

# 埋設パイプラインの防食診断システム ～ スーパーコーディングス、スーパーコーディングステスラ ～

The Inspection System of Corrosion Protection for Buried Pipelines  
“SUPER COADINS”, ”SUPER COADINS TESLA”

古賀 隆二\* 技術開発研究所 機械商品開発室 シニアマネジャー  
Ryuji KOGA

鈴木 正二 日鉄パイプライン(株) 技術部 メンテナンス技術課長  
Shoji SUZUKI

赤間 智典 日鉄パイプライン(株) 技術部 メンテナンス技術課  
Tomonori AKAMA

大平 尚 技術開発研究所 機械商品開発室 シニアマネジャー  
Hisashi OOHIRA

## 抄録

本稿では、電気防食を適用した埋設パイプラインの防食障害を非開削で診断する2つの技術について述べる。スーパーコーディングス (Super Coating Defect Inspection System) は、地表面の電位勾配を2つの車輪電極により埋設パイプラインに沿って測定することで、埋設パイプラインの塗覆装損傷部を検知する。スーパーコーディングステスラは、埋設パイプラインを流れる信号電流から生じる磁界を磁気センサにより埋設パイプラインに沿って測定することで、埋設パイプラインと他の金属構造物とのメタルタッチ位置を検知する。両システムとも、微小な電位や磁界を高感度、且つ、高精度に検出することができる独自の位相検波法を適用することで、信頼性の高い診断システムを実現している。

## Abstract

This paper describes two non-excavate diagnostic techniques for corrosion control trouble of buried pipelines with cathodic protection. SUPER CODINS (Super Coating Defect Inspection System) measures the potential gradient on the ground surface with a pair of wheel electrodes along the line to detect damaged coating portions on a buried pipeline. SUPER CODINS TESLA measures the magnetic flux induced by a signal current through a buried pipeline with magnetic sensors along the line to detect contact points between a buried pipeline and other metallic structures. Both systems employ a unique lock-in-amplifier technology which enables very sensitive and accurate sensing of small potential and magnetic flux to realize reliable diagnostic systems.

## 1. 緒言

水・ガス・石油などを輸送する地中埋設パイプラインは、土壌や直流電気鉄道の迷走電流の影響を受ける腐食性環境におかれるため、塗覆装による防食法や塗覆装と電気防食を併用した防食法が適用されている。これらの防食機能を長期にわたり確保するためには、パイプラインの塗覆装損傷やメタルタッチ(金属接触)などの不具合箇所を把握し、適切な維持管理を行なうことが極めて重要である。しかし、埋設されているパイプ

ラインは目視による管体の監視ができないため、非開削で不具合箇所を調査・検知する技術が必要である。

このような状況の下、当社ではパイプラインの塗覆装損傷を検知するシステム「スーパーコーディングス」と、メタルタッチを検査するシステム「スーパーコーディングステスラ」を開発・実用化した。両システムとも交流信号を用いた検査方法で、雑音除去が容易でS/N比が非常に優れている。以下にこれら防食診断システムについて紹介する。

## 2. 交流電位法による塗覆装損傷検査「スーパーコーディンス」

塗覆装の損傷検査法として、損傷部からの漏れ電流による地表面の電位変化からその位置を知る「電位法」がある。電位法は計測や判定が容易なこと、また、他の構造物の影響が小さいことなどから、針電極法<sup>1)</sup>として利用されてきた。スーパーコーディンス (Super Coating Defect Inspection System) は電位法の特徴を最大限に利用して、東京ガス(株)と新日本製鐵(株)の共同研究により昭和 62 年に開発・実用化された検査システムである。本システムによれば、舗装・非舗装を問わず地表面から非開削で連続して調査ができるだけでなく、迷走電流の影響を受けることなく、高精度・高感度で埋設パイプラインの塗覆装損傷を検知することができる。

地表の電位  $V_0$  と電位の傾き  $V_0'$  は図 1 のようになる。ここで適当な間隔をおいた 2 つの車輪電極をもつ電位差計で地表の電位差を連続的に測定すれば、電位の傾き  $V_0'$  に近似した曲線が得られ、この極性が逆転する点を探し出すことにより塗覆装損傷部の検出を行う。

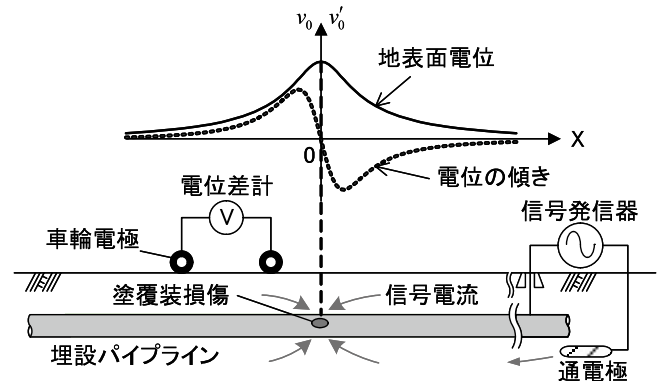


図 1 塗覆装損傷の検査原理

Fig.1 Principle of voltage gradient survey method for detecting coating defect

### 2-1. 塗覆装損傷の検知原理<sup>2), 3), 4), 5)</sup>

いま、塗覆装損傷部を地中の点電流源と見做して、その深さを  $z$ (m)、土壤抵抗率を  $\rho$  ( $\Omega$  m)、電流を  $I$  (A) とすると、地表面において塗覆装損傷部からの距離  $x$  (m) の点の電位  $V_0$  は次式のように表わすことができる。

$$V_0 = \rho I / (2\pi\sqrt{x^2 + z^2}) \quad (1)$$

また、地表の電位の傾き  $V_0'$  は上式を微分した (2) 式から求められる。

$$V_0' = dV_0 / dx = -\rho I x / \{(2\pi\sqrt{(x^2 + z^2)^3}\} \quad (2)$$

### 2-2. システム構成

スーパーコーディンスは、図 2 に示すように損傷部に信号電流を通じる発信装置と地表の電位差を検出する受信装置で構成され、受信装置には車輪電極が検出した信号から雑音分を除去する信号処理装置と記録計が組み込まれている。スーパーコーディンスでは、電位信号の振幅と位相を表示して、電位の極小点と位相変化 ( $+90^\circ \rightarrow -90^\circ$ ) の両方を観測することで精度よく損傷位置を判定することができる。

