

U字管を含む配管系におけるマイクロ波探傷法による軸方向き裂の検知

Microwave Nondestructive Detection of Longitudinal Crack in Pipe with U-bend

東北大学工学部 伊藤 悟 Satoshi ITO Member
東北大学工学部 橋爪 秀利 Hidetoshi HASHIZUME Member
東北大学工学部 アッバシ カブス Kavoo ABBASI

A circular electromagnetic TE₁₁-mode is used for detection of longitudinal crack in a stainless steel pipe. To show the capability of microwave nondestructive testing for detection of crack in large and complex piping systems such as steam generator (SG) tube, inspected pipe including U-bend are examined in this study.

Keywords: Microwave NDT, Pipe, Longitudinal Crack

1. 緒言

原子力プラントの構造の健全性の確保、稼働率の向上のためには、非破壊検査技術の高速化、高精度化が必要不可欠である。現在、非破壊検査技術として渦電流探傷法(ECT)、超音波探傷法(UT)が多く研究者によって開発されており、年々、その精度は向上している。しかしながら、大型配管にこれらの技術を適用する場合、プローブの巨大化、検査時間の増加は避けられない問題である。

ここで、非破壊検査法の1つであるマイクロ波探傷法について述べる。TEモードのマイクロ波($E_z=0, H_z \neq 0$, ただし z は配管の軸方向を表す。)を円管内に伝播させた場合、円管内面に周方向に表面電流が流れる。円管内に軸方向き裂が存在する場合、この表面電流が乱され、マイクロ波に影響を与えるため、入射波、反射波、透過波の振幅、位相より軸方向き裂の情報を得ることが可能である。またTMモードのマイクロ波($E_z \neq 0, H_z=0$)を円管内に伝播させた場合、円管内面に軸方向に表面電流が流れる。円管内に周方向き裂が存在する場合、この表面電流が乱されるため、同様にして周方向き裂の情報を得ることが可能である。マイクロ波探傷はき裂存在、き裂位置の高速検知が可能であり、マイクロ波探傷法を実用化できれば、既存の非破壊検査技術とマイクロ波探傷法を組み合わせることによって、非破壊検査に要する時間の短縮および費用の削減が可

能であると考えられる。

まず、単純な周方向き裂の探傷に対してマイクロ波探傷法が適用可能かが過去の研究[1-5]において検証された。遮断周波数以上の円形 TM₀₁モードのマイクロ波を周方向き裂のある SUS304 製のストレート管に入射した場合の反射波がき裂の情報を含んでいることが明らかにされ、さらにマイクロ波の反射振幅比の時間領域測定を行った結果、計測器で発振されたマイクロ波が被測定管のき裂で反射して計測器に戻ってくるまでの時間、すなわち TOF の計算値が、実験において反射損失大きく変動する時間とおおよそ一致することがわかった。これは周方向き裂位置がマイクロ波探傷法によって同定できることを示している。また、軸方向き裂のある SUS304 製のストレート管に遮断周波数以上の円形 TE₁₁モードを入射した結果、周方向き裂の場合と同様に TOF の計算値が、実験において反射損失大きく変動する時間とおおよそ一致することを確認した[6]。

これまでの研究では単純なストレート配管にマイクロ波探傷法を適用してきた。本研究では、マイクロ波探傷法が複雑な配管系においても適用可能であることを示すことを目的とし、TE₁₀モードのマイクロ波により U字管を含む SUS304 配管系において軸方向き裂の位置同定を試みる。

2. 実験方法

2.1 実験体系

Fig. 1~Fig. 3 に本研究で用いるマイクロ波探傷法の実験体系を示す。いずれにおいても実験体系はネットワークアナライザ、モード変換器、テーパ導波管、被

連絡先:伊藤悟、〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01-2、東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻、電話: 022-795-7906、e-mail:satoshi.ito@qse.tohoku.ac.jp

