

© 1985 ISIJ

# 超音波探傷法にて検出される MnS 系 非金属介在物の定量化

論文

石川 登\*・藤盛 紀明\*<sup>2</sup>

## Quantitative Evaluation of MnS Inclusion in Rolled Steels Detected by Ultrasonic Testing

Noboru ISHIKAWA and Toshiaki FUJIMORI

## Synopsis:

A new testing method is proposed which may evaluate the quantity of A-type MnS inclusions in rolled steels. This method is characterized by scanning on the lattice points assumed on steel plates.

An experimental study about the performance of this method has been performed.

Results obtained are as follows.

Mean echo height ( $\bar{F}$ ) is correlated with the ratio ( $AR_C$ ) of the projected area of inclusions to the scanning area of steels.

The pitch of the lattice points and the scanning area of steels affect the assurance of results. Therefore, in the inspection of steel frame members, it is necessary for the pitch to be at least 10 mm.

### 1. 緒 言

建築鉄骨は、柱と梁から成る骨組構造を特徴としており、その構成の要となる柱-梁接合部には、T形突き合わせや十字形突き合わせ継手が広く用いられている。この接合部構成部材の板厚方向引張特性は、溶接部とともに、構造物の性能を確保するうえで、重要な要素となっている<sup>1)</sup>。

一方、鋼材中に平板状に展伸したA系の非金属介在物が含まれている場合には、その切欠効果により、鋼材の板厚方向の延性低下が顕著となる<sup>2)</sup>。これらの非金属介在物が柱梁接合部の継手性能に及ぼす影響を検討し、鉄骨の品質管理に反映させるためには、鋼材中の非金属介在物を非破壊的に定量化することが必要である。

非金属介在物の非破壊的な定量化手法の一つとして、超音波探傷法があり、鋼材製造工程の品質管理に広く利用されている<sup>3)</sup>。筆者らは、既報<sup>4)</sup>にて、鉄骨の柱梁接合部のような限定された領域における非金属介在物の詳細な測定方法として、水浸形焦点探触子を用いたCスコープ法とAVGダイアグラムを用いたアクリル遅延法の2種類の超音波探傷法の検出性能について検討した。その結果、両者とも非金属介在物個々の寸法を測定するのに有効であることを示した。しかしながら、Cスコープ法は水浸形の探傷法であるため、大型構造物に対して

は実用的な方法でない。また、アクリル遅延法は、非金属介在物個々に対して寸法測定を行うため、鋼材中に非金属介在物が多く含まれる場合や、鋼材の寸法が大きい場合は、作業量が膨大となる。

そこで、鉄骨のような大型の鋼構造物の品質の確保を図るため、実構造物において構造上重要となる特定な領域中の非金属介在物を、能率的に精度良く定量化する手法を提案することを目的として、本実験を実施した。

### 2. 実験方法

#### 2.1 供試材料

供試材料としては、建築鉄骨構造物に最も一般的に使用されているJISの溶接構造用圧延鋼材2種(SM 50 A)とし、板厚32 mmのものを使用した。その化学成分と機械的性質を、Table 1に示す。供試材料は多数の

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of the steels used.

	Chemical composition (wt%)					Mechanical property		
	C	Si	Mn	P	S	$\sigma_y$ (kgfmm <sup>2</sup> )	$\sigma_b$ (kgfmm <sup>2</sup> )	El (%)
A	0.16	0.38	1.38	0.019	0.008	35.1	52.9	26.9
B	0.17	0.36	1.40	0.025	0.009	38.1	54.7	25.4
C	0.17	0.37	1.40	0.022	0.008	35.8	54.7	27.4

昭和 59 年 6 月 26 日受付 (Received June 26, 1984)

\* 清水建設(株)技術研究所 (Institute of Technology, Shimizu Construction Co., Ltd., 3-4-17 Etchujima Koto-ku 135)

\*<sup>2</sup>清水建設(株)技術研究所 工博 (Institute of Technology, Shimizu Construction Co., Ltd.)

