

ガイド波用圧電式リング形センサーで励起した 円周 Lamb の共鳴現象を利用した肉厚測定法

Wall-thickness measurement by resonant phenomena of the circumferential Lamb waves generated and detected by eight transducer-elements located evenly on circumference of pipe.

徳島大学大学院先端技術科学教育部 森田 圭一 Keiichi MORITA Member
徳島大学大学院ソノテクノサイエンス研究部 西野 秀郎 Hideo NISHINO Member

Piezoelectric ring-shaped sensor (PeRS) has been widely used for guided wave inspection of piping. The PeRS is normally consisted of plural transducer elements located along circumference at regular interval. Due to the structure, in addition to the axially propagating torsional mode guided waves, circumferential (C-) Lamb waves have also been generated as spurious waves at the same time. Especially in the resonant conditions determined by both the specific frequencies and locations of sensor elements, the C-Lamb waves are dominantly and preferentially generated as actual spurious signals that may distort axially propagating waves. In this paper, this troublesome phenomenon is used not for the axially propagating guided waves but usefully for the measurements of wall thicknesses. The Principle, the verification and the accuracy of the measurements were shown.

Keywords: Ultrasonic, Nondestructive evaluation, Guided wave, Pipe

1. 諸言

ガイド波計測には、圧電式リング形センサー[1]と磁歪式センサー[2]の2つが主に用いられている。本研究で利用する圧電式リング形センサーは、円周に等間隔に配置された探触子エレメントで構成される。例えば $T(0, 1)$ 基本モードガイド波の励起では、8つの各探触子エレメントを配管の周方向に同位相で駆動すればよい(図1)。一方で周方向への探触子エレメントの駆動は、同時に円周 Lamb 波の励起条件にも符合し、それを励起する。励起される円周 Lamb 波は、探触子エレメントと円周 Lamb 波の波長が特定の関係を有する時に共鳴し、非常に大きな振幅として観測される[3, 4, 5]。この円周 Lamb 波の共鳴現象を利用した新しい肉厚測定法に関する研究を行ってきた。本報告では入力サイクル数増加による Q 値の変化と共鳴周波数の評価方法について考察したので報告する。

2. 共鳴現象と肉厚測定原理

共鳴現象は、配管の円周中に円周 Lamb 波の波長が連続的に(位相ギャップ無しに)整数個存在することで発生する。図1には本研究で用いた波長が 1, 2, 4, 8 個存在

する(角波数 1, 2, 4, 8)場合を示した。角波数 1 のときは、探触子エレメント⑧, ①, ②と④, ⑤, ⑥を逆位相方向(図1の矢印)に振動させれば共鳴が起きる。このとき③, ⑦は振動させない。角波数 2 のときは、①, ⑤と③, ⑦を逆位相方向で②, ④, ⑥, ⑧は振動させなければ共鳴が起きる。角波数 4 のときは、①, ③, ⑤, ⑦と②, ④, ⑥, ⑧を逆位相方向に振動させれば共鳴が起きる。角波数 8 では、8つの探触子エレメントを全て同位相で振動させることで共鳴が起きる。

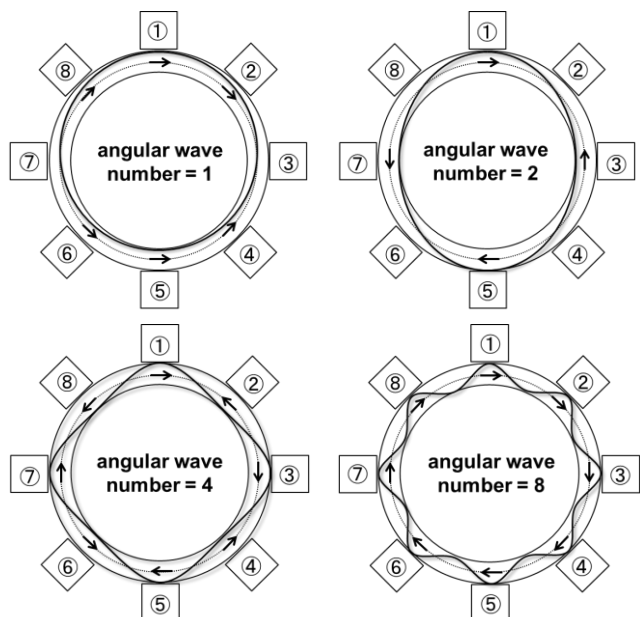


図1 円周 Lamb 波共鳴定在波と探触子エレメントの関係

円周 Lamb 波の波長(周波数) は配管の肉厚で変化する。このため円周 Lamb 波の周波数を掃引し、共鳴現象が発生する共鳴周波数を求めることで配管の肉厚を求めることが可能である。図 2 に角波数に対する共鳴周波数の関係をアルミニウム (Al) パイプの場合で示す。CL₁ mode と CL₂ mode は円周 Lamb 波の 2 つの最低次モードで、それぞれ Lamb 波の S₀ と A₀ モードに似たモードである。図 2 より角波数によって共鳴周波数が異なることがわかる。図 3(a)~(d)に外径 60.5 mm の Al パイプにおける肉厚と共鳴周波数の関係を角波数 1, 2, 4, 8 の場合で示した。さらに本報告で最終的に得られた実験結果も示している。

