

円周 Lamb 波による自己干渉性を利用した減肉計測法

Accurate wall thickness measurement using autointerference of Circumferential Lamb wave.

徳島大学大学院先端技術科学教育部 川野 亜久利 Aguri KAWANO
徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部 西野 秀郎 Hideo NISHINO Member

In this paper, a method of accurately measuring the pipe wall thickness by using noncontact air-coupled ultrasonic transducer (NAUT) was presented. In this method, accurate measurement of angular wave number (AWN) is a key technique because the AWN is changes minutely with the wall thickness. An autointerference of the circumferential (C-) Lamb wave was used for accurate measurements of the AWN. Principle of the method was first explained. Modified method for measuring the wall thickness near a butt weld line was also proposed and its accuracy was evaluated within 6 μm error. It was also shown in the paper that wall thickness measurement was accurately carried out beyond the difference among the sensors by calibrating the frequency response of the sensors.

Keywords: Non Contact Air Coupled UT, Pipe wall thickness, Circumferential Lamb waves, Calibrating air-coupled sensors

1. 諸言

非接触で超音波を固体中に伝搬させ、非破壊検査に利用できる非接触空気超音波センサー (Noncontact Air-coupled Ultrasonic Transducer :NAUT) が、近年の感度上昇を背景に広く用いられている。本研究グループでは、NAUT を用いて配管の円周方向に伝搬するガイド波である円周 (Circumferential: C-) Lamb 波を励起させることで、非接触で配管の減肉計測を行う手法の開発を行ってきている。配管の全周減肉を対象とした相対精度で 6 μm 程度の精度を有する減肉計測法を既に構築してきた^{1,2)}。この方法では、肉厚により音速が異なることを利用して肉厚量を推定することを基本とするが、肉厚 10 μm の変化が音速では 0.1% 程度の変化であることから、その差異の検出は一般に非常に困難である。筆者らは、これらの困難を克服するために、サイクル数の長い (150 波程度) C-Lamb 波を用いる。こうすることで、周回伝搬経路上で自ら重ね合わせが発生し、自己干渉により振幅値が変化する。振幅値変化は位相の変化に敏感なため、肉厚の微小な変化による微小な位相速度の変化でも、干渉振幅値は大きく変化する。本方法はこのことを利用して肉厚の精密な推定を可能としている^{1,2)}。さらに本報告の最新の成果として、以下 2 点を示す。一つは溶接線近傍に本方法を適用する場合の溶接線の影響を考慮した減肉量推定法³⁾

である。溶接線の影響による伝搬挙動を考慮した計算モデルを用いることで、配管の肉厚を 6 μm 程度の高精度で測定することに成功している³⁾ので報告する。溶接線近傍の領域に発生する流れ加速型腐食 (Flow Accelerated Corrosion; FAC) においても有効な手法である。他方は利用するセンサーの校正による更なる高精度化⁴⁾である。本手法を適用する前にセンサーの周波数特性をインパルス応答から求めておき、それを用いて周波数特性の平坦化を実現することで、センサーに依存した計測誤差を大幅に低減できることを報告する。

2. 円周 Lamb 波の重ね合わせによる自己干渉性を利用した減肉測定法

2.1 測定原理

本研究では、CL₂ mode (Lamb 波の A₀ モードに似たモード) の 340 kHz 近傍の円周 Lamb 波を使用している。図 1 に 340 kHz 近傍における減肉による位相速度の分散関係の変化を示す。減肉により、位相速度の増加が確認できる。しかしその程度は減肉量 0.1 mm で位相速度が約 1% (20 m/s) の減少と微小で、その差を高精度に検知することは一般的には困難である。そこで、本研究では、この位相速度の変化を円周 Lamb 波の重ね合わせ振幅値の変化としてとらえる方法を用いる。図 2 に本方法の原理を示す。Transmitter から励起された縦波空中超音波が、最適な臨界角でアルミニウムパイプ表面に入射されることで、円周 Lamb 波が励起される。励起された円周