鋼材を前もって粗探傷し、非金属介在物を含む程度により、3種類を選別抽出したものである。

2.2 超音波探傷試験

以下に示す2種類の方法により、非金属介在物の超音波探傷をおこなった。

(1) Cスコープ法

水浸形の集束探触子を用いたCスコープ法は、平板状のA系非金属介在物に対しては、非金属介在物と同じ深さに探触子の焦点を結ばせることにより、その形状と寸法を精度良く測定することができる<sup>4)</sup>。そこで、他の探傷法の非金属介在物に対する検出性能を評価するうえで、の基準となる値をうるため、Cスコープ法を実施した。

(2) 直接接格子点探傷法

筆者らは、既報<sup>4)</sup>にて、手動探傷により非金属介在物の寸法を測定する方法として、アクリル遅延法を提案した。これは、ピークエコー高さを測定するため、測定に熟練を必要とし、探傷技術者の技能が測定精度や能率に影響を与える。そこで、実構造物に対して適用が容易で、しかも測定結果の再現性が高い探傷法として、格子点探傷法を試みた。格子点探傷法は、圧力容器用鋼材の超音波探傷検査法に代表されるように、鋼材の検査手法として広く利用されている<sup>5)6)</sup>。しかしながら、これまでの研究では、非金属介在物の平面的な寸法や面積に関して、詳細な情報を得るに至っていないかつたこともあり、超音波探傷の結果と、鋼材の強度や延性との対比はなされたものの、非金属介在物そのものの定量化と結びついたものは少ない。そこで、本実験では、格子点探傷法の測定結果を前述したCスコープ法により得られる非金属介在物の面積と対比することにより、実構造物に使用される鋼材中における非金属介在物の定量化をこころみるものである。

試験片は 250 mm × 500 mm の矩形平板とし、その中央部分の 100 mm × 200 mm の領域に対して超音波探傷

試験をおこなった。格子点探傷法においては、試験片の探傷領域に 10 mm 間隔の格子線を想定し、その交点上のエコー高さを測定した。両探傷法の探傷条件を、Table 2 に示す。

3. 実験結果及び考察

3.1 非金属介在物像の面積頻度分布

Cスコープ図の一例を Photo. 1 に示す。

鋼材Aには、非金属介在物はほとんど認められなかつた。鋼材Bと鋼材Cを比較すると、非金属介在物の占有面積率 (Cスコープ図の測定領域に対する非金属介在物像の面積の割合、以下  $AR_c$  と称す) は、Bが大きい、個々の非金属介在物は、Cが大きいという特徴があつた。

鋼材ごとに、Cスコープ図中の非金属介在物像の面積を、0~5 mm<sup>2</sup>、5~10 mm<sup>2</sup> というように 5 mm<sup>2</sup> 間隔で層別し、その層内に含まれる非金属介在物の個数を計数し、頻度分布を作成した。非金属介在物は、面積が小さいものほど、数が多い傾向があり、面積に関して指数分布状の分布を呈していた。指数分布は、一般に(1)式で表される。

$$P_r = \frac{1}{\mu} \exp\left(-\frac{S}{\mu}\right) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $\mu$  は非金属介在物の平均面積

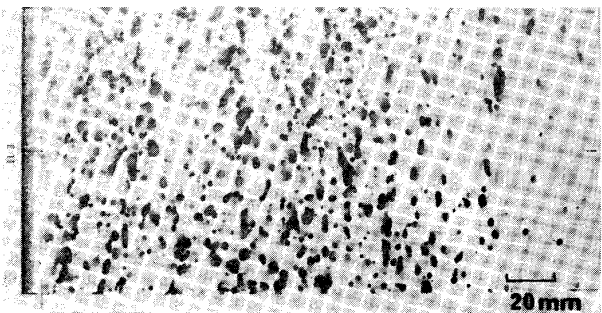


Photo. 1. C-scope figure of inclusions by C-scope method with an immersion focusing type probe.

Table 2. Ultrasonic testing conditions.

Item \ Method	C-scope method	Lattice scanning method
Testing apparatus	UM 731	FD 410 S, SM 80 D
Probe	Immersion focusing type probe Frequency: 10 MHz Probe diameter: 6.35 mm Immersion focusing distance: 50.8 mm Focus diameter: 20.32 mm	5Q20 N
Couplant	Water	Glycerin
Detective level	STB-N1 5.6 $\phi$ 80% +12 dB	STB-N1 5.6 $\phi$ 50% +24 dB

