配管内管軸方向割れ検出のための TE モードのマイクロ波を用いた配管広域一括検査技術の開発

片桐 拓也^{*1}, 佐々木 幸太^{*1}, 遊佐 訓孝^{*2}, 橋爪 秀利^{*2}

Development of long-range inspection using TE mode microwaves for detecting axial cracks

Takuya KATAGIRI^{*1}, Kota SASAKI^{*1}, Noritaka YUSA^{*2} and Hidetoshi HASHIZUME^{*2}^{*1, *2} Department of Quantum Science and Energy Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University
6-6-01-2 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

Received: 29 August 2017; Revised: 22 December 2017; Accepted: 28 February 2018

Abstract

This study proposes nondestructive long-range inspection for axial cracks appearing at the inner surface of a metal pipe using microwave. Numerical simulations were conducted to design a mode converter that converts TEM into TE mode that is necessary to detect axial cracks. The simulations confirmed that situating coaxial cables circumferentially enables to propagate microwaves in TE mode inside a pipe. The results also revealed that the number and positions of coaxial cables affect the frequency range where microwaves propagate as TE₀₁ mode dominantly. A mode converter with four coaxial cables was fabricated according to the results of the simulations aiming at the propagation of microwaves as TE₀₁ mode. Experimental verification was conducted using a brass pipe with a total length of 11.6 m and an inner diameter of 19.0 mm, and having the mode converter at the center. The results showed significant difference between the signals with and without an artificial slit simulating a crack. This study also proposed a signal processing method to compensate for the dispersion of microwaves with an aid of a window function. The signal processing method gave the clearer signals corresponding to the slits to determine the predict position of the slit quantitatively using the time-of-flight of the signals.

Keywords : Nondestructive testing, Microwave, TE modes, Axial cracks, Mode conversion, Pipeline

1. 緒 言

プラントなどの大規模な構造物において配管群は重要な役割を果たしており、その保全活動には高い信頼性と効率の両立が求められる(Nishiguchi et al., 2010). 配管の劣化・損傷を検出するために現行適用されている代表的な手法として、超音波探傷法、渦電流探傷法などが挙げられる. これらの手法は高精度である一方、探傷部位がプローブの近傍に限定されるため、広範囲の探傷には多大な時間と費用を要することが課題となっている. 配管群の効率的な検査手法としてガイド波を用いた探傷法(Rose et al., 1994, 2002, Mitra and Gopalakrishnan, 2016, Eybpoosh et al., 2017)が近年実用化に至ってはいるが、配管溶接部等の不連続部や支持構造物により信号が大きく減衰するという課題がある.

このような状況を鑑み、マイクロ波を用いる非破壊検査手法が提唱されている(Sugawara et al., 2001, Liu and Ju, 2011, Liu et al., 2011). これはマイクロ波を配管内に入射し、その伝播挙動から配管内壁面に存在するきずの検出と評価を行う手法である. マイクロ波は金属配管内を高速かつ低損失で伝播するため、広範囲を一括で探傷し得る手法として期待されている. 先行研究においては特に減肉を対象として各種詳細検討が行われてきており、反射波から減肉位置を評価する信号処理手法の開発(Sakai et al., 2012)、配管内への効率的な信号の入射手法の開発(Sasaki et al., 2015a)、さらにはプローブから約 30 m の位置にある模擬減肉からの信号の確認にも至っている(Sasaki et al., 2014). 一方、配管において生ずる減肉と並び重要な劣化事象としては、応力腐食割れや疲労割れなどの表

面開口割れがあるが、マイクロ波探傷法を表面開口割れの検出に用いた場合、検出感度は割れの向きに大きく依存し、管周方向を向いている割れからは信号が確認できているものの、割れが管軸方向を向いている場合には顕著に感度が低下することが課題として指摘されている (Sasaki et al., 2015b).

