弾性波を用いた深部埋設管の探査および可視化技術の開発

Development of Seismic-Based Detection and Visualization Techniques for Deeply Buried Pipelines

程塚　保行*[1]
YASUYUKI HODOTSUKA

都市部で地下工事を行う際には，深部埋設管の位置と深度の把握が不可欠であるが，調査には多大な労力を要する。本報では，弾性波を用いた深部埋設管の効率的な探査手法を開発することを目的として，弾性波を用いた埋設管探査手法について検討した。その結果，埋設管の敷設方向にチャープ方式で起振・受振する測定方法が有効な測定条件であることを確認した。また，状態空間モデルを用いた高分解能データ処理手法，ならびに埋設管からの散乱波を抽出して可視化する手法を検討した。さらに，フィールド実験および数値シミュレーションにより，これらの手法の有効性を確認した。

キーワード：地下インフラ，埋設管，反射法地震探査，数値シミュレーション

Accurate identification of the locations and burial depths of deeply buried pipelines is essential for urban underground construction. However, conventional investigations are often time-consuming and labor-intensive. This study investigates an efficient seismic exploration method using elastic waves for detecting deeply buried pipelines. The results showed that a chirp-based survey configuration, in which excitation and receivers are arranged along the pipeline direction, is effective for pipeline detection. In addition, a high-resolution processing method based on a state-space model and a technique for visualizing scattered waves from buried pipelines were examined. The effectiveness of the proposed method was confirmed through field experiments and numerical simulations.

Keywords: Underground infrastructure, Buried pipe, Seismic reflection survey, Numerical simulation

1. はじめに

水道管，下水管，ガス管，電力・通信ケーブルなどの地下インフラは，社会基盤として重要な役割を担っている。一方，不正確な埋設情報は，地下工事における事故や経済的損失の要因となる [1]。また，下水道の老朽化により大規模な道路の陥没を招けば，長期間に及ぶ幹線道路の通行止めにもつながり，住民生活や流通への影響は計り知れないものになる [2]。そのため，埋設管の位置や深度を非破壊で把握する探査技術が求められている。

埋設管探査には地中レーダ探査が広く利用されており，高精度な位置推定が可能である [3]。しかし，地下水位の高い地域や深度 2 m を超える埋設管では電磁波の減衰が大きく，適用が困難である。このため，深部埋設管の調査にはボーリング掘削などが必要となり，多大な労力を要している。

著者らはこれまでに，反射法弾性波探査と信号処理・画像処理を組み合わせることで埋設管位置を推定できることを確認した [4),5]。しかし，測定データの鮮明化と埋設管位置の可視化が課題として残されていた。そこで本報では，深度 2 m を超える埋設管探査手法の開発を目的として，適切な測定手法と状態空間モデルを用いた高分解能なデコンボリューション処理手法，ならびに sIP 変換法による埋設管位置の可視化手法を開発した [6]。さらに，フィールド実験および数値シミュレーションにより，開発手法の有効性を検証した。

*[1] 技術研究所技術開発推進部

2. 埋設管探査に適した測定条件の検証

従来の反射法弾性波探査と弾性波を用いた埋設管探査技術の測定概念を**図-1** に示す。従来技術が地層境界からの鏡面反射波を対象とするのに対し，埋設管探査技術では埋設管からの散乱反射波を測定する必要がある。そのため,埋設管の敷設方向に対する最適な起振･受振方向を把握することを目的として 2 次元探査実験を実施した。

実験レイアウトを**図-2** に，検討した起振・受振条件を**表-1** に示す。関東ローム層を深度 3 m まで掘削し，埋設管中心深度が 1.5 m および 2.5 m となるように埋設した実験場を整備した。測線は内径 0.5 m のヒューム管中央部直上を横断する方向に配置した。受振点は 0.1 m 間隔で 81 点，起振点は測線から X 方向に 0.5 m オフセットした位置に配置した。起振には周波数変調可能な可搬型バイブレータを用い，チャープ，ランダム，ステップの 3 方式を適用した。受振には 3 成分（X，Y，Z）速度計を用い，複数受振点を同時測定した。

