

[R 4 . 1 . 1] シーバース海底配管の検査技術の研究開発

(海底配管検査技術グループ)

鈴木 憲、山岡 誠治、久保田 義昭、佐久間 精一、屋敷 孝志

1 . 研究開発の目的

製油所等の原料や製品の出入荷、石油備蓄基地への原油の揚荷や緊急放出等の重要な任を担う国内の海底配管は、海洋で危険物である油を直接扱う設備である。

これら海底配管は水深 3 0 m 前後の海底 2 ~ 3 m に埋設されて敷設されており、敷設後 3 0 年以上経過しているものが多く、検査による海底配管の劣化状況の把握と、検査結果に基づく経済的且つ迅速で効率的な補修に対するニーズが非常に高まっている。

現存の腐食検査技術の多くは腐食検査後検査データの解析に数ヶ月の期間が必要であり、腐食検査直後に補修要否の判断や補修位置の特定ができない。また、国内の海底配管はほぼ全数が海底に埋設されており、特徴的な部品やマーカー等もなく、アクセスそのものが困難な環境にあるため、腐食検査結果得られる位置情報だけでは容易に補修位置を特定し補修に移行することは困難である。

そこで、効率的で信頼性の高い補修を行うために、国内に供用されている種々の海底配管について、高い精度で腐食検査を行い、検査結果選定された補修必要箇所をリアルタイムで再度検出して配管の外部に通信し、補修位置を配管外部からピンポイントで特定できる検査システムを開発する。

この検査システムを開発することにより検査工事期間中に補修必要箇所、補修位置が高い精度で特定できるようになり、補修工事を含む全体工事工程の短縮及び工事費を安価にすることが可能となる。

2 . 研究開発の内容

2 . 1 検査システムの開発

腐食検査機能と位置特定機能を併せ持つ検査システムを開発する。

2 . 1 . 1 腐食検査機能

海底配管を対象に補修を実施する場合、補修対象部位の選定のため、事前に腐食等の減肉（以下「腐食」と記す）の状況を把握しておく必要がある。今回開発する検査システムも、国内の海底配管を対象として、外面からの補修工事に適用することを目的としているため、事前に腐食状況を把握する機能が必要である。

海底配管を対象とした腐食検査技術そのものは既存技術としてあるが、国内の海底配管を対象として、外面からの補修工事に適用するという目的を達成するために、腐食検査機能として具備すべき機能を検討する。

2 . 1 . 2 位置特定機能

海底配管を対象に配管外面からの補修技術を実用化するためには、補修必要箇所の位置を配管外面から精度高く特定する必要があるため、位置特定機能として具備すべき機能を検討

する。

2.2 検査システムの総合性能検証テスト

本研究で開発した検査システムは18B実証用テスト配管を用いて実証テストを実施し、検査システムの性能を総合的に検証する。

3. 研究開発の結果

3.1 検査システムの開発

3.1.1 腐食検査機能

(1) 腐食検査における検出項目

腐食検査は海底配管の維持管理の一環として実施されることから、検査結果は強度評価や余寿命評価及び補修工事に適用できるものでなければならない。このような要求を満足するために、強度評価に広く適用される公的規格の DNV (DET NORSKE VERITAS)、或いは減肉のある配管等を対象として継続使用の安全性を評価する場合に使用される API (American Petroleum Institute) 579 等を基に検討し、腐食部の最小残肉厚、軸方向の減肉長さ及び周方向の減肉長さを腐食検査の検出項目として設定した。

(2) 腐食検査に要求される仕様

(イ) 検査システムの走行性能

検査システムの通過性能に影響する配管仕様はバンド形状と配管の長さである。国内の既設海底配管を調査し、要求仕様を下記とした。

バンド形状：JIS のロングエルボの曲げ半径に相当する $1.5D$ 以上

適用配管の外径：6 ~ 56B

(ロ) 検査原理

実用化されている検査技術の中で配管内外面の腐食減肉状態を検査することが可能で、且つ座屈や浮上等の配管の機械的、構造的な要因による適用上の制約のない漏洩磁束法及び超音波法を対象に適用する検査原理を検討した。

