

© 1984 ISIJ

# 電磁超音波法によるオンライン連铸凝固 シェル厚み測定とクレータエンド推定

論文

吉田 透\*・厚見 直\*・大橋 渡\*・加賀谷幸司\*  
 椿原 治\*<sup>2</sup>・曾我 弘\*<sup>3</sup>・川島 捷宏\*<sup>3</sup>

## On-line Measurement of Solidification Shell Thickness and Estimation of Crater-end Shape of CC-slabs by Electromagnetic Ultrasonic Method

Tôru YOSHIDA, Tadashi ATSUMI, Wataru ÔHASHI, Kôji KAGAYA,  
 Osamu TSUBAKIHARA, Hiromu SOGA and Katsuhiko KAWASHIMA

### Synopsis:

To establish the technique for producing very high temperature steel slabs required in a continuous casting-direct rolling process, the measurement method for the solidification shell thickness of a continuous casting steel slab has been developed using the electromagnetic ultrasonic technique, and industrialized at Sakai Works, Nippon Steel Corporation. The main features of this method are as follows:

- (1) On-line, real time, non-contact and continuous measurement is done at every 15 seconds.
- (2) Sensors are transversally scanned and the measurement is done at any desired points.

The measurement error was determined to be 1.2 mm (standard deviation) by comparing the measured results with the destructive method, driving a special aluminum plated rivet into a slab of 250 mm in thickness.

Combining the shell thickness measurement with the two dimensional solidification simulation, the estimation method for the location and the shape of the crater-end (solidification completion end) was also developed.

In the real operation of the continuous casting machine, the shell thickness variation due to the casting speed change was clearly measured and moreover, the interesting shape of the W-figure type craterend was obtained. This measurement system has become very useful for the stable operation of the continuous casting machine and is now working very well.

## 1. 緒 言

連続铸造の操業を適切かつ効果的に制御するためには、铸片の凝固状態を正確に把握することが必要である。特に近年のように連铸-圧延直結化プロセスが指向されてくると、連铸プロセスにおいて高温铸片を製造する技術が重要なポイントとなる。高温铸片を得るために最も重要なことは、クレータエンド（铸片末凝固層先端部）を可能な限り連铸機機端に近づけることであり、それを実現するためには铸片凝固シェル厚みを正確に測定することが必須である。従来よりシェル厚みおよびクレータエンドは、2次冷却水量、铸型抜熱量および铸片表面温度等に基づいて計算する間接的な方法が採られていた。

本報では電磁超音波を利用して直接的にシェル厚みを

測定する方法の実用化について述べ、その測定精度をA1めつき鋸の鋸打ち結果と電磁超音波の透過時間精度等に基づいて考察した。さらにシェル厚み測定法に基づいて開発したクレータエンドの推定法について紹介し、2次元熱伝導モデルによる計算値およびA1めつき鋸の鋸打ち結果との対比によつて本推定方法が妥当なことを明らかにした。

## 2. 凝固シェル厚み測定方法

### 2.1 凝固シェル厚み測定原理

電磁超音波および凝固シェル厚み測定の基本原理については、既に報告済み<sup>1)2)</sup>であるので、ここではごく簡単にふれるにとどめる。Fig. 1において、超音波が铸片を透過するのに要する時間と凝固シェル厚みの関係は、両側の凝固シェル厚みが等しい場合次式となる。

昭和 58 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 58 年 11 月 29 日受付 (Received Nov. 29, 1983)

\* 新日本製鉄(株)堺製鉄所 (Sakai Works, Nippon Steel Corp., 1 Chikkoyahatamachi Sakai 590)

\*<sup>2</sup> 新日本製鉄(株)製鋼技術部 (Steelmaking Technical Div., Nippon Steel Corp.)

\*<sup>3</sup> 新日本製鉄(株)第一技術研究所 工博 (R & D Laboratories - I, Nippon Steel Corp.)

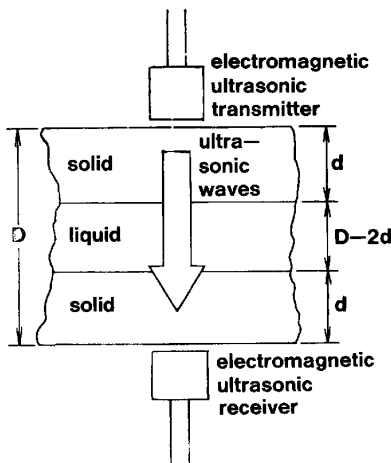


Fig. 1. Measurement principle of solidification shell thickness of CC slab.