3 種類の起振方式で取得した受振データには，相互相関処理を適用した。2 次元探査実験結果を**図-3** に示す。埋設管からの散乱反射波は，埋設管位置を頂点とする双曲線状の波群として観測された。起振・受振方向ごとの結果を比較すると，いずれの起振方式においても，X 方向の起振－受振配置で双曲線状の連続した波群が最も明瞭に確認された。そのピーク位置は 2 本の埋設管の水平位置と対応しており，埋設管からの散乱反射波であることが分かる。Andre(2019)ら [7]は，土質地盤では S 波振幅が卓越し，測線直交方向の水平起振－水平受振によって最も強い反射波が得られることを示している。本実験でも同様の傾向が確認され，埋設管探査においても水平起振－水平受振による S 波反射法弾性波探査が有効であることが確認された。起振方式を比較すると，ランダム方式は散乱反射波の振幅が小さく，ステップ方式は直接波の振幅および波長が大きいため散乱反射波と一部重なった。一方，チャープ方式では埋設管からの散乱反射波が最も明瞭に観測された。以上より，埋設管の敷設方向に対するチャープ方式の水平起振－水平受振配置が，有効な測定条件であるといえる。

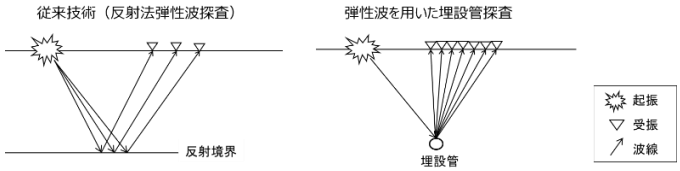


図-1　測定概念

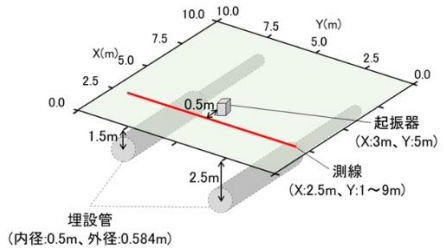


図-2　実験レイアウト

表-1　起振・受振条件

起振	起振方法	チャープ（周波数連続変調）方式
		ランダム方式
		ステップ（周波数ステップ変調）方式
	起振周波数	20～400Hz
受振	受振器	速度計
	受振方法	多チャンネル測線形式，3 成分

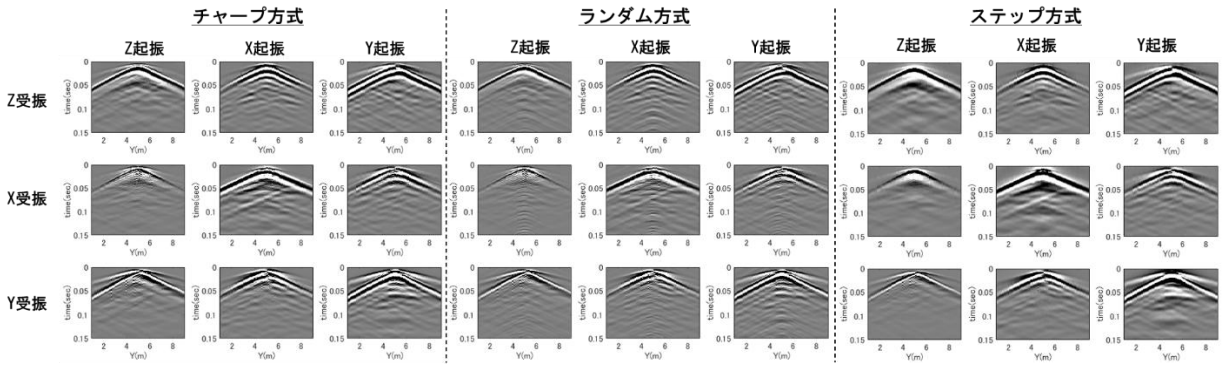


図-3　2 次元探査実験結果

3. 状態空間モデル法による反射波の鮮明化処理

反射法弾性波探査のデータ処理は，分解能の高い鮮明な地下構造をより忠実に表現する反射係数系列を推定することを目的として行う。探査で観測される反射波 $x(t)$ は，起振波形 $w(t)$ と反射係数系列 $e(t)$ のコンボリューション（合成積，$*$）で表される。

$$x(t) = w(t) * e(t) \tag{1}$$

デコンボリューションフィルタは，起振波形の逆フィルタ $w^{-1}(t)$ を求めることで，観測波形を反射係数系列あるいはインパルス状の波形へ変換し，高分解能な地下構造イメージを得るために適用される。