Lamb 波は、Transmitter と対向に設置された Receiver によって約 0.5 周回った後に検出され、その後も n 周回った後に検出される。本方法では、サイクル数が大きいバースト波を用いることで、各周回波を重ね合わせ、その重ね合わせ振幅値を肉厚推定に用いる。 n 回目までの周回波の重ね合わせ振幅値 A は、以下の式で示される。

$$A = \left| \sum_{k=0}^n A_k \exp(2\pi i k p) \right| \quad (1)$$

ここで A_k , k , p は、各周回波の振幅値、周回数、円周 Lamb 波の角波数である。図 3 に減肉による重ね合わせ振幅値の周波数依存性として 0.5 周と 1.5 周の重ね合わせ振幅値を示す (理論値)。この振幅値変化は、周波数の変化によって周期的に変化しているが、最大の振幅値をとる周波数 (ピーク周波数) は肉厚によって変化する。本手法は、このピーク周波数から減肉量を推定するものであり、概ね $6 \mu\text{m}$ の相対推定精度を達成している。

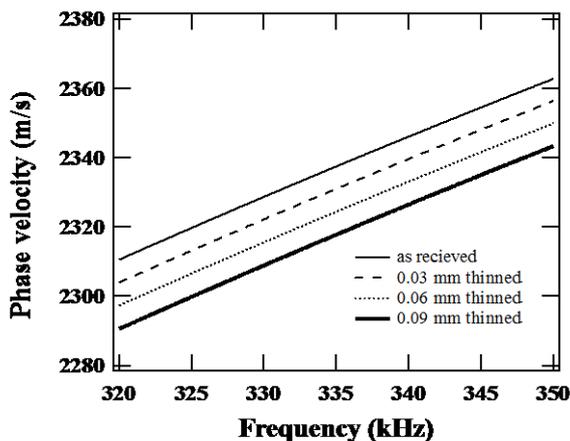


図 1 位相速度分散曲線

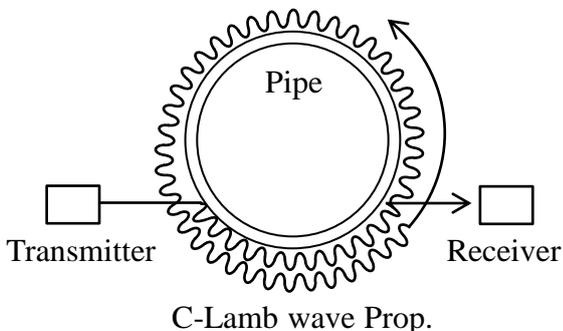


図 2 円周 Lamb 波の周回軌道

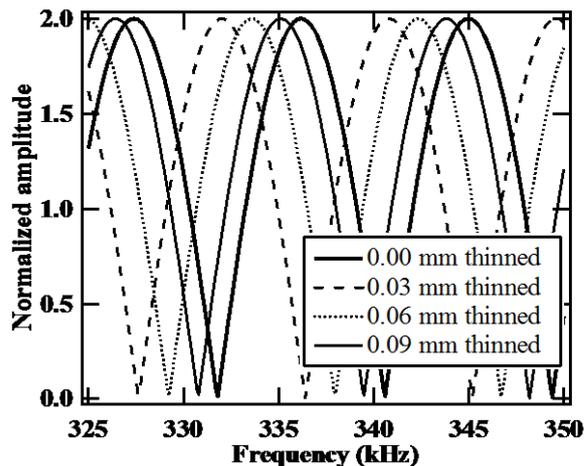


図 3 減肉による重ね合わせ振幅値変化

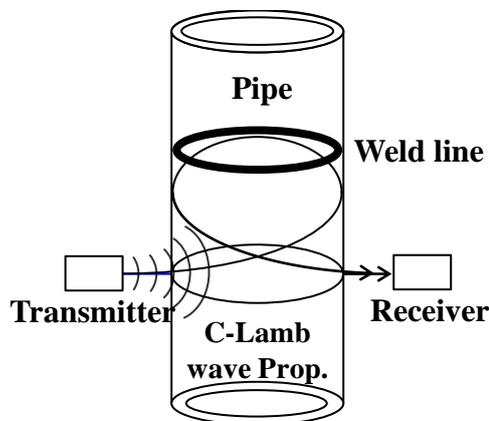


図 4 配管の溶接線近傍における C-Lamb 波伝搬経路

2.2 溶接線近傍における不要信号発生 の原理

本研究の目標は、実用化に向けた実環境での困難性の解決である。困難性とは、正常な周回軌道を外れ、配管を斜めに伝搬する一部の C-Lamb 波が、計測部位近傍の溶接線で反射し、検出されることで生じる測定誤差の増大である。図 4 に配管の溶接線近傍における C-Lamb 波伝搬経路の模式図を示した。Transmitter から励起された縦波空中超音波が配管に入射されることで励起される C-Lamb 波は、配管表面で放射状に散乱し伝搬する。

