

I-13 電磁誘導法を利用した地下埋設物の連続探査における

精度向上と GIS との効果的な連携

Accuracy improvement of the continuous exploration of buried cables and conduits by using the electromagnetic induction method, and effective data exchange with GIS.

福田和弘¹・福井豊一²・本藤聡一郎³

Kazuhiro Fukuda, Toyokazu Fukui, and Soichiro Hondo

抄録: 電磁誘導法を用いた埋設物探査に関して、従来の技術では線状埋設構造物を連続的に精度よく探査することは極めて困難であった。これに関して、筆者らは電磁誘導法を用いて地下埋設物の連続的な探査を可能とする新たな探査技術を開発した。さらに今回新たに位相判定及び磁界分布解析技術を開発することにより、複雑な磁界下における探査精度を向上した。加えて GIS とのスムーズな連携を図ることにより、効果的な設備管理を実現可能とした。本論文では開発した技術について、実際の探査事例と併せて紹介する。

Abstract: Concerning the exploration using the electromagnetic induction method, it is extremely difficult to explore a continuous linear buried structure with high accuracy by a conventional technology. So we developed a new exploration technology which enables to explore continuously a buried object by using the electromagnetic induction method. And this time, we improved accuracy under a complex magnetic field by developing technologies of identifying the current signal phase and analyzing the distribution of the magnetic field. Additionally, we made it possible to manage facilities effectively by innovating smooth data exchange with GIS. In this paper, we introduce the developed technology in conjunction with examples of actual applications.

キーワード: 埋設物探査, 電磁誘導法, 探査精度向上, 設備管理, GPS, GIS

Keywords: exploration of buried object, electromagnetic induction method, improvement of exploration accuracy, facility management, GPS, GIS

1. はじめに

地下に埋設されているライフライン設備において、道路掘削等による損傷事故の発生は社会生活に多大な影響を与え、その社会的損失は計り知れない。

事故発生原因の一つとして設備記録と実際の設備位置が異なる問題が挙げられる。この問題の解決手法として、非開削の埋設物探査技術である電磁波パルスレーダー法¹⁾や電磁誘導法等を用いた埋設物探査が行われている。

しかしながら、従来の探査技術では、ライフライン設備のような線状構造物を連続的かつ精度よく探査することは極めて困難であり、費用等の問題から限られたポイントの離散的なデータしか得られなかった。とりわけ、都市部等の埋設物輻輳箇所においては、探査対象物の正確な位置を把握することができなかった。

そこで筆者らは、従来の探査技術の問題を解決して、地下埋設構造物の連続的な探査を可能とし、かつ精度を向上した電磁誘導法による新たな探査システムを開発した。さらに、GIS とのスムーズな連携を図ること

により、効果的な設備管理を実現可能とした。本論文では、開発した技術及びシステムについて実際の探査事例と併せて紹介する。

2. 電磁誘導法を用いた埋設構造物探査の基本原則

(1) 電磁誘導法を用いた埋設構造物の探査方法

電磁誘導法を用いた埋設物の探査は、ケーブルや管路といった金属媒体の線状構造物を対象としている。埋設物に交流の信号電流を流し、発生する同心円状の磁界（磁束の変化）を地上の受信コイルを用いて誘導電流として検知し²⁾、磁界強度を測定する。

これに従って、探査システムは発信器と受信器で構成される。一般的に受信器は複数個のコイルを搭載し、各コイルで測定した磁界強度から、探査対象物の平面位置及び深度を算出できる仕組みとなっている。

(2) 従来の受信器の仕組み

従来の受信器は、上下に一軸コイルを水平に配置した構造となっている。探査対象物のおおよその地上位置において、受信器を埋設ラインと直交方向に移動さ

1: 正会員 工修 NTT インフラネット(株) 技術開発部

(〒103-0007 東京中央区日本橋浜町 2-31-1, Tel: 03-5645-1030, E-mail: fukuda-k@hqt.nttinf.co.jp)

2: 正会員 NTT インフラネット(株) 技術開発部 (〒103-0007 東京中央区日本橋浜町 2-31-1)

3: 非会員 工修 NTT インフラネット(株) 技術開発部 (〒103-0007 東京中央区日本橋浜町 2-31-1)

せることで、磁界強度のピーク位置を把握し、平面位置として特定する。その後、同ポイントにおける上・下コイルが受信する磁界強度の相対関係から、探査対象物の深度を算出するという手順で探査を行う。

図-1において、 H_1 は下コイルの受信する磁界強度、 H_2 は上コイルの受信する磁界強度、 z は上下コイルの離隔、 D は探査対象物の深度、 I は電流値を表す。磁界強度は深度と電流の関係式に置き換えることができ、上下コイルそれぞれの磁界強度は式(1)に示され、この連立方程式の解として D を求めることができる。

$$\begin{aligned} H_1 &= K \cdot I / D \\ H_2 &= K \cdot I / (D+z) \end{aligned} \quad (1)$$

(K:コイル感度に比例する係数)

(3) 開発した受信器の仕組み

今回筆者らが開発した受信器は、xyzの三軸コイルを受信器左右の位置にそれぞれ配置している。三軸コイルうちxコイル及びzコイルを用い、左右コイル位置における磁界強度の相対関係として探査対象物の平面位置と深度が同時に算出できる。したがって、探査対象物の埋設ライン方向に沿って受信器を移動させることで、連続的な探査が可能となる。なお、yコイルは次章の磁界分布の計測にて利用する。