漏洩磁束法はガス配管の検査に多用されているが、解析により減肉深さを算出するという間接的な測定である。超音波法は高い検査精度を有する技術であることから、液体配管の検査には超音波法が適用される傾向にある。

国内の海底配管は、製油所や工場の原料や製品の入出荷等の目的で設置されており、ほとんどが液体配管である。このため海底配管の全線内外全面の肉厚を直接、且つ高い精度で測定できる超音波法を検査原理として設定した。

(ハ) 検査環境

超音波法による腐食検査の場合、配管内を液体で満たした環境下で検査を実施する必要がある。海底配管の多くは、原油等の石油類を取り扱うものであるから、水環境下だけでなく原油等油中環境で腐食検査が実施できることを要求仕様とした。

(ニ) 検査性能

腐食検査のデータは配管の強度評価や余寿命評価に活用されるため高い精度が要求される。そこで国内の検査性能を調査し、既存技術の最高水準と同程度の検査性能を要求仕様として設定した。

以上の検討結果をまとめ、表3-1に検査システムの要求仕様を示す。

表3-1 検査システムの要求仕様

番号	項目		要求仕様
1	適用配管（管径）		6B～56B（国内の主要海底配管の管径）
2	検査原理		超音波法
3	検査環境		原油等油中環境下でも腐食検査が実施できること
4	検査性能	検出可能減肉深さ	1 mm
		減肉深さ測定精度	±0.5 mm
		配管軸方向減肉位置測定精度	±0.2 m（近接基準点からの距離）
		データ分解能	
		肉厚方向	0.1 mm
		軸方向	10 mm
		周方向	±5°

3.1.2 位置特定機能

(1) 位置特定に必要な基本機能

腐食検査と補修工事を同一工事機会に実現するという要求が増加しつつある。これを実施する場合の補修工事手順は次のようになる。

まず、腐食検査を行い、腐食検査結果に基づいて補修の要否と補修必要箇所の選定を行う。補修必要箇所の選定結果に基づき位置特定技術により補修必要箇所を配管内部から再度検出し、さらに配管外部から補修位置を特定する。特定した補修位置を配管外部から特定表示して、補修工事に移行する。

従って検査システムの位置特定に必要な基本機能は「検査結果の提示期間」、「配管埋設部の補修位置の特定精度」として検討した。

(2) 検査結果の提示期間

補修工事は腐食検査結果に基づいて計画されるので、検査結果の提示期間の短縮化が要望される。この要望に対して検査結果の提示期間は腐食検査完了から補修工事への準備期間を考慮し、2日以内として設定した。

(3) 配管埋設部の補修位置の特定精度

配管外面からの補修に対して、補修治具の例として市販の補修クランプを使用する場合、その最大長さは6mであり、補修必要箇所の特定位置から±2.5m以内であれば、確実な補修が可能とのことから設定した。

この基本機能を満足するためには次の機能を持つ位置特定装置を新規に設計・製作して、既存腐食検査装置に加える必要がある。

海上から容易に補修必要箇所へアクセスすることを可能にする機能

海底で配管外部からピンポイントで補修位置の特定を可能にする機能

(イ) 海上から容易に補修必要箇所へアクセスすることを可能にする機能

(a) 位置測定装置の構成

補修必要個所を配管外部から位置特定するためには、海上から船舶等で補修位置に容易にアクセスできることが必要になる。このためには、補修位置を測定し、測定位置データから補修位置を測地座標系の座標で決定することが必要になる。

補修位置の座標を測定するために、腐食検査装置に加えて、座標測定のための位置測定装置を検査システムへ組み込む。位置測定装置は加速度センサと光ジャイロ（リングレーザジャイロ）で構成され、位置測定装置の移動のみで位置測定装置の移動経路の軌跡、距離及び高低差の測定が可能となる。

(b) 慣性測量

位置測定装置の加速度センサ（加速度計）と角速度センサ（光ジャイロ）による測定データから位置測定装置が移動した距離変化と方向変化を演算し、基準点（測量開始点）からの三次元位置座標（相対座標）や移動軌跡（配管形状）が求められる。

