

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1311 September 2015

超音波非接触式肉厚測定装置の計測精度向上と現地試験

白井 一洋
平林 丈嗣
松本さゆり

国立研究開発法人 港湾空港技術研究所

National Research and Development Agency,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 非接触肉厚測定 の原理	4
2.1 接触式肉厚測定 (超音波厚み計) の原理	4
2.2 非接触式肉厚測定 の原理	5
2.3 多重反射	5
3. 付着物の状況と音響特性	6
3.1 付着物の状況	6
3.2 付着物の音響特性	7
4. 送受波器の設計	8
4.1 近距離音場	8
4.2 集束型音源	9
4.3 試作した送受波器の音圧分布	10
5. 実用化のための開発	10
5.1 信号処理	10
5.2 多重反射波の特定方法	12
5.3 測定距離と肉厚測定精度	12
6. 水槽実験	13
6.1 非接触式肉厚測定装置	13
6.2 付着物が無い場合の測定精度	14
6.3 付着物が有る場合の測定精度向上策	16
7. 現地調査	19
7.1 実施場所及び調査日	19
7.2 調査項目	19
7.3 測定位置	19
7.4 超音波非接触肉厚測定	19
7.5 接触式肉厚測定 (従来方法)	23
7.6 測定結果と考察	24
8. まとめ	25
9. おわりに	26
参考文献	26
記号表	27

Measurement Accuracy Improvement and Field Test of The Ultrasonic Non-contact Thickness Gauging Equipment

Kazuhiro SHIRAI*

Taketugu HIRABAYASHI*

Sayuri MATSUMOTO**

Synopsis

The steel port structures, such as the sheet-pile quay wall and the pipe-pile pier, are exposed to a heavily corrosive environment, and in many cases corrosion proceeds more rapidly than initially anticipated. For this reason, the thickness of steel structures is periodically measured to provide decision-making input for repair operations conducted to preserve the structural soundness of port facilities.

The methods in use today for measuring the thickness of steel pier supports generally utilize ultrasonic thickness gauges. The ultrasonic transducer is brought into contact to the surface of the structure to be measured. However, because seashells and marine life also attach to port structures, all attached objects must be removed before taking measurements, with the ultrasonic transducer attached and the thickness measured only after the measurement surface is scraped. This scraping step consumes the majority of the time required for the entire measurement operation, resulting in poor measurement efficiency. Because measuring the thickness of the entire structure is difficult with the methods in use today, sample measurements at representative points are used to characterize the thickness of structures.

For these reasons, we have developed a non-contact thickness gauging equipment for underwater steel structures such as steel pipe piles of the pier. Efficiency of non-contact measurement is better than that of conventional contact measurement for inspection work. The measurement principle is as follows. We use the convergence transducer of large diameter in order to focus ultrasonic waves on the inside the steel plates. We measure the time intervals of multiple reflections from the steel plate, and calculate the thickness using the measured values. Sufficient results were obtained in tank test, and field experiments.

Key Words: ultrasonic, non-contact thickness gauging, pulse compression, barker code, maintenance

* Senior Researcher, Sensing and System Technology Group, Frontier Technology and Engineering Division

** Head, Sensing and System Technology Group, Frontier Technology and Engineering Division

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5062 Fax : +81-46-844-0575 e-mail:shirai-k83ab@pari.go.jp

超音波非接触式肉厚測定装置の計測精度向上と現地試験

白井 一洋*・平林 丈嗣*・松本 さゆり**

要 旨

栈橋や岸壁等の港湾構造物は、耐用年数の間その機能を維持するようにメンテナンスが行われている。鋼管杭や鋼管矢板は、定期的に肉厚測定が行われ、メンテナンスのための検討資料として利用されている。現在行われている肉厚測定は、超音波厚み計を使用して、プローブ(超音波送受波器)を鋼板表面に密着させて測定するため、付着物を除去する前処理が必要となる。前処理に肉厚測定のほとんどの時間が費やされることと、連続的な測定ができないので1点の測定値で周辺の肉厚を代表している等の問題が有る。これらの問題点を解決するため、付着物が付いたままの状態、非接触で肉厚測定のできる装置の開発を実施してきた。

港空研では、港湾構造物の維持管理のために行われている鋼管杭、鋼管矢板、鋼矢板等の肉厚を、海生生物等の付着物が付いたままの状態測定できる超音波非接触肉厚測定装置の実現を目指して、開発研究を実施してきた。測定原理は、鋼板から放射される多重反射波を検出し、肉厚を算出するものである。水中に置いた鋼板に超音波が伝搬すると、鋼板内部で多重反射と呼ばれている現象が発生し、鋼板の表面と背面の間を超音波が往復しながら、少しずつ水中に超音波を放射する。送受波器の方向に鋼板表面から放出される多重反射波を検出し、その時間間隔を測定し、鋼板の肉厚を算出するものである。多重反射波は微弱な信号であり、付着物が有る場合は検出が困難であった。

本研究では、多重反射波を精度良く検出するため、机上検討、水槽実験、現地調査を行った。その結果、超音波信号は700kHzのバーカ符号とし、送受波器は大口径(直径φ100mm)の焦点集束型音源(焦点距離300mm)を使用した。また、測定を簡単にするため、多重反射波を検出し、肉厚を数値で表示するアプリケーションを作成した。本研究による最大の成果は、測定精度を向上させる測定方法の考案である。本測定方法を考案する以前は、現場計測において付着物が多い場合には、十分な肉厚測定精度が得られていなかったが、本測定方法により飛躍的に性能が向上した。

キーワード：超音波、非接触肉厚測定、パルス圧縮、バーカ符号、維持管理

* 新技術研究開発領域計測・システム研究チーム主任研究官

** 新技術研究開発領域計測・システム研究チームリーダー

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5062 Fax：046-844-0575 e-mail:shirai-k83ab@pari.go.jp

1. まえがき

栈橋や岸壁等の港湾施設は、大多数が鋼管杭や鋼矢板で製作されている。これらの鋼構造物は海水に接し、潮位変動や波しぶきを受けるという過酷な環境下にあることから、一般に陸上鋼構造物に比べて激しい腐食を示すため、電気防食等の防食工が施されている。また、耐用年数にわたってその機能が腐食により損なわれることが無いように、継続的に維持管理がされている。この維持管理のために必要なデータを得る目的で、肉厚測定が定期的を実施され、腐食の進行速度の算出や補修計画の立案等に使用されている。

現在行われている肉厚測定は、超音波厚み計を使用することが標準とされ、肉厚測定の前処理として、約10cm四方をハンマーやスクレイパ等で付着物を除去した後、ワイヤブラシ等で鋼材面を磨き、鋼材の地肌を露出させる。超音波厚み計の探触子を鋼材の地肌を露出させた部分に密着させて肉厚を測定する。測点は10cm四方内で5点程度とし、5点の平均値を肉厚値としている(沿岸センター1999)。この方法では、肉厚測定の前処理である付着物の除去や鋼材の地肌を露出させる作業に大半の時間を費やすことから、効率の悪い作業となっている。また、除去した付着物は産業廃棄物扱いとなるため、全て回収し処分することが義務付けられている。

これらの状況を改善するため、港空研では鋼構造物の付着物除去等の前処理の要らない非接触式肉厚測定装置の開発を行っている。本装置は、海水中で超音波を測定対象鋼板に放射し、鋼板の背面からの多重反射波の時間間隔を測定して、肉厚を算出するものである。超音波送受波器は、海生物等が付着した状態の鋼板から一定の間隔をおいて設置し、大口径の送受波器で表面反射が消えた後の微弱な多重反射を捉えて肉厚測定を行うものである。本装置は非接触であるため、水中の鋼構造物に対し超音波送受波器の位置を自由に移動させ、連続的な肉厚測定が可能である。これまでの研究により、非接触での肉厚測定が可能であることを示した。使用した実験装置の主な仕様を以下に示す。

- ・送受波器：直径φ80mm，曲率半径R300mm
- ・超音波：周波数750kHz，モノパルス(正弦波1波)
- ・発信器：WF-1946B(エヌエフ回路設計ブロック社製)
- ・パワーアンプ：広帯域パワーアンプ2100L(E&I社製)
- ・オシロスコープ：Wave Surfer454(LcCroy社製)

肉厚の算出方法は、受波した反射波をオシロスコープに記録し、測定者が波形を見て多重反射波を特定し、肉厚を算出する方法で行っていた。また、現場での肉厚測

定結果は付着物が多い場合、良い結果が得られなかった(吉住ら2009)。

非接触肉厚測定装置を実用化するためには、一般的な技術者が簡単に使用でき、従来の接触式の肉厚測定と同等の測定精度が求められる。本資料では、非接触肉厚測定装置を実用化するために必要な装置の改良及びアプリケーションの作成を行ったので、その改良点及び効果について示す。

具体的には、以下に示す3項目の改善を実施した。

- ①超音波信号をモノパルスからバーカ符号に変え、相互相関関数を算出して反射信号を検出するように変更した。これにより、送波器に加えることが出来る限られた電圧で、より大きなパワーを測定対象物に伝えることが可能になった。また超音波の到達時間が、相互相関関数の最大値で得られるので、時間の測定精度が向上した。
- ②付着物による測定精度の低下を改善するため、測定対象物と送受波器の距離を変更した。これにより付着物からの反射波を小さくすることができ、測定精度が飛躍的に向上した。
- ③数値で肉厚を表示するためのアプリケーションを作成したことにより、今までは、反射波形を観察し、その中から多重反射波を選択して肉厚を算出していたが、専門知識が無くても肉厚測定ができるようになった。

2. 非接触式肉厚測定の実験装置

肉厚測定は、栈橋や岸壁等の鋼製港湾構造物の適切な維持管理のために必要な、鋼材の肉厚を知るために実施している。現在行われている肉厚測定の方法は、超音波厚み計を使用し、付着物を除去した測定対象物の金属表面に超音波送受波器を密着させて超音波を放射し、背面からの反射波を検出し肉厚を算出している。これに対し非接触式肉厚測定では、超音波送受波器を測定対象物に付着物が付いたままの状態ですべての距離を離して超音波を放射し、鋼板の両端面で反射を繰り返す多重反射波の時間間隔を測定して肉厚を算出する。

2.1 接触式の肉厚測定(超音波厚み計)の原理

現在実施されている肉厚測定は、超音波厚み計を用いることを標準とすることが「港湾構造物の維持・補修マニュアル」で示されている。

超音波厚み計は、金属、樹脂、ガラス等の厚さを測定するもので、図-2.1に示すように測定物の表面に探触子(超音波送受波器)を接触させて超音波を放射し、背面からの反射波を検出し、その伝搬時間から厚さを算出して

いる。

$$(\text{肉厚}) = (\text{往復の伝搬時間}) \div 2 \times (\text{伝搬速度})$$

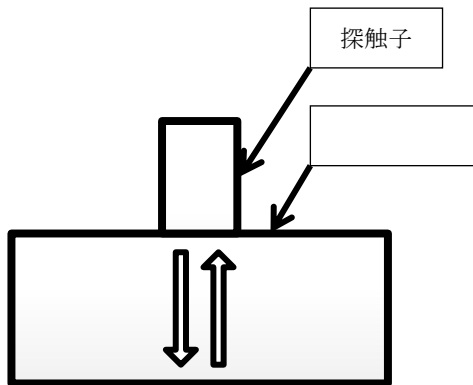


図-2.1 超音波厚み計の原理

超音波厚み計の主な仕様は、

超音波周波数：1～10 MHz

探触子直径：10 mm程度

測定分解能：0.01mm程度

測定範囲(鋼材)：0.6 ～ 500mm

測定手順は以下の通りである。

・キャリブレーションの実施

測定対象鋼材とほぼ同じ厚さの肉厚既知の基準鋼板によりキャリブレーションを行い、音速設定を行う。

・下地処理(図-2.2)

肉厚測定点の10cm四方をハンマーやスクレイパ等で付着物を除去し、金剛砥石やワイヤブラシ等で鋼材表面を研磨して鋼材の地肌を露出させる。

・測定

超音波厚み計の探触子を各測点に3回ずつあてて測定し、3回の平均値を求め1点の測定値とし、さらに測定範囲内の5点について平均値を求め、測定点の肉厚測定値とする。

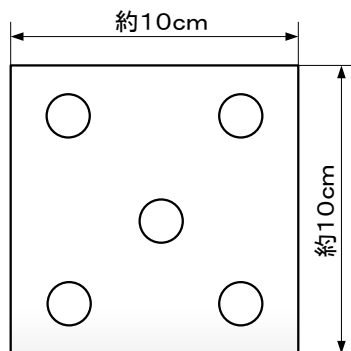


図-2.2 下地処理の範囲と測点(5点)

本方式の長所、短所は以下の通りである。

長所

・直接測定対象物に超音波送受波器を密着して測定するため、測定精度が高い。

・超音波周波数が高いため、薄板の測定が可能。

短所

・測定には、付着物を除去し表面を磨く前処理が必要。

・連続測定が出来ない。

2.2 非接触式肉厚測定の原理

貝等の生物が付着した鋼板に超音波を伝搬させると、反射波は図-2.3に示すように付着物からの反射波、鋼板表面からの反射波、多重反射波の順で、受波器に到達する。多重反射波は、鉄板内で往復している音波であるため、付着物からの反射波、鋼板表面からの反射波が消えた後もしばらくの時間継続している。この多重反射波の時間間隔が鉄板内を往復する音波の時間間隔であるので、これに鉄板内の音速を掛けて2で割ることにより板厚を算出できる。

しかし、水の中に置いた鋼板からの多重反射は、表面反射と比較して非常に微弱であり、さらに、付着物を透過するとき、超音波が減衰し鋼板に到達するエネルギーが減少する。このような微弱な多重反射波を検出するため、送受波器の形状、信号処理等の技術開発を行った。

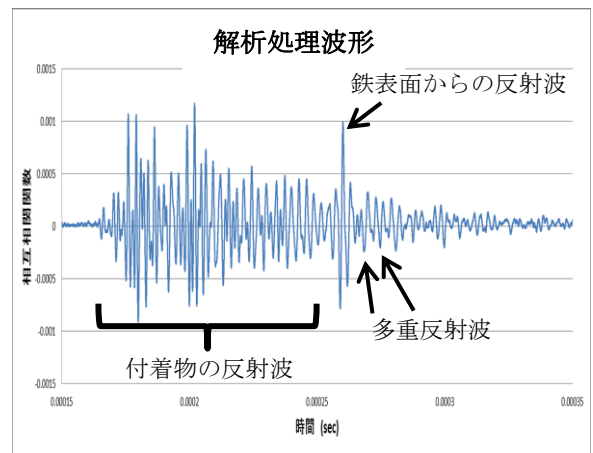


図-2.3 反射波の解析処理波形

2.3 多重反射

多重反射は水中に鋼板を置いて、超音波を伝搬させた場合のように、異なる媒質中を超音波が伝搬する際に境界面の反射と透過の割合により発生する。

反射と透過の割合は平面波の場合、各媒質の音響インピーダンスを Z_1 、 Z_2 とすると、以下に示す反射率、透過率

の式で表される.

