

平成26年度・平成27年度

中小企業経営支援等対策費補助金

(戦略的基盤技術高度化支援事業)

「ハイパワーガイド波を活用した埋設配管探傷技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成28年 3月

担当局 中国経済産業局

補助事業者 公益財団法人 ひろしま産業振興機構

目次

第1章 研究開発の概要	
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	2
1-3 成果概要	2
1-4 当該研究開発の連絡窓口	4
第2章 本論	
2-1 埋設配管周囲の圧力とガイド波反射信号の相関把握	4
(1) 模擬試験体の概要	4
(2) まとめ	8
2-2 ガイド波伝搬シミュレーションによる評価	8
(1) はじめに	8
(2) シミュレーション解析の概要	9
(3) 結果	10
(4) まとめ	14
2-3 ハードウェア開発	14
(1) ガイド波装置の仕様	14
(2) リングセンサーの仕様	15
(3) 開発したリングセンサー及びガイド波装置の基礎性能評価	16
(4) まとめ	19
2-4 ソフトウェア開発	19
(1) ソフトウェア仕様	19
(2) 製作したソフトウェアの性能	19
(3) まとめ	20
2-5 性能試験	20
(1) はじめに	20
(2) 基本性能試験	20
(3) 埋設模擬試験体を用いた性能試験	21
(4) 測定精度に関する試験	21
(5) 断面欠損率に関する試験	22
(6) まとめ	22
2-6 フィールド試験	22
(1) はじめに	22
(2) 試験結果	22
(3) まとめ	23
最終章 全体総括	
3-1 全体総括	24
(1) 研究成果まとめ2年総括	24
(2) 事業化に向けた取り組み	24

第1章 研究開発の概要

国内における石油化学プラント設備では、建設後 30 年以上経過しているものが多く、装置老朽化に伴う漏えい事故の危険性が日増しに高まっている。本事業の対象となる埋設された配管では、健全性確認に伴う、埋設部解体に係るコストが多額である為、設備管理上最大の課題になっている。2013 年度行われた産業競争力懇談会では、埋設配管の腐食問題に関し、合理的な検査技術が無いことを指摘し、「ハイパワーガイド波技術」を開発すれば効率的な検査が可能になると最終報告として提言した。全国のプラント設備の保守点検を担う関西エックス線は、この提言に応えるべく、日立パワーソリューションズが開発（特許化）したガイド波技術をベースにして、新たに埋設部に対応した「ハイパワーガイド波技術」の開発を目指すものである。

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

川下製造業者である基幹産業インフラ業界では、埋設配管等の探傷に対して、様々な検査手法を検討および試用してきたが、決め手になる手法は見つかっていない。

測定部位周辺を解体せずに検査する手法には、電位差法や、海外からはガイド波を利用した装置の提案がある。電位差法は測定範囲の肉厚を測定することができるが減肉位置を特定することが困難である。一方、英国 Plant Integrity 社や Guided Ultrasonics Ltd. などがガイド波検査装置を製造・販売しており、日本国内においても適用事例があるが、土中埋設管には対応できない。

国内では、本研究実施機関である日立パワーソリューションズが本研究テーマにマッチングしたガイド波技術の特許を有している。（平成 24 年 11 月 9 日成立 特許第 5127574 号「ガイド波を用いた検査方法」）

主に石油化学プラントメーカーの検査サービスを請負っている関西エックス線は、この日立製ガイド波測定装置に着目し、基幹産業インフラ事業者である石油化学会社と石油会社に防油堤貫通および埋設配管検査への導入検討を試みた。その結果、長さ10m程の道路下埋設横断配管において日立製ガイド波装置の超音波音圧をさらに高め、ガイド波伝播減衰に影響する土中における不均一な土圧影響を補正するアルゴリズムを加味すれば、実用的な探索技術が構築出来る感触を得た。日立製ガイド波装置技術をベースに、徳島大学のガイド波の分散挙動に関する理論的な研究、発電設備技術検査協会の埋設配管における減衰の程度が埋設条件に依存することに対するガイド波シミュレーションの技術開発を融合させることで、課題である埋設配管の腐食スクリーニング技術を実現できるとの見通しを得、本提案に至った。

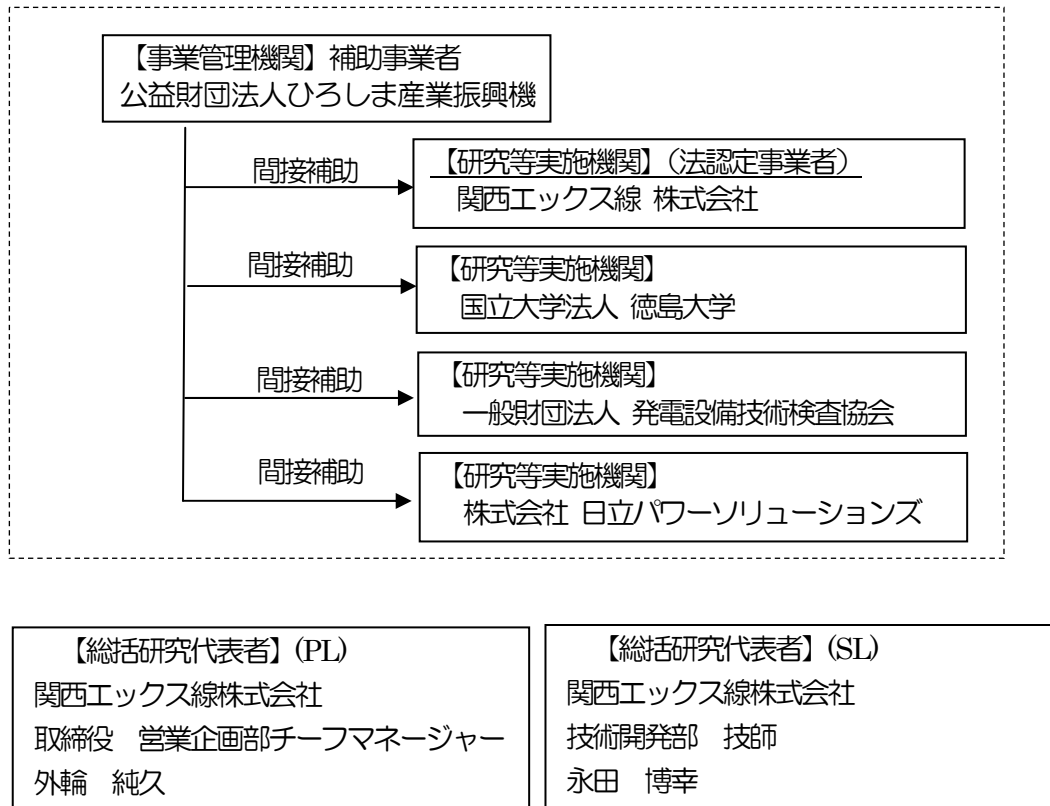
ベースとなる日立製ガイド波装置では、これまでに防油堤貫通部で施工した実績がある。保有しているガイド波装置では、ガイド波は防油堤内では減衰し、減肉を検出しているものの、信号レベルが小さくノイズとの区別が付きにくい。またこの特性値は、防油堤内の配管周囲の圧力や防食テープの有無などにより変化するので、夫々の圧力や配管周囲の環境に対する補正が必要である。加えて、装置は実験室レベルの仕様であり、検査現場で簡便に利用できる装置を開発する必要もある。

埋設配管検査探傷に関する従来技術やベースになる日立製のガイド波技術の課題、及びハイパワーガイド波を活用した埋設配管探傷技術の現場活用のあるべき姿、に関して知見を有する関西エックス線が中心となり、日立パワーソリューションズ、徳島大学、発電設備技術検査協会、及びアドバイザーとして川下基幹産業インフラ事業者の石油化学会社を加えて研究共同体を構成し、日立パワーソリューションズのシステムをベースに、「ハイパワーガイド波を活用した埋設配管探傷技術」を開発する。

高度化の目標は、通常の埋設状況（土性状や圧力）で、一般的な5m程度の埋設配管の減肉が探傷でき、現場で簡便に操作活用可能な試作品を製作し、上記課題及びニーズに応える検査システム

を構築する。

1-2 研究体制



1-3 成果概要

本研究開発は、高出力で高性能のハイパワーガイド波装置を開発し、最終目標である『長さ 5m の埋設配管で、配管断面積比 3%の減肉を検出する』を達成することを目的に開発を行った。ものづくり（ハードウェア開発、ソフトウェア開発）では、高出力、高性能を満足する装置を開発することが出来たが、想定していた以上に、埋設環境の影響が大きかった為、目標達成には至らなかった。しかしながら、これまで検出出来なかった反射信号を明確にとらえることができるようになり、さらなる高度化や解析を進めることで、課題解決を可能とするレベルに達した。

以下、個別のテーマ毎の目標と成果について記載する。

(1) 埋設配管周囲の圧力とガイド波反射信号の相関把握

[目 標] 減衰係数と波形変化の取得

[成 果] ・土や砂及び防食テープ施工時に関する減衰係数を取得し、土圧の影響は少ないことがわかった。

- ・防食テープがガイド波の減衰に大きく影響し、施工後数か月は時間の経過とともに変化する。理論解析と一致する。
- ・埋設環境では、配管の板厚によって減衰に影響することが分かった。理論解析と一致する。

(2) ガイド波伝搬シミュレーション解析

[目 標] モデルの開発、モックアップ試験評価

[成 果] ・埋設部に超音波が伝搬又は埋設部で拘束される条件をモデル化し、モックアップ試験より、

超音波が伝搬していることと仮定した。(H26年度)

- ・埋設模擬試験体を用いた経年変化検証結果より、防食テープの密着性の違いをモデル化し、密着性の変化に対する減衰の影響を確認した。
- ・フィールド試験結果より、埋設部における配管の板厚差が、減衰に及ぼす影響をモデル化し影響を確認した。

(3) ハードウェア開発

[目 標] 長さ5mの埋設配管で、配管断面積比3%減肉検出可能な出力を持ったガイド波装置の開発
(高出力、バッテリー化3時間以上、軽量化20kg以下)

簡便に操作可能なリングセンサーの開発(小型化、取付け時間短縮)

[成 果] ・送信電圧200V⇒300Vのハイパワー化を実現できた。

- ・バッテリー化でポータブルな装置を開発し、8時間以上の連続駆動が可能となった。
- ・重量については、本体は14～15kg。但し、高出力を優先したため、バッテリーは別ユニットで約25kgとなった。
- ・センサ小型化(40%容量減)と取付け時間短縮(30分以上⇒数分)を実現し、現場で簡便な操作が可能となった。
- ・高出力に対応したセンサーを開発し、設置性向上したことにより、センサー感度が2割アップした。
- ・センサーは、取り外しは簡易化し共有する仕様であり、配管径ごとに専用治具が必要となった。