(c) 補修箇所へのアクセス

位置測定装置で、測定した基準点（測量開始点）からの三次元位置座標（相対座標）と移動軌跡（配管形状）を求める。次に基準点の全地球測位システム（GPS：Global Positioning System）による測量で基準点の測地座標を決定し、相対座標を補正することにより、配管各部（補修位置）の測地座標が決定できる。

補修位置の測地座標を決定した後、測量船等にGPSレシーバを搭載し、GPSにより位置座標を確認しながら補修位置の測地座標に向い航行することにより、補修箇所へ容易にアクセスすることが可能になる。

(ロ) 海底で配管外部からピンポイントで補修位置の特定を可能にする機能

海底で配管外部からピンポイントで補修位置を特定するためには、慣性航法装置（INS：Inertial Navigation System）で測定した補修位置の測地座標に測量船で海上からアクセス後、海底で精度高く検査システムの位置を特定することが必要になる。この目的で、位置測定装置に電磁波を発信するトランスミッタ（発信機）を搭載し、トランスミッタの発信信号を配管外部からダイバ又は遠隔操作式無人潜水艇（ROV：Remotely Operated Vehicle）の持つレシーバで検出することにより、補修位置を海底の配管外部からピンポイントで特定することが可能になる。

3.1.3 検査システムの開発

海底配管を対象とした腐食検査技術は既存技術であり、複数の企業が実用化して検査サービスを提供していることから、本研究開発では新たに腐食検査技術（腐食検査装置）を開発するのではなく、基本技術としてこれら既存検査技術（検査装置）を活用し、目的達成のために不足する機能や性能を基本技術に新たに付加することとした。

既存技術の中で、要求仕様を満足し、検査システムの研究開発に用いる基本技術となり得る技術を検討した結果、ノルウエーの検査会社AGR社が所有するケーブル操作式検査装置PipeScanを採用することとした。

