磁気センサを用いたドリル先端位置検知精度の改善

中 内 啓 雅*・猪 股 渉**・卯 西 裕 之*³・藤 本 幸 二*⁴

Improvement of the drill head positioning accuracy using magnetic sensors

Takaharu Nakauchi*, Wataru Inomata**, Hiroyuki Unishi*³ and Koji Fujimoto*⁴

ABSTRACT

Precise measurement of drill head position is required to avoid the collision between the drill head and underground facilities, when a horizontal drilling machine is used for constructing underground gas pipes in the city. A positioning technique without special devices on the ground surface has been expected especially beneath the waterway or heavy traffic road, because it is difficult to conduct the measurement for locating the drill head position on the ground surface.

The authors have studied both magnetic and pitch sensors installed inside the drilling tool for locating drill head position, and we have found that alignment of two sets of magnetic sensors is effective to reduce noise in the city which disturbs the natural magnetic field. We have confirmed that the sensors can keep the drill head position with a precision less than 10 cm, when the drill head progresses 12 m along the drill hole. Engineers and workers do not have to walk around just above the underground drilling site to locate the drill head position by using the sensors.

Key words: magnetic sensor, pitch sensor, precise measurement

1. はじめに

近年、市街地などにおけるガス管などの敷設では非開削工法が用いられている。ガス管の敷設の前に、ドリル先端部（以下、ヘッドと呼ぶ）の位置測定を行いながら水平ボーリングする必要がある。その位置測定の際には、例えば Mercer (1998, 1999) が提案したヘッドに

数十 kHz の磁場を形成する発信機を搭載し、地上で受信機を持った測定員がヘッド直上あたりを歩き回り、ヘッドの水平位置を特定した後に深さを測定する手法が世界中で利用されている。楠見ら (1993, 1995) が提案した発信機も同様で、地上にはヘッドの推進ラインをカバーするくらい大型の受信用コイルを設置したものもある。しかしながら、大きな水路のある場所や交通量の多

2004年8月27日原稿受付；2005年3月15日受理
物理探査学会第109回（平成15年度秋季）学術講演会にて一部を発表

* (株)日本ガス協会
〒105-0001 東京都港区虎ノ門 1-15-12
(現 大阪ガス(株))

〒554-0051 大阪市此花区西島 5-11-61
** 東京ガス(株)
〒230-0045 横浜市鶴見区末広町 1-7-7

*³ JFE エンジニアリング(株)
〒230-8611 横浜市鶴見区末広町 2-1

*⁴ JFE テクノリサーチ(株)
〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町 1-1

Manuscript received August 27, 2004; Accepted March 15, 2005.

A part of this paper was presented at the 109 th SEGJ conference, 2003

* THE JAPAN GAS ASSOCIATION.
1-15-12, Toranomom, Minato-Ku, Tokyo, 105-0001, Japan
Now, Osaka Gas Co., LTD.
5-11-61, Torishima Konohana-ku, Osaka, Japan

** Tokyo Gas CO., LTD.
1-7-7, Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama, Kanagawa, 230-0045, Japan

*³ JFE Engineering CO., LTD.
2-1, Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama, Kanagawa, 230-8611, Japan

*⁴ JFE Techno-Research Corporation.
1-1, Minamiwatarita-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki, Kanagawa, 210-0855, Japan

い場所などにおいて、測定員がヘッド直上を歩き回ることができないケースや直上に大型の受信用コイルを設置できない場合が多く、それ故にこのような手法では正確なヘッド位置を検出できない場合がある。中内ら(2000, 2001, 2002)は、Fig. 1(a)に示すように地中の計画ルートを自動的に水平ボーリングし、ガス管などを敷設する『インテリジェント非開削工法』の研究を進めており、上記問題を改善し、市街地における外乱の影響を低減し、水路下など歩行不能な場所においてもヘッド位置を計測可能な磁気センサを搭載した試作機の製作を進めてきた。基礎的な検討における目標精度として、

「距離 12 m 推進に対して、10 cm 以下の誤差」とした。

その他、ヘッドの中にはボーリング中前方に埋設物を検知するための地下レーダシステムが搭載されており、ヘッドから 30 cm 程度前方の金属・非金属管などの埋設物を検知し、破損を防止する試みがなされている。ま

た、同時に土中のヘッド位置データと地下レーダのデータを地上へ通信するための無線通信システムも搭載されている。

地上の水平ボーリングマシン付近に置かれたパソコンには、敷設する管の計画ルートが事前にインプットされる。また、ドリルの推進に伴い、次の推進方法を指示する「推進オペレーション支援」ソフトが入っており、水平ボーリングマシンに直接コマンドを送り込むことができる。コマンドに応じて推進方向を変更するために、ドリルには「方向修正機構」が搭載されている。

本論文では、特に Fig. 1(a)に示すヘッド位置の計測に関する検討内容と基礎的な精度検証実験結果について報告する。

2. 位置測定システム

位置測定システムのデータのフローを Fig. 1(c)に示す。ヘッドにおける磁気センサと傾斜センサの測定値か

b) Prototype of the Horizontal Boring Machine

c) Data flow in a whole system

Fig. 1 Intelligent Horizontal Boring System.

