論説

Paper

高減衰鋼片の超音波探傷技術

片岡克仁*

Development of Ultrasonic Inspection Technique for Steel Billets with High Acoustic Attenuation

Katsuhito Kataoka

Synopsis

Various nondestructive testing have been applied for steel products in manufacturing processes. Ultrasonic inspection is an important method to evaluate inclusions in rolled billets. Conventional ultrasonic transducer with a flat piezoelectric element is used for the inspection. However, ability of inspection for a part of chromium stainless steel billets with coarse grain is insufficient with comparison to the ability for carbon steel billet. This paper describes a result of development of new ultrasonic transducers for the billets with coarse grain. Numerical analysis with finite element method was carried out to make sure a best frequency and wave shape. Two transducers are designed and confirmed advantages over the conventional transducers.

1. 緒 言

大同特殊鋼(株)は、スクラップを原料として、溶解、鑄造、各種圧延工程を経て、大型の角製品、丸製品から、平鋼、棒鋼、線材、帯鋼製品、などを生産している。このように、多岐にわたる鋼製品に対して、内質検査は重要である。内質検査が不適切であれば、製品の使用中に損傷や破壊が起こり、人身事故を伴う重大な災害を招くこともある。

内質検査を最終製品に適用する場合、多種多様な形状や寸法に即した設備が必要で、場合によっては、検査自体が困難な場合がある。このため、中間製品にあたる鋼片での内質検査（超音波探傷）の要求は特に大きい。通常の鋼片には、周波数が数 MHz の超音波を用いて探傷している。しかし、一部のフェライト系ステンレス鋼や電磁ステンレス鋼においては、結晶粒が 1 mm 程度と粗大化しているものもあり（以後、高減衰鋼片という）、粒界散乱により微小な欠陥の検出性能が低下することがあり、改善が望まれていた。

そこで、今回、高減衰鋼片の超音波探傷精度の向上を

目指し、(1) 高減衰鋼片の超音波特性を明らかにし、(2) 結晶粒界散乱を考慮した数値解析により探傷条件を最適化し、(3) 全断面探傷を可能とする技術を開発した。

2. 超音波特性調査

調査する鋼片として、二種類のフェライト系ステンレス鋼 (SUS430, SUS405 modified) と、比較のため、減衰の少ない構造用鋼 (SCM435) を用いた。

2. 1 結晶粒径分布

鋼片断面のマクロ観察を実施し、結晶粒径分布を測定した。測定結果を Fig.1 に示す。構造用鋼の結晶粒径は、鋼片断面の表層から中心まで、直径 0.05 mm 以下ではほぼ均一であるのに対し、フェライト系ステンレス鋼は、中心に近づくにつれ、結晶粒径が大きくなっていた。なお、中心近傍の粒径は、SUS430 では 1.6 mm 程度、SUS405 modified では 0.8 mm 程度であった。

2. 2 超音波減衰特性

鋼片の粗大結晶粒部（鋼片の中心部近傍）を切り出

Fig.1. Grain size distribution of the billets.

し、超音波を入射したときの第1回目の底面エコーと第2回目の底面エコーの比率より、鋼片の超音波減衰特性を調査した。調査結果を Fig.2 に示す。構造用鋼に比べ、フェライト系ステンレス鋼の減衰は大きく、探傷周波数 5 MHz においては、構造用鋼が 0.05 dB/mm に対し、フェライト系ステンレス鋼は 0.20 dB/mm であった。また、探傷周波数が、低周波数になるにつれて、超音波減衰が小さくなることがわかった。この調査より、散乱減衰の著しいフェライト系ステンレス鋼には、低周波数が有効であることがわかった。

Fig.2. Characteristic of acoustic attenuation.

3. 数値解析による探傷条件の最適化

3.1 結晶粒界散乱を考慮した数値解析法

数値解析には、有限要素法の陽解法を、要素分割には、ボロノイ分割法を用いた。陽解法とは、ある時刻 t における値を基にして微少に進んだ時刻 $t + \Delta t$ の値を代数的に求め、それを繰り返し計算していく方法である。 Δt だけ時間を進めたときの値を計算するのは、収束計算を用いない比較的簡単な演算であるため、1つの時間ステップの演算負荷は低いが、 Δt を大きく取りすぎないように、非常に多くの時間ステップが必要である。しかし、最近のコンピュータ技術の発展により、高速に計算可能である。ボロノイ分割法では、解析領域内に結晶粒密度に応じた数の母点をランダムに配置し、それぞれの母点間を結んだ直線の垂直二等分線を描き、これを結晶粒界とした。次に、粒界散乱波の発生原因を結晶粒間の異方性主軸方向の違いによる音響インピーダンスの差のみに限定し、結晶粒ごとに異なる異方性主軸方向を与えることで粒界散乱波を表現したり、作成した解析モデルを Fig.3 に示すが、実際のフェライト系ステンレス鋼片断面のマクロ観察写真 Fig.3(a) と類似した解析モデルが得られた。

