

## 集束探触子の多重反射特性を利用した 鑄鉄鑄物の超音波探傷試験\*

里 中 忍\*<sup>1</sup>, 立 川 逸 郎\*<sup>2</sup>  
山 本 光 治\*<sup>3</sup>, 上 野 大 成\*<sup>4</sup>

### Ultrasonic Inspection of Cast Iron with a Focusing probe

Shinobu SATONAKA, Itsuro TATSUKAWA  
Mitsuharu YAMAMOTO, and Taisei UENO

In the conventional ultrasonic inspection of cast iron, a dead zone of probe and surface roughness makes ultrasonic inspection of near-surface flaws such as blow holes and pin holes difficult. In this paper, an improved technique of ultrasonic inspection using a focusing probe is applied to various types of artificial defects in cast iron. The results show that with a water distance such that the focal point of the ultrasonic beam locates beneath the flaw, the flaw echo of the near-surface flaw is distinguished from the surface echo with an observable time delay behind the surface echo on an A-scan display. The surface roughness causes the echo height of both surface echo and flaw echo to fluctuate, but their fluctuations become smaller with decreasing water distance. The scanning graphs of flaw echo height show a wavy pattern and a flat-shaped pattern reflected from the small flaw and plane flaw, respectively. The C-scan display is an effective method for presenting the distribution of flaws.

**Key Words:** Nondestructive Inspection, Ultrasonic Inspection, Iron and Steel, Focusing Probe, Multiple Reflection, Near-Surface Flaw, C-scan Display

#### 1. 緒 言

鑄物の表層部には砂かみ、のろかみなどの欠陥が発生しやすく、これらの欠陥が最終加工面に残留すると不良品となる。したがって、鑄仕上げの状態ではこれらの欠陥を検出することは品質管理、生産性向上の面からも重要な課題となり、そのために X 線や  $\gamma$  線を用いた探傷試験が実施されている。しかしながら、これらの方法には操作に危険が伴うこと、測定時間が長いことなどの欠点がある。一方、操作が容易で安全な超音波探傷試験では問題となる欠陥が表層部に存在すること、鑄仕上げの状態では鑄肌面の表面粗さが大きいこと、鑄物の表面形状が複雑なことなどの理由により、現状では有効な探傷法が確立されていない。これは超音波探傷試験が表面粗さの影響を受けやすく、表層部の欠陥に対しては探触子の不感帯の問題や多重反射の問題が残ることによるもので、二、三の新しい方法<sup>(1)(2)</sup>が提案され、それに対応できる広帯域の探触子

や測定器も開発されている。

本研究では表面粗さの影響の少ない、鑄物表層欠陥の超音波探傷法を確立するために、集束探触子の多重反射特性を利用した探傷法を試みた。この方法は集束探触子の音圧上昇の効果と、表面と欠陥の間で起こる多重反射特性を利用するもので、表層部の欠陥や薄板の探傷に有効である<sup>(3)</sup>。実験では種々の深さに人工欠陥を有し、しかも表面に機械加工で表面仕上げを施した試験片と鑄仕上げのままの試験片を用い、表面粗さ、結晶粒、探傷条件などが多重反射特性や探傷結果に及ぼす影響を明らかにするとともに、有効な探傷法を検討した。

#### 2. 測定原理および実験方法

本研究で採用した超音波探傷法は集束探触子の多重反射特性を利用した水浸法で、その原理を図 1 に示す。集束探触子から送信された超音波ビームは水中あるいは材料内で集束し、焦点に到達した後、発散する。図 1 のように集束探触子の焦点が欠陥深さよりもさらに深く位置するような水距離では、材料内に透過した超音波ビームもまた、表面と欠陥の間で多重反射を繰返しながら集束し、そして発散する。超音波探傷器では表面からの反射波と欠陥からの多重反射波を合成し

\* 昭和 62 年 10 月 25 日 九州支部・中国四国支部熊本地方講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 9 月 26 日。