図-2において、 H_{LX} は左xコイルの受信する磁界強度、 H_{LZ} は左zコイルの受信する磁界強度、 H_{RX} は右xコイルの受信する磁界強度、 H_{RZ} は右zコイルの受信する磁界強度、 T は左右コイルの離隔、 t は探査対象物と左右コイル中心線との離隔、 D は探査対象物の深度、 I は電流値を表す。左右コイルそれぞれの磁界強度は式(2)に示され、連立方程式の解として t 及び D を求めることができる。

$$\begin{aligned} H_{LX} &= K \cdot I \cdot \cos\theta_L / \sqrt{\{D^2+(T/2-t)^2\}} \\ H_{LZ} &= K \cdot I \cdot \sin\theta_L / \sqrt{\{D^2+(T/2-t)^2\}} \\ H_{RX} &= K \cdot I \cdot \cos\theta_R / \sqrt{\{D^2+(T/2+t)^2\}} \\ H_{RZ} &= K \cdot I \cdot \sin\theta_R / \sqrt{\{D^2+(T/2+t)^2\}} \end{aligned} \quad (2)$$

(K:コイル感度に比例する係数)

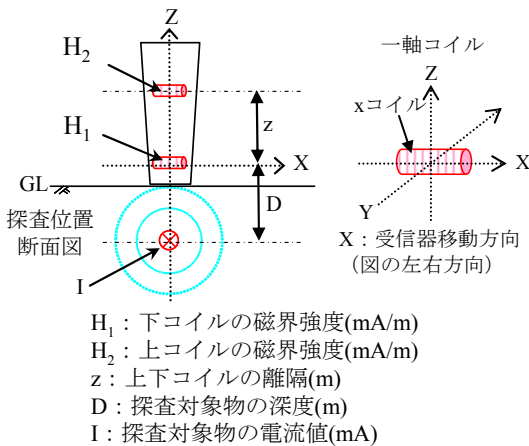


図-1 受信器の仕組み (上下一軸コイル方式)

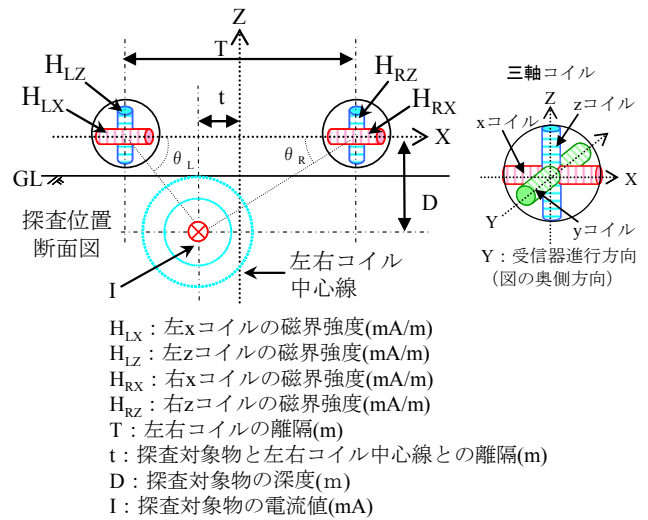


図-2 受信器の仕組み (左右三軸コイル方式)

3. 電磁誘導法による探査精度の向上

(1) 埋設物の輻輳箇所における探査への影響

都市部等における埋設物の輻輳箇所では、近接する金属管路やケーブル等にリターン及び2次誘導電流が発生する。このような場合、探査位置における磁界の分布が複雑になり、探査精度に影響を与える。

図-3に、探査対象物以外の金属媒体にリターン電流が発生した場合、想定される磁界の発生状況を例示する。このような磁界環境においては、図-4に示すように、本来探査対象物の直上で磁界強度が最大(ピーク)になるが、リターン電流が存在する場合、ピーク位置及び強度ともにズレが生じる。

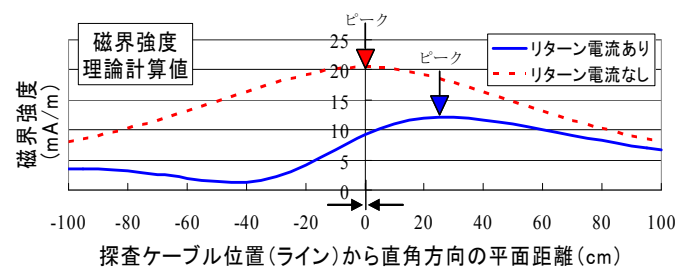
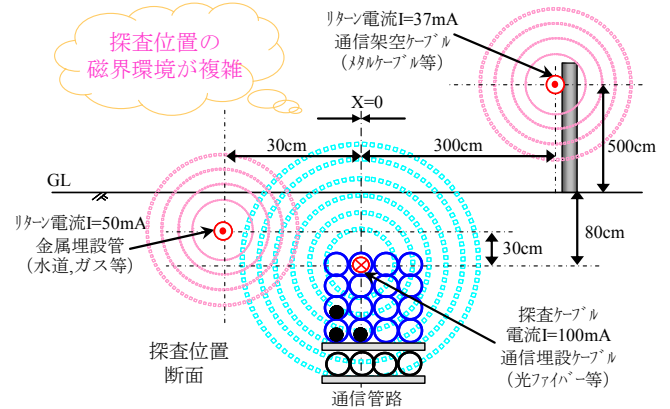


図-4 探査位置付近における磁界分布の例

(2) 探査精度を向上する技術の開発

前述の磁界分布のピーク位置及び強度のズレに対して、筆者らは、発信器より送出する交流信号の特性と探査位置付近の磁界分布に着目し、探査精度の向上を図った新たな探査システムを開発した。