この腐食検査装置に図3-1に示すように、新規に設計・製作する位置特定装置（位置特定技術）を付加し、図3-2に示す検査システムを開発した。

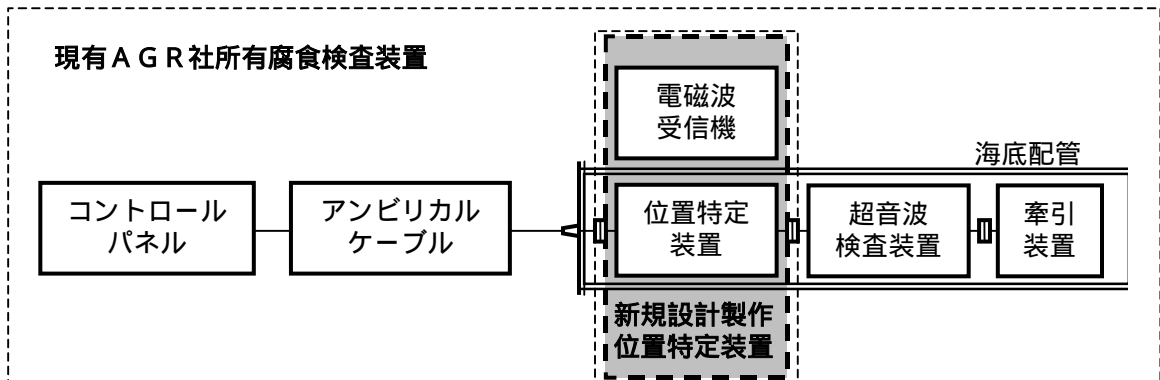


図3 - 1 検査システムの構成

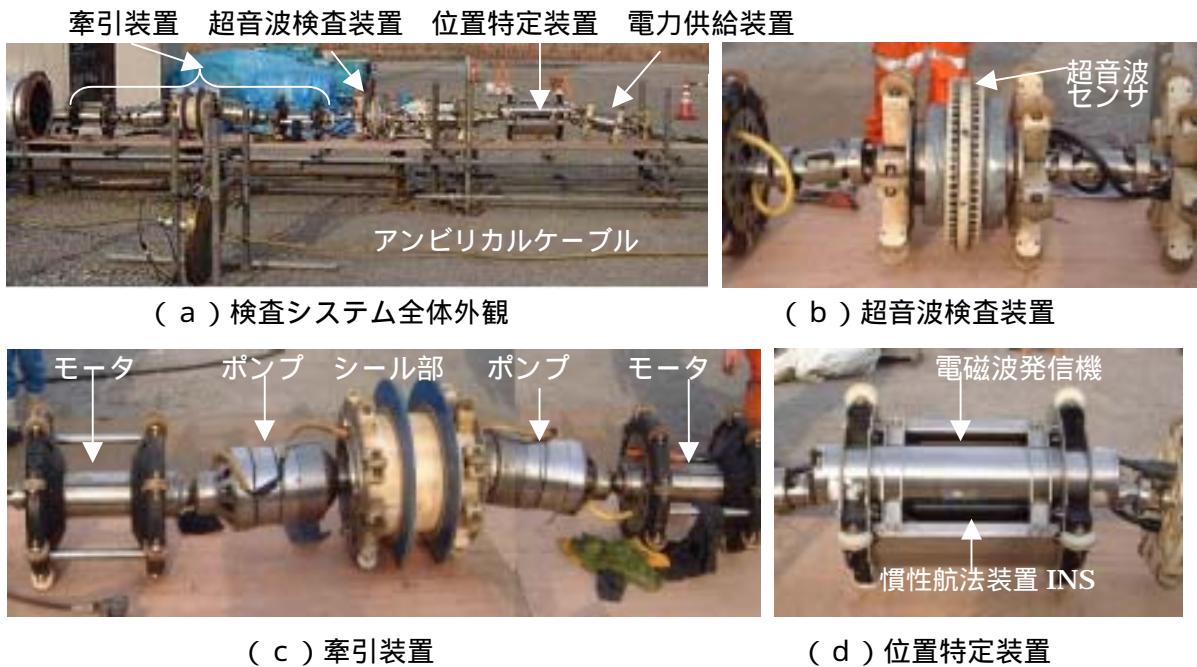


図3 . 2 ケーブル操作式検査装置による検査システムの開発

この検査システムは、走行装置、腐食検査装置、位置特定装置、発信機で構成される検査装置と、アンピリカルケーブル及びコントロールパネルで構成される。

コントロールパネルからアンピリカルケーブルで電力を走行装置に供給し、走行速度をコントロールしながら検査装置を走行する。

腐食検査装置には多数の超音波プローブ（探触子）がアレイ状に組み込まれており、コントロールパネルの超音波装置からアンピリカルケーブルで電気信号を超音波プローブに送信し、超音波プローブから配管内面に向かって超音波を発射する。この超音波は配管内外面で反射されるので、超音波の反射波を超音波プローブで検出して電気信号に変換（測定データ）し、アンピリカルケーブルでコントロールパネルへと送信して腐食検査を行う。

この検査期間中、腐食検査に加えて位置測定装置により検査装置の位置データを測定し、この位置データから位置測定装置が移動した距離変化と方向変化を演算し、基準点（測量開

始点)からの三次元位置座標(相対座標)と移動軌跡(配管形状)を求め、腐食検査と同様にアンビリアルケーブルでコントロールパネルへと送信する。基準点をGPS測量して測地座標を求め、この基準点の測地座標により基準点(測量開始点)からの三次元位置座標(相対座標)を変換して、補修位置の測地座標を求めることができる。

検査中、コントロールパネルでは検査装置の腐食データと位置データを合成し、海底配管の内外面の状態をカラーイメージでオンライン・リアルタイムにコンピュータのディスプレイ上に表示し、モニタリングを行なうことが可能な検査システムになる。検査で得られた腐食減肉の検査データを評価して、補修必要個所が選定される。

選定された補修必要個所の位置データに従い、モニタリングしながら検査装置を再走行させて補修必要個所にアクセスし、補修必要個所を再検出する。走行装置の走行速度は可変で調節可能であり、必要時に任意の位置で停止可能である。

選定された補修必要個所の測地座標にGPSレシーバを搭載した作業船等で海上からアクセスし、その位置でレシーバを持つダイバ等が潜水する。補修位置で停止した検査装置は発信機から配管外部にその位置を通信し、潜水したダイバ等がレシーバで受信して、海底で配管外部から補修位置をピンポイントで特定することが可能になる。

