

写真 手順-1
付着物除去状況
(スクレーパ)

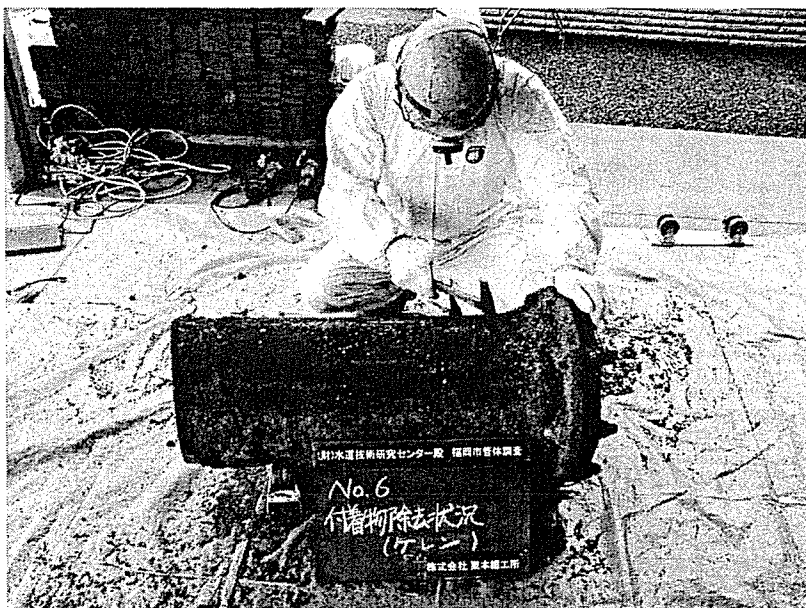


写真 手順-2
付着物除去状況
(ケレン)



写真 手順-3
付着物除去状況
(ワイヤブラシ)



写真 手順-4
腐食量調査状況
(テストハンマ)



写真 手順-5
腐食量調査状況
(腐食深さ測定)



写真 手順-6
管厚調査状況

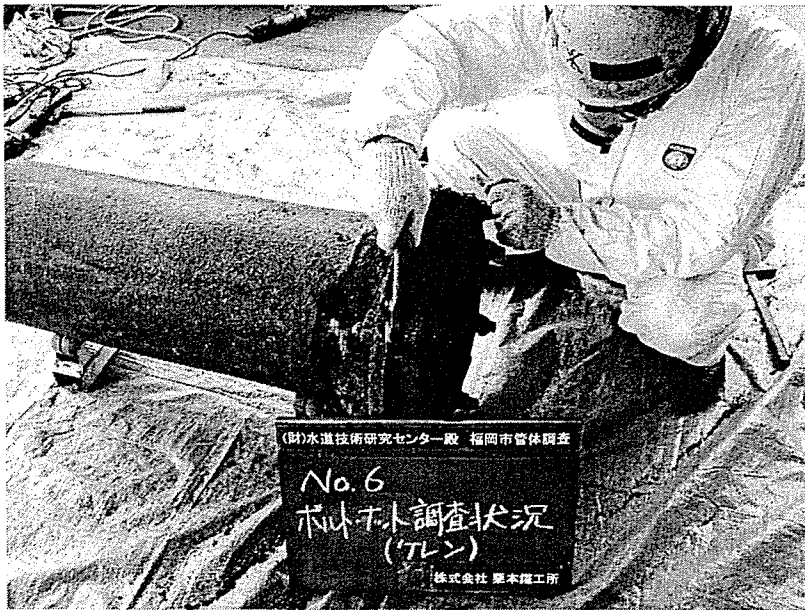


写真 手順-7

ボルト・ナット調査状況
(ケレン)

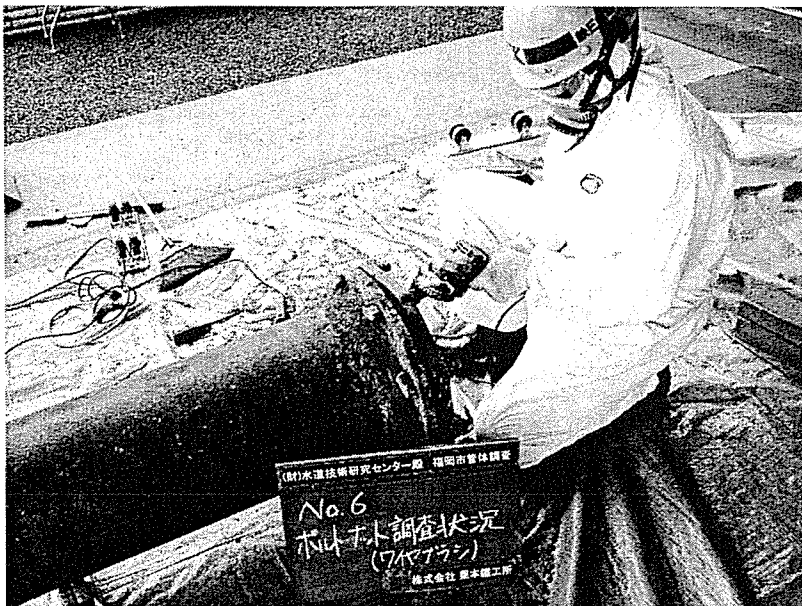


写真 手順-8

ボルト・ナット調査状況
(ワイヤブラシ)



写真 手順-9

ボルト・ナット取り外し状況



写真 手順-10
 ボルト・ナット調査状況
 ボルト取り外し後
 (ワイヤブラシ)