3. 実験装置および実験方法

図 4 に実験配置図を示す。試験体には外径 60.5 mm, 肉厚 3.9 mm と肉厚 5.5 mm の Al パイプを用いた。円周 Lamb 波の励起と検出には圧電式リング形センサーを用いた。センサーは円周方向に 8 個の探触子が等間隔に配置されたものを 1 組として、軸方向に 30 mm 離れて 2 組設置されている。各組それぞれを励起と検出に用いた。上記測定原理に従って、角波数が 1, 2, 4, 8 となるように振動させた。入力サイクル数は図 5(a)と図 5(b)にそれぞれ示した 13 波と 25 波を使用した。周波数は角波数 1 のとき 30 - 70 kHz, 角波数 2 のとき 40 - 80 kHz, 角波数 4 のとき 100 - 150 kHz, 角波数 8 のとき 40 - 90 kHz をそれぞれ 1 kHz ステップで変化させた。

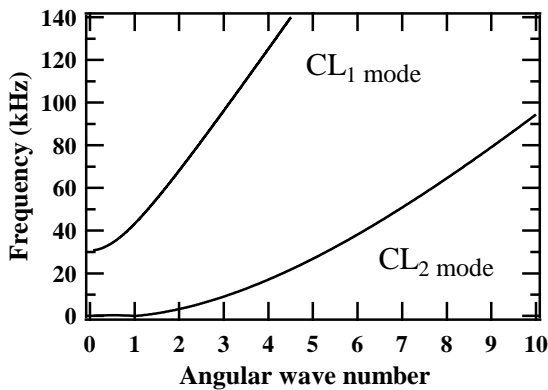


図2 円周 Lamb 波の分散曲線

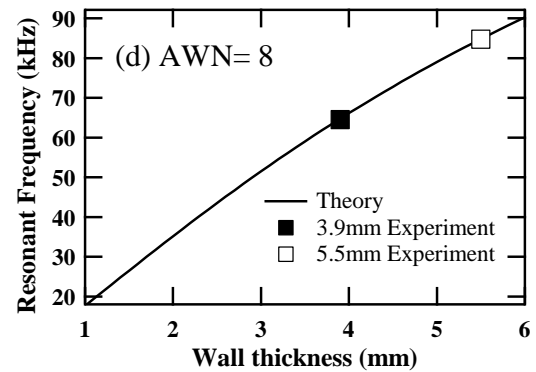
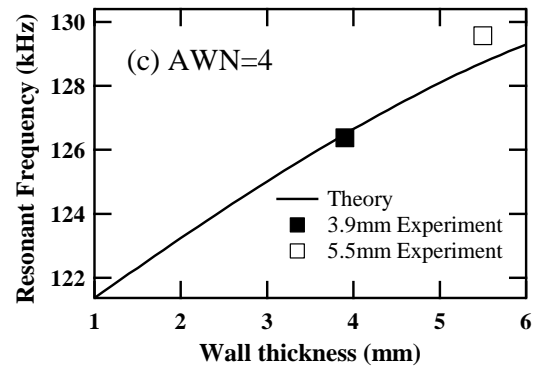
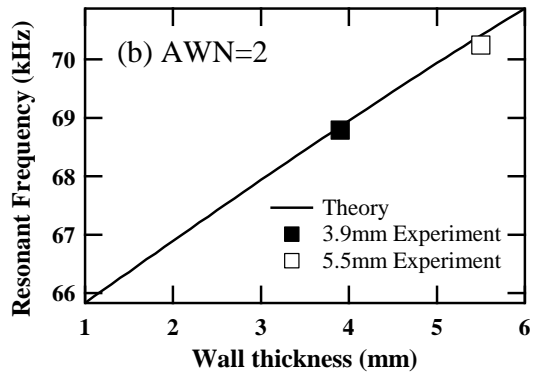
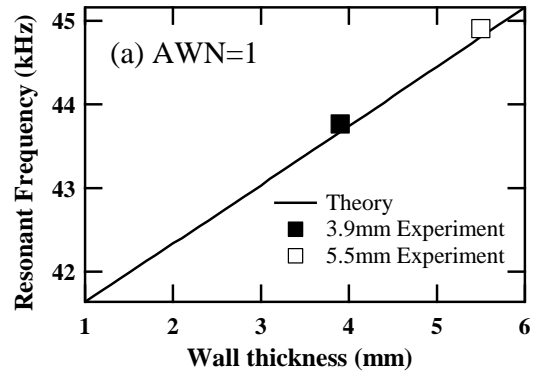