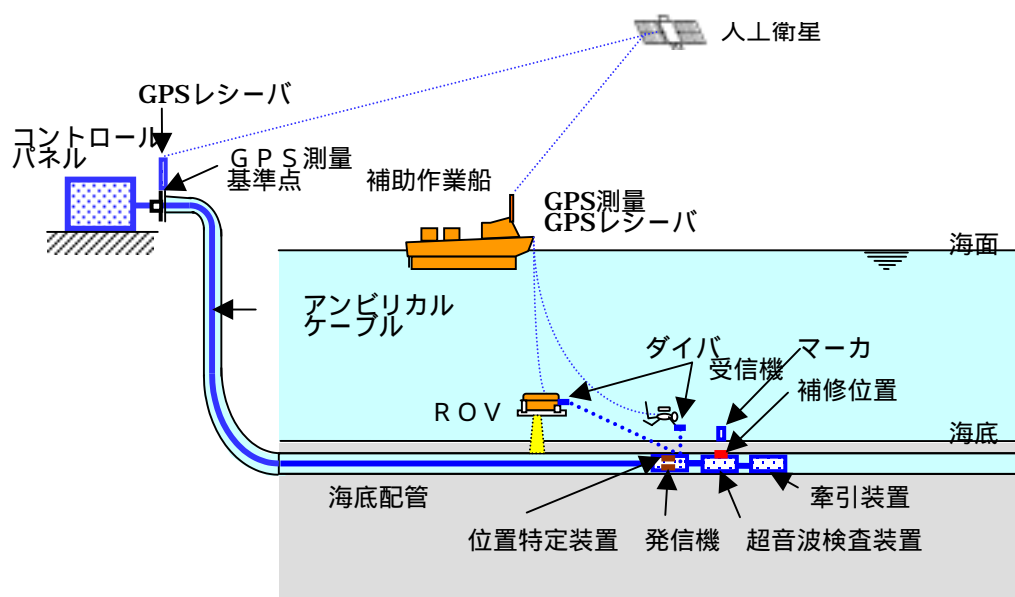


図3 - 3 検査システムの概要

3.2 検査システムの総合性能検証テスト

図3 - 4に実証用テスト配管を製作したサイトの全景を示す。この実証用テスト配管を用いて、開発した検査システムの性能を総合的に検証した。この実証用テスト配管は、中口径18インチ、全長100m、埋設深度3mで長さ20mの埋設配管部、50mの水平配管部を有し、内外面人工欠陥を12個加工して海底配管を模擬したもので、実際の海底配管と同等の性能確認を可能とした。

