

電磁波を用いた配管内部欠陥探傷技術の開発

Development of crack detection method by using electromagnetic wave

| | | | |
|---------|-------|---------------------|------------|
| 東北大学大学院 | 橋爪 秀利 | Hidetoshi HASHIZUME | Member |
| 東北大学大学院 | 結城 和久 | Kazuhisa YUKI | Non-Member |
| 富士重工(株) | 柴田 拓也 | Takuya SHIBATA | Non-Member |

Abstract The NDT method using electromagnetic waves has the possibility to detect widely and quickly inner surface crack existing in large pipes. The purpose of this study is to demonstrate validity of the method to detect the thin crack introduced by plasma discharge fabrication. Through this study, it has been shown that both reflected and transmitted waves carry a lot of information on existence of the crack. Experimental results indicate that there exists attractive possibility in this new NDT method.

Keywords: Crack radar, NDT method, Microwave, Cut-off frequency
E-mail: hidetoshi.hashizume@qse.tohoku.ac.jp

1. 緒言

原子炉の長期使用は、地球温暖化ガス放出削減や電力コスト低減に非常に有効であるが、プラントの健全性をより経済的に保証するためには、より高速でかつ高精度の欠陥探傷技術の開発が重要となってくる。現在までのところ典型的な欠陥サイズの同定技術として、超音波検査法・渦電流検査法などがあり、実績がある。しかしながら、両者ともにより広い範囲の検査を行う場合には、精度は良いものの検査に要する時間が膨大になると考えられる。そこで、配管内部に存在する欠陥を高速に検出する技術の開発が重要となり、従来の超音波探傷法と組み合わせることにより、高速に欠陥を検出した後、欠陥サイズの同定を行うという先進的な欠陥検出システムの構築が可能となる。

すでに実施された数値解析結果[1]から、円形 TM_{01} モードの電磁波によって配管内部の周方向欠陥の検出が可能であり、また、遮断周波数近傍の周波数の電磁波を用いることにより、欠陥位置の同定が可能であることが示されている。また、その後実施された実験結果 [2,3,4]においても、遮断周波数近傍の TM_0 モードの電磁波が欠陥の情報を多く含んでいることが示されている。しかし、これらの実験では2つ円管に、内径の大きなスペーサーをはさみ、比較的大きな人工欠陥を用いて欠陥を模擬していた。

そこで本研究では、この電磁波を用いた欠陥探傷技術によって、放電加工によって導入された欠陥の検出が可能であることを示し、いわゆる“クラックレーダー”の可能性を示すことを目的としている。

2. 実験装置

2.1 モード変換器

前述のように、数値解析結果から、円形 TM_{01} モードの電磁波によって配管内部の周方向欠陥の検出が可能でありことが分かっている。このモードの電磁波が伝搬する際には、通常、導体の表面（配管の内表面）に軸方向の表面電流が誘起される。従って、円周方向の欠陥が配管内表面に存在していると、この表面電流の分布が乱れ、結果として、電磁波の散乱が起き、透過波、反射波を計測することによって、欠陥の検出が可能となる。

しかしながら、電磁波の発振器であるガンオシレーターは、通常矩形 TE_{10} モードの電磁波を発振するため、 TM_{01} モードへの変換を行う必要がある。図1にモード変換器の概略図を示す。このシステムにおいては、円形 TE_{11} モードも同時に発生するが、このモードは軸方向欠陥を検出する際に有効である。そして、これら2つのモードは、モード変換器のプランジャー位置“ l ”を調整することによって強度を調整できる。すなわち、 TM_{01} モードを共鳴さ

せるためには

$$l = \lambda_{gTM} \cdot \frac{m}{2} \quad (1)$$

とし、TE₁₁モードの発生を抑えるためには

$$l = \lambda_{gTE} \cdot \frac{2n+1}{4} \quad (2)$$

とすればよい。ただし、 m, n は任意の整数、 λ_g は管内波長で、自由空間での波長 λ と、遮断波長 λ_c を用いて次式で与えられる波長である。

$$\frac{1}{\lambda_g^2} = \frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_c^2} \quad (3)$$

