

表 4.5.15 CASE-B の解析結果⑦ (説明変数相互の偏相関係数)

	漏水量の多少	78以前の管路	平均水圧	腐食性評価係数	鑄鉄管(CIP)
漏水量の多少	1	0.1786	0.0649	0.3987	0.3015
78以前の管路	[ - ]	1	0.1128	-0.1866	0.3726
平均水圧	[ - ]	[ - ]	1	0.0274	0.0424
腐食性評価係数	[**]	[ - ]	[ - ]	1	0.1080
鑄鉄管(CIP)	[*]	[**]	[ - ]	[ - ]	1

[\*\*]:有意水準1%で相関あり, [\*]:5%で相関あり, [-]:5%で相関なし

表 4.5.16 CASE-B の解析結果⑧ (分析精度)

判別的中点	0.0000
-------	--------

判別クロス表

	群 1	群 2	計
判別的中点より大	21	8	29
判別の中点より小	7	20	27
計	28	28	56

判別の中率	73.2%
-------	-------

相関比	0.2868
-----	--------

平均と標準偏差(群別)

	平均	分散	標準偏差
群 1	0.2945	0.1702	0.4125
群 2	-0.2945	0.2611	0.5109
全体	0.0000	0.3023	0.5498

級内分散	0.2156
級間分散	0.0867

### ③ カテゴリースコアによる結果の解釈

CASE-A の解析結果について、アイテム（説明変数）が漏水量（外的基準）に対してどのような影響を及ぼしているのかを詳しく考察する。カテゴリースコア（前掲表 4.5.4）をグラフ化すると、図 4.5.1 のようになる。

各カテゴリーの正負の向きが、漏水量に対する寄与を表わしている。すなわち、カテゴリーの横棒が正の向き（右向き）にある場合、そのカテゴリーは漏水量を増加させる要因となり、逆に横棒が負の向き（左向き）では、そのカテゴリーは漏水量を減少させる要因となる。また、今回の例題のように、複数のアイテムを同時に扱う分析においては、どのアイテムが外的基準への寄与の度合いが大きく、どのアイテムが小さいのかといったことを「レンジ」(前掲(2-23)式)を用いて判断するが、同図のようにグラフ化すれば、その判断が容易にできる。

実際にグラフを見ると、レンジの最も大きいアイテムが「鑄鉄管（CIP）」であることが読み取れる。鑄鉄管（CIP）を「含む」メッシュは、「含まない」メッシュに比べて漏水量が多い傾向にある。「鑄鉄管（CIP）」の次にレンジの大きいアイテムは「腐食性評価係数」であり、漏水量に対する寄与は、腐食性評価係数が高いメッシュの方が漏水量が多いことを意味している。なお、「平均水圧」については、水圧の「高い」メッシュの方が「低い」メッシュと比較して漏水が多い結果を表わしているが、4 アイテムの内、最もレンジが小さい点から判断すると、平均水圧による影響は必ずしも大きくない。

以上をまとめると、「鑄鉄管（CIP）を含み、腐食性評価係数の高いメッシュでは漏水量が高い傾向にあるが、平均水圧の高低が及ぼす漏水量への影響はさほど大きくない」と診断される。

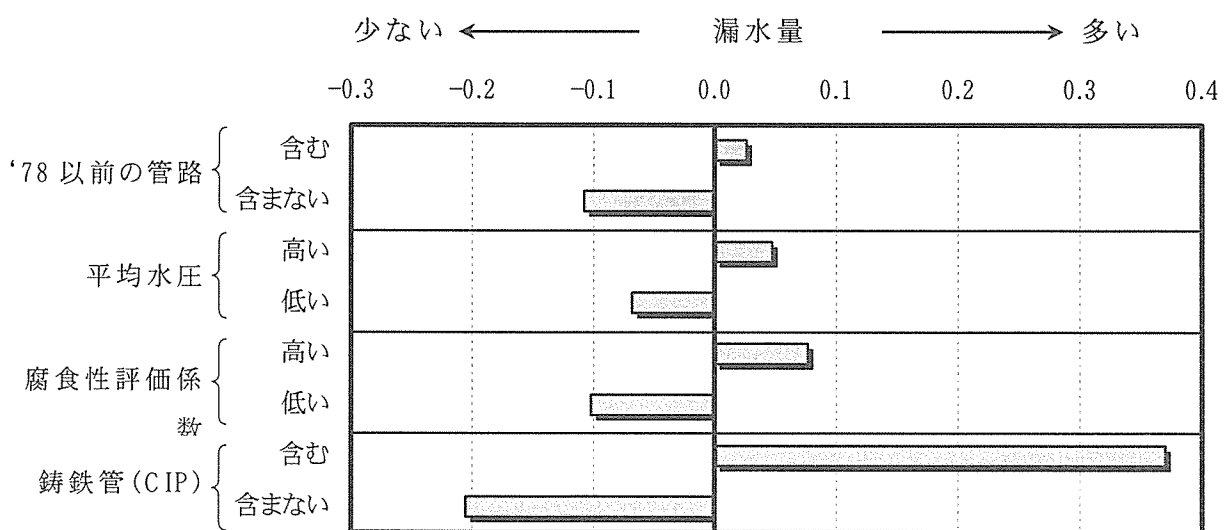


図 4.5.1 カテゴリースコアのグラフ (CASE-A)

同様に、CASE-B の解析結果について詳しく考察する。カテゴリースコア（前掲表 4.5.12）をグラフ化すると、図 4.5.2 のような結果が得られる。

最もレンジの大きなアイテムは「腐食性評価係数」であり、次に「鋳鉄管（CIP）」が続いている。漏水量に対する寄与については、CASE-A の解析結果とレンジの順が異なるものの、腐食性評価係数が高く、鋳鉄管（CIP）を含むメッシュは、漏水量が多くなる傾向にあると判断される。また、「平均水圧」に着目すると、CASE-A の結果と同様、レンジが最も小さいアイテムとなっており、漏水量への影響度は小さいことが読み取れる。