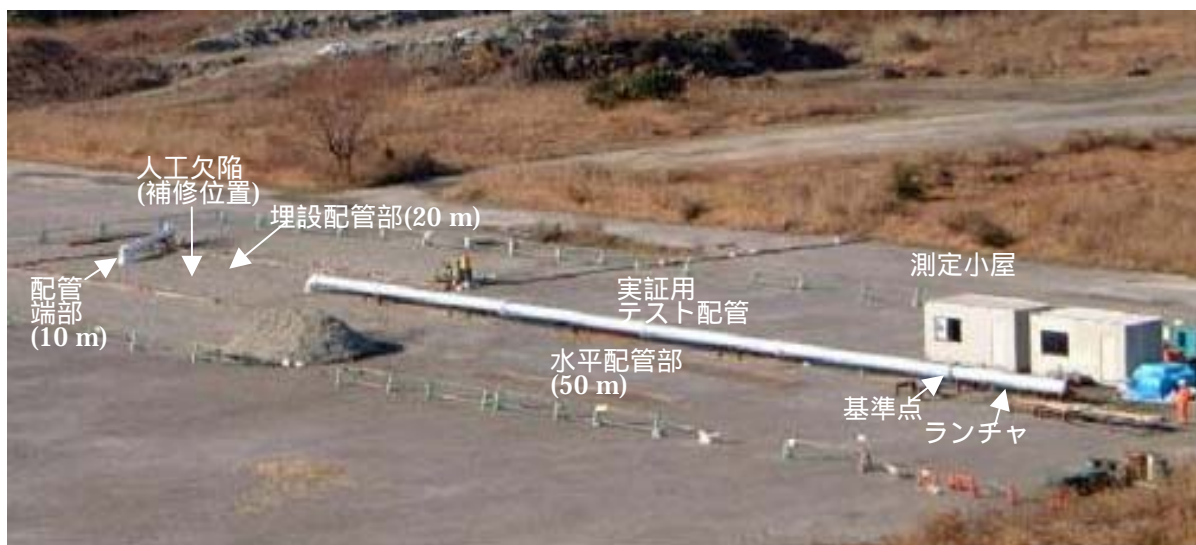


図3 - 4 18インチ実証用テスト配管

表3 - 2 に性能検証項目とテスト内容を示す。

表3 - 2 性能検証項目

番号	性能検証項目	テスト内容
	通過性能	バンドを含む実証用テスト配管全線を自走で1往復走行
	走行性能(耐久性)	実証用テスト配管内を往復走行で3 km 走行
	検査性能	実証用テスト配管を走行させ検査
	検査結果の提示期間	検査後検査データを解析し、検査結果として提示
	(補修必要箇所を選定)	
	位置特定期間	- 1 検査システムを再走行し、実証用テスト配管埋設部の補修位置を検出
		- 2 INS で補修位置の座標を測定し送信
		- 3 GPS 受信機で位置確認しながら、測定員が地上を補修位置の座標まで移動
		- 4 測定員が電磁波受信機で実証用テスト配管の外部から補修位置を特定
	位置特定精度	電磁波受信機による位置特定

3.2.1 腐食検査性能

(1) テスト方法

(イ) 検査性能

検査システムを実証用テスト配管内を走行させ、配管内に加工した人工欠陥の検査データを採取し、検査データを解析して検査性能を検証した。

(ロ) 検査結果の提示期間

検査データを解析し、検査結果として検査レポートを提出することで、検査結果の提示期間(2日以内)を検証した。

(2) テスト結果

(イ) 検査性能

検査実証用テスト配管の水平配管部の 10 個の内面人工欠陥と、埋設配管部の外面配管部の 2 個の外面人工欠陥を、最初の 1 往復の通過性能確認のための走行の間に検査した。検査中の検査データをオンライン・リアルタイムでモニタリング表示したものを、図 3 - 5 に示す。12 個の人工欠陥をすべて検出し、検査データを解析した結果を表 3 - 3 及び表 3 - 4 に示す。

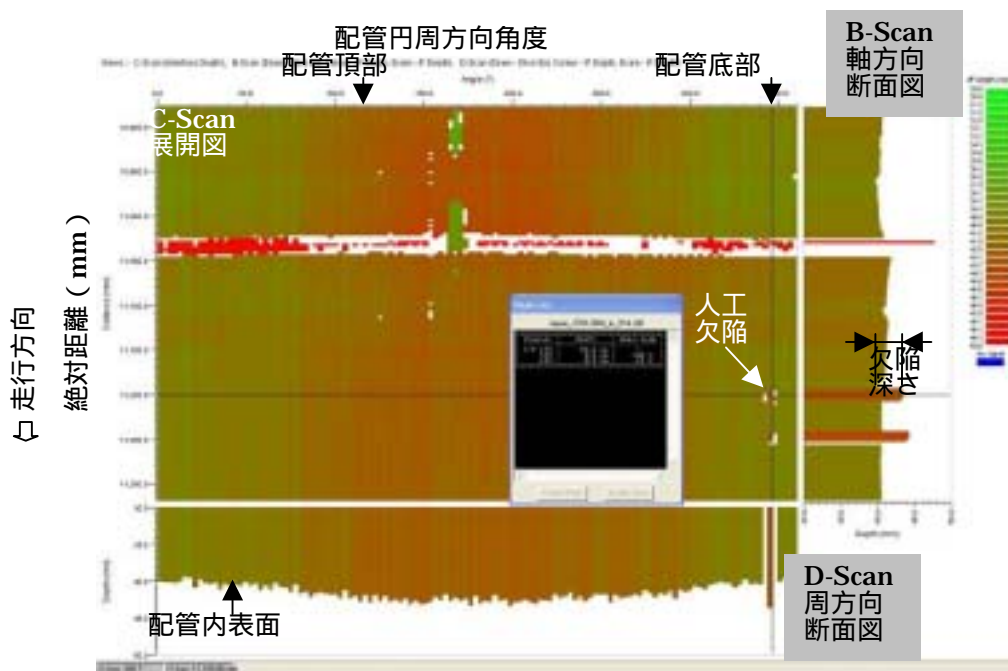


図 3 - 5 検査データをオンライン・リアルタイムでモニタリング表示

表 3 - 3 検査結果 (最初の 1 往復走行中の検査データ)