円形モードの場合、 λ_c は

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{r_0} = \frac{c}{f_c} \quad (c: \text{光速}), \quad (4)$$

で与えられ、 $r_0 = 2.405$ (円形 TM₀₁モード)、 $r_0 = 1.841$ (円形 TE₁₁モード)となる。

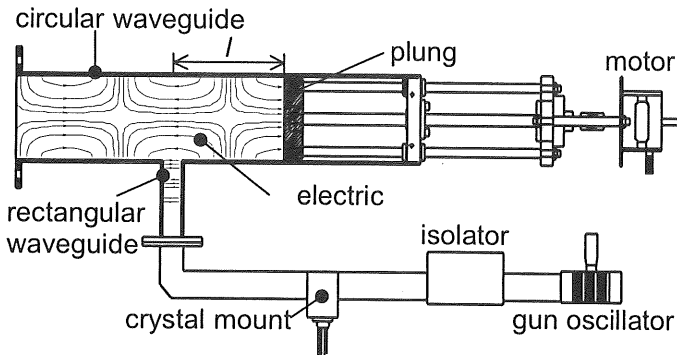


Fig. 1 Schematic diagram of mode converter

(1) 式 (2) 式を満足するように“ l ”を変化させ、必要なモードを共鳴させる。なお本実験装置では、“ l ”およびガンオシレーターの周波数はコンピュータを使用して、自動的に変化させている。

2.2 試験部

図2に試験部を含めた全体の実験装置を示す。ガンオシレーターから発振された矩形 TE₁₀モードの電磁波がモード変換器内に伝搬し、モード変換された後に、テーパ導波管を通して試験部へと導かれる。また、反射波、透過波の強度は矩形導波管に取り付けられたクリスタルマウントによって、計測される。ここで、テーパ導波管は、試験部の配管における遮断周波数以下の電磁波を試験部に導入するために必要となるものである。

試験に使用したのは SUS304 製の配管 (内径 34mm) である。従来の実験[2,3,4]では欠陥の無い試験管の場合に得られる反射波・透過波を、2つの配管をフランジで繋ぎ、擬似的に欠陥を導入した場合に得られる結果と比較し、欠陥の存在を推定していた。しかしながら、これらの実験では、配管自体が異なるものを使用しているため、欠陥の有無ではなく、配管個体の影響が結果に現れている可能性もある。そこで本論文の実験では、まず、欠陥の無い配管について反射波・透過波を測定し、その後、放電加工によって欠陥を導入し、両者の信号を比較することによって個体の影響を排除している。

