

精密超音波探傷試験法による連铸スラブ内 欠陥弁別手法の開発

笠井 宣文*・大久保 寛之*・西 隆之*²

The Development of Internal Defects Evaluation Method in Continuous Casting Slabs by
High Frequency Supersonic Flaw Detection Technique

Norifumi KASAI, Hiroyuki OOKUBO and Takayuki NISHI

Synopsis : We developed the internal defects and inclusions evaluation method in continuous casting cleanliness slabs by using supersonic flaw detection technique.

The size and position of defect in a slab was detected by several echoes of supersonic by a neural network signal treatment. Internal defect and inclusion was distinguished according to the phase and amplitude of the echoes. The size of defects was calibrated by preliminary artificial defect testing. Those results was compared with the optical microscope observation of the defects which revealed by polishing at 0.1 mm interval.

The results were follows.

(1) Whole pinhole type defects detected by the present method agreed with that by the optical microscope observation. And the 90 percent of inclusion type defects by this method agreed with that by the optical microscope observation. This result suggested that this method was enough precision for practical use.

(2) On the other hand, some kinds of flaw such as Al₂O₃ cluster and pin hole could not be distinguished by this neural network treatment.

(3) The different shape of pinhole type defects and the cluster type inclusions could be classified with a slope α which was obtained by size distribution fitting of doubly exponential function.

Key words: high frequency supersonic flaw search, continuous casting slab, flaw distinction technique.

1. 緒言

近年、清浄鋼を製造する技術が確立しつつあるのに伴い、鋼の清浄性評価技術に対して、精度を向上させた上での迅速かつ大量に処理する技術が極めて強く求められてきている¹⁾。特に連続铸造（以下、連铸と略す）素材段階における清浄性の迅速評価技術は大量の製品不良発生を未然に防止する上で、今後さらにニーズが大きくなることが考えられる。

従来、これらの要求に対して、いくつかの清浄性評価手法が用いられてきたが、清浄鋼を評価する上では以下の問題点が存在する。

(1) 全酸素分析法やサンドアルミナ分析法は迅速かつ大量に実施することは可能であるが、清浄鋼において問題となる介在物を評価するには、粒度分布や形状が分からない。

(2) 電解スライム抽出法²⁾やマイクロ検鏡法³⁾などの確性手法では、サンプル加工や結果算出に時間を要し、少数のサンプル数しか評価できない。さらに、電解スライム抽出

法は自動化が難しいことからオペレーターの作業負荷が大きく、迅速かつ大量の処理が困難である。

これらの問題点を解消して迅速かつ大量に清浄性評価試験を行う手法として、従来から高周波超音波Cスコープ探傷（以下、精密超音波探傷と称する）法による鋼中介在物の評価方法の研究が盛んに行われている。石川ら⁴⁾は精密超音波探傷法の測定結果から、鋼材の延性に大きな影響をおよぼすA系介在物は鋼板面への投影面積に関して、指数分布関数で整理することが可能であることを見出されている。圧延材に精密超音波探傷試験法を適用して評価する手法については、近年加藤ら⁵⁾によって人工基準試験片と実機圧延材を用いて詳細な実験と解析が行われ、従来用いられてきた酸溶解抽出法との比較を行うことにより、高周波数探傷子の介在物検出限界は波長のほぼ1/4であることが見出されている。

一方、精密超音波探傷法による欠陥の弁別技術に関しては、空隙による欠陥エコーの正反転に着目してピンホールと介在物を弁別する手法^{6,7)}が知られている。

これらの研究は鋼材の清浄性を迅速かつ定量的に評価す

平成17年1月31日受付 平成17年4月4日受理 (Received on Jan. 31, 2005; Accepted on Apr. 4, 2005)

* 住友金属工業（株）鋼板・建材カンパニー (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Ind., Ltd., 3 Hikari Kashima 314-0014)

* 2 住友金属工業（株）総合技術研究所 (Corporate Research & Development Laboratories, Sumitomo Metal Ind., Ltd.)

ることに対して極めて有用な知見であり、今後も活用され続けるであろうと考えられるが、迅速かつ大量処理が可能であるという精密超音波探傷法の利点をさらに活かすことを考えた場合、圧延以前の鋳片において介在物種類をより正確に弁別して探傷結果を製鋼プロセスにおける製造条件に反映させるための技術開発も必要となってくる。すなわち鋳片では、圧延で圧着されるピンホールやキャビティといった空隙や、圧延で破碎されるクラスタ状介在物がそのままの形状を保持しており、これらも弁別する技術が求められる。

このような背景のもと、筆者らは鋳片における清浄性を精密超音波探傷法によって評価することを目的に、装置に信号解析機能とニューラルネットワークを用いた疵判別機能を導入した全自動探傷システム開発を行ってきた⁸⁾。本報では、精密超音波探傷装置の概要について述べたのち、連鋳鋳片の探傷実験の結果ならびに、統計的解析手法を応用した介在物の種類の判別方法について解析を行った結果

について述べる。

2. 精密超音波探傷装置のシステム構成と機能

Fig. 1に精密超音波探傷装置のシステム構成と装置外観を示す。

装置は探触子、超音波発生装置、信号処理装置、三次元トラバースおよび水槽、CRT等の付帯機器によって構成されている。

探傷可能なサンプル形状は100×100×3~5mmの形状で、表裏面に生じる不感帯を除いた厚み方向の範囲について欠陥を探傷することが可能である。1回の探傷によって処理できるサンプル数は最大30枚であり、あらかじめ設定した探傷条件のもと一括して超音波Cスコープ探傷が可能である。探傷波形はデジタル変換され、信号処理部で欠陥の検出および種類判別を行う。