(4) ソフトウェア開発

[目 標] 減衰係数による補正アルゴリズムを組み込み、減肉信号を色表示させた映像化ソフトウェアの開発

[成 果] ・基本探傷ソフトと短時間で映像化可能なソフトを開発した。

- ・減衰係数を反映し、補正出来る機能を付加している。

(5) 性能試験(モックアップ試験)

[目 標] ガイド波信号の有効性確認。長さ5mの埋設配管で減肉測定精度±20%

[成 果] ・既存ガイド波装置と比較し、開発装置は、2.9倍の出力アップを達成したことにより、強減衰下でも、基準となる管端信号が検出が可能であった。

- ・検出精度に関しては素管では目標を達成するも、埋設部に対しては減肉を検出には至らず、課題が残った。

(6) フィールド試験

[目 標] ガイド波信号の有効性確認(断面欠損率3%の検出)。長さ5mの埋設配管で、反対側の基準信号の検出が可能なこと。

[結 果] ・ハイパワー化した装置でフィールド試験を行い、これまで検出が難しかった強減衰下における評価基準信号(フランジ)について、明確に検出可能となった。但し、本研究の目標値埋設5mでの断面欠損率3%の検出については、検出には至らず課題が残った。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

公益財団法人 ひろしま産業振興機構
研究開発支援センター 参事 神田 敏和
電話：082-240-7712 FAX：082-504-7317

関西エックス線 株式会社 技術開発部 技師 永田 博幸
電話：082-291-2500 FAX：082-291-2515

第2章 本論

ガイド波は、配管表面に超音波を伝搬させる手法であり、減肉があった場合、送信波が減肉に反射してセンサーで受信、減肉を検出し位置を特定することが出来る技術である。

主な特徴として、長距離配管など広範囲の測定時に大きな効果を発揮し、配管のスクリーニング検査として最も注目されている検査手法である。しかしながら配管埋設部において、既存ガイド波技術では、埋設環境からの強い減衰により、定量的な評価が出来ていないのが現状である。主な課題は、ガイド波の信号が減衰しノイズレベルが高いことにより、減肉信号を判別出来ないことである。さらに、得られたデータはアナログ信号である為に、データを詳細に解析する必要がある。本研究では、これらの課題に対応したハイパワーガイド波装置を開発し、配管埋設部におけるスクリーニング技術の確立を目指すことが目的である。

本研究では、ガイド波が埋設配管の周囲環境から受ける影響を、模擬試験体を用いた試験とガイド波シミュレーションを活用した解析により、検証結果を分析した。さらに高出力で簡便なガイド波装置開発と、減衰係数を組み込んだソフトウェアの開発に取り組み、性能試験及びフィールド試験を実施し総合評価した。

2-1 埋設配管周囲の圧力とガイド波反射信号の相関把握

本テーマでは、石油化学会社から得られた実プラント情報をもとに一部を土中に埋設した模擬試験体を製作し、主に、現行機である日立製ガイド波装置(200V 出力)を用いて、モックアップ試験を計画し実施した。非埋設区間にガイド波リングセンサを設置し、配管を伝搬するガイド波が配管の周囲環境(配管周囲の土の圧力=荷重パラメータを Max2ton)から受ける影響(電圧=音圧変化)を、ガイド波の周波数などをパラメータとして測定した。この試験によって、圧力による減衰の度合いを明確にし、送信電圧のハイパワー化や減衰に強い低周波センサーの仕様決定やソフトウェア開発に展開することが主な目的である。

(1) 模擬試験体の概要

鉄製容器に埋設用土を入れ、その中に配管を貫通させる。また、1m相当の土圧が十分かかるよう上部に最大2,000kg程度のウエイトをのせられるようにした。(図2.1.1.1)
容器は2000×800×800mmの寸法で、配管は2000mmの長さで埋設を模擬している。埋設していない箇所ガイド波センサーを取り付ける仕組みとなっている。

また、配管にかかる荷重がわかるよう、配管表面にロードセルを取り付けた。

図2.1.1.2は、実際の写真で、埋設前を示し、図2.1.1.3は、埋設後(重り積載後)を示す。

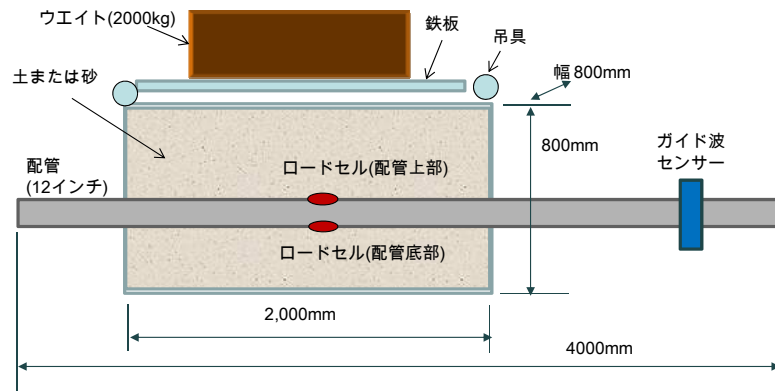


図2.1.1.1 モックアップ設備概念図



図2.1.1.2 埋設前の写真



図2.1.1.3 埋設後（重り積載後）の写真

図2.1.2.4は、素管の測定データを映像化したものである。このデータに対して、数種類の埋設環境を模擬した試験体で、試験を行った。図2.1.2.5は、減衰の影響が大きかった防食テープ+砂埋設の測定データを示す。

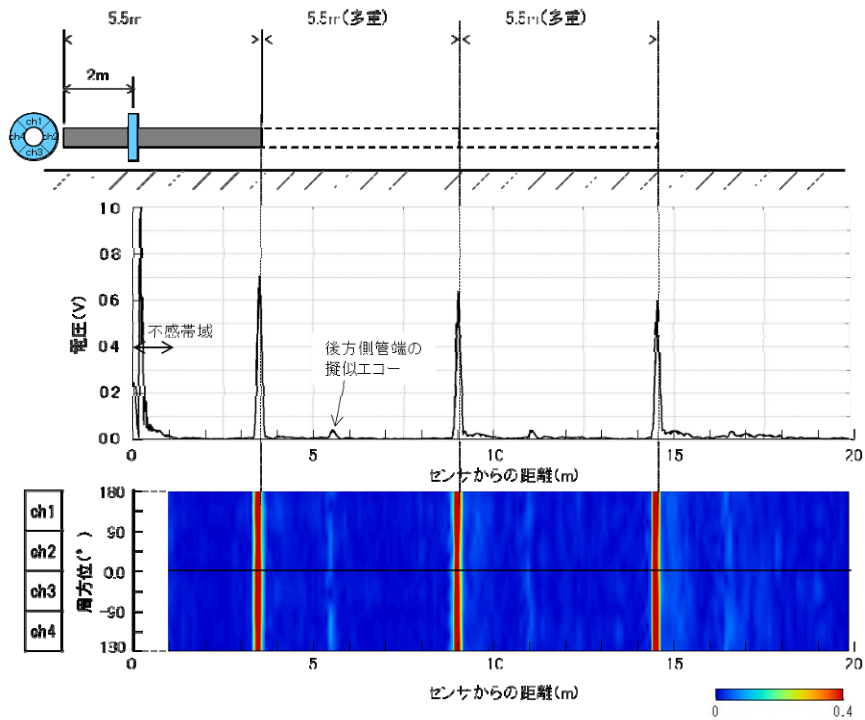


図 2.1.2.4 素管映像化データ (40kHz)

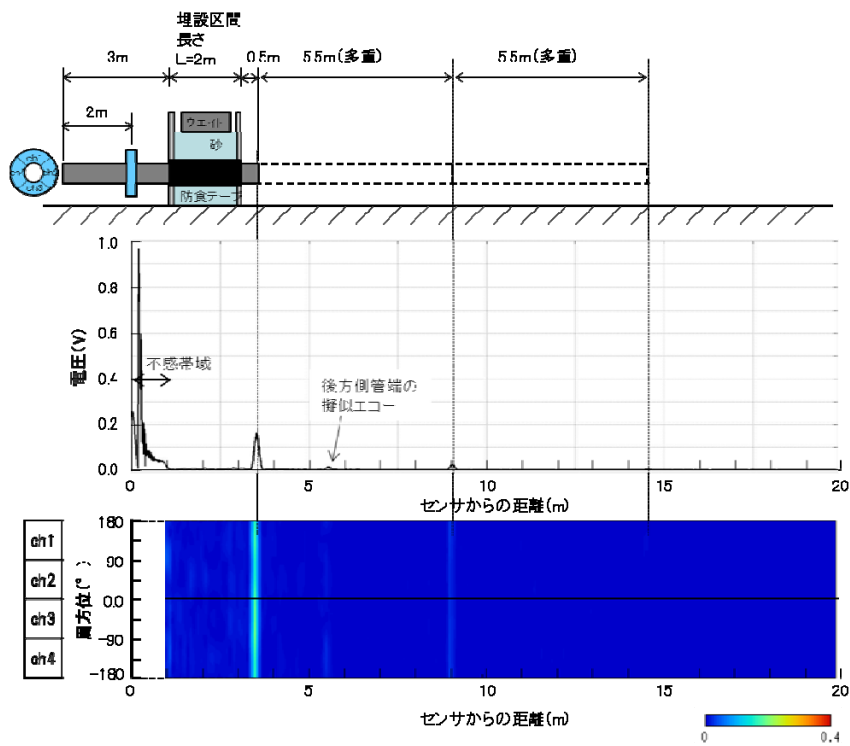


図 2.1.2.5 防食テープ+砂埋設映像化データ (40kHz)

横軸を送信周波数、縦軸を減衰係数にとり、土埋設、砂埋設、防食テープ単独に加え、防食テープ付で埋設した条件で測定結果を図 2.1.2.6 に示す。防食テープ以外は、周波数依存性は高いとはいえない。防食テープは低周波数の場合減衰係数が高く、35kHz 以上ではほぼ一定の値となっている。また、埋設単独と防食テープ単独での減衰係数の和が、防食テープ付埋設配管と同じ傾向が得られた。図 2.1.2.7 は、重りと減衰係数の関係を示す。重りを積載した後も、変化が少ない。すなわち、土圧による変化が少ないことを示す。