\*<sup>1</sup> 正員、熊本大学工学部 (☎860 熊本市黒髪 2-39-1)。

\*<sup>2</sup> 正員、(財)大分県高度技術開発研究所 (☎879-76 大分市中判田ビワノ門 1977)。

\*<sup>3</sup> 熊本大学工学部。

\*<sup>4</sup> 日立金属(株) (☎800-03 福岡県京都郡菟野町長浜町 35)。

たものが探傷図形として表示されるが、多重反射における個々の反射波は超音波ビームの集束の程度に応じた音圧上昇の効果と反射による音圧減衰の影響を受ける。反射による音圧減衰の影響は表面あるいは欠陥での反射率や反射回数に依存し、減衰の割合は反射回数とともに大きくなる。また、音圧上昇の効果は超音波ビームの集束の程度に依存するもので、焦点に近づくに伴い、急激に大きくなる。その結果、十分に集束されていない状態での反射波は減衰の影響が音圧上昇の効果より大きくなり、表面での反射波に比較すると無視できるが、欠陥で最も集束された状態での反射波は音圧上昇の効果が顕著になるため、表面での反射波と同程度の音圧を有するようになる。しかも、この反射波は表面での反射波から、最も集束するまでの時間遅れを生じるために、探傷図形では図2に示すように表面エコーと離れた位置に欠陥エコーが発生する。この図2は後述する試験片Eの厚さ0.9mmのみぞ部を水距離24mmで探傷して得られる波形で、最初のピークが表面エコーで、3番めのピークが欠陥エコーである。また、水距離を一定にすると、欠陥エコーの時間遅れは欠陥深さに関係なくほぼ一定となり、欠陥エコー高さは欠陥の形状、深さによって異なる。したがって、欠陥の検出には走査探傷を採用し、走査位置と欠陥エコー高さの関係から欠陥の形状、分布を判別した。

実験には表1に示す化学組成の球状黒鉛鋳鉄FCD60を用い、図3に示す形状の試験片を準備した。試験片A、Bは内部に人工欠陥を含まないもので、表

面が鋳仕上げの試験片Aでは表面粗さの影響を、表面を研削仕上げした試験片Bでは黒鉛などの結晶粒の影響を調べた。表面を研削仕上げし、内部に直径1mmの横穴欠陥および縦穴欠陥を図3のように配置する試験片Cでは内部欠陥の検出能力を調べるとともに、探傷結果の表示法を検討した。また、表面が鋳仕上げの状態、内部にそれぞれ横穴欠陥、平面欠陥を有する試験片D、Eでは表面粗さが探傷結果に及ぼす影響を調べ、有効な探傷条件を明らかにした。図4は本研究で用いた測定装置の概略図を示したもので、超音波探傷器、集束探触子、走査装置、水槽、変位計、記録部から構成されている。本研究では走査探傷を採用するため、ステッピングモータで駆動される集束探触子が試験片上を移動するが、その移動量は変位計で測定される。一方、欠陥の検出は超音波探傷器上の欠陥エコー発生位置にあらかじめゲートを設け、ゲート内の欠陥エコー高さを出力する。移動量と欠陥エコー高さの記録にはX-Yレコーダによる方法とA-D変換器を介してパーソナルコンピュータのメモリ上に記録する方法を用い、その表示には走査グラフの二次元表示とCスコープ法を用いた。なお、探触子は直径20mm、焦