$$e(t) = x(t) * w^{-1}(t) \tag{2}$$

しかし，実際の探査では，起振器と地盤の相互作用により入力波形が変化するため，真の起振波形を正確に把握することが難しく，その逆フィルタを求めることも容易ではない。そこで，状態空間モデルによる反射係数の推定を検討した。状態空間モデルは，状態方程式および観測方程式として式(3)および式(4)で表される。

$$x(n+1) = Ax(n) + Bu(n) \tag{3}$$

$$y(n) = Cx(n) + Du(n) \tag{4}$$

ここで，$x(n)$ は状態変数，$u(n)$ は入力値，$y(n)$ は観測値を表し，A, B, C, D は状態空間行列である。Crump(1974)[8] および Deng et al.(2016)ら[9]は，状態変数を反射係数，観測行列を起振波形としたカルマンフィルタを設計し，反射法弾性波探査データに対するデコンボリューションフィルタとして適用する手法を提案している。しかし，この手法は打撃式振源を対象としているため，本報で用いるチャープ方式振源には適用できない。そこで本報では，入力値 $u(n)$ をチャープ振源の起振波形，観測値 $y(n)$ を速度計で測定された波形，状態変数 $x(n)$ を反射係数とする状態空間モデルを構築するカルマンフィルタをデコンボリューションフィルタとして適用した。

状態空間モデル法によるデコンボリューションフィルタの埋設管探査データへの適用性を検証するため，三次元差分法[10]による数値シミュレーションを実施した。数値モデルの物性値を**表-2** に示す。数値シミュレーションには，実験場を模擬した**図-4** の数値モデルを用いた。モデル寸法は X 方向 10 m，Y 方向 10 m，Z 方向 20 m とし，深度 3 m 以浅を掘削領域，それ以深を関東ロームの物性値に設定した。モデル側面および底面には吸収境界条件を適用し，グリッド間隔は 0.04 m とした。入力波形には，20～400 Hz のチャープ信号を用いた。また，第 2 章の 2 次元探査実験との比較を可能とするため，起振点および受振点は実験と同一配置とした。

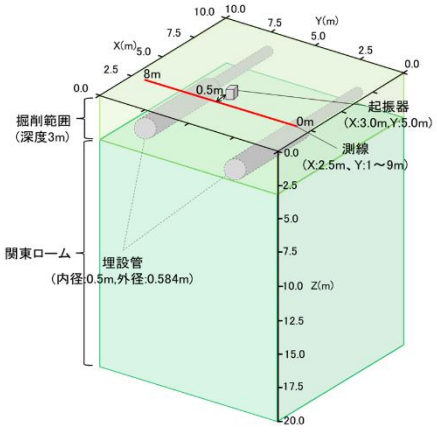


図-4　数値モデル

表-2　数値モデルの物性値

	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)	密度 (t/m³)
掘削範囲	300	90	1.1
関東ローム	470	130	1.4
ヒューム管	3800	2400	2.4

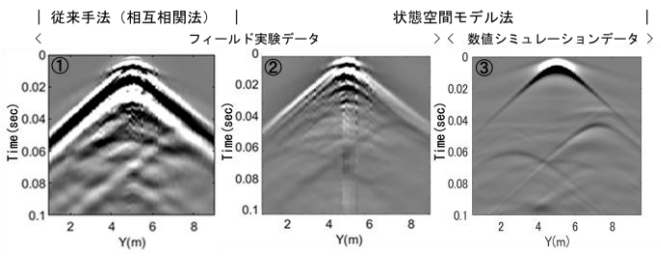


図-5　状態空間モデル法の適用結果

第 2 章に示した 2 次元探査実験データおよび数値シミュレーションデータに対し，状態空間モデル法を適用した結果を**図-5** に示す。状態空間モデル法を適用した実験データ（**図-5②**）および数値シミュレーションデータ（**図-5③**）では，従来手法である相互相関法（**図-5①**）と比較して，埋設管からの散乱反射波がより明瞭に抽出されていることが確認できる。また，抽出された散乱反射波は短波長の特徴を示している。このことから，状態空間モデル法により反射係数が適切に推定され，高分解能なデコンボリューション処理が実現されていることが示唆される。