以上より、CASE-B（数量化理論第Ⅱ類の適用）についても、CASE-A（数量化理論第Ⅰ類の適用）と同じような傾向を確認することができた。

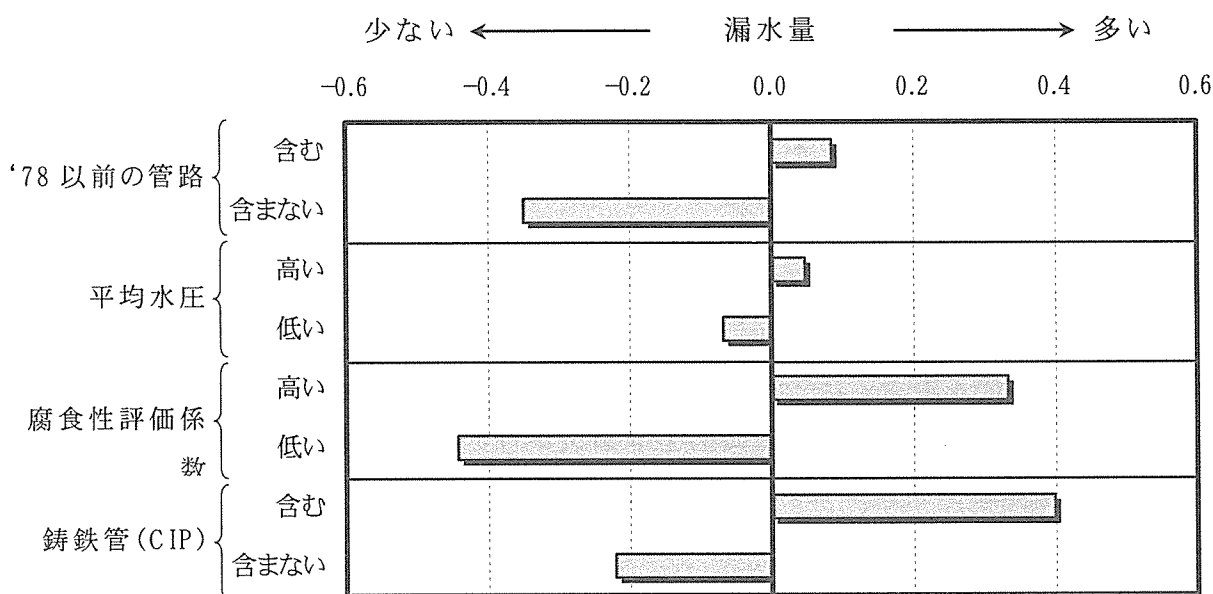


図 4.5.2 カテゴリースコアのグラフ (CASE-B)

#### 4) まとめと今後の展望

本研究では、水道管路の事故リスクに関する統計的分析を検討すべく、数量化理論を用いた管路診断手法の提案を行った。具体的な適用事例を紹介することで、漏水とその原因と考えられる複数の説明要因との関連性を記述する方法（統計モデル）を明らかにするとともに、提案したモデルの発展性を示すことができた。

しかし、今回の例題では、数量化理論の手法としての基本的な特性を明示する点に重心が置かれているため、必ずしも実用的な管路診断手法の確立には至っていない。例えば、「'78以前の管路」と「鑄鉄管（CIP）」との間に高い相関が認められること（前掲表 4.5.6 及び表 4.5.7 を参照）から、内部相関を生じないアイテムの選択が必要となる。また、精度向上の観点から、単に「鑄鉄管（CIP）」を「含む」か「含まない」といった大別だけでなく、どの程度含むのか（一例として「より多く存在する」「少しだけ存在」「存在しない」）、あるいは別な属性との関係はどうなっているのか等、実際の状況に即したカテゴリー化を検討する必要がある。

今後、空間レベルにおけるメッシュデータを用いた管路診断モデルの具体的な作成を行い、管路の経年化や埋設環境を考慮に入れた統計的な管路診断（問診に相当する）方法の研究<sup>2)</sup>を進めて行きたいと考えている。さらには、管路一本一本固有の診断を行うことが可能な物理モデルの開発も併せて行う必要があると思っている。

最後に、本研究を進めるに当たり、貴重な実態調査データを提供していただいた福岡市水道局の中野直樹係長をはじめとする関係各位に心より感謝致します。また、本研究に際し協力を得た首都大学東京大学院都市環境科学研究科の稲員とよの准教授並びに荒井康裕助手に謝意を表します。

#### 【参考文献】

- 1) 林知己夫 監修、駒澤勉 著：数量化理論とデータ処理、朝倉書店、1982
- 2) 小泉明・何王善・孫躍平：数量化理論による下水道管渠の損傷判別分析、環境工学研究論文集、Vol.38、pp.257-264、2001

## 4.6 基礎実験

### 4.6.1 音響エコーを用いた水道管路の劣化検出（音響法）

研究担当委員／横浜国立大学 朝倉 祝治

#### 1) 緒言

老朽化した管路施設の更新・改良については、健全な水循環の形成という観点から、衛生面や環境負荷面に配慮し、効率的・計画的に行わなければならない。しかし、管路の大部分は地中に埋設されており、その状況が容易に把握できないため、管路更新を効率的・計画的に行うには、残留塩素の減少・消失等の水質劣化調査や、非開削等による物理化学的調査、各種センサ技術などを応用して適用を図り、管路機能の低下や管内外面の劣化状況を総合的に診断・評価することが必要であり、更新等の優先順位付けに役立つ、管路の老朽度診断手法ならびに要素技術の開発が望まれる。

水道管路は腐食劣化が起こるとスケールやさびの付着がおこる。そこで、管内に発振子設置し、強力な断続的音波（パースト波）を発生させると付着物による音響的反射波（エコー）が発生する。そのエコーから付着物の量や大きさ、物理的性状などを検出し劣化の部位と程度を検出する試みを実験室的に行うことが本研究の目的である。

本研究を実施することにより、現在更新時期を迎えている管路施設の効率的・計画的な更新が図れるとともに、安全・安心でおいしい水の安定的な供給に資することができる。更新等を契機に、管路の安全性や耐震性等の強化を図ることにより、次世代を見据えたより高度な管路施設システムの構築が可能となる。

これらの研究により、各水道事業者が将来のことを考え、今の段階から管路施設の老朽度や更新の必要性を総合的に評価し、効率的・計画的に管路更新が進められるよう支援していくことを目標とする。

## 2) 理論的検討

### (1) 超音波特性

超音波とは我々が普段生活している環境中に生じる音波の一種であるが、人間の耳では聞こえない周波数の音波のことであり、特に 20kHz 以上の周波数のこという。図 4.6.1 に周波数とその特徴を示す。

#### ①超音波の伝搬速度

音速や伝わり方は、音波が伝搬する媒質の状態によって異なる。気体中の超音波の伝搬速度  $V$ [m/s]は温度  $T$ [°C]とすると、

$$V = 331.5 + 0.60714T \quad \dots(1)$$

と表せる。同様にして水中での超音波の伝搬速度は以下のように表せる。

$$V = 1410 + 4.21T - 0.037T^2 + 1.14s + 0.0168h \quad \dots(2)$$

ここで、 $s$  は塩分濃度 (%),  $h$  は水深[m]である。一般に、音波の伝搬速度の概略値は、気体中では 200~400m/s、液体中では 900~2000m/s 程度である。