表1 供試材の化学組成

wt %							
C	Si	Mn	S	P	Cr	Cu	Mg
3.63	2.25	0.36	0.006	0.032	0.04	0.51	0.043

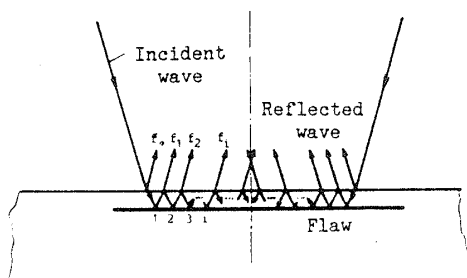


図1 測定原理

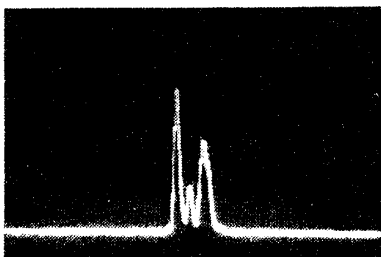


図2 平面欠陥の探傷図形

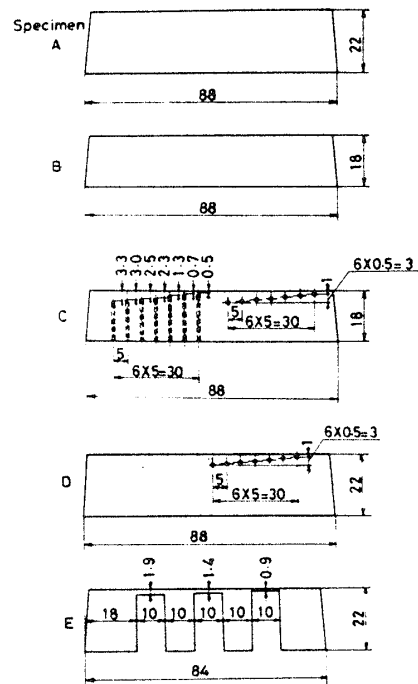


図3 試験片

点距離 36 mm, 周波数 5.2 MHz のレンズ結合形集束探触子である。

### 3. 実験結果および考察

**3.1 表面粗さと表面エコーの関係** 鋳物の鋳肌面は鋼素材に比較して表面粗さが大きく、そのことが鋳物の超音波探傷試験を困難にしている理由の一つである。本研究では表層部の欠陥に対して有効であった集束探触子の多重反射特性を利用した探傷法を鋳物に適用するが、表面粗さが大きい場合、表面エコー高さは測定位置によって変化し、欠陥エコーにも影響を及ぼすことが考えられる。そこで、その影響を明らかにするために種々の水距離に対する表面エコー高さの変化を調べた。

図5は試験片Aの鋳肌面を表面粗さ計で測定した結果を示す。鋳肌面には不規則な周期で凹凸が発生しており、その粗さは  $R_{max}100\ \mu\text{m}$  となっている。図6は同じ試験片を水距離 36 mm で走査探傷して得られる表面エコー高さの走査グラフである。水距離 36 mm は超音波ビームが表面で焦点を結ぶ場合であり、しかも、焦点での音圧の広がり、すなわち、焦点径は約 0.8 mm となることから、表面エコー高さには表面の凹凸にほぼ対応した変化が得られている。水距離を短くすると、超音波ビームの照射される領域は広くなり、そ

の結果、表面からの反射波も広い範囲からの反射音圧が平均化されるために、その変動幅も図7に示すように次第に減少することがわかる。一方、集束探触子の多重反射による超音波探傷法は水距離の短い場合にその特性が顕著に現れることから、水距離の短い探傷条件では表面粗さの影響の少ない探傷が可能と推察される。

**3.2 人工欠陥による超音波探傷試験** 鋳物の超音波探傷試験では前述の表面粗さの影響のほかに、砂かみ、のろかみなどの表面に近い欠陥の検出が困難なことも欠点とされてきた。しかも、鋳物では黒鉛などの結晶粒界での散乱による減衰も考慮する必要がある。ここでは、表面を研削仕上げした試験片Cの人工欠陥を対象にして表層部欠陥の検出法や黒鉛などの影響を調べた。