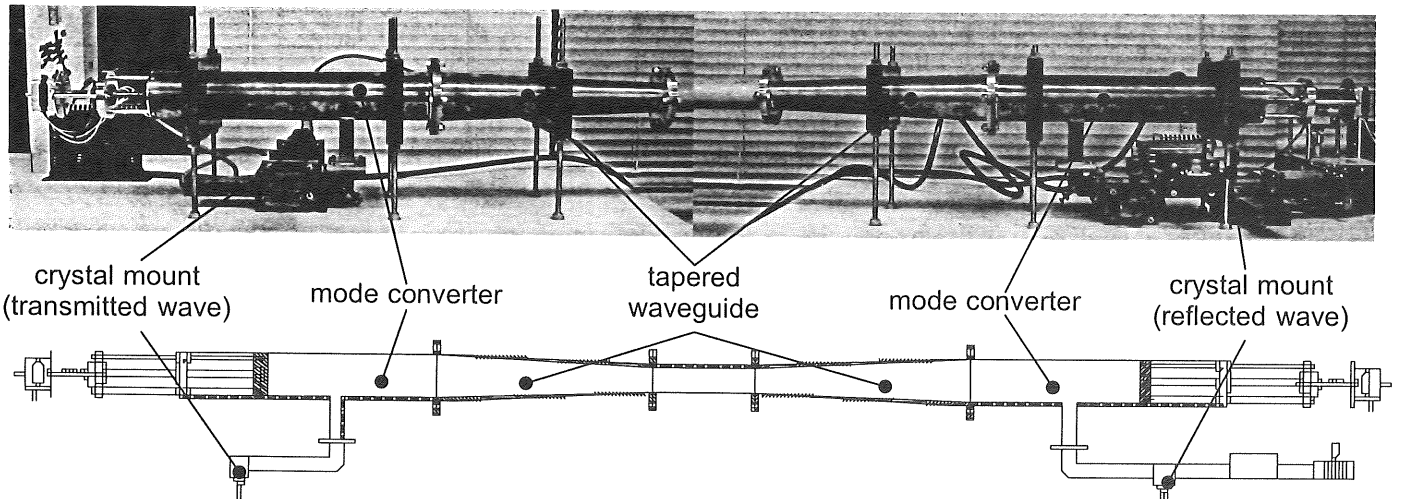


Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

3. 実験結果

3.1 欠陥検出最適条件の決定

図3に欠陥検出のための条件を明らかにするための実験装置を示す。この実験では、テーパ導波管の終端に円形 TM_{01} モードに対する反射板を取り付けた場合と吸収板を取り付けた場合とを比較することによって、円形 TM_{01} モードのみが共鳴している領域を明らかにする。まず、すべてのモードに対して反射する反射板を用いて反射波の強度を測定する。つぎに、パラフィンとグラファイトから出来ている円形 TM_{01} モードのみを吸収する吸収板を装着して同様に反射波強度を測定する。従って、円形 TM_{01} モードが主に共鳴している領域では、反射板を取り付けた場合には信号強度が大きく、かつ、吸収板を取り付けた場合には、信号強度が大きく減少していることになる。図4にこれらの結果を示す。縦軸はガンオシレーターの発振周波数、横軸はモード変換器のプランジャー位置“ l ”を表している。図4(a)は、反射板を取り付けた場合の反射波強度分布を示しており、黒い領域は反射信号強度が大きいことを意味している。この体系における遮断周波数は、6.755GHz (TM_{01} モード)、5.171GHz (TE_{11} モード) となっており、 TM_{01} モードが理論上传搬可能な周波数領域では、 TE_{11} モードも伝搬可能となっている。図4(a)中に式(2)より計算される TE_{11} モードの発生が抑えられる領域を四角で示してあるが、信号強度の弱い領域と良く一致している。図中には、この TE_{11} モードの強度が小さくなる領域と一致していない領域も存在しており、これは TM_{01} モードの強度が小さくなっているためであると考えられる。 TM_{01} モードに対しては理論的に予測される領域と比較することは、遮断周波数近傍であるため式(3)より遮断波長が無大となることから、不可能となる。しかし、たとえば6.95GHzにおける TE_{11} モードの発生が抑えられる領域と一致していない部分間のプランジャーの位置の差は、約26mmとなっている。一方、この周波数における $\lambda_{g, TM}$ と $\lambda_{g, TE}$ の理論値の半分は、それぞれ26mmと24mmとなっていることから、上述の考察が正しいと判断できる。