また、発信源から物体までの距離を  $L$  とし、エコーを受信するまでの時間を  $t$ [s] とすると、物体までの距離  $L$  は以下の式で求められる。

$$L = \frac{Vt}{2} \quad \dots(3)$$

となる。

#### ②超音波の指向性

超音波は普通の音波とは異なる様々な性質が現れてくる。図 4.6.2 に音源から音波が放射された場合の指向性の例を示す。通常、放射された音波の指向性は音源の大きさと波長の比が大きいほど鋭くなる。超音波の場合、音源の大きさは波長に比べて大きい場合が多いので、鋭い指向性が得られる。この場合、音波は広がらずにある方向に放射されるため、球面状に広がる音波に比べて音の強さは大きくなる。すなわち超音波では、平面波が容易に発生し、音の強さも弱まりにくい。

#### ③超音波の反射

超音波の反射率は、音波が伝搬する媒質の密度と音速の積である固有音響インピーダンスによって決定される。固有音響インピーダンス  $z$  は音速  $c$ 、密度  $\rho$  とすると、

$$z = \frac{p}{v} = \rho c \quad \dots(4)$$

で表される。常温常圧の空気に対する  $\rho c$  はほぼ 430 Pa·s/m であり、水ではおよ

そ  $\rho c = 1.4 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}$  となる。

音響インピーダンスは(4)式で与えられ、図 4.6.3 のように 2 つの媒体が接している系を超音波が伝搬する際一部は反射し、一部は通過する。各媒体での音響インピーダンスをそれぞれ  $Z_1$ 、 $Z_2$  とすると、この境界面での反射率  $r$  は

$$r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (5)$$

で表される。本研究では、送信したパルスの一部のみ反射しエコーとして検知すると考えられるので、エコー強度から管内面に付着した生成物の大きさを求められると予測される。空気中では高い周波数の超音波の減衰は大きいため 40kHz 前後の周波数が用いられる

超音波は対象物からの反射を利用する 경우가多く、反射特性は重要な役割を持っている。気体と液体あるいは固体間の超音波の伝搬では、超音波が境界面でかなり減衰するため透過率が小さくなること、高い周波数の超音波では、障害物の裏側への回り込み（回折）が少ないことなどに注意すべきである。例えば、空気と水の境界面では反射率は非常に大きく、どちらの面から入射しても境界面でほとんど全反射することになる。従って、超音波が配水管中を通じる際、管内に存在する気泡にも反射し、管内面に付着する生成物と同様に検出する可能性が生じる。しかし、一般的に管内面に付着する生成物は固定されており、その位置に変化はないが、管内の気泡は溶液と共に流動するので、その位置は時間と共に変化する。従って、検出位置の変化によって判別することは可能である。

#### ④水中での超音波の伝搬

水中における超音波の伝搬は気体中に比べ容易に音が伝搬する。

水中においても発振したパルスのエコーを検出するまでの時間と距離の関係は大気中と同様に(3)式で示される。さらに水中における計測パラメータと周波数の関係は以下のように表される。

a) 距離分解能  $r$        $r = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f} \quad \dots(6)$

b) 指向角  $\theta_w$        $\theta_w = 29 \frac{\lambda}{D} = 29 \frac{c}{Df} \quad \dots(7)$

ただし、 $\theta_w$  は 80% のエネルギーが集中する片側の角度、 $D$  は振動子の直径である。

c) 減衰  $P_x$        $P_x = P_0 e^{-\alpha x} \quad \dots(8)$

ただし、 $P_0$  は  $x=0$  における音圧、 $x$  は音波の伝搬距離、 $P_x$  は距離  $x$  伝搬後の音圧、 $\alpha$  は水の減衰定数実験値である。

精度よく測定を行うためには、送受信機の周波数が高い程よい。

## (2) 超音波センサの構成

### ①超音波送信素子及び受信素子

超音波を発生させるには流体力学的に超音波を発生させる方法もあるが、現在では圧電効果を用いて発生させる方法が多く用いられている。

本試験で使用する超音波センサの原理図は図 4.6.4 で示すように、圧電セラミックに電圧を加えると、この電圧に対応した機械的な変形を生じ、パルスを発生させる。また、圧電セラミックに外部から応力を加えると電極間に電荷が発生する。これを圧電現象といい、超音波センサはこの圧電現象を利用したもので、圧電セラミックに金属版を貼り合わせたユニモルフ構造の振動子で形成されている。本試験で使用する超音波センサでは図 4.6.5 のように装置内部にユニモルフ振動子と共振子が組み込まれ、送信及び受信ができる。

### ②超音波センサの構成回路

本研究では超音波センサを距離計として利用している。つまり、管内面に付着した生成物に超音波をあて、その反射波を受信することでセンサから付着物までの距離を測定し、検出することを目的としている。この超音波距離計測定回路の概念図を図 4.6.6 に示す。

送信するパルスの幅は距離分解能により定められる。パルスの幅が広いほどより遠方までの検出が可能となる。一方で、反射波による検出では距離の分解能送信するパルス幅に依存し、パルス幅より短い分解能を得ることは不可能である。

また送信するパルスの返し周期は測定レンジにより定められる。パルスの周期が短いほど、より遠方まで超音波が到達するが、遠方からの反射波が戻ってくる以前に次のパルスを発射すると反射波の検出が出来なくなる。以上のことから本試験で使用する送受信回路の仕様は表 4.6.1 のように定める。

図 4.6.7 は超音波の送信回路であり、図 4.6.8 は超音波送信部のブロック図である。パルスの発信は NE555 (U1)にて作成する。NE555 はタイマー用 IC で、発信周波数とデューティサイクルを数個の抵抗とコンデンサーで設定できる。R1、R2、及び C1 はこれらの設定用で、ON 時間  $100\mu\text{sec}$ 、繰返し周期  $50\text{msec}$  のパルス波形を得る。

超音波となる  $40\text{kHz}$  の信号は同じく U2、NE555 にて作成される。R3、R4 及び C4 はこれらの設定用で、R4 の抵抗値を調整し発信周波数を  $40\text{kHz}$  としてある。この  $40\text{kHz}$  の発信機は U1 にて作成されたパルス波形で制御される。また、出力電流を稼ぐため、4069 のゲートを二つ、並列に接続して使用している。出力段は逆極性の出力をもつ二つの出力回路から構成されていて、それぞれの出力が超音波センサに接続されている。これは BTL 接続と呼ばれる方式で、負荷には電源電圧の二倍の電圧を供給できる。

図 4.6.9 は超音波の受信回路であり、図 4.6.10 は超音波受信部のブロック図で



ある。超音波センサは機械－電気変換素子で、超音波を受信するとその両端に電圧信号が発生し、これを必要なレベルまで増幅することで超音波を受信することができる。増幅回路はオペアンプによる反転増幅器を二段に接続した物で、前段(U4-A)で 40dB、後段(U4-B)で 20dB の利得を持たせている。各反転増幅器はコンデンサー C6、C7 を介して接続されている。また、反転増幅器の入カインピーダンスは R5、R6 で 10kΩ となっているため低域がカットされていて、各々の低域遮断周波数は 1.59kHz である。

