

複数モードのマイクロ波を利用した金属配管内表面の きず位置推定手法の高精度化

Precision Improvement of a Method to Predict the Flaw Location on an Inner
Surface of a Metal Pipe Using Multiple-mode Microwaves

東北大学	片桐 拓也	Takuya KATAGIRI	Student Member
東北大学	陳 冠任	Guanren CHEN	
東北大学	遊佐 訓孝	Noritaka YUSA	Member
東北大学	橋爪 秀利	Hidetoshi HASHIZUME	Member

Abstract

In this study, a new signal-processing method was developed to improve the precision of locating flaw's position using microwave NDT. The previous processing method is available only for the single-mode microwave, which causes the noise generation in the case that multi-mode microwaves propagate in a metal pipe. In order to reduce the noise, the reflections caused by the propagation of unintended modes were extracted and deducted from the original signal. The result showed the less noise intensity and higher signal-to-noise ratio than that without the procedure. After adopting this method, the flaw can be precisely located even under the interference of the undesirable modes.

Keywords:

Nondestructive testing, metal pipe, microwave, time-of-flight, dispersibility, signal processing

1. 本研究の背景および目的

配管群は原子力発電所等の大規模プラントにおける主要な構成機器の一つであり、その保全には高い信頼性が求められる。金属配管における主な劣化現象として配管減肉などの配管内表面における劣化が挙げられ^[1]、これらの検出のために様々な非破壊検査手法が提案および適用されている。しかしながら、それらの手法の多くはプローブの走査や配管の表面処理等のため検査に多大な時間を要することが課題として挙げられる。そこで、検査の効率化のためマイクロ波を用いた非破壊検査技術(マイクロ波探傷法)が提案されている^[2,3]。

当該技術は金属配管内の領域を円形導波管とみなし、パルス波として入射されたマイクロ波の飛行時間や信号強度からきずの位置や性状を推定する手法である。一般に円形導波管内を伝播するマイクロ波は分散性を有するため、伝播距離に応じてパルスの形状が崩れ飛行時間の評価が困難となる。配管内を伝播するモードや伝播距離が既知であれば分散の度合いを理論的に求めることができ、これを補償するための信号処理手法(分散補償法)が提案されている^[4]。ただし実際の測定においてはきずの位置は未知であるため、推定きず位置をパラメータとした信

号の評価が行われてきた^[5,6]。しかしながら、従来の信号処理においては単一の伝播モードのみを考慮しており、プローブの特性や配管内でのモード変換を原因として分散性の異なる複数のモードが混在する場合に S/N 比が悪化する。そこで本研究では従来の信号処理を利用し、目的とするモード以外の信号を抽出したうえで元の信号から差し引く操作を繰り返すことで、複数モードが存在する場合であっても信号を抽出可能とする手法を開発した。

2. 信号処理手法

図 1 に新たな信号処理の手順を示す。ここで、 F は周波数領域信号、 T は時間領域信号を意味するものとする。当該処理は測定により得られた周波数領域信号に対し、配管内を伝播するマイクロ波モードによる信号を抽出または除外するためのものである。具体的には、配管内における伝播モード X_1 (往路)、 X_2 (復路)が距離 L (プローブから反射源までの距離)を伝播したと仮定し、この時の信号 F_3 を測定によって得られた信号 F_0 から差し引く操作を行う。この手順をノイズとして存在し得る X_1 、 X_2 、 L の組み合わせについて繰り返す。なお、時間領域信号および周波数領域信号の変換には高速フーリエ変換(FFT)および逆高速フーリエ変換(IFFT)を用いており、IFFT の実行

前には6次のKaiser窓を、FFTの実行後にはKaiser窓の逆数を信号に乗算している。

3. 実験体系

前節の手法の有効性を検証するため、先行研究⁷⁾にて得られた測定データを用いて比較を行う。当該実験体系は図2に示すようにネットワークアナライザより発振されたマイクロ波を配側面入射用のモード変換器(プローブ)に入射し、プローブ両端にそれぞれ接続された内径19 mm、肉厚3 mm、長さ5.5 mの真鍮管(被測定管)に伝播