欠陥 番号 No	位置				サイズ					座標 ^{注1}	
	絶対 距離 (mm)	相対 距離 (mm)	周方向 位置 (時)	内面 外面	深さ (mm)	長さ (mm)	幅 (mm)	肉厚		東距 (m)	北距 (m)
								残 (mm)	健全 (mm)		
1	11200	170	6	内面	3	18	33.7	4.4	7.4	411882	3926850
2	11244	214	6	内面	3.8	18	21.8	4.8	7.6	411882	3926850
3	20982	172	6	内面	3.1	27	21.8	4.2	7.3	411876	3926842
4	21024	214	6	内面	3	21	33.7	4.4	7.4	411876	3926842
5	31644	-219	6	内面	3	18	33.7	4.3	7.3	411869	3926833
6	31704	-159	6	内面	2.8	18	33.7	4.4	7.2	411869	3926833
7	32025	162	6	内面	2.8	18	33.7	4.6	7.4	411869	3926833
8	32076	213	6	内面	3	15	21.8	4.4	7.4	411869	3926833
9	42681	-219	6	内面	2	21	21.8	5.6	7.6	411862	3926825
10	42735	-165	6	内面	2.4	18	21.8	5.1	7.5	411862	3926825
11	58545	5073	12	外面	3.2	15	10.9	4.5	7.7	411855	3926815
12	68250	-2997	12	外面	2.8	18	21.8	5.0	7.8	411849	3926808

注1 基準点の GPS 座標 : (東距、北距) = (411890 , 3926860) (m)

表 3 - 4 人工欠陥深さの実測結果と検査結果の比較

(単位：mm)

欠陥番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
実測結果	3.0	3.3	3.1	2.9	2.9	2.7	3.0	2.7	2.4	2.5	3.0	2.7
検査結果	3.0	3.8	3.1	3.0	3.0	2.8	2.8	3.0	2.0	2.4	3.2	2.8
差	0.0	+0.5	0.0	+0.1	+0.1	+0.1	-0.2	+0.3	-0.4	-0.1	+0.2	+0.1

(口) 検査結果の提示期間

12 個の人工欠陥について、検査性能の確認試験で採取した検査データを解析し、表 3 - 3 に示す検査結果を検査データ採取後 1 日以内に提示した。

(4) テスト結果の評価

(イ) 検査性能

実証用テスト配管に加工した 12 個の人工欠陥の検査結果と実測結果を比較した結果 (表 3 - 4) すべてにおいてその誤差は ± 0.5 mm 以内であり、測定精度の目標値 ± 0.5 mm を達成できた。

(口) 検査結果の提示期間

検査データ採取後 1 日以内に検査結果を提示でき、検査結果の提示期間の目標値 2 日以内を達成できた。

3.2.2 位置特定性能

(1) テスト方法

検査システムは直管部を往復走行 (3 km) させたのち、埋設配管内に再走行させ、埋設配管部に加工した外面人工欠陥を再検出する。再検出した補修必要箇所の位置座標は、検査システムの INS (慣性航法装置) で測定し、この座標を GPS 座標に変換する。

GPS 受信機で位置を確認しながら人が地上を補修位置の GPS 座標まで移動する。

検査システムが埋設配管部の補修位置を検出後、電磁波発信機が発生する電磁波を人が電磁波受信機により受信して補修位置を特定し、実際の補修位置との誤差から位置特定精度を検証する。

(2) テスト結果

GPS 受信機で補修位置まで移動した後に、電磁波受信機を使用し、電磁波発信機の生成する電磁波を検出し、図 3 - 6 に示す電磁波の強度が変化する位置の距離 C ~ D (r_1) を測定して、その中心位置 O' を補修箇所の特定位置とし、電磁波発信機の直上位置 O ~ O' 間の距離を位置特定誤差 r として測定した。その結果を表 3 - 5 に示す。