4. sIP 変換法による埋設管位置の可視化処理

反射法弾性波探査の可視化手法として，マイグレーション処理が広く用いられている。キルヒホッフマイグレーション [11]は，反射面を多数の点回折波源の集合として扱い，各回折波源から生じる双曲線状の反射波を積算してその頂点へマッピングすることで反射点をイメージする手法である。**図-5②**の状態空間モデル法による実験データに対してキルヒホッフマイグレーションを適用した結果を**図-6** に示す。**図-6** では埋設管および掘削底面がイメージされているが，その他の反射イベントも多数含まれており，埋設管の判読には反射イメージに関する専門的な知識が必要となる。このことから，埋設管をより容易かつ明瞭に抽出できる，弾性波探査に適した可視化手法について検討した。

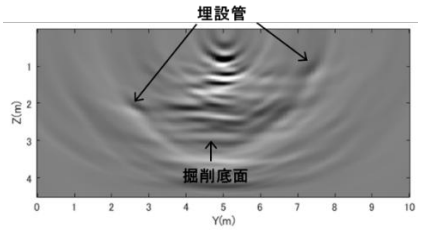


図-6　キルヒホッフマイグレーション結果

sIP 変換法の概念図を**図-7** に示す。sIP 変換法は，ラドン変換の一種で，受振点で観測される波形データ $g(x,t)$を幾何学的な領域(ξ,ζ)に変換することにより，地下の埋設管などの散乱体で散乱反射する波をその領域に積算させ，その積算された $\Gamma(\xi,\rho)$ のピークを散乱点として抽出し，散乱体の位置をマッピングする方法である。sIP 変換法は，式(5)および式(6)を用いて求められ，走時 t_r を式(7)で定義し，sIP 変換には式(8)で示される走時 $t_r sip$ を用いる。v は弾性波速度，ρ は sIP 点から起振点までの直線距離，ξ は sIP 領域の水平座標，ζ は sIP 領域の鉛直座標を示す。

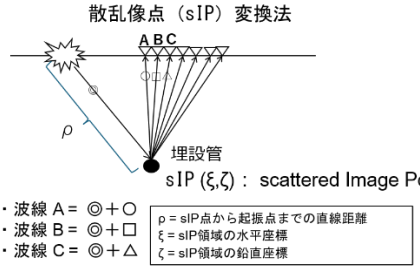


図-7　sIP 変換法の概念図

$$\Gamma(\xi,\rho)=\int g(x,t=t_r(\rho,\xi;x))dx \tag{5}$$

$$\rho=\sqrt{\zeta^2+\xi^2} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} t_r &= \frac{\rho}{v}+\frac{\sqrt{\zeta^2+(\xi-x)^2}}{v} \\ &= \frac{\sqrt{\zeta^2+\xi^2}}{v}+\frac{\sqrt{\zeta^2+(\xi-x)^2}}{v} \\ &= \frac{\sqrt{2\rho^2+x^2-2x\xi}}{v} \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} t_r sip &= t_r-\frac{\rho}{v} \\ &= \frac{\sqrt{2\rho^2+x^2-2x\xi}}{v}-\frac{\rho}{v} \\ &= \frac{\sqrt{2\zeta^2+2\xi^2+x^2-2x\xi-\zeta^2-\xi^2}}{v} \\ &= \frac{\sqrt{\rho^2+x^2-2x\xi}}{v} \end{aligned} \tag{8}$$

sIP 変換法では，起振点（S）から埋設管などの散乱体（sIP）までの走時（S-sIP 走時）が全受振点で共通であることに着目する。そこで，起振点（S）から散乱体（sIP）で散乱反射し，各受振点（R）へ到達する散乱反射波の走時（S-sIP-R 走時）から，S-sIP 走時を差し引いた走時（sIP-R 走時）を用いて sIP 変換を行う。この変換により，散乱反射波を sIP 点へ収束・重合することが可能となる。その結果，sIP 点における散乱反射波の振幅が増大し，ピークの検出が容易となる。さらに，検出した sIP 点に対して逆 sIP 変換を適用することで，散乱体である埋設管の位置を特定することができる。

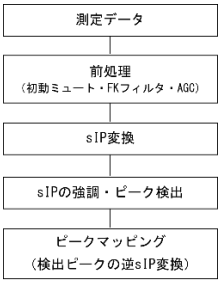


図-8　データ処理フロー

(1) 2 次元探査実験データへの sIP 変換法の適用

第 2 章で示した 2 次元探査実験データおよび第 3 章で示した数値シミュレーションデータに対して，**図-8** に示す処理フローに従い sIP 変換法を適用した。まず，前処理として初動をミュートして直接波を抑制し，FK フィルタにより表面波および受振器の共振ノイズを低減した。さらに，AGC を適用して振幅減衰を補正した。次に，sIP 変換を適用し，感度係数に基づく局所的な閾値処理により sIP を強調した。その後，sIP のプロミネンス（突出度）を算出し，閾値を設定してピークを検出した。最後に，逆 sIP 変換によってピークをマッピングし，埋設管位置を推定した。

