

(19) 超音波CT法を用いる角鋼片の内部欠陥検査における欠陥径の関係性

角間 孝一¹・水谷 孝一²・若槻 尚斗³

¹学生会員 筑波大学 大学院システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail:kakuma@aclab.esys.tsukuba.ac.jp

²正会員 筑波大学教授 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail:mizutani@iit.esys.tsukuba.ac.jp

³非会員 筑波大学准教授 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail:wakatsuki@iit.tsukuba.ac.jp

超音波CT法を用いる角鋼片の内部欠陥の検査において、実際の欠陥径と可視化像における欠陥像の直径が異なるために、可視化像から実際の欠陥径を判定できていなかった。ここで検査に用いる探査信号は、得られる可視化像の欠陥像に影響を与えることが分かっていた。そこで、探査信号の周波数と実際の欠陥径と欠陥像の直径の関係性を調べるため、数値計算シミュレーションを行い結果を比較した。その結果、中心周波数の増加に対して、欠陥像の直径が反比例のように縮小すること、実際の欠陥径の増加に対して、欠陥像の直径がわずかに拡大することが分かった。

Key Words : defect detection, wave propagation, computerized tomography, FDTD, steel billet

1. 序 論

現代において、ビルや橋などの建築物に対しては、安全性を確保するために様々な段階で検査が行われる。中でも材料を作り始める初期の段階における検査は、その後の工程を大きく左右することから重要である。建築物に必要な不可欠な鉄材に焦点を当てると、初期の段階で製造されるのは角鋼片と呼ばれる鉄の塊である。角鋼片は内部に介在物等の欠陥を含むことがあり、鉄材の安全性の確保、再生産の防止という点から、角鋼片に対して非破壊による検査が行われている¹⁾。

角鋼片に対して現在用いられているのは、超音波パルスエコー法と呼ばれる検査手法であるが、微小な欠陥の検出を苦手とすることから、別の新たな検査手法が研究されている。その1つに、超音波の縦波伝搬時間 (TOF : Time of Flight) と計算機トモグラフィ (CT : Computerized Tomography) を用いた検査手法²⁻⁴⁾があり、数値計算によるシミュレーションや試験片による実験等によって評価・改善が行われている。以降、この検査手法をTOFを用いる超音波CT法と呼ぶ。

図-1 に、TOFを用いる超音波CT法による検査の概要図を示す。本論文で対象としているのは、鉄からなる断

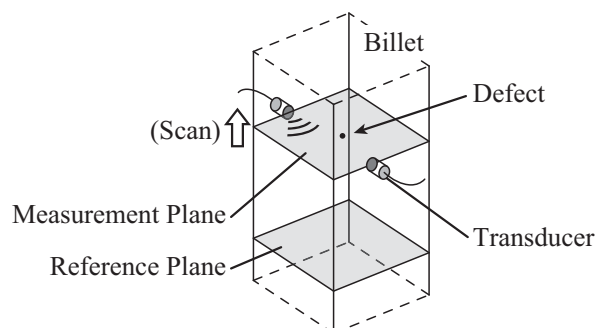


図-1 TOFを用いる超音波CT法における検査の概要図

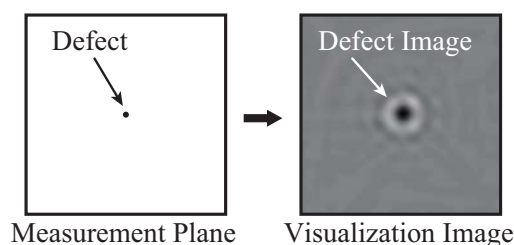


図-2 検査手法により得られる可視化像の一例

面 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ の角鋼片である。図-1 のように、角鋼片の断面の周囲にトランスデューサを配置、超音波を送受信することで内部情報を取得、この情報を元に角鋼片