させ、配管内で生じた反射波を測定することを想定している。なお、本実験で用いたモード変換器は主として配管のRight側にTE₀₁モードを伝播させることを想定して製作されたものである。また被測定管のRight側に、プローブからL=3.5 mの位置に非貫通割れを模擬した管軸方向長さ30 mm、幅1 mmの貫通スリット加工(外表面を銅箔で被覆)が施されている。

測定は周波数領域にて行い、反射波をSパラメータとして評価した。このとき測定周波数は20~26 GHz(1,921点)とし、平滑化を30回行った。

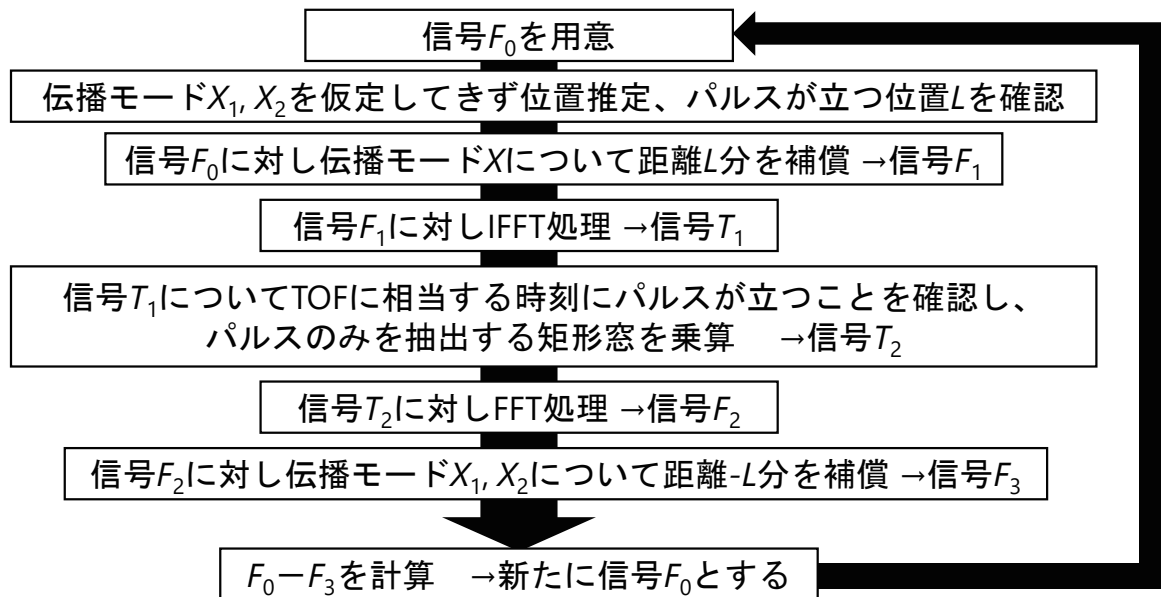


図1 信号処理のフローチャート

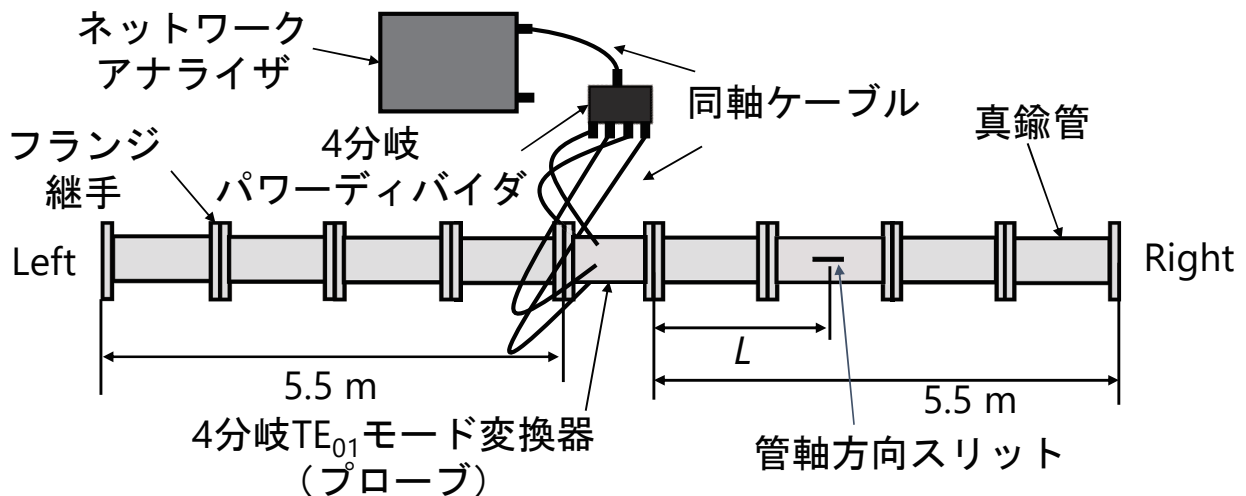


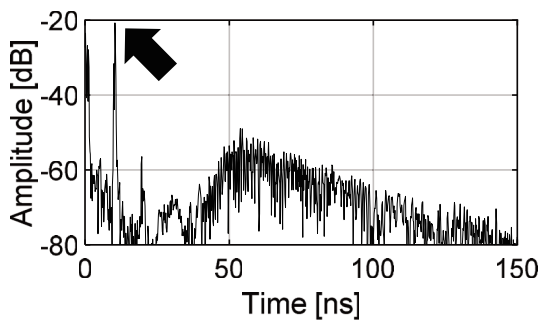
図2 実験体系

4. 信号処理結果

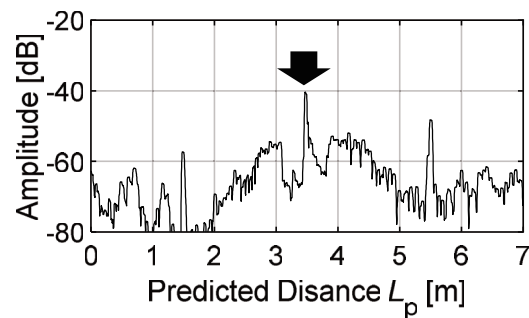
測定した信号に対し2節の処理を適用し、その過程において得られた信号を図3に示す。図3(a)は F_0 に対するIFFTの実行結果である。図中矢印($t=10.2$ ns)はプローブからの反射波を示しており、このピーク以降にみられる信号が被測定管からの反射波であると考えられるが、マイクロ波の分散性のためパルスが確認できない。 F_0 に対し、 X_1, X_2 共に TE_{01} モードとみなしてきず位置を推定した結果が図3(b)である。前節で述べた通り、本実験で用いたプローブは主として TE_{01} モードを伝播させることを想定したものであるが、 $L_p=3.5$ mのパルスの前後にはほかのモードの伝播に起因すると考えられるノイズが存在している(なお、 $L_p=1.5, 5.5$ mの信号はそれぞれフランジ継手の不整合、管終端における反射波によるものと考えられる)。