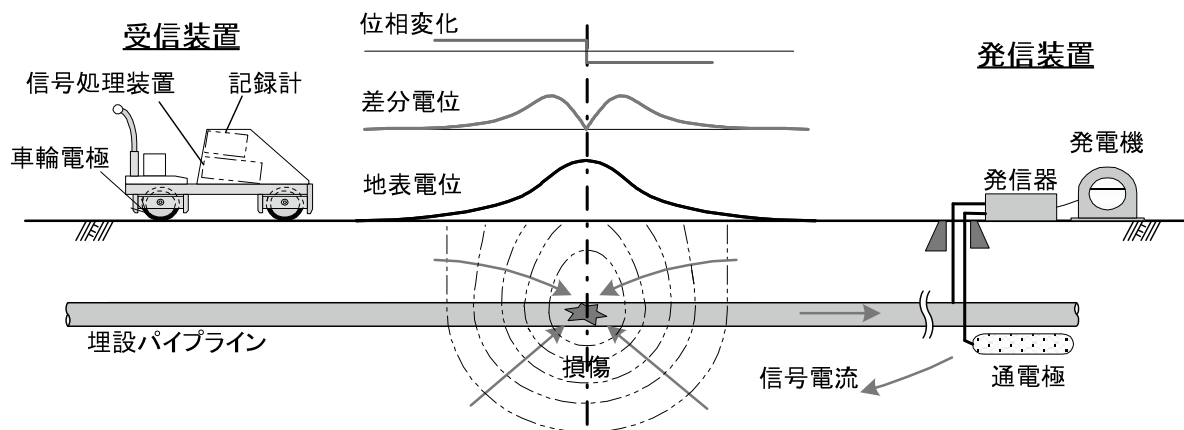


図 2 スーパーコーディンスの構成

Fig.2 SUPER CODINS (Super Coating Defect Inspection System)

### 2-3. 特徴

#### (1) 信号処理方法

車輪電極が検出する信号は種々の雑音を含んでいる。本システムにおいて、これら雑音に埋もれた微小信号を検出する方法として、位相検波法 (Phase-sensitive demodulation method) を用いた信号処理を行っている。位相検波法による信号処理には同期関係が不可欠であるため、発信装置・受信装置ともに周波数精度の高い水晶振動子を搭載し、両装置の周波数設定を同一にするとともに受信装置の位相調整器を調整することにより、両装置を一定の位相関係にすることを可能にしている (図3)。

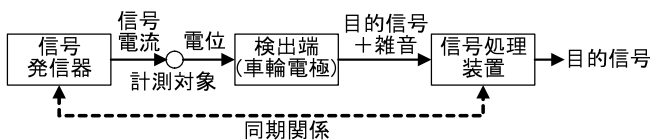


図3 位相検波法による信号の同期性  
Fig.3 Signal synchronism in phase-sensitive demodulation method

位相検波法により、信号処理装置からは以下の目的信号が出力される。

$$X = A \cos(\phi + \theta) \quad (3)$$

$$Y = A \sin(\phi + \theta) \quad (4)$$

$$A = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (5)$$

$$(\phi + \theta) = \left( \tan^{-1} \frac{Y}{X} \right) \quad (6)$$

ここで、A：前輪の電位 (E1) と後輪の電位 (E2) の差 ( $A = |E1 - E2|$ )、 $\phi$ ：受信装置の基準信号に対する車輪検出電位の位相、 $\theta$ ：初期設定位相 ( $E1 > E2$  の

とき  $+90^\circ$  に設定) である。本システムにより、極めて高い S/N で微小な信号を測定することが可能となる。

#### (2) 干渉排除技術<sup>6)</sup>

被調査パイプライン (以下、調査ライン) に近接して他のパイプラインがあると、信号電流の一部が近接する他のパイプラインに流入・流出して損傷部と同様に位相が ( $+90^\circ \rightarrow -90^\circ$ ) に変化する干渉 (擬似損傷) 波形を示すことがある。この干渉波形を排除する方法として、調査区間の両端に周波数の異なる信号 f1, f2 を同時に通電し、受信装置にて各々の周波数信号を検出する二周波同時信号通電法を開発・実用化した。図4に二周波同時信号通電法の構成を示す。

この方法を適用すると、図5に示すように、真の損傷においては f1, f2 とも位相が ( $+90^\circ \rightarrow -90^\circ$ ) に変化するのに対し、干渉の場合は f1, f2 のどちらかの位相が反対方向の ( $-90^\circ \rightarrow +90^\circ$ ) に変化するため排除することができる。この干渉排除方法は、誤判定を避けるために極めて有効な技術である。

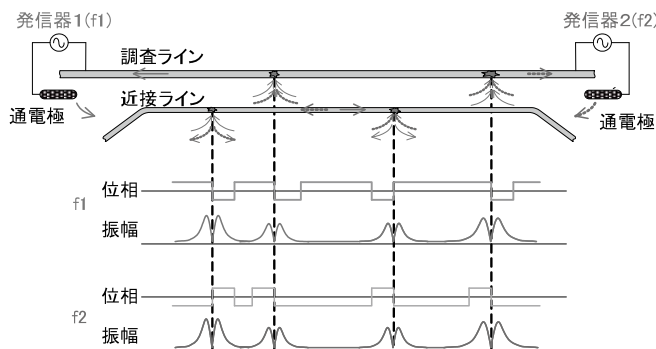


図5 近接パイプラインの干渉排除方法  
Fig.5 Method of interference signal exclusion

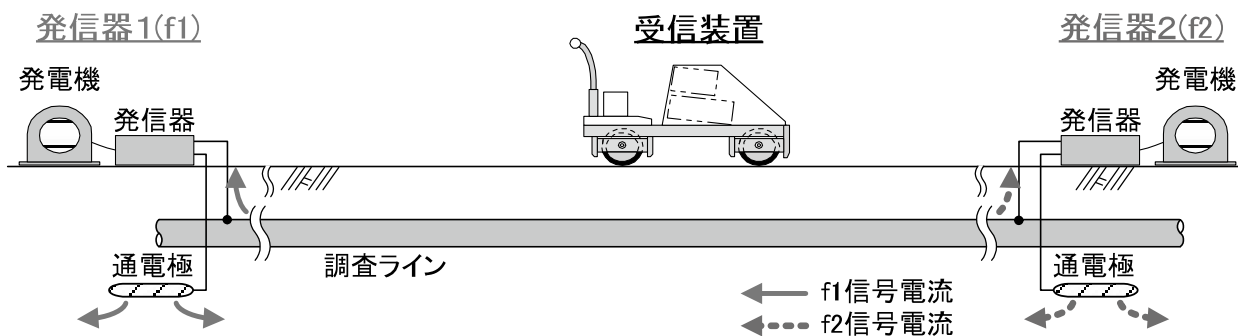


図4 二周波同時信号通電法の構成  
Fig.4 Method used by two-frequency signals for detecting coating defects