軸方向を向いた割れに対し感度が低い原因として考えられているのが、既往研究において主として用いられてきたマイクロ波の伝播モードが TM モードであったということである。配管内に TM モードのマイクロ波が伝播する場合、配管内壁面には管軸方向を向いた電流が誘導される。この電流は管周方向を向いた割れによって乱されやすいため、結果として管周方向の割れが検出可能である。一方、管軸方向を向いた電流は管軸方向の割れによってほとんど乱されることが無いため、結果として管軸方向を向いた割れはマイクロ波の伝播挙動に与える影響が小さく、よって検出が困難であったと考えられる。したがって、マイクロ波探傷法により管軸方向を向いた割れを高感度に検出するためには管周方向に誘導電流を生じさせる TE モードでマイクロ波を伝播させることが有効と考えられるものの、現状マイクロ波探傷法において配管内に TE モードを効率的に伝播させる技術の検討は行われていない。

そこで、本研究では管周方向に電流を誘導し得る TE モードのうち、電磁場分布が比較的単純な TE_{01} モードを対象とし、配管内に TE_{01} モードを効率的に伝播させるためのマイクロ波プローブを数値解析に基づいて設計・製作する。続いて製作したプローブの妥当性検証のため、約 12 m の配管を用いた測定試験を行い、配管に加工したスリットの検出性を確認すると共に、分散を補償するための新しい信号処理手法を提唱し、測定された信号に対してこの信号処理を施すことでの信号の飛行時間(Time of Flight; TOF)からのスリット位置定量的評価を試みた。

2. 数値解析

2・1 解析体系および解析手法

図 1 に配管内に TE_{01} モードにて伝播させるためのマイクロ波入射部の設計方針を示す。図 1(a)に示すように、円管を伝播する TE_{01} モードの電場は管の周方向の成分のみを持つという特徴がある。一方で、マイクロ波探傷法においてはネットワークアナライザ等のマイクロ波発振器により発振されたマイクロ波が TEM モードで同軸ケーブル内を伝播し、配管内に入射されることを想定しているが、同軸ケーブルの芯線を完全導体であると仮定すると、芯線の近傍では芯線表面に対して垂直な成分をもつ電場が発生すると考えられる。よって図 1(b)のように同軸ケーブルを配管の中心軸からずらすように、対称性を考慮して等間隔に複数配置することで、図 1(c), (d)のようにマイクロ波の配管内に TE_{01} モードによく似た電場分布が実現されると期待される。

Fig. 1 Design proposal of mode converter and predicted transition of electric field due to propagation.

以上の考察を踏まえ構築した解析モデルの概略図を図 2(a)に示す。これは内径 19.0 mm の直管内にマイクロ波を伝播させることを想定したものであり、直管の周方向に p 本 (図は $p=4$) の同軸ケーブルを挿入している。これらの端部(Port 1~Port p)より同位相、同振幅の TEM モードを発振し、管両端の Measuring Port 1 および Measuring Port 2 において透過したマイクロ波および発振ポートに反射したモードの強度を三次元有限要素法により求めた。図 2(b)に入射部面の詳細を示す。ケーブルの中心軸は直管の中心軸から Δr 離れた箇所であり、同軸ケーブルの誘

電体部分の長さ 15.0 mm, 芯線は内径 0.8 mm, 内部誘電体は内径 2.2 mm, 被覆材の内径は 3.0 mm である. ケーブルの被覆材の端部は配管の内壁面と接する位置とした. また, 図中 PML とあるのは無限に長い配管を模擬するために設置した完全整合層(Perfectly Matched Layer)であり, この領域に進入した電磁波は反射することなく吸収される.

(a) Overview of analysis model.

(b) Details of excitation ports.

Fig. 2 Numerical analysis model.