例えば、 $X_1: TE_{01}$ モード、 $X_2: TE_{21}$ モードと仮定してきず位置を推定すると、図3(c)のように $L_p \cong 3.5$ mにおいてパルスが確認できる。そこで、このパルスが立つような周波数成分 F_3 を元の信号 F_0 から除外することを考える。 $X_1: TE_{01}$ モード、 $X_2: TE_{21}$ モード、 $L=3.482$ m($\cong 3.5$ m)として分散を補償し、IFFTを実行した結果 T_1 が図3(d)である。図中の矢印が示す通り、時間領域信号においてパルスが立つことが確認できる。この

パルスを抽出するような矩形窓を乗算してFFTを実行した後、先ほどの補償の逆変換を行った周波数領域信号 F_3 を求めた。このときのきず位置推定結果が図3(e)であり、 $L_p \cong 3.5$ mにおけるパルスのみが抽出されていることが確認できる。この F_3 を用いて F_0-F_3 を計算し、再度 X_1, X_2 共に TE_{01} モードとみなしてきず位置を推定した結果が図3(f)である。図3(b)と比較すると、矢印で示した箇所のノイズが軽減されていることが確認できる。また図3(g)のように $X_1: TE_{01}$ モード、 $X_2: TE_{21}$ モードとしてきず位置を推定した場合、さらに図3(h)のように分散を補償した後IFFTを実行した結果においても、それぞれ図3(c)および(d)と比較することで $L_p \cong 3.5$ mにおけるパルスが除去されていることが確認できる。

