

マイクロ波による水中におけるき裂の定量評価

Nondestructive Evaluation of Cracks under Water by Microwaves

東北大学大学院工学研究科	巨 陽	Yang JU
関西電力(株)	宮津 亨	Toru MIYADU
東北大学大学院工学研究科	祖山 均	Hitoshi SOYAMA
東北大学大学院工学研究科	坂 真澄	Masumi SAKA

Quantitative evaluation of small cracks in stainless steel under water which was used to simulate the environment of unclear reactor was demonstrated. The crack depth was evaluated by the means of the microwave dual frequency technique, and the crack closure stress was estimated based on the compliance technique. The cracks were detected significantly with larger closure stress and the effect of the closure stress to the evaluation of crack depth was investigated.

Keywords: Crack Depth, Crack Closure Stress, Water Environment, Microwave

1. 緒言

き裂は航空機の胴体、化学プラントや発電所の圧力容器、配管等で発生し、機械や構造物において最も危険な欠陥である。それゆえ小さなき裂の非破壊評価は経年構造物の寿命評価や部品の品質保証等につながり、設備や機械等を安全に使用するために重要な課題である。

き裂の非破壊評価において、欠陥を含む材料内部特性を定量的に評価できる超音波法が広く用いられている[1][2]。しかしながら、検査対象のき裂が閉じている場合、き裂面の突起同士が部分接触を起こし、その部分的な接触面を介して超音波がき裂面を透過してしまう問題がある。そのため超音波探傷を行う時のき裂に対する検出感度が低下し、き裂寸法の過小評価等の原因となり、早急に解決しなければならない一つの課題として残されている。

一方、近年、マイクロ波を利用したき裂の非破壊評価が注目されている。マイクロ波は金属に照射するとほとんど反射するが、金属表面上にき裂がある場合、マイクロ波はき裂面内部に電流を誘起し、誘起された電流によりエネルギーを失い、反射波を減衰する。これらの特性によりマイクロ波を用いて金属表面上のき裂を検出することができる[3]。一方、き裂検出に得られ

るマイクロ波の振幅比の変化は、き裂の閉じ具合とき裂深さの二つの影響を受ける。そのため、マイクロ波によるき裂の寸法の定量評価は困難であった。最近、き裂寸法の定量評価手法としてマイクロ波二周波数法が開発され、き裂の閉じ具合の影響を取り除いてき裂の深さの非破壊評価が可能になった[4]。さらに、き裂の閉口圧を定量評価する手法も開発された[5]。

本報では、これらの手法を用いて、原子力発電所の圧力容器と同様の環境中である水中におけるステンレス鋼表面上のき裂の定量評価について報告する。

2. マイクロ波二周波数法

前述のように、き裂を有する金属表面上にマイクロ波を照射すると、マイクロ波の反射波は導体損失により減衰する。き裂によるマイクロ波の振幅比の変化からき裂の深さを求める手法として、二周波数法が提案された[4]。

二周波数法においてマイクロ波の応答の減少量は、振幅比の減少量 ΔA として次式で示される。

$$\Delta A = S(f)d + G(f)\Phi(w, \sigma)d \quad (1)$$

$$\Phi = \begin{cases} \xi(w) & \text{if } \sigma = 0 \text{ (open crack)} \\ \eta(\sigma) & \text{if } w = 0 \text{ (closed crack)} \\ 0 & \text{if } w = 0 \text{ and } \sigma = 0 \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 d はき裂深さ、 $S(f)$ 、 $G(f)$ は周波数 f によって

連絡先: 巨 陽、〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青6-6-01、東北大学大学院工学研究科、電話: 022-273-2129、e-mail:ju@mm.mech.tohoku.ac.jp

決まる定数、 w はき裂幅、 σ はき裂閉口圧である。式(1)の右辺第一項はき裂面上での導体損失、第二項は開いたき裂の場合は空気中でのマイクロ波の減衰、閉じたき裂の場合は導体損失の減少を表す。またき裂評価式は上式と二種類の周波数 f_1 、 f_2 および既知なる深さ d_a 、 d_b を有する二つのき裂を用いて求めることができる。ここに深さ d_a を有するき裂はき裂幅及びき裂閉口圧が零であるものとし、すなわち式(2)の三段目の条件を満たしているものとする。これらの条件からき裂深さの評価式は

$$d_E = \frac{\Delta A(f_1) - \frac{G(f_1)}{G(f_2)} \Delta A(f_2)}{S(f_1) - \frac{G(f_1)}{G(f_2)} S(f_2)} \quad (3)$$