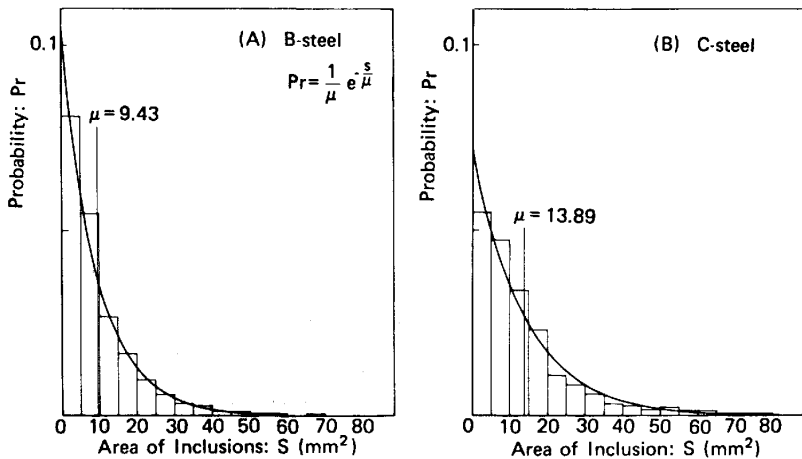


Fig. 1. Comparison of the distribution for the stratified relative frequency on the inclusions' area and the frequency curve of the exponential distribution obtained from the mean area of inclusions in B-steel material (A) and C-steel material (B).

$P_r$  は面積  $S$  なる非金属介在物が存在する確率

鋼材 B, C について、非金属介在物像の平均面積を求め、これを(1)式に代入して得られる指数分布関数と実際の非金属介在物像の発生確率の分布を Fig. 1 に示す。鋼材 B, C とも、両者は良く一致している。更に多くの鋼材について確認する必要があるが、非金属介在物は、その面積に関して、指数分布関数を用いて代表できるものと考えられる。

### 3.2 格子点探傷法の特性

#### 3.2.1 探触子のエコー高さ分布

超音波探傷のエコー高さは、欠陥の形状や面積とその欠陥位置における超音波の音圧および欠陥からの反射特性から求められる。

円形振動子が十分遠方にある場合、その音場は理論式を用いて求まる<sup>7)</sup>が、格子点探傷に用いた探触子では、近距離音場限界距離が供試材料の板厚よりも大きいため、理論式から音場を得ることはできない。

一方、振動子の中心軸からはずれた位置にある欠陥からのエコー高さは、探触子の指向特性と欠陥の反射指向特性の影響を受ける。この場合も、近距離音場限界距離以下では、理論計算は行われていない<sup>8)</sup>。

本実験で使用した探触子による欠陥からのエコー高さの分布を求めるに当たり、理論計算は近距離音場限界距離以下での計算法が確立していないため、実験的な方法によりもとめることとした。

最初に、板厚 15 mm の鋼板に対する垂直探触子(5Q 20N)の音圧分布を、エレクトロダイナミックセンサー(EDS)を用いて測定した。Fig. 2 にその音圧分布を示す。音圧は中央部で一定値を示し、中央から約 6 mm の位置から半径に比例して低下する傾向を示した。

次に、この鋼板の底面に点音源があり、点音源の方向

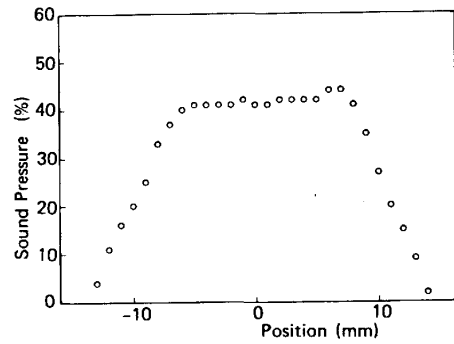


Fig. 2. Variation of the sound pressure on the bottom surface of STB-A2-2φ, which is measured with the Electro-Dynamic Sensor.

成分が COS 分布をなす、すなわち、点音源から鋼板上面にある垂直探触子へ伝わる音圧が(2)式で求まるものと仮定して、底面上の音源が探触子に与える音圧の面積積分値(エコー高さ)を求めた。

$$\Delta EH = \frac{S_0 \cdot \Delta S}{R^2} \cdot \cos \theta \quad \dots \dots \dots (2)$$

$\Delta EH$ : 探触子の微小部分が受ける音圧

$S_0$ : 点音源の面積

$R$ : 点音源と探触子の微小部分間の距離

$\Delta S$ : 探触子の微小部分の面積

$\theta$ : 点音源と探触子の微小部分との角度

その値を Fig. 3 に示す。音圧の面積積分値は、鋼板底面における音圧分布と同様に、探触子の中心部分で一定値を示し、中心からある程度離れた位置から半径に比例して低下する傾向を示した。