(3) 積算回路の付加<sup>7)</sup>

2つの車輪電極による地表面の電位差信号を、積算回路を用いて積算することで、真の地表面電位に近似した積算波形を実現した。この積算波形を用いることで、電位差信号だけでは判定が難しい長手方向の大きい損傷や連続した損傷、長い鞘管とのメタルタッチなどを鮮明に捕捉できる。図6に鞘管とメタルタッチした個所を調査した際の積算波形と電位差波形の模式図を示す。

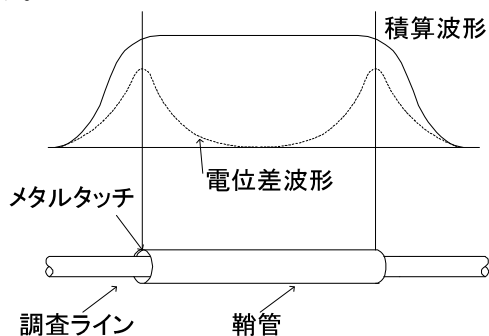


図6 積算波形と電位差波形

Fig.6 Voltage gradient and integrating voltage gradient

## 2-4. スーパーコーディンスの性能と実績

## (1) 性能

表1にスーパーコーディンスの主な性能を示す。また、写真1に調査状況、写真2にスーパーコーディンスで検出した塗覆装の損傷例を示す。スーパーコーディンスは、塗覆装損傷部が空隙や剥がれた塗覆装によって鋼面と土壌が絶縁された場合などを除き、埋設深さ約1.8mにおいてポリエチレン被覆鋼管では $0.1\text{cm}^2$ 以上、アスファルトビニロンクロスなどの瀝青系塗覆装でも $1\text{cm}^2$ 以上の面積の損傷を検知することが可能である。

表1 スーパーコーディンスの主な性能

Table1 Performance of SUPER CODINS

項目	性能	
最小検出能力 <sup>*1</sup>	ポリエチレン被覆鋼管	約 $0.1\text{cm}^2$
	瀝青系被覆鋼管	約 $1\text{cm}^2$
検出可能深さ	約7m	
検査能率 <sup>*2</sup>	ポリエチレン被覆鋼管	約2.5km/日
	瀝青系被覆鋼管	約1.5km/日
調査対象外	露出配管、シールド内配管、水路下配管など	

\*1: 深さ約1.8mの一般的な埋設状況

\*2: 塗覆装の品質、埋設・道路状況などによって変化する

写真1 スーパーコーディンスの調査状況  
Photo.1 Operation scene of SUPER CODINS写真2 検出した塗覆装損傷例  
Photo.2 Coating defect (example)

## (2) 調査実績

スーパーコーディンスは1987年から都市ガスの高圧(1MPa以上)・中圧(0.1~1MPa)パイプラインの調査を開始した。その後、本技術の高精度・高信頼性が認知されるとともにパイプラインの維持・保全の重要性の認識が広がり、水道、石油・ガス井開発、電力業界などからの受注も加わり、現在では総調査延長が4000kmを超えるまで至った。

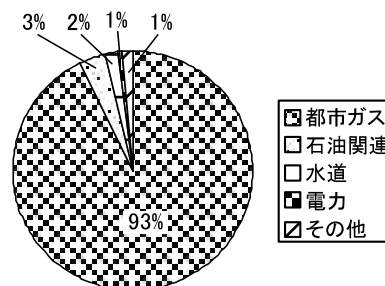


図7 平成11~20年度の事業者別調査延長比率実績

Fig.7 Ratio of survey length according to entrepreneur (1999~2008)

## 3. 交流磁界法による電気防食不良調査「スーパーコーディンステスラ」

埋設パイプラインの他の金属構造物とのメタルタッチ(金属接触)を調査する方法として「磁界法」がある。スーパーコーディンステスラ(以下、テスラ)は、この磁界法を利用したシステムであり、高性能の磁気センサとスーパーコーディンスの信号処理装置を活用し高精度のメタルタッチの調査を可能とした。

### 3-1. 原理<sup>5), 6), 8), 9)</sup>

パイプラインに信号電流が流れると、アンペアの右ネジの法則によりパイプラインの周囲に磁界が発生する。パイプラインの直上に設置された磁気センサに誘起される電圧  $E$  は、管内電流  $I$ 、センサからパイプライン中心までの距離  $z$ 、センサの感度  $k$  を用いて (7) 式のように表される。

$$E = k \frac{I}{z} \quad (7)$$

テスラではこの原理を基に磁気センサにて誘起される電磁誘導電圧を計測することで、パイプラインを流れる信号電流の大きさ、土被り、パイプライン・分岐管の位置や地中構造物（他埋、弁室等）との接触調査を行なっている。

### 3-2. システム構成

テスラは、図8に示すように、磁気センサを搭載したセンシングカーとスーパーコーディンスを信号ケーブルで接続した構成である。センシングカーには指向性のある複数の磁気センサを搭載しており、磁界の3軸成分の検出、パイプラインの埋設深さの計測等、用途に合わせて使い分けている。各磁気センサで検出した信号は、スーパーコーディンスの信号処理装置で処理した後、記録計に記録される。

### 3-3. 特徴

#### (1) 磁気センサ

センシングカーには高感度の磁気センサが搭載されている。この磁気センサは取扱いも簡単で、市販の磁気抵抗素子やホール素子などを使用した磁気センサと同等以上の性能を有している。

#### (2) 信号処理方法

テスラはスーパーコーディンスと同じ位相検波法 (2-3 項参照) を適用している。位相検波法を用いることで極めて高い S/N で信号を測定することができるだけでなく、位相を観測することで信号電流の方向を判別することができる。

#### (3) 用途

テスラはこれまでに述べた技術を応用することで、以下の機能を実現している。

##### ①他の金属構造物とのメタルタッチ個所検知

図8のように、パイプラインの途中で他の金属構造物が接触し、そこから信号電流  $I_b$  が鋼管に流れ込むと、発信器側の信号電流は  $I_a + I_b$  に増加する。この時、接触部付近の誘導電圧  $E$  は、磁気センサと接触部の角度を  $\theta$  (rad) とすると次式のように表わされる。

$$E = \frac{k}{z} \left\{ I_a + \frac{I_b}{2} (1 + \cos \theta) \right\} \quad (8)$$

