

非接触空中超音波技術を用いた配管の検査法の開発

Development of Inspection Method for Pipes by Non Contact Air Coupled Ultrasonic Testing

ジャパンプローブ(株)	高橋 雅和	Masakazu TAKAHASHI
ジャパンプローブ(株)	星野 秀和	Hidekazu HOSHINO
ジャパンプローブ(株)	小倉 幸夫	Yukio OGURA
九州電力(株)	北川 秀昭	Hideaki KITAGAWA
九州電力(株)	渡邊 肇	Hajime WATANABE
九州電力(株)	楠元 淳一	Junichi KUSUMOTO
九州電力(株)	金谷 章宏	Akihiro KANAYA

We have developed the constant incident angle method to inspect pipes by using high power square burst wave in non contact air coupled ultrasonic testing (NAUT). We also succeeded to scan the effective guided wave propagated circumferentially in pipes. This paper describes the optimum frequency, incident angle, the selection of probes and examples of detecting image pictures with the constant incident angle focusing method using focus probe.

Key Words: Constant incident angle, Propagation, Guided waves, Square burst wave, Pipes, NAUT

1. はしがき

矩形バースト超音波はパルス超音波と比較して強力なパワーが出ること、周波数や波数が容易に可変でき最適探傷条件を見いだし易い利点がある。今回、矩形バースト超音波を用いた非接触空中超音波検査(Non Contact Air Coupled Ultrasonic Testing; 以下 NAUT と呼ぶ)によって、パイプの円周方向に効率良くガイド波を送受できる方法を開発した。本報告では、ガイド波を効率良く伝搬させるための周波数・入射角の設定法、探触子の設計方法及び集束探触子を用いた入射角一定フォーカシング法等について述べる。

2. 最適周波数及び入射角の設定法

NAUT によるパイプ円周方向探傷では、円周方向で最大透過波を得る設定条件を確立する必要がある。平板の斜め入射の透過率については既に実験と理論が良く一致することを確認した^{1)~3)}。今回、平板の理論がパイプの斜め入射の透過率にも適用可能と考え以下検討した。図1において入射角 i のときの透過率 T は式(1)で表される^{1)~3)}。

$$T = \frac{4 N^2}{4 M^2 + (N^2 - M^2 + 1)} \quad \text{----- (1)}$$

ここに、

$$N = \frac{Z_1 \cos^2 2\theta_1}{Z_1 \sin k_{1y} d} + \frac{Z_1 \sin^2 2\theta_1}{Z_1 \sin k_{1y} d} \quad \text{----- (2)}$$

$$M = \frac{Z_1 \cos^2 2\theta_1}{Z_1 \tan k_{1y} d} + \frac{Z_1 \sin^2 2\theta_1}{Z_1 \tan k_{1y} d} \quad \text{----- (3)}$$

$$Z = \frac{\rho v}{\cos i}, Z_1 = \frac{\rho_1 v_1}{\cos \theta_1}, Z_2 = \frac{\rho_2 v_2}{\cos \theta_2} \quad \text{----- (4)}$$

$$k_{1y} = \frac{\omega}{v_1} \cos \theta_1, k_{2y} = \frac{\omega}{v_2} \cos \theta_2 \quad \text{----- (5)}$$

$$\sin \theta_1 = \frac{v_1}{v} \sin i, \sin \theta_2 = \frac{v_2}{v} \sin i \quad \text{----- (6)}$$

である。ここで、 v は空気中の音速、 v_1, v_2 は板材の縦波と横波の音速、 ρ は空気の密度、 ρ_1, ρ_2 は板材の密度、 d は板の厚さ、 i は入射角、 θ_1, θ_2 は板中での入射角 i に対する縦波と横波の屈折角、 k_{1y}, k_{2y} は板の厚さ方向の縦波と横波の波数成分、 Z, Z_1, Z_2 は入射角を考慮した音響インピーダンス、 ω は超音波の角周波数をそれぞれ示している。図1に NAUT によるパイプ円周方向の透過波を得るための実験方法を示す。