垂直探触子による欠陥からの反射エコー高さの分布は、その欠陥を反射源として探触子が受ける音圧の探触子面における積分値から推定される。この値は、欠陥の位置における音圧と反射特性から定まる。すなわち、点音源が発する音圧として、EDS から得られた音圧分布

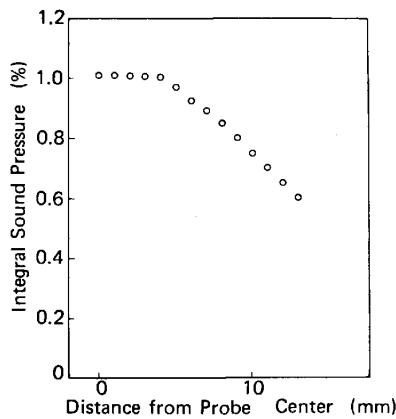


Fig. 3. Variation of the integral sound pressure calculated from eq (2).

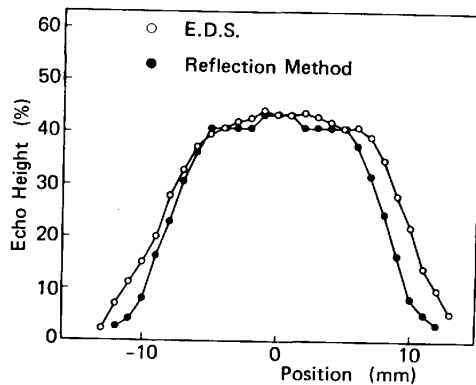


Fig. 4. Comparison of the echo height obtained using Electro-Dynamic Sensor and the echo height measured by the reflection method with direct contact probe (5Q20N).

を反射特性を表す(2)式に代入し、探触子面における音圧の面積積分値を求めることにより、反射エコー高さを得ることができる。この方法によつて得られた反射エコー高さの分布を Fig. 4 に示す。

反射エコー高さの分布を実験的に求める他の方法としては、鋼板の所定の深さに人工的な欠陥を設け、鋼板の表面上を探触子を順次移動させ、移動距離に対する欠陥からの反射エコー高さを測定する方法がある。EDSの音圧感受部の径が5.6φであり、使用した鋼材が板厚15mmであるため、同様な条件が再現できるNDI-STB-N1の5.6φ平底穴を用いて、エコー高さを測定した。Fig. 4にその結果を併せて示す。

両者のエコー高さ分布は、近似した特性を示しており欠陥の直上付近では一定値を示し、半径約6mmのところから低下する。この結果から、エコー高さ分布を人工欠陥を用いて測定する方法は、理論的な手法がない現段階において、実際的な方法と考えられる。しかしながら、NDI-STB-N1の5.6φは人工欠陥の寸法として過大なものである。そこで、人工欠陥としてNDI-

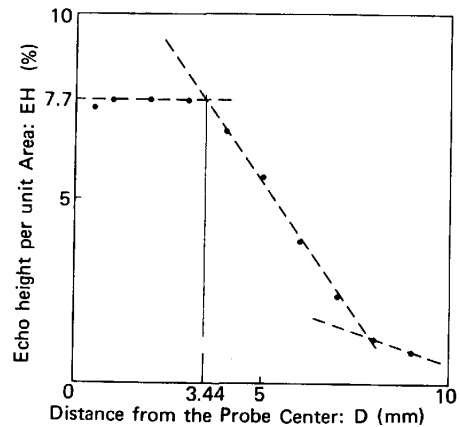


Fig. 5. Change of the echo height per unit area ( $=\pi \text{ mm}^2$ ) for the distance from the center of the probe (5Q20N).

STB-A2 2φ×2の人口欠陥を用い、同様な方法でエコー高さの分布を測定した。

Fig. 5にそのエコー高さ分布を示す。STB-N1 5.6φに比較して、欠陥直上のエコー高さが一定となる領域が狭くなっている。この結果から、単位面積の欠陥に対するエコー高さは、探触子の中心からの距離の関数として(3)式であらわされる。

$$\left. \begin{aligned} f(r) &= 7.7/\pi & (0 \leq r < 3.44) \\ &= (12.7 - 1.452r)/\pi & (3.44 \leq r < 7.88) \\ &= (3.86 - 0.33r)/\pi & (r \geq 7.88) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$f(r)$  : 深さ 13 mm の位置にある単位面積の欠陥のエコー高さ  
 $r$  : 探触子の中心から欠陥までの平面距離