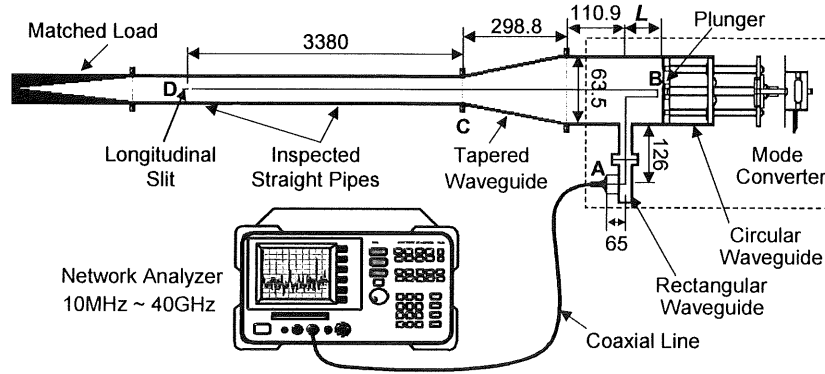


Fig. 1 Experimental Set-up (1): Longitudinal Crack at Straight Inspected Pipe

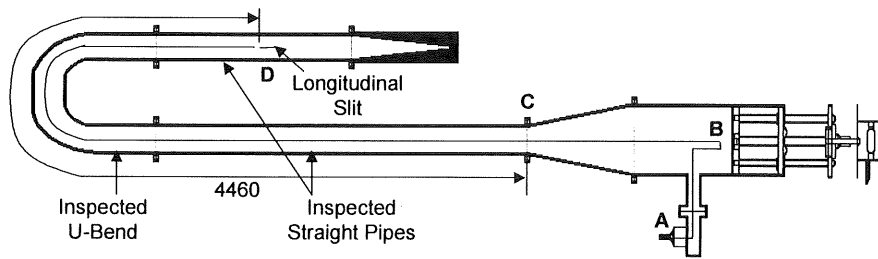


Fig. 2 Experimental Set-up (2): Longitudinal Crack at Straight Inspected Pipe after U-bend

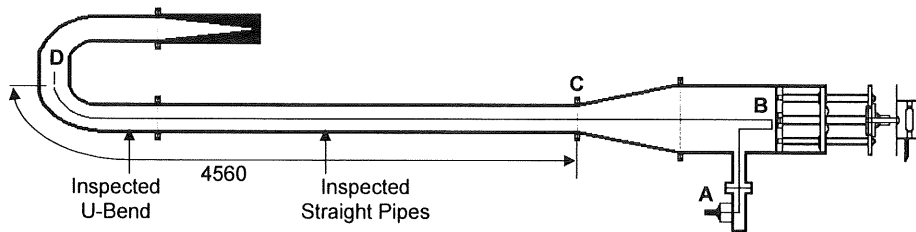


Fig. 3 Experimental Set-up (3): Longitudinal Crack at U-bend

測定管、無反射終端で構成されている。ネットワークアナライザから発振されたマイクロ波は同軸ケーブルを介してモード変換器の矩形導波管部に矩形 TE_{10} モードとして入射される。モード変換器は銅製の矩形導波管と円形導波管を接続した形になっており、矩形 TE_{10} モードのマイクロ波はモード変換器内で円形 TE モードと円形 TM モードに変換される。その後、マイクロ波は銅製のテーパ導波管を経由して、被測定管に進入する。被測定管内で反射したマイクロ波はネットワークアナライザで計測され、透過したマイクロ波はパラフィン製の無反射終端で吸収される。モード変換器内にはプランジヤが設置されており、このプランジヤ

一位置を変えることによって、特定のモードを共振させ、別の特定のモードを抑制することができる。共振条件、抑制条件を式(1)、式(2)に示す。

$$L = \lambda_g \cdot \frac{m+1}{2} \quad (\text{共振条件}) \quad (1)$$

$$L = \lambda_g \cdot \frac{m}{2} \quad (\text{抑制条件}) \quad (2)$$

ただし、 L はプランジヤ面と矩形導波管の中心線との距離、 λ_g は管内波長、 m は整数である。管内波長 λ_g は周波数 f および、遮断周波数 f_c を用いて以下の式で表すことができる。

$$\lambda_g = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (3)$$

マイクロ波は遮断周波数以下では配管内を伝播することはできない。

続いて、本研究で用いる被測定管について述べる。被測定管は全て内径 34mm、肉厚 2mm の SUS304 製シームレス管である。測定対象となる軸方向き裂は、Fig. 4 に示すような幅 0.3mm、長さ 4mm のもので、人工的に被測定管の外側から回転刃で削って作成している。本研究では以下の 3 種類の配管系での軸方向き裂の位置同定を試みる。