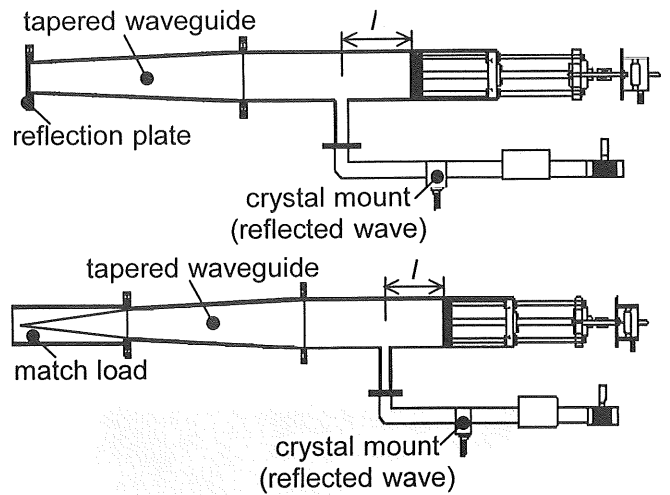


Fig. 3 Experimental set-up with reflection plate and matched load

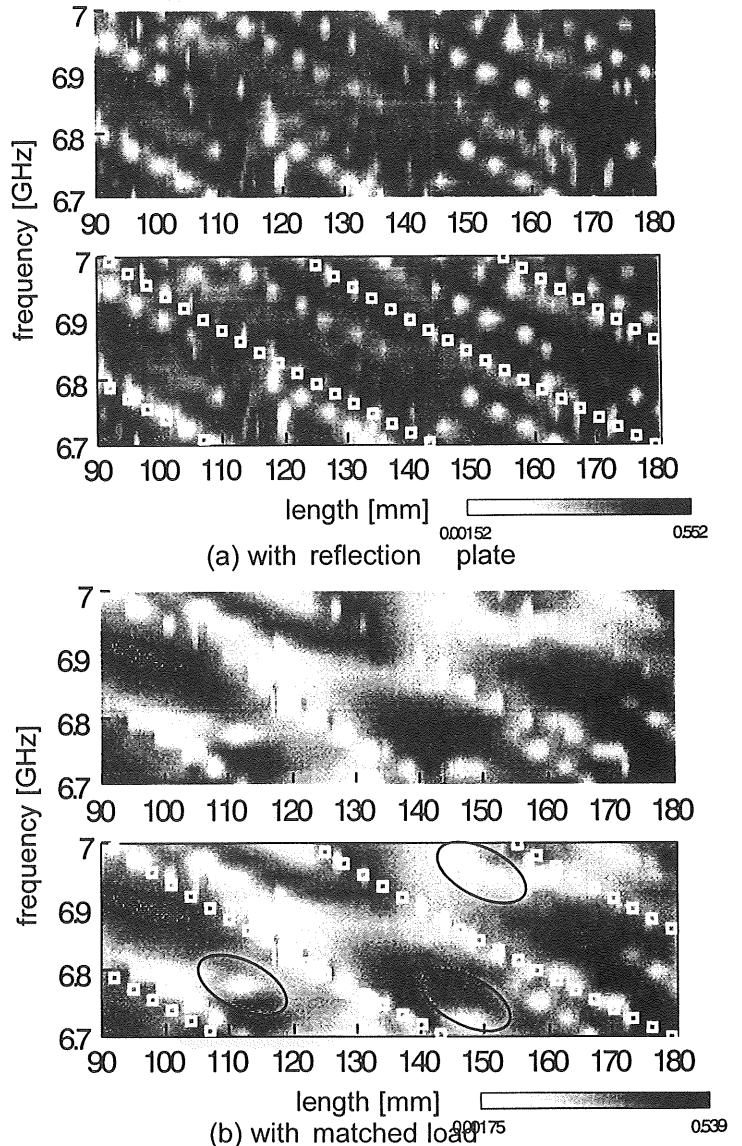


Fig. 4 Intensity of reflected wave

3.2 欠陥検出実験

図5に放電加工によって導入された貫通欠陥の様子を示す。配管材は SUS304 であり、長さ 1200mm 内径 34mm となっている。欠陥は端から 400mm の位置に導入されており、半周分の大きさとなっている。欠陥の幅は 0.5mm である。配管の取り付け方向を逆にするによって発