音圧の反射率 (Rp)

$$R_P = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (1)$$

音圧の透過率 (Tp)

$$T_P = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2)$$

音の強さの反射率(RI)

$$RI = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (3)$$

音の強さの透過率(TI)

$$TI = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (4)$$

海水の音響インピーダンスを

$$Z_1 = 1.48 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}$$

鉄の音響インピーダンスを

$$Z_2 = 46.4 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}$$

海水中に鋼板を置いた場合, 海水中から鋼板に音波が伝搬する場合と鋼板から海水中に音波が伝搬する場合の反射率, 透過率は式(1)~(4)から表-2.1のようになる.

表-2.1 反射率と透過率

	海水 → 鋼板	鋼板 → 海水
Rp	0.94	-0.94
Tp	1.94	0.06
RI	0.88	0.88
TI	0.12	0.12

表-2.1から分かるように, 海水中から鋼板に伝搬する音の強さの透過率(TI)は0.12であり, 12%の音のエネルギーが鋼板に伝わる. 鋼板に伝わった音波は進行し鋼板背面の水との境界面に到達し, 境界面で反射と透過が起こる. 鋼板から海水に伝わる音の強さの反射率(RI)は0.88であり, 音波が鋼板から海水中に伝搬するときに入射波の88%の音のエネルギーが鋼板内に反射され戻ることになる. このため, 鋼板に入射した音波は, 鋼板の両端で海水中に12%程度エネルギーを放射し, 鋼板内を往復伝搬しながら減衰することとなる. 図-2.4に示すように, 音波が鋼板の両端で反射を繰り返し往復する現象を多重反射と呼んでいる. 入射音圧を1とすると式(1)~(4)から表-2.2の関係が得られる. マイナスがついているのは, 位相が反転していることを示す. 表-2.2から分かるように, R1とR2はほぼ同じ音圧で検出が可能となる. ここで

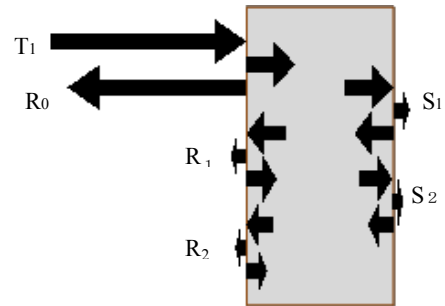


図-2.4 多重反射

は, 伝搬減衰等の減衰量を考慮していないので, 実際に測定できる音圧はさらに小さくなる. この, R1とR2の時間間隔を測定することにより, 鋼板内の往復の超音波の伝搬時間を知ることが出来るので, 鋼板の肉厚を算出できる.

表-2.2 多重反射

	音圧	音の強さ
入射波 T1	1	1
表面反射波 R0	0.94	0.88
1回目の背面反射波 R1	-0.11	0.01
2回目の背面反射波 R2	-0.10	0.01

3. 付着物の状況と音響特性

3.1 付着物の状況

図-3.1及び図-3.2に示す川崎港東扇島ふ頭-14m岸壁の杭式栈橋で付着物についての調査を10月に実施した. 鋼管杭の直径はφ1000mmで4本の杭を調査対象とし, 水面付近, 中間部, 海底付近で付着物の厚さ, 付着物の種類について調査を行った.

調査結果を表-3.1に示す. 杭の位置は杭No. 1, 2が栈橋先端から3m陸側, 杭No. 3, 4が8m陸側に入った位置の杭である. 太陽光が多く入射する位置に有る杭No. 1, 2の水面



図-3.1 調査地点

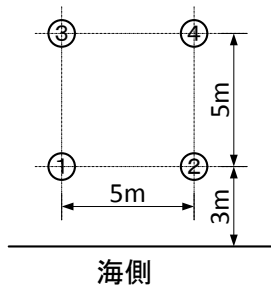


図-3.2 杭の位置

付近の付着物の付着厚さが最も厚いことが分かる。また水深により付着物の種類も異なっている。

表-3.1 調査結果

調査地点		東扇島ふ頭-14m岸壁			
杭 No		1	2	3	4
付着厚さ	水面	21.6cm	23.1cm	20.5cm	15.1cm
	中間	24cm	20cm	16.8cm	14.9cm
	海底	17.3cm	17cm	16.2cm	13.7cm
種類	水面	ミドリイガイ	ミドリイガイ ムラサキイガイ	ミドリイガイ	
	中間	ムラサキイガイ	コケムシ類 マガキ	ムラサキイガイ	
	海底	コケムシ類			

3.2 付着物の音響特性

付着物の音響特性を測定するため、調査時に付着物の採取を行った。付着物は採取時の状態を保ち、付着物同士が足糸で強固に結びついている状態の物で最大厚さ約90mm、一辺の長さ30cm程度の塊であった(図-3.3)。これ

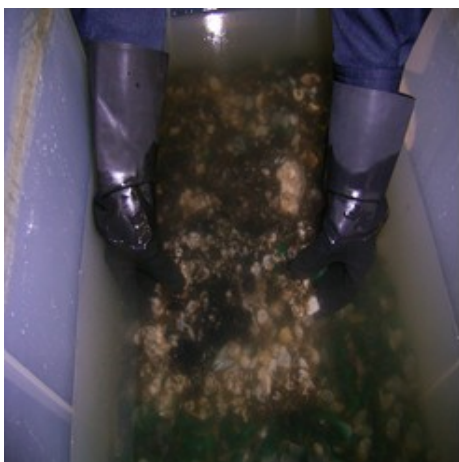


図-3.3 採取直後の付着物



図-3.4 ムラサキイガイの袋詰め

を採取直後に水槽に入れ透過損失の測定を行った。また、水槽実験に使用するため、ムラサキイガイを煮沸乾燥し貝殻とした物をビニル袋に詰め、厚さ50mm程度にした物(図-3.4)についても透過損失の測定を行った。測定方法は、図-3.5に示すように送受波器の焦点付近に hidroホンを置き、付着物は送受波器から190mmの位置に配置した。測定は、付着物が有る場合と無い場合の受信電圧を測定し、透過損失を求めた。

測定結果を図-3.6に示す。伝搬損失は周波数に大きく依存していることが解る。

透過損失については、採取直後の付着物とムラサキイガイの袋詰めでは大差が無いように見えるが、波形の変形を見ると、採取直後のものでは図-3.7に示すように、700kHzでは透過波の乱れは無いが、1MHzでは波形の乱れが激しいことが分かる。また、袋詰の物は波形の大きな変形は見られなかった。

付着物の厚さにもよるが、海水中で付着物が密に結合している状態では、1MHz以上の高い周波数の超音波はほぼ透過しないことが分かった。このため、本装置に使用する超音波周波数は波形変化が少ない700kHzとする。

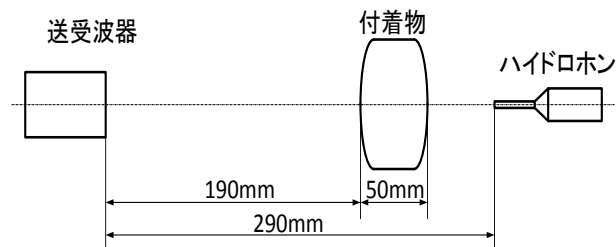


図-3.5 透過損失の測定

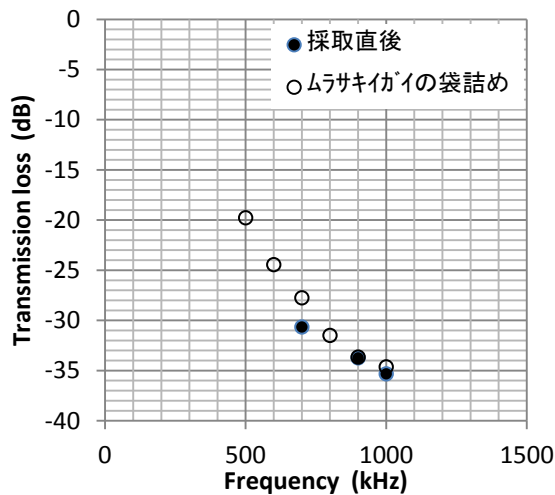
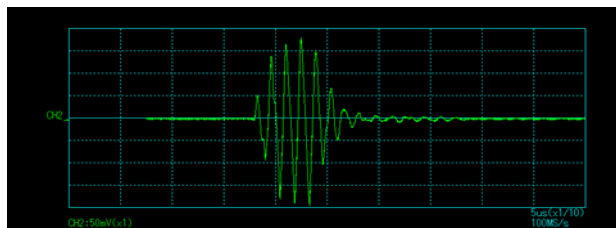
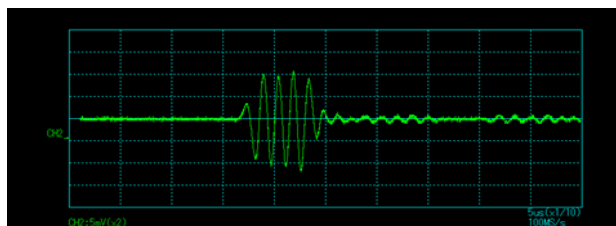


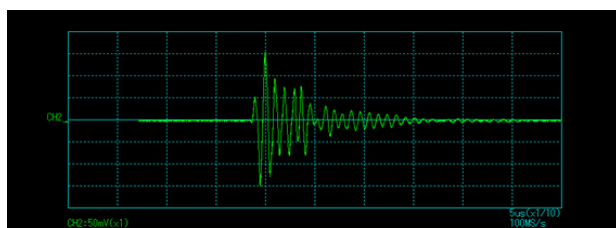
図-3.6 付着物の透過損失



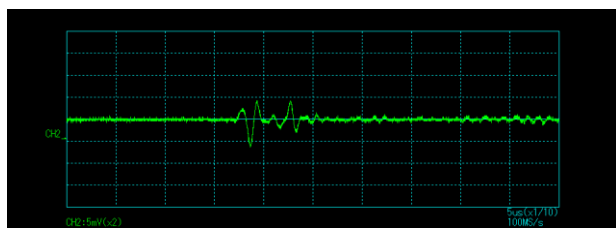
(1) 付着物が無い場合(700kHz)



(2) 付着物が有る場合(700kHz)

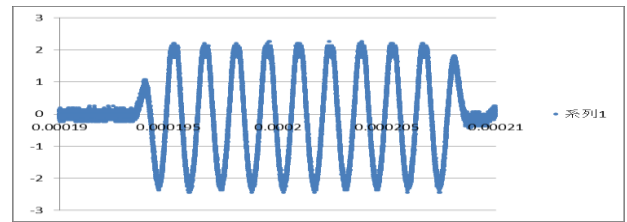


(3) 付着物が無い場合(1MHz)

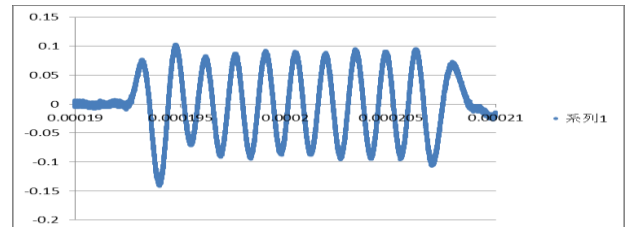


(4) 付着物が有る場合(1MHz)

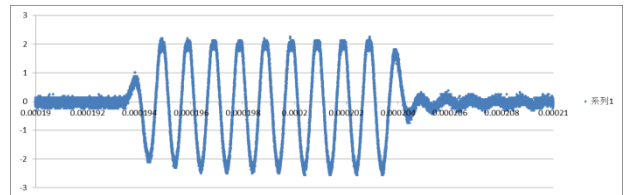
図-3.7 採取直後の付着物の透過波



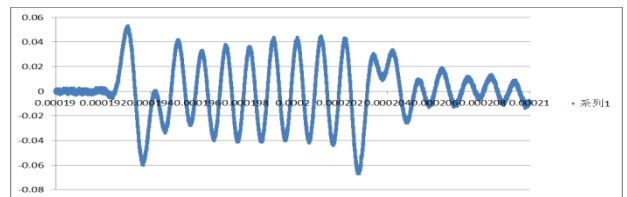
(1) 付着物が無い場合(700kHz)



(2) 付着物が有る場合(700kHz)



(3) 付着物が無い場合(1MHz)



(4) 付着物が有る場合(1MHz)

図-3.8 ムラサキガイの袋詰め透過波

4. 送受波器の設計

非接触で対象物の肉厚を測定するには、微弱な多重反射を捉えることが重要であるので、パワーの大きな音波を測定対象物に放射し、反射波を効率よく受波することが出来る大口径の焦点集束型送受波器を作成した。