図8は試験片Cの表面エコーと欠陥エコーの発生位置にそれぞれゲートを設け、横穴欠陥部を水距離 27 mm で走査探傷したときの走査グラフを示す。表面エコーの発生位置にゲートを設けた場合には欠陥の位置でエコー高さにわずかな変動がみられるものの、その変動幅は小さい。欠陥深さが浅いときの表面エコー高

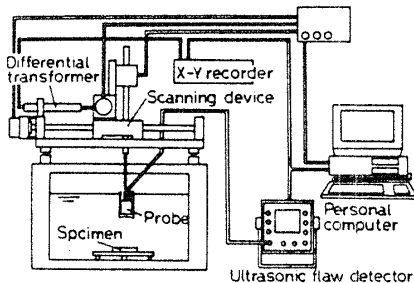


図4 測定装置の概略

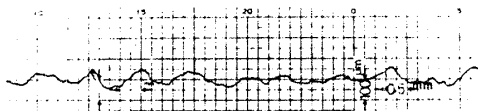


図5 粗さ曲線

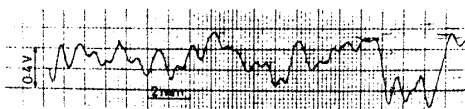


図6 表面エコーの変化

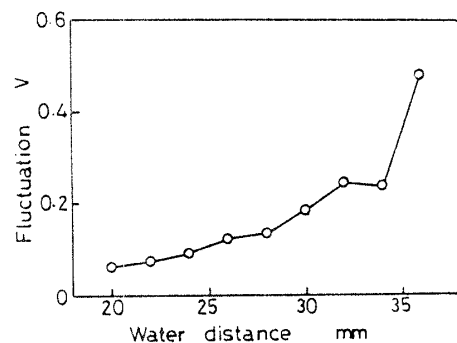


図7 表面エコー高さの変動幅と水距離の関係

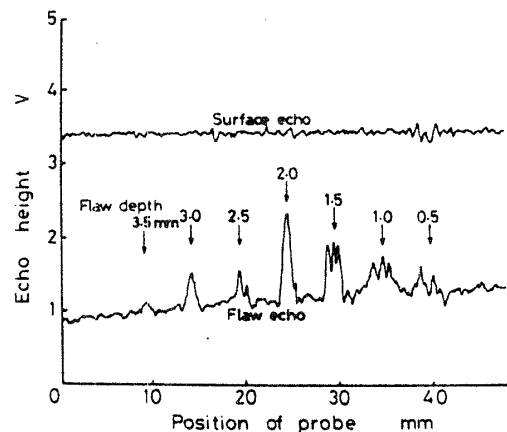


図8 表面エコーと欠陥エコーの走査グラフ

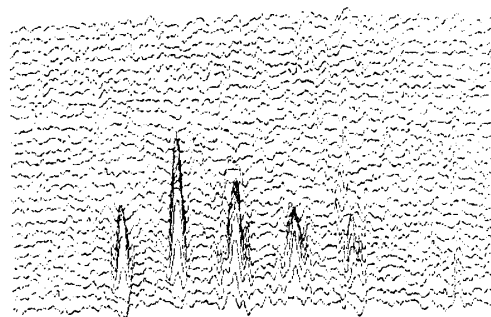
さの変動は表面と欠陥の間で起こる多重反射の初期の段階の反射波が表面エコーに重畳したもので、これらの反射波は十分に集束されていないために音圧は低く、欠陥の検出には利用できない。一方、欠陥エコーの発生位置にゲートを設けた場合には、横穴欠陥の位置で1個あるいは複数のピークが観察され、欠陥のない領域とも区別できる。しかも、その高さは欠陥深さによって異なっている。この欠陥エコーは表面と欠陥の間で発生する多重反射のうち、主として最も集束された状態での反射波で形成され、表面エコーとも判別できる時間遅れを有する。しかしながら、水距離 27 mm では探傷図形に欠陥エコーと表面エコーの重なる領域が存在し、欠陥エコーの立上りから立下りの間にゲートを設けた場合には欠陥エコーが検出されない健全部で表面エコーの一部がゲート内に検出されることから、図 8 の走査グラフでは欠陥のない部分でもエコー高さが検出されている。このエコー高さより高い欠陥エコーが走査探傷における欠陥検出のしきい値となる。また、しきい値には黒鉛などの結晶粒の影響も含まれることが考えられるが、本法に及ぼす影響は無視できる。以上の結果から、欠陥の検出にはゲート内で検出される表面エコーより高いエコー高さを有する欠陥エコーの発生が判定基準となるが、探傷可能な欠陥の表面からの深さは 1.0 mm であった。また、鋳物の探傷では欠陥の分布、形状を把握することも重要となるが、これは上記の走査探傷を全面に施すことによって達成でき、本研究ではその表示法として走査グラフの二次元表示と C スコープ法を採用した。