と求められている。ここに $S(f_1)$ 、 $S(f_2)$ 、 $G(f_1)/G(f_2)$ は d_a 、 d_b の深さを有するき裂の計測から求まる係数である。以上よりき裂の深さの評価が可能となる。

3. き裂閉口圧の評価

次に、ひずみゲージによるき裂閉口圧の評価方法を示す[5]。試験片表面上にあるき裂をまたいでひずみゲージを貼り、4点曲げを行うことで、き裂が閉じていることを確認することができる。荷重とひずみの関係の測定結果を Fig. 1 に示す。Fig. 1 より荷重とひずみの関係が非線形から線形に変わることがわかる。この非線形から線形へ変わる点がき裂開口の瞬間であり、このときの荷重を P_{op} とする。

き裂閉口圧 $|\sigma|$ は Fig. 2 に示すはりの曲げを考え、次式により計算できる[5]。

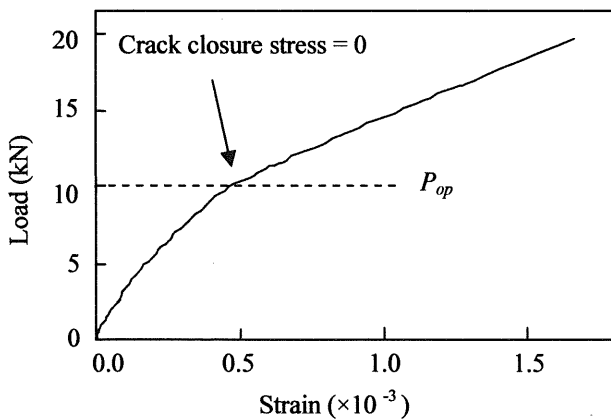


Fig. 1 An example of the relationship between strain and load measured for a closed crack

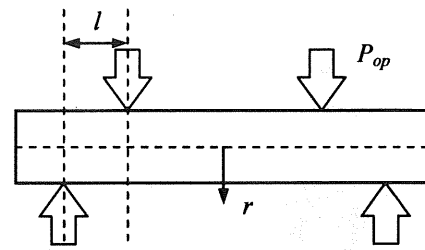


Fig. 2 Geometry of four-point bending

$$|\sigma| = \frac{P_{op} l r}{2 I} \quad (4)$$

ここで Fig. 2 に示すように l は左の治具と左の荷重位置の間隔、 I は断面 2 次モーメントである。この式はき裂開口部にあたる位置とき裂先端部にあたる位置で応力の値が異なる。このためき裂閉口圧はその分布の平均値、すなわちき裂深さの中央部分の応力とするので、 r は断面の図心からき裂深さの中央までの距離である。以上よりき裂閉口圧の評価が可能となる。

4. 実験方法

Fig. 3 に実験装置の概略を、Fig. 4 に水中におけるき裂検出の写真を示す。実験装置は x - y - z ステージ、センサ、センサ取り付け具、ネットワークアナライザ、パソコン及び試験片を水没させるための容器からなる。ネットワークアナライザはマイクロ波を発生し、入射波と反射波の振幅、位相を測定することができる。水中におけるき裂の検出は 105 GHz と 90 GHz の周波数を用いた。ネットワークアナライザによるある一点での測定値は 2000 回測定した値の平均である。試験片を走査する際の x 方向（き裂面に垂直する方向）への送