従って、パイプラインの直上を延長方向に移動して磁気センサの信号電圧を連続的に測定し、検出電圧が変化する地点を探索することにより、接触部を特定す

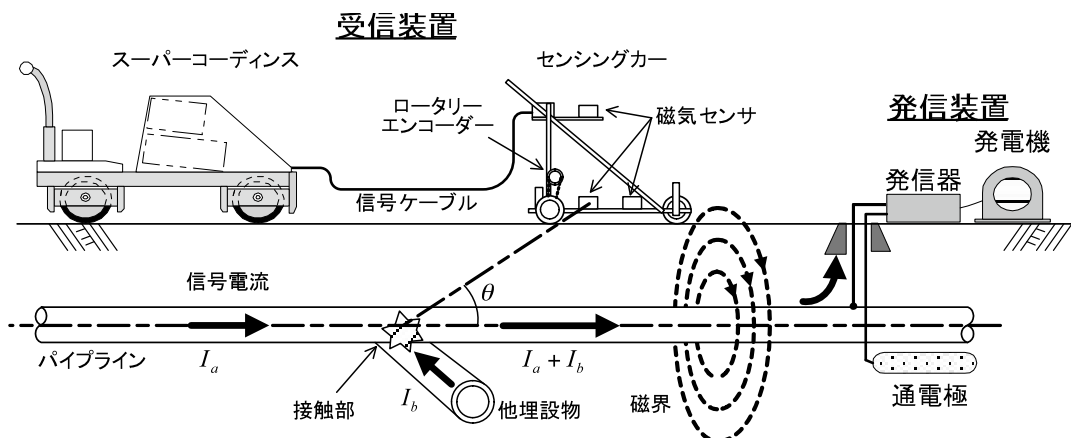


図8 スーパーコーディンステスラの構成

Fig.8 SUPER CODINS TESLA



ることが可能となる。分岐管がある場合も同様の信号の変化を示すため、分岐管の位置検知にも有効である。図9にパイプラインが残置鋼矢板と接触していたときの検出信号の例を示す。

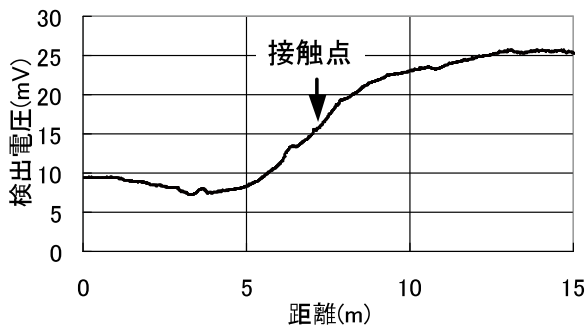


図9 スーパーコーディンステスラの検出例

Fig.9 Measured waveform of SUPER CODINS TESLA (example)

### ②パイプラインの位置検知

図10に示すように、パイプラインを横断するように磁気センサを移動させると、検出信号の横断方向成分  $E_y$  はパイプの中心軸直上で最大となり、また、鉛直方向成分  $E_z$  はパイプ中心軸直上で0となる。従って、 $E_y$  の極大値、もしくは、 $E_z$  の0クロスを探査することでパイプの位置検知が可能となる。

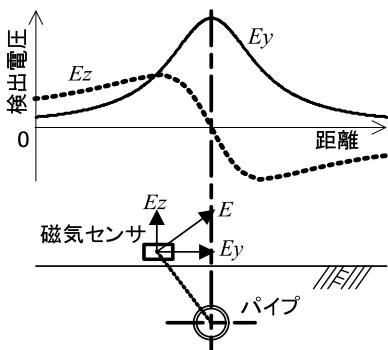


図10 位置検知方法

Fig.10 Method for locating pipeline

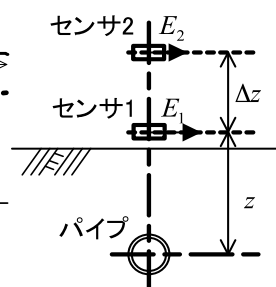


図11 埋設深さ計測方法

Fig.11 Method for measuring depth of pipeline

### ③パイプラインの埋設深さ計測

図11に示すように、パイプの中心軸上に高さを変えた2個の磁気センサを設置し、センサ1とセンサ2の出力信号  $E_1$ ,  $E_2$  と、センサ間の距離  $\Delta z$  より、(9)式を用いてセンサ1からパイプライン中心までの距離  $z$  を求めることができる。

$$z = \frac{\Delta z \times E_2}{E_1 - E_2} \quad (9)$$

### 3-4. 並行パイプライン同士の接触調査方法<sup>9),10)</sup>

従来、磁界法による調査では、調査対象のパイプライン（以下、調査ライン）と近接・並行して敷設されている他のパイプライン（以下、接触ライン）とが接触している場合、その接触位置を特定することは困難であった。この場合、調査ラインと接触ラインを流れる電流は図12のようになる。

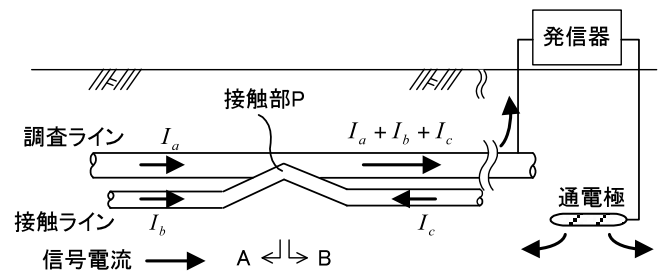


図12 並行管と接触している例

Fig.12 Pipeline contacting with another parallel pipeline (example)

接触部PのA側において、調査ラインと接触ラインを流れる電流は向きが同じであるため、磁気センサには(10)式のように調査ラインと接触ラインの電流を足し合わせた電圧  $E_A$  が誘起される。

$$E_A \approx \frac{k}{z} (I_a + I_b) \quad (10)$$

一方、B側においては調査ラインと接触ラインの電流は向きが逆であるため、(11)式のように電流が相殺された形で電圧  $E_B$  が誘起される。

$$E_B \approx \frac{k}{z} \{ (I_a + I_b + I_c) - I_c \} = \frac{k}{z} (I_a + I_b) \approx E_A \quad (11)$$

即ち、接触部P前後の磁気センサの検出信号はほぼ同じ値となり、信号の変化は観測されない。このことから、磁気センサによる近接した並行管同士の接触部の位置の特定は困難であった。

この問題に対し、二周波同時信号通電法による並行管の接触調査法を開発した。本方法は、スーパーコーディンズに適用した場合と同様に、調査ラインの調査区間の両端に信号周波数  $f_1$  の発信器1、信号周波数  $f_2$  の発信器2を設置して、2つの異なる周波数の信号電流を調査ラインに同時に通電する方法である。