- 1) 実験体系① Fig. 1 のようにストレート管のみで構成されている配管系に軸方向き裂が存在する場合：
き裂位置（図中経路 CD） 3380mm
- 2) 実験体系② Fig. 2 のようにストレート管と U 字管で構成されている配管系で、U 字管の先にあるストレート管に軸方向き裂が存在する場合：
き裂位置（図中経路 CD） 4460mm
- 3) 実験体系③ Fig. 3 のようにストレート管と U 字管で構成されている配管系で、U 字管に軸方向き裂が存在する場合：
き裂位置（図中経路 CD） 4560mm

2.2 測定手順

本研究では散逸パラメータのうち反射波特性を表す S_{11} をデータとして取得する。円管内面のマイクロ波探傷法での測定手順は以下の通りである。

- 1) き裂のない被測定管において S_{11} (Data1) を得る。
- 2) き裂のある被測定管において S_{11} (Data2) を得る。
- 3) $\Delta S_{11} = (\text{Data2}) - (\text{Data1})$ を計算する。

上記の手順で得られた ΔS_{11} と時間（マイクロ波が発振された時間をゼロとする）との関係により、き裂位置の同定を行う。

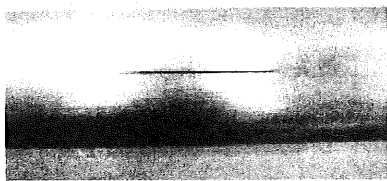


Fig. 4 Artificial Longitudinal Crack

2.3 TOF の評価法

本研究ではマイクロ波の TOF (Time Of Flight) を用いて、き裂の位置を同定する。マイクロ波の TOF を計算するのに必要な群速度 v_g は光速 c 、比透磁率 μ_R 、比誘電率 ϵ_R 、マイクロ波の周波数 f 、遮断周波数 f_c を用いて以下の式で与えられる。

$$v_g = \frac{c}{\sqrt{\mu_R \epsilon_R}} \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2} \quad (4)$$

いずれの実験においてもマイクロ波の経路は Fig. 1～Fig. 3 の図中の ABCDCBA として、群速度より理論的に TOF を計算して、実験結果と比較を行う。また、実験で得られた TOF と群速度より、き裂位置の計算を行い、その精度を評価する。

本実験ではマイクロ波の周波数帯域を 5.2GHz～6.0GHz とする。Fig. 5 に本実験で用いる被測定管における群速度の分散曲線を示すが、この周波数帯域は軸方向き裂検知に有効な円形 TE₁₁ モードのみを発生させる範囲である。

3. 結果と考察

3.1 プランジャー位置の決定

Fig. 6 にプランジャー位置 L を 90mm～180mm と変化した場合の周波数領域、時間領域における ΔS_{11} の分布の例として、実験体系②で得られたものを示す。Fig. 6 より、周波数領域では、 ΔS_{11} が帯状に分布していることが読み取れる。これは、式(1)、式(2)に従って、円形 TE₁₁ モードのマイクロ波が共振しているプランジ