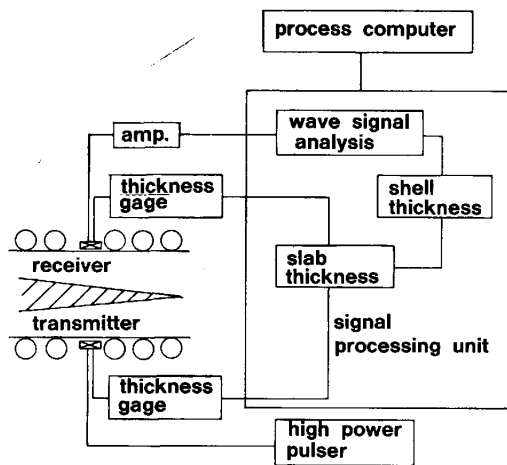


Fig. 2. Schematic diagram of solidification shell thickness measurement system in practical use at Sakai Works.

$$\tau = \frac{d}{V_s} + \frac{D-2d}{V_l} + \frac{d}{V_s}$$

$$d = \left( \tau - \frac{D}{V_l} \right) / 2 \left( \frac{1}{V_s} - \frac{1}{V_l} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここで  $\tau$  : 電磁超音波透過時間  
 $\bar{V}_s$  : 固相中の平均超音波速度  
 $\bar{V}_l$  : 液相中の平均超音波速度  
 $D$  : 鋳片厚み  
 $d$  : 凝固シェル厚み

(1)式より明らかなように、凝固シェル厚みの算出には、電磁超音波の透過時間、鋳片厚みおよび固相・液相中の平均超音波速度の測定が必要となる。

**2.2 凝固シェル厚み測定システム**

測定システムは Fig. 2 に示すように、電磁超音波発生および受信装置・鋳片厚み測定装置・データ処理装置より構成されており、連鋳機機端より 3m の位置に設

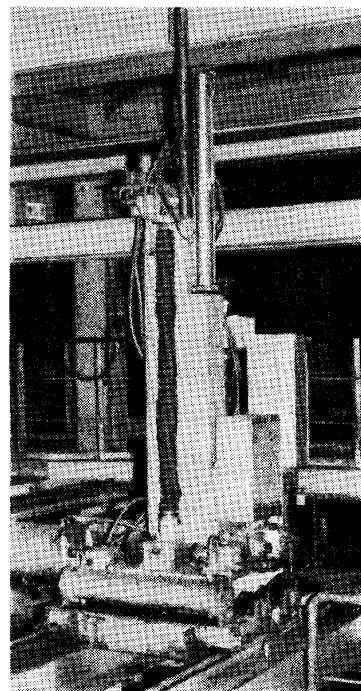


Photo. 1. Solidification shell thickness measurement system in CC-machine, Sakai Works.

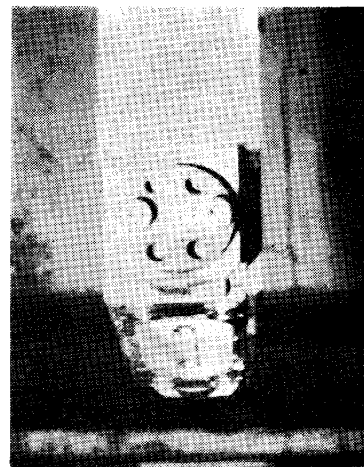


Photo. 2. Electromagnetic ultrasonic transducer in use to measure solidification shell thickness.

置した。現場での設置状況を Photo. 1 に示す。

電磁超音波送受信端は、鋳片幅方向の移動装置と昇降装置により駆動される。昇降装置は昇降ストロークが 2 m と長いのでジャッキと昇降シリンダの組み合わせによる 2 段昇降方式とし、測定時には昇降シリンダのみの動作とし待機時にはジャッキを昇降させる構造である。電磁超音波の発生・受信装置は高圧パルス発生装置・送受信電磁超音波変換子・増幅器等より構成されている。送受信変換子は 28 mm×50 mm の大きさであり全体を水冷カバーで冷却し、水冷カバーの先端には耐熱ロールを設置している。これを Photo. 2 に示す。このロール

は铸片表面と変換子間のエアギャップを一定に保つとともに移動中の铸片とのスムーズな接触を可能にしている。铸片表面と変換子との間のエアギャップは、信号のS-N比上極めて重要であり現在約1mmとしている。高圧パルス発生装置は送受信変換子先端の耐熱ロールが铸片に到達した時にパルスを発生させる。1回の測定に対し3回パルスを発生させ測定信頼性を高めている。铸片厚みは昇降シリンダに取り付けられたマグネスケール方式による铸片厚み測定装置によりおこなう。データ処理装置は超音波の波形を解析し超音波透過時間を算出するとともに(1)式によつて凝固シェル厚みを計算するものである。なお本測定システムの装置部分は、その製作を三菱電機(株)に依頼した。