具体的には、探査対象物に流れる電流とリターン及び2次誘導電流の位相の変化を捉えて、探査結果の信頼性を判定し、詳細な磁界分布の解析を実施することで探査精度を向上させる手法を開発した。

a) コイル受信磁界の位相判定

図-5に交流信号の波形を示す。発信器から送出される交流信号の位相を0°（実線）とすると、リターン電流は逆向きであることから位相は-π（-180°、一点破線）となる。また、2次誘導電流は電磁誘導の原理より位相は-π/2（-90°、破線）となる。このことから、リターン電流や2次誘導電流が発生している場合、受信器のコイルは位相の異なる交流信号によって合成された磁界を受信している。実際に磁界強度の式(1)、(2)で得られる電流Iは、振幅A、周波数f、時間t、及び初期位相φ₀による式(3)で表される。

$$I = A \cdot \cos(2\pi ft + \phi_0) \tag{3}$$

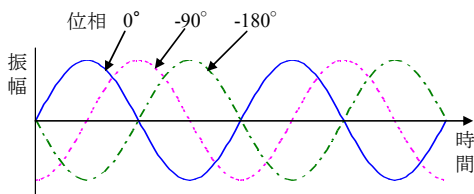


図-5 交流信号の位相

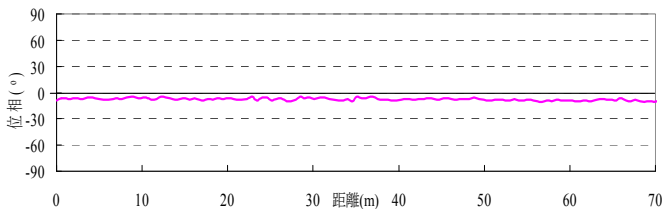


図-6 位相が安定している区間での位相判定例

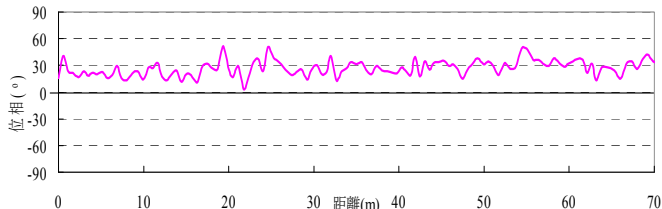


図-7 位相が乱れる区間での位相判定例

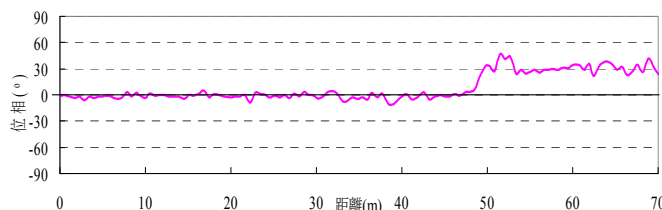


図-8 位相が途中から乱れる区間での位相判定例

そこで、発信器から送出する交流信号の位相を0°とした場合における、コイルが受信する合成磁界の位相を判定する手法³⁾⁴⁾を取り入れた。これにより、リターン及び2次誘導電流の発生を検知し、詳細な磁界分布解析の必要性を機械的に判定可能とした。

実際の測定データを図-6~8に示す。グラフから、位相の状態が安定している区間、初めから位相が乱れている区間、探査途中の地点から位相が乱れる区間を明確に把握することが出来ている。

b) 磁界分布の解析

コイル受信磁界強度Cは、発信器位相成分I（実部）と直交位相成分Q（虚部）の合成磁界として得られ、図-9の関係にある。発信器の信号がsin波の場合、C、I、Q、はそれぞれ式(4)にて表される。jは虚数単位、fは周波数、tは時間、φ₀は初期位相を表す。磁界強度Cの振幅M及び位相φは、受信器（コイル）により測定されることから、CのI成分およびQ成分を算出することができる。

磁界分布の測定は図-10に示すように、埋設物の横断方向の測線上の磁界強度をyコイルにより細かく測定し、地上位置の磁界分布図を作成する。その測定した区間内において、理論上の磁界強度を算出する。理論上の磁界強度は、位置、深度、電流、位相を変数

$$C = I + jQ$$

$$I = M \cdot \sin(2\pi ft + \phi_0)$$

$$Q = M \cdot \sin(2\pi ft + \phi_0 + \pi/2) = M \cdot \cos(2\pi ft + \phi_0) \tag{4}$$

$$M = \sqrt{I^2 + Q^2}$$

$$\phi = 2\pi ft + \phi_0 = \tan^{-1}(I/Q)$$

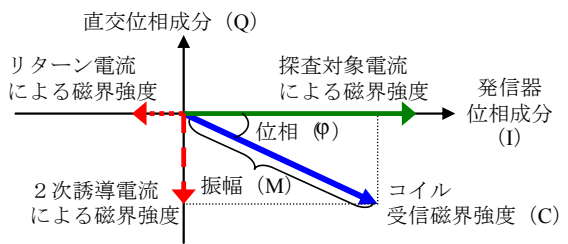


図-9 磁界強度成分の関係

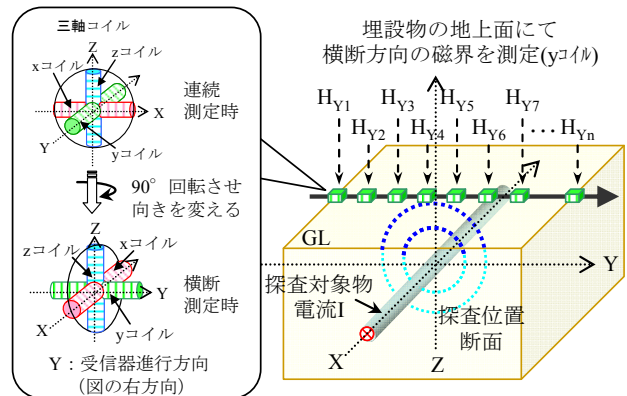


図-10 磁界分布測定概念図

に用いて I と Q を含んだ関係式として表すことができる。これら変数の数値代入処理を実施することにより、理論上の磁界分布を、測定した磁界分布に一致させる最適化の手法⁵⁾を適用し、位置、深度を算出する。