写真 手順-11
 ボルト重量測定状況



写真 手順-12
 ナット重量測定状況

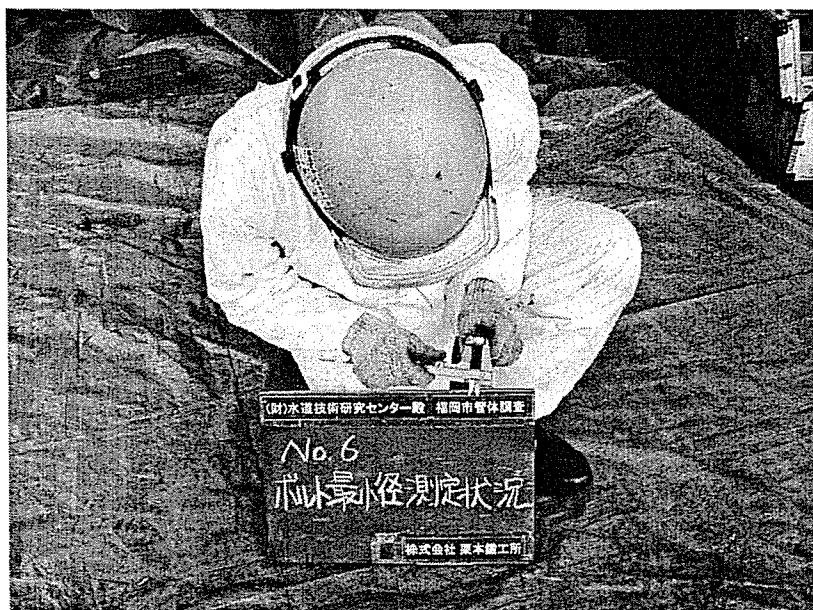


写真 手順-13
ボルト最小径測定状況

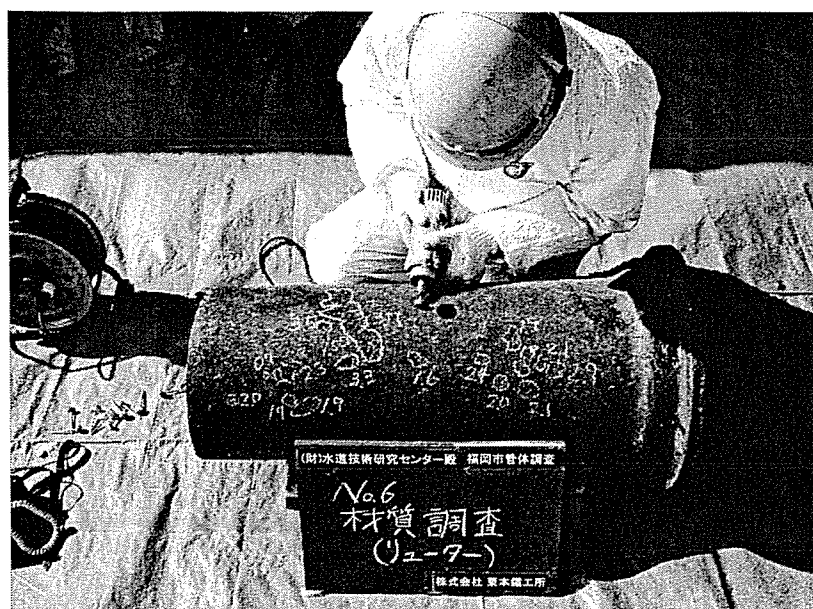


写真 手順-14
管体材質調査状況
(リューター 研磨)



写真 手順-15
管体材質調査状況
(顕微鏡)



写真 手順-16
 押輪材質調査状況
 (リユーター 研磨)



写真 手順-17
 押輪材質調査状況
 (顕微鏡)

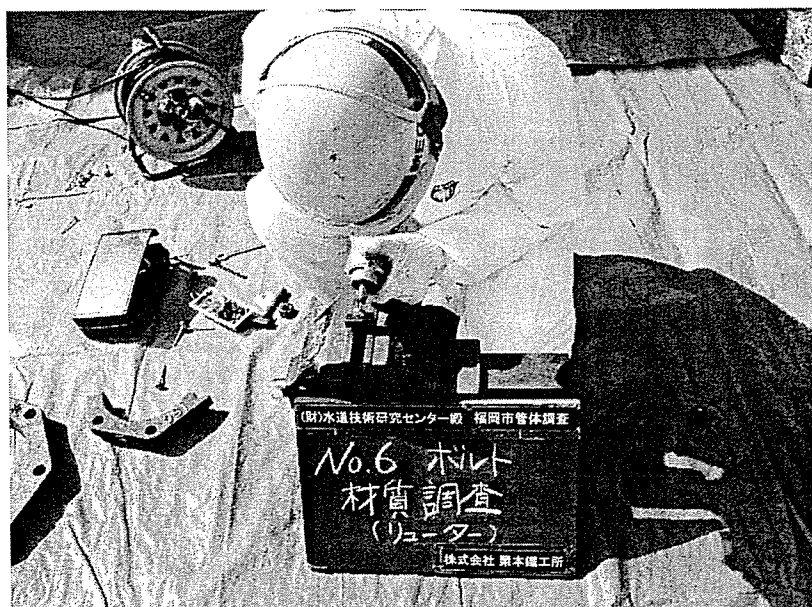


写真 手順-18
 ボルト材質調査状況
 (リユーター 研磨)



写真 手順-19
ボルト材質調査状況
(顕微鏡)

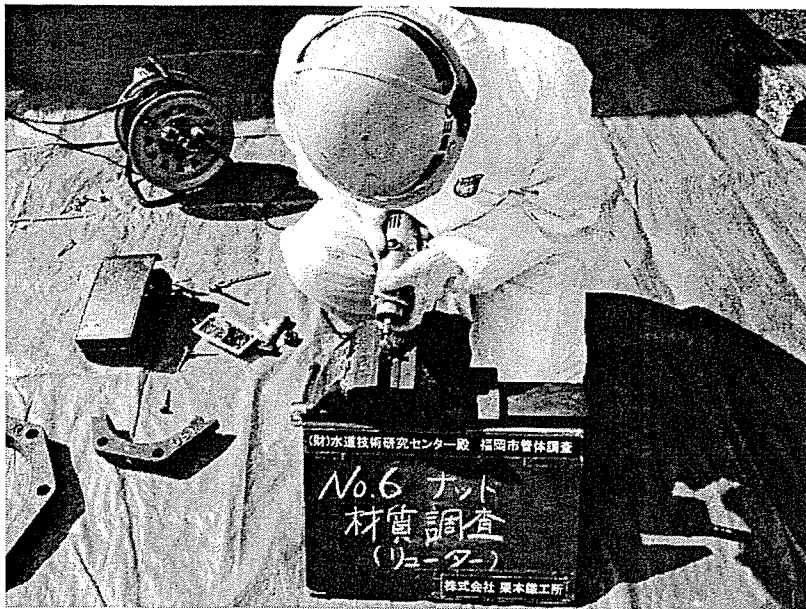


写真 手順-20
ナット材質調査状況
(リューター 研磨)