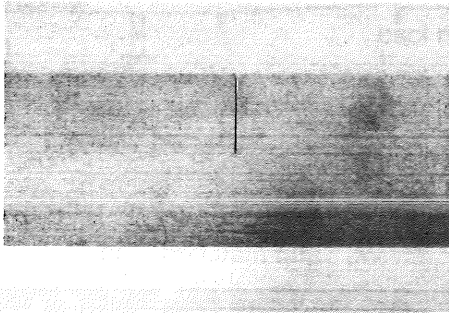
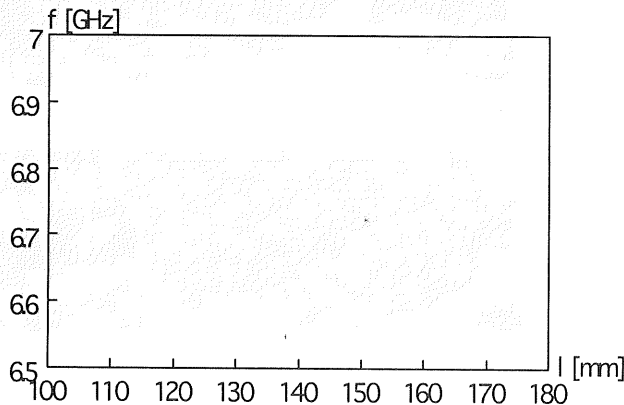
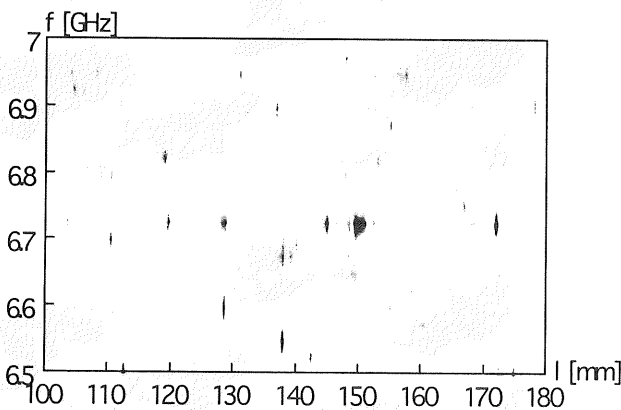


Fig. 5 Test pipe with thin crack



(a) error of signal without crack



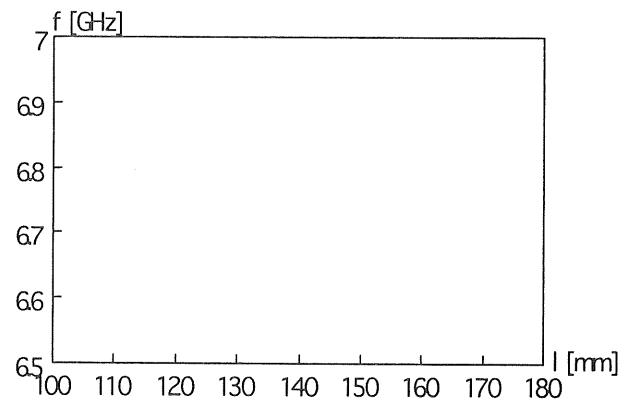
(b) signal difference due to crack existence

Fig. 6 Reflected signals (crack location:400mm)

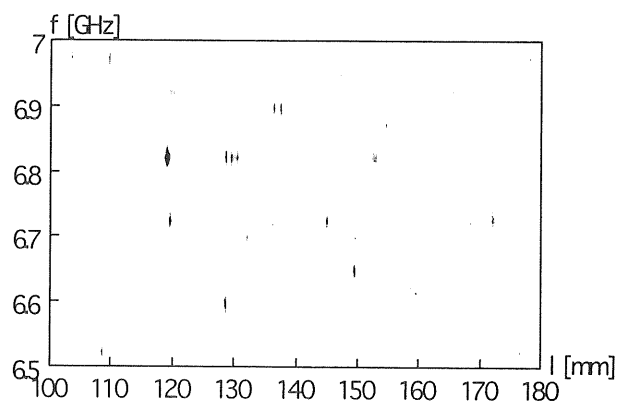
振源側から見て欠陥の位置を 400mm と 800mm の2種類の実験を行うことが可能となる。