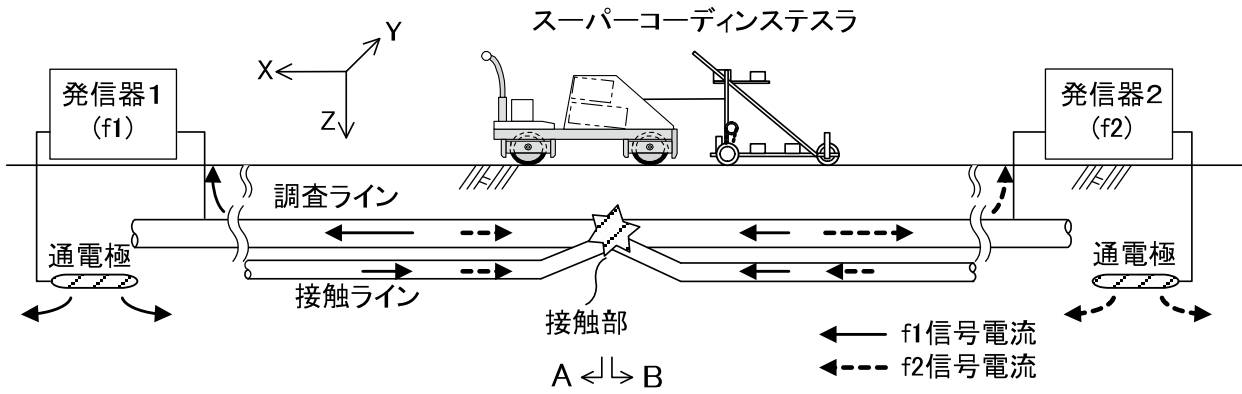


図 13 二周波同時信号通電法による接触調査  
 Fig.13 Method used by two-frequency signals for detecting the contact location

本方法を用いたときの信号電流の分布を図 13 に示す。接触部 P の発信器 1 側 (A 側) において、調査ラインと接触ラインを流れる信号電流は、f1 では逆の向きであるが、f2 では同じ向きである。一方、接触点 P の発信器 2 側 (B 側) において調査ラインと接触ラインを流れる信号電流は、f1 では同じ向きであるが f2 では逆となる。この接触部前後における信号電流の向きの変化が、磁気センサの検出信号にも変化を与える。

まず、調査ラインと接触ラインが水平に並行している場合を考える。調査ラインを横断する方向に磁気センサを走査させると、調査ラインと接触ラインの電流の向きが同じであると、検出信号の横断方向成分  $E_y$  のピーク及び鉛直方向成分  $E_z$  の 0 クロスが調査ラインと接触ラインの間に現れる (図 14(a))。即ち、見かけ上のパイプの位置は調査ラインと接触ラインの間に現れる。一方、電流の向きが逆であると、 $E_y$  のピーク及び  $E_z$  の 0 クロス、即ち見かけ上のパイプの位置は調査ラインから見て接触ラインの反対側に現れる (図 14(b))。

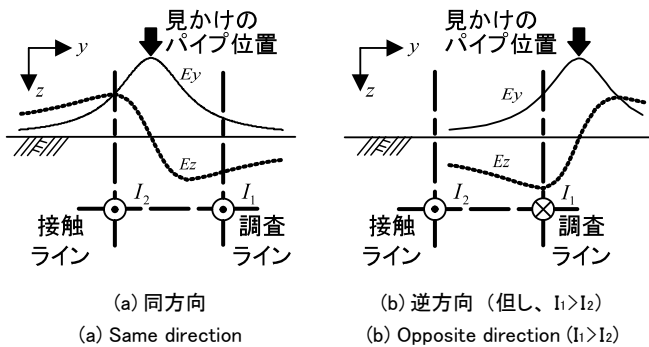


図 14 電流の向きと信号分布 (水平に並行な場合)  
 Fig.14 Directions of signal current and measured waveform

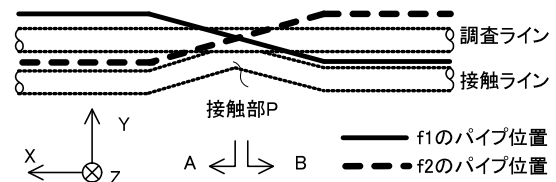


図 15 f1 と f2 の見かけのパイプ位置の軌跡  
 Fig.15 Apparent location of pipeline (f1, f2)

接触部の前後においてパイプライン延長方向に f1 と f2 それぞれの見かけのパイプの位置を調査すると、図 15 に示すように、f1 と f2 の見かけのパイプの位置が異なる地点に現れ、且つ、接触部を境にして f1 と f2 の位置が入れ替わる様子が観測される。即ち、f1 と f2 の見かけのパイプの位置が入れ替わる地点が接触部であると特定することができる。

次に、調査ラインと接触ラインが鉛直に並行している場合は、パイプラインの埋設深さの計測を行うことで接触位置の特定が可能となる。調査ラインの真下を接触ラインが並行している場合、調査ライン及び接触ラインを流れる電流をそれぞれ  $I_1, I_2$ 、センサ 1 から調査ライン及び接触ラインまでの距離をそれぞれ  $z_1, z_2$ 、センサ 1、2 間の距離を  $\Delta z$  とすると、(12) 式に示す埋設深さ  $z'$  が導出される。

$$z' = \Delta z \times \frac{I_1 z_1 z_2 (z_2 + \Delta z) + I_2 z_1 z_2 (z_1 + \Delta z)}{I_1 z_2 (z_2 + \Delta z) + I_2 z_1 (z_1 + \Delta z)} \quad (12)$$

調査ラインと接触ラインの電流の方向が同じであると、 $z'$  は調査ラインと接触ラインの間の値が導出される。即ち、見かけの埋設深さは調査ラインと接触ラインの間に現れる (図 16(a))。一方、電流の向きが逆であると、見かけの埋設深さは調査ラインより浅い位置に現れる (図 16(b))。

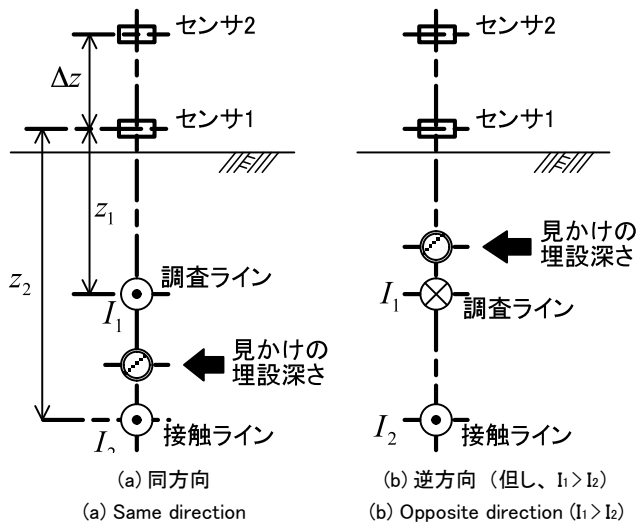


図 16 電流の向きと見かけの埋設深さ（鉛直に並行な場合）  
Fig.16 Directions of signal current and measured depth of pipeline