図3 共鳴周波数と肉厚の関係 (理論)

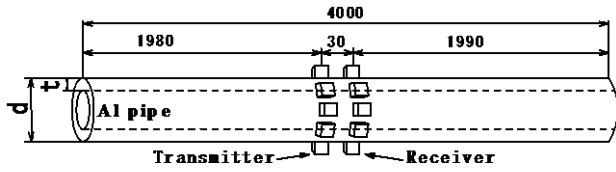
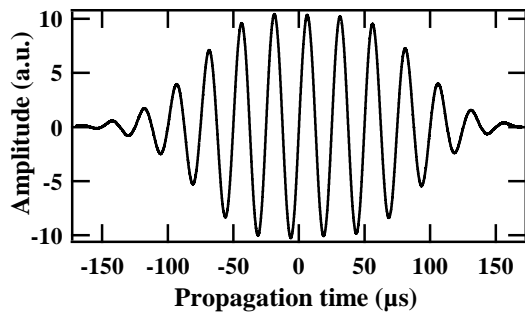
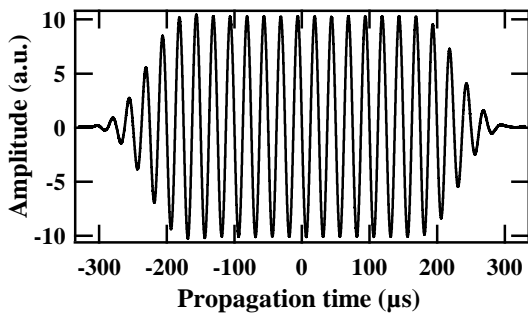


図4 実験配置図



(a) 13波



(b) 25波

図5 入力信号

4. 実験結果

図6に周波数ごとに得られた入力サイクル数25波のRF時間波形として角波数8、肉厚3.9mmの場合を示した。65kHz近傍に見られるサイクル数の大きな波束が共鳴によるリングングを示している。信号の出力時刻から20周期目における振幅値を、各周波数の関数として図7に示した。○と□が、それぞれ入力サイクル数13波と25波を示している。13波と25波で、Q値はそれぞれ7.2と15.6であり、25波の場合にピークが比較的鋭くQ値の上昇が確認できた。中心周波数の特定のため、最大値とその左右3つの計測値に対してガウス曲線への最小2乗近似を行った。13波と25波で、中心周波数はそれぞれ64.53kHzと64.82kHzとなり理論計算値との誤差はそれぞれ0.344%と0.112%となった。このことから25波を使うことで優位性が確認できた。上記は20周期目の振幅値で評価を行ったが、周期により推定される中心周波数が異なる

ことが考えられる。表1に角波数1, 2, 4, 8における20, 25, 30, 35, 40周期目の信号出力時刻から求めた共鳴の中心周波数と平均値、理論計算値を肉厚3.9mmと5.5mmの場合で示した。角波数8のとき平均値と理論計算値の誤差は、肉厚3.9mmと5.5mmの場合でそれぞれ0.132%, 0.636%となり、実験結果は理論計算値と非常によく一致した。20~40周期における共鳴周波数から推定される肉厚は、3.9mmの場合で3.89~3.91mm(最大肉厚誤差0.317%), 5.5mmの場合で5.54~5.56mm(最大肉厚誤差1.12%)であった。その他の角波数においても、周波数で見たときの誤差は全て1%以内で収まり、肉厚で見たときの誤差は最大で3.24%となったが全体的に良好な計測ができた。