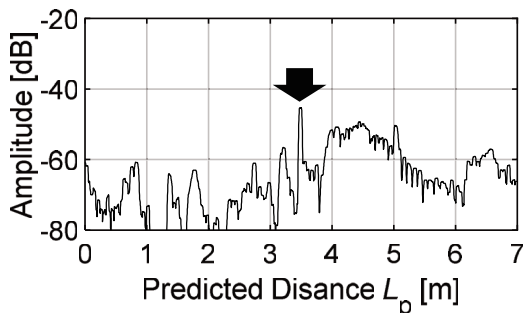
図4に前節の測定データを用いて主要なノイズと考えられる X_1, X_2, L の組み合わせについて信号処理を繰り返し、その後きず位置を推定した結果を示す。図4(a)は $X_1: TE_{01}$ モード、 $X_2: TE_{01}$ モードの信号以外を除外した場合、図4(b)は $X_1: TE_{01}$ モード、 $X_2: TE_{21}$ モードの信号以外を除外した場合を示す。いずれの場合においても、信号処理によって $L_p=3.5$ m近傍のノイズが軽減されており、SN比が向上したといえる。



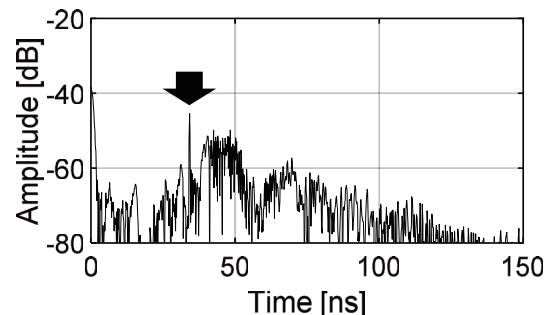
(a) 信号 F_0 に対するIFFTの実行結果



(b) 信号 F_0 に対するきず位置推定結果
($X_1: TE_{01}$ モード, $X_2: TE_{01}$ モード)

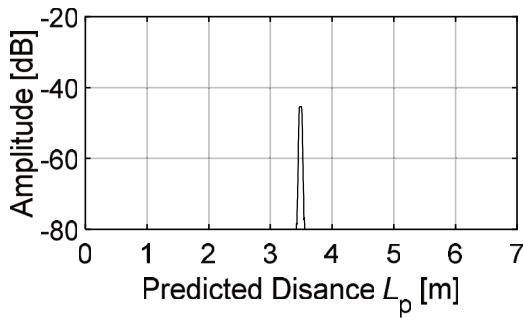


(c) 信号 F_0 に対するきず位置推定結果
($X_1: TE_{01}$ モード, $X_2: TE_{21}$ モード)

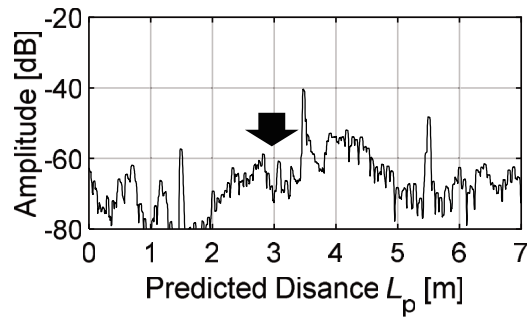


(d) 信号 T_1 ($X_1: TE_{01}$ モード, $X_2: TE_{21}$ モード, $L=3.482$ m)