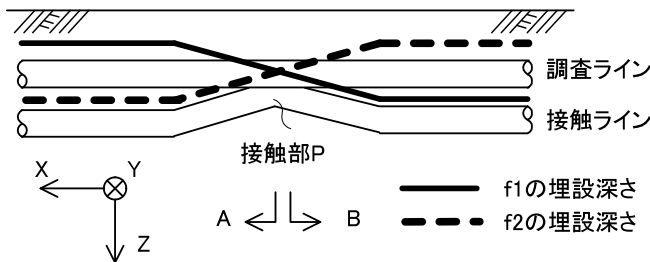


図 17 f1 と f2 の見かけの埋設深さの軌跡  
Fig.17 Measured depth of pipeline (f1, f2)

接触部の前後においてパイプラインの延長方向に f1 と f2 それぞれの見かけの埋設深さを調査すると、図 17 に示すように、f1 と f2 の見かけの埋設深さは異なり、且つ、接触部を境にして f1 と f2 の埋設深さが入れ替わる様子が観測される。即ち、f1 と f2 の埋設深さが入れ替わる地点が接触部であると特定することができる。

このように並行したパイプライン同士の接触について、二つの異なる周波数の信号を同時に通電することにより接触位置を特定する方法を開発した。実際の調査ラインと接触ラインの位置関係（離隔、埋設深さ）や信号電流の大きさは様々であるため、上述の傾向に基づいて判断を行う。本方法を用いることで、並行管の接触調査の精度、信頼性が飛躍的に向上した。

### 3-5. テスラの性能と実施例

#### (1) 性能

表 2 にテスラの主な性能を示す。また、テスラの調査実績、及び、防食電位不良箇所における接触の原因を図 18 と図 19 に示す。

維持管理に電気防食を使用しているパイプラインは多数あり、その定期点検などによって電気防食不良などが見つかった際の原因調査に当社のテスラを使用する事業者が都市ガス事業者を中心に増大している。

表 2 テスラの主な性能

Table2 Performance of SUPER CODINS TESLA

項目	性能
適用埋設深さ	約 3m までの土被り推定可
埋設深さの精度	約 ±10%
接触検知可能物	直交管、並行管、コンクリート構造物の鉄筋など

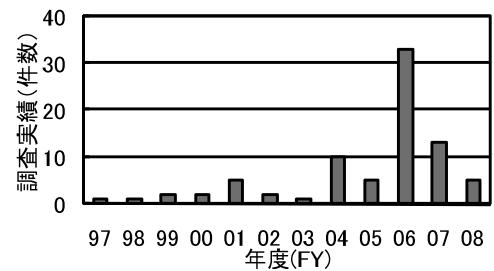


図 18 調査実績

Fig.18 Actual survey of SUPER CODINS TESLA

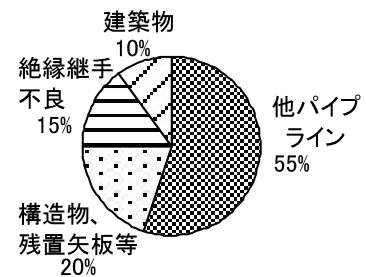


図 19 接触原因内訳

Fig.19 Ratio of cause of contact



写真 3 テスラの調査状況  
Photo.3 Operation scene of SUPER CODINS TESLA



写真 4 メタルタッチ例  
Photo.4 Contact with pipeline (example)



## 4. 電位法と磁界法の適用方法

### 4-1. 電位法と磁界法の特徴

埋設パイプラインの防食診断方法としては、電位法を用いた検査がよく知られている。電位法は塗覆装損傷を検知するために優れた検査方法である。しかし、パイプラインが他の金属構造物と接触している場合、電位法では実際に接触している場所とは異なる地点を損傷と判定してしまうことがあり、磁界法による検査が必要となる。表3に、電位法「スーパーコーディンス」と磁界法「スーパーコーディンステラ」の特徴を比較した。

表3 電位法と磁界法の特徴

Table3 Characteristics of voltage gradient survey method and magnetic survey method

名称	電位法(スーパーコーディンス)	磁界法(スーパーコーディンステラ)
原理	地表面に発生する電位(振幅、位相)を測定	パイプを流れる電流から発生する磁界(振幅、ピーク位置、埋設深さ)を測定
検出端(センサ)	車輪電極	磁気センサ
用途	<ul style="list-style-type: none"> <li>塗覆装損傷検知</li> <li>塗覆装の有無の検知</li> <li>裸管の位置検知</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>接触(メタルタッチ)調査</li> <li>管位置検知(ロケーティング)</li> <li>埋設深さ計測</li> </ul>
共通	<ul style="list-style-type: none"> <li>地上から非開削で、連続・リアルタイムに検査</li> <li>交流信号利用による高いS/N比、迷走電流の影響排除</li> <li>舗装・未舗装に適用</li> <li>2周波数信号の同時通電による作業効率・精度の向上</li> </ul>	

### 4-2. 塗覆装損傷調査への適用

調査対象のパイプラインの塗覆装損傷が小さい場合、磁界法では損傷の検出が難しくなる。一例として、面積 $S=1(\text{cm}^2)$ の塗覆装損傷を電位法と磁界法で調査したときの信号の大きさについて考える。また、土壌抵抗率 $\rho$ を $50(\Omega \cdot \text{m})$ 、パイプラインの土被り $d$ を $1.5(\text{m})$ 、塗覆装厚 $t$ を $0.3(\text{cm})$ 、塗覆装損傷部における管対地信号電圧 $V_p$ を $1000(\text{mV})$ 、管内を流れる信号電流 $I_p$ を $1.0(\text{A})$ とする。このとき、損傷抵抗 $R$ は(13)式により約 $2000(\Omega)$ 、損傷への流入電流 $I_D$ は(14)式により $0.5(\text{mA})$ と求められる。