Fig. 2に健全部の受信エコーの一例を示す。初期条件設

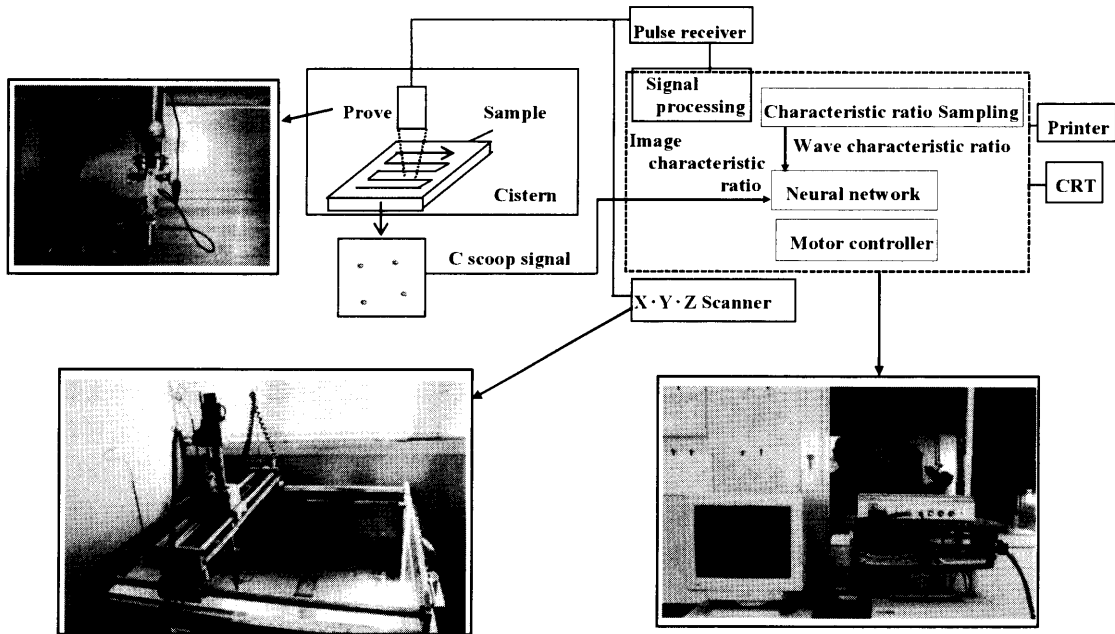


Fig. 1. The outward appearance and the composition of the high frequency supersonic flaw search equipment.

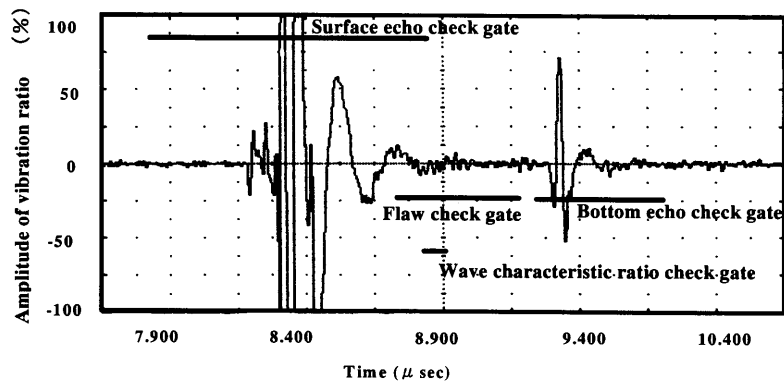


Fig. 2. Example of receive echo in normal scanning area.

定として4本の探傷ゲートを設定する。各々、表面エコー監視、底面エコー監視、欠陥エコー検出、特徴量抽出の役割を持つ。この特徴量抽出ゲートは、あらかじめ受信エコーの2~3波程度の幅に設定し、欠陥エコー検出ゲート内で最大のエコー位置に自動的に移動する。これにより、受信エコーから欠陥エコーのみを特定することができ、その欠陥エコーを演算して特徴量を抽出する。

欠陥の種類判別方法は、探傷波形から欠陥エコーを特定し、特徴量を抽出する。抽出された特徴量は、バックプロパゲーション型ニューラルネットワーク⁹⁾ (入力層3, 中間層3, 出力層2) によりあらかじめ学習させた欠陥種類別の特徴量と比較評価することで、介在物とピンホールの判別を行う。本実験において用いた特徴量は欠陥エコーの位相, S/N比, 振幅などである⁸⁾。

探傷データは磁気記録装置に保存され、検出した欠陥の解析に供することが可能である。

介在物を検出するために探触子は50 MHzの高周波を使用し、Cスコープイメージから求める欠陥面積の分解能を向上させるため、探傷ピッチは0.05 mm以下とした。

3. 実験方法

精密超音波探傷装置の探傷精度を確認することを目的に、人工欠陥を加工した連铸鋳片の試験片ならびに、連铸鋳片の介在物集積位置から切り出した試験片を用いて探傷実験を行った。

また、連铸鋳片集積位置から切り出した試験片は探傷後に検出された欠陥を光学顕微鏡によって観察した。

本項ではそれぞれの実験方法について述べる。

3.1 人工欠陥探傷実験方法

人工欠陥探傷実験に用いる試験片は連铸鋳片から切り出したが、供試材に存在する介在物等の欠陥の影響を極力避けるため、鋳片上面から75%厚み位置から採取し、機械加工によって深さ1.0 mm, 直径0.12, 0.24, 0.36, 0.54 mmの人工欠陥を施した。

人工欠陥探傷実験は、探傷感度を直径0.12 mmの人工欠陥エコー高さが最大になるように設定した後、Table 1に示す探傷条件で行った。

3.2 鋳片欠陥探傷実験方法

鋳片欠陥探傷実験に用いた連铸鋳片は低炭素40 K鋼である。

探傷実験はFig. 3に示す試験片を用いた。試験片の厚みは連铸鋳片の場合、音波減衰が大きいことを考慮して3 mmとした。鋳片の場合、厚み方向の不感帯は表面1.5 mm, 裏面0.5 mmであり、不感帯を除いた探傷厚みは1 mmである。

探傷用試験片は鋳片の任意の幅位置より鋳片上面から厚み方向、鋳造方向それぞれ100 mmの試験片を切り出し、

Table 1 Scanning conditions.