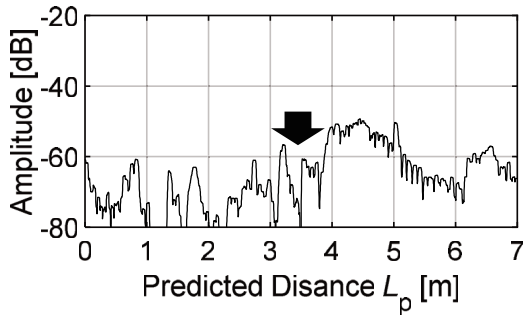
図3 処理の過程において得られた信号



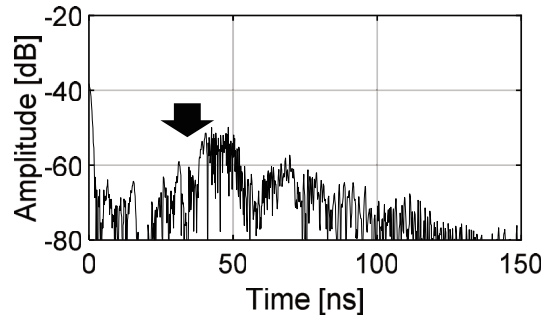
(e) 信号 F_3 に対するきず位置推定結果
(X_1 : TE₀₁ モード, X_2 : TE₂₁ モード)



(f) 信号 F_0-F_3 に対するきず位置推定結果
(X_1 : TE₀₁ モード, X_2 : TE₀₁ モード)

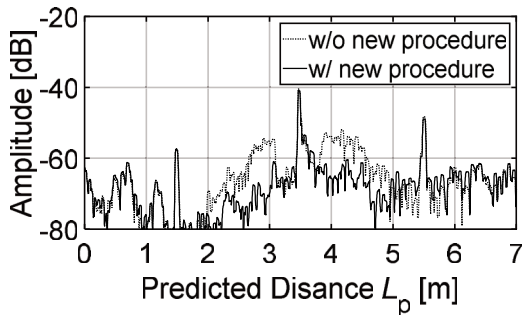


(g) 信号 F_0-F_3 に対するきず位置推定結果
(X_1 : TE₀₁ モード, X_2 : TE₂₁ モード)

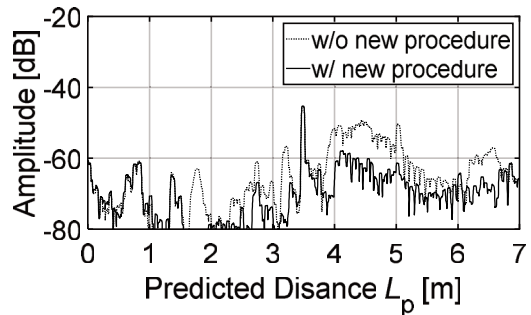


(h) 信号 F_0-F_3 に対し分散を補償した後 IFFT を実行した結果
(X_1 : TE₀₁ モード, X_2 : TE₂₁ モード, $L=3.482$ m)

図 3(続き) 処理の過程において得られた信号



(a) X_1 : TE₀₁ モード, X_2 : TE₀₁ モード以外の信号を除外した場合



(b) X_1 : TE₀₁ モード, X_2 : TE₂₁ モード以外の信号を除外した場合

図 4 処理前と処理後のきず位置推定結果の比較

5. 結論

以上の検討より、本研究で用いた信号処理を利用することで、配管内を複数のモードのマイクロ波が伝播する場合であっても信号の評価が可能となることが示された。さらなる議論については会議にて報告する。

参考文献

[1] I. Nishiguchi et al., E-Journal of Advanced Maintenance 2 (2010/2011), pp.14-24.
[2] K. Sugawara et al., JSAEM Studies in Applied

Electromagnetics and Mechanics 10 (2001), pp.313-316.

[3] L. Liu and Y. Ju, NDT&E International 44 (2011), pp.106-110.
[4] Y. Sakai et al., Nondestructive Testing and Evaluation 27(2) 2012, pp.171-184.
[5] K. Sasaki et al., NDT&E International 96 (2018), pp.47-57.
[6] 片桐ら, 日本機械学会論文集 84 (2018), 17-00375.
[7] 片桐ら, 第 22 回表面探傷シンポジウム, 仙台, 2018/03/18-19, 発表番号 1-4