通常、オペアンプは正負両電源で使用するが、ここでは抵抗分割で電源電圧の 1/2 の電圧を作り、各オペアンプの非反転入力に加えている。これにより負電源を用意する必要がなくなり回路が簡略化される。増幅器(U4-B)の出力は外部に取り出され、ディジタル化オシロでの測定に使用される。図 4.6.11 は距離表示部のブロック図である。

図 4.6.12 に各パルスによる波形を示す。図 4.6.8、図 4.6.10 及び図 4.6.11 に示されている①～⑨は図 4.6.12 に示すパルスが加えられていることを示している。

### (3) 水中における計測範囲

水中にて計測を行う場合、必要とされるパラメータはソナー方程式によって決定される。図 4.6.13 にソナー方程式の概念図を示す。ソナー方程式を構成するパラメータを表 4.6.2 に示す。これをもとにして、水中での超音波の伝搬において雑音源として背景雑音が最も大きい場合、ソナー方程式は以下のように示される。

$$DT = SL - 2TL - NL + DI + TS \quad \dots(9)$$

水中においてこれらパラメータのうち、探知閾値 (DT)、音源レベル、背景雑音レベル、受波指向性利得及びターゲットストレングスが既知であるとする、(9)式によって最大伝搬距離、つまり測定範囲が定まる。よって水中用超音波センサを設計する際は対象とする管路長、口径等によってこれらの検討を行わなければならない。

### 参考文献

- (1) 音響学入門：吉久信幸、谷澤茂、吉久光一著、日新出版株式会社（2001）
- (2) 超音波技術：根岸勝雄、高木堅志郎著、東京大学出版会（1989）
- (3) 機械技術者のためのセンサ技術入門：佐野清人著、日刊工業新聞社（1984）
- (4) 高周波の基礎と応用：高橋勘次郎監修、東京電機大学出版局（1990）
- (5) 計測・センサ工学：田所嘉昭著、オーム社（2003）
- (6) 熱間超音波距離計：松村勝己、鉄と鋼、No.70(9)、p1110～p1115（1984）
- (7) 水中超音波を用いた海洋計測技術：穴戸正昭、計測と技術、Vol.19、No.3、p348～p356（1980）
- (8) 超音波センサの距離と感度情報を用いたニューラル型対象物判別システム：青島伸一、吉澤信幸、藪田哲郎、羽成賢一、計測自動制御学会論文集、Vol.38、No.1、p111～p113（2002）
- (9) Principles of Underwater Sound : *Nat. Def. Res. Comm. Div. 6 Sum. Tech. Rep.* 7, p175～p199（1946）
- (10) Propagation of Short Radio Waves : Kerr, D.E. (ed.) M. I. T. Radiation Laboratory Series, McGraw-Hill Book Company, New York, p18～p 21（1951）

- (11) Generalized Form of the Sonar Equations : Urick, R.J. , *J. Acoust . Soc. Am*, 34 : 547 (1962)
- (12) Analysis of hidden units in a layered network trained to classify sonar targets : R. Paul Gorman , Terrence J. Sejnowski, *Neural Networks*, 1, p75~p 89 (1988)
- (13) Herman E. Sheets , Victor T. Boatwright, Jr *Hydrodynamics* , Academic Press (1970)

表 4.6.1 本試験に使用する送受信回路の仕様

送信周波数	40kHz
送信パルス幅	100 $\mu$ sec
パルス繰り返し周期	50msec
出力電圧	18V <sub>p-p</sub>
受信周波数	40kHz
増幅度	60dB

表 4.6.2 ソナーパラメータの定義（ユーリックによる）

パラメータ	記号	基準位置	定義
送波レベル	SL	音軸上で音源から 1yd	$10\log \frac{\text{音源の強さ}}{\text{基準の強さ}}$
伝搬損失	TL	音源から 1yd 及びターゲット又は 受波器位置	$10\log \frac{\text{1ydの距離の信号の強さ}}{\text{ターゲット又は受波器位置での信号の強さ}}$
ターゲット ストレングス	TS	ターゲットの 音響中心より 1yd	$10\log \frac{\text{ターゲットから1ydの距離のエコーの強さ}}{\text{入射音の強さ}}$
雑音レベル	NL	受波器位置	$10\log \frac{\text{雑音の強さ}}{\text{基準の強さ}}$
受波指向性利得	DI	受波器端子	$10\log \frac{\text{等価無指向性受波器より出力する雑音出力}}{\text{実際に用いられる受波器により発生する雑音出力}}$
残響レベル	RL	受波器端子	$10\log \frac{\text{受波器端子における残響出力}}{\text{基準の強さの信号により発生する出力}}$
探知閾値	DT	受波器端子	$10\log \frac{\text{ある条件の機能をちょうど果たす信号出力}}{\text{受波器端子における雑音出力}}$