その際、配管の斜め方向に伝搬し、溶接線で反射した一部成分が、正常な周回軌道を伝搬した C-Lamb 波と、同時に Receiver によって検出されることで、不要な干渉を引き起こす。不要信号の干渉を受けた振幅値 A は以下の式で示される。

$$A = \left| A_1 + A_{\text{irr1}} \left(\pi i \sqrt{1 + \frac{d^2}{l^2}} p \right) + A_2 \exp 2\pi i p + A_{\text{irr2}} \exp \left(2\pi i \sqrt{1 + \frac{4d^2}{l^2}} p \right) \right| \quad (2)$$

ここで $A_1, A_{ir1}, A_2, A_{ir2}, p, l, d$ は、それぞれ 0.5 周周回波の振幅値、0.5 周不要斜め信号の振幅値、1.5 周周回波の振幅値、1.5 周不要斜め信号の振幅値、円周ラム波の角波数、円周長、溶接線までの距離を示す。(2) 式において、 A_{ir1} と A_{ir2} は周回軌道からそれた成分の振幅値であり、 d の関数で未定値であるため、実験で確認し決定した。結果、溶接線近傍での本手法を適用しても概ね $6 \mu\text{m}$ の相対精度を成している。

3. センサーの周波数特性の校正

センサーの周波数特性は、ステップ入力に対する周波数応答計測として実施した。入力波形として立ち上がり時間 5 ns のステップ波形を用いた。測定に用いる 1 組 2 個のセンサーを対向配置し、それぞれを送信受信センサーにして、得られた波形から FFT により周波数特性を得た。本実験では、共に実測中心周波数 340 kHz 近傍の空気超音波センサーを 2 個用いた。センサー 1 とセンサー 2 は、アパーチャサイズが異なり、それぞれ $30 \times 20 \text{ mm}$ と $20 \times 14 \text{ mm}$ である。図 5 に周波数特性を示した。周波数特性による校正は、取得した干渉波形の重ね合わせ振幅値を図 5 の特性曲線で除することで行った。計測位置 90 mm における実験値の校正を例にとって説明する。図 6 (a) に校正前の周波数変化 (最大振幅値を 1 で正規化) を示した。校正前のピーク周波数は、センサー 1 が 337.3 kHz 及び 346.4 kHz 、センサー 2 が 337.2 kHz 及び 345.6 kHz となっており、両者のピーク周波数の誤差は 0.1 kHz 、 0.8 kHz である。その差異は減肉量およそ $20 \mu\text{m}$ に相当する。そこで、図 6 (b) に校正後の周波数変化 (最大振幅値を 1 で正規化) を示した。校正後のピーク周波数は、センサー 1 が 337.4 kHz 及び 346.3 kHz 、センサー 2 が 337.4 kHz 及び 346.1 kHz となっており、両者のピーク周波数の誤差は 0.0 kHz 、 0.2 kHz となり、非常に近い値となった。その差異は減肉量およそ $5 \mu\text{m}$ に相当する。また校正により、ピークの振幅値がほぼ同じ値になっていることもわかる。この結果から、周波数特性の校正によりセンサーの周波数特性の差異を吸収し、正確な計測が実施できると考える。