$$R = \rho / \sqrt{2\pi S} \quad (13)$$

$$I_D = V_p / R \quad (14)$$

これらの値から、電位法と磁界法それぞれで観測される信号は以下になると推定される。

#### (a) 電位法

電位法を適用して塗覆装損傷調査を行った場合、損傷面積 $S(\text{cm}^2)$ と最大地表面電位差 $e(\text{mV})$ とは(15)式の関係が成り立つ<sup>6)</sup>。従って、上記の条件において地表面電位差 $e$ を測定すると、図20(a)に示すように、 $e=0.6(\text{mV})$ のピークを持つ波形として観測される。これは十分検出が可能な値であり、従って、この程度の小さい損傷は電位法の適用が有効である。

$$S = \frac{1}{C^2} \left( 0.2 + \sqrt{0.04 + Ct} \right)^2 \quad (15)$$

$$C = \frac{V_p}{1382d^{1.45}e} \quad (16)$$

#### (b) 磁界法

一方、磁界法を適用した場合、塗覆装損傷部への流入電流 $I_D=0.5(\text{mA})$ であるため、塗覆装損傷前後における管内電流の変化割合は $0.05\%$ ( $1.0\text{A} \rightarrow 1.0005\text{A}$ )であり、管内電流がほとんど変化しないことになる。即ち、図20(b)に示すように、地表面上における磁束密度もほとんど変化せず、この塗覆装損傷を検出することは困難である。従って、磁界法では小さい塗覆装損傷の検出は困難であることがわかる。

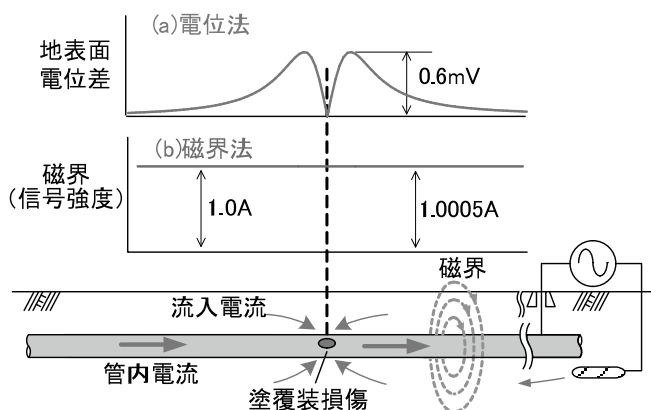


図20 塗覆装損傷調査への各検査法の適用例

Fig.20 Survey for detecting coating defects of applying each method (example)

### 4-3. 接触調査への適用

調査対象のパイプライン(調査ライン)が他埋設物と金属接触している場合、電位法による地表面電位測定では他埋設物の信号を検出することがある。一例と

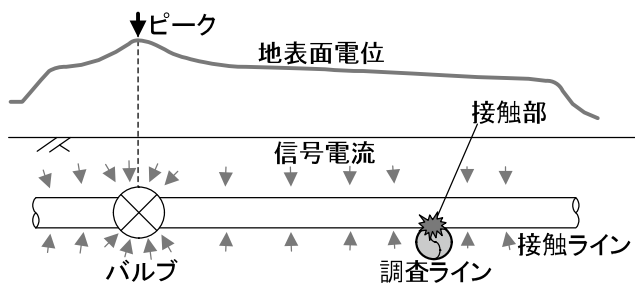
して、調査ラインが他のパイプライン（接触ライン）と接触している場合を図21に示す。

#### (a) 電位法

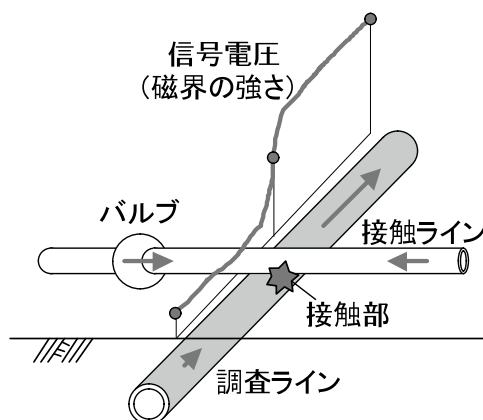
接触ラインが塗覆装のない裸管の場合、信号電流のほとんどは接触ラインに流入する。接触ラインにバルブや継手等があると、その地点で地表面電位のピークが観測されることがある。このような状況では、接触部の位置を特定することができないだけでなく、調査ラインに接触部以外の塗覆装損傷があっても、調査ラインの地表面電位に隠されて損傷が検出されないことがある。

#### (b) 磁界法

磁界法では、信号電流から発生する磁界を検出している。従って、調査ライン直上の磁界の強度を走査することにより、接触ラインから調査ラインへ流入する信号電流の変化を磁界の変化として直接検出することができる。このことが、電位法と異なり、高い精度での接触部の位置の特定を可能としている。



(a) 磁界法  
(a) Magnetic survey method



(b) 電位法  
(b) Voltage gradient survey method

図21 接触調査への各検査法の適用例

Fig.21 Survey for defecting contact locations of applying each method (example)

## 5. 調査事例<sup>11)</sup>

実際の接触の事例を基に、電位法と磁界法で観測された現象についての考察を行った。

### 5-1. 事例1

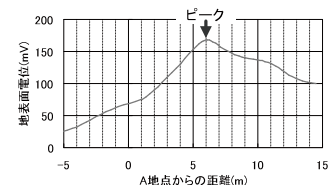
図22に調査の状況写真を示す。当該ラインは、外径150mmのポリエチレン塗覆装鋼管で、Mg陽極により電気防食されている。

図23(a)に電位法による地表面電位分布、(b)に磁界法による信号電圧の測定結果を示す。A地点から6.0mの地点で地表面電位のピーク、及び、磁界の変化が観測されたが、地表面電位のピークはライン直上ではなくラインから垂直に1m離れた地点で観測された。掘削調査の結果、鋼矢板がラインと接触していた。地表面電位のピークには、鋼矢板の端部が位置していると考えられる。

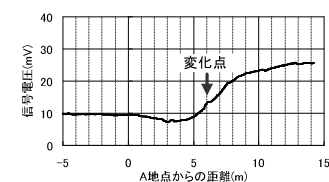


図22 調査状況 (事例1)

Fig.22 Scene of survey (case 1)



(a) 電位法/地表面電位分布  
(a) Voltage at ground surface (voltage gradient survey method)



(b) 磁界法/信号電圧  
(b) Signal amplitude (magnetic survey method)

図23 調査結果 (事例1)

Fig.23 Scene of survey (case 1)

### 5-2. 事例 2

図 24 に調査の状況写真を示す。当該ラインは、外径 200mm のアスファルト塗覆装鋼管で、Mg 陽極により電気防食されている。調査にあたり f1, f2 の 2 周波の信号を通电した。