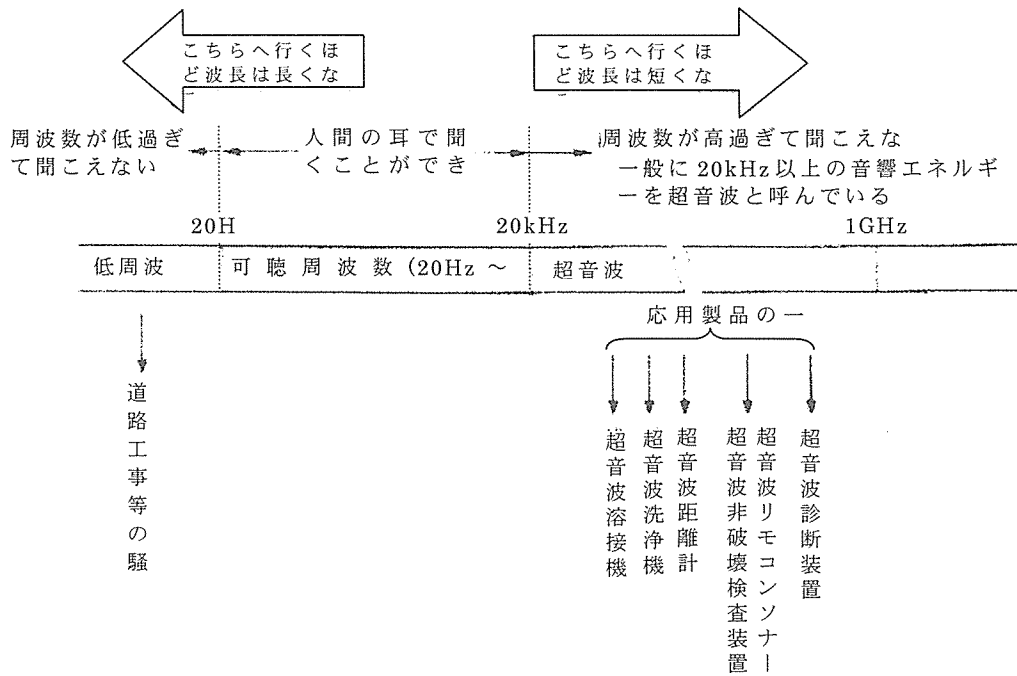


図 4.6.1 周波数とその特徴

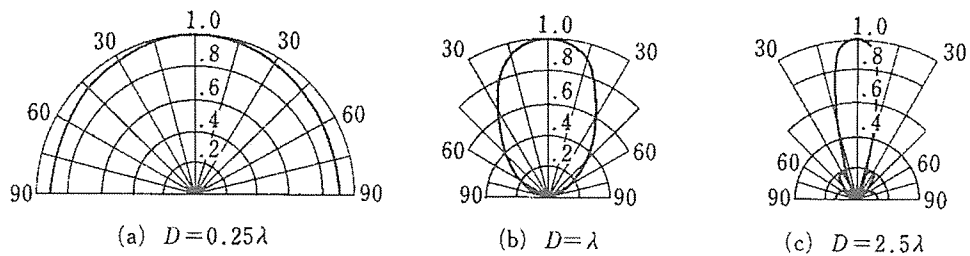


図 4.6.2 音波の指向性

( $D$ : 音源の直径、 $\lambda$ : 音波の波長)