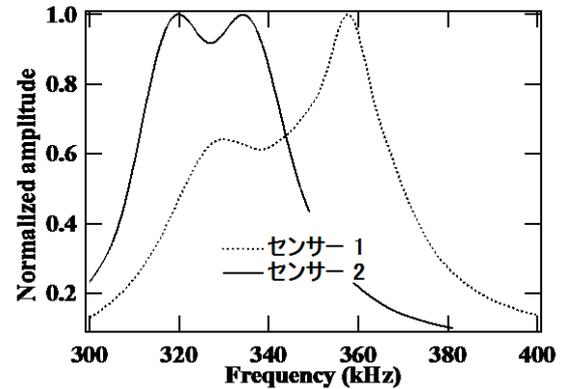
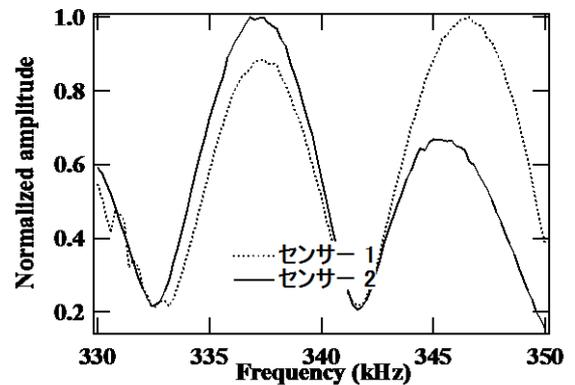
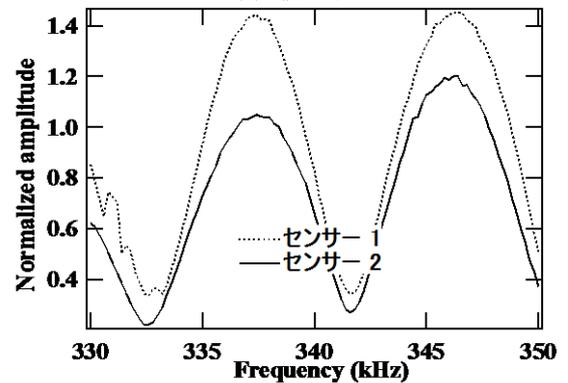


図 5 センサーごとの周波数特性



(a) 校正なし



(b) 校正あり

図 6 計測位置 90 mm による周波数変化

4. 減肉計測実験

突合せ溶接を有する外径 114.2 mm 肉厚 3 mm の Al 配管を用いた。突き合せ溶接部から管軸方向位置 20 mm から 2 mm ステップで計測を行い、周波数 $330\text{--}350 \text{ kHz}$ の干渉波形からピーク周波数を測定した。結果を図 7 (a) に示した。センサー別のピーク周波数の平均値 (管軸位置 $60 \text{ mm}\text{--}100 \text{ mm}$) は、センサー 1 で 337.4 kHz 及び 346.6 kHz 、センサー 2 で 337.1 kHz 及び 345.6 kHz と得られた。差異は、それぞれ 0.3 kHz 、 1.0 kHz であった。この差異は、減肉

量に換算して概ね 20 μm の差異に対応する。次に図 5 の特性曲線で、除して校正した後のピーク周波数結果を図 7 (b) に示した。校正後のピーク周波数は、センサー1 で 337.4 kHz 及び 346.4 kHz, センサー2 で 337.4 kHz 及び 346.2 kHz となった。差異は 0.0 kHz 及び 0.2 kHz となり、校正により近い値となった。この差は、減肉量に換算して概ね 6 μm の差異に対応する。周波数特性の校正によりセンサーの周波数特性の違いを吸収し、正確な計測が出来たと考えられる。図 8 には、実験値に加え、溶接線での波動伝搬を考慮した³⁾理論ピーク周波数の計算値と実験値を示した。理論値では、理科年表におけるアルミニウムの音速 6400 m/s と 3040 m/s から 0.4 % だけ大きくした値で計算している。0.4 % は、実験値に合う様に設定している。特に管軸位置 60 mm 以下の変動も比較的良く一致したことが確認できる。

5. 結言

本報告では、円周 (Circumferential: C) Lamb 波による自己干渉性を利用した減肉計測法の原理を概説した。また、溶接線の影響による伝搬挙動を考慮した計算モデルを用いることで溶接線近傍でも本手法で

6 μm 程度の高精度で計測が可能であることを示した。また、センサーの周波数校正として、本手法を適用する前に周波数特性の平坦化することで、センサーに依存した測定誤差を大幅に低減できることが確認できた。具体的には、校正により肉厚換算で、20 μm から 6 μm への精度の向上が確認できた。