Item	Specik
Number of Sample	Max 30 peace
Sample Size	$t3.0 \times W100 \times H100$ (mm)
Sensor prove	50MHz Point focus type
Focus distance	12.7 (mm)
Water pass	6.7 (mm)
Scan pitch	0.03 (mm)

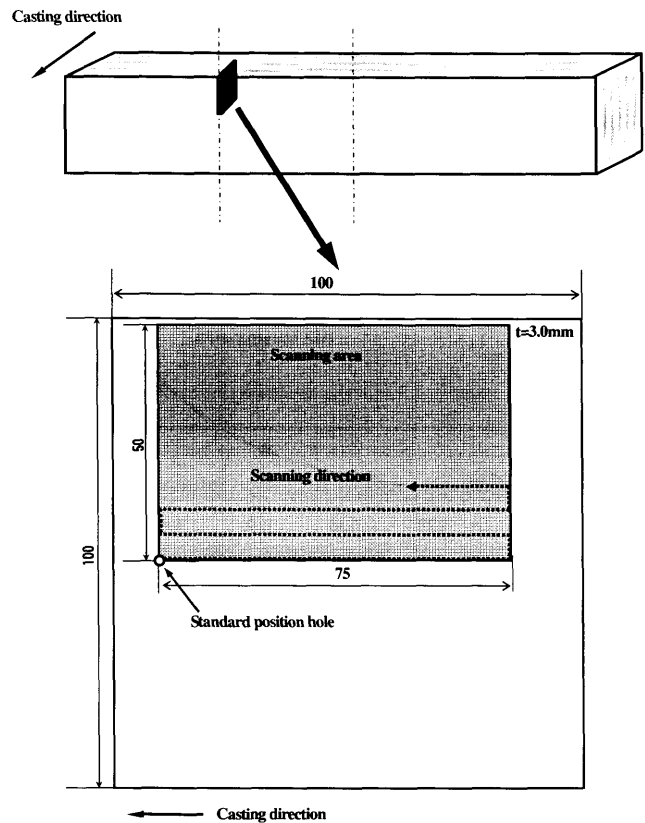


Fig. 3. Sampling position of slab and scanning aria of the high frequency supersonic flaw search method.

基準となる位置を定め、厚み方向50 mm, 鋳造方向75 mmの範囲についてTable 1に示す探傷条件にて行った。

3.3 検出欠陥の形態観察

探傷後、試験片に認められた欠陥の種類を特定することを目的に、試験片から探傷範囲を切り出したのち、不感帯部分を除いて上面から0.1 mmピッチで研磨加工を施しながら、光学顕微鏡を用いたマイクロ組織観察による欠陥の特定を行った。

4. 実験結果および考察

4.1 人工欠陥探傷実験結果

精密超音波探傷では同一欠陥を探傷した際に探触子の経時劣化、設定探傷条件の違い等の理由により、結果が異なる場合がある。そのため、欠陥の探傷精度を確保することを目的に、前述した人工欠陥が加工された試験片を用いて

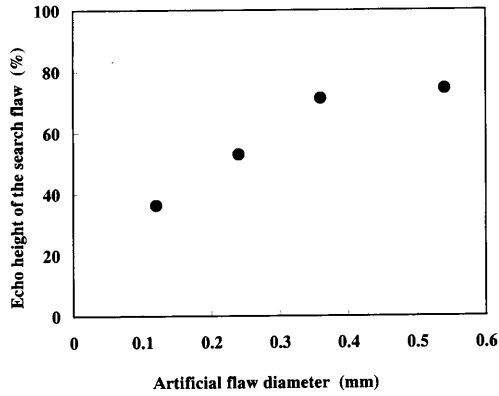


Fig. 4. Relation between artificial flaw area and echo height of the searched flaw.

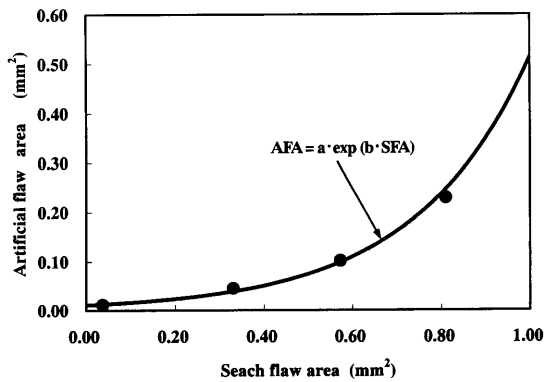


Fig. 5. Revision of searched flaw area.