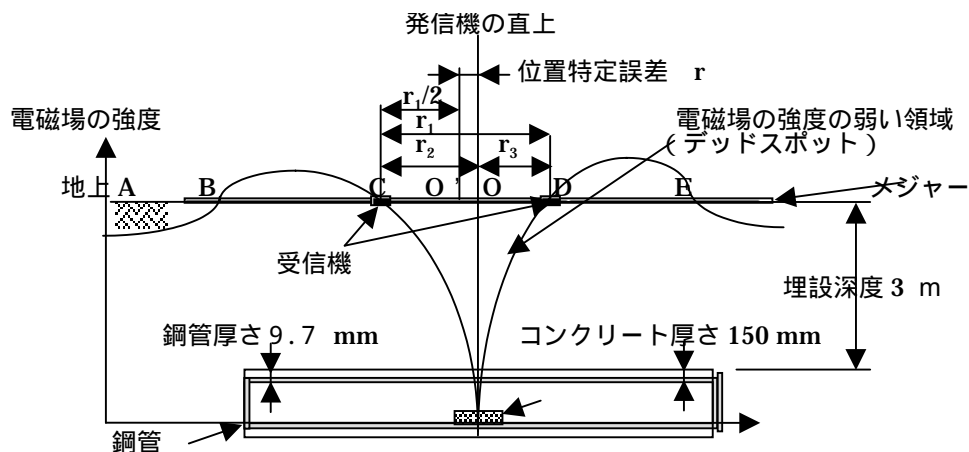


図 3 - 6 位置特定性能の試験方法

表 3 - 5 位置特定誤差の測定結果

番号	項目	測定結果	位置特定精度の目標値 (m)
1	電磁波の強度が変化する距離 r_1 (m)	2.4	-
2	電磁波発信機からの水平距離 r_2 (m)	1.3	-
3	電磁波発信機からの水平距離 r_3 (m)	1.1	-
4	位置特定誤差 r (m)	0.1	2.5

(3) テスト結果の評価

位置特定誤差は 0.1 m であり、位置特定精度の目標 ± 2.5 m 以内を達成できた。

3.2.3 通過性能

(1) テスト方法

検査システムはバンドを含む実証用テスト配管の全線を自走で一往復走行させ、バンド部の通過性能を検証した後、50 m 長さの直間部を往復走行により 3 km 自走で走行させ、耐久性を検証した。

(2) テスト結果および評価

検査システムは曲げ半径 1.5 D の 90° ベンド 4 個を含む配管埋設部を自走で問題なく通過し、かつその後往復走行で 3 km を機械的・電気的な問題や測定上の問題なく走行を完了した。以上の結果から牽引装置のシール部の磨耗も少なく、十分耐久性があると判断できる。

4. まとめ

4.1 平成 15 ~ 平成 16 年度の成果

(1) 検査システムの開発

既存のケーブル操作式腐食検査装置（腐食検査技術）に新規に設計・製作した位置特定装置（位置特定技術）を付加し、下記の基本機能を持つ検査システムを開発した。

- ・ライザ部を含む海底配管全線内外全面の腐食減肉を検査する機能
- ・補修必要箇所を選定するために腐食検査直後に検査結果を提示する機能
- ・補修必要箇所を検出してリアルタイムで配管外部に通信し、配管外部からピンポイントで位置特定する機能

(2) 検査システムの実証テスト

実際の海底配管の仕様を兼ね備える実証用テスト配管を設計・製作し、この配管を用いて、開発した検査システムの性能を総合的にテストした。その結果開発目標および要求仕様をすべて満足しており、海底配管外面から効率的で信頼性の高い補修技術を実用化し得る性能を有していることを実証した。

4.2 今後の課題

検査システムの技術は確立した。さらに検査システムの性能を向上させるために、電磁波受信機で配管の外部から補修位置を特定するときに熟練を要することから、より容易に且つ定量的に位置特定の判定を行えるように、位置特定方法の改善について調査検討を実施する。

以 上