4.1 近距離音場

送受波器表面が平面の送受波器の場合、送受波器から一定の距離をおいたところから、ビームが形成される。近いところでは、送受波器面上の各点からの距離差が波長に比べ大きくなるため複雑な音圧分布となり近距離音場と呼ばれている。この近距離音場の範囲は、近距離音場限界距離 (X_0) と呼ばれ次式で表される。

$$X_0 = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (5)$$

D : 送波器直径
 λ : 超音波の水中での波長

図-4.1は直径100mmの円形の平面送受波器から、周波数700kHzの超音波が放射された場合の送受波器の中心軸を含む平面の音圧分布(計算値)を示す。

この場合、 $X_0=1,167\text{mm}$ となり、これ以降の距離で超音波ビームが形成される。 X_0 より近い範囲では、場所による音圧変化が大きいため計測には不向きである。測量等の計測では近距離音場を避け、ビームが形成される送受波器から十分離れた距離で使用される。

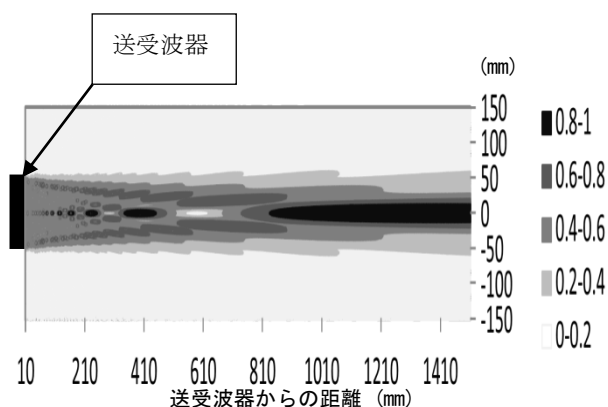


図-4.1 近距離音場

4.2 集束型音源

非接触肉厚測定で多重反射波を検出するためには、送受波器と測定対象物との距離を近くし超音波の伝搬損失等を小さくし、測定対象物に超音波エネルギーを集中させる必要がある。この目的のために、送受波器表面を円弧状にし、円弧の中心点付近に超音波が集中する集束型音源を作成した。図-4.2は超音波周波数700kHz、送受波器直径100mmで、曲率半径を200mm, 300mm, 400mmと変えた場合の送受波器の中心軸上の音圧変化の計算値を示す。縦軸はそれぞれの最大値を1として正規化した音圧比、横軸は中心軸上の送受波器表面からの距離である。表-4.1は図-4.2から求めた、音圧比が0.5以上となる幅である。この範囲内に測定対象物があるとき、計測が可能と考えられる。図-4.2及び表-4.1から、曲率半径が小さいほど音波の集中している幅が狭く、立ち上がり急峻であることがわかる。

送受波器の試作にあたっては、精密な位置合わせをしなくても測定が可能ないように、音の集中する音圧比が0.5の幅が170mmである曲率半径300mmとした。

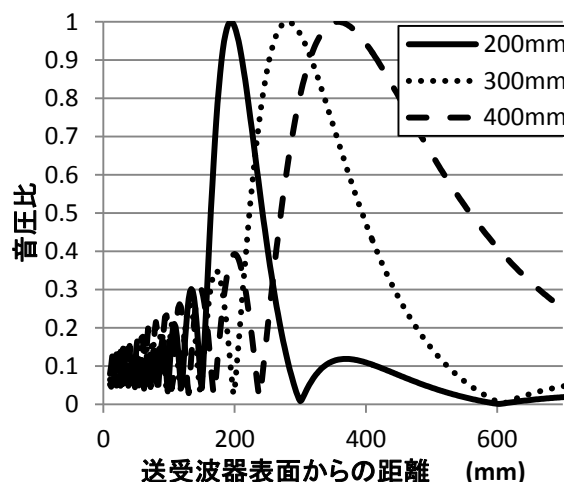


図-4.2 中心軸上の音圧分布(計算値)

表-4.1 音圧の高い領域 (mm)

曲率半径	200	300	400
音圧比が0.5の幅	78	170	286

試作した送受波器の仕様は、以下の通りである。

- ・直径 : $\phi 100\text{mm}$
- ・曲率半径 : R300mm
- ・中心周波数 : 700 kHz
- ・送受波器の種類 : 送受兼用
- ・圧電素子 : コンポジット材
- ・最大入力電圧 : 500V

図-4.3に送受波器の中心軸を含む水平面上の音圧分布(計算値)を示す。最大値を1として5段階で音圧を濃淡表示したものである。超音波は送受波器の中心軸を軸として、送受波器から200mm~500mm位の間で円筒形に強く分布していることが分かる。円筒の直径は送受波器からの距離300mm付近で約8mm、この部分に測定対象の鋼板が有る場合、直径8mmの円内の肉厚を測定することになる。

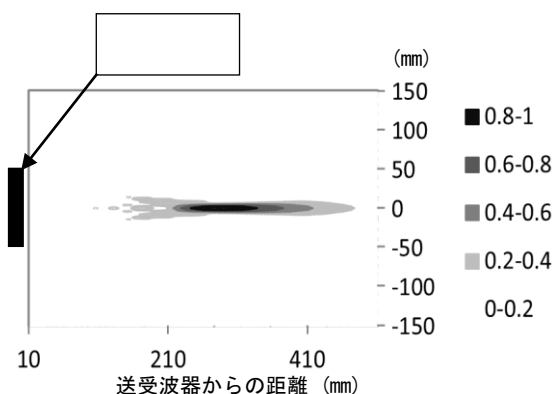


図-4.3 水平面上の音圧分布(計算値)

4.3 試作した送受波器の音圧分布

送受波器から放射される超音波の音圧分布を測定した。測定方法は、試作した送受波器を水中に固定し、ニードルハイドロホンをX-Y-Zの3軸に移動できるステージに取り付けた。送受波器から700kHz、10波のトーンバースト波を送波し、ハイドロホンを1mm毎に移動させ、各点での音圧を測定した。(図-4.4)

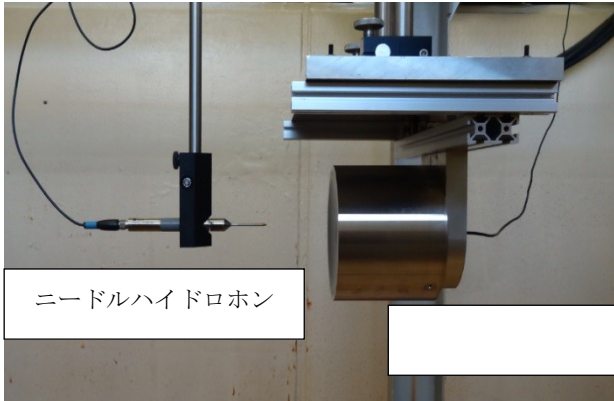


図-4.4 送受波器の音圧分布の測定

図-4.5は、送受波器面から300mmの距離での、送受波器面に平行な断面での音圧分布(断面の最大値で正規化)である。音圧比が0.5以上となる領域の直径が約9mmで計算値の約8mmとほぼ近い値となった。

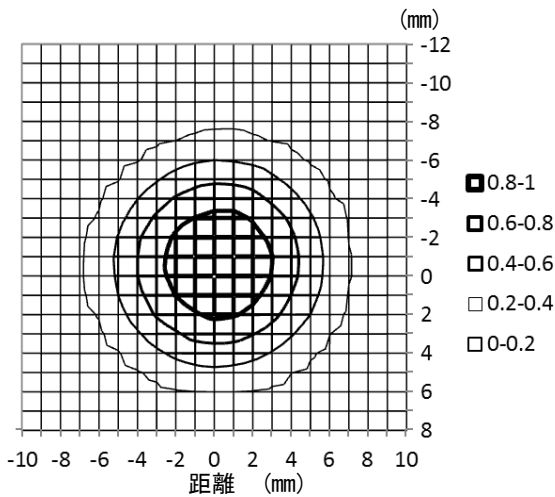


図-4.5 送受波器面に平行な断面の音圧分布

図-4.6は、送受波器の中心軸上の音圧分布(測定値, 計算値)である。測定値と計算値の形状はほぼ同じであるが、測定値の方が約10mm程度送受波器面から遠い位置に移動した様な音圧分布になっている。試作した送受波器から放射される超音波の音圧分布は以下ようになった。

- ・最大音圧の位置

送受波器中心から293mm(測定値), 280mm(計算値)

- ・中心軸上の50%値の位置

224mm~394mm(計算値), 235mm~411mm(測定値)

- ・中心軸から左右方向の50%値

片側約4mm(計算値), 片側約4.5mm(測定値)

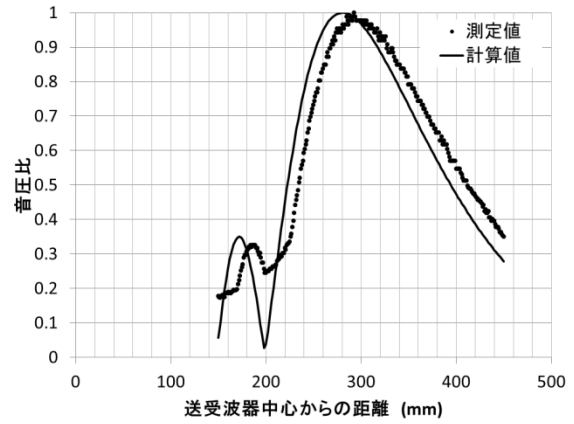


図-4.6 中心軸上の音圧分布

5. 実用化のための開発

これまで研究してきた肉厚測定の方法は、超音波信号にモノパルス信号を使い、受信波形から人が波形を見て多重反射波を選択特定して、肉厚を算出してきた。これまでのモノパルス信号を使った研究により、非接触肉厚計測の可能性を示し、付着物の厚さがごく薄い場合には、現地調査等で良好な測定結果を示している。

しかし、人力による多重反射波の特定は、多くの労力を要し、解析作業を困難なものにしている。また、モノパルス信号による計測では、付着物の層が厚い場合、多重反射波検出に足りるだけの十分な超音波エネルギーを計測対象物に伝えることは、困難であった。

本研究では非接触式肉厚測定装置を実用化するために、人力による解析を無くし、接触式の肉厚測定で使われている超音波厚み計と同様に、肉厚を数値で表示することを試みた。また、付着物が有る場合でも安定して肉厚測定できるように、付着物を通して超音波エネルギーを測定対象物に伝えるための超音波信号、解析方法、計測方法について研究開発を実施し、実験により有効性を確認した。

5.1 信号処理

肉厚測定においては、多重反射波の到達時間間隔を精度良く検出することが重要となる。微弱な多重反射波を検出し易くするためには、送波パワーを大きくすること

で多重反射波の振幅を大きくすることが可能となる。同じ送波電圧に対し、モノパルスよりもパルス幅の長い信号を使うことにより送波パワーが大きくなる。この長いパルス信号に変調を加え、相互相関関数を求めることによりモノパルスと同等の距離分解能を持ち、ピーク送波電圧を上げるのと同等の効果を得ることが出来る技術がパルス圧縮技術である。ここでは、レーダーに使われている符号変調方式によるパルス圧縮技術を導入し、レンジサイドローブが小さくなるバーカ符号を使用した。

(1) バーカ符号

バーカ符号は2値符号で、変調符号を

$$a_i = \begin{cases} 1 & (i=1, \dots, N) \\ -1 & \end{cases} \quad (6)$$

とすると、自己相関関数は

$$\begin{aligned} \Phi(k) &= \sum_{i=1}^{N-k} a_i a_{i+k} \\ &= \begin{cases} N & (k=0) \\ 0, \pm 1 & (k=1, 2, \dots, N-1) \\ 0 & (k \geq N) \end{cases} \quad (7) \end{aligned}$$

で表される。

$k \neq 0$ における値がレンジサイドローブの強度を示し、0または±1となる。レンジサイドローブが小さいので、信号の検出が容易になる。表-5.1に示すようにバーカ符号は、 $N \leq 13$ で存在することが知られている。

図-5.1に $N=7$ の場合のバーカ符号と自己相関関数を示す。 $k=0$ の位置が信号の到達時間となり、最大値7で、レンジサイドローブは0、-1となる。バーカ符号をそのまま超音波送波器に送っても信号を送波することは出来ない。超音波送受波器からバーカ符号を送波する場合は、超音波信号を搬送波として、バーカ符号の変化に応じた変調を施した電気信号を超音波送受波器に送ることで、バーカ符号を超音波として伝搬させることが出来る。

具体的な方法は、図-5.2に示すように、超音波の1周期とバーカ符号のビット幅を合わせ、バーカ符号がプラ

表-5.1 バーカ符号

N	バーカ符号
2	++ および +-
3	++-
4	++-+ および +++-
5	++++-
7	++++--+-
11	++++-----+----+-
13	+++++-----+---+---+

スからマイナスに変わるときに位相を180度変更する。信号の作り方は、時間長さを超音波の周期と合わせたバーカ符号を1と-1とし、超音波信号と掛け算することで、位相を180度変化させた位相変調した電気信号が得られる。この電気信号を送受波器に加え超音波を放射することで、バーカ符号を水中に放射することが出来る。超音波として放射する図-5.2の信号の自己相関関数は図-5.3のようになる。

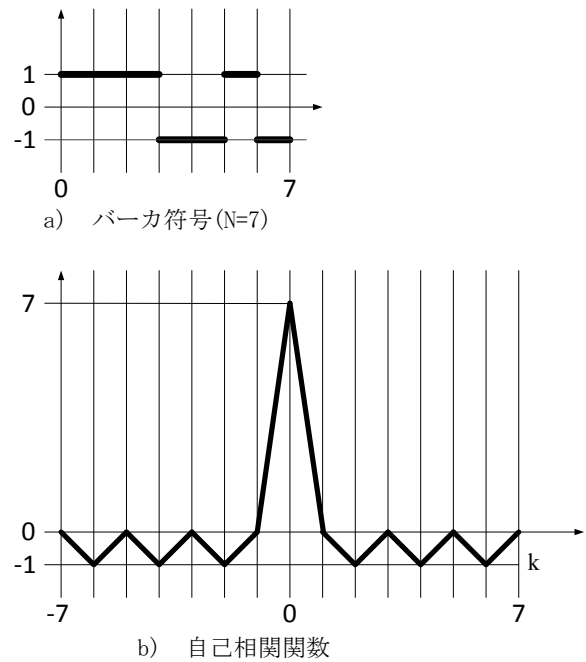


図-5.1 バーカ符号と自己相関関数

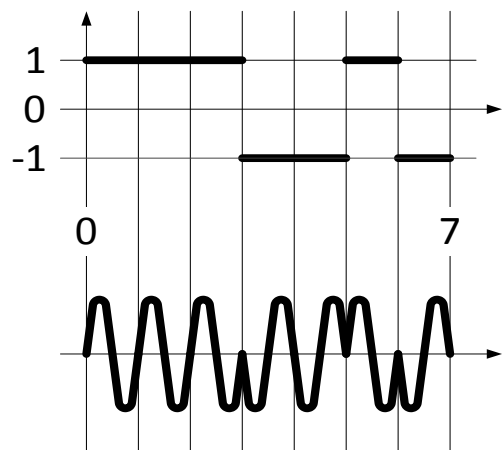


図-5.2 バーカ符号による位相変調

(2) 相互相関関数と距離測定

相互相関関数は、2つの関数 $h(t)$ と $x(t)$ の類似度を表す

もので、次式で表さる。

$$z(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)x(t+\tau)dt \quad (8)$$