写真 手順-21
ナット材質調査状況
(顕微鏡)

3.5 既存技術調査

3.5.1 「管内テレビカメラロボット」OMNIVS

既存技術調査で抽出した有望技術のひとつである「管内テレビカメラロボット」のプレゼンテーションをJFE工建(株)に依頼し実施した。また、この管内テレビカメラロボットは主にガス管路診断を目的に開発されたので、水道管路診断への適用の可能性について検討した。(システムの詳細は、文献調査リストを参照)

(1) 実施日時および場所

- ・ 実施日時 : 2006年9月28日(木) 10:00~12:00
- ・ 場所 : (財)水道技術研究センター 会議室

(2) 概要

テレビカメラを搭載したロボットを配管内に走行させ、管内面を観察するだけでなく腐食などの大きさ・深さの測定、管厚測定などが可能である。

1) 管内テレビカメラロボットの性能

- ・ 走行方式は、オムニホイール(高圧をかけ、車輪を張る)を採用している。
- ・ 管内テレビカメラロボット走行速度は、4.0m/minの範囲で設定ができる。
- ・ カメラは360度回転式であるので、管内の任意の場所で測定ができる。
- ・ 凹凸測定の分解度は±0.7mm程度、分解したものの誤差は±0.5mm程度となる。
- ・ 超音波板厚計を取り付ければ、停止して管厚の測定が可能である。探触子が触れるところをワイヤーバフで清掃する。
- ・ 調査距離は、片側400mの検査が可能である。

2) 実績

- ・ JFE工建(株)で調査・解析まで行い、成果品として提出している。不具合箇所は全てビデオより抜粋し、欠陥箇所は管路上にプロットする。その他、不具合一覧表も提出する。
- ・ 費用は1回当たり30~40万円で、実績は年間5,6件となる。
- ・ 水道管路での実績は、図面が残っていない布設後経過年数が経っている古い軌道下の管路のプロフィールを調べることを目的に行った。(終点部:不明)

3) 水道管路への適用性

- ・ 管内カメラロボットの走行にあたり、段差は20mm程度まで通過できる。ダクタイル鉄管の継手は、問題ない。(2,3件の実績有り)
- ・ 弁に損傷を与える可能性があるため、仕切弁は通過させない。(ボールバルブでは実績有り)
- ・ 分岐部はタイヤがはまってしまう可能性がある。分岐部の位置、分岐の径など

により通過の可否が決まる。走行中タイヤがはまると予知した場合は、中止と
している。(ただし、サドル分水のように小さいものは通過可能)

- ・ 管内テレビカメラロボットに防水処置を施していないので、管路内の排水が前提条件となる。(多少の滞水程度なら通過可能)

(3) 結果

結果として、管内の水を排水し、管内面に異物・付着物がないなどの条件から、水道管路への適用は困難と考える。

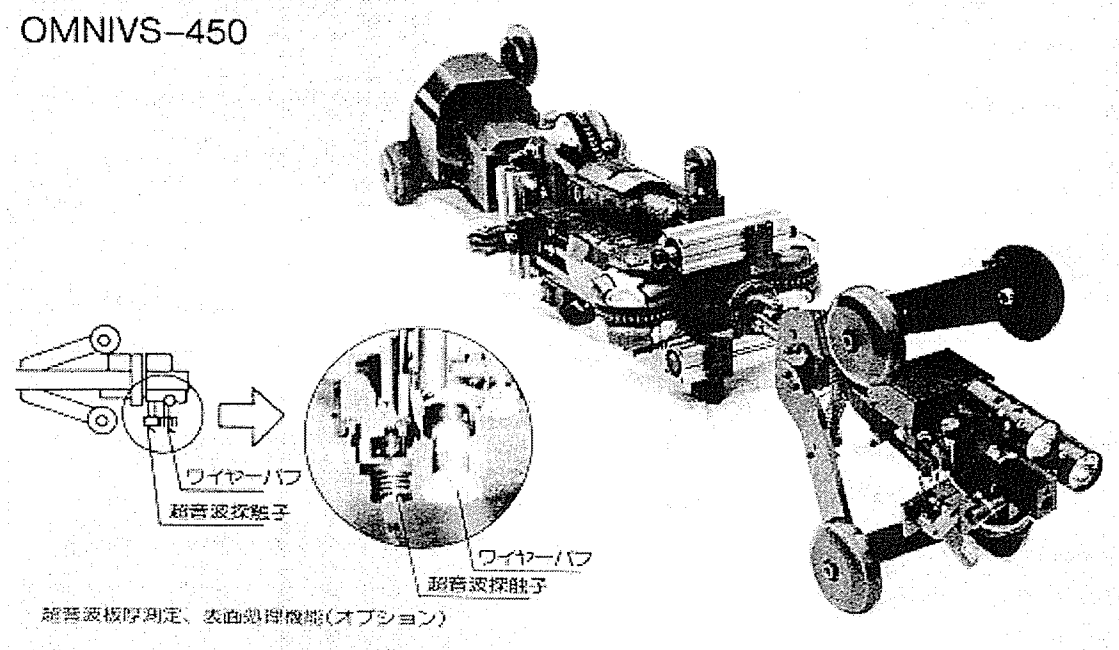


図 3.5.1 管内テレビカメラ - OMNIVS

3.5.2 「磁気飽和渦流探傷法」SLOFEC

(1) 日時及び場所等

試験日時：平成 19 年 1 月 31 日 午前 10 時～12 時

試験場所：非破壊検査株式会社 (大阪市西区北堀江 1-18-14)