3.2.2 格子点探傷のエコー高さの期待値

格子点探傷法では、鋼材上に格子点を想定し、その格子点上のエコー高さを測定する。そのため、そのエコー高さは、鋼材上を全面的に探傷した時に得られる非金属介在物からの最大エコー高さとは異なる。しかしながら、鋼材上を平均的に探傷するため、そのエコー高さは、鋼材中に含まれる非金属介在物の量を確率的に検出することが期待される。

円形振動子を持つ探触子では、音圧は探触子の中心から同心円状に変化する。探触子の中心から平面距離  $r$  の位置にある単位面積の欠陥からのエコー高さを  $f(r)$  とすると、鋼材中の全面に渡つて欠陥が存在した場合、1回の探傷で測定されるエコー高さ(EH)は(4)式で示される。

$$EH = \int_0^{\infty} 2\pi r \cdot f(r) \cdot dr \dots\dots\dots (4)$$

次に、鋼材中に占める非金属介在物の投影面積の割合

を  $AR_C(\%)$  とする。非金属介在物が鋼材中に規則性を持たずに多数存在する場合、探触子と非金属介在物との相対的な位置は、確率的には一様な分布を取るものと考えられる。従つて、格子点探傷法により、鋼材表面上を繰り返し探傷して得られるエコー高さの平均値 ( $\bar{F}$ ) は (5) 式で示される。

$$\bar{F} = \frac{AR_C}{100} \cdot EH \dots \dots \dots (5)$$

$\bar{F}$  と  $AR_C$  との比 ( $\alpha$ ) は、(3) 式を (4)、(5) 式に代入して、(6) 式として表される。

$$\alpha = \bar{F}/AR_C = 3.29 \dots \dots \dots (6)$$

**3.3 C スコープ法と格子点探傷法の相関**

供試鋼材において実際に得られた  $AR_C$  と  $\bar{F}$  との関係を、Fig. 6 に示す。 $AR_C$  と  $\bar{F}$  との間には、ほぼ原点を通る比例関係が認められる。Fig. 6 の  $\bar{F}$  と  $AR_C$  との間には、次式の関係が得られた。

$$\bar{F} = 0.899 AR_C - 1.35 \dots \dots \dots (7)$$

(7) 式における  $AR_C$  の係数は (6) 式の  $\alpha$  よりも小さな値となつている。これは (6) 式を求めるのに使用した模擬欠陥と実際の非金属介在物の形態の相違に起因するものと思われる。すなわち、Fig. 5 に示した探触子の音圧は、中空の模擬欠陥に対するものである。一方、供試鋼材中の非金属介在物は、鋼をマトリックスとして、その中に薄い箔状となつて存在している。そのため、非金属介在物に対しては、薄膜内反射波の干渉により超音波の反射が低減し、中空の模擬欠陥に比べて、エコー高さが低くなるものと思われる<sup>9)</sup>。

本実験では、非金属介在物が鋼材の板厚中央部付近に

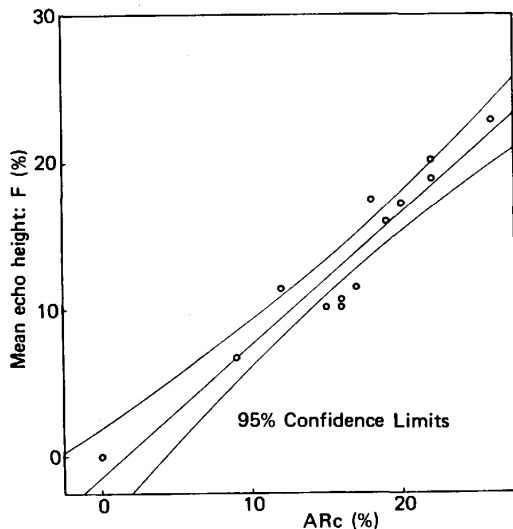


Fig. 6. Relation between the mean echo-height ( $\bar{F}$ ) by the lattice scanning method and the area ratio ( $AR_C$ ) occupied by inclusions in C-scope figure.