図-9 に sIP 変換法の適用結果およびその処理過程を示す。状態空間モデル法によって明瞭化された埋設管からの双曲線状の散乱反射波群は，前処理および sIP 変換によって sIP 領域に収束・重合され，強調された sIP 点として検出された。その後，検出された sIP 点は埋設管外径位置へマッピングされていることが確認できる。なお，2 次元探査実験データでは起振点直下にもピークが検出された。これは，実験場造成時に混入したコンクリートガラが深度約 1 m 付近の散乱体として検出されたためと考えられる。また，埋設管外径位置にマッピングされたピークは，埋設管中心と起振点を結ぶ方向上に分布しており，この位置で弾性波が散乱反射したことを示している。

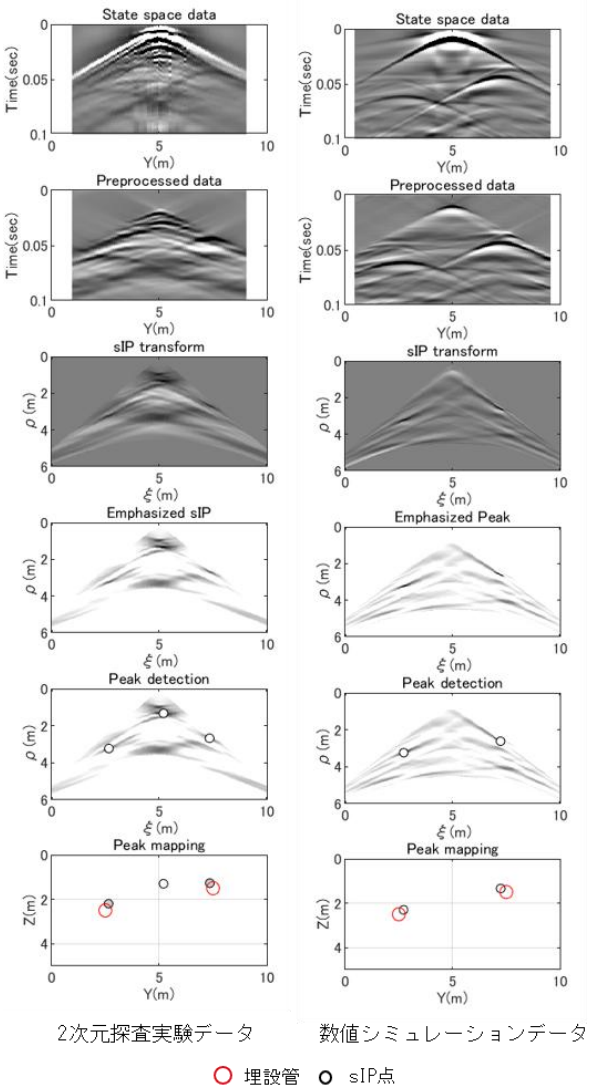


図-9　sIP 変換法の適用結果とそのデータ処理過程

(2) 3 次元探査実験データへの sIP 変換法の適用

埋設管のような線形構造物の連続性把握の可能性を検証するため，第 2 章で示した実験と同じ機器および実験場を用いて 3 次元探査実験を実施した。実験レイアウトを**図-10** に示す。測線は X 方向に 1 m 間隔で配置し，起振点は Y 方向に 1 m 間隔，X 方向に 0.5 m オフセットして配置した。また，第 3 章で示した数値シミュレーションと同じ条件で，3 次元探査実験を模擬した数値シミュレーションも実施した。