窓口担当：非破壊検査株式会社 業務本部 龍王取締役

(2) 目的

磁気飽和渦流探傷法 (SLOFEC) は、主として磁性のある金属管を対象として、渦電流を用いて供試体に非接触で欠陥の検出が可能な技術である。管内面にモルタルライニングが施されたダクタイル鉄管などについて、内面のライニング上から管体外面の腐食などの欠陥を検出できる可能性があり、診断技術として有効な手法と考えられる。

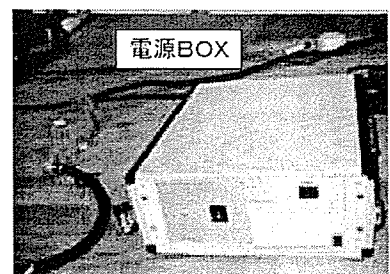
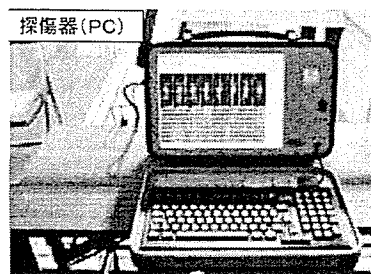
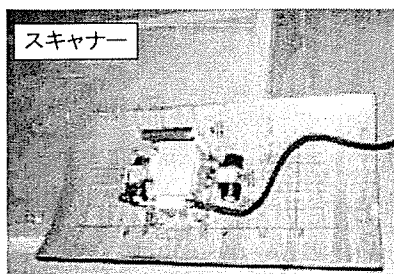
本実験では、供試管内外面に設けた模擬欠陥に対する検出能力を SLOFEC の実機を用いて確認し、今後のフィールド調査のための基礎資料を得ることを目的とした。

(3) 試験機器概要

磁気飽和渦流探傷法 (SLOFEC) は、スキャナーの電磁石で直流磁化を行い、減肉部と健全部の磁束密度変化を自己比較コイルで電気信号に変換し、減肉を検出する。

減肉に起因する信号は、システム制御用 PC の探傷画面にリサージュ波形として表示され、ストリップチャート軸もしくは C-scan 平面上に振幅レベルに応じた色調で階調表示される。

スキャナーに自己比較コイルを複数設置することにより面的な検査ができること、スキャナーの移動速度は 30cm/s 程度と高速であること、また、塗覆装の除去が不要であることから、欠陥の有無に関しては一般の超音波探傷と比較して高速な検査が可能である。しかし、欠陥の深さの精密な計測はできないため、欠陥調査のスクリーニング的な位置づけとなる。



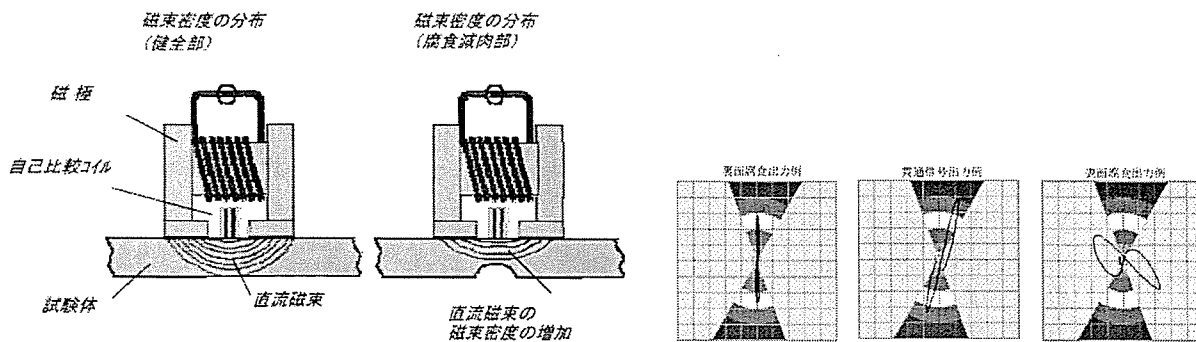


図 3.5.2 SLOFEC 機器概要及び原理

(4) 試験方法

1) 概要

SLOFEC の検出器（スキャナー）を供試管モルタルライニング上に設置し、管の外面に予め設けた模擬欠陥に対する検出能力を確認する。なお、確認を行う検出能力の種類は次の2通りとする。

- ①個別の欠陥に対する検出能力（深さ、大きさ）
- ②集団で欠損が存在する場合の分解能力（最大深さ、大きさ）

2) 供試管

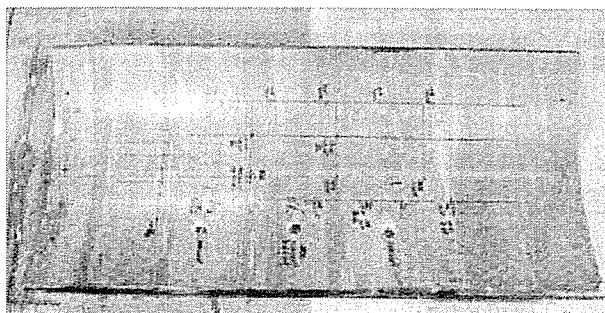
供試管：ダクタイト鉄管（内面モルタルライニング、円弧の 1/4 程度）

呼び径 900mm、長さ：約 1000mm、管厚：15mm、モルタルライニング厚：8mm

3) 模擬欠陥

模擬欠陥の種類は埋設されたダクタイト鉄管に生じる腐食などの欠陥を勘案して決定した。なお、一つの供試管上に複数の模擬欠陥を設けて検出能力の確認をするため、個別の検出能力確認を行う欠陥については、その他の欠陥と干渉しない離隔で配置した。