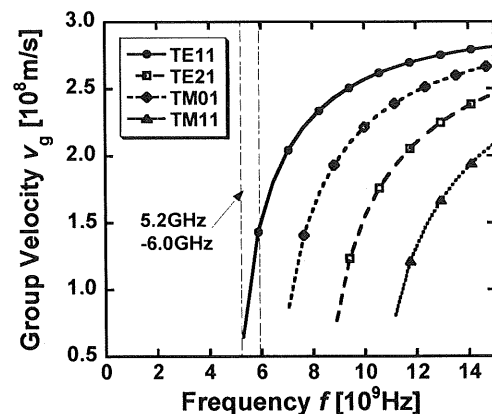
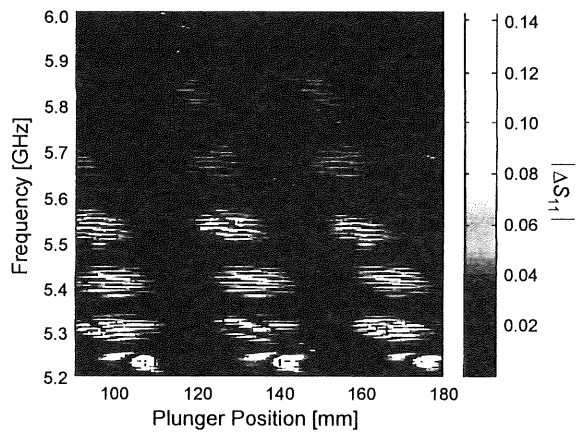
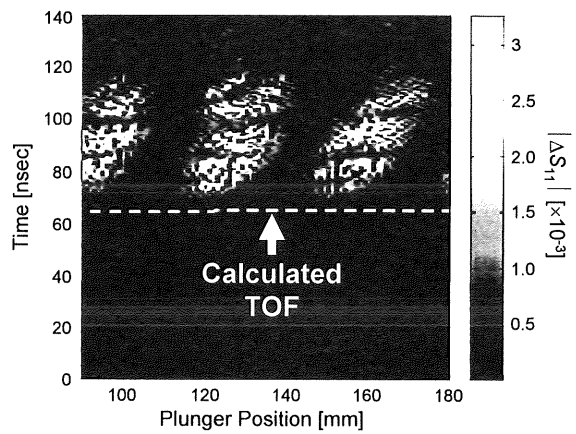


Fig. 5 Dispersion Curve for Group Velocity



(a) Frequency Domain Data



(b) Time Domain Data

Fig. 6 ΔS_{11} Distribution in Experimental Set-up (2)

ャー位置と、抑制されるプランジャー位置が交互に存在しており、また式(3)のように周波数によって管内波長が変化するためである。時間領域において ΔS_{11} が高くなっているプランジャー位置は時間領域において ΔS_{11} が高くなっているプランジャー位置と一致している。また、本実験において最高周波数である6GHzの場合の群速度から計算したTOFを時間領域における ΔS_{11} の分布に示しているが、 ΔS_{11} が変化し始める時間とTOFの計算値がほぼ一致していることがわかる。他の実験体系においても、同様の傾向が得られた。したがって、マイクロ波探傷法によって、U字管を含む配管系においても軸方向き裂の位置同定ができる可能性をこれらの結果は示している。

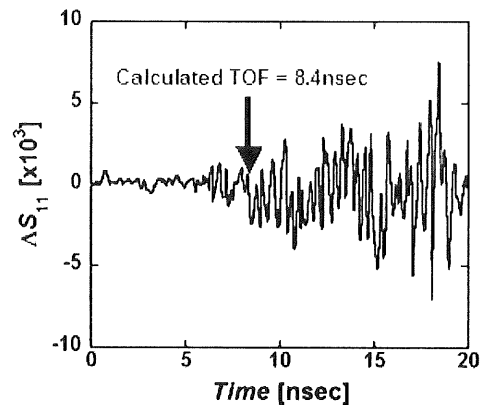
3.2 プランジャー位置を固定した時の結果

続いて各実験体系においてプランジャー位置を $L=120\text{mm}$ に固定したときの時間と ΔS_{11} の関係をより、

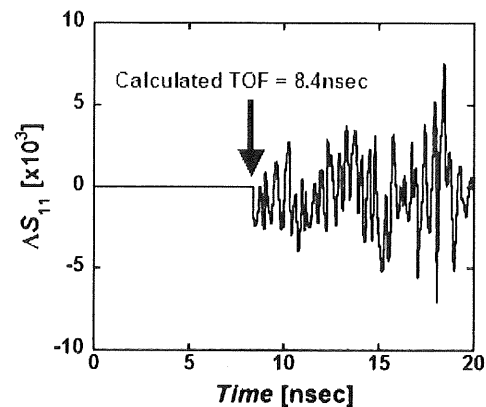
き裂位置の同定を試みる。き裂位置同定のために、本研究ではCutoff Value法と名づけた独自のデータ処理法を用いる。このデータ処理法は ΔS_{11} の最大値(ただし絶対値として)に、ある係数であるThreshold FactorをかけたCutoff Value以下のデータを削除するという方法である。ただし、Cutoff Valueよりも大きな ΔS_{11} が現れる時間以前のデータに対してのみ適用し、その時間以降のデータに対しては適用しない。Cutoff Valueを式で表すと以下ようになる。

$$[\text{Cutoff Value}] = [\text{Threshold Factor}] \times [\text{Max}(\Delta S_{11})] \quad (5)$$