3. 固相・液相中の平均超音波速度の推定

3.1 超音波の伝搬速度に対する温度・成分の影響

固相内の超音波の伝搬速度は高温域において、温度上昇とともに遅くなる(-0.6 m/s·deg)<sup>3)</sup>と言われているが、高温域での成分の影響については知られていない。そのため電気炉を用いてサンプルを均熱加熱し電磁超音波反射法にて実験を行った。使用したサンプルは凝固シェル厚みの測定対象としている連铸スラブで、[C]=4.6×10<sup>-2</sup>%、15×10<sup>-2</sup>%、23×10<sup>-2</sup>%の3種類とし、Cに対する影響を、測定対象としている温度域である800°C~1200°Cにわたつて調査した。なお本実験においては、温度による膨張およびスケール生成によるスラブの厚み変動に基づく超音波速度測定誤差の補正を行った。実験結果をFig. 3に示すが、この結果から下記の結論が得られる。

(1) 800°C~1200°Cの温度領域で、Cが4.6×10<sup>-2</sup>%~23×10<sup>-2</sup>%の範囲では、超音波速度はCの影響を受けず、同一温度では、一定の速度である。

(2) 800°C~1200°Cの温度領域では、超音波速度V(m/s)と温度T(°C)の関係は下記(2)式で表せる。

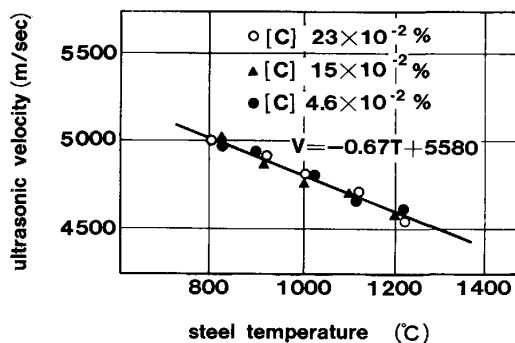


Fig. 3. Relation between ultrasonic velocity and temperature for steel.

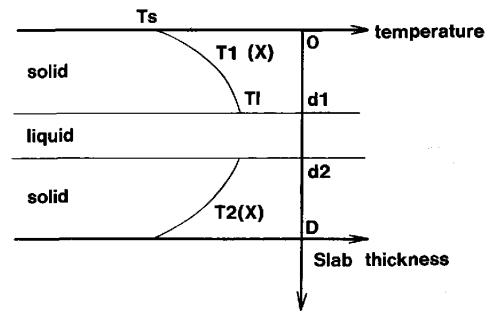


Fig. 4. Temperature distribution in CC slab.

$$V = -0.67 T + 5580 \dots\dots\dots (2)$$

(3) (2)式の関係は、既に得られている実験結果<sup>3)</sup>と多少の差異は有するが、これは主として対象サンプルの差異に起因するものと考えられ、本装置では(2)式を用いて実用化した。

次に液相内の超音波速度であるが、液相内の温度はほぼ一定と考えられ、超音波速度もほぼ一定とし、既に得られている実験値<sup>4)</sup>である3900 m/sを用いた。

3.2 固相内温度分布と平均超音波速度の関係

固相内の超音波の伝搬速度は、温度に依存しており、したがつて固相内の平均超音波速度の推定には铸片内部の温度分布が重要となる。固相内の铸片内部の温度分布を、Fig. 4に示すようにT<sub>1</sub>(x)、T<sub>2</sub>(x)と仮定すると、超音波の伝搬時間(τ<sub>1</sub>)は(3)式、したがつて固相内平均超音波速度(V<sub>s</sub>)は(4)式となる。

$$\tau_1 = \int_0^{d_1} \frac{dx}{V(T_1(x))} + \int_{d_2}^D \frac{dx}{V(T_2(x))} \dots\dots\dots (3)$$

$$\bar{V}_s = \{d_1 + (D - d_2)\} / \tau_1 \dots\dots\dots (4)$$

ここで d<sub>1</sub>, (D - d<sub>2</sub>) : 凝固シェル厚み

D : 铸片厚み

次に固相内の温度分布を铸片の熱伝導モデルを用いて求める。铸片内部の温度分布は、非定常熱伝導方程式を解くことにより求められるが、前進差分法<sup>5)</sup>を使用して計算を行った。ここで铸片内部の熱移動は長さ方向の温度勾配が小さく、厚み・幅の2方向のみについて考える。また铸片の冷却過程では、物性値の温度変化を考慮する必要があるため、熱伝導方程式はエンタルピ(H)、変換温度(φ)による表現形式とした。これを次式に示す。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\lambda_0}{\rho} \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (5)$$

ここで H : エンタルピ

$$\phi : \text{変換温度} \left( = \int_0^T \frac{\lambda}{\lambda_0} dT \right)$$

T : 温度

λ<sub>0</sub> : 基準温度における熱伝導率

- λ : 熱伝導率
- x : 厚み方向座標
- y : 幅方向座標
- ρ : 密度

鋳片の上・下表面及び側面については、表面からの熱放散があり、これを境界条件として(5)式を解くことが必要である。鋳片厚みおよび幅方向の熱放散をそれぞれ  $Q_x$ ,  $Q_y$  とすると(6)式で表現できる。

$$Q_x = -\lambda_0 \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad Q_y = -\lambda_0 \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad \dots\dots\dots (6)$$