本数値解析は商用有限要素法ソフトウェアである COMSOL Multiphysics v5.0 および v5.2a の RF モジュールを用いた. 本解析は三次元解析にて行い, その支配方程式は

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0 \quad (1)$$

$$k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \quad (2)$$

である. ただしここで $\mathbf{E}$ は電場, ϵ_0 は真空の誘電率, μ_0 は真空の透磁率, ϵ_r は比誘電率, μ_r は比透磁率, σ は導電率, j は虚数単位, ω は角周波数である. 配管内は空気としておりその物性値は, 比誘電率 1, 比透磁率 1, 導電率 0 S/m, また同軸ケーブルの内誘電体は比誘電率 1.687, 比透磁率 1, 導電率 0 S/m とした(Anritsu Company, 2011). 配管壁面, 同軸ケーブルの外導体および芯線はその表面における境界条件が次式で与えられる完全導体とした.

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0 \quad (3)$$

ただし式(3)において $\mathbf{n}$ は管壁面の法線ベクトルであり、解析における周波数は 0.5 GHz 刻み 20～30 GHz とした。参考のため、内径 19.0 mm におけるマイクロ波のモードの遮断周波数を表 1 に示す。支配方程式の離散化にあたっては二次の四面体要素および三角形要素を用い、要素の各辺は最長でも自由空間中を伝播する 30 GHz の電磁波の波長の 1/10 に相当する 1.0 mm とした。

Table 1 Cut-off frequency with a diameter of 19.0 mm.

Mode	Cut-off Frequency [GHz]
TM ₀₁	12.078
TM ₀₂	27.724
TE ₀₁	19.244
TE ₃₁	21.100
TE ₄₁	26.707
TE ₅₁	32.222
TE ₆₁	37.675

2・2 解析結果

図 3 に $\Delta r=6.0$ mm の場合において同軸ケーブル挿入数 p を 3, 4, 5, 6 と変化させたときの反射波および透過波の周波数特性を示す。図中縦軸の Energy Efficiency は各解析体系において発振されたエネルギーの総和を 1 として規格化しており、 S_{11} は発振ポートにて観測された反射波のエネルギーの総和の割合、それ以外は図 2 における Measuring Port 1 および Measuring Port 2 を透過した各モードのマイクロ波のエネルギーの割合を示している。

Fig. 3 Frequency characteristic of reflection and transmission at $\Delta r=6.0$ mm.

図3より、いずれにおいても TE_{01} モードが透過していること、また図3(a)の $p=3$ の場合および図3(b)の $p=4$ の場合については、 TE_{31} モードおよび TE_{41} モードがそれぞれの遮断周波数以上の帯域において透過することが確認できる。一般に TE_{nl} モードは電磁場の成分が周方向に n 回振動するモードであることから、 p 本のケーブルを挿入した場合、 TE_{pl} モードが誘起されやすいことが予想されるため、これは妥当な結果であると考えられる。なお、 $p=5,6$ の場合 TE_{51} モードまたは TE_{61} モードの伝播が予想されるが、表1よりこれらのモードの遮断周波数は本解析において設定した周波数帯を上回っているため、これらのモードは透過し得ない。したがって、本解析体系のような入射部形状において TE_{01} モードが支配的に伝播し得る周波数帯域は TE_{01} モードの遮断周波数と TE_{pl} モードの遮断周波数の間であるといえる。また $n=0$ の場合を除き、一般に n の値が大きいくほど TE_{nl} モードの遮断周波数は高い。したがってケーブル挿入本数 p を増やすことでより広帯域において TE_{01} モードを支配的に伝播させることができると考えられる。しかしながら、現実的にはポート数の増加に伴いすべての発振ポートにおいて振幅および位相をそろえることは困難となり、また形状が複雑化することで製作性が悪化することが考えられる。

現実的に内径 19.0 mm の配管の周方向に設置が可能である最大本数と考えられる $p=4$ の場合について、同軸ケーブル中心軸 Δr を変化させた場合の TE_{01} モードの透過特性を図4に示す。20~25 GHz において強度が最大となり、かつ周波数依存性が小となるのは $\Delta r=6.0$ mm ($\approx 0.63r$) のときである。よって、本実験においては図3(b)に示した特性をもつ $\Delta r=6.0$ mm となるモード変換器を製作することとする。

Fig. 4 Frequency characteristic of TE_{01} mode when $p=4$.