参考文献

- [1]浅野ら, 平成 22 年度 JSNDI 春季大会論文集 p.163-164.
- [2]谷口ら, JSNDI 第 19 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集 p.59-60.
- [3]谷口ら, 日本機械学会第 20 回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2012)
- [4]川野ら, JSNDI 第 20 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集 p.103-104
- [5]H.Nishino et al, Japanese of Applied physics, Vol.50, 07HC10 (2010)
- [6]H.Nishino et al, COMADEM 2010, p.163

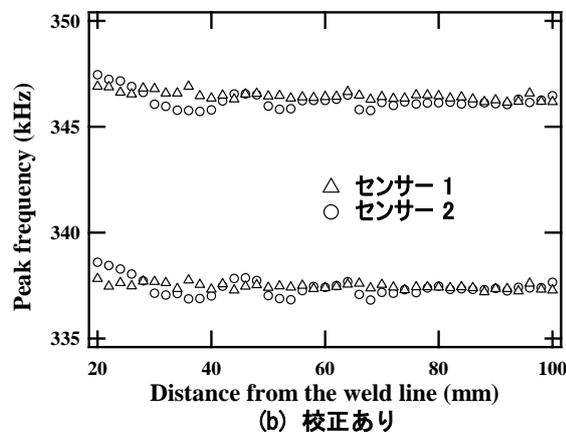
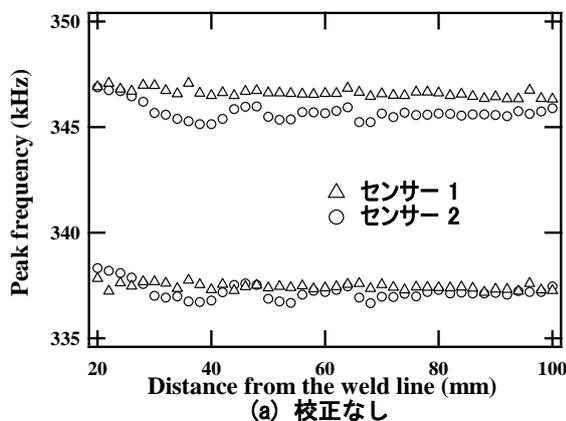


図 7 溶接線の距離によるピーク周波数の変化

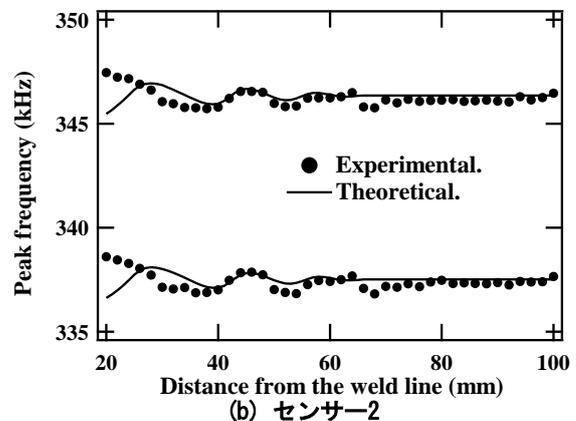
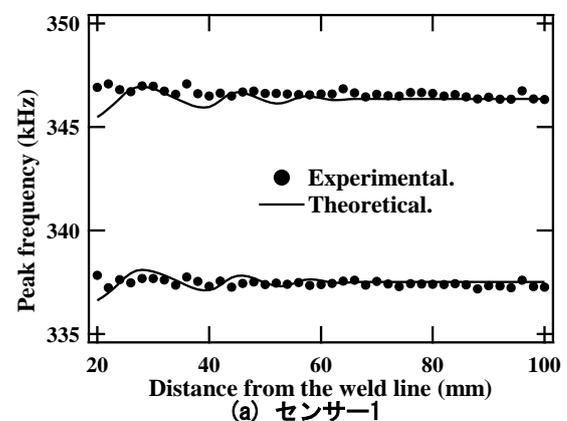


図 8 校正したピーク周波数(点)
理論ピーク周波数の計算値(線)