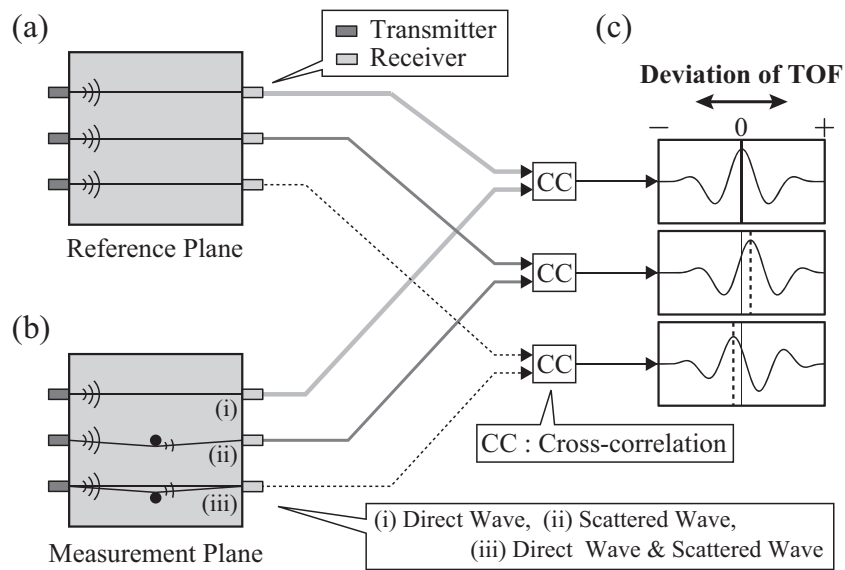


図-3 TOFの差分の計測方法 (a):参照面, (b):計測面, (c):相互相関波形

を検査する。究極的には、欠陥の位置、形状、大きさを欠陥数に依らず高い解像度で検査できることが望ましい。図-2 に、TOFを用いる超音波CT法を用いて得られた可視化像の一例を示す。図-2 のように、可視化像における欠陥（欠陥像）は実際の欠陥に比べ大きく写ってしまう。このように欠陥像が写るのは、後に示す原理上、仕方のないことではあるが、これでは実際の欠陥の大きさを正確に判定することができない。よって、実際の欠陥の大きさと欠陥像の大きさの関係性を明らかにしておく必要がある。

本論文では、欠陥像に影響を与えることが分かっている送信信号⁹⁾の中心周波数を変えることで、実際の欠陥径と可視化像の欠陥径の関係性を明らかにすることを目的とする。具体的には、角鋼片の計測面内に円形欠陥を想定し、数値計算により超音波の波動伝搬をシミュレーションする。その後TOFを用いる超音波CT法を行い、得られる可視化結果を比較する。

2. 検査手法の原理

本章では、TOFを用いる超音波CT法の検査原理を示す。まず、図-3 にTOFの差分の計測法を示す。図-3(a) は参照面、図-3(b) は計測面、図-3(c) は参照面と計測面で得られた受信波形の相互相関波形である。計測面とは検査を行う断面、参照面とは欠陥が含まれない基準となる断面のことである。