3. 実証実験

3・1 実験方法

3・1・1 実験体系

解析結果に基づき製作した4分岐 TE_{01} モード変換器を図5に示す。このモード変換器は内径 19.0 mm、肉厚 3.0 mm、長さ 100 mm のフランジ加工された真鍮管に4つの同軸ケーブルコネクタ(Anritsu 社製 K101F-R)と4本のセミリジッドケーブル(Anritsu 社製 K118)が図4に示した $\Delta r=6.0$ mm 相当となるように挿入されたものであり、コネクタより同位相、同振幅の TEM モードが入射されることでモード変換器端部から TE_{01} モードのマイクロ波が発振されるようになっている。

実験体系を図6に示す。本実験ではモード変換器の右端に 5.5 m 管、左端に 6.0 m 管をフランジ接続した全長 11.6 m、内径 19.0 mm、肉厚 3 mm の真鍮管を用いた。ネットワークアナライザ(Agilent Technologies 社製 E8363B)より発振されたマイクロ波信号がフレキシブル同軸ケーブル(潤工社製 MWX051)を伝播し、4分岐パワーディバイダ(et industries 社製 D-640-4)に入射され、信号が4分岐される。分岐された信号はフレキシブル同軸ケーブル(潤工社製 MWX241)を伝播しモード変換器を通じて管内に入射され、反射信号がネットワークアナライザにより測定される。反射信号の測定は周波数領域で行い、入射信号と反射信号の比を示す S パラメータを離散逆フーリエ変換することにより時間領域信号を得た。周波数帯は図3(b)において TEM モードから TE_{01} モードへの変換特性が優れている 20~25 GHz、測定点数は 3201 点とした。なお、入射するマイクロ波は各周波数に対応した正弦

波である。また、これらの波はネットワークアナライザに接続されている同軸ケーブルの先端部分において振幅 1, 位相 0 deg となるように校正しており、擬似的にパルスを入射しているとみなすことができる。

図 7 に本実験において割れを模擬するために用いたスリットの形状を示す。本実験では管軸方向を向いたスリットと管周方向を向いたスリットを用いた。いずれも幅 1 mm の貫通スリットであり、軸方向スリットは長さ $l_a=10.0, 20.0, 30.0$ mm のものを、また周方向スリットは開口角およそ 45, 90, 180 degree に相当する周方向長さ $l_c=7.3, 15.0, 29.8$ mm のものを準備した。スリットの中心位置は図 6 に示す入射部右端から $L=0.5, 2.0, 3.5, 5.0$ m の 4 通りとした。なお、使用する周波数帯における表皮深さは約 1 μm であるためにスリット深さは信号に大きな影響を与えないと推察されるが、貫通部からのマイクロ波の漏洩を避けるためスリットの外表面は厚さ約 80 μm の銅箔で被覆している。

Fig. 5 TE₀₁ mode convertor.

Fig. 6 Experimental system.

Fig. 7 Orientation of the slit.

3・1・2 分散補償法

円管内を管軸 z 方向に伝播する電磁波の位相 ϕ および位相速度 v_p は以下のように表される。

$$\phi = \omega t - \beta z + \phi_0 \quad (4)$$

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} \quad (5)$$

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left(\frac{\rho_{nm}}{a}\right)^2} \quad (6)$$