図-11の破線はリターン及び2次誘導電流が無いと仮定した場合の理論磁界分布の例であり、図-12の破線はリターン及び2次誘導電流が有ると仮定し最適化処理を施した場合の理論磁界分布の例である。図-11、12ともに、実線は測定した磁界分布を示している。最適化処理が施された図-12では、理論磁界と測定磁界が重なり、ほぼ一致していることが分かる。これは探査対象電流はもとより、リターン及び2次誘導電流を正確に算出できていることを示している。

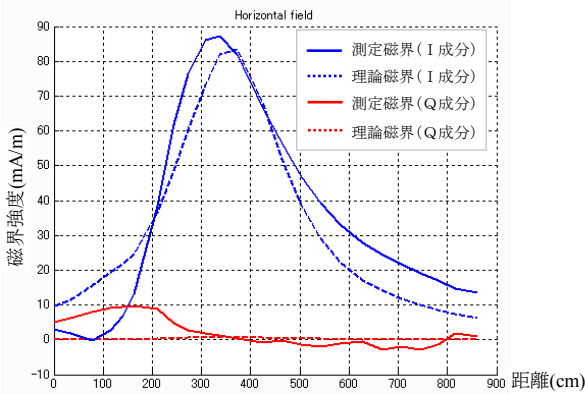


図-11 測定磁界分布とリターン電流及び2次誘導電流が無いと仮定した理論磁界分布の例

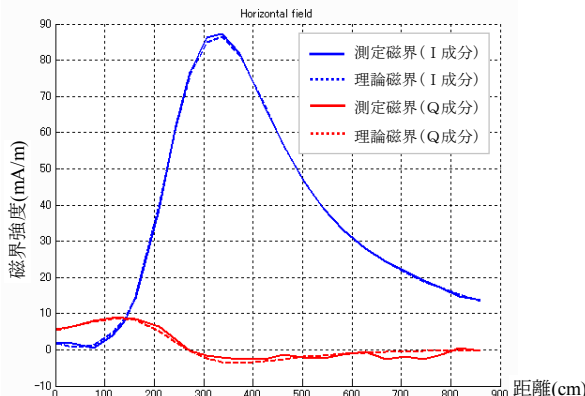


図-12 測定磁界分布とリターン電流及び誘導電流が有ると仮定し最適化処理を施した理論磁界分布の例

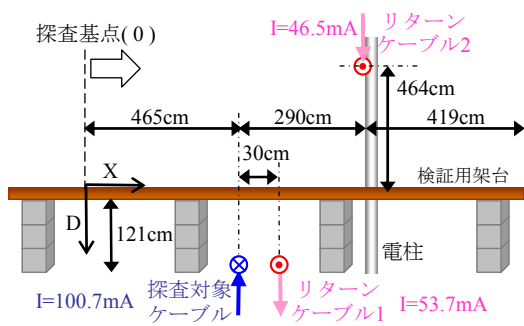
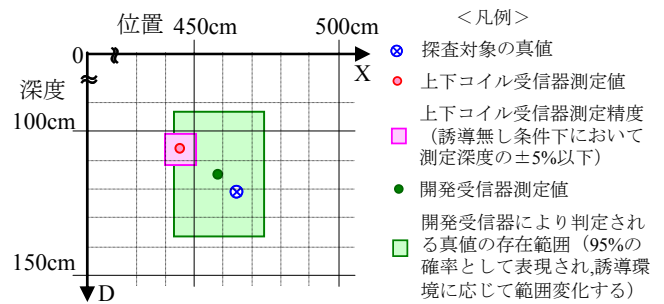


図-13 検証モデル



	探査対象 真値	上下コイル受信器		開発受信器	
		測定値	誘導無し精度	測定値	真値存在範囲
X(cm)	465	445	±5	458	±15
D(cm)	121	106	±5	115	±45

図-14 検証結果

実際に、図-13の検証モデルを構築し、探査精度の確認を実施した。Xは探査基点0からの水平距離を、Dは探査基点0からの鉛直距離（深度）を表し、Iは電流値を表す。この検証モデルについて、従来の上下コイル受信器で測定した場合と、今回開発した受信器で測定した場合の検証結果を図-14に示す。上下コイル受信器では、機器固有の誤差範囲（誘導やリターン電流の無い条件で測定深度の±5%）は真値を外れており、本環境下での測定ができないことを示している。

これに対して、今回開発した受信器の測定結果は真値に近い値を示している。また、最適化処理から判定される95%確率で真値が存在する範囲内（誘導やリターン電流の状況に応じて変化）に真値を含んでおり、本環境下において測定可能であることを示している。以上のことから、探査精度の向上を確認した。

(3) 探査手法の整理とシステム要件の定義

効果的な探査を実現するため、筆者らは新たに開発した探査手法を業務フローに沿って整理した上で、次章で記述する探査システムの要件を定義した。

a) 探査手法の整理

本手法を適用した探査の手順と工程を図-15に示す。従来の電磁波パルスレーダー探査技術で必要とされた機器走査者の高度な解析や判定等のスキルが不要であり、探査と測量を同時に実施することができる。

b) 探査システムの機能要件定義

探査システムの機能要件を「位置探査機能」と「測量/システム機能」に区分し、以下に定義した。

<位置探査機能>

- ・ 縦断方向の走査機能
- ・ 縦断方向の連続探査データ取得機能
- ・ 位相状態の判定機能
- ・ 横断方向の走査機能
- ・ 地上位置の磁界分布データ取得機能
- ・ 理論磁界分布の最適化処理機能
- ・ 主電流/リターン電流/誘導電流の判別機能