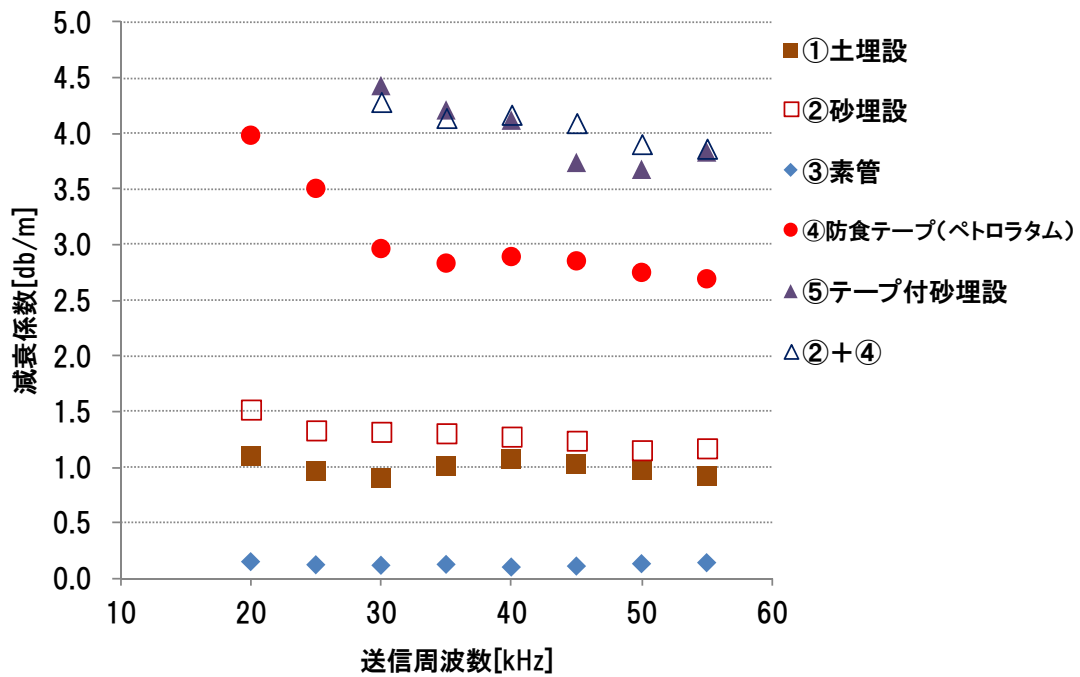


図 2.1.2.6 送信周波数と減衰係数の関係

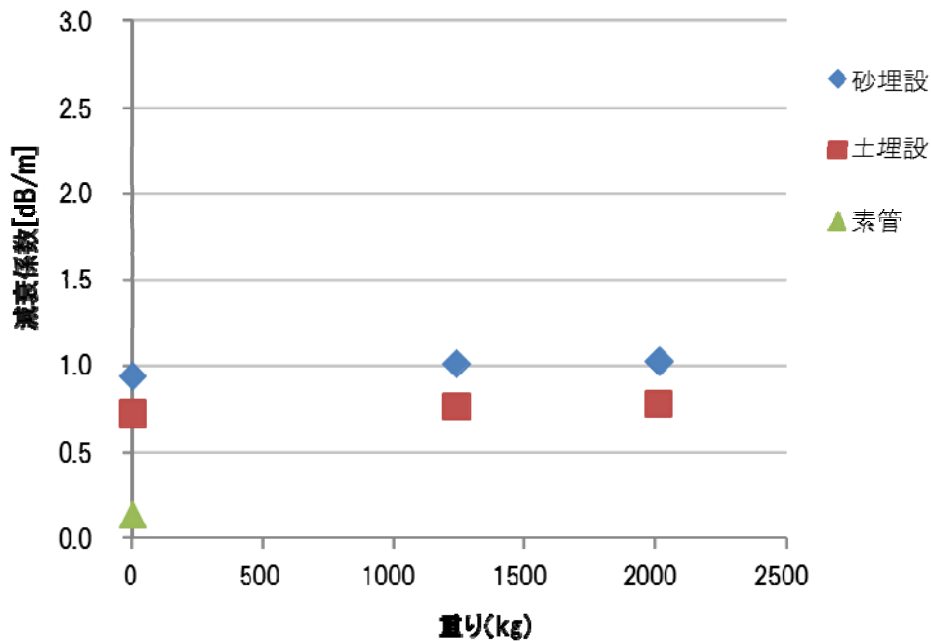


図 2.1.2.7 重りと減衰係数の関係

(2) まとめ

図 2. 1. 2. 6 にて得られた減衰係数について 40kHz の値を代表にとり、横軸をセンサからの距離、縦軸を相対的な反射信号の振幅大きさとして対数プロットした結果を図 2. 1. 2. 8 に示す。実線が 100%の反射信号（すなわち管端の反射信号相当）である。目標値に設定している 3%相当の反射信号は点線で示している。また、距離に依存せず一定の値をしめしている赤い実線は、既存ガイド波装置の固有の電気ノイズレベルである。安全側をみて電気ノイズレベルから 6dB アップ（振幅値でいう 2 倍相当）した点線の値を有意な電気ノイズレベルと定義し、この値と交わるときの距離を検出可能範囲とする。

最も実配管に近い条件である⑤の防食テープ付埋設配管を例にとると、⑤の 3%相当である緑色の点線と、有意な電気ノイズレベルとの交点は、約 4.8m となる。

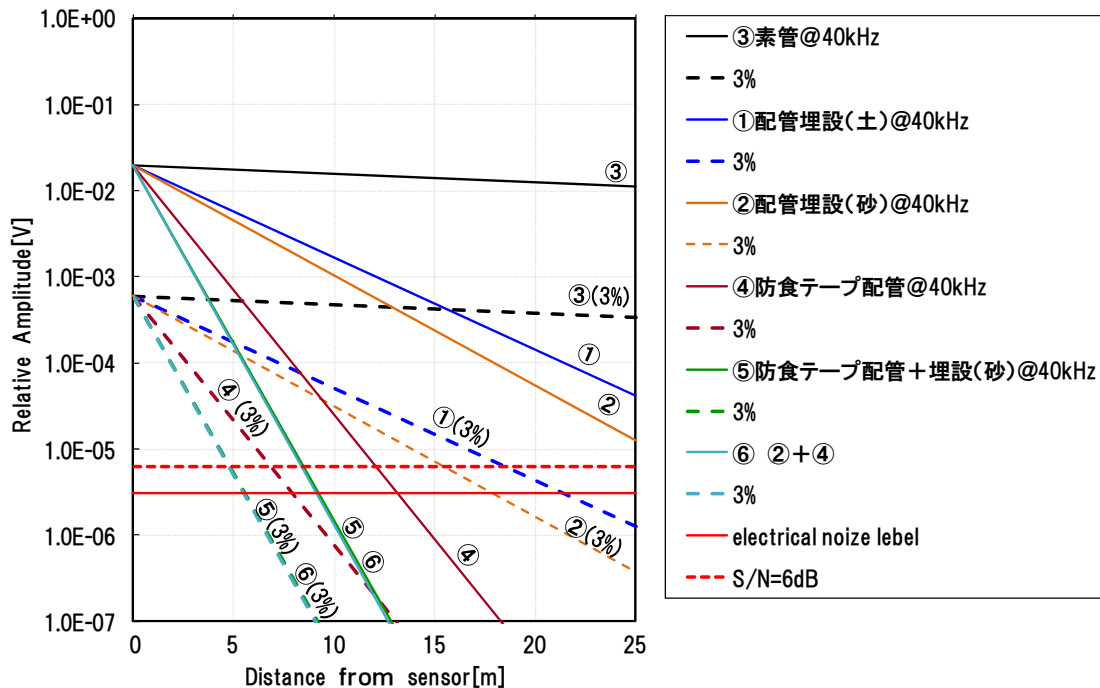


図 2. 1. 2. 8 検出可能範囲

本テーマで得られた結果では、防食テープ+砂埋設(周波数 40kHz)では、減衰係数 4.17dB/m であった。1 年後、同条件で減衰変化量を測定し、得られた結果では、減衰に変化が見られた。

結果より、減衰の要因が防食テープによるものか、埋設の影響が半別し難い内容であった。そこで、減衰に影響した要因を明確にする為に、防食テープのみの経年変化試験も行った。測定結果より、施工後一定の期間は減衰が変化することが分かった。

2-2 ガイド波伝搬シミュレーション

(1) はじめに

種々の埋設条件におけるガイド波信号の減衰や波形の歪み等を補正する上で、減衰や歪みの発生原因やその影響を的確に見積もることは重要である。本節では、前述のモックアップ試験等による分析を踏まえ、数値シミュレーション解析による理論的な面から検討し、後述するソフトウェア開発の減衰係数補正アルゴリズム検討に資するデータを得る。具体的には、埋設部のモデルの開発と埋設を模擬する境界条件を検討する。

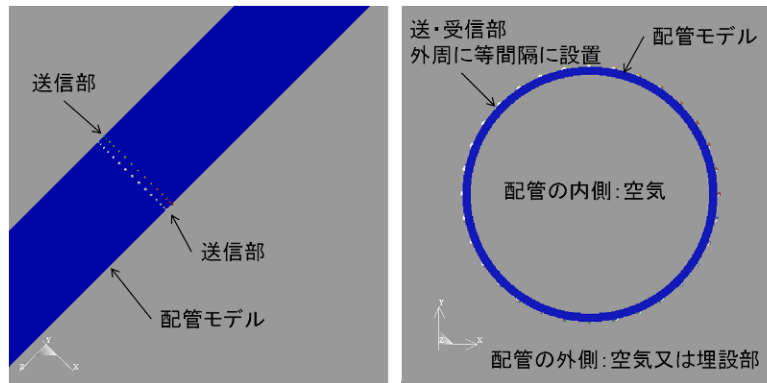
埋設部のモデル開発では、埋設の土の種類や土圧等の埋設条件を変えたモックアップ試験結果や、埋設部境界へ垂直入射した超音波の反射強度の計測結果を基に、埋設部へ超音波が伝搬（透過）す

る物理モデルを構築した。また、300A の大口徑配管においてねじりモードガイド波が発生する様子をシミュレーション解析で確認した。

(2) シミュレーション解析の概要

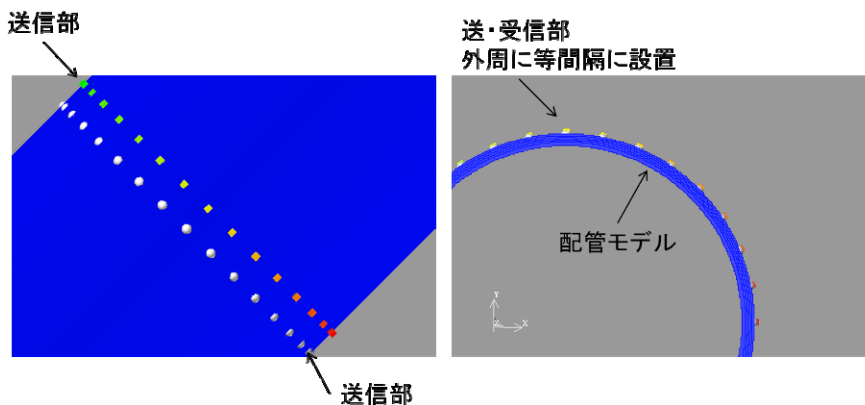
本節で用いたガイド波のシミュレーション解析法は、複雑な境界条件設定に対応できる有限要素法(FEM)である。FEM を用いたガイド波の解析では、数メートル以上の長距離を伝搬するガイド波の検査対象領域を計算機のメモリ空間内に設定する必要があるため大規模の計算となる。この課題に対しては、大規模解析に対応した市販の超音波解析ソフトウェア（伊藤忠テクノソリューションズ社製 ComWAVE）と並列計算機で対応した。ガイド波の送信及び受信モデルは、実際の計測を模擬するように構築した。図 2. 2. 1 に送信部及び受信部のモデルを示す。実際の計測と同様に、配管外面に等間隔で 32 個の送信部を設置し、各送信部には図 2. 2. 2 に示す波形に基づき強制的に同位相で円周方向の変位を与えた。受信部は、実際の受信センサの配置に対応した位置の要素の変位を時系列に取得し、各々の円周方向の変位を合成して受信波形とした。