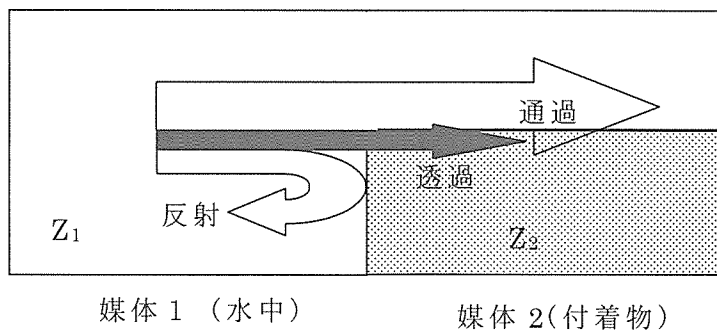


図 4.6.3 管内面に付着する生成物による超音波の反射と透過

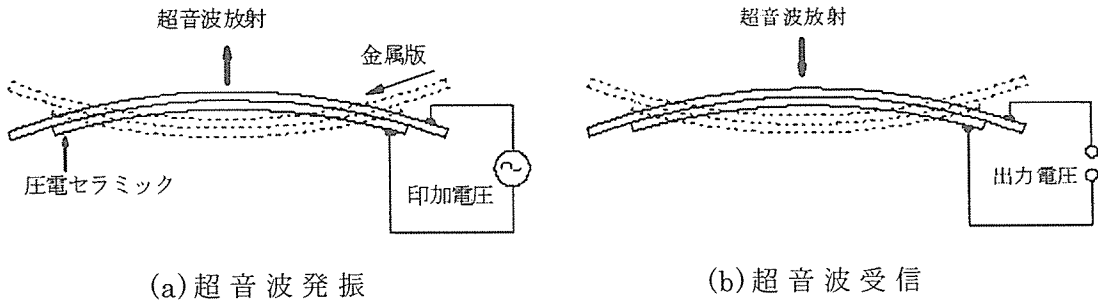


図 4.6.4 本試験に使用する超音波センサ原理図

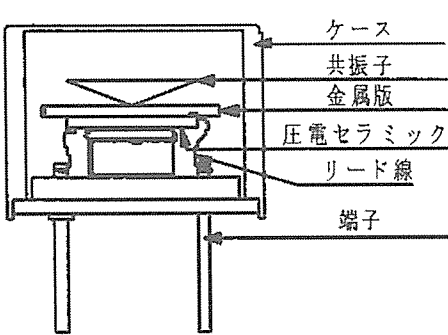


図 4.6.5 超音波センサ構造図

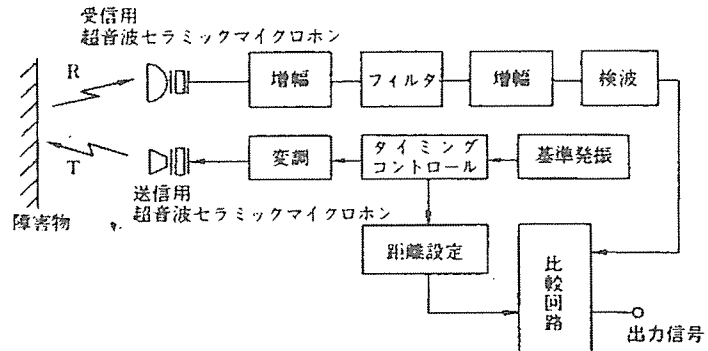


図 4.6.6 超音波距離計測定回路概念図

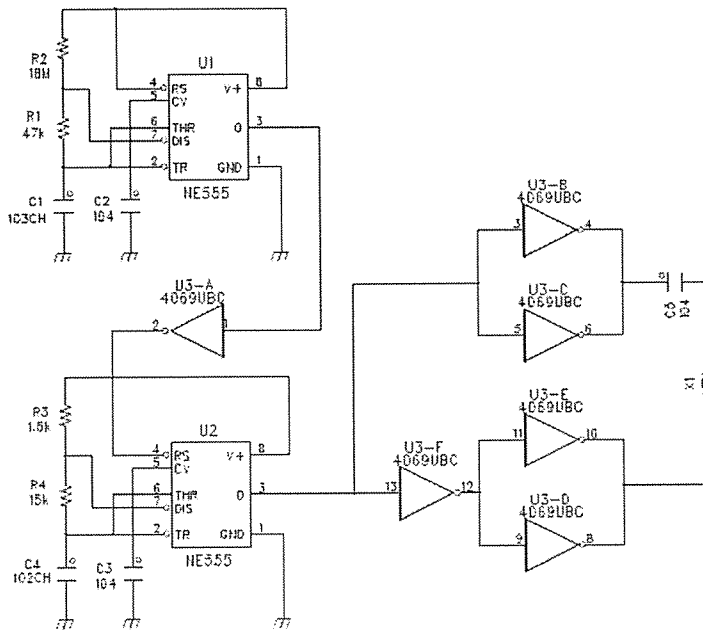


図 4.6.7 本試験で使用する超音波センサ送信回路

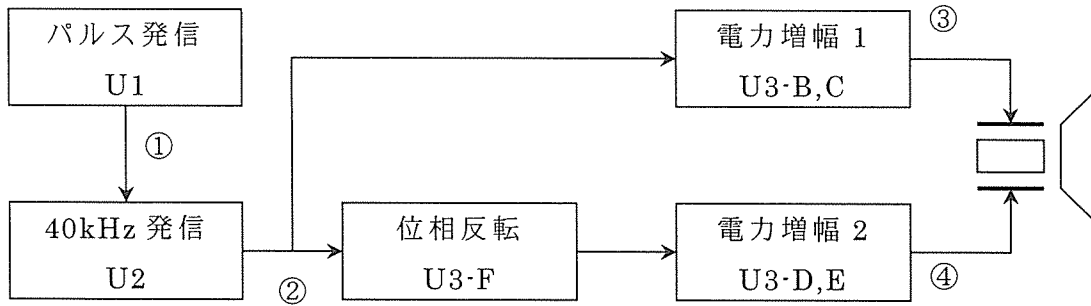


図 4.6.8 超音波送信部のブロック図

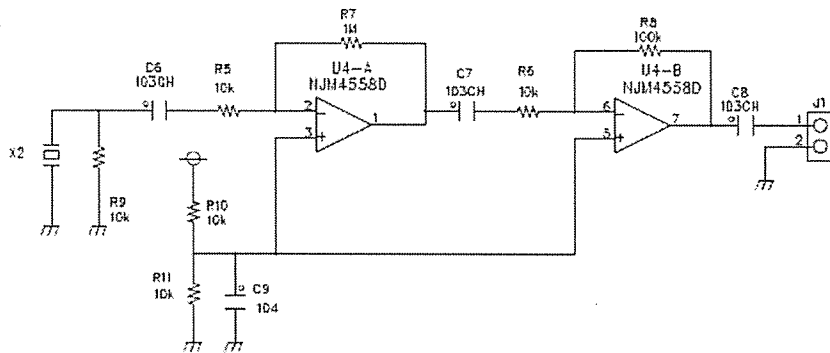


図 4.6.9 本試験で使用する超音波センサ受信回路



図 4.6.10 超音波受信部のブロック図

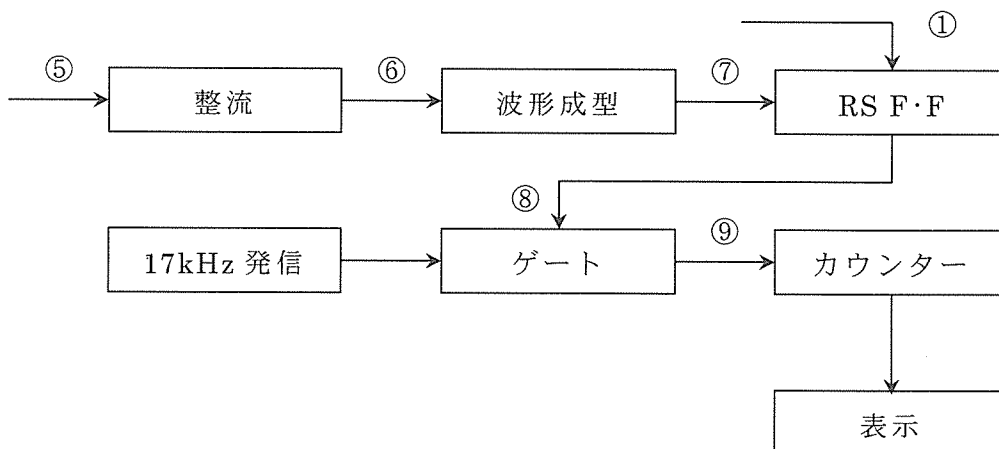


図 4.6.11 距離表示部のブロック図

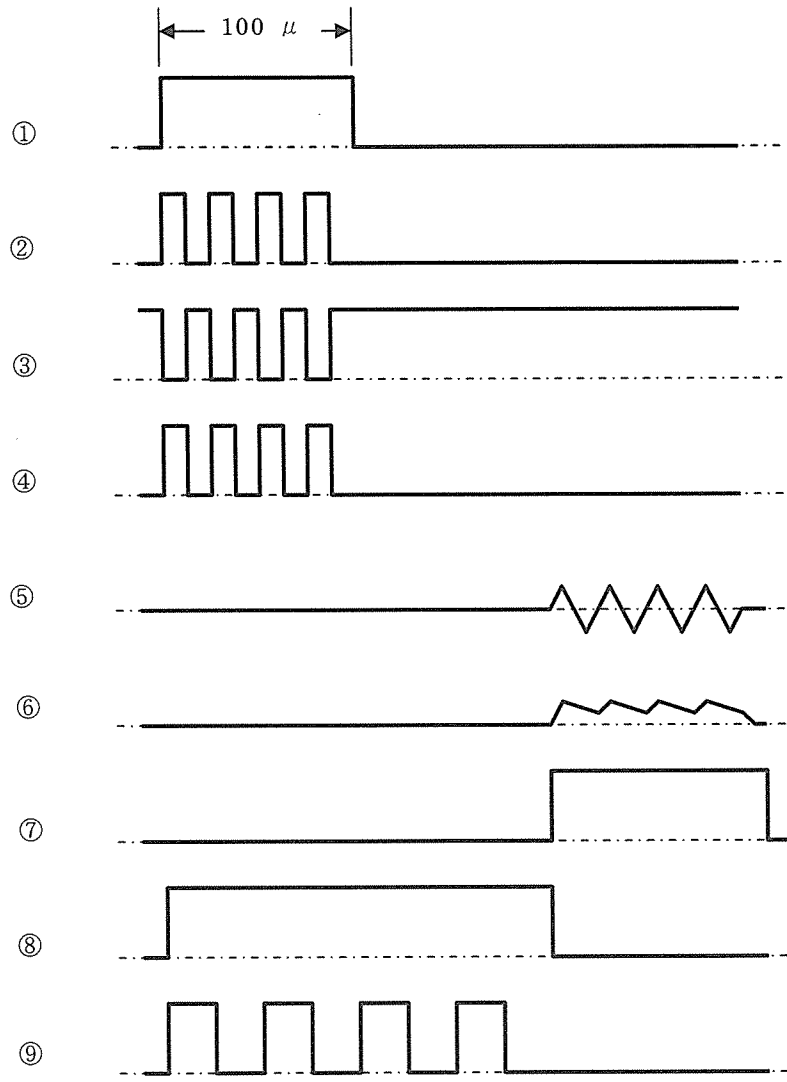


図 4.6.12 各パルスの波形

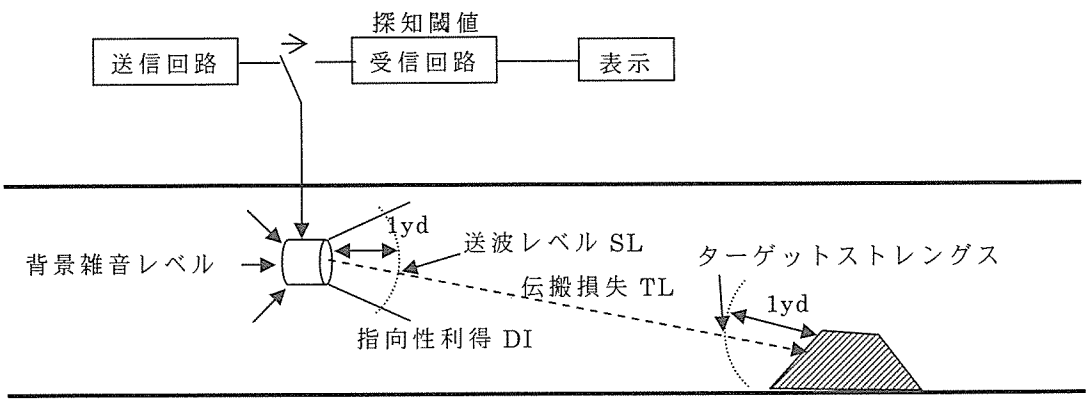


図 4.6.13 ソナー方程式概念図

### 3) 音響エコー法を用いた管路内付着物検出試験

#### (1) 試験目的

水道管路による試験を行う前にまず、大気中において本方法の原理の確認および検出に適した条件の導出を行うために実験を行った。実験は大気中において塩化ビニール管内に付着物に相当する様々な大きさの模擬物質を設置し、周波数と検出情報の解像度との関係などを求めた。

#### (2) 試験装置

本試験で使用した超音波センサは送信用として空中用超音波センサ（日本セラミック株式会社製、型番 T40-16P）、受信用として（日本セラミック株式会社製、型番 R40-16P）を使用した。これを図 4.6.8 及び図 4.6.9 に示すような回路を形成し、異物までの距離が測定できるようにデジタルモニタを取り付けた超音波距離計を作成した。本試験で使用する送受信回路の仕様は表 4.6.1 に示す。ディジタル化オシロ（岩崎通信機株式会社製 DS-8822P）で観測、記録した。超音波距離計の外観図を図 4.6.14 に示す。試験にはφ75mm、長さ 400mm の VP 管を使用し、管片側に空中用超音波計を取り付けた。他端は開放端として試験を行った。実験装置の外観を図 4.6.15 に示す。

管内付着物は 3 種類用意した。付着物はそれぞれ管内径の  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{8}$  となるように作成した。以降管内径の  $\frac{1}{2}$  の付着物を付着物 A、管内径の  $\frac{1}{4}$  の付着物を付着物 B、管内径の  $\frac{1}{8}$  の付着物を付着物 C と呼ぶ。使用した付着物を図 4.6.16 に示す。

#### (3) 試験方法

##### ①付着物の大きさによるエコーの影響

試験に使用する管片側より各付着物を挿入し、管片端に設置した超音波距離計より 50cm の位置に付着物を置き、その際のエコーのピーク強度及び検出時間を測定した。同様にして 50cm 毎に測定位置を遠ざけ、距離計より 4m の位置まで測定を行った。これを A、B、C それぞれの付着物について行った。試験概略図を図 4.6.17 に示す。得られたデータは反射波のエンベロープを抽出するため、絶対値を取り、移動平均を行った。その後、先頭から 200 データ（送信開始以前のデータ）を平均したものをオフセット値として差し引いた。さらにこれらのデータからブランクを差し引き、送信波の残存分や管末での反射を除去した。なお、試験時の気温は 15℃であった。