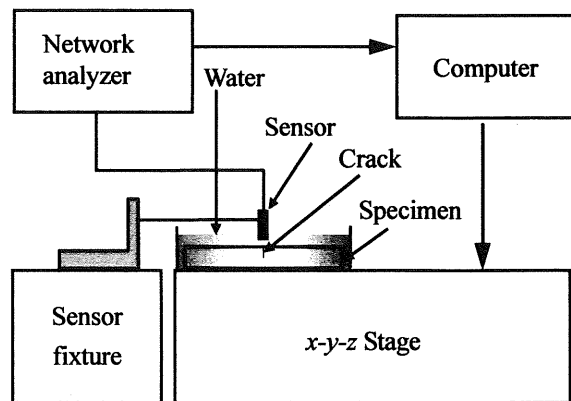


Fig. 3 Configuration of microwave inspection system

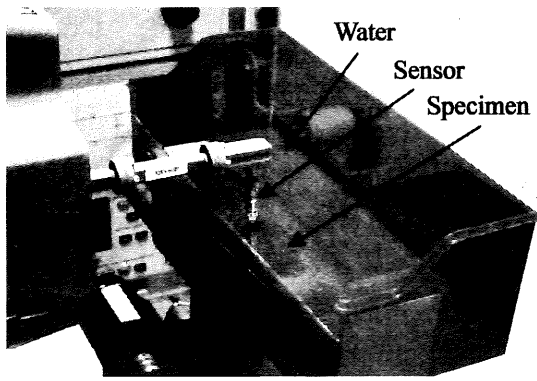


Fig. 4 Photograph of the experiment setup

Table 1 Conditions used for introducing fatigue cracks

Specimen	Maximum stress intensity factor $K_{I,max}$ (MP·am ^{1/2})	Frequency (Hz)	Stress ratio	Crack depth d (mm)
S1	24	6	0.1	1.2
S2	24	6	0.1	1.3
S3	24	6	0.1	1.7

り量は 0.04 mm、 y 方向（き裂面に平行する方向）へは 0.5 mm とし、スタンドオフ距離は 0.05 mm とした。これらはコンピュータを介して制御した。計測は固定したセンサの下を x 方向に試験片を移動させ、き裂が通り抜ける際のマイクロ波の振幅比の変化からき裂を検出した。

本研究で用いた試験片の材料はステンレス鋼 (SUS316L) である。また疲労試験機を用いて 4 点曲げより疲労き裂を導入した。試験片はステンレス鋼を S1～S3 の計 3 本を用意した。各試験片の 4 点曲げの条件及びき裂深さを Table 1 に示す。き裂導入後、初期切欠き部分を切削加工し、最終的に疲労き裂のみを計測に供した。

疲労き裂を導入した後、ひずみゲージを用いて荷重 P_{op} を測定し、式 (4) を用いてき裂閉口圧を評価した。また、試験片を疲労試験機から取り出し、無負荷状態にした後、容器に水没させ、105 GHz と 90 GHz を用いて振幅比の減少量 ΔA を測定した。その値から式(3)を用いてき裂の深さを評価した。次に、き裂に引張りの荷重を数回加え、き裂閉口圧を徐々に減少させた。そ

の手法を用いて、き裂閉口圧、き裂深さの評価を試験片の閉口圧が零になるまで繰り返した。

5. 結果と考察

Fig. 5 に水中のき裂の検出画像を示す。Fig. 5 に示したように、マイクロ波は水中におけるき裂を鮮明に検出できることがわかる。またき裂の検出は全ての試験片で導入した最大のき裂閉口圧で検出可能であり、き裂を検出した最大のき裂閉口圧は 226 MPa であった。マイクロ波二周波数法の定数を求めるために試験片 S1 の 0 MPa (d_a) と S1 の 15 MPa (d_b) を用いた。 $S(f_1)$ 、 $S(f_2)$ 、 $G(f_1)/G(f_2)$ はそれぞれ 0.0773 と 0.0679 dB/mm および 0.808 であった。Fig. 6 は試験片 S2 のき裂閉口圧に対するき裂深さの評価結果である。水中におけるき裂深さ評価は深さ 1.3 mm のき裂に対して 10 MPa 以下の閉口圧で正しく評価ができた。試験片 S3 のき裂閉口