解析で設定した音速と密度は、各々縦波 5.9 km/s、横波 3.23 km/s 及び $7.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ である。埋設部に設定した物性値や条件は各々結果の項に記す。



(a) 配管モデルと送受信部のモデル

図 2. 2. 1 ガイド波シミュレーション解析の解析モデル



(b) 送受信部モデルの拡大図

図 2. 2. 1 ガイド波シミュレーション解析の解析モデル

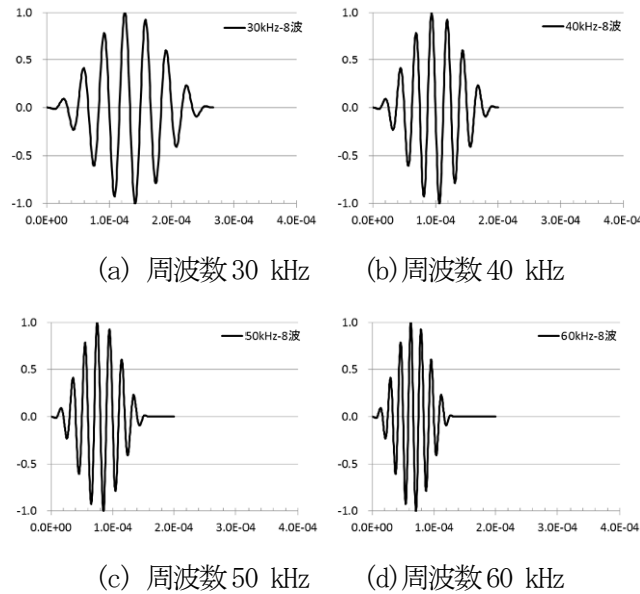
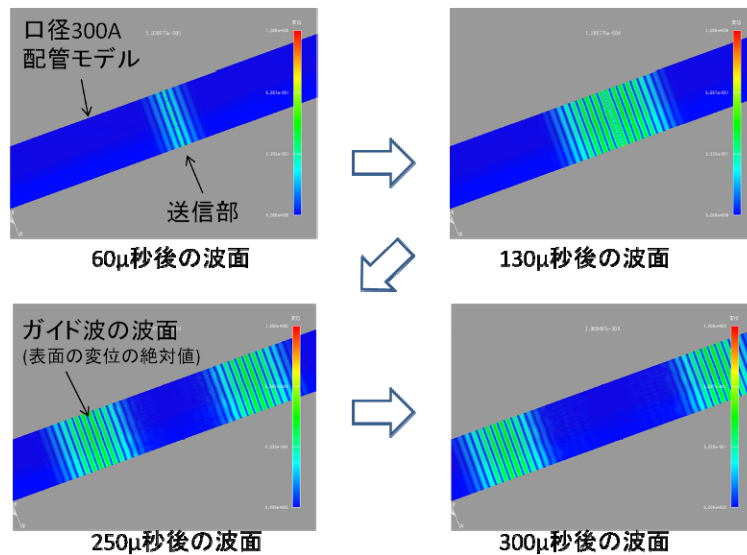


図 2.2.2 シミュレーション解析で設定した送信波形

(3) 結果

図 2.2.3 は、中心周波数 40 kHz において口径 300A の配管でガイド波が発生する状況をシミュレーション解析で可視化した結果である。配管の解析モデルは口径 300A × 肉厚 10.3mm (外径 318.5mm、内径 297.9mm、肉厚 10.3mm)、長さ 5、500mm の直管とし、管端から 2、000mm の位置を中心に送受信部を設定して解析した。これらの図は配管外表面の変位の絶対値のスナップショットであり、各々送信後 $60\mu\text{s}$ 、 $130\mu\text{s}$ 、 $250\mu\text{s}$ 、 $300\mu\text{s}$ のガイド波の波面である。ともに、32 個の送信部で配管外表面に与えた強制変位が管外表面で一様な縞状になり伝搬する様子が確認できる。送信部近傍では均一な波面になっていないもの、概ね 100mm 程度以降では均一な波面になる。周波数 50kHz 及び 60kHz でも同様であった。

次に、埋設部のモデル化について検討した。埋設部におけるガイド波の減衰を考慮すると、次に示す二種類のモデルを考えることができる。一つは埋設部が配管外表面を拘束してガイド波が伝搬し難くなり減衰するモデル、もう一つは配管外表面から埋設部へガイド波が伝搬することで配管を伝搬するガイド波が減衰するモデルである。図 2.2.4 に示す様な配管外表面に埋設部を模擬した領域を設け、上記二種類の境界条件を設定して解析した。図中の赤色の部分が埋設部のモデルであり、拘束の条件は埋設部の領域の要素を動かさない設定とし、埋設部へ伝搬する条件は埋設部に設定する物性値を表 2.2.1 の様に調整して仮想的な媒質を設定した。



周波数 40 kHz の送信

図 2.2.3 300A 配管におけるガイド波の発生状況のシミュレーション解析結果

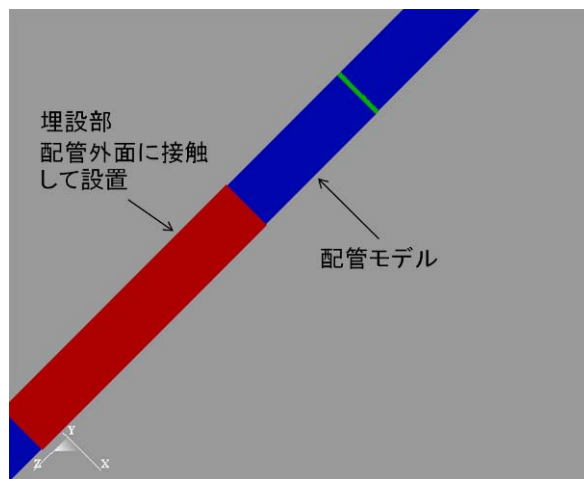


図 2.2.4 埋設部モデルの検討に用いた解析モデル概要

表 2.2.1 埋設部モデルに設定した境界条件

境界条件	仕様
拘束	埋設部の要素の変位を全解析時間中拘束
伝搬	音速と密度を調整した仮想的な媒質 ・縦波音速 2 km/s、横波音速 1km/s、密度 $3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

図 2.2.5 は拘束させたモデルでの解析結果である。この結果では、ガイド波が埋設部へほとんど伝わらず、埋設部の入口（境界）でほぼ反射する解析結果となった。すなわち、埋設部によりガイド波は大きく減衰されることになる。この解析結果は、モックアップ試験結果ならびに垂直 UT の結果と比較し、次の 3 点が異なっている。1 点目は、モックアップ試験では埋設によりガイド波の減衰は生じるもの、端部からの反射波が得られないほどの減衰ではない。2 点目はモックアップ試

験で埋設部の入口（境界）付近から大きな反射波は得られていない。3点目は直接解析結果から得られたものではないが、拘束モデルであれば垂直 UT において反射波の減衰はほとんど無いと考えられるが、実際の垂直 UT では反射波の減衰が確認されている。すなわち、今回対象とする土、砂及び防食テープによるガイド波の減衰は拘束モデルでは説明ができない。それに対して、図 2.2.6 は配管外面に接する埋設部へガイド波が伝搬するモデルでの解析結果である。この結果では、ガイド波が埋設部へ伝わり、埋設部で強度が低下すなわち減衰する様子が確認できる。また埋設部の入口（境界）での反射波ほとんど確認できない。この解析結果は、定性的ではあるが次に示す3点がモックアップ試験等の結果と同様な傾向を示す。1点目は、埋設を通過することでガイド波が減衰することである。2点目は埋設部の入口（境界）でほとんど反射しないこと。3点目は、このモデルでは垂直 UT で反射波が減衰すると考えられることである。今後、設定する境界条件の最適化が必要であるが、埋設部へガイド波が伝搬することでガイド波の減衰をモデル化する方法により、土、砂及び防食テープの減衰を再現できる見通しが得られた。

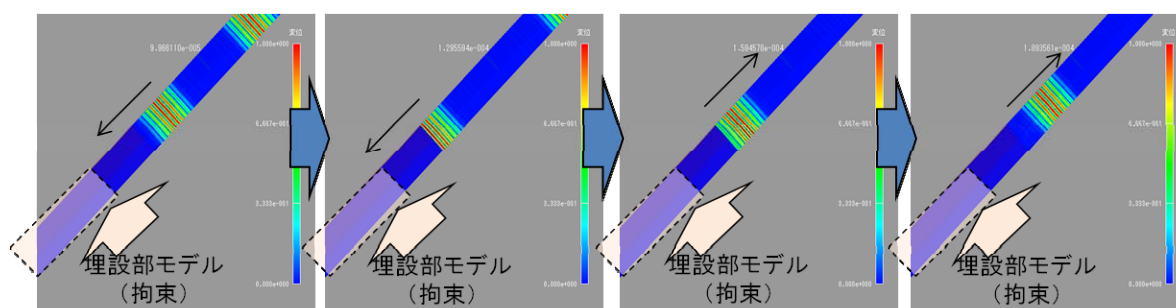


図 2.2.5 埋設部の変位を拘束させる設定としたモデルにおける解析結果（ガイド波の伝搬状況）

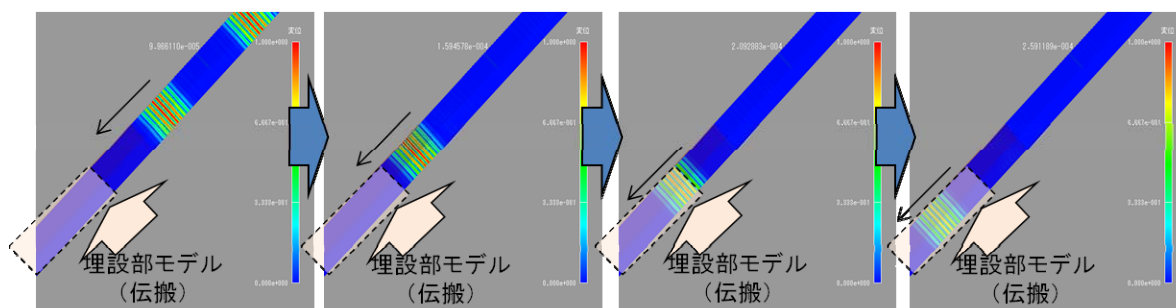


図 2.2.6 埋設部へガイド波が伝搬するように設定したモデルにおける解析結果（ガイド波の伝搬状況）

続いて、埋設部が土、砂あるいは防食テープといった条件の違い、さらに土圧の違いを考慮するモデルの検討に着手した。このモデルは境界条件として設定する埋設部の物性値（音速及び密度、すなわち音響インピーダンス）を変える方法と、埋設部と配管外面の接触状況を変える方法の二種類を検討している。図 2.2.7 は音響インピーダンスを変え、埋設部を通過後にガイド波の強度が低下する度合いをシミュレーション解析で求めた結果であり、縦軸はガイド波の通過率を、横軸は鋼材の音響インピーダンスに対する比率である。音響インピーダンスの設定は、物質の存在の有無に関わらず設定した。音響インピーダンスの比が 8.4×10^6 の物質は空気であり、この場合の減衰はほとんど無い。一方、比が 1.0 の鋼材では大部分が埋設部へガイド波が通過し通過率は 0 となる。