Fig. 7にCutoff Valueを適用したデータの例を示す(Fig.7(b)ではThreshold Valueが0.18)。Threshold Factorを変化させていくと、き裂の情報を含む反射波のTOFの推測値がステップ状に変化していく。このTOFの推測値の各ステップに対応する位置がき裂が存在する位置を候補として考えることができる。



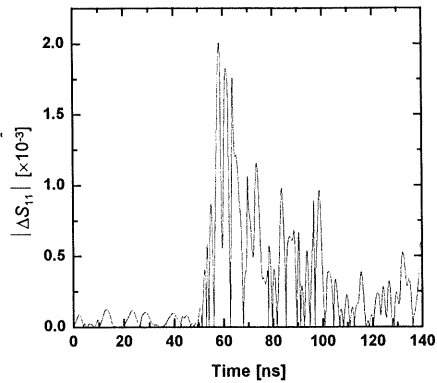
(a) Example of Data



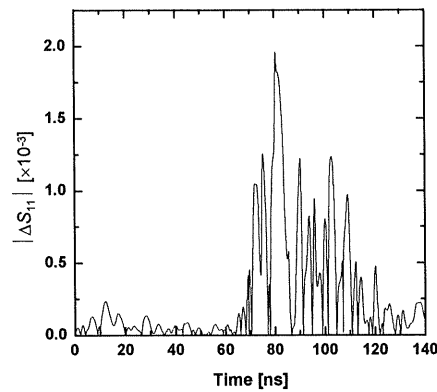
(b) Example of Data Processing

Fig. 7 Cutoff Value Method

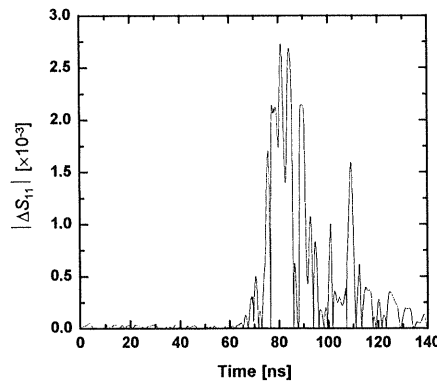
Fig. 8 に各実験体系における時間と $|\Delta S_{11}|$ の絶対値の関係を示す。また Fig. 9 に Cutoff Value 法を適用させた時の Threshold Factor β と時間 (TOF) の関係を示す。いずれの場合においても、TOF の候補のうち 1 つが計算した TOF とほぼ一致している。したがって、TOF の候補から計算したき裂位置のうちの 1 つが実際のき裂位置と考えることができる。



(a) Experimental Set-up (1)

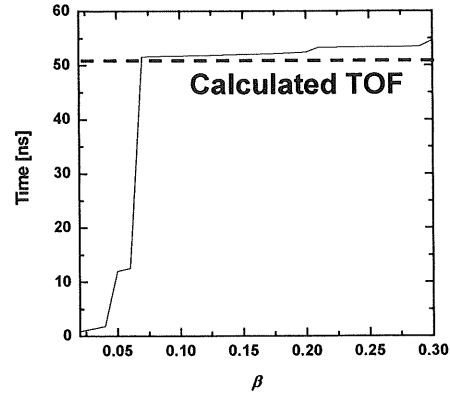


(b) Experimental Set-up (2)

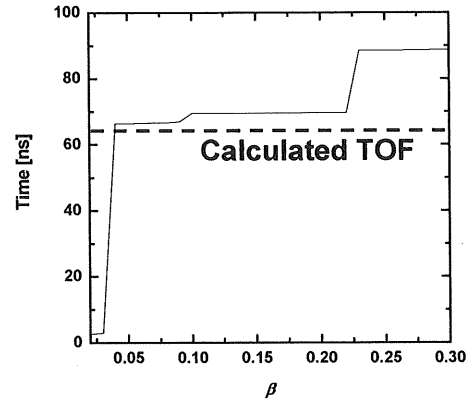


(c) Experimental Set-up (3)