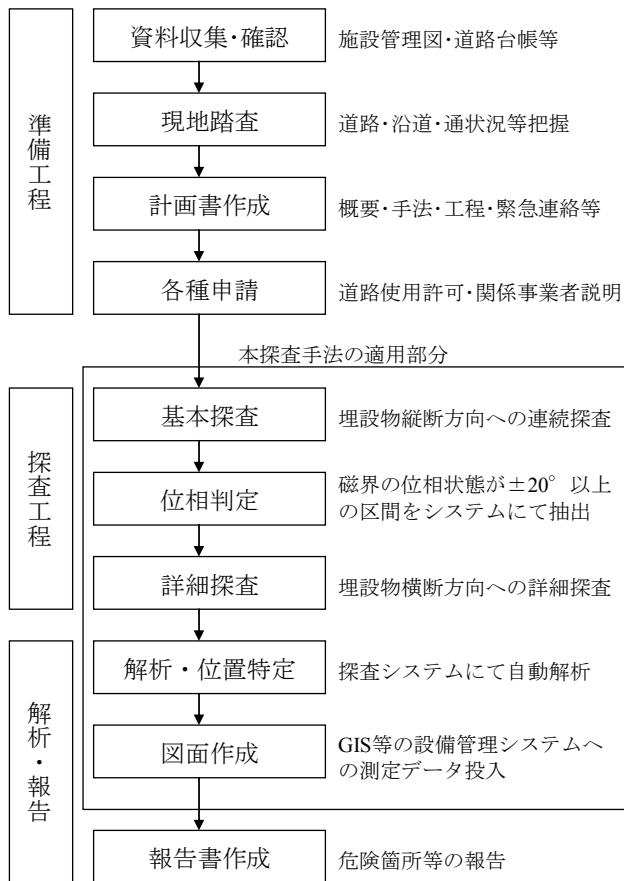


図-15 探査手法及び工程の整理



図-16 受信器および発信器

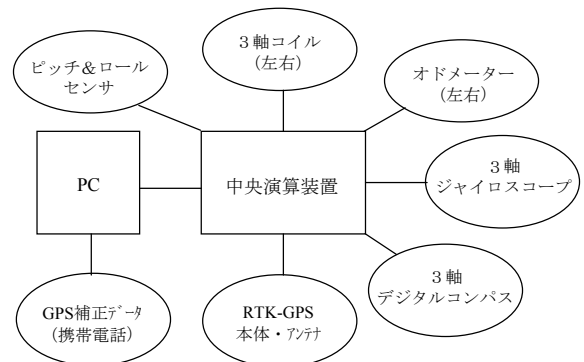


図-17 受信器の構成

<測量/システム機能>

- ・GPS 補正情報の取得機能
- ・慣性航法による座標情報算出機能
- ・GIS フォーマットでのデータアウトプット機能

4. 新しい探査システム

(1) システム構成

本システムで使用される「受信器」及び「発信器」を図-16に、受信器の構成を図-17に示す。

磁界は受信器タイヤ左右位置に設置された三軸コイルにより受信し、オドメーターにより移動距離を測定する。デジタルコンパス、ジャイロスコープ、ピッチ・ロールセンサにより傾きや方位を測定する。これに加えて、RTK-GPSにより位置情報(座標)を取得する。これらの情報は、中央演算装置により処理を行い、PC搭載の専用ソフトウェアにて解析を実施する。

(2) システム機能

本システムは、2次誘導電流の発生を抑制できる低周波交流信号(491Hz)を用いている。探査方式として、埋設物を縦断方向に連続探査できる「ベクターモード」と、横断方向に詳細探査(磁界分布解析)できる「プリサイズモード」の2つの機能を搭載している。以下に各機能の特徴を述べる。

a) ベクターモード

ベクターモードは探査対象物に対して縦断方向に連続的に受信器を走査しデータを取得する。長距離発信器を探査対象物の終端に設置することで、最大80kmの信号を伝達可能であり、長距離区間の連続探査を可能とした。連続探査イメージを図-18に示す。

測定データは探査対象物の位置情報をRTK-GPSと連動し、三次元の座標情報(緯度、経度、高度:WGS84座標系)として蓄積することを可能とした。同時にVRS方式によるGPS補正情報を取得し、自動的に補正座標を記録する機能を備えた。これにより地中での線形変化を漏れなく抽出でき、危険箇所(浅層部や変曲点等)を詳細に把握できる。特に深度に関しては、土被りデータのみならず、GPS高度座標としての管理が可能であることから、道路の路盤・舗装工事等による地盤高の変化に対しても対応できる。

しかしながら、市街地や山間部等で探査を実施する場合、図-19に示すように、上空視界が悪くGPSを精度良く取得できない場合がある。その場合、GPS精度が確保されている地点を基点とし、慣性航法を用いた計算機能により座標情報が付与される仕組みとした。探査画面を図-20に示す。リターン及び2次誘導電

流が発生している区間がある場合、走査者は探査画面から容易に位相の状態を識別可能であり、その場で詳細探査の必要性を判断できる。具体的には、位相状態が 0° から $\pm 20^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$ と変化するに従い、**図-21**に示す探査画面内のコイル表示の色を変化させることにより注意喚起する。埋設物の位置、深度、電流、GPS衛星の状況等についても逐次確認できる。