ここで、 $h(t) = x(t)$ の時は自己相関関数と呼ばれ、 $\tau = 0$ で $z(\tau)$ は最大になる。

送波信号と受波信号の相互相関関数を求めると、最大値となる時間 τ_s が送波信号と最も似た波形の始まりの時間を示す。この最大値の時間が超音波の到達時間となり、 τ_s に音速を掛けると距離を求めることが出来る。

(3) レンジサイドローブ

(7)式において、自己相関関数の値が $k \neq 0$ における値がレンジサイドローブの強度を表す。近くに反射強度の弱い物体が有る場合、レンジサイドローブとの区別が出来なくなってしまう、物体の識別が困難となる。

パルス圧縮には、バーカ符号等の符号変調方式以外に、周波数を時間と共に変化させるチャープ方式と呼ばれる方法がある。この方法は、アナログ回路でパルス圧縮を実現できるため古くから使用されている。

チャープ信号の自己相関関数を図-5.4に、バーカ符号の自己相関関数を図-5.3に示す。チャープ信号は1MHz

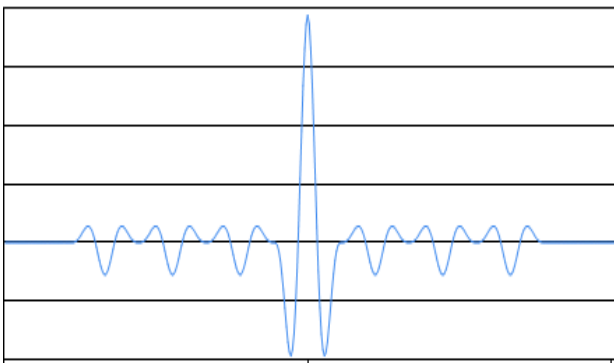


図-5.3 バーカ符号の自己相関関数 (N=7)

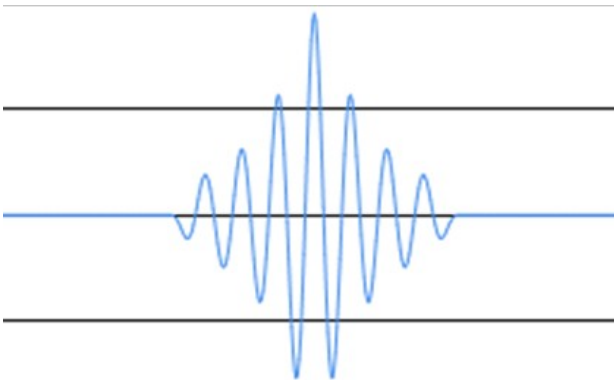


図-5.4 チャープ信号の自己相関関数

から700kHzまで1周期毎に100kHz周波数を減少させて周波数変調したものである。バーカ符号は700kHz、 $N=7$ である。チャープ方式の場合振動的にレンジサイドローブが上昇しているため、反射点が近接している場合、検出が困難になる。バーカ符号の場合は、レンジサイドローブが小さいので、識別が容易になる。

5.2 多重反射波の特定方法

本装置を実用化するためには、現在行われている接触式の測定に使用されている超音波厚み計と同程度以上の性能が要求される。このため、肉厚の数値表示は最低限の機能となる。数値表示を自動で行うためには、2点以上の多重反射波の特定が必要となる。

鋼板の表面反射と多重反射波の振幅の差は、10倍以上で有るため、表面反射波が多重反射波と重なった場合、多重反射波の検出は不可能になる。このため、多重反射波の測定は、2回目と3回目の多重反射波を対象とする。

図-5.5に示す様に鋼板の表面反射を基準にして、測定対象物の製作時の肉厚から多重反射の時間間隔(T)を算出し、2回目、3回目の多重反射波到達時間を求める。この2回目、3回目の到達時間を中心にして、 $\pm 0.5T$ の範囲内を多重反射の検出区間とし、検出区間内での最大値又は最小値を多重反射の到達時間とする。

鋼板表面に付着物がある場合は、反射波の強度から鋼板の位置を特定し、以降は上記と同様の方法で多重反射の位置を特定する。

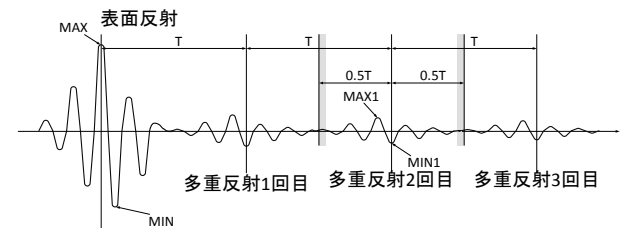


図-5.5 多重反射の特定

5.3 測定距離と肉厚測定精度

非接触式肉厚測定の場合、鋼板だけで付着物が無い場合は、多重反射を明確に検出でき測定精度も良好であった。しかし、付着物の層が厚い場合には、測定はほぼ不可能であり、付着物の層が薄い場合も高精度に測定できる場合は稀で、ほとんどの場合、測定精度が低下した。

この原因について、当初は送波出力不足とノイズの影響であると考え、送受波器の大口径化、送波電圧の増大、フィルタリング処理による検討等を行ったが、明確な成

果は得られなかった。そこで、付着物による計測精度への影響を再度検討した結果、図-5.6に示す付着物の層が厚い測定状況では、図-5.7のように、付着物からの反射波は付着物表面からだけでなく、内部の貝殻等からの反射波も存在するため、複雑な反射透過の結果、多重反射が検出される時間帯にまで及ぶことが考えられる。付着物からの反射波の強さが、多重反射波と同程度以上であれば、多重反射波の検出に影響を与えることになる。このような状況である場合、送波出力を大きくしても多重反射波と付着物からの反射波の強さの関係に変化は期待できない。また、同一の送波信号を反射しているため、フィルタリングにより付着物からの反射波と多重反射波を分離することは不可能である。

この状況を改善する方法として、送受波器と鋼板の距離を変更することが考えられる。今までは音圧分布の最大となる送受波器の焦点付近に鋼板がくるように、送受波器と鋼板の距離を決めていたため、鋼板と付着物両方

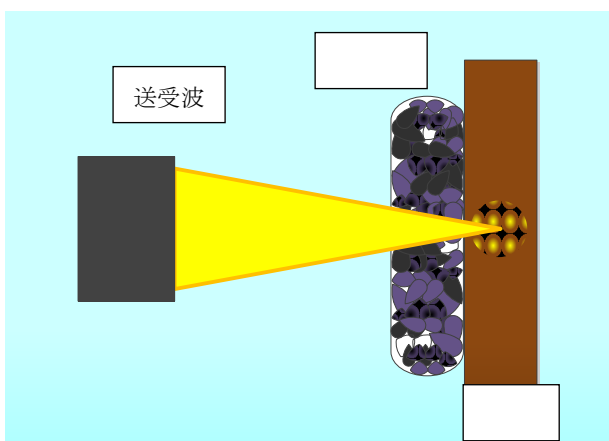


図-5.6 送受波器と測定対象物

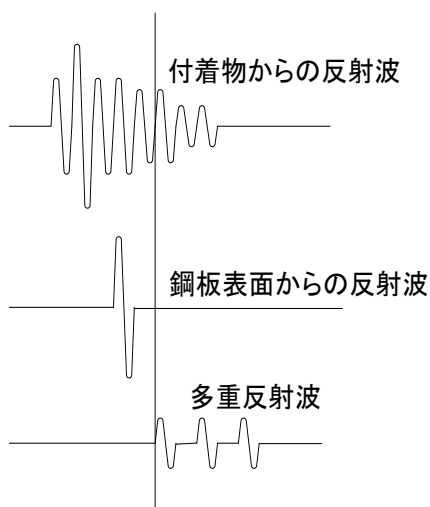


図-5.7 反射波の状況

に強い超音波があたるようになる。これに対し、鋼板と送受波器の距離を近づけることにより、鋼板にだけ強い音を当て、付着物には弱い音を当てることになるため、付着物からの反射波の強さが多重反射波より弱くなり、良好な計測が可能となる。図-5.8は送受波器の中心軸上の音圧分布に計測位置を記入したものである。送受波器と測定対象物の位置を近づけることにより、付着物に当たる超音波の強さが小さくなり、相対的に鋼板内の超音波の強さが大きくなる。これにより多重反射波の検出への影響を小さくし、肉厚の測定精度を向上させることができる。

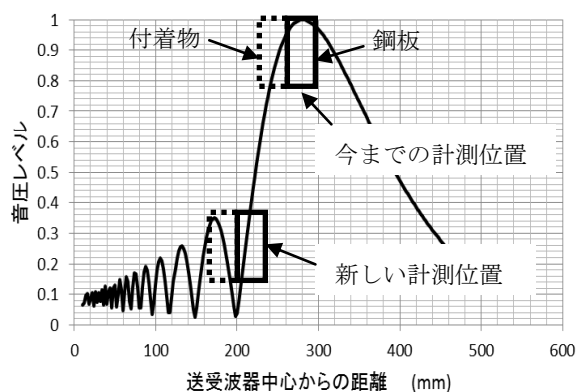


図-5.8 計測位置と音圧分布

6. 水槽実験

6.1 非接触式肉厚測定装置

図-6.1に示す実験装置は専用設計は行わず、市販の各装置を組み合わせで作成し、受波データをパソコンで処理することで、肉厚を数値表示するようにした。

各装置の品名を以下に示す。

- ①発信器 PXI-5406 (National Instruments社製)
- ②パワーアンプ 広帯域パワーアンプ2100L (E&I社製)
- ③超音波送受波器 直径φ100mm (ジャパンプローブ社製)
- ④AD変換機 PXI-5122 (National Instruments社製)
- ⑤制御解析用パソコン Elite Book 8570P (HP社製)

実験装置は、機能毎にまとめると(1)超音波信号発信部、(2)超音波受信部、(3)送受波器、(4)制御・解析部から成り主要な仕様は以下の通りである。

- (1) 超音波信号発信部 (①発信器, ②パワーアンプ)
- | | |
|-------|--------------------------------|
| 出力電圧 | : 450V |
| 波形 | : 正弦波 |
| 周波数 | : 500kHz以下～1MHz以上(可変) |
| 信号タイプ | : バースト, チャープ,
バーカ符号(4次, 5次) |

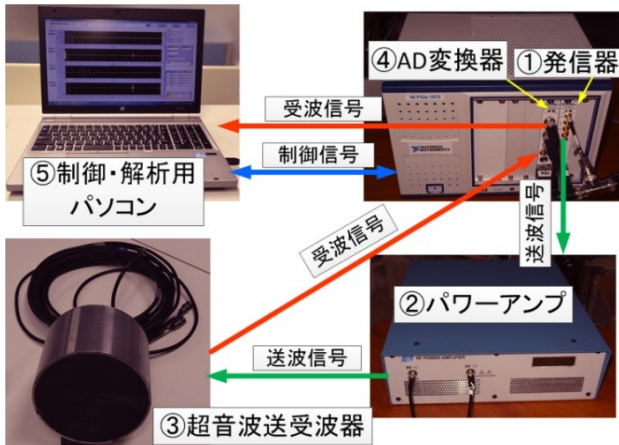


図-6.1 非接触式肉厚測定装置

(2) 超音波受信部(④AD変換器)

分解能 : 14ビット

AD変換器サンプリングレート : 100Ms/s以上(可変)

(3) 送受波器(③超音波送受波器)

直径 : φ120mm, φ100mm

曲率半径 : R300mm

最大電圧 : 500V

(4) 制御・解析部(⑤制御・解析用パソコン)

図-6.2に示す制御・解析画面をから、肉厚測定を行うための操作を行う。

主な操作機能を以下に示す。

- ・水中音速設定
- ・鉄板内の音速設定

- ・送波信号の選択
- ・波形記録
- ・相互相関関数の計算
- ・計測対象物までの距離計算・表示
- ・肉厚計算、表示

6.2 付着物が無い場合の測定精度

付着物が無い鋼板だけの場合の肉厚測定精度について実験を行った。肉厚が異なる5種類の鉄板(100mm×100mm)について、超音波信号にモノパルス、チャープ信号、バーカ符号を用いて肉厚を測定した。

(1) 測定方法

図-6.3に示すようにプラスチック製の水槽(縦1000mm×横650mm×深さ515mm)内に直動装置に搭載した送受波器を設置し、正面に鉄板を置き肉厚測定を行った。鉄板と送受波器の距離は、直動装置で送受波器を移動し、焦点距離になるように調整した。

音波は、以下の信号を使用した。

- ・モノパルス: 1MHz サイン波 1波
- ・チャープ信号: 1MHz, 900kHz, 800kHz, 700kHzのサイン波を1波毎つないだもの
- ・バーカ符号: N=4, 搬送波は900kHz

(2) 測定結果

モノパルス、チャープ信号、バーカコードでの各10回の測定の平均値とノギスでの測定値を表-6.1, ノギス測定値と平均値の差を表-6.2に示す。



- ・ノギス測定との差が小さく、安定していたものはチャープ信号であった。
- ・チャープ信号、バーカコード、モノパルスの順にノギス測定との差が小さかった。
- ・モノパルスとチャープ信号では、8.5mm、11.6mmの鉄板の肉厚測定が、多重反射を検出できなかったため測定不能と成った。