図 2.2.8 は、配管の縦断面（軸方向の断面）においてガイド波が伝搬する状況をシミュレーション解析した例である。配管外面に励起されたガイド波が板厚全体を伝搬の様子が確認でき、埋設部へ到達すると部分的に配置した接触部を通じて埋設部へガイド波が伝搬の様子が確認できる。

それに伴い、配管中のガイド波の強度が低下、すなわち減衰する様子が確認できる。今後、埋設の条件等に応じて適切な部分接触部の配置や埋設部の物性値を検討する。

次年度は、モックアップ試験の結果等を踏まえて、埋設の状況に応じた設定値や配管外面と埋設部の接触状況についても検討した。図 2.2.9 に示すような配管外面と埋設部が部分的に接触する詳細なモデルを作成し、検証を行った。

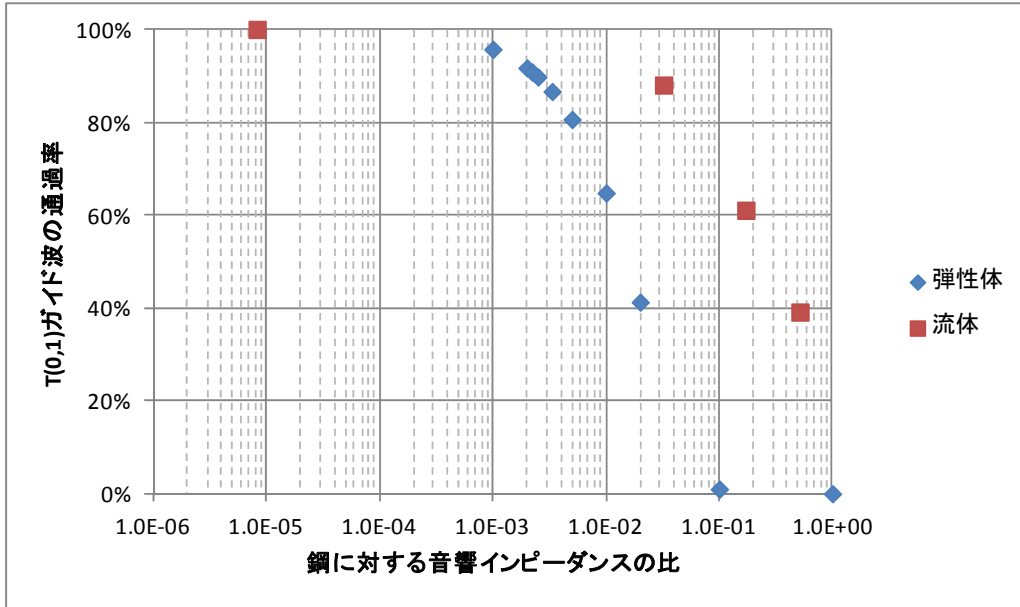


図 2.2.7 埋設部に設定する境界条件の検討状況（埋設部の物性値変化に対するガイド波の透過率変化から適正条件を検討）

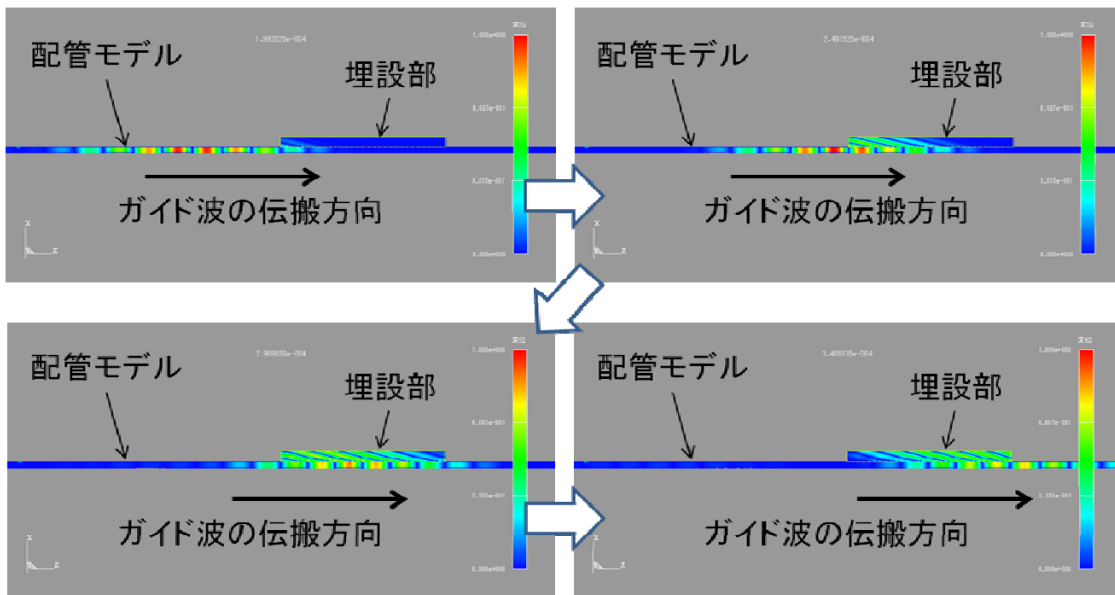
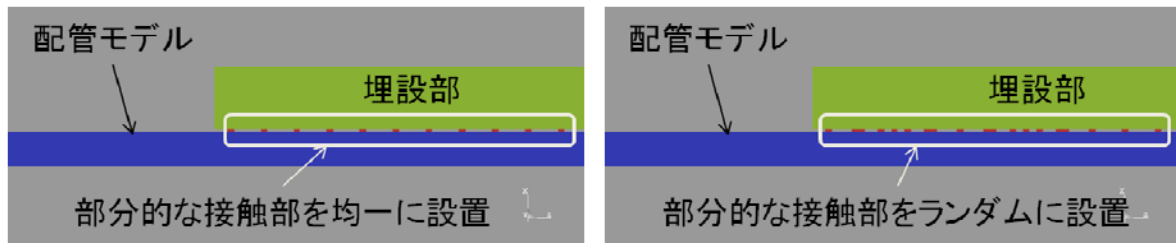


図 2.2.8 埋設部と配管外面が部分接触したモデルにおける解析結果の例



(a) 均一配置のモデルの例

(b) ランダム配置のモデルの例

図 2.2.9 配管外面と埋設部の接触状況のモデルの例

(4) まとめ

埋設部における減衰のモデルを、モックアップ試験の結果及び垂直 UT における反射波の減衰等を踏まえて検討した結果、配管の外面に接した埋設部へガイド波が伝搬することで減衰が生じるものと推定され、その現象に基づくモデルを構築した。今後、埋設の状況・条件に応じた境界条件の設定の適正化を行い、シミュレーション解析によりモックアップ試験結果の検証や探傷試験結果の予測、そして探傷可否の判断基準等への活用を図るとともに、減衰補正アルゴリズムの検討に資するデータを得るものとする。

ただし、次年度に実施したモックアップ試験等の結果における防食テープ施工後や埋設施工後の経年変化により減衰係数が変化する現象については、間隔(i)の増加によるものではないかと推測されるが本検討の結果だけでは解明することは困難であった。モックアップ試験結果やフィールド試験結果では、埋設部に対するガイド波適用において新たな知見が得られた。この現象は、初年度検討した「拘束」による減衰の影響も可能性として考えられるが、今後の詳細な分析調査が課題となる。

2-3 ハードウェア開発

本テーマでは、送信電圧のハイパワー化を目的としたガイド波装置及びリングセンサーを製作し開発したガイド波装置及びリングセンサーの個別評価と総合評価を行った。

(1) ガイド波装置の仕様

埋設部でも減衰し難い高出力のガイド波装置であり、目標とする長さ 5m の埋設配管で配管断面積比 3% 減肉検出を可能とし、検査現場で簡便な装置であることを目標とした。

以下に仕様決定時の主な目標を示す。

- (a) 回路見直しによる送信電圧 200V⇒300V のハイパワー化
- (b) 送受信チャンネル数の増加 (16ch⇒24ch)
- (c) 小型/軽量化→1人から2人で持ち運べるサイズとし、総重量 20kg 以下
- (d) バッテリー化→測定時は電源供給をバッテリー (リチウムイオン) とし、1日3時間以上計測可能

図 2.3.1 は、ガイド波装置のブロック図を示す。

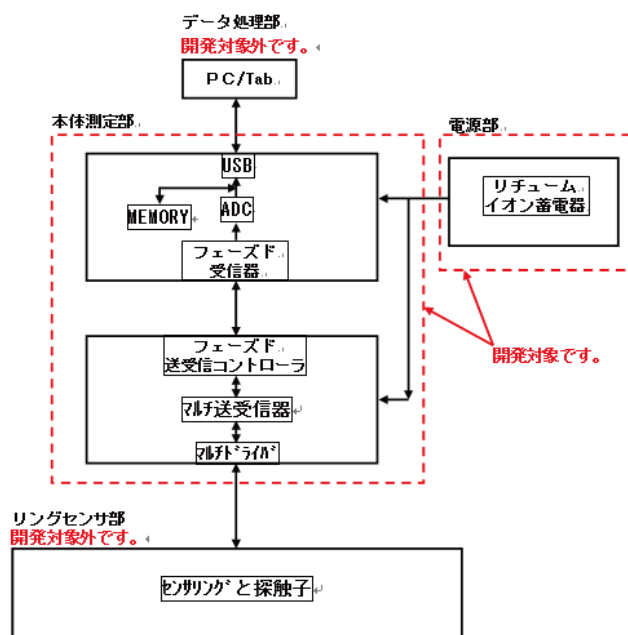


図 2.3.1 ガイド波装置ブロック図

図 2.3.2 は、製作したガイド波装置の本体測定部とバッテリー部を示す。



図 2.3.2 製作したガイド波装置の写真

(2) リングセンサーの仕様

検査現場で簡便な装置であることを前提に、目標とする検出性能（埋設部 5 m 先の断面積比 3% 減肉）を満足することを目指し、装置仕様を決定した。簡便な装置とは、リングセンサーの取付け及びキャリブレーションまで、トータル 30 分未満になることを目標とした。