探傷を行って探傷精度を確認した。

Fig. 4はそれぞれの人工欠陥における欠陥エコー高さを示した結果の一例であるが、直径0.12 mmの人工欠陥の平均エコー高さが35%以上で検出される探傷条件に設定することで、鋳片における微小欠陥の検出を可能にしている。また、Fig. 5に人工欠陥を探傷した結果の一例を示す。探傷された欠陥は(1)式によって探触子の経時劣化などで生じる誤差を補正するが、 a, b の値は前述したように、探触子の状態や設定条件によって変わる。Fig. 5で使用した補正值は、それぞれ $a=0.011, b=3.857$ である。

$$AFA = a \cdot \exp(b \cdot SFA) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、AFA：補正後欠陥面積 (mm²)

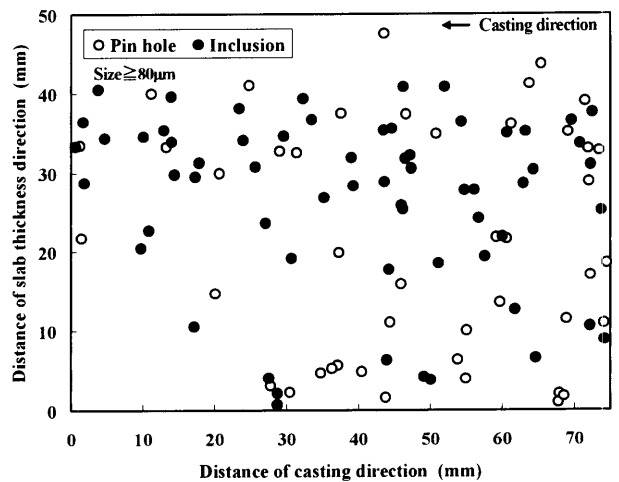
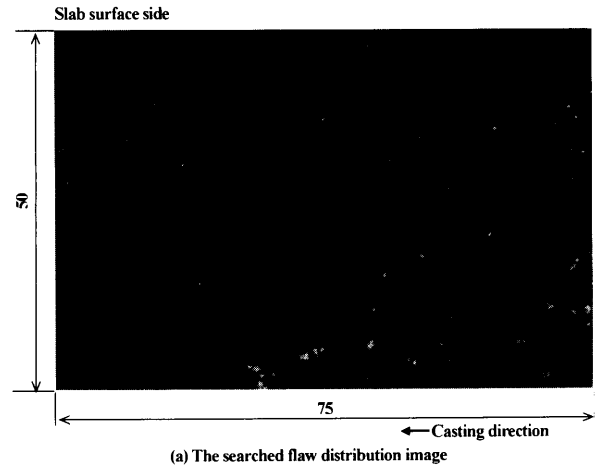
SFA：探傷欠陥面積 (mm²)

a, b ：補正值

4.2 鋳片欠陥探傷実験結果

Table 1に示した探傷条件にて、連鋳鋳片を探傷して得られた鋳片厚み方向における欠陥分布の一例をFig. 6に示す。

Fig. 6において、介在物とピンホールのそれぞれの分布を併せて示しているが、ここでは探傷された欠陥を前述したニューラルネットワークによる欠陥の判別によって得られた結果を示している。



(b) The searched inclusions and pin holes distribution of casting direction.

Fig. 6. Example of the searched flaw distribution. (a) The searched flaw distribution image. (b) The searched inclusions and pin holes distribution of casting direction.

この判別結果の精度を確認するために、光学顕微鏡を用いて探傷された欠陥の確認を行った。

介在物の種類は、クラスター、球状介在物、塊状介在物に区別した。また、ピンホールはピンホールの内面に介在物が認められないものをType-A、認められるものをType-Bとして区別した。

調査した欠陥数は180箇所であり、観察された介在物ならびにピンホールの一例をFig. 7に示す。

Fig. 8(a)にニューラルネットワークによる欠陥の判別結果と観察された介在物ならびにピンホールの一致した比率を示すが、介在物は90.3%、ピンホールは100%が的中している。

また、Fig. 8(b)に欠陥種類別の一致した比率を示すが、介在物においてはクラスターをピンホールと誤判定しているものが多く、介在物全体の判定精度を低下させている。

判定要素を再検討した結果、ニューラルネットワークによる欠陥判定において、クラスターの誤判定の主たる原因

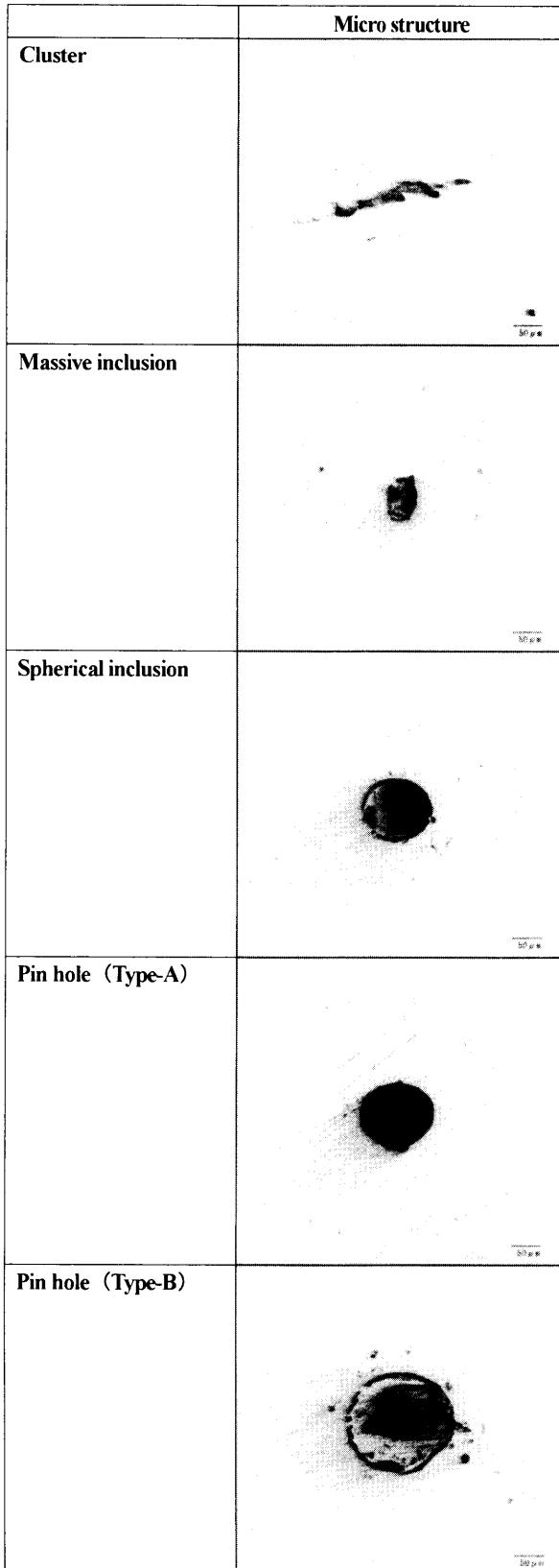
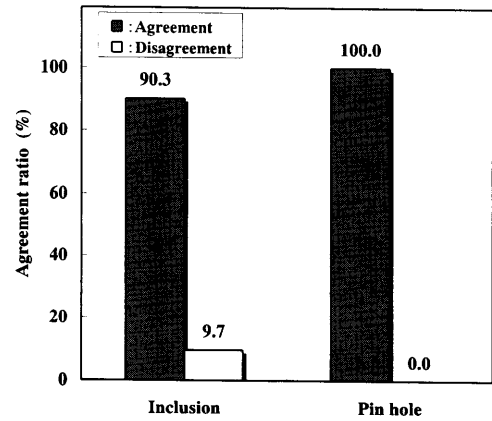