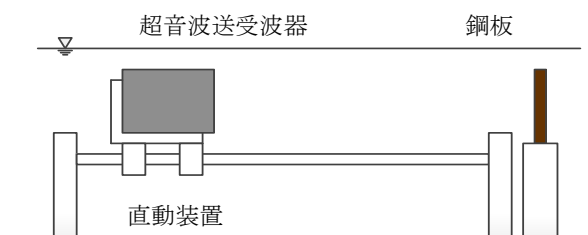


図-6.3 水槽実験配置図

表-6.1 肉厚測定結果(10回平均) (mm)

ノギス測定値	8.50	11.60	18.45	24.50	28.00
モノパルス	—	—	18.47	23.65	28.00
チャープ信号	—	—	18.39	24.49	28.01
バーカ符号	8.43	11.15	18.34	24.15	27.92

表-6.2 肉厚測定結果(ノギス測定値との差) (mm)

ノギス測定値	8.50	11.60	18.45	24.50	28.00	平均値 (絶対値)
モノパルス	—	—	-0.02	0.85	0	0.29
チャープ信号	—	—	0.06	0.01	-0.01	0.03
バーカ符号	0.07	0.45	0.11	0.35	0.08	0.21

(3)まとめ

- ・チャープ信号は、安定して計測できた。
ノギスとの平均測定差は0.03mmであった。
- ・バーカコードはレンジサイドローブが小さいため、薄い鉄板にも対応できる。
ノギスとの平均測定差は0.21mmであった。
- ・モノパルスは、エネルギーが小さいためノイズの影響を受けやすい。
ノギスとの平均測定差は0.29mmであった。

- ・モノパルス、チャープ信号で薄板が測定できない場合の波形を図-6.4に示す。縦線の位置が多重反射波を示す。モノパルスの場合は、反射波は現れているが、レベ

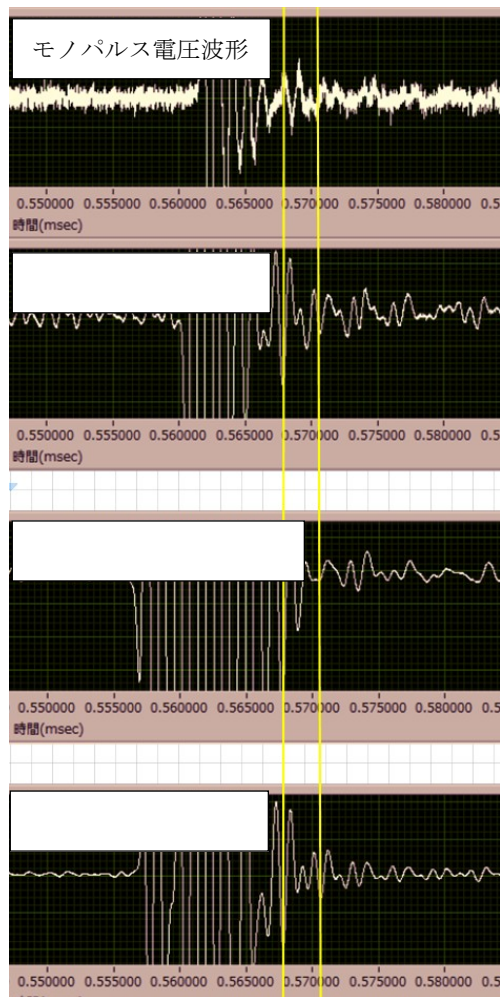


図-6.4 肉厚8.5mmの各信号での測定結果

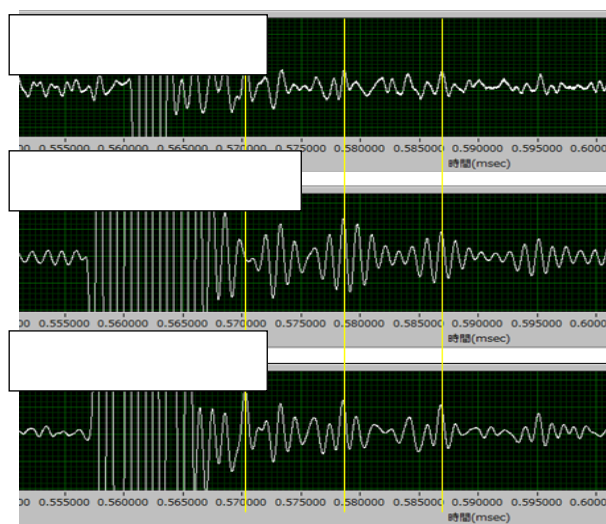


図-6.5 肉厚24.5mmの各信号での計測結果

ルが小さいためノイズとの区別が付かない。チャープ信号は、レンジサイドローブとパルス幅が長い影響で、多重反射が検出できない。

- ・ 検出性能の違いを示すため、鋼板の肉厚24.5mmの肉厚測定時の各信号の相互相関関数を図-6.5に示す。縦線の位置が多重反射波を示す。

モノパルスは、信号レベルが低いので多重反射波とノイズの区別が付きにくい。

チャープ信号は、レンジサイドローブが多重反射波と同程度の振幅となっているため最大値を検出しにくい。

パーカ符号は、レンジサイドローブが小さいので、最大値が突出し、検出が容易になる。

6.3 付着物が有る場合の測定精度向上策

付着物が有る場合の肉厚測定精度の低下理由と改善策による効果を確認するため、図-6.3に示す実験水槽で精度確認実験を実施した。

(1)測定方法

図-6.1に示す装置を使用し、送受波器は直径φ100mm、曲率半径300mm、超音波信号は周波数700kHz、パーカ符号(N=5)を使用した。また、低周波ノイズ低減のために50kHz以上を通すハイパスフィルタ、受波信号を増幅するプリアンプを受波器とAD変換器の間に接続した。

送受波器の位置は、図-6.3に示すように鋼板表面からの距離とし、送受波器を搭載した直動装置で309mmから10mm毎に距離が短くなる方向に移動させ超音波を送波し、測定を行った。鋼板の位置は、下記項目a)、b)、c)共に同じ位置になるように設置した。

a) 付着物からの反射波測定

付着物の影響を調べるため、水槽内にムラサキガイの貝殻を袋詰めにして置き、貝殻を入れた袋の背面に鋼板を置いた場合に鋼板表面が来ると想定し、送受波器の位置に対する、反射波の変化の状況を測定した。貝殻を入れた袋の厚さは約7cmで、袋の上部を枠に固定し、図-6.6に示すようにぶら下げた状態で測定した。

b) 付着物が無い場合の鋼板の肉厚測定

鋼板単体で、送受波器を1cm毎移動させ反射波の状況および鋼板肉厚を測定した。使用した鋼板の肉厚は、ノギス測定値で18.45mmである。

c) 付着物が有る場合の鋼板肉厚測定

鋼板とムラサキガイの貝殻の袋詰めが密着するように設置し、b)と同様に送受波器と鋼板表面までの距離を変え、反射波の状況および鋼板肉厚を測定した。測定状況を図-6.7に示す。



図-6.6 ムラサキガイの貝殻を袋詰め

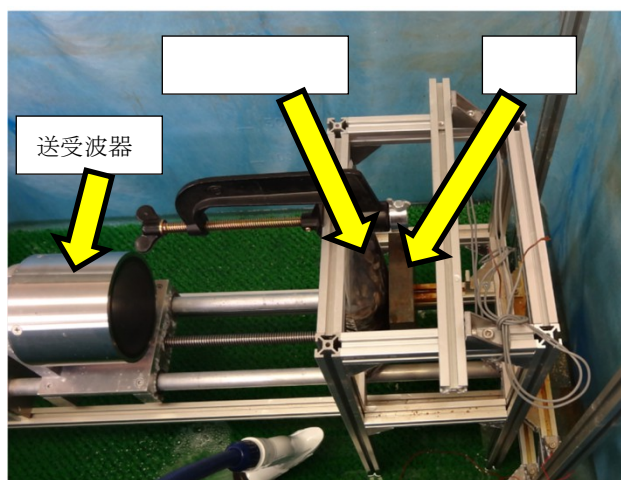


図-6.7 付着物が有る場合の測定状況

(2)測定結果

a) 付着物からの反射波測定結果

図-6.8に送受波器の位置309mmでの受波電圧波形を示す。前の方の波形はアンプで増幅しているため飽和しているが、以降は波形が維持されている。縦線①が送受波器から309mmの位置で鋼板の表面反射が検出される時間である。縦線②は多重反射波が4回検出される時間に送波パルス幅を加えた時間を示している。鋼板厚が18.45mmの場合に表面反射波と1回目の多重反射が観測されるまでの時間は、鋼板内の音の伝搬速度を5,920m/secとすると6.23μsecとなる。超音波信号のパルス幅は周波数700kHz、N=5のパーカ符号を使用するので、 $1 \div 700,000\text{Hz} \times 5\text{回} = 7.14\mu\text{sec}$ となる。縦線①と②の間の時間は $6.23\mu\text{sec} \times 4\text{回} + 7.14\mu\text{sec} = 32.06\mu\text{sec}$ となる。この縦線①と②の間に付着物からの反射波が及んでいることが分かる。図-6.9は送受波器の位置199mmでの受波電圧波形を示す。付着物からの反射波の及ぶ範囲はほぼ同一であるが、振幅が減少していることが分かる。

図-6.10は、送受波器の位置に対する図-6.8、図-6.9に示す縦線①から②の時間範囲(多重反射波が検出される

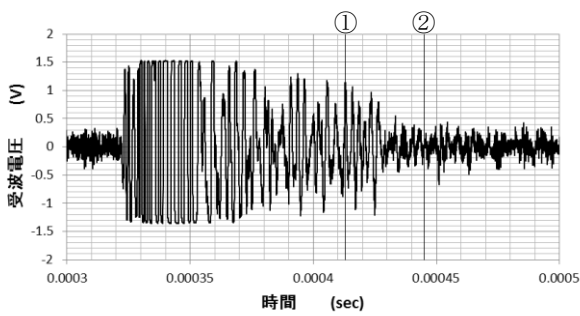


図-6.8 付着物からの反射波(距離309mm)

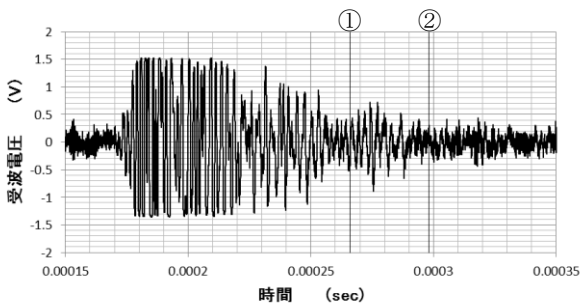


図-6.9 付着物からの反射波(距離199mm)

時間範囲)の受波電圧の最大振幅の変動を示したもので、縦軸は最大値(送受波器の位置309mmでの受波電圧の最大振幅)を1として正規化した。図-6.10から分かるように送受波器が貝殻に近づくほど貝殻からの反射波が小さくなっている。

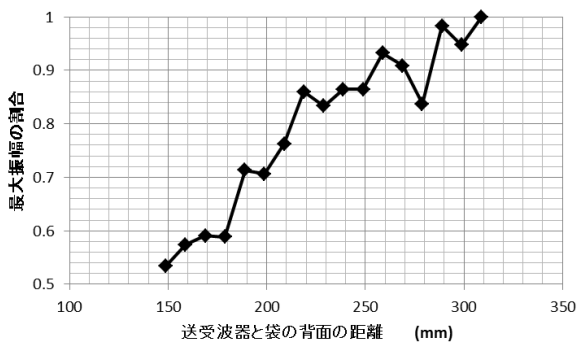


図-6.10 送受波器の位置と付着物からの反射波

b) 付着物が無い場合の鋼板の肉厚測定結果

図-6.11は送受波器の位置309mmでの受波電圧波形を示す。アンプで増幅しているため表面反射波と多重反射波は、飽和している。①、②の縦線は図-6.8の縦線と同じ時間位置で、この間に鋼板の表面反射波と多重反射波が含まれている。

図-6.12は、図-6.11に示す受波波形と送波器に印加し

た送波信号との相互相関関数を計算した解析結果である。Aが鋼板表面からの反射波の位置、Bに2回目～4回目の多重反射波の位置が波形のピーク値として現れている。多重反射波の1回目の位置は、表面反射波との合成波となるため検出できない。

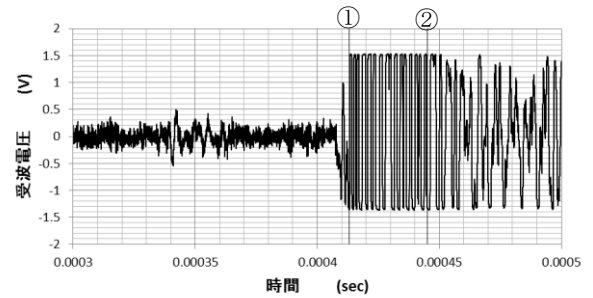


図-6.11 鋼板からの反射波(距離309mm)

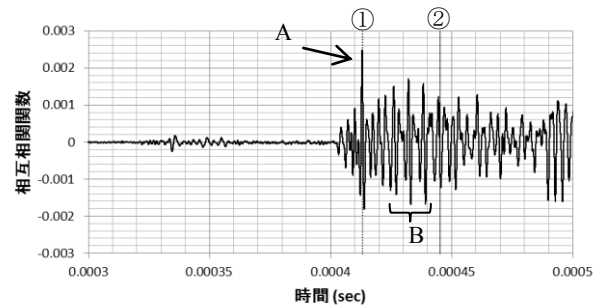


図-6.12 鋼板からの反射波の解析結果(距離309mm)