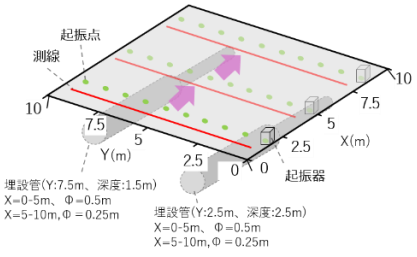


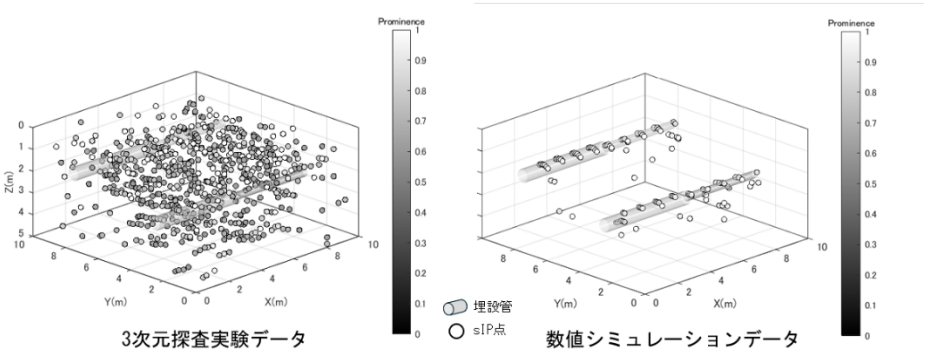
図-10　3 次元探査実験レイアウト

図−11 に，3 次元探査実験データおよび数値シミュレーションデータに対して sIP 変換法を適用した結果を示す。数値シミュレーションでは，埋設管上面に沿って sIP 点が連続的に分布し，埋設管位置を高精度に推定できている。一方，3 次元探査実験では，埋設管以外の位置にも多数の sIP 点が検出された。これらのノイズは，実験場整備時に確認されている地中の礫やコンクリートガラなどの散乱体に起因するものと考えられる。その結果，埋設管に対応する sIP 点がノイズに埋没しており，埋設管位置を明瞭に抽出することが困難であった。そこで，これらのノイズの中から埋設管に対応する sIP 点を抽出する手法について検討した。

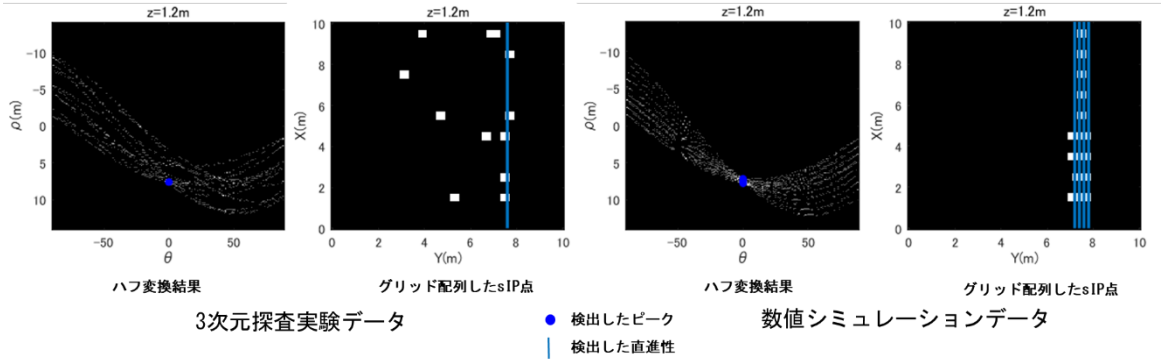
埋設管のような線状構造物を検出する手法としてハフ変換があり，地中レーダ探査では浅部埋設管の 3 次元位置推定に適用されている [12]。ハフ変換は式(9)で表される。

$$\rho = x\cos\theta + y\sin\theta \tag{9}$$

ここで，ρ は原点から直線までの垂線距離，θ は x 軸と垂線のなす角である。ハフ変換により，ユークリッド空間（x-y 座標）を ρ-θ パラメータ空間へ変換することで，線状要素を抽出することができる。本報では，**図−11** に示した 3 次元探査実験結果から最大プロミネンス値を有する sIP データを抽出し，ハフ変換を適用した。ハフ変換は 2 次元データ処理であるため，3 次元座標の sIP データを X，Y，Z 各方向に 0.2 m 間隔でグリッド化し，さらに深度方向に 0.2 m 間隔でスライスした画像データを作成して解析を行った。**図−12** に深度 1.2m におけるグリッド化した sIP データとハフ変換結果を示す。ハフ空間におけるピークから求めた直線を重ね合わせると，X 方向に分布する sIP 点列と概ね一致していることが確認できる。**図−13** に，検出されたすべての直線と最大プロミネンスの sIP データを示す。ハフ変換により X 方向の連続的な線状構造が抽出され，その方向，深度および位置は実際の埋設管と良好に一致した。以上より，sIP 変換法とハフ変換法を組み合わせた可視化手法の有効性が確認された。