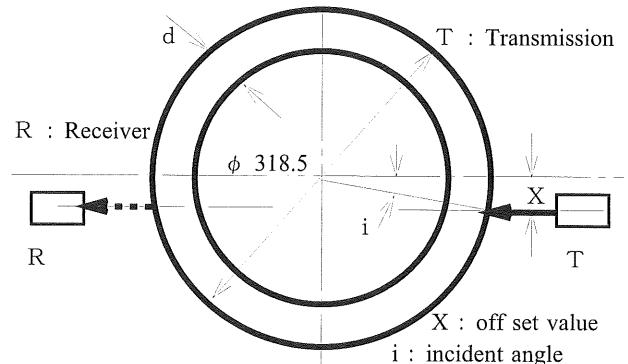


Fig.1 Experimental method to get maximum transmission wave in circumferential direction of pipe

図1の配置で送信探触子→空気→(鋼)パイプ→空気→受信探触子の径路で、空気と鋼の音響インピーダンスの相違で 90dB の損失がある。これをカバーするのに、①矩形バースト波によるハイパワーのパルサー・レシーバ、②高感度の探触子、③周波数フィルタを内蔵した外部プリアンプ等が必要である。実験に用いたパルサー・レシーバは JPR-10B-QD(ジャパンプローブ(株))で、プリアンプは周波数フィルタを内蔵した 60dB のもので、探触子は表1に示す3種類、試験体は外径 ϕ 318.5mm、肉厚 4.0 ~ 17.3mm の6種類で、実験は図1のX(入射角 i に対応)及び $f d$ (周波数 f ・肉厚 d)を変化させて最大透過波(透過率)を得る条件を求めた。入射角 i は管外径 D 、図1の偏心量 X から式(7)で求める。

Table 1 Probes used for experiment

Frequency	Probe type
400KHz	Plane probe 0.4K14 × 20N Line focusing probe:0.4K40 × 20N R190
800KHz	Plane probe 0.8K14 × 20N Line focusing probe:0.8K40 × 20N R190

$$i = \sin^{-1} \left[\frac{2X}{D} \right] \quad (7)$$

図2に最大透過波が得られる f_d と入射角の関係における計算値と実験値を示す。実験値と計算値は良く一致している。よって、式(1)～(7)を用いて各種サイズの配管に対し周波数 f 及び肉厚 d から入射角 i を決定することができる。

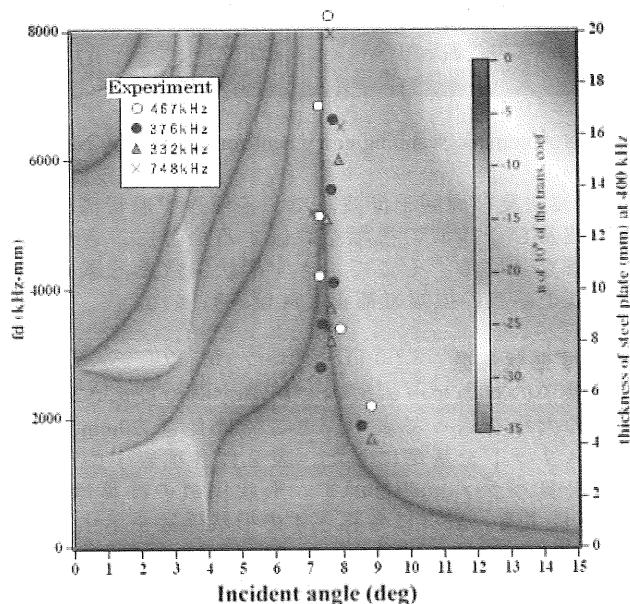


Fig.2 Relationship between frequency f , thickness d & incident angle i to get Maximum Round waves

3. 入射角一定フォーカシング法

図1の探触子の配置で平面探触子で探傷する場合、パイプの外面における超音波の入射位置によって入射角が異なり効率よく超音波を入射できない。そこで入射角を一定にする方法を考えた。図3に示す入射角一定フォーカシング法では、パイプの中心線上からずらしてO点に超音波ビームをフォーカシングすることによって、パイプに入射する超音波ビームの入射角を一定にすることができる。