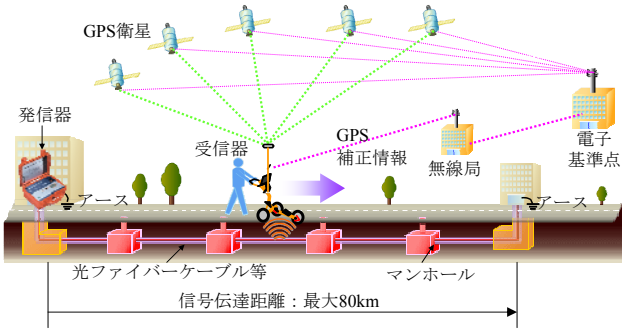


図-18 連続探査イメージ図

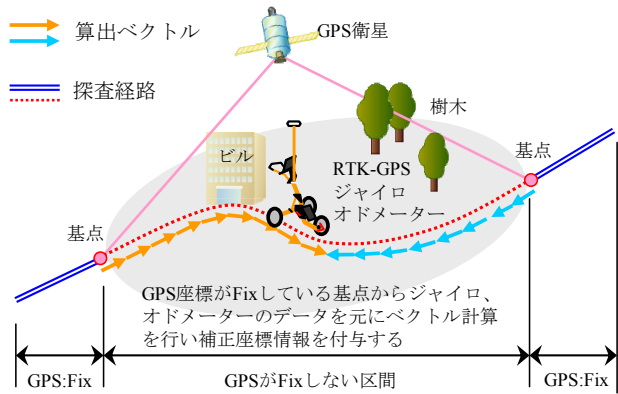


図-19 衛星不感地帯等における慣性航法処理

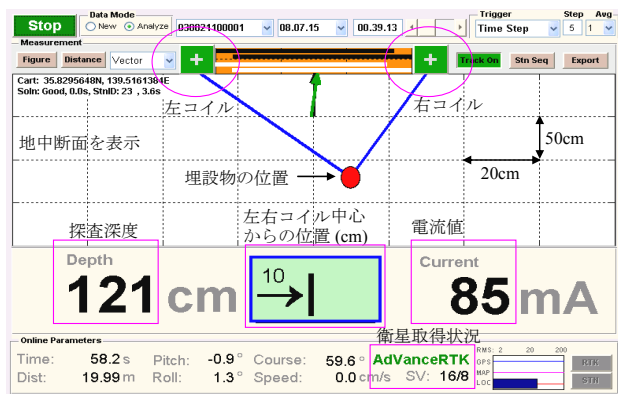


図-20 ベクターモード探査画面例

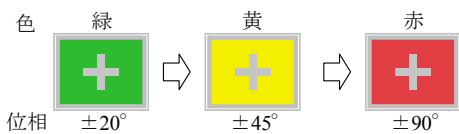


図-21 位相状態による探査画面コイル色の变化

b) プリサイズモード

プリサイズモード⁶⁾は探査対象物に対して横断方向に約5mの幅(埋設ラインを対称として約2.5m程度)で受信器を走査し、地上の磁界分布データを取得する。ベクターモードにて位相状態が $\pm 20^\circ$ 以上ある区間、すなわち、磁界の環境が悪く探査精度の信頼が劣る箇所について、プリサイズモード測定を行い、磁界分布の解析による高精度な探査を可能とした。

磁界分布データ取得時のサンプリング画面例を**図-22**に示す。データは受信器の走査に伴う磁界の微細な乱れを内包していることから、精度の高い解析を可能にするため**図-23**に示すように平均化処理を施す。平均化処理を施した磁界分布に対して、理論計算と最適化処理を実施することにより、探査対象物の位置が導き出される。測定位置は**図-24**に示すように、横断方向に探査を開始した基点を0とした水平距離と深度によって表現され、磁界環境に応じて最適化処理から判定される真値が存在する範囲(95%確率)と合わせて与えられる。