最初に欠陥位置が 400mm の場合について実験を実施した。図6に反射波の強度を示す。図6(a)には、欠陥が存在しない場合の反射波強度を2度測定し、その際の誤差を示している。この誤差は、発振器の強度の誤差やプランジャー位置のずれが原因であると考えられる。図6(b)には、欠陥が存在する場合と存在しない場合の反射波強度の差を示す。実験ではあらかじめ欠陥の無い状態でデータを取得した後、同じ配管に欠陥を導入してデータを取得している。明らかに欠陥の存在によって信号に大きな差が出ていることが分かる。

図7には透過波の強度を示すが、この場合も透過波の差は大きく、欠陥検出に有効であることが分かる。



(a) error of signal without crack



(b) signal difference due to crack existence

Fig. 7 Transmitted signals
(crack location:400mm)

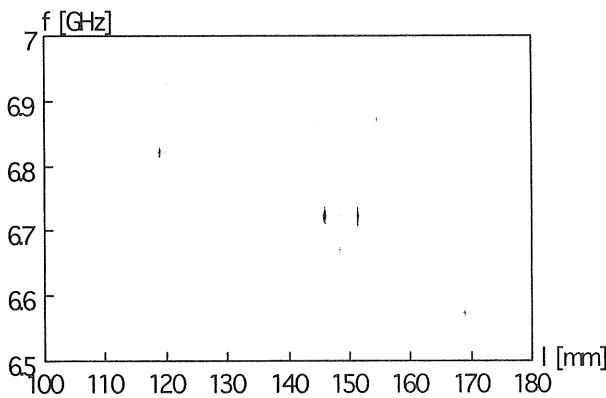
また、図 4 (b) で予想された欠陥検出可能性の高い領域すなわち、 TM_{01} モードが共鳴し、 TE_{11} モードの発生が抑えられている領域では、図 6 (b)、図 7 (b) において、欠陥の有無による信号の差が大きいことが分かる。 TM_{01} モードの遮断周波数 (6.755GHz) 以下の領域でも欠陥の有無による信号の差が大きな領域が存在しており、これは、 TE_{11} モードの電磁波が欠陥の存在によって影響を受けた可能性がある。すなわち、 TE_{11} モードにおいては、周方向に表面電流が流れるが、この電流が欠陥 (幅 0.5mm) の影響を受けたものと考えられる。

図 8 は、欠陥が試験配管の発振器側から 800mm の所に位置している場合の反射波の強度の差を示している。この場合においてもまず欠陥が存在しない場合に信号を 2 回測定し、その後、欠陥が存在するものとの比較を行って

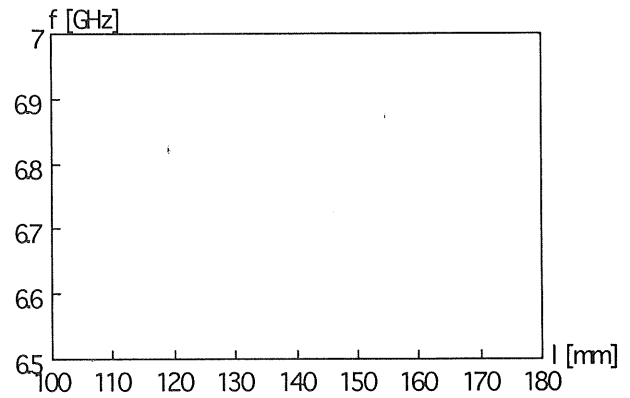
る。図 8 (b) には、欠陥の有無による反射波の強度の差を示す。この場合には信号の差の強度は図 6 (b) に示す欠陥位置が 400mm の場合と比較すると信号の差が大きいことが分かる。しかしながら、この問題は電磁波の発振器の精度・強度、プランジャー位置制御精度を上げることによって十分克服可能であるといえる。

図 9 には、透過波の結果を示している。この場合にもやはり図 6 で予想された周波数とプランジャー位置で比較的大きな信号の差が得られている。また、モードの遮断周波数以下の領域においても信号の差が得られているが、これも TE_{11} モードが影響を受けたためであると考えられる。