##### ②異なる大きさの付着物が存在する場合のエコーの影響

試験に使用する管片側より各付着物を挿入し、管片端に設置した超音波距離計



より 2m50cm の位置に付着物を一つ置き、もう一つの付着物を 1m の位置に設置し、その際のエコーを受信し、ピーク強度及び検出時間を測定した。同様にして手前に存在する付着物を 1m50cm、2m の位置に置き、測定を行った。これらの試験を付着物の順序を変えて行った。試験概略図を図 4.6.18 に示す。得られたデータは①と同様の処理を行った。

#### (4) 試験結果

##### ①付着物の大きさによるエコーの影響

図 4.6.19 及び図 4.6.20 に付着物 A、B、C を 0.5m 及び 4m の位置に設置した場合のエコーを示す。また、図 4.6.21 に付着物 A の位置を変えた場合のエコーの変化を示した。

##### ②異なる大きさの付着物が存在する場合のエコーの影響

図 4.6.22 に付着物 A を前方に置き、付着物 C を 2.5m の位置に固定した場合の結果、図 4.6.23 に付着物 C を前方に置き、付着物 A を 2.5m の位置に固定した場合の結果を示す。

#### (5) 考察

##### ①付着物の大きさ及び距離によるエコーへの影響

図 4.6.19 及び図 4.6.20 より、各距離において付着物の大きさによってピーク強度が変化することが示された。付着物が大きいほどエコー強度は大きくなった。これは付着物の大きさによって発生したパルスの反射率が変化し、付着物が大きいほど、反射率が高くなるためである。しかし、距離が遠くなるにつれてピーク強度が減少する傾向が得られた。そこで、同一付着物において距離が変化した場合のピーク強度への影響を検討するために図 4.6.21 を示す。図 4.6.21 より同じ付着物であっても、測定器から距離が遠ざかるにつれてピーク強度が減少した。これは、測定器と付着物までの距離が増加するにつれて、管内面での反射が増大し、超音波が減衰したためと考えられる。これかのことから、管内面に存在する付着物の検出には距離及び付着物の大きさが重要な因子であると考えられる。

図 4.6.24 に各測定条件におけるピーク強度と付着物までの距離の関係を示した。なお、図は両対数表記である。図 4.6.24 よりピーク強度より大きさもしくは位置に関して以下の関係があるといえる。I をピーク強度、L をセンサから付着物までの距離とすると以下の関係が得られる。

$$I = aL^{-b} \quad \dots(10)$$

を得る。ここで、a,b は定数であり、b はおよそ  $\frac{3}{2}$  であるので、ピーク強度はほぼ

距離の $\frac{3}{2}$ 乗に反比例すると考えられる。また、付着物の充填率を M とすると、充填率と a の間には以下の関係が得られる。また、この関係を図 4.6.25 に示す。

$$a = 2.51M + 0.70 \quad \dots(11)$$

ここで、充填率 M とは、管径に対する付着物の最大径の比を表す。よって、上記 2 式より、

$$I = (2.51M + 0.70)L^{-b} \quad \dots(12)$$

が得られる。この式より、ピーク強度、及び付着物までの距離がわかれば、そこにある付着物の大きさが測定できると考えられる。

上記の式が適用できるためには測定したエコーの受信時間よりセンサと付着物までの距離が測定可能でなければならない。図 4.6.26 に、実験によって定めた付着物の位置と実際の測定によって得られたピーク検出時間から求めた距離の関係を示す。測定距離は(1)式及び(3)式により算出した。図 4.6.26 より実験位置と測定距離はほぼ一致した。従って、エコー検出時間から距離が測定可能であり、その測定距離は実用上問題とならないほど、正確であるといえる。