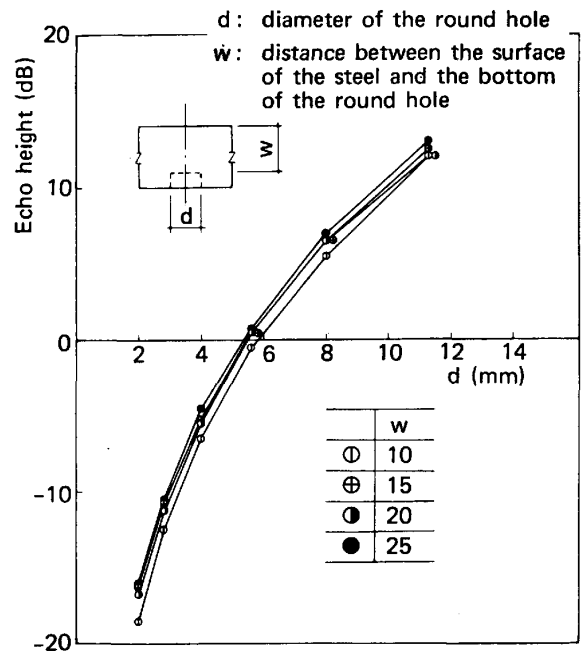


Fig. 7. Change of the echo height for the flat bottom holes of various diameters ( $d$ ) and distances ( $w$ ).

偏在して分布している場合について検討を加えてきた。しかしながら、非金属介在物は必ずしも鋼材の特定な深さに分布するとは限らない。(5) 式を用いて  $\bar{F}$  から  $AR_C$  を特定するためには、非金属介在物のエコー高さが、その深さにあまり影響を受けないことが必要となる。

欠陥の深さと径が異なる円形模擬欠陥を用いて、欠陥深さのエコー高さに及ぼす影響を測定した。Fig. 7 にその結果を示す。近距離音場領域の探傷であることから予想されるようにエコー高さは、2.0 mm から 11.3 mm の径において、その表面からの深さが 10 mm から 25 mm に変化してもほとんど変化しない。

以上のことから、格子点探傷法によつて、 $AR_C$  を推定することが可能と考えられる。

**3.4 測定間隔の測定精度に及ぼす影響**

格子点探傷は、探傷作業の観点からは測定間隔が大きく、被探傷領域における探傷回数が少ないことが望まれるが、測定精度が低下することが予想される。測定精度を検討するには、非金属介在物の発生傾向が近似した試料に対して、多数回の測定をおこなう必要がある。一方、3.1 項で示したように、非金属介在物は、その面積に関する発生頻度を指数分布関数で近似することができる。そこで、電算機を用いて非金属介在物の分布状態が近似した条件を想定し、多数回の測定をシミュレーションすることにより、測定間隔の測定精度に及ぼす影響を

Table 3. Conditions of simulation.

Item / Purpose	Mean area of the defects (mm <sup>2</sup> )	Area of the scanning zone (×10 <sup>4</sup> mm <sup>2</sup> )	Distance between the scanning points DL (mm)	Number of the defects per unit area N <sub>d</sub>	Number of calculation N <sub>c</sub>
Influence of the defect's area on the mean echo-height	4.72, 9.43 13.89, 18.86	2	10	50	50
Influence of DL on the reference value (F/AR <sub>c</sub> )	9.43	2	5, 10, 20, 50, 100	200	12
Influence of the scanning zone on the variation of the reference value (F/AR <sub>c</sub> )	9.43	2, 4, 8, 16, 32	20, 50, 100	50	20

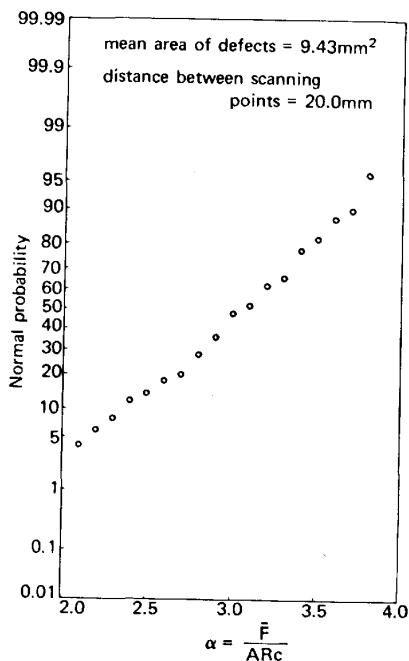


Fig. 8. Distribution of the reference value ( $\alpha = \bar{F}/AR_c$ ) obtained by the summation with a computer.