ここで、角鋼片表面に設置された2つのトランスデューサ間で超音波を透過させることを考える。トランスデューサを結ぶ経路上に欠陥がない場合、参照面と計測面

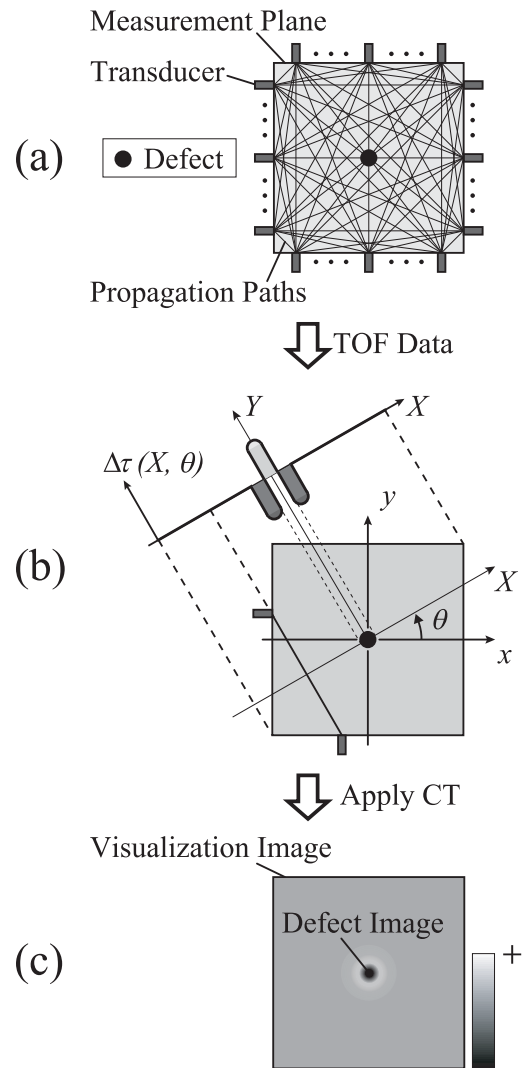


図4 全体的な検査の流れ(a):TOFの差分の計測, (b):CT法の適用, (c):疑似音速分布

では原理上同一の受信波形が得られ、相互相関波形のピークは0の位置に立つ。すなわち、TOFの差分はなしとなる。トランスデューサを結ぶ経路上に欠陥がある場合は、超音波の回折により伝搬距離が延びるため、計測面の受信信号は参照面の受信信号に比べ遅れて到達する。よって相互相関ピークは+側に立ち、TOFの差分は+となる。トランスデューサを結ぶ経路近傍に欠陥がある場合、計測面では超音波の直達波と欠陥での散乱波が干渉した受信信号が計測される。参照面の直達波と相互相関を取ると、見かけ上ピークが一側に立つため、この場合はTOFの差分を-とする。

図4に全体的な検査の流れを示す。図4(a)はTOFの差分の計測、図4(b)はCT法、図4(c)は疑似音速分布（可視化像）を示した図である。図3のように得られたTOFの差分に対してCT法を適用すると、図4(c)のように疑似的な音速分布として可視化像が得られる。欠陥部分では音速低下、欠陥周囲では見かけ上の音速上昇が見られる。この可視化像を評価することで、角鋼片内部の欠陥を検査することが可能となる。

3. 数値計算シミュレーション

(1) シミュレーション条件

図5にシミュレーションの概要図を示す。角鋼片の材質は鉄（音速：5,950 m/s）とする。内部に直径 d mm の円形欠陥を含む2次元の計測面を想定し、計測面周囲に1辺あたり50個（スキャンピッチ：2 mm）のトランスデューサを配置する。探査信号には、信号長5 μ s でハニング窓を適用したアップチャープ信号を用いる。探査信号の中心周波数は f_c MHz、周波数掃引幅は1 MHz とする。

シミュレーションには時間領域有限差分（FDTD：Finite Difference Time Domain）法を用いる。FDTD法により、角鋼片断面内における超音波伝搬を計算し、境界部分における音圧の時間波形を取得する。このシミュレーションにおいて、トランスデューサは点音源とする。欠陥位置を計測面の中心(0,0)に固定し、欠陥の直径を1, 2, 3, 4, 5 mm、中心周波数を1, 2, 3, 4, 5 MHz と変化させる。得られる可視化像より欠陥像の直径を求め、これらパラメータの関係性を調べる。

ここで、欠陥像の直径を D mm とする。図6に欠陥像の直径の算出方法を示す。5,940 m/s を閾値として可視化像を2値化し、2値化像における欠陥部分の面積を s mm² とすれば、欠陥像の直径は以下の式(1)で求められる。

$$D = \sqrt{\frac{4s}{\pi}} \quad (1)$$

上式は、円の面積の公式において直径を解いたものであ

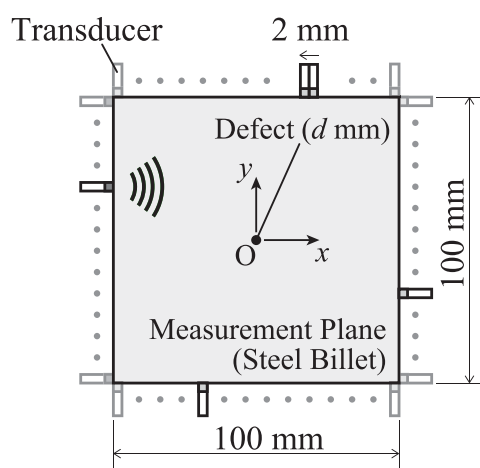
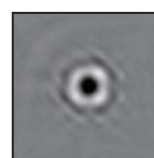


図5 シミュレーションの概要図



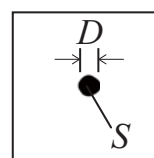
Visualization Image

↓ (Binarize by 5,940 m/s)



Binarization Image

↓ (Focus on Defect Place)



Calculation of D

図6 欠陥像の直径の算出方法

る。可視化像は再構成画像であるため、欠陥像は真円とならず僅かにひずんでしまう。よって、式(1)の方法で欠陥径を算出する。

(2) シミュレーションの結果と考察

シミュレーションの結果を図7と図8に示す。図7は各条件で得られた疑似音速分布、図8は欠陥径と中心周波数の変化に対する欠陥像の直径のグラフである。図7に着目すると、中心周波数が高くなるにつれて、欠陥像が小さくなる様子が伺える。一方、実際の欠陥径が小さくなると、音速変化の度合いが小さくなるが、欠陥像の大きさ自体は大きく変化していないことが分かる。