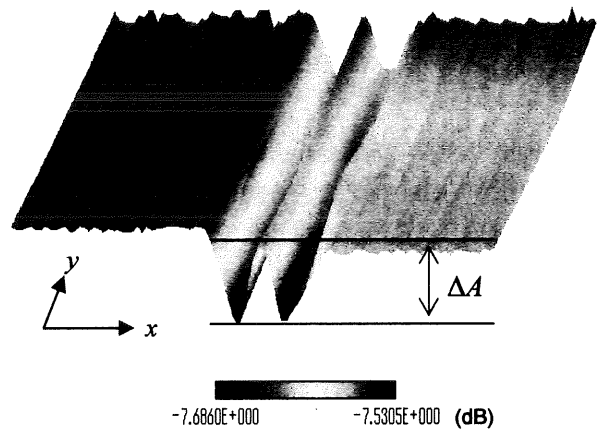


Fig. 5 Microwave image obtained by scanning the crack in water environment

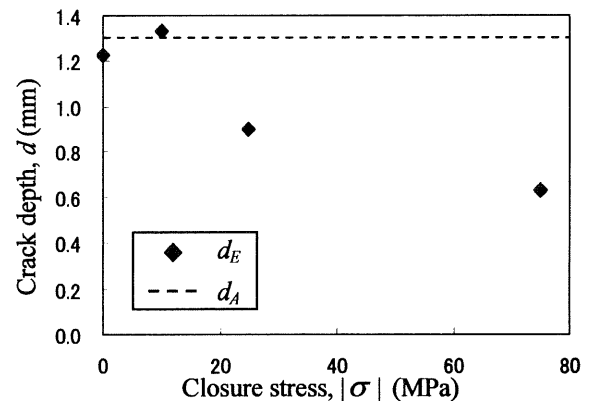


Fig. 6 Evaluated crack depth for the crack in S2 with different closure stress

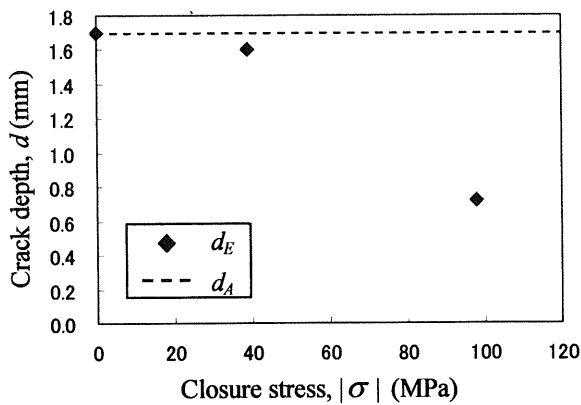


Fig. 7 Evaluated crack depth for the crack in S3 with different closure stress

圧に対するき裂深さの評価結果を Fig. 7 に示す。深さ 1.7 mm のき裂では、閉口圧 30 MPa 以下で正しく評価ができた。また、気中のステンレス鋼の評価と比べた場合、水中におけるき裂深さの評価は正しく評価できる範囲が狭い。これはマイクロ波二周波数法が水による影響を考慮していないことが原因と考えられる。このことから、水中でき裂の定量評価を広い範囲に可能

にするため、マイクロ波二周波数法の拡張が必要である。

参考文献

- [1] M.A.S. Akanda and M. Saka, Relationship Between Closure Stress of Small Fatigue Crack and Ultrasonic Response, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 23, No. 2, (2004), pp. 37-47.
- [2] M. Saka and M.A.S. Akanda, Ultrasonic Measurement of the Crack Depth and the Crack Opening Stress Intensity Factor Under a No Load Condition, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 23, No. 2, (2004), pp. 49-63.
- [3] 坂真澄, 巨陽, 羅大贏, 阿部博之, マイクロ波による金属材料表面上の閉じた疲労き裂の非破壊評価, *非破壊検査*, Vol. 50, No. 9, (2001), pp. 607-611.
- [4] M. Saka, Y. Ju, D. Luo and H. Abé, A Method for Sizing Small Fatigue Cracks in Stainless Steel Using Microwaves, *JSME International Journal A*, Vol. 45, No. 4, (2002), pp. 573-578.
- [5] M. Saka, Y. Ju, Y. Uchimura and T. Miyadu, On Microwave Dual Frequency Technique for Evaluation of Surface Cracks, *Key Engineering Materials*, Vol. 261-263, (2004), pp. 955-962.