図 9 は試験片 C の縦穴欠陥部と横穴欠陥部をそれぞれ走査間隔 0.16, 0.32 mm で走査探傷し、その結果を走査グラフの二次元表示で示した。いずれの場合にも、欠陥の位置でピークを形成し、しかも、横穴欠陥部ではピークの発生領域が線状に、縦穴欠陥部では円状に分布している。しかしながら、走査グラフが重なる部分では境界が不明りょうで、形状あるいは分布を明らかにすることができない。そこで、この欠点を補うために C スコープ法を用いた。これは全走査グラフのエコー高さから最大値と最小値を求め、その間を 8 等分して各領域を白と黒で交互に表示する方法である。図 10 は縦穴欠陥部と横穴欠陥部の C スコープ像である。図 10 から明らかなように、C スコープ像では欠陥の形状、分布とも二次元的に表示され、有効な表示法となっている。特に、縦穴欠陥部はドリル先端角 120°を有しているにもかかわらず、その形状が円となっており、本法の有用性が検証された。なお、人工欠陥のない領域でも白と黒の領域が点在しているが、これ

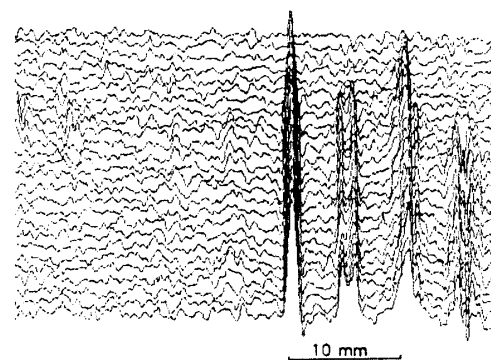
については最大値と最小値の間の分割法や鋳物固有の欠陥の影響を含め、今後検討する必要がある。

**3・3 探傷結果に及ぼす表面粗さの影響** 3・2 節の結果から、全面走査探傷結果を C スコープ像で表示すると、欠陥の形状、分布を把握できることが明らかになった。しかしながら、鋳物の探傷試験では鋳肌面からの探傷を要求されることが多く、そのために表面粗さの影響の少ない条件を明らかにする必要がある。そこで、試験片 D, E を用いてその条件を調べた。

図 11 は試験片 D の横穴欠陥を水距離 27 mm で走査探傷し、その結果を走査グラフで示したものであ



(a) 縦穴欠陥



(b) 横穴欠陥

図 9 縦穴欠陥および横穴欠陥の走査グラフ



(a) 縦穴欠陥



(b) 横穴欠陥

図 10 縦穴欠陥および横穴欠陥の C スコープ像

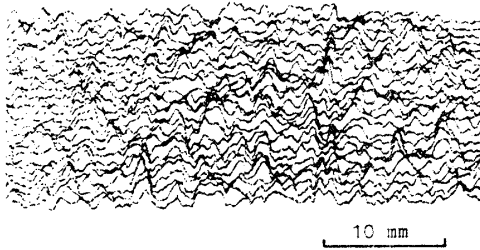


図 11 横穴欠陥の走査グラフ(水距離 27 mm)