検討した。

シミュレーションの条件を Table 3 に示す。実験と同様に 100×200 mm<sup>2</sup> の矩形平面を想定し、この平面内の任意の位置に、Table 3 に示す平均面積により代表される指数分布関数に従う頻度にて、非金属介在物を発生させる。それに対して、種々の測定間隔にて探傷がなされた時のエコー高さを、(3)式を用いて求めた。この模擬計算を繰り返しおこない、それぞれについて  $\bar{F}$  と  $AR_c$  を求めた。模擬計算では、その都度与えられる  $AR_c$  が異なるため、 $\bar{F}$  と  $AR_c$  との比 ( $\alpha = \bar{F}/AR_c$ ) を用いて、測定精度を検討した。

20 回の模擬計算で得られた  $\alpha$  の分布を Fig. 8 に示

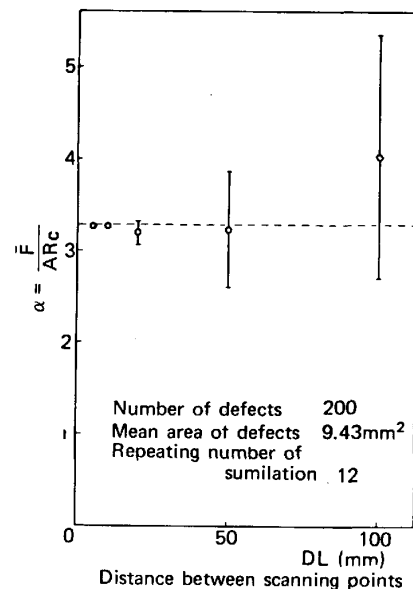


Fig. 9. Effect of the distance between scanning points on the confidence interval of the reference value ( $\alpha$ ).

す。 $\alpha$  は正規確率紙上に直線的に分布しており、ほぼ正規分布をなす。このことから、 $\alpha$  のばらつきとしては、 $2\sqrt{V}$  ( $V$  は  $\alpha$  の不偏分散) を採用する。

格子点探傷の測定間隔と  $\alpha$  の関係を、Fig. 9 に示す。模擬計算の繰り返し数が大きい場合には、 $\alpha$  の平均値は測定間隔と無関係に一定になると予想される。しかし、本実験で適用した条件下では、測定間隔があまり大きくない領域では、 $\bar{\alpha}$  はほぼ一定であるが、測定間隔が極端に大きい場合には、個々の  $\alpha$  のばらつきの影響を受け、 $\bar{\alpha}$  も変化を示した。また、測定間隔が大きくなるにつれて、 $\alpha$  のばらつきは増大しており、そのため、測定精度は低下する。

測定間隔が大きくなるにつれて  $\alpha$  のばらつきが増大する主たる要因として、測定点数の減少が考えられる。

すなわち、同一面積の鋼板を測定する場合、測定間隔が大きいほど、測定点数が少なくなり、ばらつきが大きくなるものと考えられる。しかしながら、比較的被測定面積が大きな鋼材を測定する場合には、測定間隔が大きくても、全体の測定点数が増すため、 $\alpha$  のばらつきはある程度小さくなることが予想される。

鋼材の被測定面積を、 $2 \times 10^4 \text{ mm}^2$  から  $32 \times 10^4 \text{ mm}^2$  に変化させ、種々の測定間隔について、前記の模擬計算をおこなった。模擬計算を 20 回繰り返して得られた  $\alpha$  の変動係数 ( $\sqrt{V/\alpha}$ ) を Fig. 10 に示す。変動係数は探傷面積の対数に逆比例する関係がある。Fig. 10 において、関係直線の横軸への切片は、鋼材の格子点探傷した際に得られる  $\bar{F}$  と鋼材中に非金属介在物が占める面積分率  $AR_c$  との間に、(3)式の関係がほとんどばらつきがなく成り立つ最小の面積を示している。この臨界的な面積を測定間隔に対して整理して、Fig. 11 に示す。対象とする被測定領域内において、非金属介在物が短範囲的にはアトランダムに、また、長範囲的には均一に分布していると想定される場合には、Fig. 11 から、その被測定面積に応じて、 $\bar{F}$  から  $AR_c$  を一定の精度で測定するために必要となる測定間隔を得ることができる。

建築鉄骨の仕口部のように、限定された領域内においては、前述した非金属介在物の分布状態に対する条件は、近似的に満足されるものと考えられる。また、実用上の観点から、変動係数の許容値を 0.05 とすれば、測定間隔を 10 mm とすることにより、 $\bar{F}$  から  $AR_c$  を精度良く推定することができると思われる。