以下に仕様決定時の主な目標を示す。

- (a) 減衰に強いセンサー
- (b) 探触子内配線構造見直しによる装置容積 40% 減
- (c) 配管口径 → 12B (φ318.5) 配管以下の大きさに対応できる構造

(c) の配管口径への対応については、最終仕様では配管径ごとに測定治具プレートを用意し、センサーを取り外して共有する仕様とした。その為、センサー取り外しを簡易的に行える構造となっている。

図 2.3.3 は、開発したリングセンサーの写真を示す。

設計では、配管への設置性とセンサーの押し付けを均一にする為に、試行錯誤を重ねた。ベースとなる既存ガイド波装置との大きな違いは、エア注入によるセンサーの押し付け機構を採用した点である。既存ガイド波では、各々のセンサーをセンサー上部より、ネジ機構で押し付け調整しており、セッティング及びキャリブレーションに時間を有する機構であった。エアを用いた機構では、エア注入することで短時間にセッティングが可能になる。しかしながら、開発当初は押し付け力の低下、すなわちセンサー感度の低下が懸念され、改良を重ねた結果、最終仕様決定まで時間を要してしまった。

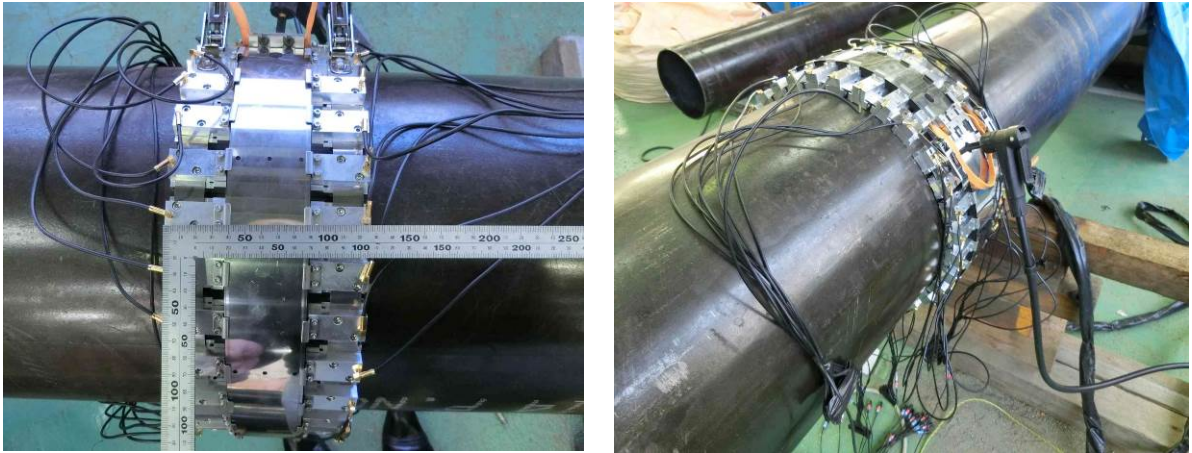


図 2.3.3 開発したリングセンサー

(3) 開発したリングセンサー及びガイド波装置の基礎性能評価

ここでは、製作されたガイド波用リング型センサの基礎的な評価結果を示す。センサはシステム全体のなかで最も重要なパーツであり、最も直接的に性能の向上に寄与するものである。センサの性能は、主にセンサの取り扱いの容易さとガイド波の励起性能に大別されるが、ここでは後者の性能評価を行った。具体的には、ガイド波を励起するセンサ振動面の振幅速度と振幅値を入力電圧値の関数として評価した。入力電圧の増加に伴って、概ね線形に振幅値が上昇することが確認出来たことを示す。また、同センサにより励起したガイド波の振幅値も入力電圧の関数として評価した。励起されたガイド波の振幅値は、ガイド波センサ単体の振動値だけに依存するものではなく、リングセンサとして構成される複数センサの締め付け状態の均一性にも依存する。すなわちガイド波の振幅値は、新リングセンサとしての評価も兼ねることになる。新リングセンサは、旧リングセンサに比べ2割程度性能が向上していることが確認されたことを示す。振動速度の計測には、レーザードップラー干渉計を用いた。

センサ振動面の振幅評価

センサ振動面の振動速度は、センサ振動面に再帰反射テープを貼付け、レーザードップラー振動計を 42° で入射させて計測した。実験配置図を図 2.3.4 に、写真を図 2.3.5 に示す。センサへの入力電圧は、50 V から 50 V ステップで 300V まで 6 通りとし、周波数は、30、40、50、60 kHz の 4 通りとした。図 2.3.6(a) から (d) に周波数別の受信波形を示した。縦軸はレーザードップラー干渉計 (グラフテック LV1710) からの出力値 ($\times 0.01 \text{ m/s/V}$) である。すべての周波数で、電圧の上昇に伴う振幅値の上昇が確認出来る。図 2.3.7 に入力電圧に対する表面変位速度を示した。周波数による差異は見られるが、電圧上昇に伴い表面振動速度の上昇が確認出来た。図 2.3.8 に、入力電圧に対する表面振幅値を示す。表面速度 v_0 と表面振幅値 u の関係は eq. 2.3.1 で結ばれる。

$$u = \int_0^{\frac{T}{4}} v_0 \sin \frac{2\pi}{T} t dt = \frac{v_0}{2\pi f} \quad \text{eq. (2.3.1)}$$

センサに用いている振動子は、電圧に対して概ね線形に変位し、周波数依存性は無い。得られた結果は周波数依存性が無く、振動子の特性を反映している。また振幅値は入力電圧の増加に伴って上昇することが確認出来た。

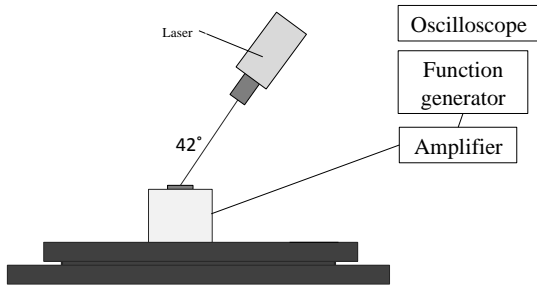


図 2.3.4 センサ面振幅計測配置図



図 2.3.5 センサ面振幅計測写真

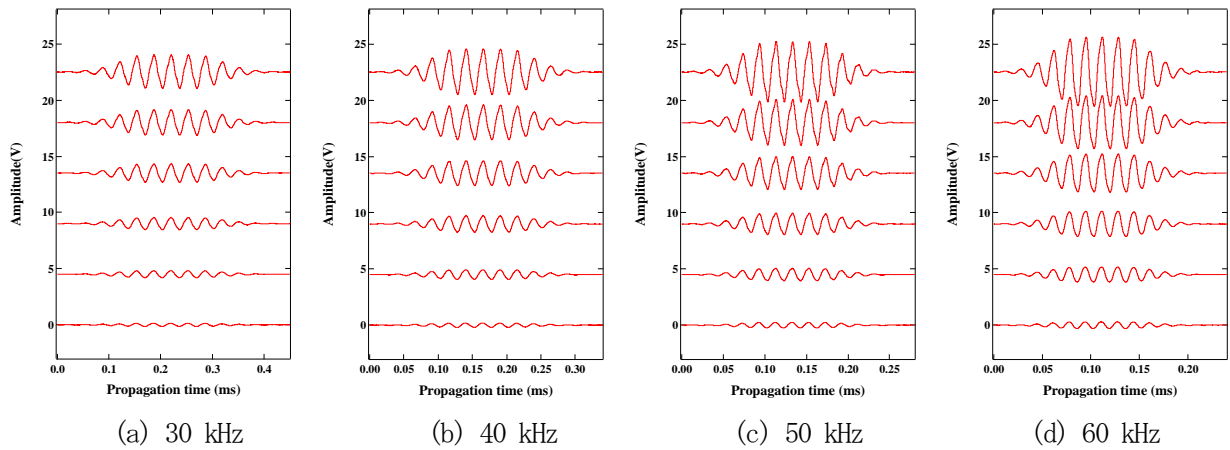


図 2.3.6 周波数別表面変位検出波形

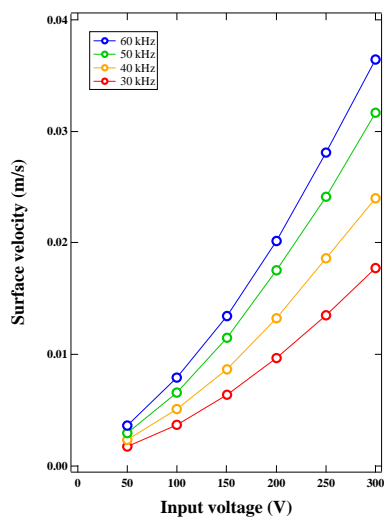


図 2.3.7 入力電圧に対する表面変位速度

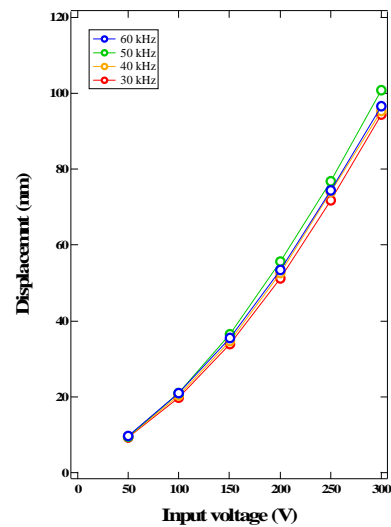


図 2.3.8 入力電圧に対する表面変位

ガイド波振幅の評価

上記のセンサを新リングと旧リングに設置して T(0, 1) モードガイド波を励起し、その振幅値をレーザードップラー干渉計で計測した。実験配置図と実験の写真を図 2.3.9 と図 2.3.10 に示した。配管には STPG 300A schedule 40 鋼管を用い、入力電圧 100、200、300 V、サイクル数 7、周波数 20、24、28、36、43、48、54、64、72 kHz とした。