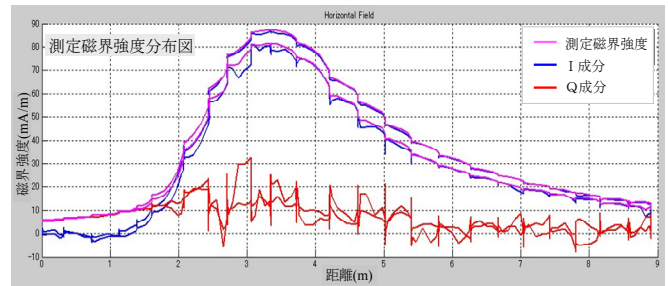


図-22 磁界データ取得時のサンプリング画面例

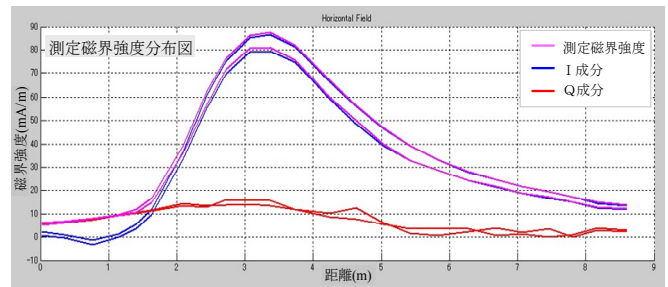


図-23 平均化処理を施した磁界分布画面例

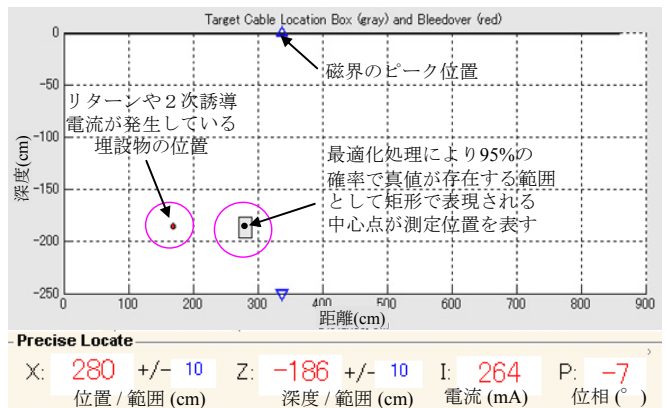


図-24 探査結果図例

(3) GIS との効果的な連携

ライフライン等の地下埋設物の探査の目的として、埋設位置情報の効果的な管理が挙げられる。

従来は紙ベースの図面や台帳による管理が一般的であり、数 10km 以上の設備において探査結果を整理・作図するだけでも膨大な時間と手間が必要であった。そこで、開発した探査システムは、**図-25** に示すように、GIS による設備管理システムと連携することを前提とした。連携の汎用性を考慮し、Excel, Shape, Google Earth KMZ 等、各種フォーマットにて測定データのアウトプットが可能であり、探査結果を GIS 設備管理システムに即時反映することができる。

表-1 に Excel アウトプットデータ例を示す。緯度、経度、標高等の埋設物の三次元位置情報が連続データとして項目毎に整理されている。これらデータを GIS にインポートすることにより、緯度、経度情報から平面位置が電子地図上にプロットされ、他の情報は属性情報として保存される。また、CAD 図面等において管理する場合においても、専用のデータ変換ツールを介することで平面・縦断面図の自動作図が可能である。

現在、通信設備において管理・運用している GIS 利用例を**図-26** に示す。探査データは電子地図上に位置データとして反映されており、個別に管理している図面・帳票類は、属性情報として参照させることで、有用な設備管理システムを実現した。

表-1 Excel アウトプットデータ例

距離	経度	緯度	標高	深度	電流	GPS状況
Dist	X	Y	Z	Depth	Current	Fix
0.00	130.68553596	33.34300886	50.07694673	0.99	25.8	AdVanceRTK
0.55	130.68554220	33.34301704	50.08669711	0.98	25.3	AdVanceRTK
1.14	130.68554793	33.34301872	50.08694134	0.97	24.9	AdVanceRTK
1.69	130.68555393	33.34301931	50.09391995	0.86	25.2	AdVanceRTK
2.20	130.68555918	33.34301989	50.09515192	0.84	26.7	AdVanceRTK
2.70	130.68556524	33.34302048	50.07712715	0.84	27.7	AdVanceRTK
3.26	130.68557006	33.34302139	50.09027048	0.83	27.4	AdVanceRTK
3.82	130.68557616	33.34302207	50.07692632	0.85	28.9	AdVanceRTK
4.41	130.68558282	33.34302296	50.08161895	0.85	28.5	AdVanceRTK



図-26 GIS を利用した通信設備管理例

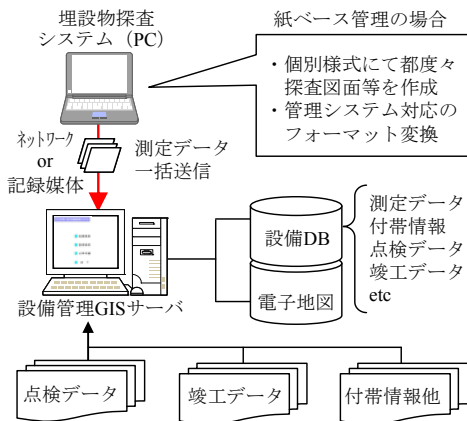


図-25 データベースによる設備管理方法

5. 探査事例

本探査システムは、左右二軸コイルを用いた連続探査装置⁷⁾の後継機種として開発を行い、平成 20 年度末までに、情報ボックス、NTT 地下通信設備、水道設備の探査において、全国で約 500km (左右二軸コイル方式: 約 465km, 左右三軸コイル方式: 約 35km) の実績を有している。