これらのことから、付着物の大きさと位置を決定するには、まずエコー検出時間を測定し、距離計と付着物の間の距離 L を(1)式及び(3)式より算出し求める。次に、得られたピーク強度及び距離から(12)式に代入して付着物の充填率 M を測定することで、付着物の大きさを特定することが出来るといえる。また、得られた関係から管内に存在する他の付着物に関しても、得られたエコーのピーク強度及びピーク検出時間から、その付着物の大きさを測定することが可能であると考えられる。しかし、付着物の形状に関しては本試験の結果だけからは判断できないので、更なる検討が必要であるといえる。さらに、他の付着物が存在する場合、付着物によってパルスが反射、減衰するので、本試験と同様のピーク強度を生じない可能性がある。

また、測定装置の使用範囲を決定しなければならない。本試験で使用した超音波距離計では 0.5m～5m 程度での使用が適当であると考えられる。これより近距離及び遠距離の測定を行うと、検出に十分なピーク強度が得られない、もしくはピーク強度が大きすぎるため、ピーク強度－距離曲線が収束し、付着物の位置は測定できても、その大きさが測定できない可能性がある。従って、これより遠距離を測定する際は、センサ出力を上げ、減衰の影響を抑える必要がある。

## ②付着物が複数存在する場合のエコーへの影響

付着物が複数存在する場合においても応答が得られた。しかし、手前に大きい付着物が存在する場合（図 4.6.22 参照）、その付着物によって大部分のパルスが反射されてしまうため、奥に付着物が存在していてもエコー強度が弱まり、奥側

に存在する付着物のエコーは僅かであった。従って、付着物が近接する場合、エコーが重なって検出された。これは付着物が近接することで小さな付着物は大きな付着物の一部として検出されていると考えられる。これらのことから、付着物の大きさが異なり、またその付着物が離れている場合、距離計から遠方に存在する微小な付着物はほとんど検出できない可能性が生じる。しかし、管内の付着物として問題となるのは管を閉塞する大きな付着物であるから、特に問題は生じないと考えられる。また、図 4.6.22 より前方の付着物のエコーは距離によって減衰しているが、後方の付着物のピーク強度はほぼ一定である。このことから前方に付着物が存在しても後方に存在する付着物はその位置によって応答が生じる。さらに、前方に存在する付着物が大きい場合、後方の付着物に対する応答はそれ以外の付着物が存在しない場合と同等のピーク強度が得られると考えられる。

手前に小さな付着物が存在する場合（図 4.6.23 参照）、奥側に存在する付着物に対しても明らかなピーク強度を得た。このことから、試験装置近傍に存在する付着物より優先的に応答することが判明した。ただし、付着物が近接している場合、エコーが重なり合うので、その判別を行う必要がある。また、図 4.6.23 より前方の付着物のエコーは距離によって減衰しているが、後方の付着物のピーク強度はほぼ一定である。このことから前方に付着物が存在しても後方に存在する付着物はその位置によって応答が生じる。しかし、前方に存在する付着物が小さい場合、後方の付着物に対する応答はそれ以外の付着物が存在しない場合より低いピーク強度が得られた。これは前方に存在する付着物によってパルスの一部が反射され、後方に到達するパルスが前方に何も存在しない場合よりも低下するためであると考えられる。ただし、前方に付着物が存在する場合、そのピーク強度は前方の付着物の位置によらずほぼ一定であるので、後方に存在する付着物の大きさも測定により決定できると考えられる。より詳細に複数存在する付着物の判別を検討する際には周波数の高いものを使用し、分解能をあげる必要があると考えられる。

これらのことから、複数付着物が存在する場合においても、付着物の位置及び大きさが判定できるといえる。

### ③管路内付着物検出システム

本試験で得られた結果より、実用に向けてのシステムを考察する。実用化に向けてはこの超音波距離計を使用し、得られたデータからピーク強度及び検出時間を抽出する。この際、複数付着物が存在する場合のため、ある一定のピーク強度を有するものを付着物として認識するようにプログラムする。そして、抽出したデータから(1)式～(3)式、(10)式～(12)式を用いて付着物の距離及び大きさを出力するシステムを構築すればよい。これにより、人間が直接目視等によって点検できないような場所に設置されている管の内面に存在する付着物を遠隔操作によって検出するシステムが可能になると考えられる。このシステムの概略図を

図 4. 6. 27 に示す。

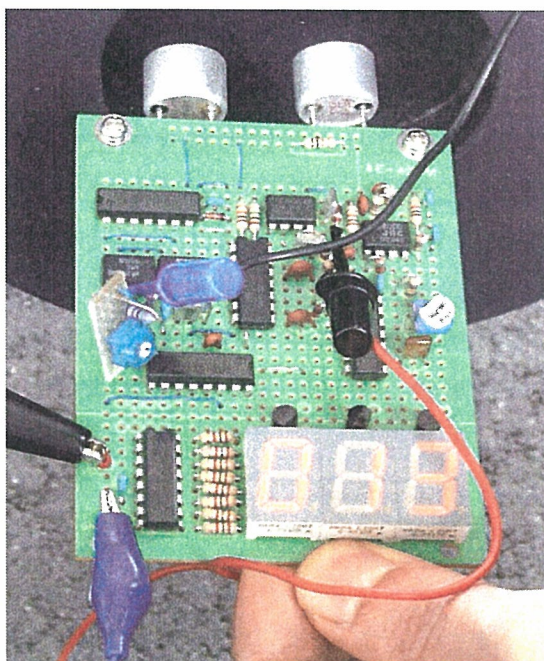


図4. 6. 14 センサ外観

※デジタルパネルの数字は異物までの距離を示す

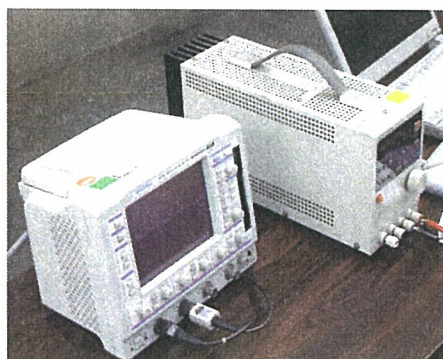


図4. 6. 15 実験装置外観