連鋳機をモールド部・スプレ冷却帯・気水冷却帯・復熱帯の4部分に分割し、各部の  $Q_x$ ,  $Q_y$  を与えて(5)(6)式に代入してシェル厚み測定装置近傍の鋳片エッジから 100 mm, 200 mm 並びに中央での鋳片内部の厚さ方向の温度分布を計算した。その結果の一例を Fig. 5 に示す。

Fig. 5 の結果から鋳片内部の温度プロフィールは凝固温度と表面温度をパラメータとしてほぼ2次式で近似でき、また鋳片厚み方向の中心に対し対称である。したがって  $d = d_1 = (D - d_2)$  とおくと、(7)式が得られる。

$$T(x) = \frac{T_s - T_1}{d^2} (x - d)^2 + T_1 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで  $T_s$  : 表面温度  
 $T_1$  : 凝固温度 (固相線温度)

(7)式を(3)(4)式に代入することにより次式が得られる。

$$\bar{V}_s = \frac{d}{\frac{1}{\sqrt{AB}} \left( -\tan^{-1} \left( -d \sqrt{\frac{A}{B}} \right) \right)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで  $A = a(T_s - T_1)/d^2$ ,  $B = aT_1 + b$   
 $a = -0.67$ ,  $b = 5580$  ((2)式の係数)

(8)式並びに  $\bar{V}_1$  を(1)式に代入すると凝固シェル厚み  $d$  に関する方程式が得られるが、(8)式にて  $| -d$

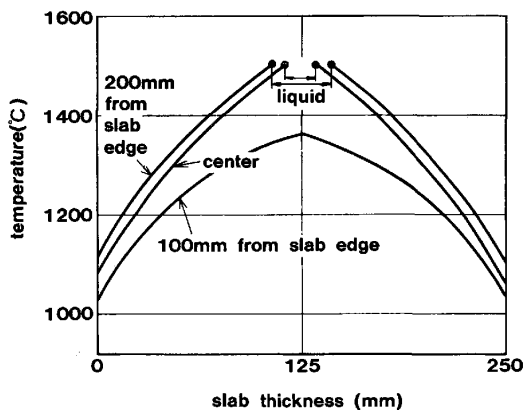


Fig. 5. Calculated temperature distribution in CC slab.

$\sqrt{A/B} \ll 1$  であり、 $\tan^{-1}$  の項を級数展開し3次の項までとると、(8)式は(9)式のように簡略化できる。

$$\bar{V}_s = \frac{aT_1 + b}{1 - \frac{1}{3} \frac{a(T_s - T_1)}{aT_1 + b}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

(9)式の分母第2項は1に比し十分小さいので(10)式のように近似することができる。

$$\begin{aligned} \bar{V}_s &= (aT_1 + b) \left( 1 + \frac{1}{3} \frac{a(T_s - T_1)}{aT_1 + b} \right) \\ &= \frac{2T_1 + T_s}{3} a + b \quad \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

一方、次式で固相部断面平均温度 ( $\bar{T}$ ) が計算できる。

$$\begin{aligned} \bar{T} &= \frac{\int_0^d T(x) dx}{d} = \frac{\int_0^d \left\{ \frac{T_s - T_1}{d^2} (x - d)^2 + T_1 \right\} dx}{d} \\ &= \frac{2T_1 + T_s}{3} \quad \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

(11)式、(2)式および(10)式から固相内平均超音波速度は、固相部断面平均温度により表せるという重要な結論が得られた。

(10)式並びに  $\bar{V}_1$  を(1)式に代入するとただちに凝固シェル厚みが得られ迅速な計測制御が可能となり本装置では、(10)式を用いることにした。(8)式と(10)式の誤差は、凝固シェル厚み測定条件の範囲で厳密に計算し比較すると、たかだか 0.05% であり、問題にならないことがわかった。

#### 4. 凝固シェル厚み測定精度の確認と考察

##### 4.1 凝固シェル厚み測定精度の実験による確認

電磁超音波による凝固シェル厚みの測定精度を確認するためには他の方法による測定値との比較が必要である。従来の測定方法としては、放射性同位元素や硫化鉄、鉛などが試みられてきたが<sup>6)7)</sup>、凝固末期のシェル厚みの測定法としては問題があつた。また金属鋅を鋳片表面から凝固界面近傍に打ち込む鋅打ち法がある<sup>8)</sup>が、実際に鋅打ち試験(鋅の材質: SCM-4)を実施したところ凝固末期のシェル厚みの厚い領域では明確な測定結果が得られず、この鋅では融点が高すぎて凝固末期のシェル厚み測定には、精度上問題があるのではないかと考えた。そこで凝固末期のシェル厚み測定精度の改善を目的に、融点の低い Al を鋼製鋅(材質: SCM-4)の表面にめつきした鋅を試作し、鋅打ち試験を実施した。この試験で凝固末期の鋳片に打ち込んだ鋅の代表的な断面写真を Photo. 3 に示す。Photo. 3 から、鋅本体は溶融せず Al のみが溶融して鋳片内に拡がった様子がうかがえるが、この Al の拡がり方から鋼単味の鋅では検出できな