ここで β は位相定数, ϕ_0 は $t=z=0$ における位相, c は光速, a は管半径, ρ_{nm} はモードによって決定される固有値であり伝播モードが TM_{nm} モードの場合は n 次の第 1 種 Bessel 関数の m 番目の根, TE_{nm} モードの場合は n 次の第 1 種 Bessel 関数の導関数の m 番目の根である. v_p は周波数依存性があり分散性を有するため, パルス波として入射した信号は伝播とともに形状が崩れていく. したがって, TOF によりきずを評価する本検査手法においては精度の低下の原因となる. そこで, $z=0$ において入射した信号が $z=L_c$ にて反射し, この反射信号が $z=0$ にて観測されたと仮定すると, ϕ に式(7)で表されるような ϕ_c を加算することで, 観測された反射信号が光速で伝播するパルス波であるとみなすことができる. この信号処理手法を分散補償法と呼ぶ (Sakai, 2012).

$$\phi_c = 2L_c \left(\beta - \frac{\omega}{c} \right) \quad (7)$$

実際の反射波発生位置を予測する際は, 予測位置 L_c をマイクロ波入射部端部から被測定管終端まで変化させ, 各 L_c に対する時間領域信号強度の最大値を取得する. 従来の分散補償法においては補償された時間領域信号から信号強度の最大値を取得する際, 反射波が観測される時刻から管終端からの反射波が観測される時刻までの, 広範囲の信号を考慮しているため, 時として S/N 比が小さくなるという課題があった. そこで, 本研究においては最大値の抽出の際, 信号の明瞭化のため補償された時間領域信号に対し以下のような矩形窓関数 $w(t)$ を乗じ, $t=t_c$ の近傍の値のみを考慮することを提案する.

$$w(t) = \begin{cases} 1 & |t - t_c| \leq \Delta t \\ 0 & |t - t_c| > \Delta t \end{cases} \quad (8)$$

$$t_c = t_0 + \frac{2L_c}{c} \quad (9)$$

ここで t_c は図 6 におけるモード変換器の入射面を $z=0$ とし, $z=L_c$ で生じた反射波が観測されると予想される時刻であり, t_0 はモード変換器入射部からの反射信号が観測される時刻, Δt は $t=t_c$ からの最大値の抽出範囲を示す. なお, 予備検討に基づき本実験では $\Delta t=0.2$ ns とした.

3・2 実験結果および考察

3・2・1 時間領域信号

$l_a=30.0$ mm の軸方向スリット及び $l_c=29.8$ mm の周方向スリットの設置位置 L を変化させて測定したときに得られた信号を, スリットがない場合に測定された信号と併せて, それぞれ図 8, 図 9 に示す. いずれの条件においてもスリットがある場合と無い場合との信号に明瞭な差異を確認することができる. また, いずれの測定においても確認される $t=0.0$ ns 付近のピークはネットワークアナライザに接続されたケーブル先端からの反射波およびパワーディバイダからの反射波, $t=10.2$ ns のピークはモード変換器の入射面における反射波であり, $t=50\sim60$ ns の 2 つのピーク, $t=70$ ns 以降のなだらかなピークはそれぞれ TM_{01} モードまたは TE_{01} モードの伝播による管両端からの反射波であると考えられる. 図 8(a)~(d)を比較すると, スリット位置 L の増加に伴い軸方向スリットからの信号の到達が遅れると共に管内を伝播するマイクロ波の分散により反射波が崩れていることを確認できる. 図

9(a)~(d)においても同様の傾向を確認できるが、その度合いは図8のものよりも小である。これは周方向のスリットは主としてTMモードのマイクロ波により検出されること、また同一の周波数帯においてはTE₀₁モードの分散の度合いが大きいことから、妥当な結果であると考えられる。

Fig. 8 Reflections from the axial slit with the length of $l_a=30.0$ mm. The presence of the axial slit provides clear differences between the signals, while the signals with the axial become unclear with L because of the dispersion of the microwave.

Fig. 9 Reflections from the circumferential slit with the length of $l_c=29.8$ mm. The signals with the circumferential slits are clearer than those shown in Fig. 8 because of the less dispersion of the microwave.