(1) ベクターモードによる探査事例

情報ボックス内の光ケーブルの探査結果例を**図-27**、**28**に示す。離散的なポイントのみの探査方法では把握が困難であった浅層部や変曲点の連続性を探査

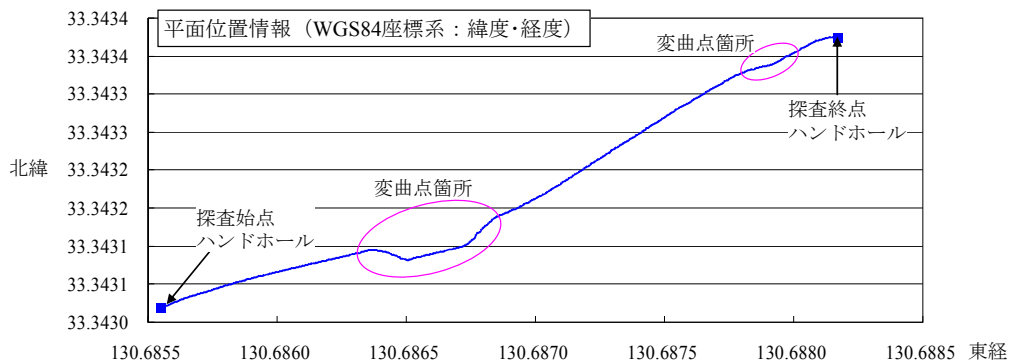


図-27 ベクターモードによる連続探査平面図例

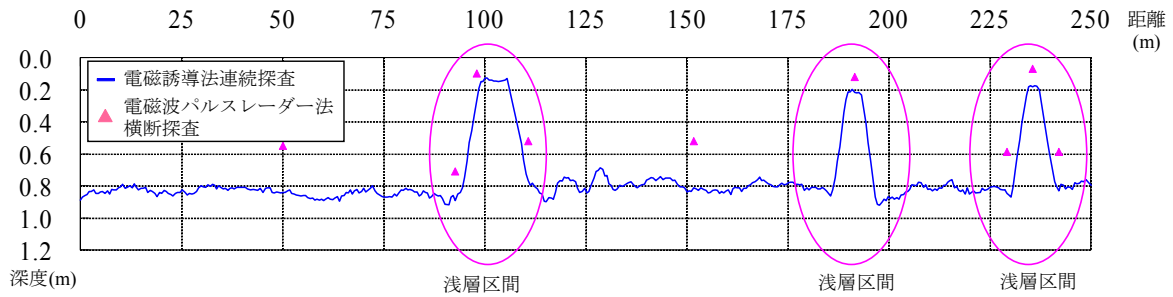


図-28 ベクターモードによる連続探査縦断図例

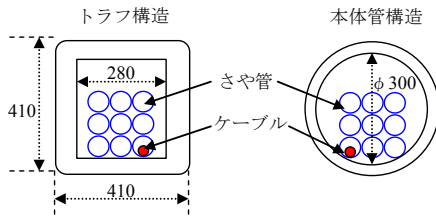


図-29 情報ボックス標準断面例

することができている。また、縦断図の深度データの微細な変化から、図-29に示す情報ボックスの構造上、さや管が固定されていないことに起因した、さや管の蛇行の状態までも測定していることが分かる。

(2) プリサイズモードによる探査事例

図-30に示す地下通信設備内の光ケーブルを探査した結果を図-31に示す。本探査箇所では、光ケーブルの他に、メタルケーブルなどに発生したリターン及び2次誘導電流の影響により、磁界が大きく乱れていた。磁界分布解析により判定された真値の存在する平面範囲は深度範囲と比べ大きくなったものの、実際の試掘調査による実測値と探査結果を比較すると、ほぼ同じ位置を示しており、高精度な探査を実現した。

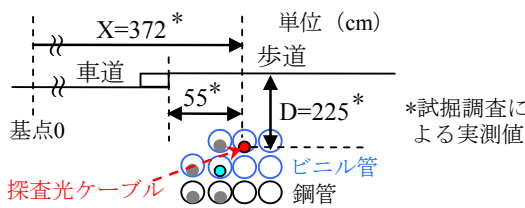


図-30 プリサイズモード探査位置の断面図

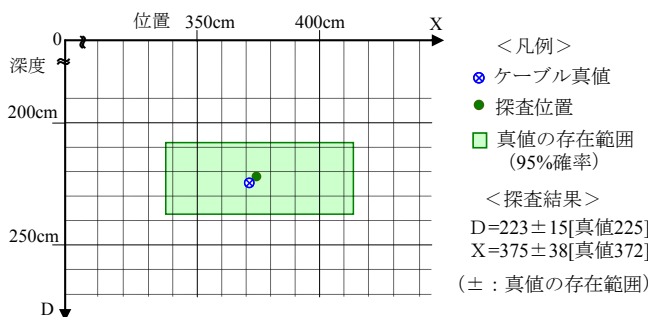


図-31 プリサイズモードによる探査結果

6. まとめ

本論文で紹介した探査技術及びシステムを用いることにより、地下埋設物の探査精度向上とGISと連携した効果的な設備管理を実現可能とした。

更なる精度向上と適用領域拡大に向けた課題として、以下の三点が挙げられる。一点目は、GPS不感地帯における慣性航法処理の高精度化である。現状では10~20mを超える不感地帯において道路曲がりがある場合、搭載ジャイロの性能限界から慣性航法を用いた計算誤差が大きくなってしまふ。二点目は、プリサイズモード走査幅の短縮化である。磁界分布解析に約5mの走査幅が必要であり、幅員の狭い道路において測定が困難な場合がある。三点目は、金属管路の探査可能距離の延伸である。通信ケーブルでは、発信器から最大で80kmの探査が可能であるが、水道管等の金属管路の場合、継手や錆等の箇所から電流が土中に漏れ出し、探査可能距離が数100~数10mまで減少してしまう。

今後、本技術の更なる普及展開を図るとともに、課題の解決に向けて引き続き技術開発を実施する。

参考文献

- 1) 西浦公祐, 高橋清, 須藤圭一: 地中レーダによる鉄筋コンクリート下の埋設物調査, 第16回非開削技術研究発表会論文集, 3-3, pp.55-60, 2005年11月.
- 2) 小柴正則: 基礎からの電磁気学, pp.65-99, 培風館, 2000年3月.
- 3) James Waite, Johan Overby: *Method and Apparatus for Digital Detection Of Electromagnetic Signal Strength And Signal Direction In Metallic Pipes And Cables*, Patent US2004/018935, 2004
- 4) スクラップ, フベルト: 金属パイプおよびケーブルの位置探索装置中における漏出に起因する干渉を分離させる方法, 特開2007-536514, 2007
- 5) Kun Li: *Enhanced Precise Location*, Patent US2008/039315, 2006.
- 6) Jim Waite, Kun Li, Toyokazu Fukui: *Precise Model-Based Underground Utility Mapping with Statistical Confidence*, Proc. of JITA Geospatial Infrastructure Solution Conference 2009, CD-ROM, 2009.
- 7) 中西信輔, 幸崎浩紀, 日高一敏: 電磁誘導法による連続的な地下埋設物探査技術, 第17回非開削技術研究発表会, 5-4, pp.149-155, 2006年11月.