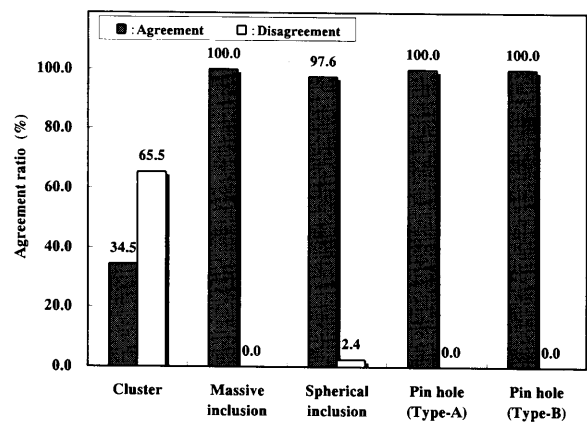
Fig. 7. Micro structure of the extraction inclusions.

は欠陥エコーの位相の違いに起因していることがわかった。

すなわち、ピンホールの場合、欠陥エコーの位相は反転し、介在物の場合は反転しない場合が多いが、今回調査し



(a) Result of judgment searched flaw by neural network method.



(b) Result of judgment severally flaw type.

Fig. 8. Result of judgment searched flaw in high frequency supersonic flaw search method. (a) Result of judgment searched flaw by neural network method. (b) Result of judgment severally flaw type.

た欠陥ではクラスターにおいて欠陥エコーが反転しており、ピンホールと誤判定している。クラスターの場合、精密超音波探傷における信号情報を処理した結果のみで判定をすることは難しいと推定される。また、介在物かピンホールの違いを判別することは可能であるが、球状介在物と塊状介在物の違いならびに、ピンホールの Type-A と Type-B の違いを欠陥単体の特徴量から判別することは不可能である。

4.3 介在物種類判別への統計手法の適用

鋼板の用途は1mm以下の薄鋼板から100mmを超える極厚鋼板まで非常に広く、その製造方法は用途に応じて大きく異なっている。そのため、製鋼プロセスにおいては製品用途に応じた種々の清浄性対策¹⁰⁻¹²⁾が採用されている。

連铸鋳片における清浄性を評価する上で最も留意すべき点は、これらの製品用途に応じて適正な評価指標を適用することだと考える。

すなわち、連铸鋳片においては製品用途に応じて問題となる介在物の種類または、形態別にその大きさ別個数分布

を把握することが重要となってくる。

精密超音波探傷装置による連铸鋳片の清浄性評価実験において、前述したように介在物とピンホールの判別は実用上問題が無いレベルで可能であることが分かったが、異なる介在物を種類別に判定することは今回適用したニューラルネットワークによる欠陥の判別方法だけでは難しい。

また、鋼材の使用用途によって異なる場合はあるが、一般的に連铸鋳片内に存在する介在物は起源の違いによって数種類存在する。

そこで、統計的解析手法を応用して精密超音波探傷によって得られた結果を解析することで介在物種類の判別が可能であるかについて検討を行った。

4.3.1 解析手法

鋼材中における介在物の弊害を評価する手法としては、極値統計法¹³⁾を適用した例が知られている。

周ら¹⁴⁾は極値統計法を用いて、鉄鋼材料中に含まれる介在物の最大寸法 $\sqrt{aria_{max}}$ を推定する上で、二次元的検鏡で三次元的最大寸法を推定すると生じる誤差の原因について検討を加えているが、異種介在物が存在する場合は(2)式で表される介在物の極値統計分布直線は折れ曲がって表されることを指摘しており、その原因は異なる介在物の原分布が存在するためとしている。

この指摘は、極値統計法では介在物を評価する際に数種類の介在物が混在している場合、種類別に介在物が有している個々の分布を特定することが可能であれば介在物の種類を特定し得る可能性があることを示唆している。

$$y_j = -\ln\{-\ln\{j/(n+1)\}\} \dots \dots \dots (2)$$

y_j : 基準化変数 ($j=1\sim n$)

そこで、極値統計法に用いられている二重指数関数を今回の測定結果に適用し、異なる介在物種類ごとの分布を求めることで、介在物種類の特定が可能かどうかについて検討を行った。

極値統計法による介在物評価では、介在物の最大寸法を推定するために、用いるデータは複数個のサンプルについて、最大寸法(極値)を有する介在物のデータを代表値として用いる。