3・2・2 分散補償法適用結果

図 2(b)の 20～25 GHz において TE_{01} モードおよび TM_{01} モードの透過が確認できることから、これら 2 つのモードが管内に伝播したとみなしてそれぞれの場合について 3.1.2 に述べた分散補償法を適用する。

図 10 は、図 8(b)に示した $l_a=30.0$ mm、 $L_s=2.00$ m の軸方向スリットがある場合の信号に対し TE_{01} モードが伝播したとみなして分散補償法を適用した結果である。図中 L_p はモード変換器端部からのスリット予測位置を示しており、 $L_p=2.0$ m として分散補償法を適用した場合は信号処理の結果信号の波形はパルス波となる一方 $L_p=1.0, 3.0$ m とした場合は得られる波形はパルスとは大きく異なったものとなっている。これは分散補償時の位相の補正が不十分もしくは過剰であったためである。

Fig. 10 Result of signal processing that assumed propagation of TE_{01} mode.

図 11 は管内に TE_{01} モードが伝播、図 12 は管内に TM_{01} モードが伝播したとみなして分散補償法を適用し、 L_p に対する分散補償法適用後の時間領域信号のピーク値を抽出した結果を示している。なお前節の結果よりモード変換器の入射面における反射波が $t=10.2$ ns にて観測されたことから、式(9)において $t_0=10.2$ ns とした。いずれの場合においても $L_p=5.5, 6.0$ m においてピークが確認できるが、これは管両端からの信号であると考えられる。

TE_{01} モードが伝播したとみなして分散補償法を適用した場合、図 11(a), (b), (c)の矢印で示すように軸方向スリットからの信号が明瞭となり、実際のスリット位置 L とスリット予測位置 L_p は一致していることが確認できる。一方、図 11(d), (e), (f)のように、周方向スリットがある場合はピークが確認できるものの L と L_p は一致しない。これは分散が正しく補償されなかったためであり、よって図 9 に示した周方向スリットからの反射波は、管内を伝播する TE_{01} モードのマイクロ波によるものではないと判断される。尚、図 11(a), (b), (c)を比較すると、スリット長さ l_a と共に信号強度が増加しており、きずが大であるほど信号も大という妥当な結果が得られていることが確認できる。

Fig. 11 Prediction of position of slits using signal processing that assumed propagation of TE_{01} mode.

Fig. 12 Prediction of position of slits using signal processing that assumed propagation of TM_{01} mode.

TM_{01} モードが伝播したとみなして分散補償法を適用した場合、以上とは逆に、図 12(a), (b), (c) のように軸方向スリットからの信号は不明瞭である、一方で図 12(d), (e), (f) の矢印で示すように周方向スリットからの信号が本来あるべき箇所に確認できる。これは周方向スリットからの反射波は TM_{01} モードのマイクロ波によるものであることを示しているが、図 3(b) に示したように、製作したモード変換器では 1 割程度 TM_{01} モードのマイクロ波が発生することを踏まえると、適切な分散補償を行った場合でも周方向スリットからの反射波は軸方向スリットからのものと比べて小であることと共に、妥当な結果と判断される。以上の議論より、2.2 節において想定された TE_{01} モードまたは TM_{01} モードが伝播したとみなして分散補償法を適用することでスリットの予測位置と実際の位置がほぼ一致することから、数値解析結果及び実験結果の整合性が確認できる。さらに、モード変換器は TE_{01} モードへの変換効率が 100% ではないことにより周軸両方向のきずの検出が可能となっているといえ、周軸いずれの割れも発生しうるような実機配管検査においては必ずしも変換効率 100% のモード変換器を用いる必要は無いということを示唆した結果でもありと考えられる。