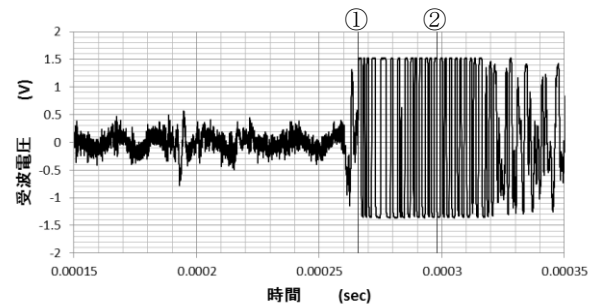


図-6.13 鋼板からの反射波(距離199mm)

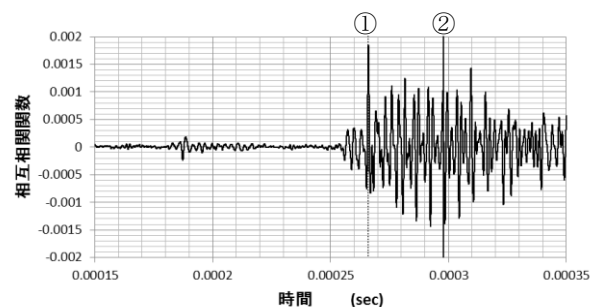


図-6.14 鋼板からの反射波の解析結果(距離199mm)

同様に送受波器の位置199mmでの受波電圧波形を図-6.13、相互相関関数を図-6.14に示す。縦線①、②は図-6.9と同じ時間位置である。鋼板と送受波器の距離が近付いても多重反射が検出できるのが分かる。

鋼板表面と送受波器との距離の変化による多重反射波の電圧値の変化を知るためハイパスフィルタおよびプリアンプを外して、図-6.1に示す装置の状態にして、表面反射波及び多重反射波の2回目から4回目までの時間範囲内の最大電圧振幅を測定した。図-6.15は送受波器と鋼板の距離304mmでの鋼板からの反射波形である。縦線①から②の間に表面反射波、③から④の間に2回目～4回目の多重反射波が存在する。図-6.16に送受波器から鋼板までの距離に対する表面反射波と多重反射波の最大振幅電圧の変化を示す。表面反射波は、図-4.6に示す音圧分布と同様に焦点付近で振幅が最大となり、送受波器と鋼板の距離が小さくなるほど小さくなっているが、多重反射波は逆に距離が近くなるほど振幅が大きくなっている。この理由は、送受波器に焦点集束型音源を使用しているため、多重反射を繰り返すことにより鋼板内を超音波が前進し、鋼板背面で焦点距離に達した場合に、多重反射が大きくなると考えられる（里中ら1997）。

c) 付着物が有る場合の鋼板肉厚測定結果

図-6.17に送受波器から鋼板までの距離309mmの位置で

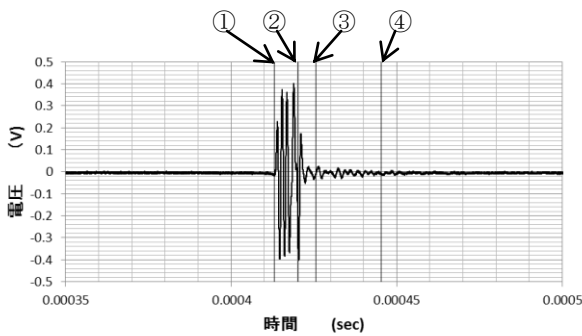


図-6.15 鋼板からの反射波(距離304mm)

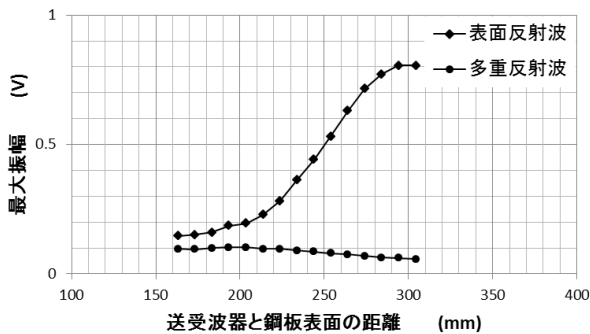


図-6.16 鋼板からの反射波振幅と距離

の反射波の解析波形を示す。縦線①と②は、図-6.12の縦線と同じ位置に引いたものであり、①の時間に鋼板の表面反射波、①と②の間に多重反射波が存在しているが、このグラフからは読み取ることができない。

図-6.18に送受波器から鋼板までの距離199mmの位置での反射波の解析波形を示す。図-6.14と比較して6μsec短い位置に鋼板表面からの反射波(縦線①)が現れている。距離にして4mm程度であるので、セッティングの際に鋼板の位置がずれたものと思われる。縦線①と②の間に多重反射波をグラフから読み取ることができる。

図-6.19は送受波器から鋼板までの距離に対する肉厚測定値を示す。鋼板単独の場合と付着物が有る場合の肉

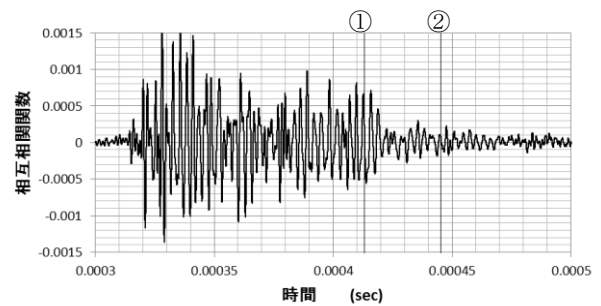


図-6.17 付着物と鋼板からの反射波の解析波形 (距離309mm)

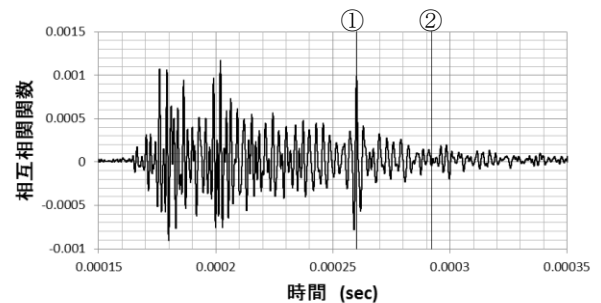


図-6.18 付着物と鋼板からの反射波の解析波形 (距離199mm)

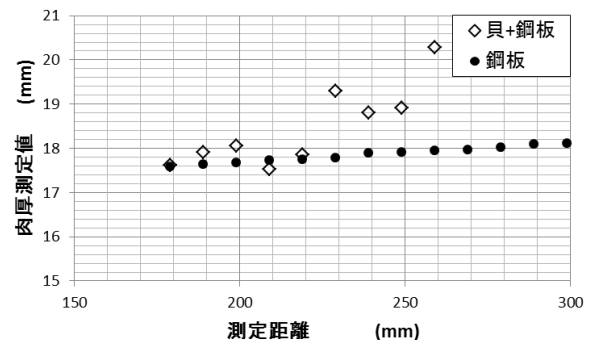


図-6.19 送受波器から鋼板までの距離と肉厚測定値

厚測定値は、距離が219mm以下の範囲ではほぼ同程度となっていることが分かる。鋼板単独の場合の肉厚測定は、多重反射波2～6回目の各間隔を測定し、平均値から肉厚を算出した。また、付着物が有る場合の肉厚測定は、多重反射波2回目と3回目の間隔を測定し、肉厚を算出した。

(3) 考察

実験の結果、以下のことが明らかになった。

①肉厚測定誤差要因

付着物が有る場合の肉厚測定誤差の主な原因は、付着物の反射波の測定から、多重反射波の検出時間領域に付着物からの振幅の大きな反射波が及んでいるためである。

②解決方法

この原因を緩和し、付着物が有っても肉厚測定を可能とする方法は、焦点集束型の超音波送受波器を使用し、送受波器と鋼板の距離を送受波器の焦点距離よりも近づけて測定する。

③解決方法の原理

この方法で付着物が有る場合の肉厚測定が可能になる理由は、以下の2点の相乗効果で多重反射波が検出できるようになるためである。

・付着物に当たる超音波の音圧を小さくする。

焦点集束型の超音波送受波器から放射される超音波の音圧は、焦点距離付近で最大となり、距離が近づくと急激に低下する。このため、送受波器と付着物の距離を近づけると付着物に当たる超音波の音圧が低下し、付着物からの反射波の音圧が低下する。

・多重反射波の音圧を大きくする。

鋼板の内部で多重反射を繰り返すことにより超音波が前進し、鋼板背面で焦点距離に達した場合に、多重反射が大きくなる。

④課題

本方式による測定方法を確かなものにするため、以下の2点について、明確にする必要がある。

・測定鋼板肉厚に対する送受波器と鋼板の距離

鋼板の肉厚により、多重反射により鋼板背面で焦点を結ぶための送受波器と鋼板表面の距離が異なるので、この関係を明らかにする。

・送受波器と鋼板の距離による肉厚測定値の変動理由

図-6.19に示すように、送受波器と鋼板の距離が近づくと肉厚測定値が小さくなる傾向にある。この原因を明らかにする。

7. 現地調査

川崎港東扇島9号岸壁で本装置を使用して、鋼管矢板

の肉厚測定を実施した。

7.1 実施場所及び調査日

調査場所：川崎港東扇島9号岸壁の鋼管矢板

図-7.1に平面図、図-7.2に断面図を示す。

調査日：平成26年11月23日～25日

7.2 調査項目

(1)非接触肉厚測定装置による肉厚測定

図-7.1に示す区画①～③の区画毎に鋼管矢板1本の肉厚を10cm間隔で測定した。

(2)従来方式（接触式の肉厚測定）による肉厚測定

図-7.1に示す区画③の非接触肉厚測定装置により肉厚を測定した鋼管矢板について、同一測線上の上、中、下3箇所について従来方式で肉厚を測定した。

7.3 測定位置

測定位置は図-7.3に示すように各区画の目地を起点として、23日は目地から12.45m、24日の午前午後は13m、25日は14mの位置とした。

建設時の鋼管矢板の寸法は、直径φ1000mm、肉厚17mmで、図-7.2に示すように上部から-1mまで防蝕のためのモルタルライニングが施されている。また、事前に潜水士による目視調査を行った結果、全ての鋼管矢板に電気防蝕のための陽極および鋼管パイプが付属していることが分かった。鋼管矢板の測定位置は、モルタルライニングの下から海底部までとし、陽極および鋼管パイプをさけて垂直に測定できる位置を潜水士の誘導で決定した。

7.4 超音波非接触式肉厚測定

本装置の送受波器は単体重量約5kgである。そのため、潜水士が水中で送受波器の位置を保持するためには、治具が必要となる。今回の現場では、図-7.2に示すように岸壁と棧橋部の間に200mmの隙間があり、スチール製グレーチングで覆われていたため、スチール製グレーチングの網目からワイヤーロープを下ろし、送受波器を取り付けた治具を吊り下げた。またワイヤーロープの陸側は、手動ウインチで巻き取り、潜水士の負担が無く、送受波器を上下動させる構造とした。

(1)計測用治具

非接触式肉厚測定装置で肉厚測定するためには、送受波器と測定対象物との距離を適当に保ち、超音波が測定対象物（鋼板）に垂直入射するように保持する治具が必要となる。今回使用した治具は、共同研究者である日鉄住金防蝕が考案したもので、手動ウインチ、アーム、セ