本研究においては、介在物種類ごとに異なる粒径分布をとると仮定し、これを表す方法として、以下のような方法を適用した。

ひとつのサンプルから得られた全ての精密超音波探傷欠陥数(n)を欠陥面積の昇順に並べ、番号 j を付与する。欠陥ごとに n および j を(2)式に代入することで、それぞれの基準化変数 y_j を算出して欠陥サイズ(\sqrt{SAF})との関係を求めた。

すなわち、本法は異なる介在物を分別するためにGumbel値と同形式の二重指数関数で表す試みである。

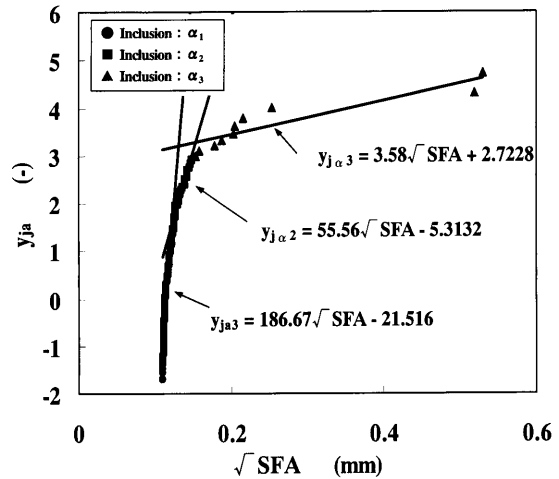


Fig. 9. Example of doubly exponential function for searched flaw area.

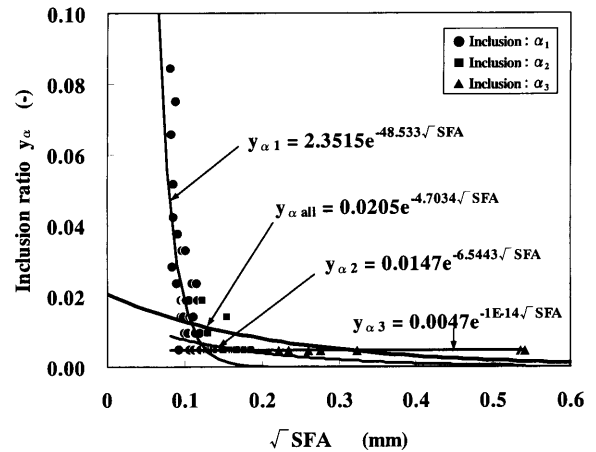


Fig. 10. The number distribution of the searched flaw area severally α .

4.3.2 解析結果

Fig. 9にニューラルネットワークによって介在物と判定された探傷欠陥を対象として、(2)式から求めた二重指数関数の一例を示す。

二重指数関数は直線とはならず、3つの異なる勾配($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$)を有する連続した線となっている。

また、今回対象とした全てのサンプルについて二重指数関数を求めた結果、いずれのサンプルにおいても、同様の結果であり、これらの勾配(以下 α と略す)の違いが介在物分布の種類による違いを表しているものと推察される。

一方、ニューラルネットワークによってピンホールと判定された探傷欠陥について、同様に二重指数関数を求めたが、介在物同様の結果であった。

これは、Fig. 8に示したように、形態が異なる2種類のピンホールが存在することと、ニューラルネットワークによる判定にクラスターをピンホールと判定した欠陥が含まれることから生じたものと考えられる。

Fig.10に介在物と判定した欠陥の大きさ別個数比率分布を整理した結果の一例を示す。全ての欠陥を対象として

(3)式により近似した場合、図中の $y_{\alpha_{all}}$ の通りとなり、小さい介在物の領域において測定結果と近似式が大きく乖離するが、Fig. 9に示す α 別にそれぞれの大きさ別個数分布を(3)式にて整理することによってほぼ一致する。

これは、介在物種類の違いによって、大きさ別個数分布が異なることから生じているものと考えられ、 α 別に介在物種類を特定することで、精密超音波探傷法によって介在物種類を特定出来る可能性を示唆している。

$$y_{\alpha} = c \cdot \exp(-d \cdot \text{AFA}) \dots\dots\dots (3)$$

c, d : 介在物分布係数

Fig.11はFig. 9に示した α 別の介在物と判定した欠陥のデータを(2)式によって個別に整理した結果の一例である。 β は個別に整理した際の勾配を表している。Fig. 9中に示した α_1 から α_3 が β_1 から β_3 に対応し、 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ のいずれにおいても $\sqrt{\text{SFA}}$ と $y_{j\beta}$ の関係は直線となる。

また、Fig.12に α と β の関係を示すが、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ を区別してみると、それぞれが同一オーダー内にあり、 β との関係は(4)式によって整理することができる。ここで、Fig. 9ならびにFig. 11の結果から、同一種類

の欠陥であれば α, β のいずれも一定値となるものと考えられるが一定値とはなっていない。これは二重指数関数を求める際の対象となる欠陥個数分布の違いによって生じており、 α, β のオーダーが同一であれば同一の分布を有するものと考えられる。

$$\beta = 1.0512 \alpha^{1.1462} \dots\dots\dots (4)$$

以上の結果より、Fig. 9に示した二重指数関数である基準化変数 y_j が異なる勾配 α を有する連続した線で表される時、それぞれの勾配の違いによって異なる分布を有する欠陥の集合であって、 α の違いに着目することで、介在物種類を特定する可能性があることを示唆している。

4.3.3 aの違いによる介在物種類の特定

前述したように、数種類の介在物が混在するサンプルを精密超音波探傷装置によって探傷した結果についてニューラルネットワークによる介在物、ピンホールの判定を行い、それぞれのデータを(2)式によって二重指数関数を求めると、異なる勾配を有する連続した線となる。