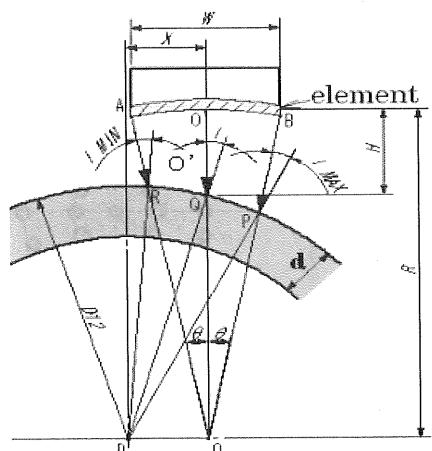


Fig.3 Constant incident angle focusing method

図3においてQ点、R点及びP点の入射角をそれぞれ i (探触子中心の入射角)、 i_{MIN} (最小入射角) 及び i_{MAX} (最大入射角) とすれば、図3の幾何学的位置から式(8)～(14)が得られる。

$$i = \sin^{-1} (2X/D) \quad (8)$$

$$\theta = \sin^{-1} (W/2R) \quad (9)$$

$$\angle ROD = (\pi/2 - \theta) \quad (10)$$

△DORで正弦法則を適用して

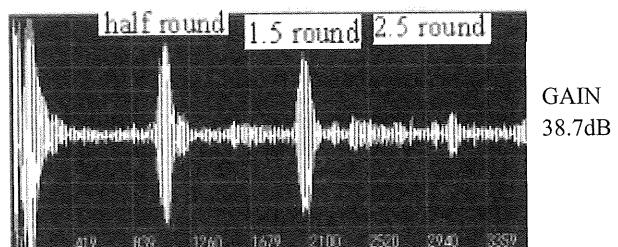
$$\frac{\sin(\pi/2 - \theta)}{DR} = \frac{\sin(i_{\text{MIN}})}{DO} \quad (11)$$

$$\sin(i_{\text{MIN}}) = \sin(\pi/2 - \theta)X/(OD/2) \quad (12)$$

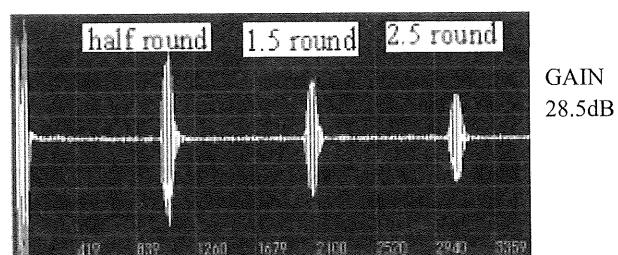
$$\frac{\sin(\pi/2 + \theta)}{DP} = \frac{\sin(i_{\text{MAX}})}{DO} \quad (13)$$

$$\sin(i_{\text{MAX}}) = \sin(\pi/2 + \theta)X/(OD/2) \quad (14)$$

例えば、 $D=318.5\text{mm}$ 、 $W=40\text{mm}$ 、 $X=20\text{mm}$ 、 $R=190\text{mm}$ の場合、 $i = i_{\text{MIN}} = i_{\text{MAX}} = 7.2^\circ$ となり図3の配管外面に対して入射角を一定にすることができる。この入射角一定フォーカシング法の効果を確認するために図1に示すレイアウトで実験を行った。その結果、図4に示すように平面探触子に比べ、入射角一定フォーカシング法の場合感度(10dB)、S/N比ともに向上することができた。なお、この実験では新たに開発した周波数フィルタを内蔵した外部プリアンプを用いた。



(a) Plane probe



(b) Constant incident focusing method

Fig.4 Comparison of round waves between plane probes and focusing probe

4. 周回波法・周回干渉波法及び反射法の開発

図5～図7に示す周回波法・周回干渉波法及び反射法の組合せによって配管の円周方向の探傷及びモニタリング方法を開発した。

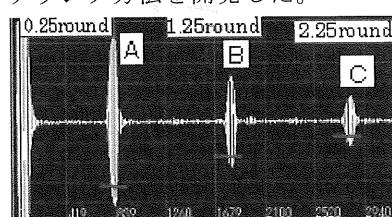


fig.5 Round circumferential wave method

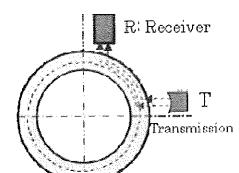


図5の周回波法はきずによって周回波の振幅が変化することを利用してきずを検出・評価する方法である。図6の周回干渉波法は図5の0.25周と1.25周の周回波を干渉させその振幅この変化からきずを検出・評価する方法である。