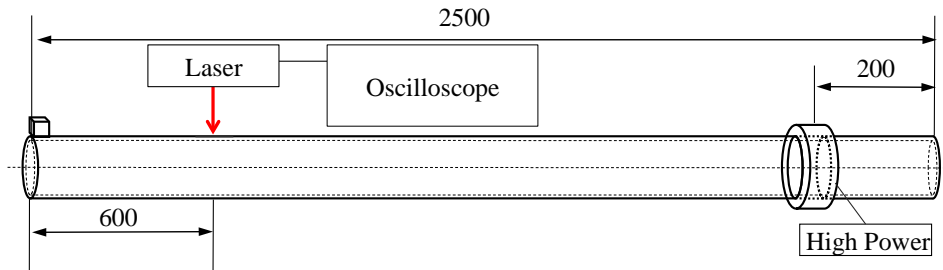


図 2.3.9 ガイド波表面変位計測実験配置図



図 2.3.10 ガイド波表面変位計測実験写真

図 2.3.11 に表面変位速度を周波数の関数として示した。図には入力電圧の違いと新旧リングの違いを示した。電圧の上昇に伴い表面変位速度が上昇することが確認出来る。また、新リングでは、旧リングに比べ表面変位速度が2割程度大きいことが確認出来る。これは、新リングで、締め付けの均一性が向上したことが原因であると推定している。図 2.3.12 には表面変位を示したが、ここでもその傾向は同じである。300 ボルト化による高振幅化で、高減衰環境にある埋設配管対応が本研究の主テーマであるが、今回製作した新リングの締め付け均一性の向上により、従来の目的以上の高性能化が実現出来たと言える。

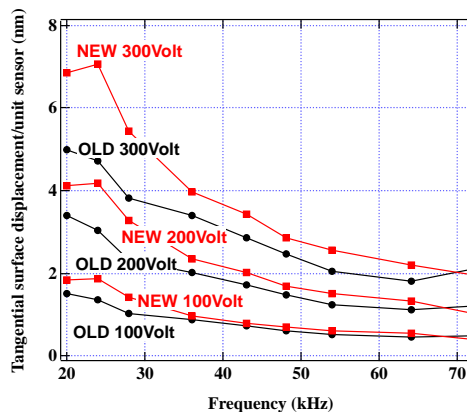
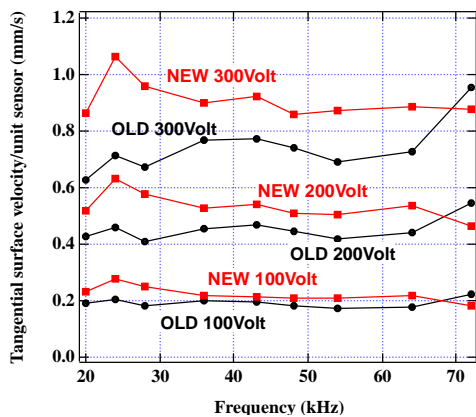


図 2.3.11 新旧センサリング別ガイド波変位速度

図 2.3.12 新旧センサリング別ガイド波変位

300V 出力の評価と新しく作成したセンサリングの評価をはじめに行った。センサ単体に 50V から 300V まで印加し、センサ振動面の振動速度と振動変位をレーザードップラー干渉計により計測評価した所、電圧増加に対し、概ね線形に速度と変位が上昇することを確認した。次に新センサリングと旧センサリングでガイド波を励起し、レーザードップラー干渉計でその振動速度と振動変位を測定した。その結果、新リングでは、旧リングに比べ振動速度と振動変位が 2 割程度増加していることがすべての印加電圧で確認できた。これは、新リングの締付けの均一性の向上が原因と見られる。望外の良い結果であった。新リングでは、脱着性の向上に加え、センサ感度が 2 割程度向上したことになる。

(4) まとめ

開発したリングセンサー及びガイド波装置は、電圧増加のハイパワー化に加え、リングセンサーの設置性向上に伴う効率向上も確認され、十分な機能を有していることが証明された。目標値をほぼ満足する装置を開発することが出来た。

2-4 ソフトウェア開発

本節では、計測ソフト及び解析ソフトの基本設計と製作を実施した。減衰係数による補正アルゴリズムの組み込みと配管条件を加味した評価結果を得られるシステムの構築を目指し、各々の仕様を設計及び製作した。

(1) ソフトウェアの仕様

計測ソフトは、ベースとなる既存ガイド波装置の機能を元に、S/N 比向上を目的とした波形解析機能を追加した。解析ソフトでは、測定より得られたデータを元に必要なパラメータを入力し、伝搬シミュレータで映像化を行うシステムを構築した。映像化した画像は、センサからの距離を横軸とし、周方位 θ を縦軸とする反射振幅分布展開図の表示とした。(図 2.4.1)

以下に仕様決定時の主な目標を示す。

- (a) 減衰係数の補正による評価精度向上
- (b) 配管軸方向に加え配管周方向の減肉信号分布を表示
- (c) 反射波の大きさに応じて色分け表示
- (d) ユーザビリティの向上

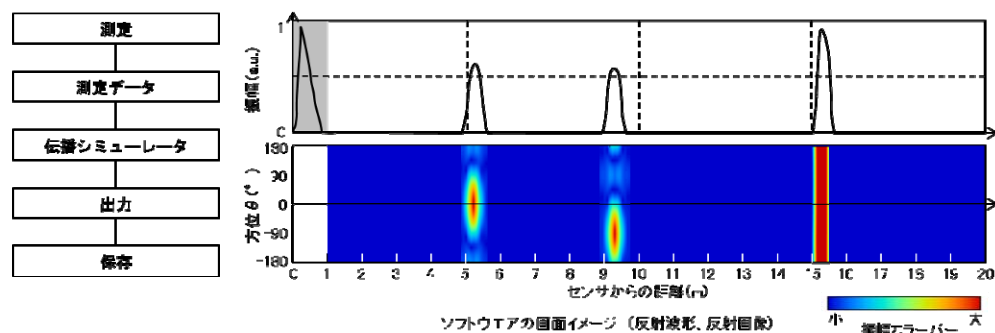


図 2.4.1 ソフトウェアの仕様

(2) 製作したソフトウェアの性能

(a) 解析ソフト 図 2.4.2 は開発した解析ソフトを示す。測定したデータを読み込み、必要なパラメータを入力し映像化を行う。減衰に関する情報の入力が必要だが、減衰補正により振幅の強さを調整する機能も有している。映像化ではデータ読み込み後、数分で表示、解析することが可能であった。

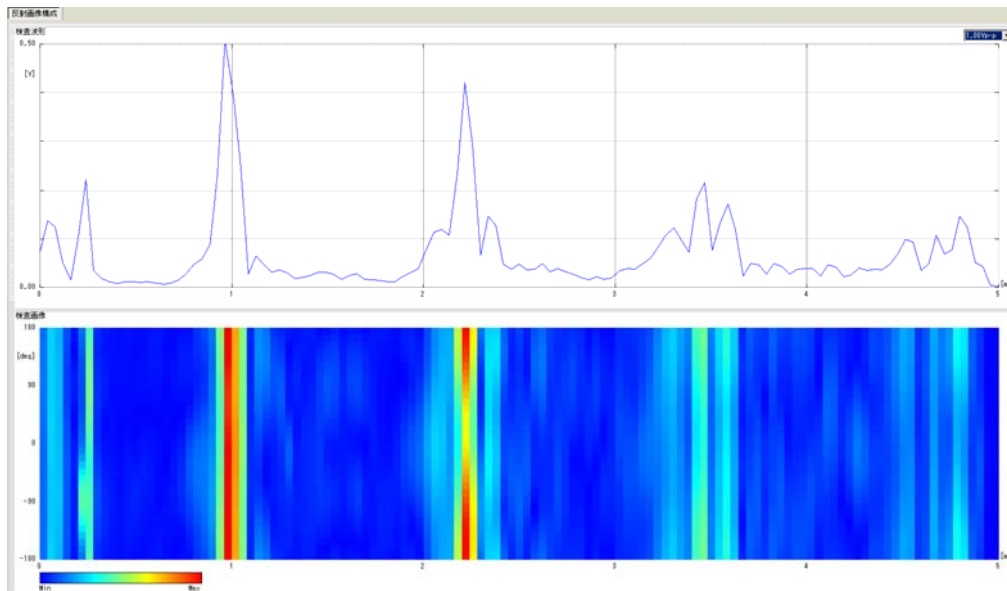


図 2.4.2 解析ソフト (映像化)

(3) まとめ

ソフトウェア開発では、映像化及び減衰補正機能の開発が主なテーマである。探傷ソフトと解析ソフトの開発により、測定、映像化、補正機能など、基本的なデータ取得まで組み込むことが出来た。事業化に向けては、構築した機能を活かすために、性能試験やフィールド試験を複数回行い、多くの情報を元に最適な条件を求める必要がある。高度化については波形解析処理を行うことで、S/N 比向上に効果があることも検証できた。今後、リアルタイムに解析できるよう機能を追加する。

2-5 性能試験

(1) はじめに

本節では、開発したガイド波装置を総合評価することを目的とし、埋設模擬試験体を用いた試験を実施した。埋設模擬試験体を用いた検証は、フィールド試験を行う為に重要な過程であり、装置の性能及び結果の評価まで行うことが目標となる。

試験は、①素管試験体を用いた基本性能試験 ②埋設模擬試験体を用いた性能試験 ③測定精度に関する試験 ④断面欠損率に関する試験の 4 つの内容を実施した。

(2) 基本性能試験

装置の基本性能評価として、既存ガイド波装置(200V)と開発したガイド波装置(300V)を比較した。試験概要は、信号レベルの比較によりハイパワー化の評価を行うものである。図 2.5.1 は試験の状況写真である。各々のリングセンサーを 300A 配管に設置して、配管端部から得られる信号を比較する。ガイド波は、反射波を収録し評価する手法であり、配管端部は反射率 100%を示す。配管端部より 1.5m の位置にセンサーを取り付け、センサーより手前側の配管端面に向かって測定する。



図 2.5.1 基本性能試験状況写真 (端部信号レベル比較)

既存ガイド波装置と開発したガイド波装置では、2.9 倍の信号レベルの向上であった。2.9 倍の内訳は、ガイド波送信出力を 300V にしたことによる約 1.5 倍の効果と開発したリングセンサーにより、配管に対する設置性が向上した結果であると推測される。開発したリングセンサーは、フレキシブルな機構による追従性の向上、エア機構採用による押しつけ力の向上により、性能アップに繋がった。

(3) 埋設模擬試験体を用いた性能試験

ガイド波で定量的な評価をする場合、評価の基準となる反射源が必要となる。埋設配管の検査では、埋設環境によりガイド波が減衰する。その為、埋設範囲を超えた地点で、基準となる信号が如何に検出できるかが、最初のステップとなる。ここでは埋設模擬試験体（強減衰仕様）を使用し、埋設を超えた先の管端信号(100%)の検出性能を確認することを目的に、試験を実施した。

既存ガイド波装置(200V)による測定では、評価の基準となる管端信号は明確には検出されていないのに対し、開発したガイド波装置(300V)では、明確な信号をとらえている。