数値解析条件は、探傷周波数 1.0 ~ 3.0 MHz、周波数帯域は広帯域と狭帯域、超音波振動子径は 20 mm と 30 mm、人工欠陥（横穴）の深さをパラメータとして、Table 1 の条件で解析した。

Table 1. Condition of numerical analysis.

Condition	Value
Frequency	1.0 / 1.5 / 3.0 MHz
Frequency bandwidth	Broadband / Narrowband
Transducer shape	Flat-faced / Focused
Transducer diameter	20 mm / 30 mm
Defect diameter	1 mm (SDH)
Defect depth	35 mm

3.2 数値解析による最適探傷条件

数値解析例を Fig.4, Fig.5 に示す。これらの波形は、人工欠陥を深さ 35 mm、直径 1 mm の横穴とし、横軸を伝播時間、縦軸をエコー強度として、Fig.4 が広帯域（波数 1.5 波）の場合、Fig.5 が狭帯域（波数 4 波）の場合である。人工欠陥のエコーは、伝播時間 10 ~ 15 μs の位置に現われ、底面 150 mm に相当するエコーは 50 μs 付近に現われている。

また、Fig.4 に示す広帯域超音波を用いた解析例では、周波数 1.0 MHz の場合が、最も欠陥からの信号が大きく、高周波になるにつれ、その信号強度が小さくなっている。

Fig.3. A section photograph of a billet and a model for the numerical analysis.

Fig.4. Results of numerical analysis with broadband ultrasound.

Fig.5. Frequency dependence of S/N ratio with broadband ultrasound.

特に、3.0 MHz では、欠陥エコーが見られない。周波数帯域が広帯域の場合の探傷周波数と S/N 比の関係を Fig.5 に示す。Fig.5 より、周波数 1.0 MHz の S/N 比が最良であった。また、周波数帯域を広帯域から狭帯域にすると、

Fig.6. Results of numerical analysis with narrowband ultrasound frequency 1.0 MHz.

Fig.6 に示すように欠陥エコーは識別できるものの、エコーの波数が多いため、欠陥エコーの識別性が悪くなっている。これらの結果から、探傷周波数は、1.0 MHz の場合が最良であり、周波数帯域は広帯域の方が S/N 比が良好であった。

次に、先の解析結果で良好であった周波数 1.0 MHz、広帯域（波数 1.5 波）において、超音波の集束効果と振動子径について解析した。数値解析例を Fig.7 に示す。

Fig.7. Results of numerical analysis with variation in transducer diameter and focal types.

なお、Fig.7では欠陥エコー高さに着目するため、全波整流波形となっている。同じ振動子径で、超音波集束無し (Fig.7 (a)) と集束あり (Fig.7(b)) の場合では、後者の方が、欠陥エコーが大きくなっている。また、同じ超音波集束ありの場合で、振動子径を大きくする (Fig.7(c)) と、さらに欠陥エコーが大きくなる。これらの結果より、高減衰鋼片の超音波探傷において、超音波の集束と振動子の大径化が有効であると判断した。

以上の数値解析より、高減衰鋼片の超音波探傷において、低周波数 (1.0 MHz) で広帯域の超音波を用い、振動子径を大きく、かつ、集束させることが必要であるとの結果が得られた。

4. 各探触子の開発

従来法 (平面探触子による手探傷) を比較対象として、数値解析に基づくフォーカス法 (点集束探触子) の適用を検討した。

4. 1 点集束探触子の開発

数値解析の最適条件に従い、Table 2 に示す点集束探触子を開発した。

探触子の性能調査には、Fig.8 に示すような深さの異なる直径 1 mm の横穴を加工した鋼片を用いた。また、性能比較のために、周波数 1 MHz、振動子径 20 mm の平面振動子の従来探触子でも調査した。

Fig.9 に今回、開発した点集束探触子を、Fig.10 に従来探触子を用いた場合の深さの異なる横穴からの反射波形

を示す。探傷感度は、それぞれノイズエコーが同程度になるように調整した。これらの波形を見ると、欠陥深さ 45 mm では、それぞれ同程度のエコー強度であるが、欠陥深さ 80 mm 以上では、点集束探触子のエコー強度が、従来探触子を上回っているのがわかる。