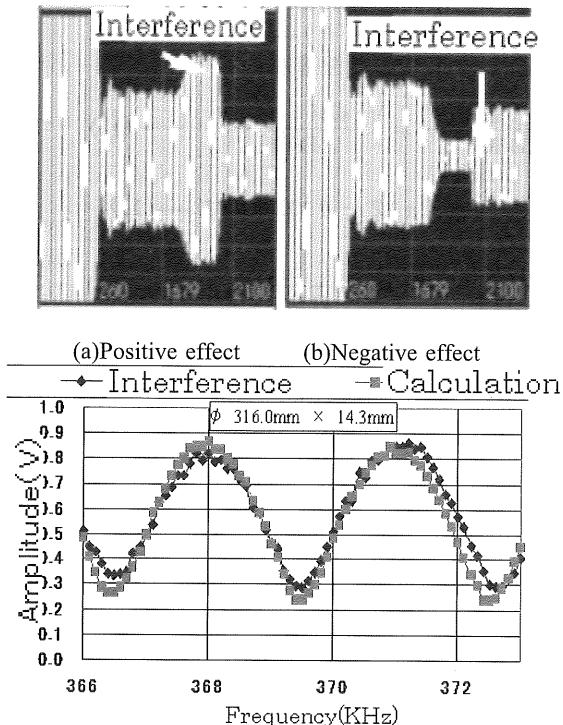


Fig.6 Interference of round circumferential wave method
周波数変化時の干渉波形の振幅 I は式(15)で求めた。

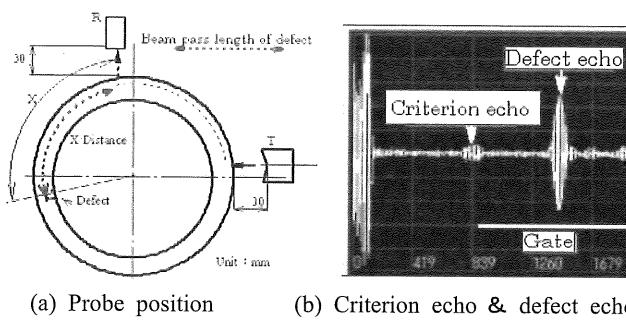
$$I = [(A + B \cos(\phi))^2 + (B \sin(\phi))^2]^{1/2} \quad (15)$$

但し、Aは図5の0.25周回波の振幅、Bは1.25周回波の振幅、 ϕ はAとBの位相差で式(16)による。

$$\phi = 2\pi [\pi D/(V/F)] \quad (16)$$

ここで、Dは配管の外径(mm)、Vはガイド波の音速(m/s)、Fは周波数(kHz)である。

図7に反射法を示す。Tから送信された超音波は管内を伝搬し、きずで反射し、Rで受信する。反射法はこのきずエコーを検出し評価する方法である。



5. 実験による検証
周回波法・周回干渉波法及び反射法の有効性を検証するために各種きず形状について実験した。実験は図8に示す自動超音波探傷画像装置を用いて行った。図

