

## 813 超音波後方散乱波のウェーブレット解析によるクリープキャビティ評価

Void Evaluation by Wavelet Analysis of Scattering Ultrasonic Wave Using Transducer of 50MHz

○正 西野 精一(富山大) 正 塩澤 和章(富山大) 永井 悠介(富山大院)  
新甚 博之(北陸電力) 正 林 義忠(北陸電力)

Seiichi NISHINO, Kazuaki SHIOZAWA, Yusuke NAGAI, Toyama University, 3190 Gofuku, Toyama 930-8555  
Hiroyuki SHINJIN, Yoshitada HAYASHI, Hokuriku Electric Power Company, Hisakata-machi, Toyama 930-8686

**Key Words:** Non-destructive Evaluation, Ultrasonic, Wavelet, Creep, Cavity, SUS304, 2.25Cr-1Mo

## 1. 緒言

高温クリープ条件下で長期間使用される耐熱鋼にはクリープ損傷により材料内部にキャビティが発生・成長し破壊に至ることが知られている。これら材料内部の欠陥や損傷を短時間で簡便に評価できる非破壊的方法是機械・構造物の安全性評価のために重要な技術でありその開発が望まれている。超音波を利用した材料内部欠陥評価法はこれまで、材料底面からの反射波から得られる音速や減衰率を利用する方法が中心であった。これらの方法は超音波が通過した領域に存在する欠陥密度等の平均的な情報を評価するものである。しかし、実際の機械・構造物では溶接部や応力集中部等の局所的な部分にクリープキャビティ等の欠陥が発生するため、欠陥密度の分布に関する情報も含んだ欠陥評価法の検討が必要であると考えられる。著者らはこれまで直径数 $\mu\text{m}$ の欠陥を有する Al-Si 粉末焼結材の欠陥密度や分布が超音波後方散乱波をウェーブレット解析(時間一周波数解析)することにより評価できることを報告した<sup>1)</sup>。

本研究では、SUS304 鋼および 2.25Cr-1Mo 鋼のクリープ又はクリープ・疲労試験片内部に発生したクリープキャビティの後方散乱波による評価法の開発と同評価法を溶接熱影響部への適用について検討した。

## 2. 供試材および実験方法

2.1 供試材 本研究には次の三種類の供試材を用いた。

(1) オーステナイト系 SUS304 ステンレス鋼クリープ・疲労試験片: 温度 1073K, 全ひずみ範囲  $\Delta\epsilon_f=0.7\%$  で引張り側  $10^{-4}/\text{s}$ , 圧縮側  $10^{-2}/\text{s}$  の CP 波形の疲労試験を寿命の 40%, 80%, 100% まで行った材料。

(2) 2.25Cr-1Mo 鋼クリープ試験片: 温度 923K, 応力 110MPa でクリープ試験を寿命の 40%, 80%, 100% まで行った材料。

(3) 2.25Cr-1Mo 鋼内圧クリープ試験片: 外径 50mm, 肉厚 11.5mm で、長手方向に溶接した大径管に温度 923K, 内圧 29.3MPa の内圧クリープ試験を寿命の 60%, 80%, 100% まで行った材料。

後方散乱波の測定は(1),(2)の試験片に対しては標点部を切り出した材料に対して行い, (3)の内圧クリープ試験片に対しては図1に示すように溶接部近傍を平坦に加工後溶接熱影響部に対して行った。なお、いずれの試験片においても表面から深さ方向を  $x$  とした。

2.2 後方散乱波測定方法 散乱波の計測には 50MHz の

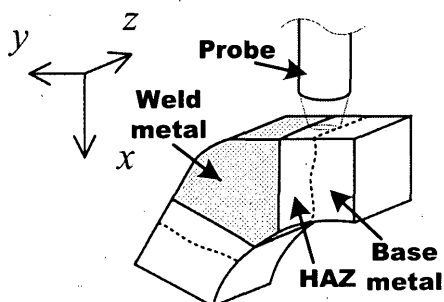


Fig.1 Schematic view of the measuring method of scattering ultrasonic for internal pressure creep specimen.