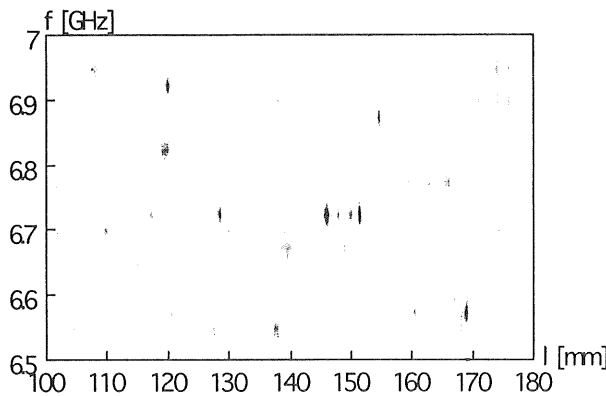
また、図 6 (b) と図 8 (b)、図 7 (b) と図 9 (b) を比較すると、欠陥の存在により現れたと考えられる信号の差の強度分布のパターンが、欠陥の位



(a) error of signal without crack

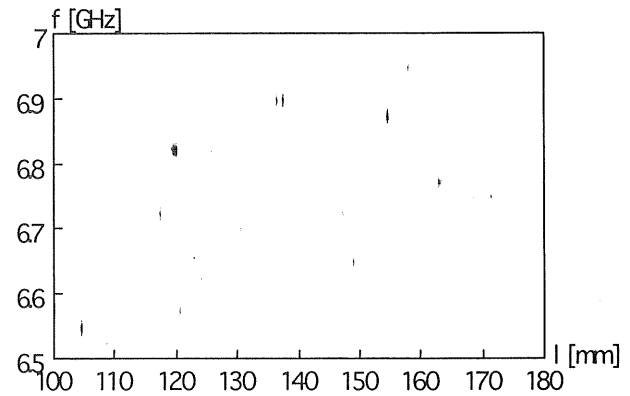


(a) error of signal without crack



(b) signal difference due to crack existence

Fig. 8 Reflected signals (crack location:800mm)



(b) signal difference due to crack existence

Fig. 9 Transmitted signals

(crack location:800mm)

置が異なるにもかかわらず、同じように現れている部分があり、これは、欠陥位置 800mm が欠陥位置 400mm の整数倍になっているためである可能性があり、今後、配管長さを長くし、欠陥位置をより変化させて評価する必要性があると考えられる。

4. 結論

本研究を通して以下の結論が得られた。

- 1) 全反射板と TM_{01} モード吸収板を用いた実験により、 TM_{01} モードが共鳴し、周方向欠陥の検出可能な周波数領域とプランジャー位置について評価することができた。
- 2) 欠陥が発振器から離れた位置に存在する場合には、透過波を使用することによって欠陥検出が可能であることが分かった。また、比較的欠陥が発振器に近い場合には透過波だけではなく、反射波を用いても検出可能であることが示された。
- 3) TE_{11} モードによる周方向欠陥検出の可能性が示された。今後、より、幅の狭い欠陥についての実験を進めることが必要と考えられる。
- 4) 欠陥の存在しない配管に対する計測結果から、測定時の誤差が比較的大きいところが明らかとなった。今後、発振器の高精度化を進める必要性があると言える。
- 5) 今回の研究により、電磁波を用いた欠陥検出技術の基本的原理は証明されたと言える。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費（萌芽研究）(No. 15656236)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, 2001, JSAEM Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 10, pp. 313-316.
- [2] H. Hashizume, S. Kitajima, T. Shibata, Y. Uchigaki,

K. Ogura, 2003, Fundamental study on NDT method based on electromagnetic waves, eNDE2003, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, 24, 2004, pp.263-270..

- [3] T. Shibata, H. Hashizume, S. Kitajima, K. Ogura, 2003, Experimental study on NDT method using electromagnetic waves, Journal of Materials Processing Technology, JAPMED03, Athens