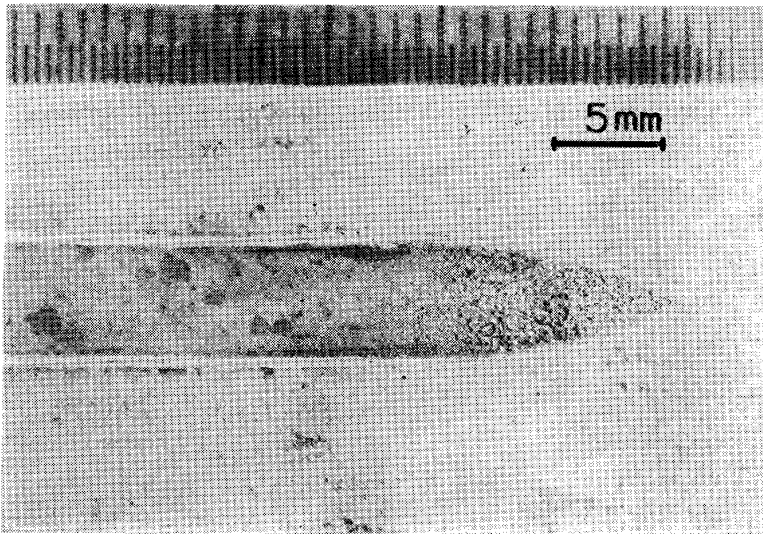


Photo. 3. Typical cross section of aluminum plated rivet method (etched by picric acid).

Table 1. Test conditions.

No.	Steel grade	Slab thickness (mm)	Casting speed (m/min)	Cooling water ratio (l/kg)
1	L[C]-Al-K	250	1.6	0.77
2	L[C]-Al-K	250	1.0~1.6	0.52
3	L[C]-Al-K	250	1.43~1.5	0.52

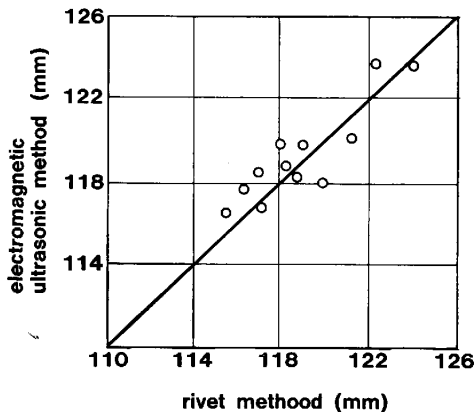


Fig. 6. Solidification shell thickness, measured by rivet method versus electromagnetic ultrasonic method.

い固相率の高い溶鋼が鋳片の中心部に残留していたことが推測される。凝固シェル厚みの測定においては、めつき金属である Al が凝固界面の凹凸をなぞるような形で分布するものと考え、Al の拡がりの中で最も表面に近い境界まで未凝固部分が存在すると判断しそこから表面までの距離を凝固シェル厚みとした。

実铸造において、この Al めつき鋳と電磁超音波による凝固シェル厚みの測定を、鋳片幅中心とエッジから 200 mm 位置にて実施し、その測定値の比較を行った。テスト条件を Table 1 に、テスト結果を Fig. 6 に示すが、この結果から Al めつき鋳測定値に対する電磁超

音波による測定値の誤差は、 $\sigma = 1.2 \text{ mm}$  であると言える。

4.2 測定精度に対する考察

電磁超音波による凝固シェル厚みの測定精度は、Al めつき鋳を用いた鋳打ち法に対し  $\sigma = 1.2 \text{ mm}$  であると述べたが、ここでは各計測値の精度から考察する。凝固シェル厚み ( $d$ ) は、超音波透過時間 ( $\tau$ )、鋳片厚み ( $D$ )、固・液相内平均超音波速度の関数で表現できる。

$$d = f(\tau, D, \bar{V}_s, \bar{V}_l) \dots\dots\dots (12)$$

誤差は次式であらわされる<sup>9)</sup>。ただし  $\bar{V}_l$  の誤差は無視した。

$$|\Delta d| \leq \left| \frac{\partial f}{\partial \tau} \Delta \tau \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial D} \Delta D \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial \bar{V}_s} \Delta \bar{V}_s \right| \dots\dots\dots (13)$$

(1) 透過時間の計測誤差 ( $\Delta \tau$ )