この勾配と介在物種類の関係を明らかにすることで、介

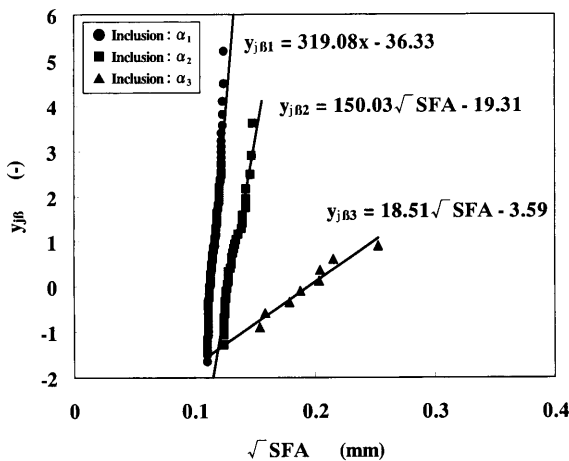
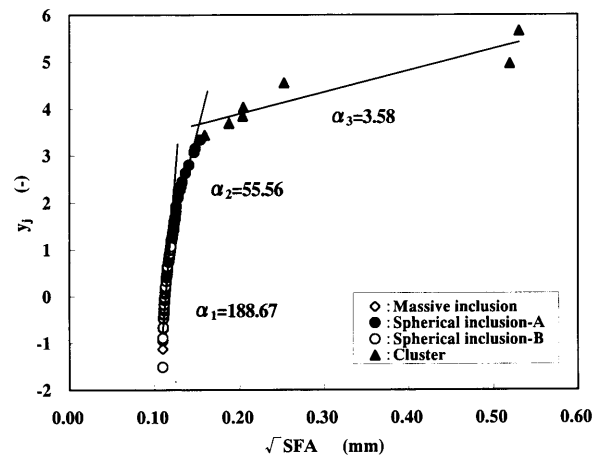


Fig. 11. Example of doubly exponential function distributions for search flaw area severally α .



(a) Judged inclusions by neural network method.

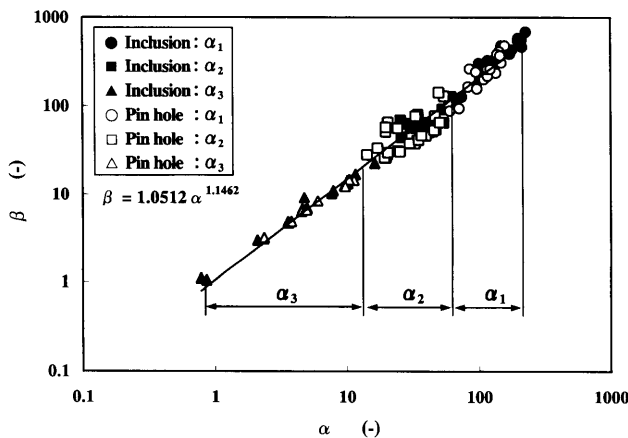
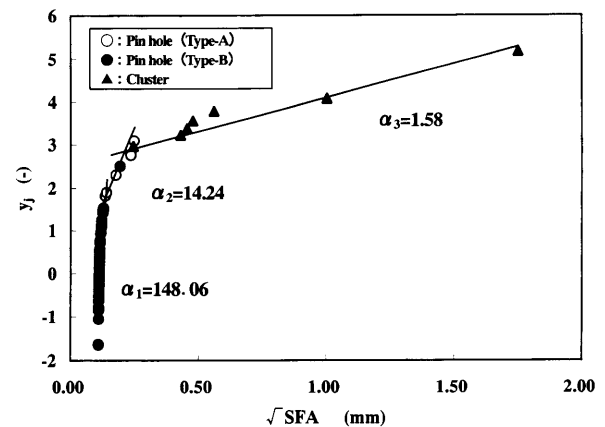


Fig. 12. Relation between α and β .



(b) Judged pin holes by neural network method.

Fig. 13. Example of doubly exponential function distribution for severally flaw of form.

在物の種類を特定することが可能であることを検証することを目的に、Fig. 7に示した介在物ならびにピンホールの種類別全測定結果について、Fig. 9に示した結果との比較を行った。

Fig.13に結果を示すが、Fig.13(a)は精密超音波探傷の欠陥判定で介在物と判定した欠陥であり、Fig.13(b)はピンホールと判定した欠陥である。

Fig.13(a)において、観察された欠陥は α_1 においては塊状介在物と球状介在物-Bであり、 α_2 では球状介在物-A、 α_3 ではクラスターであった。また、Fig.13(b)では、 α_1 においてはType-Bのピンホール、 α_2 ではType-Aのピンホール、 α_3 ではFig.13(a)同様、クラスターであった。

Fig.13(a)において α_1 と α_2 で観察された球状介在物の違いはFig.14(a)に示すように、介在物の形態が異なっており、球状介在物-Aは溶融した形態であるのに対して、球状介在物-Bは焼結しており、外観上は球状でありながら、介在物の構成は塊状介在物に近く、 α_1 において観察された介在物は未溶融スラグまたはパウダーを起源とした介在物であることが分かる。

一方Fig.13(a), (b)のいずれにおいても α_3 にて観察されたクラスターについて、両者の違いはFig.14(b)に示すように、介在物と判定されたクラスターでは介在物とメタル間において間隙が存在しないのに対して、ピンホールと判定されたクラスターでは間隙が存在している。

この間隙の有無の差が反射エコーの位相の違いに反映されたものと推察される。

5. 結言

清浄鋼の溶製技術が確立されつつある現状において、より迅速かつ高精度な鋼の清浄性評価技術が要求されている。

本研究は精密超音波探傷装置に信号解析機能とニューラルネットワークを用いた疵判別機能を導入した全自動探傷システムの概要と、連铸鑄片の探傷結果ならびに、ニューラルネットワークによって介在物とピンホールに判別した結果をベースに極値統計法を適用することによって、介在物種類の特定が可能であるかについて検討を行った。結論