8に示すように配管の軸方向に探触子を走査して周回波・周回干渉波及び反射波の振幅を画像化した。周波数400KHz, 600KHz及び800KHzである。

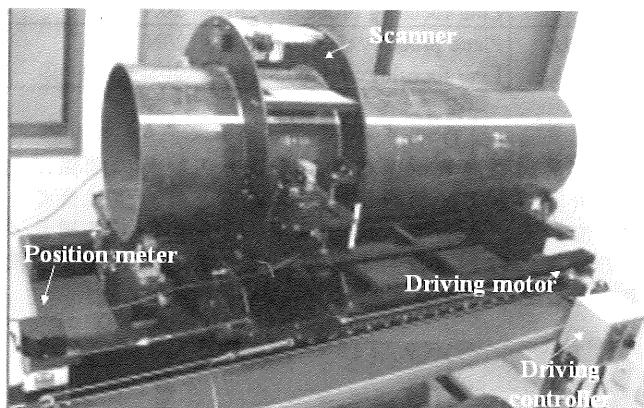


Fig.8 Automatic scanning equipment for imaging by NAUT

周回波法及び周回干渉波法で、各種きず形状について周回波及び干渉波の振幅を評価する場合に、きず形状の影響を受ける。そこで、きず形状係数を考慮し周回波及び干渉波の振幅を補正し評価を行った。

(1) きず形状係数

探触子の有効ビーム幅内で円周方向の投影された断面積の大小をもって表す。ここでは長さ20mm、深さtのスリットを基準にした。表2に各種きずの形状係数の計算パラメータを示す。形状係数の計算は式(17~21)による。表3に各種きずの形状係数を示す。

Table 2 Assumption to determine shape factor for flaw

Defect Shape	Defect Shape & Dimension
Slit	Depth : t
Circular Disk	Depth : t
Ellipse shape D2 type	Depth : t Width : 10mm Length : 20mm
Ellipse shape D 4 type	Depth : t Length : 20mm Width : 10mm
Pit Defect	Depth : t Diameter : $\phi 5$ Numbers : 25 FBH $\phi 5 \times 2mm$ $(\phi 5 \times 4mm)$

- ①スリット試験体の形状係数 SF=1、②円形減肉きず SF=20t/20t=1----- (17)、③楕円減肉 D2型きずは SF=t[(10-2t)+πt/2]/20t=[(10-2t)+πt/2]/20----- (18)
- ④楕円減肉 D4型きずの SF は楕円の面積から、 SF=10 π t/2/(20t)=π/4=0.785----- (19)
- ⑤ピットきずの SF の結果のみを示すと SF=0.8--- (20)

⑥外面を滑らかに仕上げたきずの SF は、
 $SF=20(t+0.9t)/2=20t=0.95$ ----- (21)
 図 9～図 10 に周波数 600kHz のきず形状を補正したマスターカーブを示す。図 9 は周回波法、図 10 は周回干渉波法である。

Table 3 Shape factor for various kinds of flaws

Depth (mm)	Shape Factor					
	Slit	Circular Disk	Ellipse Shape D2 Type	Ellipse Shape D4 Type	Pit Defect	Smooth Grinding
1	1	1	0.478	0.785	---	0.95
2	1	1	0.457	0.785	0.8	0.95
3	1	1	0.436	0.785	---	---
4	1	1	0.414	0.785	0.8	---
Ave	1	1	0.446	0.785	0.8	0.95