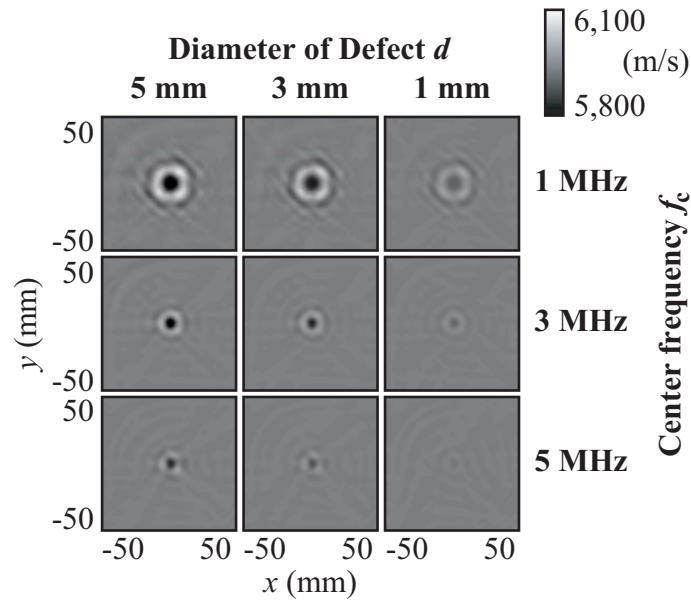


図-7 欠陥径と中心周波数による疑似音速分布の変化

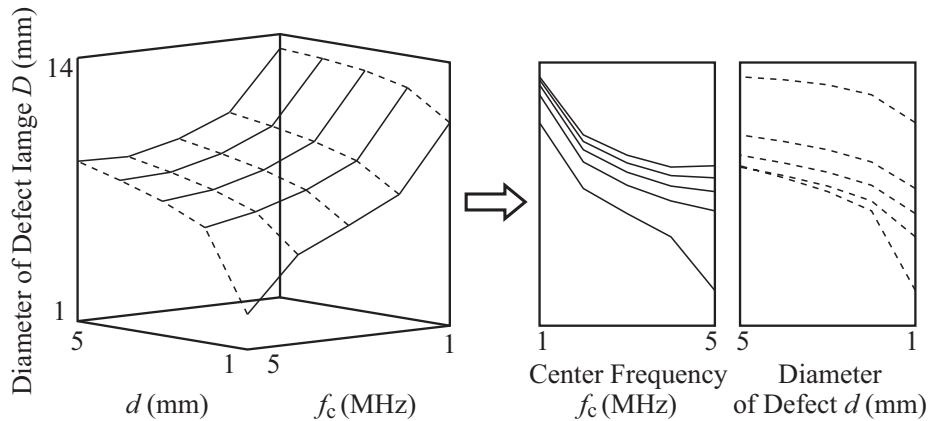


図-8 欠陥径と中心周波数による欠陥像の直径の変化

図-8のグラフに着目すると、中心周波数の増加に対して、欠陥像の直径が反比例のように縮小すること分かる。また、実際の欠陥径の増加に対して、欠陥像の直径がわずかに拡大することが分かる。よって、これらの関係性を踏まえれば、実際の欠陥径を逆推定できる可能性があると言える。

4. 結 論

本論文では、実際の欠陥の直径と、可視化像における欠陥像の直径の関係性を明らかにするため、探査信号の中心周波数を変化させて数値計算シミュレーションを行った。その結果、中心周波数の増加に対して、欠陥像の直径が反比例のように縮小すること、実際の欠陥径の増加に対して、欠陥像の直径がわずかに拡大することが分かった。

参考文献

- 1) M. B. Karamis and F. Nair, Effects of Reinforcement Particle Size in MMCs on Extrusion Die Wear, *Wear*, Vol. 265, pp. 1741–1750, 2008.
- 2) H. Mitsui *et al.*, Detection of internal cracks in square billets using time of flight of longitudinal waves, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 48, No. 7, pp. 07GD05_1-5, 2009.
- 3) Y. Norose, K. Mizutani, and N. Wakatsuki: *Jpn. J. Appl. Phys.* 51, 07GB17_1-6, 2012.
- 4) K. Kakuma, Y. Norose, K. Mizutani, and N. Wakatsuki: *Jpn. J. Appl. Phys.* 52, 07HC10, 2013.
- 5) 野呂瀬葉子他, 縦波伝搬時間を用いる超音波 CT 法による角鋼片内部の欠陥検出能力, *土木学会論文集 A2*, Vol. 68, No. 2, pp. 1_81-1_88, 2012.