4. 結 言

本研究ではマイクロ波探傷法の高度化のため、配管内の軸方向割れを検出し得る TE_{01} モードを伝播させ得るモード変換器の形状を数値解析により検討および最適化し、製作したモード変換器を用いて割れを模擬したスリットからの反射波を評価し、さらに信号処理によるスリット位置の定量的評価を試みた。数値解析においては内径 19 mm の配管において同軸ケーブルを配管の中心軸からずらし管側面から等間隔に挿入することで TE_{01} モードを支配的に伝播させられることを確認した。数値解析により最適化したモード変換器を用いた検証試験においては、スリットの有無による反射信号の差異を評価することで軸方向スリットからの反射波を確認した。一方で周方向スリットからの反射波は確認できたものの、その程度は軸方向スリットのものよりも小であった。また、分散補償法を適用することで反射波の TOF によるスリット位置の評価を行い、 TE_{01} モードの伝播による軸方向スリットの位置特定が可能であることを示した。

謝 辞

本研究は科研費（課題番号 15K14298）及び特別研究員奨励費（課題番号 14J04906）の助成を受けたものです。

References

- Anritsu Company, Precision RF & Microwave Components, Catalog No. 11410-00236, (2011).
- Eybpoosh, M., Berges, M., and Noh, H. Y., An energy-based sparse representation of ultrasonic guided-waves for online damage detection of pipelines under varying environmental and operational conditions, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 82 (2017), pp. 260–278.
- Liu, L. S. and Ju, Y., A high efficiency nondestructive method for remote detection and quantitative evaluation of pipe wall thinning using microwaves, *NDT&E International* Vol. 44 (2011), pp. 106–110.

- Liu, L. S., Ju, Y., Chen, M. J. and Fang, D. N., Application of microwaves for nondestructive and high-efficiency detection of wall thinning locations in a long-distance metal pipe, *Material Transactions*, Vol. 52, No. 11 (2011), pp. 2091–2097.
- Mitra, M. and Gopalakrishnan, S., Guided wave based structural health monitoring: A review, *Smart Materials and Structures*, Vol. 25, No. 5 (2016), DOI:10.1088/0964-1726/25/5/053001.
- Nishiguchi, I., Inada, F., Takahashi, M., Ogawa, B., Inagaki, T., Ohira, T., Iwahara, K. and Yamakami, K., A review: Japanese pipe wall thinning management based on JSME rules and recent R&D studies performed to enhance the rules, *E-Journal of Advanced Maintenance*, Vol. 2 (2010), pp. 14–24.
- Rose, J. L., Ditre, J. J., Pilarski, A., Rajana, K. and Carr, F., A guided wave inspection technique for nuclear steam generator tubing, *NDT&E International*, Vol. 27, No. 6 (1994), pp. 307–310.
- Rose, J. L., A Baseline and vision of ultrasonic guided wave inspection potential, *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 124 (2002), pp. 273–282.
- Sakai, Y., Yusa, N. and Hashizume, H., Nondestructive evaluation of wall thinning inside a pipe using the reflection of microwaves with the aid of signal processing, *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 27, No. 2 (2012), pp. 171–184.
- Sasaki, K., Liu, L., Yusa, N. and Hashizume, H., Optimized microwave excitation probe for general application in NDT of wall thinning in metal pipes of arbitrary diameter, *NDT&E International*, Vol. 70 (2015a), pp. 53–59.
- Sasaki, K., Yusa, N. and Hashizume, H., Applicability of evaluation of non-destructive testing using microwave for a crack on the inner surface of metal tubes, *The 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM2015)*, Kobe, Japan, (2015b), Paper No. 3P1-C-1.
- Sasaki, K., Yusa, N. and Hashizume, H., Evaluation of the applicability of nondestructive testing using microwave for wall thinning inside a long-range metal pipe, *Proceedings of the 2nd International Conference on Maintenance Science and Technology (ICMST-Kobe 2014)* (2014), pp. 201–202.
- Sugawara, K., Hashizume, H. and Kitajima, S., Development of NDT method using electromagnetic waves, *JSAEM Studies in Applied Electromagnetic and Mechanics*, Vol. 10 (2001), pp. 313–316.