図−11　3 次元データへの sIP 変換法適用結果



図−12　グリッド化した sIP データとハフ変換結果（深度 z = 1.2 m）

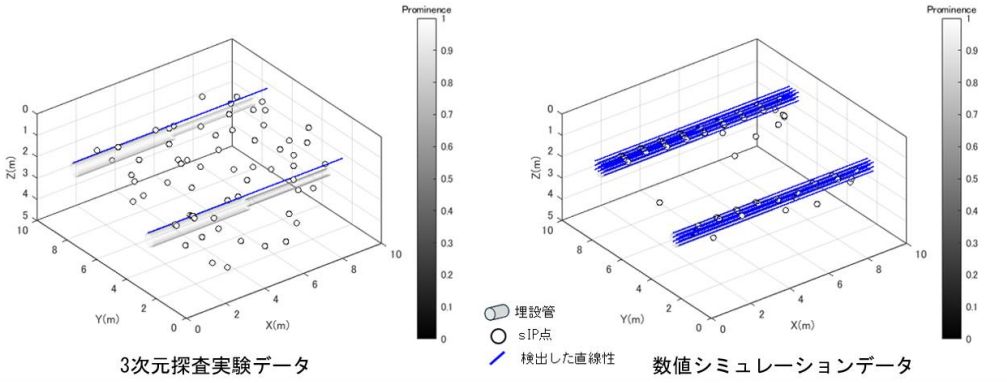


図-13　ハフ変換による埋設管の線状構造抽出結果

5. まとめ

下水道などの深部埋設管の効率的な探査手法の開発を目的として,弾性波を用いた埋設管探査手法を検討した。その結果，埋設管の敷設方向にチャープ方式で起振・受振する測定方法が有効であることを確認した。また，状態空間モデル法によるデコンボリューションフィルタを用いて反射係数を高精度に推定することで，埋設管からの散乱反射波を明瞭化できた。さらに，散乱反射波を抽出して埋設管位置を可視化する手法を適用し，実験結果と数値シミュレーション結果との整合性から，その有効性を確認した。

謝辞：本研究は，東京大学生産技術研究所の水谷司准教授との共同研究によるご指導の下，技術の開発や実験の計画・実施・結果の検討に至るまで，多くのご助言をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

1) Yang, S. and Jun, W., Xiangyu, W., Yuan Y., Wenchi, S.: 3D reconstruction in underground utilities, Automation in Construction, 2023
2) 笛田保之：下水道破損に起因する八潮市道路陥没事故～事故で露呈した下水道老朽化問題にどう対処すべきか～，建設政策，No.221，2025
3) Yamaguchi, T., Mizutani, T. : Localization of Subsurface Pipes in Radar Images by 3D Convolutional Neural Network and Kirchhoff Migration. 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, pp. 4841-4844, 2021
4) 程塚保行，水谷司，神山圭佑：弾性波を用いた埋設物探査手法の適用性に関する基礎的実験，令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会論文集，III-365，2023
5) Kamiyama, K. and Mizutani, T., Hodotsuka, Y.: Determining the location of high-depth buried pipes using shallow seismic reflection techniques, Journal of Applied Geophysics, 2025
6) 程塚保行，水谷司：弾性波を用いた深部埋設管探査技術の開発，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 31 巻，土木学会，C2-3，2026
7) Andre, P. and Öz, Y.:Optimum source-receiver orientations to capture PP, PS, SP, and SS reflected wave modes, The Leading Edge, Vol.38, No.1, pp.10-80, 2019
8) Crump, N. D.: A Kalman filter approach to the deconvolution of seismic signals: Geophysics, 39, 1-13, 1974.
9) Deng, X. and Zhang, Z., Yang, D.: Seismic data deconvolution using Kalman filter based on a new system model, Geophysics 81:V31–V42, 2016
10) Weiss, R. M. and Shragge, J.: Solving 3D anisotropic elastic wave equations on parallel GPU devices, GEOPHYSICS, Vol. 78, No.2, 2013
11) Schneider. W. A.:Integral formulation for migration in two and three dimension, Geophysics, 43, pp.49-76, 1978
12) Mizutani,T. and Chen, J., Yotsumoto, S.: The 3D localization of subsurface pipes from Ground Penetrating Radar images using edge detection and point cloud segmentation, Measurement, 2024