9号岸壁の区画①, ②, ③毎に
1本の鋼管矢板の肉厚を連続測定した.
測定した鋼管矢板は, 西側目地から約13m

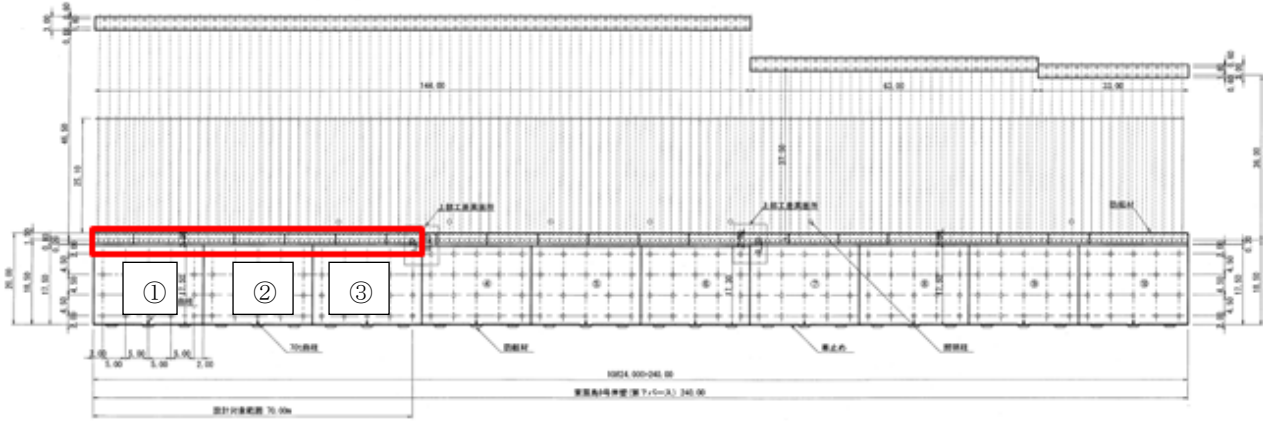


図-7.1 東扇島9号岸壁平面図

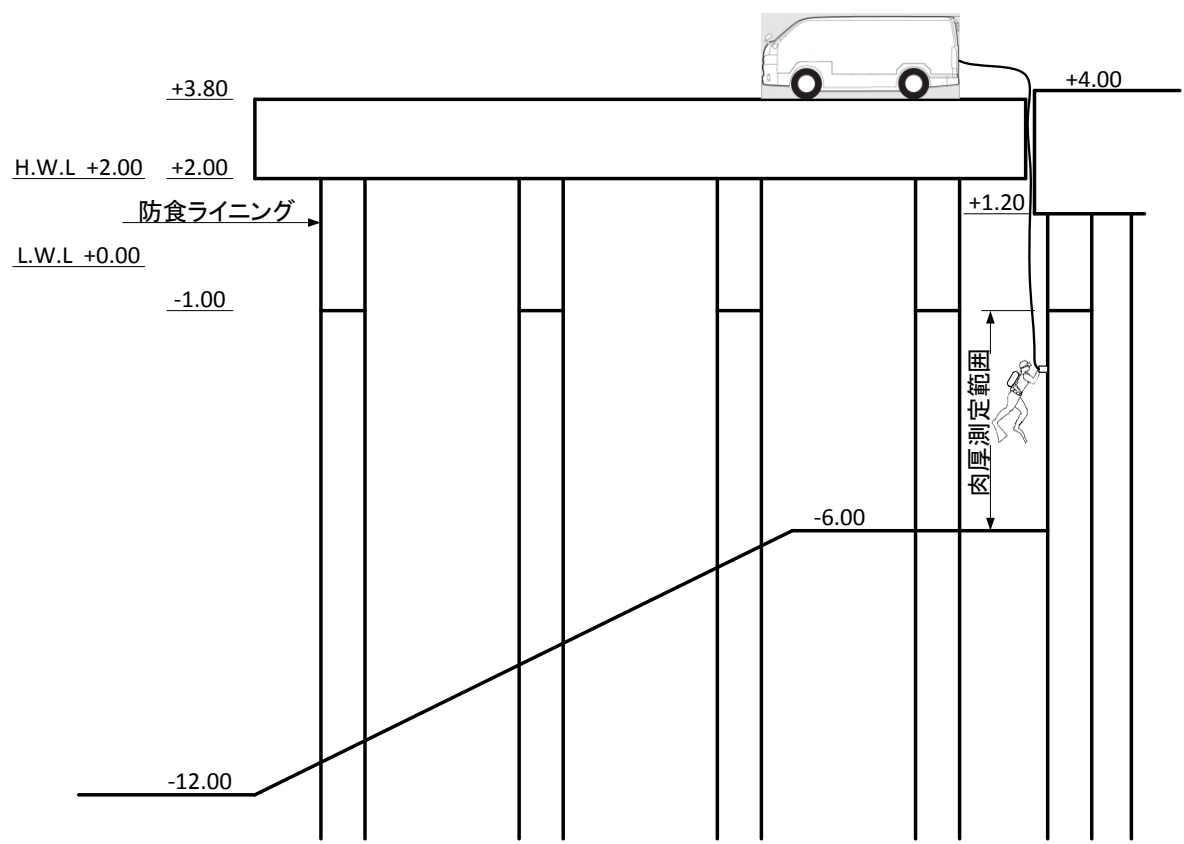


図-7.2 東扇島9号岸壁断面図

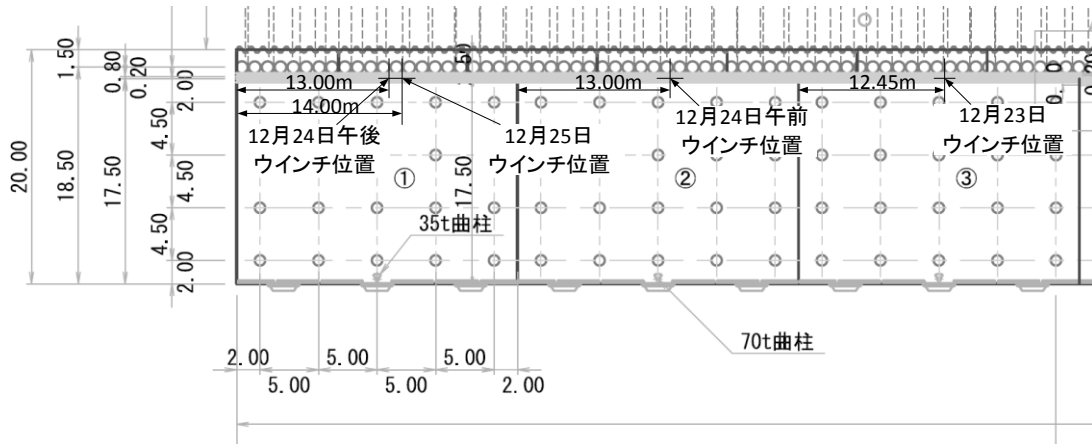


図-7.3 測定位置詳細

ンサ架台からなる。

a) 手動ウィンチ(図-7.4, 図-7.5)

手動ウィンチは、超音波送受波器を搭載したセンサ架台をワイヤーロープで吊り下げ、ワイヤーロープの繰り出し量を1cm単位で読み取れるようになっている。このワイヤーロープの繰り出し量で、超音波送受波器の上下方向の位置決めを行った。

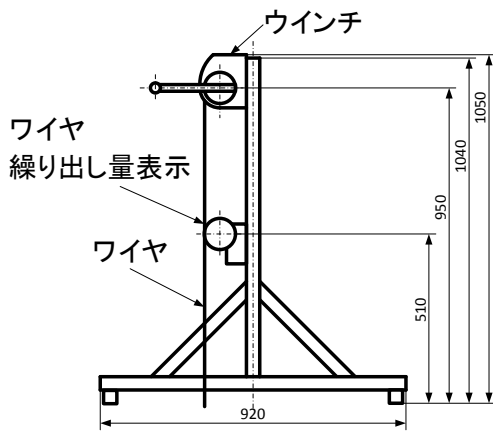


図-7.4 手動ウィンチ

b) アーム(図-7.6)

アームは、手動ウィンチとセンサ架台の間に設置し、ワイヤーロープが岸壁の部材に接触しないように滑車でワイヤーロープ通過経路をコントロールするために使用した。アームは磁石で鋼管杭に簡単に取り付けることが出来るようになっている。

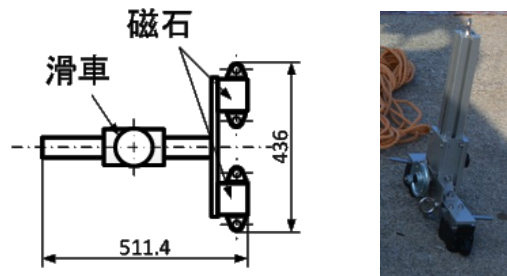


図-7.6 アーム

c) センサ架台(図-7.7)

アイボルトに手動ウィンチからのワイヤーロープのフックを掛け、吊り下げて使用する。4個の車輪で鋼管杭に沿って移動し、測定時に潜水士がハンドルを押して4輪が鋼管杭に接するように固定し測定する。なお、付着物の厚さ測定後、鋼管矢板の曲率と付着物の厚さを考慮して、現場で超音波送受波器の位置を200mmから223mmに変更した。

超音波送受波器は、焦点集束型音源で曲率半径300mm、直径100mm、周波数700kHzのものを使用した。

(2) 超音波非接触肉厚計測装置(図-7.8)

6.1項に示す装置を使用し、送受波器は直径φ100mm、曲率半径300mm、超音波信号は周波数700kHz、パーカ符号(N=5)を使用した。また、低周波ノイズ低減のために50kHz



図-7.5 ワイヤーロープ繰り出し量表示とウィンチ全景

以上を通すハイパスフィルタ，受波信号を増幅するプリアンプを受波器とAD変換器の間に接続した。

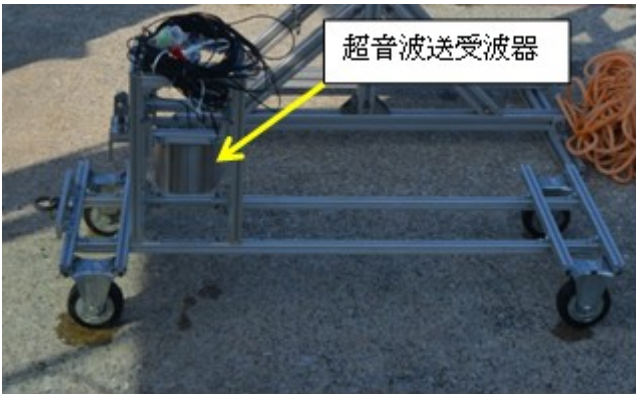
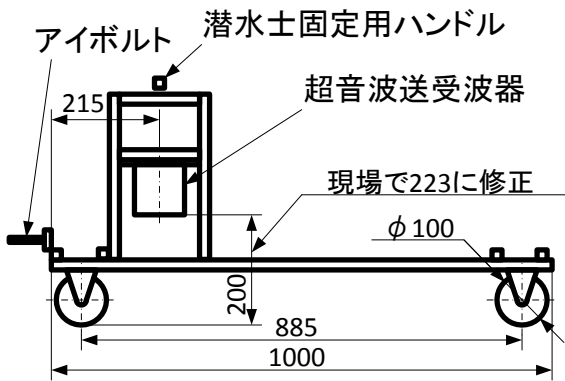


図-7.7 センサ架台



図-7.8 超音波非接触肉厚計測装置

(3) 計測方法

図-7.9に示すように栈橋上に手動ウインチを設置し，アームを鋼管矢板の防食ライニングの下部に磁石で固定した．アームを確実にするために鋼管矢板の付着物を除去し，図-7.10に示すように取り付けた．



図-7.10 アーム固定状況

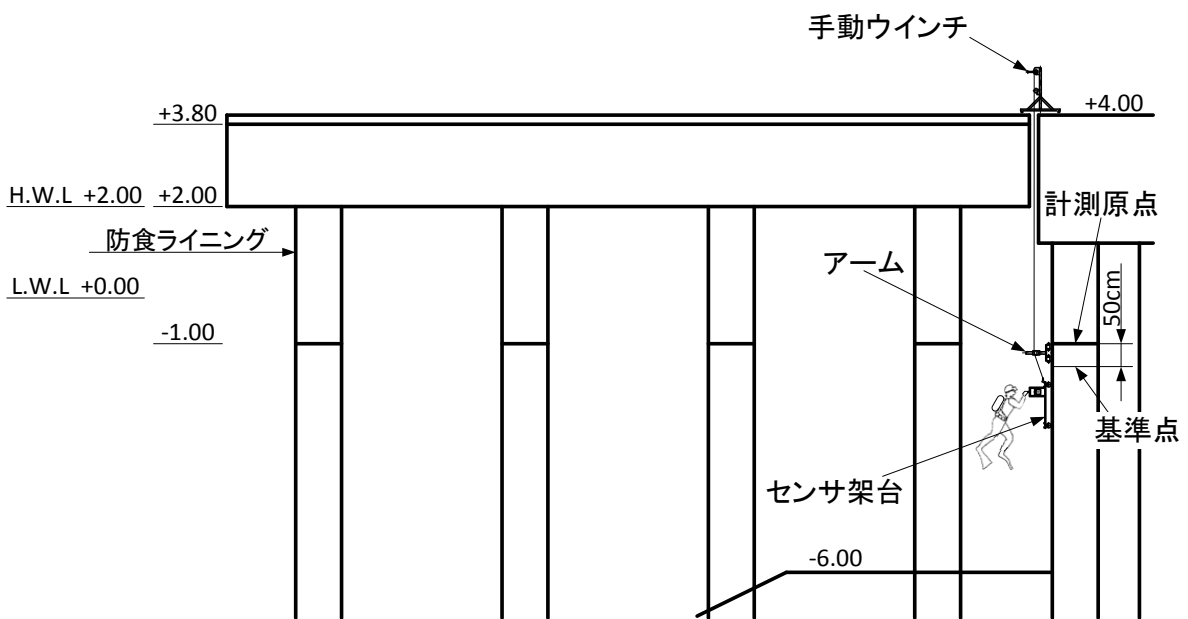


図-7.9 測定状況

手動ウインチからワイヤーロープが鉛直に下りるようにアームの滑車の位置を調節し、滑車を通してワイヤーロープ先端のフックをセンサ架台のアイボルトに掛け、センサ架台を吊り下げた。

計測原点を防食ライニングの下端とし、計測原点から50cm下がった地点を基準点(0cm)とし、潜水士の指示で基準点までセンサ架台を下ろし肉厚測定を開始した。

測定は以下に示す手順で行った。

- ①手動ウインチでワイヤーロープを10cm繰り出す。
- ②陸上から潜水士にウインチ操作の完了を連絡。
- ③潜水士がセンサ架台を鋼管矢板に押しつけ位置決めを行う。(図-7.11)



図-7.11 センサ架台固定状況

- ④超音波を送受波し、データを取得。

送波間隔は、0.5secで、10秒程度の間データの記録を行った。データ記録前に、反射波が得られるようにプリアンプで増幅度の調整を行った。

送受波器の向きについては、潜水士がセンサ架台を鋼管矢板に押しつけただけで、超音波が鋼管矢板に垂直入射するように特別な指示、作業は行っていない。

①から④が測定の1工程で、これを繰り返し基準点からセンサ架台が海底に着底するまでの間の鋼管矢板の肉厚測定を行った。

7.5 接触式肉厚測定(従来方法)

非接触式の肉厚測定結果を検証するため、従来方式の接触式肉厚測定を23日に非接触式で肉厚測定した同一測線上の基準点から50cm、150cm、250cmの位置で、肉厚測定を実施した。

(1)超音波厚み計

表-7.1と図-7.12に示す装置を使用した。送受波器を測定面に押しつけると、表示部に肉厚が表示されるようになっている。

表-7.1 超音波厚み計

名称	水中厚み測定器
型式	CYGNUS 1
製造番号	4216 (リモートプローブ)
製造会社	CYGNUS INSTRUMENTS LTD.
周波数	2.25MHz, 3.5MHz, 5MHz
測定精度	0.1mm



図-7.12 水中厚み測定器

(2)測定方法

測定方法は、図-7.13に示すように縦横10cmの正方形に鋼管矢板表面の付着物を除去し、正方形内の5点について超音波送受波器を密着させることが出来るように、鋼管矢板の地金が出るまで研磨した。