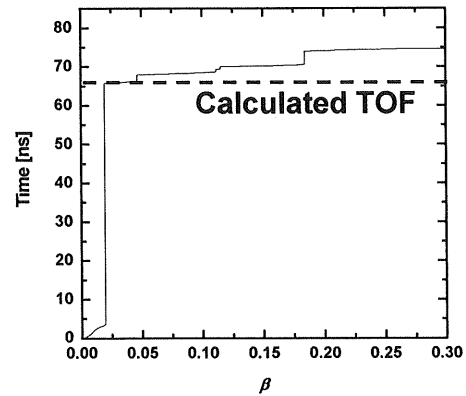
Fig. 8 Time- $|\Delta S_{11}|$ Characteristic ($L=120\text{mm}$)



(a) Experimental Set-up (1)



(b) Experimental Set-up (2)



(c) Experimental Set-up (3)

Fig. 9 Threshold Factor-Time Characteristic

Table 1 に各実験体系におけるき裂予測位置とその精度を示す。Table 1 より現状ではある位置からプラスマイナス 200mm 程度の範囲にき裂が存在を確認することができる。今後はノイズ低減はより正確なデータ処理法の導入などにより精度を上げていくこと、周方向き裂や減肉などの検知が可能となるように本手法を拡張していくことが課題となる。

Table 1 Predicted Crack Location

Condition	Crack Location	Predicted Location
Crack is located in straight pipe	3380 mm	337 mm ± 67 mm 1019 mm ± 75 mm 3387 mm ± 73 mm
Crack is located in straight pipe after U-bend	4460 mm	346 mm ± 106 mm 4275 mm ± 360 mm
Crack is located in U-bend	4560 mm	301 mm ± 63 mm 4509 mm ± 258 mm 4996 mm ± 116 mm

4. 結論

本研究ではマイクロ波探傷法により複雑形状の配管系に存在する軸方向き裂の位置を同定できることを示すことを目的として、マイクロ波探傷法を人工的な軸方向スリットを有する U 字管を含む配管系に適用した。本研究は以下のように結論づけられる。

- 1) 円形 TE₁₁ モードのマイクロ波を用いることにより、軸方向き裂の存在、位置を示す信号が得られた。
- 2) TOF のデータを用いることにより、U 字管を含む複雑な配管系においても、軸方向き裂の位置の予測ができる可能性があることが示された。
- 3) 現状では、1 つのき裂に対しても、き裂位置候補が複数あり、また、その精度もプラスマイナス 200mm 程度であった。今後はノイズ低減はより正確なデータ処理法の導入などにより精度を上げていくこと、周方向き裂や減肉などの検知が可能となるように本手法を拡張していくことが課題となる。

謝辞

本研究は独立行政法人原子力安全基盤機構の委託研究「原子力安全基盤調査研究」の成果の一部である。

参考文献

- [1] K. Sugawara, H. Hashizume, S. Kitajima, “Development of NDT method using electromagnetic waves”, JSAEM Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 10, 2001, pp.313-316.

- [2] H. Hashizume, T. Shibata, S. Kitajima, Y. Uchigaki, K. Ogura, “Fundamental Study of NDT method using electromagnetic waves”, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 24, 2003, pp.263-270.

- [3] H. Hashizume, T. Shibata, K. Yuki, “Crack Detection Method using Electromagnetic Waves”, International Journal of Applied Electromagnetics, Vol. 20, 2004, pp.171-178.

- [4] T. Shibata, H. Hashizume, S. Kitajima, K. Ogura, “Experimental Study on NDT method using electromagnetic waves”, Journal of Materials processing Technology, Vol. 161, 2005, pp.348-352.

- [5] K. Abbasi, S. Ito, H. Hashizume, K. Yuki, “Evaluation of Circumferential Crack Location in Pipes by Electromagnetic Waves”, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 28, 2007, pp.117-124.

- [6] K. Abbasi, S. Ito, H. Hashizume, “Microwave Detection of Longitudinal Crack and Identification of Its Location in Straight Pipe”, Journal of Power and Energy Systems, Vol. 2, 2008, pp.538-544.