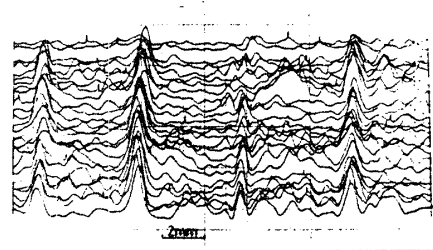


図 12 横穴欠陥の走査グラフ(水距離 19 mm)

る。走査グラフには図9で示された欠陥部に対応するピークは観察されず、全領域にわたってほぼ均一な変動を呈している。これは水距離が長い場合超音波ビームが表面に照射される領域が狭くなり、超音波ビームの入射角が表面粗さの影響を受けて変化したことや横穴欠陥が直径1 mmと小さく、多重反射による集束の効果が現れなかったことによる。図12は水距離19 mmの場合の走査グラフを示す。水距離19 mmでは超音波ビームが照射される領域が広くなり、表面粗さによる変動も平均化されるために、横穴欠陥部では図9と同様、欠陥部でピークが検出され、無欠陥部との判別も可能となっている。図13は試験片Eのみぞ部の走査グラフを水距離28, 26, 24, 22 mmについて示したものである。この場合、みぞ部は平面欠陥とみなすことができるが、いずれの場合にも両端部の無欠陥部よりもエコー高さの高いほぼ平坦な走査グラフが得られ、縦穴欠陥部や横穴欠陥部とも区別することができる。また、平面欠陥の場合には水距離が長い場合でも探傷可能となっているが、横穴欠陥では欠陥部に照射される超音波ビームと比較して欠陥の大きさが小さく、しかも断面が円形となっていることから多重反射する超音波ビームの割合が少なかったことに対し、平面欠陥では欠陥部全面で多重反射が起こり、表面粗さに比較して多重反射の効果が顕著に現れたことによる。

以上の結果から、集束探触子の多重反射特性を利用した探傷法は水距離の短い条件で実施することにより、表面粗さの影響が少ない鋳物表層部の欠陥検出に有効な方法であることが明らかになった。

#### 4. 結 言

本研究では、人工欠陥を用いて集束探触子の多重反

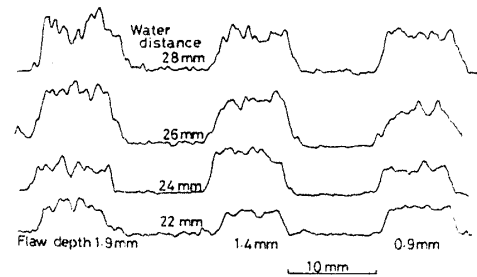


図 13 平面欠陥の走査グラフ

射特性を利用した鋳物表層欠陥の探傷法を水浸法で試み、表面粗さの影響、有効な探傷条件、探傷結果の表示法を検討した。主な結果は次のとおりである。

- (1) 集束探触子の多重反射特性を利用した超音波探傷法は鋳物表層部欠陥にも有効なことが確認され、欠陥の検出には欠陥エコーの発生が判定基準となる。
- (2) 鋳肌面の表面粗さは表面エコー高さや欠陥エコー高さの変動の原因となるが、水距離の短い条件ではその影響を小さくすることができる。
- (3) 微小欠陥は1個あるいは複数のピークを呈する走査グラフとなり、平面欠陥は平坦な走査グラフとなる。
- (4) 走査探傷結果の表示には走査グラフの二次元表示やCスコープ像が有効となるが、欠陥の形状、分布にはCスコープ像が適する。

#### 文 献

- (1) 片峰・ほか3名, 鋳物, 58-2(1986), 111.
- (2) 井上・ほか3名, 溶接学会論文集, 2-4(1984), 686.
- (3) 里中・ほか2名, 溶接学会論文集, 3-4(1985), 875.