内面側



外面側

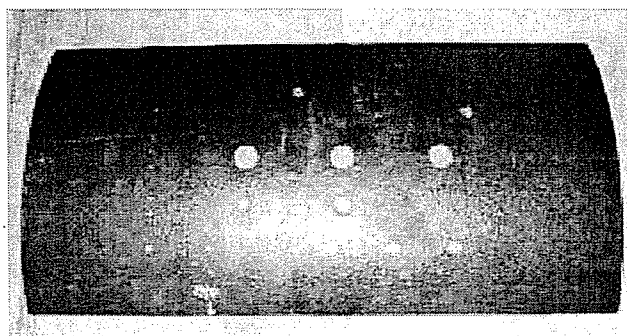
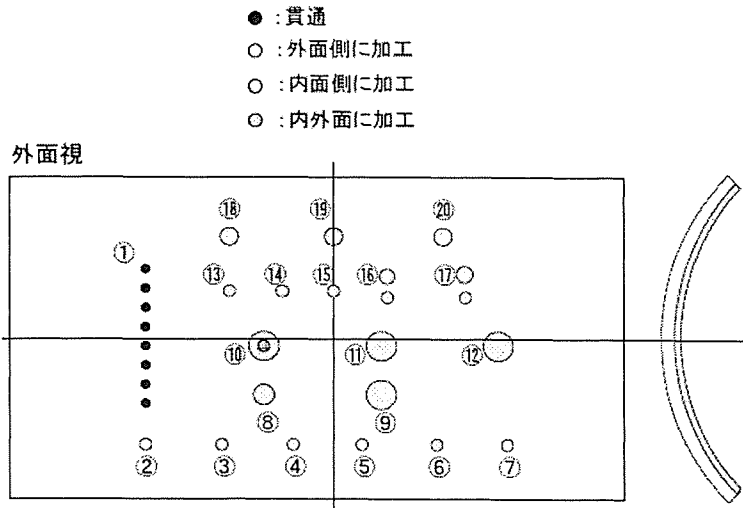


写真 3.5.1 模擬欠陥の配置状況写真

表 3.5.1 模擬欠陥一覧表

No.	位置	形態	形状	大きさ	深さ	減肉率
①	—	単独	円形	8.0φ	貫通	100%
②	外面	単独	平底穴	10.0φ	3.0mmd	18%
③	外面	単独	平底穴	10.0φ	7.5mmd	46%
④	外面	単独	平底穴	10.0φ	12.0mmd	73%
⑤	外面	単独	平底穴	20.0φ	3.0mmd	18%
⑥	外面	単独	平底穴	20.0φ	7.5mmd	46%
⑦	外面	単独	平底穴	20.0φ	12.0mmd	73%
⑧	外面	単独	皿型	22.5φ	4.5mmd	27%
⑨	外面	単独	皿型	37.5φ	7.5mmd	46%
⑩	外面	混在	平底穴	40.0φ	4.0mmd	24%
				3.0φ	12.0mmd	73%
⑪	外面	単独	平底穴	40.0φ	6.0mmd	36%
⑫	外面	単独	平底穴	40.0φ	9.0mmd	55%
⑬	外面	単独	平底穴	3.0φ	3.0mmd	18%
⑭	外面	単独	平底穴	3.0φ	7.5mmd	46%
⑮	外面	単独	平底穴	3.0φ	12.0mmd	73%
⑯	外面	近接	平底穴	10.0φ	3.0mmd	18%
				3.0φ	12.0mmd	73%
⑰	外面	近接	平底穴	20.0φ	3.0mmd	18%
				3.0φ	12.0mmd	73%
⑱	内面	単独	平底穴	20.0φ	3.0mmd	18%
⑲	内外面	混在	平底穴	20.0φ	内面2.0mmd	12%
				20.0φ	外面3.0mmd	18%
⑳	内面	単独	平底穴	20.0φ	1.0mmd	6%

※減肉率の算出は、母材実測厚さ16.3mmに対する加工きず深さから算出。



人工きずの形状詳細

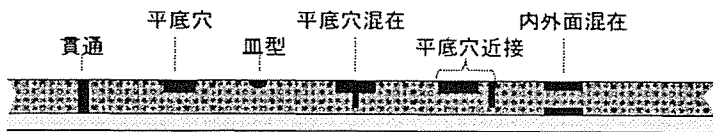


図 3.5.3 模擬欠陥配置状況図

(5) 試験結果

1) 概要

対比試験片の管内面側より全面探傷した結果を表 3.5.2 に示す。模擬欠陥 20 個中で 15 個を検出した。検出可能な欠陥は、大きさ $\phi 8\text{mm} \times$ 貫通 $\sim \phi 10\text{mm} \times 50\%t$ 程度以上と考えられる。

表 3.5.2 試験結果一覧表

No.	位置	形態	加工きず一覧				検出の可否
			形状	大きさ	深さ	減肉率	
①	—	単独	円形	8.0 ϕ	貫通	100%	可(位相差より腐食と区別可)
②	外面	単独	平底穴	10.0 ϕ	3.0mmd	18%	不可
③	外面	単独	平底穴	10.0 ϕ	7.5mmd	46%	可
④	外面	単独	平底穴	10.0 ϕ	12.0mmd	73%	可
⑤	外面	単独	平底穴	20.0 ϕ	3.0mmd	18%	可
⑥	外面	単独	平底穴	20.0 ϕ	7.5mmd	46%	可
⑦	外面	単独	平底穴	20.0 ϕ	12.0mmd	73%	可
⑧	外面	単独	皿型	22.5 ϕ	4.5mmd	27%	可
⑨	外面	単独	皿型	37.5 ϕ	7.5mmd	46%	可
⑩	外面	混在	平底穴	40.0 ϕ	4.0mmd	24%	検出可であるが分離検出困難
3.0 ϕ				12.0mmd	73%		
⑪	外面	単独	平底穴	40.0 ϕ	6.0mmd	36%	可
⑫	外面	単独	平底穴	40.0 ϕ	9.0mmd	55%	可
⑬	外面	単独	平底穴	3.0 ϕ	3.0mmd	18%	不可
⑭	外面	単独	平底穴	3.0 ϕ	7.5mmd	46%	不可
⑮	外面	単独	平底穴	3.0 ϕ	12.0mmd	73%	不可
⑯	外面	近接	平底穴	10.0 ϕ	3.0mmd	18%	不可
				3.0 ϕ	12.0mmd	73%	
⑰	外面	近接	平底穴	20.0 ϕ	3.0mmd	18%	検出可であるが分離検出困難
				3.0 ϕ	12.0mmd	73%	
⑱	内面	単独	平底穴	20.0 ϕ	3.0mmd	18%	可
⑲	内外面	混在	平底穴	20.0 ϕ	内面2.0mmd	12%	合成信号として検出可
				20.0 ϕ	外面3.0mmd	18%	
⑳	内面	単独	平底穴	20.0 ϕ	1.0mmd	6%	可