透過時間は超音波の発生時点と到達時点の差により計測しており、したがって超音波の真の発生・到達時点を求めなければならない。そのためには綿密な受信波形の解析が重要であるが、受信波形は冷片と熱片では大きく異なっており熱片テストをする必要がある。温度と超音波速度は(2)式の関係があり、したがって温度分布のわかつたスラブでは透過時間が計算でき、これと実測した透過時間の差を計測誤差とした。すなわち、加熱炉にて加熱したスラブの厚み方向 10 点に熱電対を埋め込み、スラブの温度分布を測定し、この温度分布に基づいて透過時間を算出する。この計算透過時間と実測透過時間の関係を Fig. 7 に示すが、これから透過時間の計測誤差は  $\sigma_\tau = 0.09 \mu\text{s}$  と言える。

(2) 鋳片厚み計測誤差 ( $\Delta D$ )

校正用の冷片スラブを用いて、シェル厚み計に設置さ

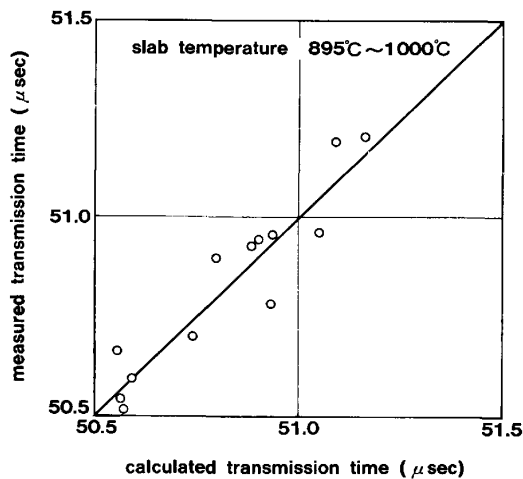


Fig. 7. Relation between calculated transmission time and measured one.

Table 2. Measurement error of shell thickness.

No.	Factor	Coefficient (Ki)	Measurement error ( $\sigma_i$ )	Ki $\sigma_i$	
1	measurement error of transmission time	12 mm/ $\mu$ s	0.09 $\mu$ s	1.08 mm	
2	measurement error of slab thickness	3.0	0.034 mm	0.10 mm	
3	measurement error of average ultrasonic velocity in solidification shell	123 $\mu$ s	$1.8 \times 10^{-3}$ mm/ $\mu$ s	0.22 mm	
measurement error of shell thickness				$\sigma_s = \sqrt{\sum_{i=1}^3 (Ki \sigma_i)^2}$	1.1 mm

れているマグネスケールで測定した結果、校正片の実寸との誤差は、 $\sigma_D = 0.034$  mmであることがわかった。

(3) 固相内平均超音波速度の誤差 ( $\Delta \bar{V}_s$ )

固相内平均超音波速度の誤差は、表面温度の計測誤差、凝固温度の推定誤差および平均超音波速度算出を(10)式の近似式を用いていることに起因する誤差である。表面温度は放射温度計で計測しているが、ランドカップによる測温値と比較した結果、誤差は $\sigma_T = 7^\circ\text{C}$ であり、平均超音波速度に対し $\sigma = 0.04\%$ である。また(10)式の近似式を用いたことによる平均超音波速度の推定誤差は最大3 $\sigma$ で平均速度の0.05%である。なお凝固温度の推定誤差は無視できるとした。

以上のことをもとに、凝固温度を1500°C、表面温度を1000°C、鋳片厚みを250 mm、凝固シェル厚みを118 mmとした場合の(1)~(3)項の誤差影響係数およびこの条件での計測誤差を含めた総合的な凝固シェル厚みの計測精度をTable 2に示すが、 $\sigma = 1.1$  mmである。この精度は表面温度の計測誤差、平均超音波速度の推定誤差や鋳片厚み計測誤差に起因するよりはむしろ上記

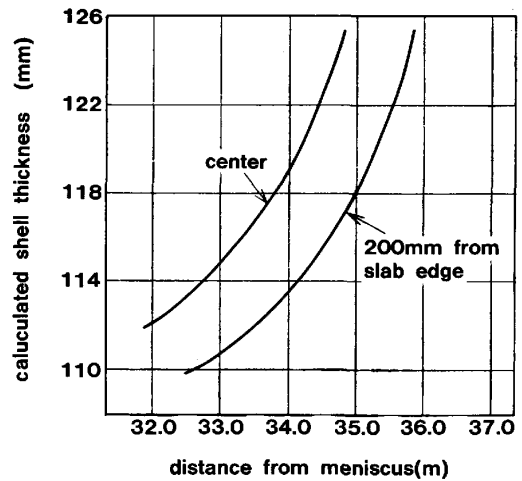


Fig. 8. Calculated shell thickness using heat transportation equation.

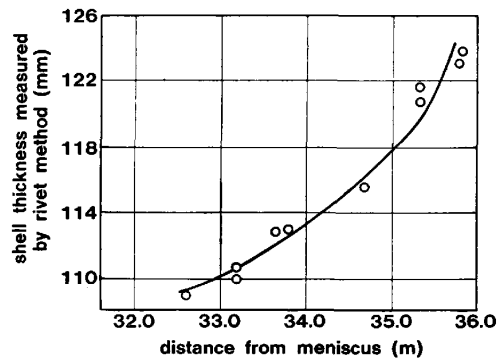


Fig. 9. Shell thickness measured by rivet method in the vicinity of crater-end (solidification completion end).