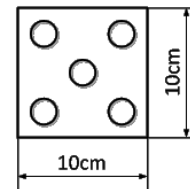


図-7.13 肉厚測定部位

研磨した部分に超音波送受波器を密着させ、表示される測定結果を潜水士が読み取り、陸上の連絡員に通話装置を通して肉厚値を報告した。



図-7.14 肉厚測定状況

測定は正方形内の5点について1点当たり3回測定し、その平均値を採用し、さらに5点の平均値で正方形内の肉厚値とした。

7.6 測定結果と考察

(1)測定結果

従来方式での接触式肉厚測定結果を表-7.2と図-7.15に、非接触式肉厚測定装置による測定結果を表-7.3と図-7.15～図-7.18に示す。表の中で(－)と表示されている箇所は、波形の検出が困難で測定出来なかった点を示す。海底部に貝殻等が堆積していて、センサ架台を捨石面上まで下ろすことが出来なかったため、23日は0から250cmまで、他の日は0から210cmまでの間を10cm毎に測定した。平均肉厚は16.3mm、最大値は17.7mm、最小値は11.6mmであった。

(2)考察

・今回の測定現場は、付着物の厚さが10～20mmと薄かったため、全測点数92点に対し欠測点は10点で1割程度であった。

・従来の接触式で測定した地点の非接触式肉厚測定のデータが3点共に非接触式での測定では欠測であったため直接比較は出来ないが、近傍のデータで比べるとほぼ近い値を示している。

・肉厚測定値が最小の11.6mmの地点は、図-7.19に示す測定波形が鋼板表面からの反射波および多重反射波が明瞭に表示されているので、測定誤差では無くこの部分だけ異常に損耗していると思われる。

・図から肉厚測定値の1mm以上のバラツキが有る測点がある範囲で固まっているように見える。この原因の1つとして、超音波の斜め入射の影響が考えられる。送受波器は4輪のセンサ架台に搭載され、潜水士が鋼管矢板にセンサ架台を押しつけているだけであるので、鋼管矢板表面の付着物による凹凸の影響を受けて、超音波の鋼管矢板への入射角度が斜めになっていた可能性が考えられる。

ただし、斜め入射の影響については、十分に調べていないので水槽実験で明確にする必要がある。

・数値で肉厚測定値を表示することは、解り易くて良いが、その値が確定値のように測定者には受け止められる。

波形から判断すると、多重反射波が明瞭に現れている場合と不明瞭な場合が有り、この情報を測定値の信頼度として測定者に伝えられるような表示を考える必要がある。

表-7.2 従来方式による肉厚測定結果

基準点からの距離	肉厚測定値					平均値
	1	2	3	4	5	
50cm	15.9	14.9	16.3	16.4	15.7	15.8
150cm	16.2	16.2	16.4	16.5	16.3	16.3
250cm	16.3	15.3	16.8	15.1	16.9	16.1

表-7.3 非接触式肉厚測定装置による肉厚測定結果

基準点からの距離 (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
11月23日測定肉厚 (mm)	15.7	15.7	16.3	15.7	16.1	—	17.3	—	16.1	15.6	16.1	16.3	16.1
11月24日午前測定肉厚 (mm)	16.8	16.3	15.9	16.5	—	16.5	17.7	16.4	17.7	17.3	—	16.8	16.2
11月24日午後測定肉厚 (mm)	16.5	15.9	16.5	16.3	16.3	16.8	16.4	16.4	15.9	16.1	16.7	16.7	15.4
11月25日測定肉厚 (mm)	16.2	15.7	16.4	16.4	16.3	11.6	16.8	16.7	16.8	—	16.4	16.0	16.7
基準点からの距離 (cm)	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
11月23日測定肉厚 (mm)	16.5	16.9	—	—	16.4	17.0	16.1	16.3	16.1	15.9	16.1	16.9	—
11月24日午前測定肉厚 (mm)	16.4	16.4	16.6	16.7	16.6	—	16.1	15.4	16.9				
11月24日午後測定肉厚 (mm)	17.4	14.4	15.4	16.4	16.4	15.7	16.4	16.6	16.8				
11月25日測定肉厚 (mm)	16.8	—	16.4	16.4	16.3	16.3	16.6	15.7	15.7				

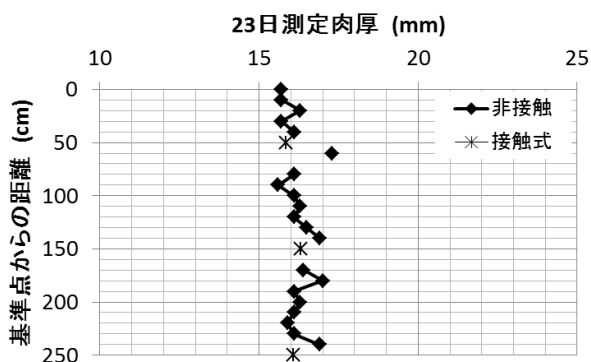


図-7.15 肉厚測定結果(23日)

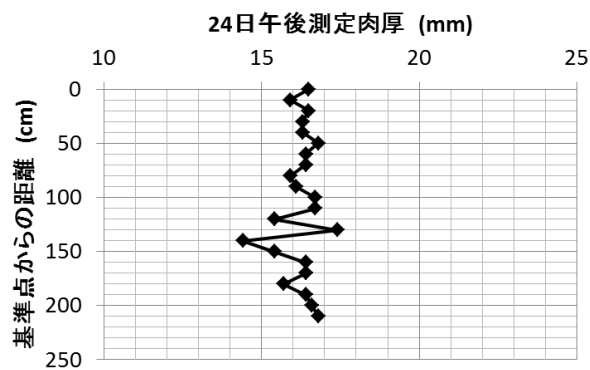


図-7.17 肉厚測定結果(24日午後)

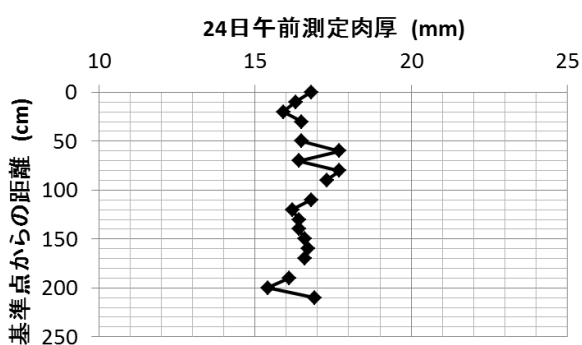


図-7.16 肉厚測定結果(24日午前)

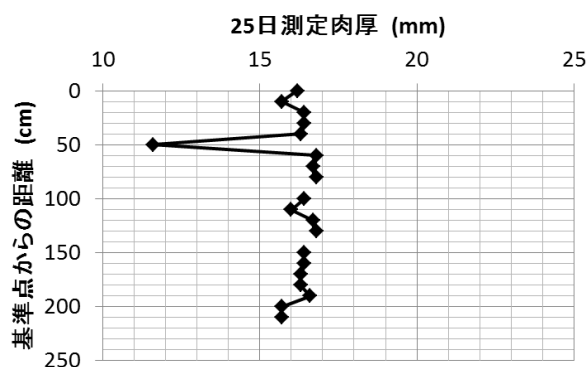


図-7.18 肉厚測定結果(25日)

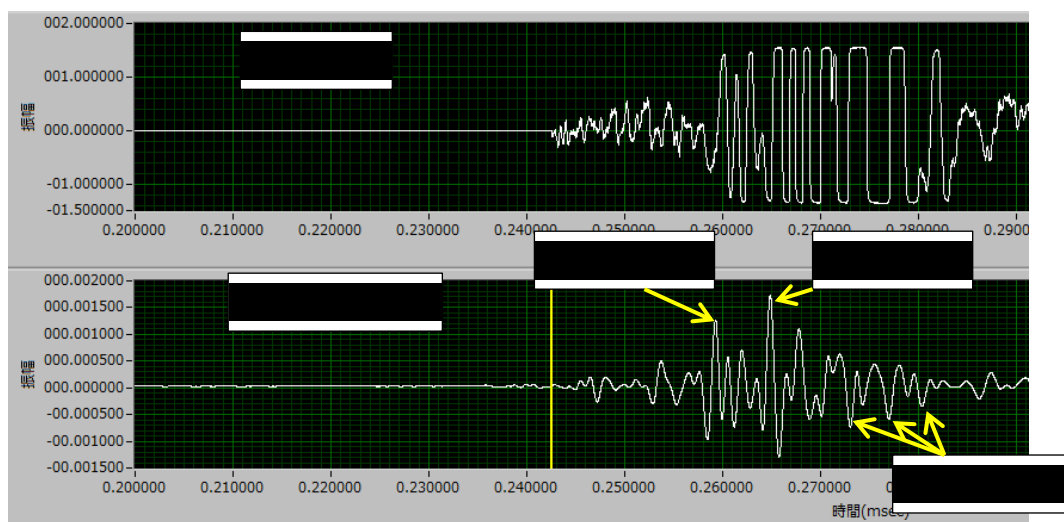


図-7.19 受波電圧波形と解析波形(25日 基準点からの距離 50cm)

8. まとめ

本研究では、肉厚測定装置の実用化を目指して、超音波の特性に対する知識の無い技術者が使用できる肉厚測定装置の開発を行ってきた。本装置は、付着物が付いたままの状態で行うもので、水中に置かれた鋼

板内に超音波が伝搬することにより発生する多重反射波を検出し、その時間間隔から肉厚を算出するものである。多重反射波は微弱な信号であるため、この信号を精度良く検出することが本装置を実用化するための最も重要な事項となる。

本研究において、明らかになったことを以下に示す。

①附着物の音響特性

附着物を栈橋の鋼管杭から採取して、その音響特性を調べた結果、周波数が700kHz以下の超音波であれば、透過波の波形の変形が少なく、多重反射波の検出ができる。

②送受波器の形状

数値計算で音圧分布を検討し、微弱な信号を捉えるため焦点集束型の超音波送受波器を製作した。

③信号処理

時間計測精度を向上させ、限られた送波電圧で大きなエネルギーを鋼板に伝えるために、レーダーで実用化されているパルス圧縮技術を導入した。

超音波信号にバーカ符号を使用し、送波信号と受波信号との相互相関関数を求めることで、同じ送波電圧の場合、モノパルスよりも高精度に多重反射波を検出できることを水槽実験で確認した。

④測定肉厚の数値表示

多重反射波を特定し、多重反射波の時間間隔から肉厚を算出表示するアプリケーションを作成した。

⑤測定精度を向上させる測定方法の考案

本測定法が考案されるまでは、現地調査において附着物の多い鋼管杭等では、全測点の1割程度しか肉厚測定ができなかったが、本方式の考案により今回の現地計測では、全測点の9割で、肉厚が測定できた。

測定精度に関しても、本方式が考案される前の現地測定データの例を挙げると、平成24年12月新日鐵住金株式会社君津製鉄所内の火力発電所取水口側壁の鋼矢板測定において、チャープ信号による計測を行い平均値で非接触：9.4mm、接触式：15.2mmと大きな差が出てしまった。また、平成26年3月大黒埠頭でのバーカ符号による岸壁鋼矢板の計測では、周辺ノイズが大きく十分な測定が出来なかった。これに対し本方式では図-7.15から分かるように、接触式との肉厚測定差は1mm以下であった。

このように本方式により、非接触肉厚測定装置の性能が飛躍的に向上したことが分かる。

⑥未解決の課題は以下の通り。

・斜め入射の影響

超音波が測定対象物に垂直入射する想定で開発を進めてきたが、現地調査では、超音波ビームを対象物に常に垂直入射させることは困難である。

斜め入射の計測精度に与える影響、入射角度の許容範囲を明らかにし、機械的な操作により、常に垂直入射する機構の開発が必要である。

・測定精度と測定距離

上記⑤で述べた測定方法の考案の過程で、測定距離による肉厚測定精度の変動が生じることが分かった。この

原因を明らかにする。

・肉厚測定値の信頼性表示

数値で表示される肉厚測定値について、明確に多重反射波を捉えている場合と不明瞭な場合について、波形の状態を測定者に伝えることができれば、肉厚計測値の異常値の判断がし易くなる。

・FRP保護カバーの取り付けられた鋼管杭等の肉厚計測

防蝕のためFRP保護カバーの取り付けられた鋼管杭等が有り、一定期間ごとに保護カバーを撤去して、肉厚測定が行われている。FRP保護カバーが付いた状態で、肉厚測定が出来るようにする。

・送受波器の小型化

現在使用している送受波器は、大きなエネルギーを測定対象物に伝え、微弱な信号を効率的に捉えるため、大口径(直径φ100mm)の物を使用してきた。しかし、送受波器の重量が5kgと重くなってしまったため、取扱いが簡単で無く、高速移動の妨げとなるなど、現場計測に不利な条件となっている。計測精度に影響を与えない範囲で送受波器の小型化を検討することが現場計測の簡便化につながる。

9. おわりに

超音波非接触式肉厚測定装置は、測定手法の考案から研究を開始し、10年近くの長期間にわたって研究を継続し、測定原理の確立及び測定精度を向上させる測定方法の考案により、実用化の可能性が増した。残された課題として、超音波ビームの斜め入射の肉厚計測精度に与える影響の明確化と送受波器の小型化により、肉厚測定装置がほぼ完成する。

本装置による現場での肉厚測定を多数実施し、港湾関係の技術者に本装置について知ってもらい、現地調査で使い易くするための改良を行い、実用化を図りたい。

(2015年5月1日受付)

参考文献

財団法人 沿岸開発技術研究センター(1999)：港湾の維持管理技術マニュアル、沿岸技術ライブラリー、No. 26, pp. 105-110.

吉住夏輝・松本さゆり・片倉景義(2009)：水中鋼構造物の非接触式肉厚測定器の開発、港湾空港技術研究所報告、Vol. 48, No. 4, pp89-108

里中忍・西健治・西脇敏博・河野勇造(1997)：局部水浸法によるスポット溶接の超音波試験、溶接学会論文集、第15巻、第1号、pp58-63

記号表

R_p	: 音圧の反射率
T_p	: 音圧の透過率
RI	: 音の強さの反射率
TI	: 音の強さの透過率
Z_1	: 海水の音響インピーダンス (Pa · sec/m)
Z_2	: 鉄の音響インピーダンス (Pa · sec/m)
X_0	: 近距離音場限界距離 (mm)
D	: 送波器直径 (mm)
λ	: 超音波の波長 (mm)

港湾空港技術研究所資料 No.1311

2015.9

編集兼発行人 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所

発行所 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 シーケン

Copyright © (2015) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています