時間-周波数解析による超音波欠陥信号の弁別*

(第2報, 単一探触子による欠陥信号の弁別)

福田 義徳^{*1}, 北川 孟^{*2}

Classification of Ultrasonic Flaw Signals by Means of Time-Frequency Analysis (2nd Report, Flaw Signals Classification by Single Ultrasonic Probe)

Yoshinori FUKUDA and Hajime KITAGAWA

The previous classification method⁽¹⁾ which is based on a time-frequency analysis, can classify three types of artificial flaws; side-drilled hole, flat-bottomed hole and slit. But this method requires two ultrasonic probes to distinguish these flaws. As this method is complicated, this paper examines the phase of flaw signal to develop a single ultrasonic probe method. The phase value of flaw signal is analyzed by STFT, a method of time-frequency analysis. As a result of analysis, it is clear that narrow slit causes a change of the phase value and there is a difference in the phase value between the side-drilled hole and the slit. In the previous method, the flat-bottomed hole can be distinguished from both the side-drilled hole and the slit by a probe of 6 mm aperture diameter. Therefore, by combining the previous and the present methods, a single ultrasonic probe method which can classify three types of artificial flaws is achieved.

Key Words: Ultrasonic Inspection, Nondestructive Inspection, Time-Frequency Analysis, Flaw Classification, Phase

1. 緒 言

鉄鋼製品の製造プロセスにおける欠陥検査においては、製品中の欠陥の有無の判定のみならず、その種類の弁別が、品質管理および品質保証上重要となる。

超音波探傷法は代表的な非破壊検査法であり、鉄鋼製品の欠陥検査にこれまで広く用いられてきている。この探傷法における欠陥弁別には、欠陥信号の周波数領域に基づく手法⁽²⁾、時間領域に基づく手法⁽³⁾等が提案されている。しかしながら、これらの手法は弁別の精度に劣るため、実用化にはまだ至っていない。欠陥の種類は現在も熟練技術者の手探傷によって判断されており、探傷の自動化を推進する観点から簡便かつ精度の優れる弁別法の開発が望まれている。

これに対応するため、著者は前報⁽¹⁾で時間-周波数解析法(t-f解析法)^{(4)~(6)}を応用した新たな欠陥弁別法を提案している。この手法は、縦波超音波の指向性

の周波数による変化を利用しており、欠陥信号の到達時間の周波数による差に基づき弁別を行うものである。この手法により、横穴・平底穴・スリットの3種類の人工欠陥を的確に弁別することができる。しかしながらこの手法では、これら3種類の人工欠陥の弁別に振動子径の異なる2種類の探触子を必要とするため、検査が煩雑になるという問題がある。

ところで、超音波の入射によりスリット先端で発生する端部エコーは、その位相が約1/4周期分ずれることが報告されている⁽⁷⁾。したがって、欠陥信号の位相を解析することで、スリットが他の欠陥から弁別できることが期待できる。

そこで本報では、単一の探触子による3種類の欠陥の弁別法を開発するため、欠陥信号の位相に着目した検討を行う。欠陥信号の位相は、前報の欠陥弁別法の適用の際に求めたt-f解析結果を利用することで容易に算出することができる⁽⁸⁾。本報では、まず、前報で提案した欠陥弁別法の原理および適用結果を示し、その問題点を明らかにする。次に、欠陥信号の位相に及ぼすスリットの幅および形状の影響を明らかにする。さらに、3種類の人工欠陥からの欠陥信号に対し、欠陥種類と位相との関係を求める。以上により、前報で提案した手法と本報で提案する位相に基づく手法とを

* 1997年3月31日 第74期通常総会講演会において講演、原稿受付 1997年12月19日。

^{*1} 正員、豊橋技術科学大学〔現：NKK基盤技術研究所(☎210-0855 川崎市川崎区南渡田町1-1)〕。

^{*2} 正員、豊橋技術科学大学(☎441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)。

E-mail: yfukuda@lab.keihin.nkk.co.jp

組合せることで、単一の探触子で3種類の人工欠陥が的確に弁別できることを示す。

2. 欠陥信号の測定およびt-f解析

対象とする欠陥は、横穴、平底穴、スリットの3種類の人工欠陥とする。これらはそれぞれ鉄鋼厚板中に発生する自然欠陥である、ラミネーション傷、空孔・介在物、割れを模擬したものである。

2・1 探傷システム 探傷は一探触子法による直接接触法により行う。探傷システムの概略を図1に示す。探傷器はデジタルオシロスコープに接続されており、測定された欠陥信号はいったんデジタルオシロスコープ内に8ビットの分解能で取込まれる。さらに、欠陥信号はGPIBを介しパーソナルコンピュータに読込まれる。

2・2 探触子 本報では、鉄鋼厚板の製造プロセスへの応用を考え、探傷に用いる探触子は2種類の広帯域縦波垂直探触子とする。公称中心周波数はともに5 MHz、振動子径はそれぞれ10 mmおよび6 mmである。以後、これらを探触子 $\phi 10$ mm、探触子 $\phi 6$ mmと呼ぶことにする。

図2には、二つの探触子による厚さ30 mmの鋼板からの底面反射波の周波数解析結果を示す。図2より両探触子とも十分広い周波数帯域を有することがわかる。ピーク周波数は、探触子 $\phi 10$ mmで4.5 MHz、探触子 $\phi 6$ mmで5.3 MHzである。

図3には、二つの探触子に対する指向性の評価結果

を示す⁽¹⁾。図3の横軸 θ は探触子中心軸からの角度であり、縦軸は超音波の放射強度を示す。図3より高周波になるにつれ指向性が鋭くなること、振動子径の大きい探触子 $\phi 10$ mmのほうが探触子 $\phi 6$ mmに比べ指向性が鋭いことがわかる。これらのことは、縦波超音波の放射に関する理論⁽⁹⁾と一致する。

2・3 試験片 供試材はSM 490 Aである。図4に本報で用いる横穴および平底穴付き試験片、スリット付き試験片の2種類の試験片を示す。横穴および平底穴の探傷は一つの試験片で探傷面を変えることによって行う。横穴および平底穴の直径は $\phi 1.0$, $\phi 1.4$, $\phi 2.0$, $\phi 2.8$, $\phi 4.0$ mmの5種類、スリット深さは2, 4, 6, 8, 10 mmの5種類である。スリットは放電加工により導入しており、その幅は約0.2 mmである。

2・4 欠陥信号 測定のサンプリング周波数は50 MHz、サンプリング点は512点とする。電気ノイズを減らすため、オシロスコープ上にて16回平均化処理を行っている。例として、図5に、二つの探触子による $\phi 4$ mmの横穴、 $\phi 4$ mmの平底穴および深さ10 mmのスリットからの欠陥信号を示す。スリットの欠陥信号において7.5 μ s付近に見られる波形は底面反射波であり、解析には用いない。

2・5 t-f解析 t-f解析法には、短時間フーリエ変換(STFT)⁽⁴⁾、ウェーブレット変換⁽⁵⁾、ウィグナー分布⁽⁶⁾等がある。本報では、位相の評価が行えること

Fig. 1 Diagram of ultrasonic inspection system

Fig. 2 Spectra of ultrasonic probes

(a) Probe $\phi 10$ mm

(b) Probe $\phi 6$ mm

Fig. 3 Directivities of ultrasonic probes

Fig. 4 Specimens

(a) Side-drilled hole (probe ϕ 10 mm) (d) Side-drilled hole (probe ϕ 6 mm) (b) Flat-bottomed hole (probe ϕ 10 mm) (e) Flat-bottomed hole (probe ϕ 6 mm) (c) Slit (probe ϕ 10 mm) (f) Slit (probe ϕ 6 mm)

Fig. 5 Examples of flaw signals

と著者が前報で行った検討結果に基づき, STFT を用いて解析を行うものとする。STFT は, 波形を順次適当な窓関数を用いて切り出しフーリエ変換する方法であり, 次式で与えられる。

$$S(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) g(\tau - t) e^{-j\omega(\tau - t)} d\tau \quad \dots\dots (1)$$

ここで, $f(t)$ は入力信号, $g(t)$ は窓関数である。本報では窓関数にハミング窓を用い, 窓長は信号のパルス

幅と同程度とするため, 探触子 $\phi 10$ mm による欠陥信号では $1.0 \mu\text{s}$, 探触子 $\phi 6$ mm による欠陥信号では $0.56 \mu\text{s}$ とする。

一般に, $S(t, \omega)$ は複素数であるため, その絶対値と位相角で表現されることが多い。すなわち

$$|S(t, \omega)| = \sqrt{\text{Re}[S(t, \omega)]^2 + \text{Im}[S(t, \omega)]^2} \quad \dots\dots (2)$$

$$\angle S(t, \omega) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[S(t, \omega)]}{\text{Re}[S(t, \omega)]} \quad \dots\dots (3)$$

以後、これらをそれぞれ STFT の振幅および位相と呼ぶことにする。

図 6 には、例として図 5 (d) に示す信号のうち $3.8 \sim 5.1 \mu\text{s}$ の領域について、STFT で t-f 解析した結果を振幅で表示する。

3. 前報で提案した欠陥弁別法とその問題点

3.1 欠陥弁別の原理 前報で提案した欠陥弁別法は、縦波超音波の周波数による指向性の違いを利用している。つまり、縦波超音波の指向性は高周波で鋭く低周波になるにつれ悪くなる⁽⁹⁾。

そのため、図 7 (a) のような空間的に広がりのある欠陥では、高周波成分は探触子直下でのみ反射するが、低周波成分は探触子直下および離れた位置で反射することになる。その結果、超音波の平均伝搬距離は低周波成分のほうが高周波成分に比べ長くなり、低周波成分の到達時間に遅れが生じる。

一方、図 7 (b) のような空間的に局在した欠陥では、高周波成分および低周波成分はともに探触子直下で反射することになり、到達時間に差は生じない。

したがって、欠陥信号に t-f 解析を施し、その振幅から高周波成分と低周波成分の到達時間の差を評価することで、欠陥の種類を弁別することができる。

3.2 欠陥弁別結果およびその問題点 先に測定

Fig. 6 Example of t-f analysis (amplitude)

Fig. 7 Principle of flaw classification

した 3 種類の人工欠陥からの欠陥信号に対し、t-f 解析を施し高周波成分と低周波成分の到達時間差を求めることにする。高周波成分は、前報での結果に基づき探触子 $\phi 10 \text{ mm}$ では $3.5 \sim 5.5 \text{ MHz}$ 成分の平均値、探触子 $\phi 6 \text{ mm}$ では $4.0 \sim 6.0 \text{ MHz}$ 成分の平均値とし、低周波成分は、探触子 $\phi 10 \text{ mm}$ では $0.6 \sim 1.0 \text{ MHz}$ 成分の平均値、探触子 $\phi 6 \text{ mm}$ では $1.4 \sim 1.8 \text{ MHz}$ 成分の平均値とする。

図 8 は、低周波成分の高周波成分からの到達時間遅れと欠陥の大きさとの関係を示す。図 8 (a) の探触子 $\phi 10 \text{ mm}$ による結果では、横穴が平底穴とスリットから弁別できることがわかる。空間的に広がりがあるにもかかわらず、スリットで低周波成分の到達時間遅れが生じなかったが、これは低周波成分を $0.6 \sim 1.0 \text{ MHz}$ と低く設定したため十分な反射強度が得られなかったことによる。また、図 8 (b) の探触子 $\phi 6 \text{ mm}$ による結果では、平底穴が横穴とスリットから弁別できることがわかる (平底穴では低周波成分のほうが到達時間が早まるが、これは探触子の振動子の特性によるものである。この特性をあらかじめ求めることで補正はできるが、欠陥弁別の目的上このような操作は不

(a) Probe $\phi 10 \text{ mm}$

(b) Probe $\phi 6 \text{ mm}$

Fig. 8 Classification result by arrival time delay of low frequency component⁽¹⁾

要と考え、本報では特に考慮しないことにする)。

以上より、図8(a), (b)に示す欠陥弁別結果を組合せることで、横穴・平底穴・スリットの3種類の人工欠陥を的確に弁別することができる。しかしながら、この手法で3種類の人工欠陥を弁別するには、このように振動子径の異なる二つの探触子を用いて探傷する必要があり、煩雑であり実用性に欠けている。そのため、単一の探触子で3種類の欠陥が弁別できる簡便な手法の開発が望まれている。

4. 位相解析による欠陥の弁別

前報で提案した欠陥弁別法は、STFTによるt-f解析結果の振幅に基づいているが、すでに述べたようにSTFTでは振幅と同時に位相も得ることができる。図9には、図6に振幅で表示した欠陥信号のt-f解析結果を位相で示すが、このような欠陥信号の位相も欠陥の形状を反映した情報を含んでいるものと考えられる。そこで本報では、単一の探触子による3種類の欠陥の弁別法を開発するため、欠陥信号の位相に着目した検討を行う。

4.1 欠陥弁別の原理 スリット上端部で発生する端部エコーの発生時間は、スリット上端部で鏡面反射すると仮定した場合に比べ、約1/4周期分遅れることが報告されている⁽⁷⁾。このような端部エコーの発生は、スリットの変形挙動のコンプライアンスによって生じるものと考えられる。つまり、スリットは外部からの作用に対し柔軟な変形を示すことから、入射波の伝ばによるスリット先端近傍の最大変位は、入射波の最大振幅が到達したときではなく、それが過ぎさらに約1/4周期経たのちに生じる⁽⁷⁾。端部エコーの発生は、スリット先端近傍の局所的な変形に起因するものであり、そのため端部エコーの最大ピークの位置は約1/4周期分遅れることになる。

このように、端部エコーは約1/4周期分遅れて発生するものの、超音波の振動はそのまま保存される。し

Fig. 9 Example of t-f analysis (phase)

たがって、端部エコーの位相は約1/4周期分ずれることになる。本報における欠陥の弁別の原理はこの位相の評価にあり、端部エコーを主に発生するスリットと鏡面反射波を主に発生する横穴との弁別が期待できる。

4.2 スリットによる位相の変化 端部エコーはスリット先端近傍の変形によって発生するため、その位相はスリットの幅および先端の形状に大きく依存するものと考えられる。そこで、ここではその影響の検討を行う。

4.2.1 試験片 図10に探傷に用いる3種類のスリット付き試験片を示す。供試材は、先の探傷で用いた試験片と同様SM 490 Aとする。試験片の厚みはいずれも30 mmであり、スリットの深さは10 mmである。スリットは、先端が方形および円形の2種類を導入しており、方形先端のスリットは幅が0.2 mmから20 mmまでの10種類、円形先端のスリットは幅が0.4 mmから1 mmまでの5種類である。これらのスリットはいずれも放電加工により作製している。

4.2.2 欠陥信号 探傷は、2章で説明した方法と同様に一探触子による接触法により行い、探傷システム、探触子、探傷条件についても同様とする。図11には、2種類のスリットによる、幅0.3 mmおよび幅5 mmの方形先端のスリットからの欠陥信号を例示する。図11より、スリットの幅が異なると波形が微妙に変化することがわかる。また、図5と同様に8.2 μs付近に底面反射波が確認できるが、これらは解析には用いない。

4.2.3 解析結果 測定した各スリットからの欠

Fig. 10 Slit specimens

Fig. 11 Examples of flaw signals reflected from slit

陷信号に対し、STFTにより t - f 解析を行い位相を求めることにする。ここで、位相は図9に示すように時間とともに変化するから、それを評価するには基準となる時間を設定する必要がある。本報では、探触子の公称中心周波数である5 MHz成分の到達時間を基準に定め、その時間において位相の値を周波数ごとに求めることにする。また、鏡面反射波である鋼板底面からの反射波についても同様に位相の値を求めることにする。

図12には、方形先端のスリットからの欠陥信号について、底面反射波からの位相の差と周波数との関係をスリットの幅ごとに示す。図12より、スリットの幅が狭まるにつれ底面反射波との位相の差が広がる傾向にあることがわかる。これは、スリットの幅が狭ま

Fig. 12 Relation between frequency and phase difference from bottom echo (square shape slit)

るにつれ、鏡面反射成分が減少し端部エコー成分が支配的になるためであると考えられる。また、スリットの幅による位相の変化は、周波数にあまり依存しないことがわかる。

図13には、各スリットからの欠陥信号と底面反射波との位相の差のうち、図12中の網掛け部で示される中心周波数近傍である4~6 MHz成分とスリットの幅との関係を示す。図13より、底面反射波との位相の差はスリットの幅0.3~0.4 mm付近で最大となり、1/4周期に近い値に達することがわかる。スリットの幅が0.2 mmとさらに狭くなると位相の差は逆に減少するが、これはスリットの幅が狭くなり過ぎたため、方形先端スリットの両端部での変形挙動にコンプライアンスを示せなくなったためであると考えられる。また、方形先端と円形先端のスリットを比べると、円形先端のスリットのほうがやや位相の変化が小さいが、スリットの幅が1 mm以下ではほぼ同程度であることがわかる。

以上より、信号の位相の評価を行うことで、割れを模擬する幅の狭いスリットからの欠陥信号が、鏡面反射波を主とする欠陥信号から弁別できることがわかる。

4.3 欠陥種類と位相との関係 先に測定した3種類の人工欠陥からの欠陥信号に対し、前報の欠陥弁

(a) Probe ϕ 10 mm (b) Probe ϕ 6 mm

Fig. 13 Relation between slit width and phase difference from bottom echo

(a) Probe ϕ 10 mm (b) Probe ϕ 6 mm

Fig. 14 Relation between frequency and phase difference from bottom echo

別法の適用の際に求めた t-f 解析結果を利用して位相を算出することにする。位相は、これまでと同様に 5 MHz 成分の到達時間を基準として定める。

図 14 には、各欠陥信号について、底面反射波からの

(a) Probe ϕ 10 mm (b) Probe ϕ 6 mm

Fig. 15 Classification result by phase difference from bottom echo

位相の差と周波数との関係を示す。図 14 より、横穴からの欠陥信号は底面反射波との位相の差が小さいことから、横穴では鏡面反射に近い反射をしているものと考えられる。また、平底穴およびスリットからの欠陥信号の位相は、底面反射波より大きくずれていることから端部エコー成分が支配的であると考えられる。ここで、探触子 $\phi 6$ mm による平底穴からの欠陥信号において低周波領域での位相の上昇が認められるが、これは平底穴のみが空間的に局在した欠陥であり、その他の信号（横穴欠陥信号、スリット欠陥信号、底面反射波）と異なり低周波成分の到達時間に遅れが生じないため、位相を評価する時間が相対的にずれたことによる。図 14(a) でその影響が認められないのは、探触子 $\phi 10$ mm を用いた場合には主に 1 MHz 以下で低周波成分の到達時間遅れが生じる⁽¹⁾ からである。

図 15 には、図 14 に示す各欠陥信号の底面反射波からの位相の差について、探触子中心周波数近傍である 4~6 MHz 成分の平均値と欠陥大きさとの関係を示す。図 15(a), (b) より、どちらの探触子を用いた場合でも、横穴が平底穴とスリットからの的確に弁別できることがわかる。