(1)項に述べた超音波透過時間、すなわち超音波の真の発生および到達時点の検出誤差が最大要因であると言える。またこの精度はFig. 6のAlめつき鋳との対比による実測測定誤差とよく対応しており、電磁超音波による計測精度は $\sigma = 1.1 \sim 1.2$  mm程度であると言える。

5. クレータエンド推定方法

5.1 クレータエンド近傍の凝固モデル

クレータエンド近傍の凝固過程を3.2項で述べた2次元熱伝導モデルにより計算し、その結果の一例をFig. 8に示す。これから凝固の完了する近傍では、鋳片エッジ200 mm位置から鋳片幅中央まで凝固厚みは異なるが、ほぼ同様の凝固挙動を示し、かつ加速凝固の様相を呈している。次にAlめつき鋳を用いて凝固末期のシェル厚みを計測した。これをFig. 9に示すが、これからも凝固完了近傍は加速凝固域であると言える。

そこで加速凝固域での凝固過程をモデル化する。鋳片厚み方向の温度分布を2次式で仮定し、またこの領域で

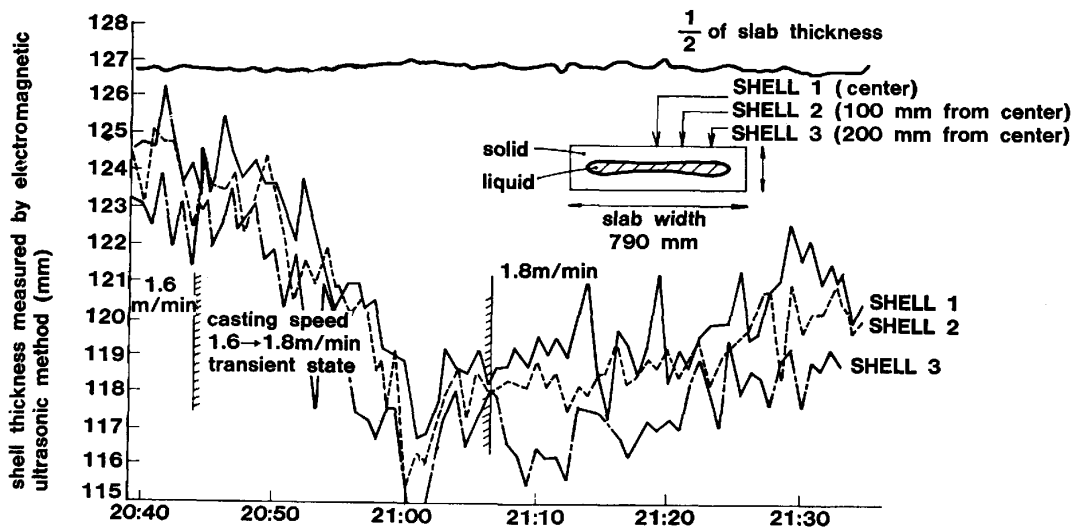


Fig. 10. Continuous measurement of shell-thickness at three different locations.

の固相の成長速度は鋳片表面での熱放散の影響をほとんど受けず凝固界面での熱バランスのみで決まると考える。さらに Fig. 9 の結果を考慮すると (14) 式の微分方程式で表すことができる。

$$\frac{dX}{dt} = K \frac{1}{D/2 - X} \dots\dots\dots (14)$$

ここで X : 凝固シェル厚み  
 D : スラブ厚み  
 K : 凝固パラメータ

(14) 式の K は、Fig. 9 の結果より回帰して求め、 $K=78 \text{ mm}^2/\text{min}$  と定めた。この K 値は鋳片エッジ 200 mm 位置から鋳片中心位置まで同一であった。 (14) 式より次式が導かれるが、これによりある時刻でのシェル厚み測定値  $X_0$  より  $t_1 \text{ min}$  後の同じ鋳片部分のシェル厚み  $X_D$  を計算することができる。

$$X_D = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2} - X_0\right)^2 - 2Kt_1} \dots\dots\dots (15)$$

シェル厚み測定後に  $X_D = D/2$  となるに要する時間、すなわち完全凝固するに要する時間  $t_2$  は同様に次式で求められる。

$$t_2 = \frac{1}{2K} \left(\frac{D}{2} - X_0\right)^2 \dots\dots\dots (16)$$

この  $t_2$  と鋳造速度およびシェル厚み計測位置より、完全凝固する位置、すなわちクレータ先端位置が推定できる。同様に、シェル厚み計を鋳片幅方向に走査し (16) 式を用いることにより、鋳片エッジ 200 mm 位置から鋳片中心位置までのクレータ先端の形状推定が可能である。