※減肉率の算出は、母材実測厚さ16.3mmに対する加工きず深さから算出。

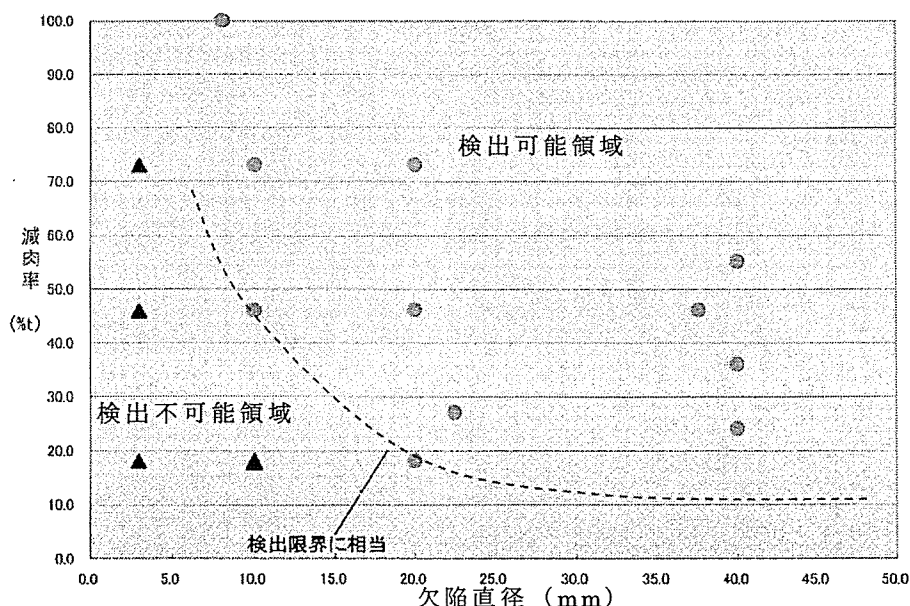


図 3.5.4 SLOFEC 検出限界の推定

2) 探傷による出力画像など

探傷データをもとにソフトウェア上で示されるマッピング画像を図 3.5.5 に示す。

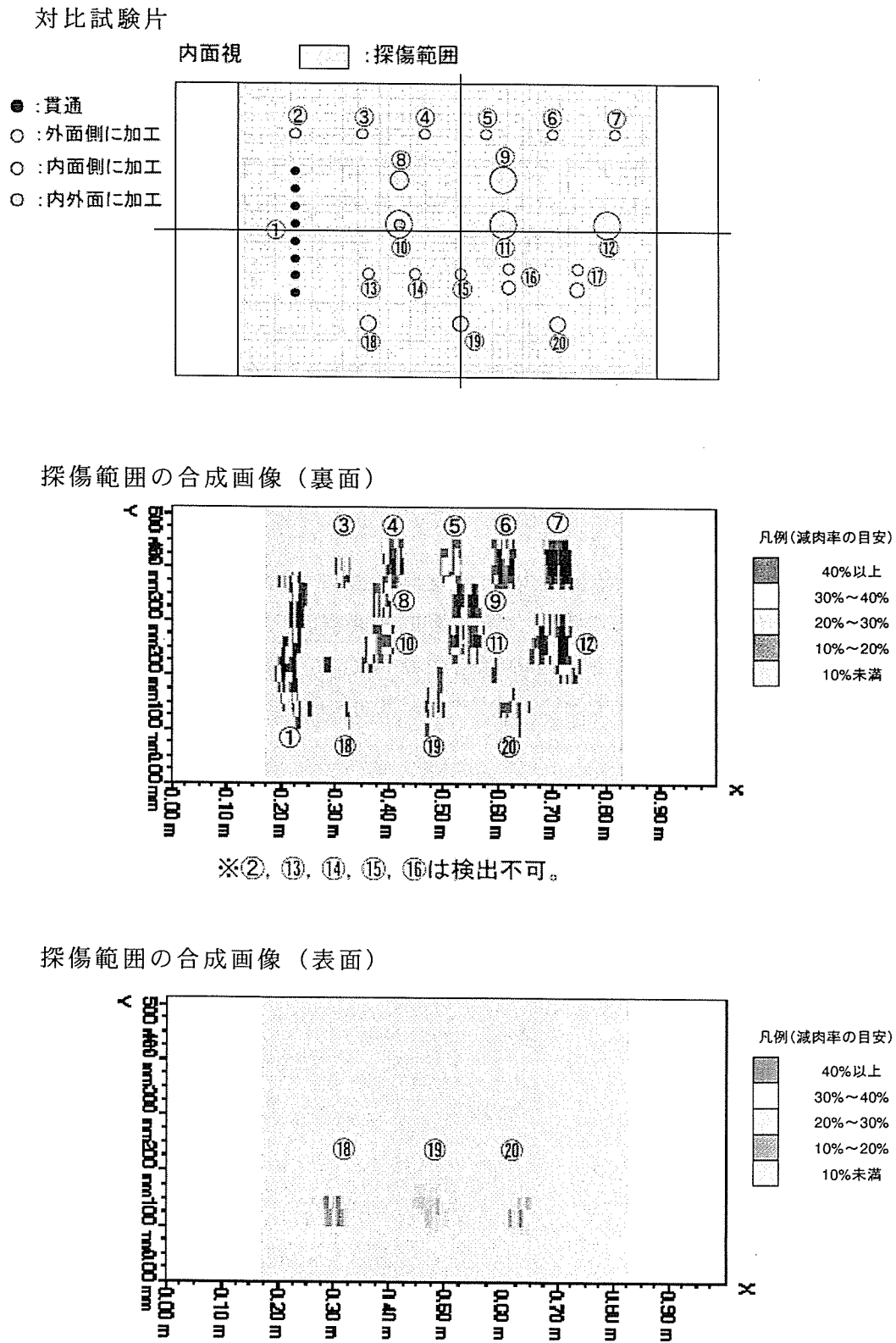


図 3.5.5 SLOFEC のマッピング画像

(6) まとめ

1) 試験結果について

磁気飽和渦流探傷法（SLOFEC）を用いてモルタルライニングが施された供試管の管内面側より全面探傷した結果、本試験では管外面に設けた模擬欠陥のうち、大きさ $\phi 8\text{mm} \times$ 貫通(約 15mm) $\sim \phi 10\text{mm} \times 50\%t$ 程度以上の欠陥について検出が可能なが確認できた。本試験にはダクタイル鉄管を用いたが、本手法は鋼管などを含めた主として磁性のある金属管に対して適用が可能である。

また、検出可能な欠陥は減肉による欠損体積と関連があるため、欠陥の直径が減少すれば欠損体積が減少するため検出性が低下し、欠損の直径が増加すれば逆に検出性が向上する特性がある。

なお、SLOFECを用いた検査の目的は欠陥のスクリーニングであり、検査結果から重大な欠陥が認められ、SLOFECによる検査結果から十分な判断ができない場合には、その部位について超音波や厚さ計などによる、詳細調査を行うことが必要である。

2) 埋設管調査への応用について

管内面から調査が可能な $\phi 800$ 以上の既設の大口径は一般に基幹施設と考えられる。SLOFECを用いることにより、管内面にモルタルライニングなどの塗覆装が施された主として磁性のある金属製の管路において、一時的な断水期間を設けて管内面から管外面の欠陥を検出することができ、管路の健全性確認に有効な手法であると考えられる。

また、腐食状況などの詳細な調査が必要な場合には、SLOFECによるスクリーニング結果を踏まえた、掘削による外面調査箇所の設定などの活用方法が考えられ、従来にも増して有効な診断が行えるものと考えられる。

しかし、日本国内では水輸送管路への適用事例は見られるものの水道管路への適用はなされていないため、実際に埋設されている水道管路への適用について検討する必要があると考えられる。

以 上

3.6 基礎実験

3.6.1 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) 堀上管に対する大気中での音響エコー法の適用

1) 試験目的

平成 17 年度には模擬付着物を用いた実験から本方法により、配管内部の付着物の検出が可能であることを確証した。そこで、実際の堀上管について本方法が適用できるか否かの検討を行うことを目的とした。

2) 試験方法

試験は福井市企業局より提供されたφ100mm、長さ2mの鋳鉄管（埋設年度：大正13年、写真3.6.1以下試験体1と言う）、及びさいたま市水道局より提供されたφ75mm、長さ1mの鋳鉄管（埋設年度：昭和49年、写真3.6.2以下試験体2と言う）を使用した。管の一方の端に空中用超音波ピエゾ素子を2基取り付け付けた。1基は超音波発生用に用い、1基は受信用に使用した。