焦点付縦波用探触子を用い、水浸法で行った。試験片から探触子までの距離は 6.3mm とした。超音波波形の計測はデジタルオシロスコープによりサンプリング間隔 1ns で行った。後方散乱波解析は、表面波および底面波の影響を避けるため、表面波計測時から 200ns 後から底面波計測時の 100ns 前までの範囲で行った。また、ウェーブレット解析には時間一周波数解析に適している点から Gabor 関数を用いた。なお、焦点付探触子を用いた場合、超音波の強度は、材料表面からの距離  $x$  と、材料中の焦点距離  $MP$  との関係により変化する。本研究では別に行った実験から材料中の超音波強度を次式から求めた。

$$P/P_0 = 0.7027 \{MP/(MP-x)\}^{0.1369} \quad \dots(1)$$

ここで  $P$  は表面から  $x$  の距離における超音波強度であり、 $P_0$  は入射波の強度である。

## 3. 数値解析結果

向井らは試験片表面から  $x$  の距離に存在する散乱体からの後方散乱波の角周波数  $\omega$  の成分  $P(x, \omega)$  は次式で与えられることを報告している<sup>2)</sup>。

$$P(x, \omega) = D \cdot N \cdot P_0(\omega) \sqrt{\left(\frac{d\gamma}{d\Omega}\right)_{L\pi}} \cdot \exp(-2\alpha x) \quad \dots(2)$$

ここで、 $P_0(\omega)$  は入射波の角周波数  $\omega$  の成分、 $d\gamma/d\Omega$  は欠陥の微分散乱断面、 $\alpha$  は減衰率、 $N$  は欠陥の体積密度、 $D$  は定数である。式(2)に基づき種々の欠陥径  $d$  と密度  $N$  に対する後方散乱波の数値計算を行った例を図2に示す。図より欠陥径及び密度の変化に対応して後方散乱波の強度及び周波数特性が変化することがわかる。著者らは図2に示す各プロファイルの面積として定義したノイズエネルギーと重心周波数が欠陥径及び密度と相関関係があることを報告している<sup>1)</sup>。本研究でも同様の手法で欠陥径  $d$  と欠陥密度  $N$ , 距離  $x$  とノイズエネルギー  $E$  及び重心周波数  $G$  との関係を得た。SUS304 鋼に対して得られた関係式を次式に示す。

$$E = D \cdot N^{-0.2272x+0.5108} \exp\left\{\frac{-(d-1.127 \times 10^{-3} N^{-0.1719})^2}{3.662 \times 10^{-7} N^{-0.3515}} - 24.01x + 5.034\right\} \quad \dots(3)$$

$$\Delta G = 2.088 \times 10^{12} N^{0.6425} d^4 \quad \dots(4)$$

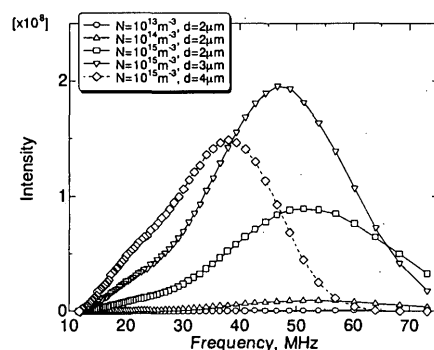


Fig.2 Numerical solution of scattering spectrum for various density and diameter of void of SUS304.

#### 4. 実験結果および考察

**4.1 後方散乱波ウェーブレット解析結果** 図3に SUS304 鋼クリープ疲労試験終了後の試験片から得られた後方散乱波とウェーブレット解析により得られた各時間における Scale とウェーブレット係数との関係を示す。図より、Scale とウェーブレット係数との関係は試験片深さ方向に対応する時間によって変化していることがわかる。これらウェーブレット変換結果から式(3),(4)を用いて内部欠陥の平均径、密度及び相対密度を推定した結果を図4に示す。図中に示した実線はそれぞれ試験片断面の SEM 観察で求めたキャビティの平均径と密度並びにアルキメデス法で求めた相対密度である。図より、後方散乱波から推定した各値は深さ  $x$  に依存して変動しているが、破線で示した平均値は実測値とほぼ同程度であることがわかる。

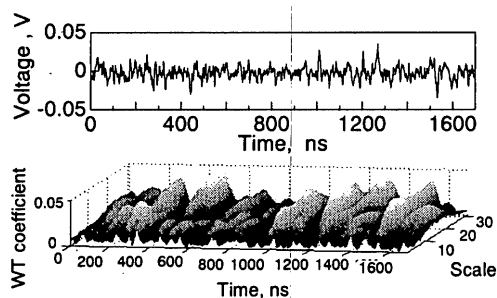


Fig.3 Scattering ultrasonic and the result of wavelet transformation of SUS304 creep ruptured specimen.

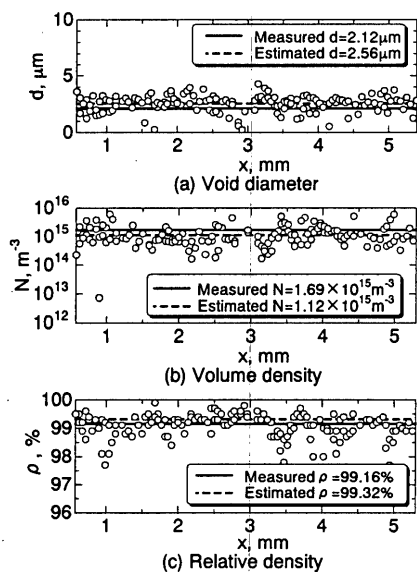


Fig.4 Estimated void diameter, volume density and relative density from wavelet analysis of scattering ultrasonic.

