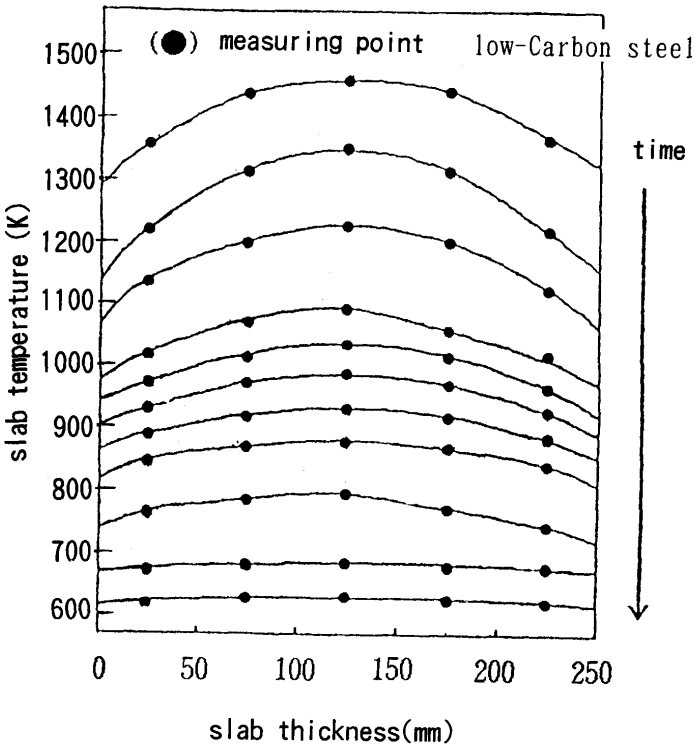


Fig.4 Exeperimental method by changing natural cooling slab temperature

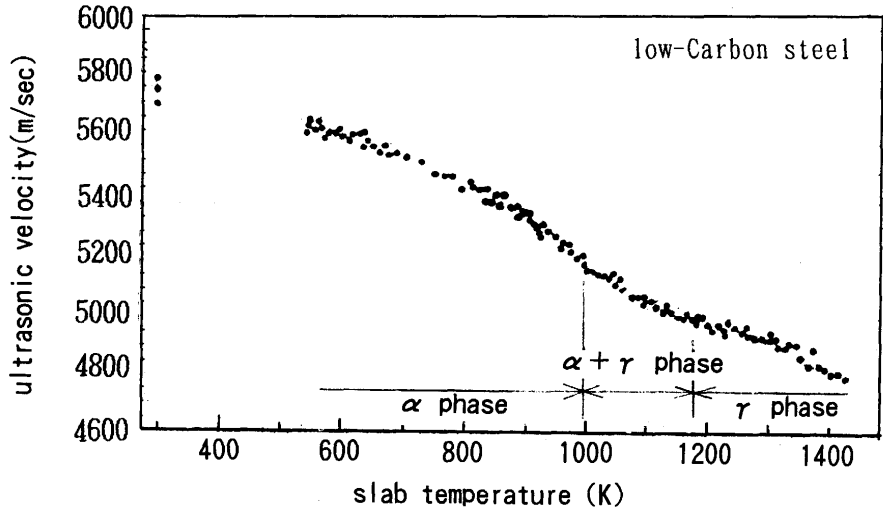


Fig.5 Relationship between ultrasonic velocity and slab temperature

で相が混在した状態になるために、変態に伴う音速の屈曲点が明瞭でなく、また平均温度から考えられる変化点とも一致しない。

(2)しかし、 α 相、 $\alpha + \gamma$ 相、 γ 相の各温度領域にある程度準じて、超音波透過速度とスラブ平均温度との関係式を持つことで、電磁超音波を用いたオンラインスラブ温度測定が可能である。

4.3. スラブ表面の酸化スケールが超音波透過速度特性に与える影響

Fig. 5に加熱時に生成した酸化スケールを除去した場合と、除去せずにそのまま実験を行った場合の超音波受信波形を示す。(実績スケール厚みは1～1.5 mm)

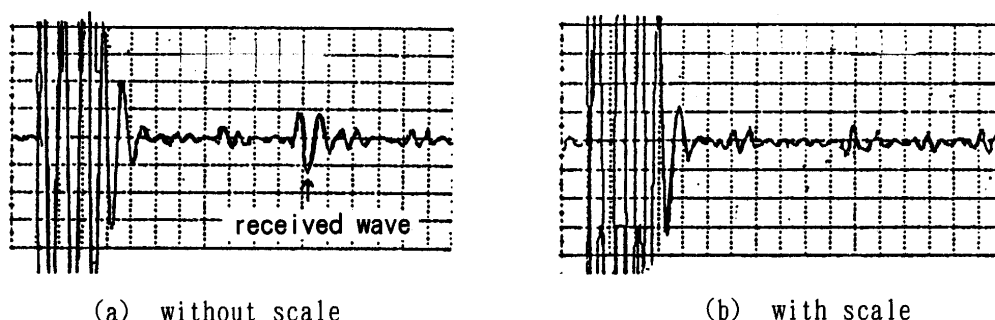


Fig.6 Received wave pattern of electromagnetic ultrasonics
(low-Carbon steel)

Fig. 6より、付着スケールが有ることによって前述したようにスケール内で渦電流が生じ、スラブ内を超音波が伝搬しなくなる。したがって電磁超音波を用いてスラブ温度を測定する場合、酸化スケールを除去する必要がある。

4.4. 鋼中成分の影響について

方向性電磁鋼(Si鋼)に関しては、スラブ温度の低下に伴って α 相 $\Rightarrow$ γ 相 $\Rightarrow$ α 相と変態が生じるためにそれに伴って音速が上下し、ばらつきが大きくなる。よってこのような変態挙動を示す鋼種に関しては電磁超音波を用いたスラブ温度測定は困難であることが判った。

5. 結 言

連続鋳造の出片時や熱間圧延工程前の加熱前後におけるオンラインスラブ温度計測手段として、電磁超音波を用いた温度計測技術の適用の可能性についてラボ実験を行った結果、低炭素鋼についてはスラブ平均温度とスラブ内超音波透過速度の間に良好な相関が得られ、温度計としての適用の可能性を見出した。

参考文献

- 1) 米田, 川島, 吉田, 三好: 電磁超音波による凝固シェル厚測定装置, 非破壊検査34-11, (1980), P815-819
- 2) 吉田, 厚美, 大橋ら: 電磁超音波によるオンライン連铸凝固シェル厚み測定とクレーターエンド推定, 鉄と鋼, 70, (1984), P1123-1130