写真3.6.1及び写真3.6.2に記載されているA～Dは試験装置を設置した位置を表す。

管内に異物が存在しなければ、超音波は反射せずピークは測定されないが、異物が存在した場合、超音波は異物によって反射され受信用超音波センサが検知しピークが検出された。

3) 試験結果と考察

各試験条件における測定結果を図3.6.3～図3.6.8に示す。また、昨年度の試験結果より距離の-1.5乗にピーク強度は比例するので、補正を行った結果も併記した。

試験体1に関しては測定位置Aにおいて0.2m及び0.4m付近で堆積物の存在を示すピークが確認された。実際に管内面を確認すると写真3.6.3に示すように、0.2m、0.4m付近に置いて堆積物の存在が認められた。また、測定位置Bにおいては0.2m付近で堆積物の散在を示すピークが確認された。同様に管内面を観察すると写真3.6.4に示すように、堆積物の存在が確認された。試験体2においても図3.6.5、写真3.6.5及び図3.6.7、写真3.6.6に示すように、ピーク強度が見られる位置に堆積物の存在が確認された。これらのことから検知したピークから堆積物の位置を測定できることが可能であると言える。

管内面に存在する堆積物の最大ピーク値と昨年度の研究結果から得られた堆積物の大きさとピーク強度の関係を示した曲線上に本試験の結果を図3.6.9に示す。図3.6.9の曲線は平成17年度に行った試験結果から得られた直線であり、φ75mm管での結果である。このため、試験体1とは直接的な比較は行えないので、あくまで

も参考である。しかし、昨年度の研究から推測して、錆びこぶの大きさは小さいと推察される。以上のことから、堆積物の大きさを判定するためにはピーク強度と堆積物量及び位置の関係について、より詳細な検討を行う必要がある。

(2) 水で満たされている模擬水道管路についての音響エコー法

1) 試験目的

前章においての試験は大気中で行った試験である。しかし、実際に使用を想定している環境は埋設管路であり、管路内は水によって満たされている。そのため、水中でも大気中と同様のエコーを検出できなければならない。

本試験では、水を満たした管路中に模擬堆積物を封入し、そのエコーを求めることを目的とした。

2) 試験方法

試験は写真 3.6.7 で示す装置を用いた。内部にアクチュエーター及びセンサ用ピエゾ素子が組み込まれており、大きさは 5cm である。又、使用した音波周波数は 200kHz である。試験に使用した管は $\phi 75\text{mm}$ 、及び $\phi 150\text{mm}$ 、長さ 400mm の VP 管を使用し、管片側に試験装置を取り付けた。試験装置の外観は写真 3.6.8 に示す。また、管内は水で満たした。また、 $\phi 75\text{mm}$ 管及び、 $\phi 150\text{mm}$ 管での試験において管内付着物として 3 種類用意した。付着物はそれぞれ管内径の 1/2、1/4、1/8 となるように作成した。以降管内径の 1/2 の付着物を付着物 A、管内径の 1/4 の付着物を付着物 B、管内径の 1/8 の付着物を付着物 C と呼ぶ。使用した付着物を写真 3.6.9 及び写真 3.6.10 に示す。