4・4 単一の探触子による欠陥の弁別 探触子 $\phi 6$ mm による結果に注目した場合、図 8 (b) に示す欠陥信号の低周波成分の到達時間遅れに基づく手法では、平底穴が横穴とスリットから、図 15 (b) の欠陥信号の位相に基づく手法では、横穴が平底穴とスリットから弁別できることがわかる。したがって、これら両者の手法を組合せることで、探触子 $\phi 6$ mm による欠陥信号のみを解析することにより、3 種類の人工欠陥を的確に弁別することができる。

本報では、振動子径が 6 mm の探触子を用いた場合に 3 種類の欠陥の弁別が行えたが、振動子径による弁別結果の違いは前報で提案した弁別法におけるスリットにある。つまり振動子径が 10 mm の探触子を用いた場合には、スリットで低周波成分の到達時間遅れが生じないため、前報の弁別法ではスリットと平底穴とを弁別することができず、位相に基づく方法と組合せても 3 種類の欠陥の弁別が行えなかった。スリットにおいて低周波成分の到達時間遅れを有効に生じさせるには、探触子の指向性が鈍いことが望ましく⁽¹⁾、そのため探触子には 6 mm 程度あるいはこれよりも小さい振動子径のものをを用いるべきである。

また、本報では、欠陥信号の位相の変化を評価するため底面反射波の位相を基準としたが、あらかじめ探触子および探傷器の位相の特性を把握しておけば、底面反射波との位相の差を評価する必要はない。

5. 結 言

前報で報告した t-f 解析法を応用した超音波欠陥信号の弁別法は、横穴、平底穴、スリットの 3 種類の人工欠陥を弁別するために振動子径の異なる二つの探触子が必要となる。そこで、単一の探触子で 3 種類の人工欠陥が弁別できる手法を開発する目的で、欠陥信号の t-f 解析の際に振幅と同時に得られる位相に着目し

た検討を行った。

本報では、まず、位相に及ぼすスリット幅および形状の影響を調査し、スリットの幅が狭くなるにつれ、位相が大きく変化することを明らかにした。

次に、3 種類の人工欠陥からの欠陥信号に対し位相の値と欠陥種類との関係を求め、位相の評価により横穴が平底穴とスリットから弁別できることを示した。

以上により、前報で提案した欠陥信号の低周波成分の到達時間遅れに基づく弁別法と、本報で提案する欠陥信号の位相に基づく弁別法とを組合せることで、振動子径が 6 mm の探触子のみを用い、3 種類の人工欠陥を的確に弁別することができた。

この方法は、前報で提案した欠陥弁別法において用いている t-f 解析結果を有効に利用できることから、計算の負荷が軽減されるため、実用的な方法であるといえる。

今後、位相の差が生じる条件等について、コンピュータシミュレーション等により検討を加える必要があると考える。また、自然欠陥に対し本手法を適用し、その有効性を確認する必要があると考える。

文 献

- (1) 福田義徳・北川孟, 機論, **63**-609, C (1997), 1551-1558.
- (2) Gericke, O. R., *J. Acoust. Soc. Am.*, **35**-3 (1963), 364-368.
- (3) Rose, J. L., ほか 3 名, *Materials Eval.*, **42**-1 (1984), 98-101.
- (4) 伊藤忠宏・ほか 4 名, 機論, **61**-586, C (1995), 2347-2352.
- (5) Morlet, J., ほか 3 名, *Geophysics*, **47** (1982), 203-236.
- (6) Cohen, L., *Proc. IEEE*, **77**-7 (1989), 941-981.
- (7) 劉銘崇・三木千壽, 土木学会論文集, 525/I-33 (1995), 109-116.
- (8) Fukuda, Y. and Kitagawa, H., *Proc. 5th Jap. Int. SAMPE Symp.*, (1997-10), 377-382.
- (9) 日本学術振興会製鋼第 19 委員会編, 超音波探傷法, (1977), 24, 日刊工業新聞社.