(2)きず形状を補正したマスターカーブ

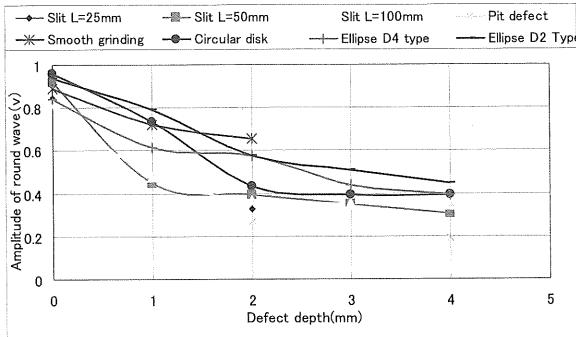


Fig.9 Master curve for round circumferential wave method

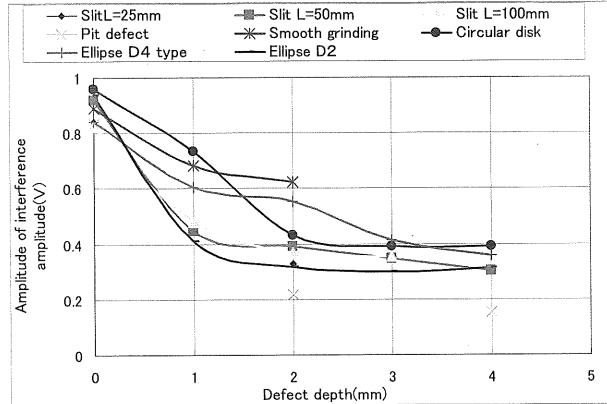


Fig.10 Master curve of overlap method for round circumferential waves

きずの深さが 1 mm までは周回波及び干渉波の振幅は低下するがこれを越えると低下の程度は小さくなる。

(3)マスターカーブによる評価

図 11 にマスターカーブを用いた評価手順を示す。
 ①周回波法・周回干渉波によって探傷する。②きずの長さが 20mm 以上のものはきず形状係数を考慮したマスターカーブを使用する。③マスターカーブによって深さを測定する。

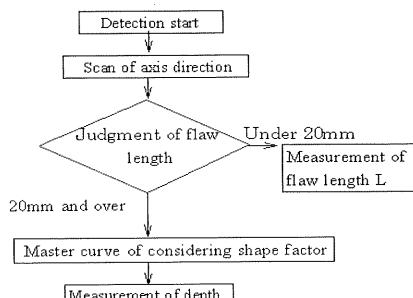


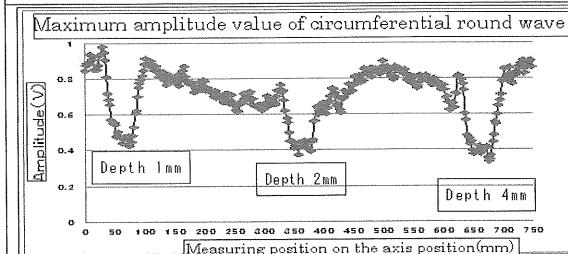
Fig.11 Measurement Procedure using master curve

きず長さが 20mm 未満の場合、きず長さより式(22)できず深さ F_t を推定する。ただし、A はきず長さ測定時の周回波(周回干渉波)の振幅

$$F_t = (20 / L) \times A \quad \text{----- (22)}$$

(4)画像例：図 12 にスリットきずの画像例を示す。図 12 に示すようにスリットの部分では明らかに周回波の振幅は低下している。

[Frequency: 600kHz : Test specimen: 50mm long slit]



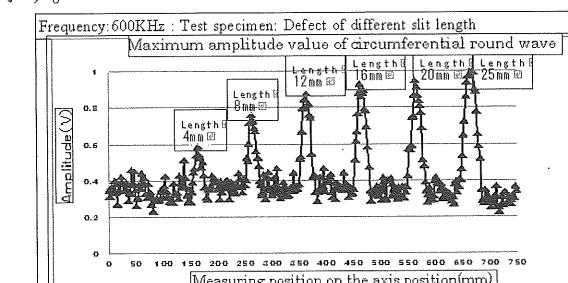
(a) Amplitude of round circumferential wave



(b) Example of image picture

Fig.12 Example of amplitude of round circumferential wave and image picture

図 13 に反射法によるスリットの反射波及び画像例を示す。



(a) Example of reflection echo from slits



(b) Example of image picture for reflection echo

Fig.13 Example of reflection echo from slits & image picture

6.まとめ

NAUT による矩形バースト超音波パルサー・レシーバを用いて配管の円周方向の探傷法を開発した。

(1) 集束探触子を用いた入射角一定フォーカシング法を開発した。(2) 周回波法・周回干渉波法及び反射法の組み合わせで配管のきずの検出・評価が可能になった。(3) NAUT を可能にするには①矩形バースト波によるパイパワーのパルサー・レシーバ、②高感度の探触子、③周波数フィルタを内蔵した外部プリアンプ等が必要である。

参考文献

- (1) 西野秀郎他：非接触エア UT の板材の斜め入射透過率に関する検討(1)、平成 19 年 NDI 秋季大会、PP.27-30, (2007)、(2) 高橋雅和他：非接触エア UT の板材の斜め入射透過率に関する検討(2)、平成 19 年 NDI 秋季大会、PP.31-34, (2007)、(3) H.Reissner, Helv.Phys. Acta, 7, PP.140-150, (1934)

謝辞

徳島大学の西野先生にはガイド波についての御指導・計算等の援助を頂いた。心から感謝致します。