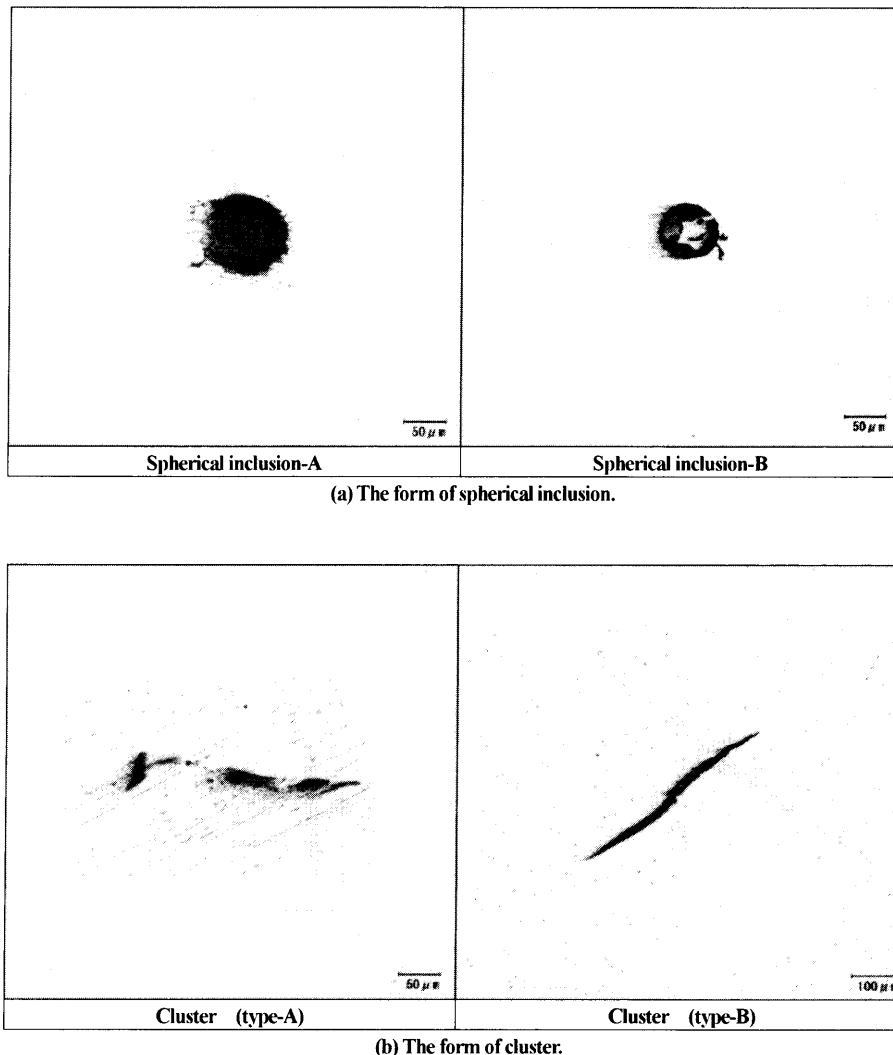


Fig. 14. Comparison of form of similar type flaw. (a) The form of spherical inclusion. (b) The form of cluster.

は以下のようにまとめることができる。

(1) 精密超音波探傷装置を用いて連铸鑄片を探傷し、ニューラルネットワークによる欠陥判定を行ない、光学顕微鏡による介在物の観察結果と比較した結果、介在物は約90%、ピンホールは100%一致し、実用上問題がない精度であった。

(2) ニューラルネットワークによる欠陥判定では欠陥の種類を特定することは不可能である。

(3) 精密超音波探傷によって検出された欠陥を、ニューラルネットワークにより介在物とピンホールに判別したのち、極値統計処理を行うことによって、異なる形態を有する2種類のピンホールとクラスター、スラグ系介在物の溶融または未溶融の違いを二重指数関数における勾配 α の違いによって判別することが可能である。

文 献

- 1) 日本学術振興会製鋼第19委員会非金属介在物小委員会の概要： *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 35.
- 2) 最近の分析解析技術の進歩、日本鉄鋼協会編、日本鉄鋼協会、(1990), 87.
- 3) Y.Kusano and Y.Kawachi: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 990.
- 4) N.Ishikawa and N.Fujimori: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 12.
- 5) Y.Kato, K.Sato, K.Hiraoka and Y.Nuri: *Sanyo Tech. Rep.*, **8** (2001), No. 1, 59.
- 6) J.Murai, T.Ida and T.Shiraiwa: *J. Jpn. Soc. Non Destructive Inspection*, **47** (1998), 498.
- 7) Y.Kato, S.Takemoto, K.Sato and Y.Nuri: *Sanyo Tech. Rep.*, **7** (2000), No. 1, 35.
- 8) H.Ookubo, R.Murayama, A.Nakanishi, N.Kasai and H.Narita: 日本非破壊検査協会平成9年度春季講演大会概要集, (1997), 220.
- 9) <http://kyu.pobox.ne.jp/softcomputing/> (2005.1.14)
- 10) J.Aoki, R.Sugano and H.Ishii: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 912.
- 11) M.Ootsuka, K.Nakagawa, A.Teraguchi, Y.Hitomi, T.Nagahata and H.Kurayasu: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 1050.
- 12) A.Mutou and N.Kasai: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 900.
- 13) T. Inoue: *Bull. Iron Steel Inst Jpn.*, **4** (1999), No. 5, 48.
- 14) S.Zhou, Y.Murakami, Y.Fukushima and S.Beretta: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 12.

- 1) 日本学術振興会製鋼第19委員会非金属介在物小委員会の概