試験は $\phi 75\text{mm}$ 管及び $\phi 150\text{mm}$ 管を使用した。試験に使用する管片側を封印し、他端より各付着物を挿入し、測定装置より 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、測定装置より 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。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、生データ絶対値を取り、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ていた。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。

3) 試験結果と考察

$\phi 75\text{mm}$ 管に付着物が存在しない場合、及び付着物 A、B、C が管内に存在した場合の試験結果を図 3.6.11～図 3.6.14 に示す。また、管内に複数の付着物を入れた場合の試験結果を図 3.6.15～3.6.17 に示す。

同様に、 $\phi 150\text{mm}$ 管に付着物が存在しない場合、及び付着物 A、B、C が管内に存在した場合の試験結果を図 3.6.19～3.6.22 に示す。また、管内に複数の付着物を入れた場合の試験結果を図 3.6.24 及び図 3.6.25 に示す。

①管内面に存在する付着物の距離と応答時間の関係

図 3.6.10 及び図 3.6.18 に $\phi 75\text{mm}$ 及び $\phi 150\text{mm}$ でのパルス応答時間と付着物設置距離の関係を示す。図より明らかなように応答時間と付着物の距離は比例関係にあることが示され、応答時間を測定することにより、付着物の存在位置が特定できることが示された。

②管内面に存在する付着物の大きさと出力値の関係

図 3.6.11～図 3.6.14 及び図 3.6.19～図 3.6.22 よりいずれの管径、付着物の大きさであっても、距離と共に出力値の減衰が生じた。しかし、アクチュエーター及びセンサ設置位置から 300mm 以内の距離にある付着物に関してはブラックアウトにより、測定を行うことができなかった。

次に、各付着物の設置距離とピーク値の関係を図 3.6.26 及び図 3.6.27 に示す。図より近似曲線を求めると、ほぼ距離の -1 乗に比例すると考えられる。そこで、距離の逆数を横軸とし、ピーク値を縦軸としたグラフを図 3.6.28 及び図 3.6.29 に示す。図 3.6.28 より $\phi 75\text{mm}$ であれば、付着物の大きさに依存した出力値が得られた。一方、図 3.6.29 より $\phi 150\text{mm}$ においては、付着物の大きさに関わらずほぼ同様の反射波が得られた。但し、存在する位置に関しては特定できるので、付着物の存在を示すことは可能である。

また、 $\phi 150\text{mm}$ 管に関しては付着物とアクチュエーター・センサ部分との間で繰返し反射がおり、ゴーストが見られた。ゴーストの部分の最大出力値を以下の式を用いて減衰率を定め、減衰率と繰返し回数との関係を図 3.6.23 に示す。

$$\text{減衰率}[\%] = \frac{\text{繰返し反射波の出力値}}{\text{1回目の反射波の出力値}} \times 100$$

図 3.6.23 より、ゴーストは繰返し回数と共にほぼ指数関数的に減衰することが示される。これらのことより、ゴーストに関しては、ピークの発生距離及び減衰率との相関によって判別できると考えられる。

この結果は次のことを示唆している。即ち、送受信のピエゾ素子の大きさ、あるいは両者の間隔により、検出モードが大きく異なることである。つまり、検出対象物が超音波が拡散していく範囲内にあれば、その大きさを検出できるが、拡散範囲外になると、その認識感度は低下することである。これは超音波の性質から理解できることではあるが、今後、本方法を完成させる為には留意しなければならない重要な点である。

③管内面に複数の付着物が存在する場合の応答曲線

図 3.6.15～図 3.6.17 及び図 3.6.19～図 3.6.22 に示したように管径に関係なく、管内面に複数の付着物が存在する場合においても、検出することが可能であった。ただし、測定装置に近い位置に大きな付着物が存在する場合、その付着物によって大部分がエコーとなり、奥に存在する付着物の応答エコーは非常に小さい応答

になる。そのため、大きな付着物の後に存在する付着物の正確な大きさの特定は困難であると考えられる。

(3) 水で満たされた堀上管についての音響エコー法

1) 試験目的

前節において、水を満たした管路中に模擬堆積物を封入し、そのエコーを求めることにより、管路内に存在する堆積物を検出できる可能性が示された。そこで、本試験では水で満たされた堀上管について音響エコーの測定を行い、実際の管路に適用できるか検討を行う。

2) 試験方法

試験は前章の試験と同じ装置を用いた。また試験に福井市企業局より提供されたφ100mm、長さ2mの鑄鉄管（埋設年度：大正13年、写真3.6.1以下試験体1と言う）、及びさいたま市水道局より提供されたφ75mm、長さ1mの鑄鉄管（埋設年度：昭和49年、写真3.6.2以下試験体2と言う）を使用した。試験に使用する管片側を封印し、測定を行った。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、生データ絶対値を取り、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ていた。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。

3) 試験結果と考察

測定結果を、図3.6.30及び図3.6.31に示す。

模擬配管での試験結果より、測定装置より300mm付近では付着物による応答が得られていない。今回の堀上管では試験体長さが短い為、測定装置近傍の応答が付着物によるものか判別がつかないが、両試験体とも50cm付近での応答が見られる。また、図3.6.30より1mより先での応答が見られないが、これは図3.6.5及び図3.6.6に示すように、管内面には大量の腐食生成物が存在しており、それらによってすべて反射された為と考えられる。

これらのことから、実管路においても本装置により、管路に付着する生成物の位置を検出できることが示された。ただし、その大きさの特定に関しては、今後の更なる研究が必要であると考えられる。

(4) 要約と今後の研究課題

1) 堀上管に対する大気中での音響エコー法の測定

水道技術研究センターより提供を受けた錆びこぶのある2種類の堀上管について、大気中で音響エコー法を適用した。そのエコー波の減衰を前年度に求めた結果を用いて補正し、その形状と目視によって観察した錆びこぶの形状を比較した。その