5.2 実操業への適用

実操業にて凝固シェル厚みを計測した結果を Fig. 10

に示す。測定は鋳片幅中心位置とエッジ方向 2 点の計 3 点である。 Fig. 10 において 20 時 44 分頃までは鋳造速度は 1.6 m/min であり、2 次冷却水量は 0.57 l/kg である。その後鋳造速度を 1.8 m/min に上昇させると同時に冷却水量も 0.77 l/kg に増加させている。凝固シェル厚みは最初は 124 mm 前後とほぼ安定しているが、増速直後より減少しはじめ 21 時 0 分頃に最小値 115 mm を示した後に定常的な厚み約 120 mm に回復している。増速前後の定常的な厚みはそれぞれの鋳造速度、冷却水量によって決まる厚みであり、その間に最小厚みが過渡的にあらわれているのは 2 次冷却帯終端からシェル厚み測定点までの間約 16 m に冷却水のない復熱ゾーンがあり、速度変更時に 2 次冷却帯終端を通過した部分が増速後比較的短時間でこの復熱ゾーンを通過して測定点まで到達し、その間に凝固が十分に進行しなかつたためであろう。このように電磁超音波のシェル厚み測定装置により、定常部および非定常部の凝固状態の過渡応答までも確実に検出することが可能となつた。

次に幅方向のクレータ先端形状を推定した例を Fig. 11 に示す。 Fig. 11 で鋳片中心位置よりエッジ部のクレータエンドが伸長しているのがわかる。これは連続-圧延直結プロセスにおいて、鋳片エッジ部の温度確保が重要であり、鋳片中央部とは別個にエッジ部の冷却制御を実施していることによるものである。

以上述べたように、本システムにより、凝固シェル厚みの測定並びにクレータエンド位置および先端形状の精度の良い検出が可能となり、本システムは昭和 57 年 7 月より実用化され、連続の高温出片技術に重要な役割を果たしている。

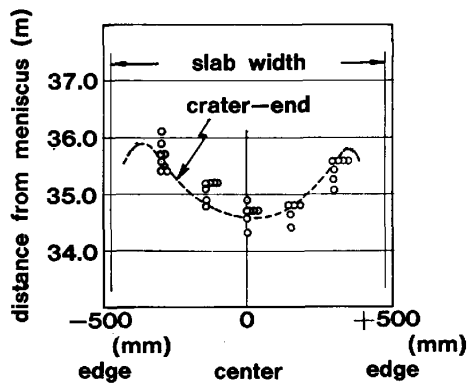


Fig. 11. Shape of crater-end (solidification completion end) estimated by using measured shell thickness and solidification equation.

## 6. 結 言

電磁超音波方式連铸凝固シェル厚み測定装置および方法を開発し、当社堺製鉄所にて実用化し次の結果を得た。

(1) 2次元熱伝導モデルにて铸片内部温度のシミュレーションを実施し、温度分布はほぼ2次式で仮定できることを示した。さらにこれを用いると固相内の平均超音波速度は、良い近似で断面平均温度から求められることを証明し、この関係を用いたシェル厚み計を開発した。

(2) 電磁超音波によるシェル厚みの測定精度は、Alめつき鉾の鉾打ちによる実測結果との比較および計測誤

差分析を行い、 $\sigma = 1.1 \sim 1.2 \text{ mm}$  程度である。

(3) クレータ先端の凝固過程は、加速凝固の様相を呈していることを2次元熱伝導モデルおよびAlめつき鉾で確認しこれをモデル化した。凝固シェル厚み測定と組み合わせることによりクレータエンド位置およびクレータ先端形状の推定が可能となった。

(4) 本システムを実操業に適用した結果、定常部・非定常部の凝固状態の過渡応答まで計測できることが可能となった。本システムは現在順調に稼動し、連铸-圧延直結プロセスの高位安定稼動に有効な役割を果たしている。

## 文 献

- 1) 川島捷宏, 室田昭治, 中森幸雄, 曾我 弘: 非破壊検査, 29 (1980), p. 837
- 2) 川島捷宏: 第76回西山記念技術講座 (1981), p. 229
- 3) E. P. PAPADAKIS, L. C. LYNNWORTH, K. A. FOWLER and E. H. CARNEVALE: J. Acoust. Soc. Amer., 52 (1972), p. 850
- 4) W. KURTZ and B. LUX: Arch. Eisenhüttenwes., 39 (1968), S 521
- 5) 日本鉄鋼協会: 連続鋼片加熱炉における伝熱実験と計算方法, 熱経済技術部会加熱炉小委員会報告
- 6) 稲本金也, 永岡典義, 佐坂三郎, 金子康弘: 鉄と鋼, 55 (1969), S 108
- 7) 川和高穂, 北川 融: 鉄と鋼, 60 (1974), S 60
- 8) 根本秀太郎, 川和高穂, 宮原 忍: 鉄と鋼, 58 (1972), S 115
- 9) 川島捷宏, 中森幸雄, 室田昭治, 曾我 弘: 鉄と鋼, 67 (1980), p. 1515