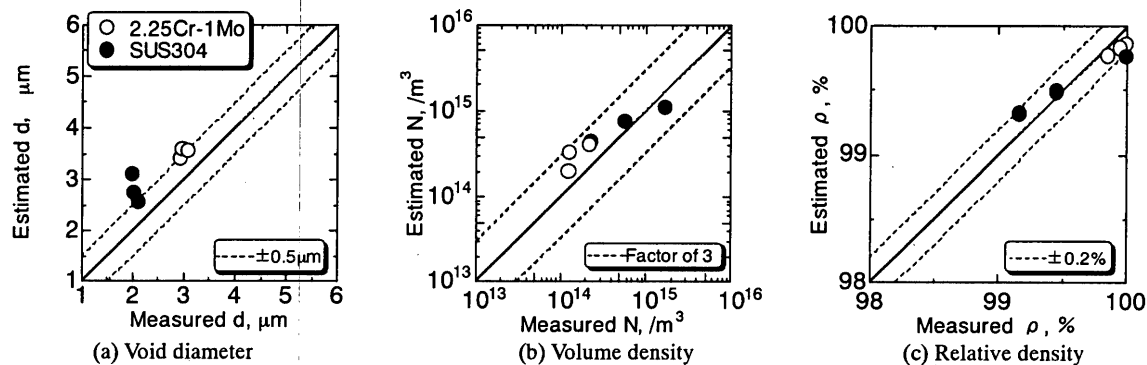


Fig.5 Comparison between estimated and measured value of  $d$ ,  $N$ , and  $\rho$

図5に SUS304 鋼クリープ・疲労試験片と 2.25Cr-1Mo 鋼クリープ試験片で測定した後方散乱波から求めた欠陥の平均直径  $d$ 、密度  $N$  及び相対密度  $\rho$  の実測値との比較を示す。図より、 $d$  の推定値は実測値よりも  $0.5\mu\text{m}$  程度大きい、 $N$  及び  $\rho$  の値は実測値とほぼ対応していることがわかる。推定した  $d$  の値が実測値よりも大きい理由は超音波の反射に対して大きな欠陥の寄与が大きいためと考えられる。従って、後方散乱波をウェーブレット解析することにより  $2\sim 3\mu\text{m}$  程度のキャビティの評価が可能と判断される。

**4.2 溶接熱影響部への適用** 実機でのクリープキャビティの発生は溶接熱影響部等の局所的な箇所である。ここでは 2.25Cr-1Mo 鋼内圧クリープ試験片の熱影響部の  $2\times 2\text{mm}$  の範囲に  $0.2\text{mm}$  間隔で超音波を入射し、得られた後方散乱波から相対密度の三次元投影図を作成した。得られた結果を図6に示す。図中の黒い部分が相対密度の低い箇所、すなわちクリープキャビティの発生していると評価された箇所を示す。図より、表面から約  $10\text{mm}$  程度内部で密度の低い箇所が局所的に存在することがわかる。また、この密度の低い箇所は内圧クリープ寿命に対する損傷率(寿命比)の増加に対応して増加する傾向が認められた。従って、本方法により局所的に発生するクリープキャビティの検出も可能と考えられる。

#### 5. 結 言

クリープ又はクリープ・疲労試験により試験片内部にキャビティを有する SUS304 鋼および 2.25Cr-1Mo 鋼を用いて後方散乱波ウェーブレット解析を行い、欠陥直径や密度を推定した結果、推定値は実測値とほぼ対応することが明らかとなった。また、内圧クリープを受けた溶接熱影響部に本方法を適用した結果、局所的に発生するキャビティの評価が可能と判断された。

#### 参考文献

- (1) 西野, ほか 5 名, 2000 年度年次大会講演論文集 Vol.Ⅲ, (2000), 309-310
- (2) 向井, ほか 4 名, 日本非破壊検査協会 平成 7 年度秋季大会講演概要集, (1995), 129-134

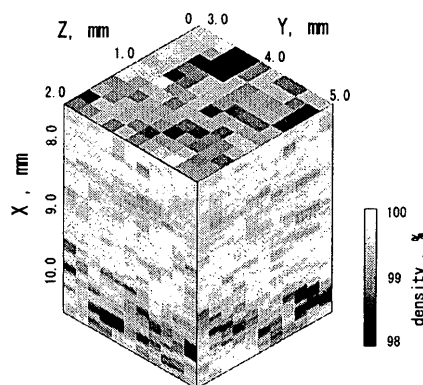


Fig.6 Distribution map of relative density.