図 25 (a) に電位法による地表面電位分布、(b) に磁界法による磁界のピーク位置の軌跡を計測した結果を示す。電位法では TB(ターミナルボックス) から -10、11、17.5 m の 3 箇所地表面電位のピークが観測されたが、磁界法では TB から 8 m の地点で f1, f2 の磁界のピーク位置の変化が観測された。TB から 8 m の地点を掘削したところ、近接して並行した铸铁管が接触していた。地表面電位のピークは铸铁管に流入する信号を検出したものと考えられる。最も近い地表面電位のピークでも接触部から 3 m も離れているため、地表面電位のピーク点を掘削しても接触の解消には至らない。



図 24 調査状況 (事例 2)  
Fig.24 Scene of survey (case 2)

### 5-3. 事例 3

残置の裸管と接触していたラインについて、接触の解消前後に電位法による塗覆装損傷調査を行った。その結果、図 26 に示すように、接触解消前に観測された大きな地表面電位は接触解消後には消滅し、本来の塗覆装損傷による地表面電位のピークが現れた。このように接触が存在するラインにおいては接触している他の埋設物による信号に隠されて、本来の塗覆装損傷の検査ができないことが分かる。

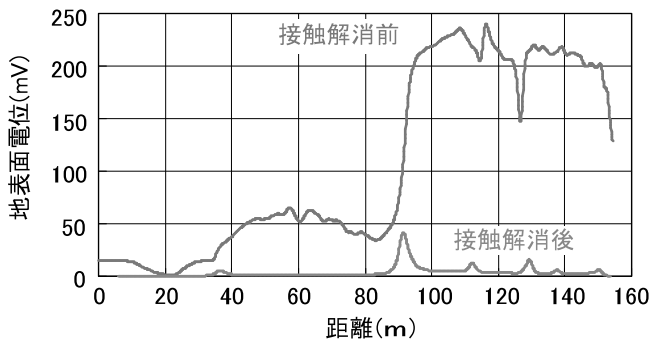


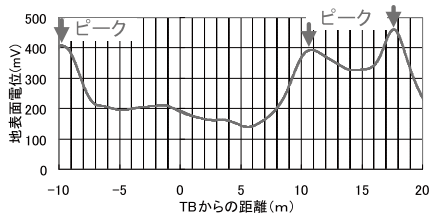
図 26 接触解消前後の地表面電位の変化 (事例 3)  
Fig.26 Voltage at ground surface before and after removing contact (case 3)

## 6. 電位法と磁界法の比較

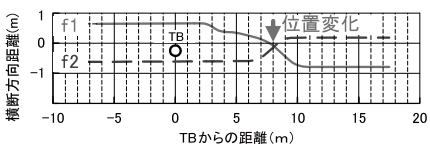
電気防食の障害の種類に対する電位法と磁界法の適用の可否をまとめたものを表 4 に示す。電位法は地表面電位、磁界法は磁界と、異なる対象を計測しているため、防食診断を行う上で、防食障害の原因や現場の状況に応じた方法の選択、あるいは、両者を組み合わせた調査が必要となる。適切な調査法を適用することにより、防食診断の精度・信頼性をより向上させることができる。

表 4 電気防食障害の種類と各検査法の可否  
Table4 Application of each method

電気防食障害の種類	電位法	磁界法
塗覆装損傷	○	×~△ 大きい損傷は検知可能
近接パイプラインとの接触	×	○
残置鋼矢板等との接触	△~○	○
鋼製鞘管との接触	○ 接触場所の特定は困難	△~○ 接触場所の特定は困難
コンクリート構造物の鉄筋との接触	△~○	○



(a) 電位法 / 地表面電位分布  
(a) Voltage at ground surface (voltage gradient survey method)



(b) 磁界法 / ピーク位置  
(b) Peak location (magnetic survey method)

図 25 調査結果 (事例 2)  
Fig.25 Survey result (case 2)

## 7. 結言

天然ガスの普及やエネルギーの自由化、また燃料電池の開発にともなう水素パイプラインの研究開発も進められており、地中埋設パイプラインは、将来に向けて、益々のニーズが期待されている。このため、防食技術やメンテナンス・補修技術、調査・診断技術の果たす役割は、今後、より一層、大きくなるものと予想される。当社は、スーパーコーディンスやスーパーコーディンステスラをはじめとして今日までに蓄積した技術と新しい技術を積極的に開発・導入して、地中埋設配管を保有する多くの企業・自治体からの信頼に応えていけるよう、弛みない努力を続けていく所存である。

## 8. 謝辞

スーパーコーディンスの開発と実用化にあたり、東京ガス(株) 殿には、多くのアドバイスと実験フィールドの御提供を賜り、深く感謝いたします。

### 参考文献

- 1) Ike Solomon: COST EFFECTIVE PIPELINE MAINTENANCE USING MODERN COATING SURVEYS, CORROSION89, 416
- 2) 川上誠、黒田美紀他: 埋設鋼管の塗覆装損傷検査技術の開発、製鉄研究 334 55-61(1989)
- 3) T. Sato, M. Kawakami: DEVELOPMENT OF UNDERGROUND PIPELINE COATING DEFECT INSPECTION SYSTEMS, INTERNAL & EXTERNAL PROTECTION OF PIPES, Proceedings of the 8th international Conference, chapter26(1989)
- 4) 川上誠、鈴木正二: 塗覆装損傷検査システム”スーパーコーディンス”, 材料と環境 Vol. 42 601-603(1993)
- 5) 菊池義和、古賀隆二: 交流法による地中埋設配管のモニタリングシステム「スーパーコーディンス」、NO-DIG TODAY No. 49 22-28 (2004)
- 6) 大平尚、鈴木正二: 交流電位法によるガスパイプライン塗覆装モニタリングシステム、防錆管理 Vol. 42 No. 6 6(1998)
- 7) 大平尚: パイプライン塗覆装調査監視の新しい技術、配管技術 580. Vol144. No3 56-61(2002)
- 8) Nick J. Frost: Electromagnetic techniques to monitor pipe line coating, PIPE LINE INDUSTRY 33-55(1988)
- 9) 古賀隆二: 磁気センサを用いたパイプラインの接触調査方法、検査技術 Vol. 11, No. 2, 73-78 (2006).
- 10) 古賀隆二: 磁気センサを用いた埋設パイプラインの接触調査とその事例、第 54 回材料と環境討論会講演集 d304 (2007).
- 11) 古賀隆二、赤間智典: 埋設パイプラインの接触調査に有効な検査法に関する考察、第 55 回材料と環境討論会講演集 c301 (2008).