次に、先の探傷波形より、欠陥エコー強度をシグナル (S) とし、送信エコーと欠陥エコーと底面エコーを除外した波形のピークをノイズ (N) として S/N 比を求め、グラフにまとめたものを Fig.11 に示す。横軸が欠陥深さ、縦軸が S/N 比である。Fig.11 より、従来探触子では、欠陥深さに反比例して S/N 比が悪くなるのに対し、点集束探触子は浅いところで従来を下回るものの、深いところでは従来を上回る良好な S/N 比になった。

以上の結果から、今回開発した点集束探触子は、深さ 50 mm 以上の鋼片内部の探傷性能は従来を上回ることで、表層部 20 mm 以内では感度が低下することがわかった。

4. 2 分割型探触子の開発

前述の点集束探触子の課題である表層部を探傷するために、送信エコーによる表層不感帯の影響を受けない二探触子法 (分割型探触子) の適用を検討した。二探触子法は、二つの超音波振動子を用いて、超音波の送信と受信を別々に行うものである。

開発した分割型探触子の仕様を Table 3 に示す。周波数は、表層部の結晶粒径が内質部に比べ細かいため、高周波数 (2 MHz) を選定した。また、送受信ビームの交軸範囲を表層直下から 30 mm 程度になるように振動子傾斜

Table 2. Specification of spherical focus transducer.

Condition	Value
Frequency	1.0 MHz
Frequency bandwidth	Broadband
Transducer shape	Spherical surface
Transducer diameter	40 mm
Focal types	Point focus
Focal depth	80 mm

Table 3. Specification of dual element transducer.

Condition	Value
Frequency	2.0 MHz
Transducer shape	Concave radius
Transducer type	Dual element transducers
Element size	10 × 15 mm
Roof angle	7.2 deg.

Fig.8. Defect layout of the steel billet sample.

Fig.9. Results of ultrasonic testing with the spherical focus transducer.

Fig.10. Results of ultrasonic testing with a conventional transducer.

Fig.11. Comparison of S/N ratio between spherical focus transducer and conventional transducer.

角を設け、振動子を曲面状とし、交軸点でビームの集束性を高めた。

分割型探触子の性能調査には、Fig.12に示すようなアルミ試験片を用いた。調査結果をFig.13に示すが、欠陥深さ2 mm以上では、きずからのエコーの立上りが明瞭であるが、欠陥深さ1 mmでは、健全部と波形形状に若干の差異がわかるだけである。次に、これらの探傷波形からS/N比を求め、グラフにまとめたものをFig.14に示す。Fig.14より、欠陥深さ1 mmでは、S/N比が2未満で

Fig.12. Defect layout of the aluminum billet sample.

欠陥判別は難しいが、欠陥深さ2 mm以上ではS/N比が8以上であり、欠陥判別は可能である。

以上の結果から、分割型探触子は、表層直下2 mm以上の欠陥が検出可能である。

5. 結 論

分塊圧延された鋼片には、結晶粒が粗大で、超音波探傷が困難な高減衰鋼片がある。今回、この高減衰鋼片の超音波探傷条件を、数値解析を用いて検討し、探触子を開発した結果、以下の結論が得られた。

(1) 粗大結晶粒を持つ高減衰鋼片の超音波減衰は、構造用鋼に比べ著しく大きく、0.20 dB/mmであった。

Fig.13. Results of ultrasonic testing with the dual element transducer.

Fig.14. Depth dependence of S/N ratio of the dual element transducer.

(2) 結晶粒界散乱を考慮した数値解析より、高減衰鋼片の超音波探傷には、低周波数 (1.0 MHz) で広帯域の超音波を用い、振動子径の大きい点集束探触子が最適である。

(3) 開発した点集束探触子において、深さ 50 mm 以上で従来探触子に比べ S/N 比が 2 ～ 3 向上することができた。

(4) 表層部用に開発した分割型探触子において、深さ 2 ～ 10 mm において、S/N 比 8 以上が得られた。

なお、開発した探触子は、改良を加え、製品検査に適用中である。また、さらに、高減衰鋼片の全長、全断面探傷の自動化に、アレイ超音波探傷法の適用を検討中である。

最後に、本技術開発を遂行するに当たり、多大な協力をしていただきました名古屋工業大学 伊藤智啓准教授に謝意を表します。

(文 献)

- 1) 中村正也，伊藤智啓：第 12 回超音波による非破壊シンポジウム，2005，15.