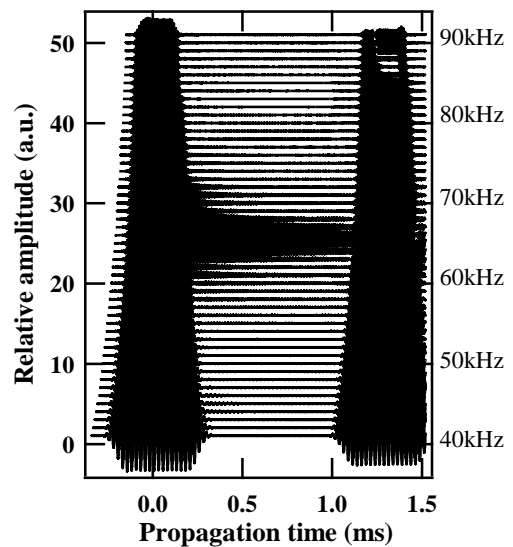


図6 周波数別のRF信号、65kHzに共鳴が観測できる。

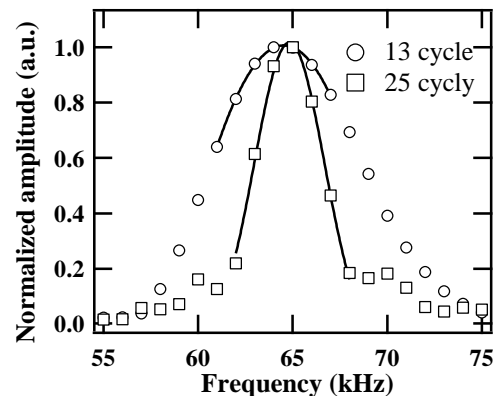


図7 共鳴周波数分布

5. 結言

本報告では、ガイド波用圧電式リング型センサーで励起される円周Lamb波の共鳴周波数を用いてパイプの肉

厚を推定する方法を示した。角波数 1, 2, 4, 8 において 2 種類の肉厚で実験した。推定精度を高めるために入力サイクル数と共鳴周波数の決定方法について考察を行った。入力サイクル数を増やすことで Q 値が増加することが確認できた。共鳴周波数の中心値の決定には、共鳴現象により発生する継続時間の長いリングング波形の振幅値を取得する必要があるが、本手法では 20 周期から 40 周期における振幅値で決定した。その結果、角波数 8 のとき 3.9 mm と 5.5 mm の公称肉厚の 50A 配管で 3.89 – 3.91 mm (最大肉厚誤差 0.317%), 5.5 mm の場合で 5.54 – 5.56 mm (最大肉厚誤差 1.12%) で計測できることが確認できた。

参考文献

- [1] D.N.Aellye and P.Cawly: Mater.Eval.55(1997)504.
- [2] H.Kwun and K.A.Bartel: Ultrasonics36(1998)171.
- [3] 問山ら, 非破壊検査協会, 平成 23 年春季講演概要集, p.7.
- [4] 片岡ら, 非破壊検査協会, 平成 23 年度秋季講演論文集, p.103-104.
- [5] 森田ら, 機械学会 2012 年度年次大会講演論文集, J042012.

表 1 共鳴周波数の中心値

角波数 1

肉厚	周期数	20	25	30	35	40	平均値	理論値 (実験値との誤差)
3.9 mm	共鳴周波数 (kHz)	43.60	43.59	43.60	43.67	43.69	43.62±0.042	43.67 (0.09%)
	推定肉厚 (mm)	3.80	3.78	3.80	3.90	3.92	3.84±0.059	3.9 (1.52%)
5.5 mm	共鳴周波数 (kHz)	44.86	44.80	44.80	44.75	44.89	44.82±0.049	44.81 (0.02%)
	推定肉厚 (mm)	5.58	5.49	5.49	5.43	5.62	5.52±0.068	5.5 (0.38%)

角波数 2

肉厚	周期数	20	25	30	35	40	平均値	理論値 (実験値との誤差)
3.9 mm	共鳴周波数 (kHz)	69.04	69.01	68.89	68.86	68.93	68.95±0.068	68.85 (0.14%)
	推定肉厚 (mm)	4.091	4.059	3.938	3.914	3.977	4.00±0.068	3.9 (1.97%)
5.5 mm	共鳴周波数 (kHz)	70.59	70.5	70.43	70.37	70.37	70.45±0.084	70.41 (0.05%)
	推定肉厚 (mm)	5.703	5.6	5.524	5.469	5.466	5.55±0.089	5.5 (0.61%)

角波数 4

肉厚	周期数	20	25	30	35	40	平均値	理論値 (実験値との誤差)
3.9 mm	共鳴周波数 (kHz)	127.39	126.97	126.52	126.21	126.10	126.64±0.48	126.49 (0.12%)
	推定肉厚 (mm)	4.54	4.25	3.95	3.74	3.67	4.03±0.33	3.9 (3.24%)
5.5 mm	共鳴周波数 (kHz)	128.96	128.72	128.60	128.51	128.47	128.65±0.18	128.73 (0.06%)
	推定肉厚 (mm)	5.70	5.60	5.52	5.47	5.47	5.45±0.15	5.5 (0.89%)

角波数 8

肉厚	周期数	20	25	30	35	40	平均値	理論値 (実験値との誤差)
3.9 mm	共鳴周波数 (kHz)	64.82	64.69	64.64	64.60	64.57	64.66±0.088	64.75 (0.13%)
	推定肉厚 (mm)	3.91	3.90	3.89	3.89	3.89	3.89±0.0063	3.9 (0.15%)
5.5 mm	共鳴周波数 (kHz)	85.54	85.42	85.39	85.32	85.29	85.39±0.086	84.85 (0.64%)
	推定肉厚 (mm)	5.56	5.55	5.55	5.54	5.54	5.55±0.0076	5.5 (0.89%)