(4) 測定精度に関する試験

開発したガイド波装置(300V)の減肉測定精度を確認する為に、磁石を活用した性能試験を行った。磁石はガイド波測定では反射源となり、磁石の個数を増やすにつれて反射信号が高くなる。配管端面の信号は、断面反射率 100%であり、磁石の反射源との比により、検出信号レベル(断面欠損率)を算出する。この手法では減肉の形状に影響されない為、定量的な評価が可能である。

本試験の最終目標は、5m の埋設配管で減肉測定精度 $\pm 20\%$ である。しかし、強減衰下での試験は反射源となる磁石の検出が出来ていない為、現時点で測定可能な素管を用いた試験とした。ここでは、磁石(模擬減肉)の数と信号レベルの関係が $\pm 20\%$ 以内であるか、性能試験を行った。

測定結果より、いずれの測定値においても誤差範囲内であり、仮想減肉に対して検出精度を有していることが分かった。

但し、本試験については、減衰が測定精度に影響を及ぼす可能性が有る為、強減衰下で再度試験を行う必要がある。

(5) 断面欠損率に関する試験

開発したガイド波装置(300V)を用い、埋設部における検出性能を測定する試験を行った。断面欠損率は、配管の減肉が無い場合を断面積100%と考え、減肉が存在する場合は3%、5%など減肉の断面積の大きさにより変化した値である。目標は、この断面欠損率3%減肉を5mの埋設配管で検出することであり、この性能を確認する為に埋設模擬試験体による試験を行った。試験概要は、2mの埋設模擬試験体(強減衰仕様)の片側に開発したリングセンサーを設置し、もう片側に磁石(模擬減肉)を設置し実施した。測定結果では映像化まで行い、色での識別が可能か判断した。

得られた結果では、アナログ波形及び映像化した画像のいずれでも、磁石の検出を判別することは出来なかった。磁石を増やし再度検証を行ったが、磁石による反射源を確認することは困難であった。検出出来ていない要因は、何らかのノイズが発生していると推測される。

(6) まとめ

開発した装置の性能は満足する結果が得られたが、埋設環境からの影響を解明できていないことにより、現時点では埋設部への適用が困難である。ノイズ源の特定については、今後継続して解明に取り組む。

主な内容については、以下に示す。

- ・既存ガイド波装置と比較し、開発装置は2.9倍の出力アップが実証された。
- ・強減衰下(強減衰仕様)においては、基準となる管端信号レベルが明確に検出されるようになった。
- ・検出精度については、素管においては性能確認出来たが、埋設部に対しては減肉検出には至らず課題が残った。

2-6 フィールド試験

(1) はじめに

フィールド試験では、装置の性能及び実用性を検証することを目的に試験を行った。当初の計画では、①試作機製作段階 ②開発装置製作完了後のフィールド試験を予定していたが、装置の製作の遅延とフィールド時期の調整が出来なかったこともあり、既存ガイド波装置(200V)で試験を行うこととした。その為、掘削後に解体した試験体を既存ガイド波装置(200V)で再試験を行い、その結果と開発したガイド波装置(300V)の結果を比較し、考察することとした。

(2) 試験結果

既存ガイド波装置(200V)による概略図2.6.1に示す。防油堤(二重堤)の仕様は、コンクリートが入り口側と出口側に施工されており、埋設内部は砂埋設である。配管サイズは150A(SGP5.0mm)であり、防食テープ(ペトロラタム、ジュート)を巻いた仕様となっている。測定では、タンク側にリングセンサーを設置し、試験を行った。

測定結果は、映像化まで行い評価したが、評価の基準となる防油堤を超えたフランジ信号が明確には検出出来なかった為、評価までは至らなかった。比較的短い配管であったが、フランジ信号は検出出来なかった。理由として、防食テープによる減衰及び配管の板厚が薄いことが減衰に影響しているのではないかと考察した。この結果を元に、モックアップ試験及びシミュレーションによる解析で、防食テープと板厚に対する評価を追加試験として実施した。

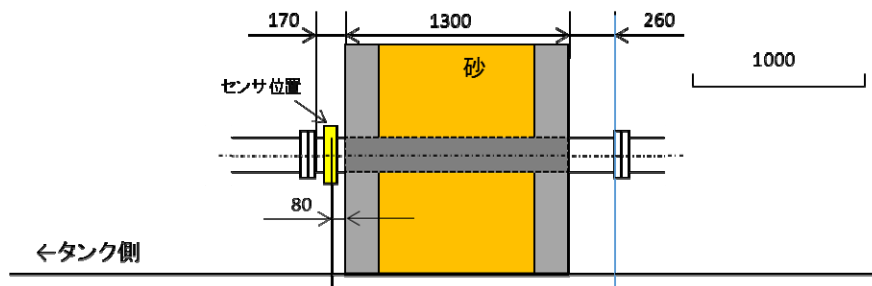


図 2.6.1 既存ガイド波装置による概略図 (掘削前)

次に、掘削した試験体を既存ガイド波装置(200V)を用い、同条件で再試験を行った。図 2.6.2 は、掘削後の概略図を示す。フィールド試験では、フランジ信号はほぼ検出出来ていなかったが、掘削後はやや識別できる結果であった。再試験を行った結果では、掘削前の結果の方が、若干減衰が大きい結果であったが、比較的近い試験結果であり、掘削後も有効な試験体と言える。

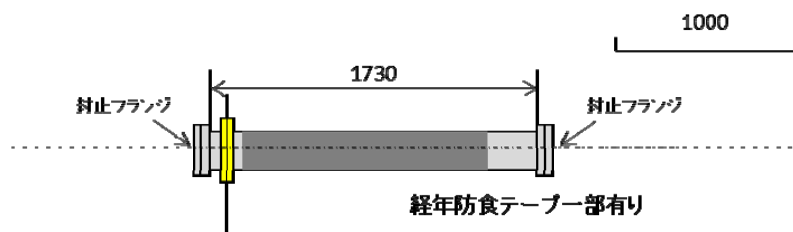


図 2.6.2 既存ガイド波装置による再試験概略図 (掘削後)

図 2.6.3 は、開発したガイド波装置(300V)にて、掘削後試験体を測定した概略図である。既存ガイド波 200V から開発した装置 300V に出力アップしたことから、配管フランジ信号は明確に検出している。これにより、フランジ信号を反射率 100%と考へ、評価に対する基準信号を得ることが出来た。

しかし、磁石を設置した場合でも、磁石からの反射信号を識別することが出来なかった。これは 2-5. 性能試験の結果と同様で、ノイズ等の影響により、識別が困難である。

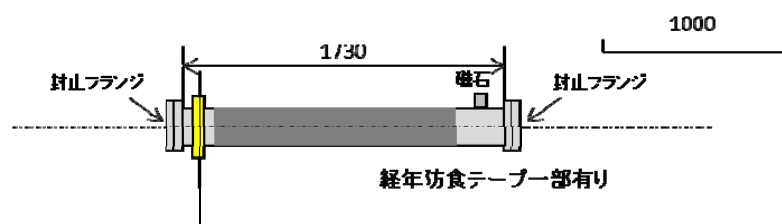


図 2.6.3 開発したガイド波装置による試験概略図 (掘削後)

(3) まとめ

フィールド試験より、得られた成果を以下に記す。

- ・評価の基準となるフランジ信号については、明確な信号を得ることが出来た。
- ・本研究の目標値 5m の埋設配管で、断面欠損率 3%の検出については、検出には至らず課題が残った。

3-1 全体総括

(1) 研究成果まとめ及び2年総括

全体を振り返ると、ものづくりはほぼ満足できるものが開発できたが、当初想定していた以上に、埋設部の減衰が大きいことが判明した。その為、目標としていた5mの埋設配管で断面欠損率3%の検出を達成することが出来なかった。

しかしながら、高性能のハイパワーガイド波を開発したことにより、従来では全く検出出来ていなかった信号を、明確にとらえるようになった。これにより解析できる可能性が大幅に広がり、これまで蓄積した知見を実証出来る段階になったことは、十分な成果である。

課題解決に向けての補完研究は、減衰の影響についての分析と装置を高度化（さらに出力アップ）する2つのケースがある。まずは、開発した装置を元にフィールド試験を実施し、課題解決を行うために必要な条件を算出する。また、追加資金が必要な場合や時間を要するケースが考えられるため、技術的な目標に目途がついた時点で、再度計画を練り直す予定である。

(2) 事業化に向けた取り組み

事業化を進めるにあたり、これまでの結果を元に、今後の取り組みについて以下に示す。当初目標であった埋設部への適用については、現段階では評価できるレベルではない為、課題解決に取り組む。

開発したガイド波装置の性能は、難しい課題に取り組む過程で、世界トップレベルのガイド波装置となった。その為、埋設部への研究開発を進めることと並行し、まずは地上配管への適用で事業化を進めることとする。

埋設配管

- ・現段階では、埋設部適用時の課題を解決できておらず、早急に課題の解決に取り組む。これまでの技術目標は5m埋設部へ適用であったが、現状では早期の達成は難しいため、当面の目標を埋設部2mとし検証を進め、最終的に5m埋設部への適用を達成させる。

- ・想定される市場は以下となる。

当初目標 ⇒ 国内のプラント埋設部総数：40,000箇所 ⇒ 9,200箇所(30年以上の設備総数の23%)

(a)埋設部2m以下 ⇒ 6,300箇所(全体の2/3と想定：石油化学プラントの割合を反映)

地上配管

- ・事業化に向けて、まずは定量的な評価が可能であるか、段階的に検証を行う。広範囲を一度に測定可能なスクリーニング技術を目指し、事業化をすすめる。

(a) 模擬減肉を付与した試験体での検出性能の確認

(b) ガイド波伝搬距離の計測を目的としたフィールド試験(30m以上の長距離配管)

(c) 減肉検出性能を目的としたフィールド試験(他の検査手法との比較)

- ・想定される市場は以下となる。

(a) 国内70主要プラントの地上配管

(b) 海外の石油化学プラントの天然ガスパイプラインなど

(c) 社会インフラの配管設備

保温配管

- ・石油化学プラントにて、既存ガイド波装置による検証試験を実施した。約20m先で、評価基準となるフランジ信号や溶接線信号を検出することが出来た。

- ・事業化に向けて、まずは定量的な評価が可能であるか、段階的に検証を行う。
 - (a) 模擬減肉を付与した試験体での検出性能の確認
 - (b) 減肉検出性能を目的としたフィールド試験（目視記録との比較）
- ・想定される市場は以下となる。
 - (a) 国内70主要プラントの保温配管
 - (b) 海外の石油化学プラントの保温配管

PR活動

事業化を進める上で、下記に示す内容でPR活動を行う。

- ・プラント設備メンテナンスに関する展示会への出展、ものづくりに関する展示会への出展を行う。
 - (2016年7月：「メンテナンスレジリエンス TOKYO2016」)
 - (2016年9月：「JIMA 総合検査機器展 2016」)
- ・ハイパワーガイド波技術を広めるべく、技術交流会等で発表を行う。