#### 4. 結 言

MnS より成る A 系非金属介在物を非破壊的に定量化することを目的として、非金属介在物量が異なる鋼材に対し超音波探傷法を適用し、以下の結論を得た。

(1) MnS より成る A 系の非金属介在物は、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できる。

(2) 鋼材の表面に等間隔の格子線を想定し、その交点上を測定する格子点探傷においては、エコー高さの平均値  $\bar{F}$  は、探傷領域内に占める非金属介在物の面積分率  $AR_c$  とよい対応を示す。

本実験に使用した種類の非金属介在物を含む鋼材に対して、格子点探傷法により、その  $AR_c$  を求めるに当たっては、下式で示される  $\bar{F}$  と  $AR_c$  との関係を用いることが提案される。

$$\bar{F} = 0.899 AR_c - 1.35$$

(3) 被探傷領域の面積が一定な場合、格子点の間隔

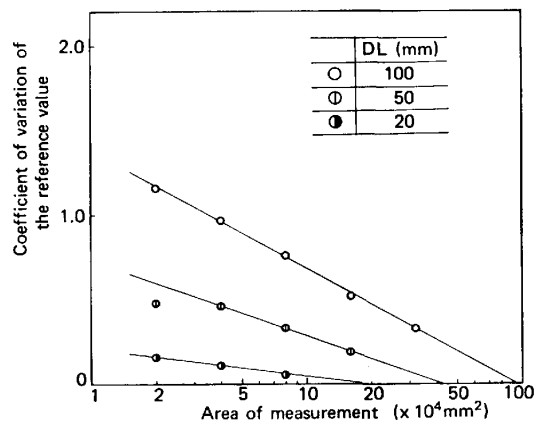


Fig. 10. Relation between the area of measurement and the coefficient of variation of the reference value ( $V/\alpha$ ), in case that the distance between scanning points is varied in 20~100 mm.

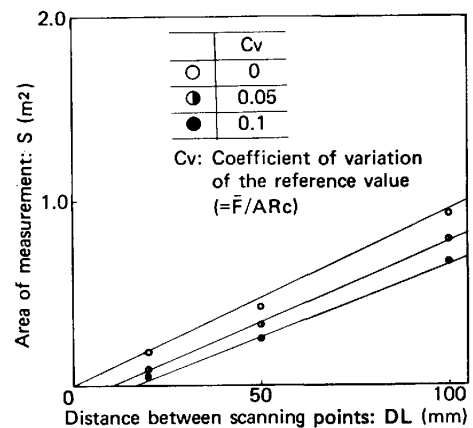


Fig. 11. Relations between DL and S which are necessary to keep the condition that the coefficient of variation of the reference value becomes constant.

が広がるほど、 $\bar{F}$  から  $AR_c$  を推定する精度が低下する。また、被探傷領域の面積に応じて、 $\bar{F}$  から  $AR_c$  を推定する際の推定誤差をほとんど無視しうる臨界的な測定間隔が存在する。建築鉄骨仕口部を対象とした場合、測定間隔を 10 mm に設定することにより、十分な精度で  $\bar{F}$  から  $AR_c$  を推定することができる。

終わりに、本研究の遂行に当たり、実験装置の利用に関して、科学技術庁・金属材料技術研究所福原氏、ならびに、石川島播磨重工業技術研究所米山弘志氏の御協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

#### 文 献

- 1) 日本建築学会編：鉄骨工事技術指針・同解説 (1977), p. 336[丸善]
- 2) W. DAHL, H. HENGSTENBERG and C. DÜREN: Stahl Eisen, 88 (1968) 8, p. 364
- 3) 日本非破壊検査協会編：非破壊検査の進歩 NDI 30 年史 (1982), p. 126
- 4) 石川 登, 藤盛紀明: 鉄と鋼, 71 (1985) p. 242

- 
- 5) 厚板超音波探傷法研究会: 超音波探傷の実際—厚鋼板への応用—(1960), p. 21
  - 6) 学振 19 委超音波探傷法協議会・自動探傷法委員会編: 厚板の自動超音波探傷法第 2 次研究報告書(1968), p. 122
  - 7) 日本非破壊検査協会編: 非破壊検査技術シリーズ 超音波探傷試験 B (1979), p. 17
  - 8) 同上, p. 24
  - 9) 日本学術振興会製鋼第 19 委員会編: 超音波探傷法 (1974), p. 33 [日刊工業新聞社]
-