Fig. 2 Coordinate system of the drill head.

らヘッドの姿勢を算出し、推進時の進行量及びヘッドの姿勢から先端の位置を順次積算する演算式を以下に示す。

a) 座標系の定義

演算に用いたヘッドの座標系を Fig. 2 に示す。推進方向を Z、鉛直方向を X、推進方向と水平面内の直交方向を Y 軸とする。

b) 姿勢角の定義

姿勢角は、回転角 α 、傾斜角 β 、方位角 γ からなる。各々の定義を Fig. 2(b) に示す。

c) センサ校正時の定義

磁気センサおよび傾斜センサは 3 軸からなるので、それぞれの軸で校正して使用する必要がある。各々の校正時の定義を以下に示す。

磁気センサ：各軸とも、北（磁北）を向けたときを最大値、その逆方向（磁南）を最小値とする。

傾斜センサ：各軸とも、真上に向けたときを最大値（100 μ T）、真下に向けたときを最小値（-100 μ T）とする。

d) 姿勢角の算出方法

a)～c) に述べた定義に基づいて各姿勢角の計算式を算出する。

回転角および傾斜角の算出方法を、Fig. 3 に示す。ここで X、Y 軸方向の重力加速度をそれぞれ G_x 、 G_y とすると、XY 面内における合成重力加速度 G_{0xy} は、

$$G_{0xy} = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (1)$$

となる。

同様に、Z 軸方向の重力加速度を G_z とすると、XZ 面内における合成重力加速度 G_{total} は、

$$G_{total} = \sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2} \quad (2)$$

Fig. 3 The rotation angle and pitch angle.

となる。ここで回転角は α であり、傾斜角は β である。すると Fig. 3 より、

$$\text{回転角 } \tan \alpha = \frac{-G_y}{G_x} \quad \cos \alpha = \frac{G_x}{G_{0xy}} \quad (3)$$

$$\text{傾斜角 } \tan \beta = \frac{G_{0xy}}{-G_z} \quad \cos \beta = \frac{-G_z}{G_{total}} \quad (4)$$

であるから、回転角、傾斜角の値は以下の (5) (6) 式で求められる。

$$\text{回転角 } \alpha = \arctan \frac{-G_y}{G_x} = \arccos \frac{G_x}{G_{0xy}} \quad (5)$$

$$\text{傾斜角 } \beta = \arctan \frac{G_{0xy}}{-G_z} = \arccos \frac{-G_z}{G_{total}} \quad (6)$$

ここで X、Y、Z 軸方向の磁場強度をそれぞれ B_x 、 B_y 、 B_z とすると、方位角は

$$\tan \gamma = \frac{B_x \tan \alpha + B_y}{\left(B_x - B_y \tan \alpha + B_z \frac{\tan \beta}{\cos \alpha} \right) \cos \beta} \quad (7)$$

で表されるので

これに (3)、(4) の式を代入すると

$$\tan \gamma = \frac{G_{total} (B_x G_y - B_y G_x)}{B_x G_x G_z + B_y G_y G_z - B_z G_{0xy}^2} \quad (8)$$

よって最終的に方位角 γ は次の式で表されることになる。

$$\gamma = \arctan \left(\frac{G_{total} (B_x G_y - B_y G_x)}{B_x G_x G_z + B_y G_y G_z - B_z G_{0xy}^2} \right) \quad (9)$$

以上、3 軸の磁気センサおよび傾斜センサを用いて、ヘッドの姿勢角（回転角 α 、傾斜角 β 、方位角 γ ）を算出することができる。

Fig. 4 Measuring points and each angle.

e) ヘッドの姿勢角とドリルの推進量から積算位置の算出方法

ヘッドの姿勢角とドリルの推進量からヘッド位置の積算位置を算出する方法を Fig. 4 に示す。

Z 方位基準に対する Y 方向の方位角を θ として、測定点 2 箇所 (2 点間距離: L) における測定姿勢角を θ_{n-1} , θ_n とすると, (10) 式に示す平均角度法による計算式から, Y 方向変位 ΔY が求まる。

$$\Delta Y = L \cdot \sin \left(\frac{\theta_{n-1} + \theta_n}{2} \right) \quad (10)$$

ΔY 分の変位量を積算することによって, 基準線からの方位角方向の変位量が求まり, ヘッドの水平方向の位置測定が可能となる。

同様に, 傾斜角を本測定方法に適用して, 基準線からの傾斜角方向の変位量が求まり, ヘッドの鉛直方向の位置測定が可能となる。よって, 水平, 鉛直 2 方向の変位量から, ヘッド位置が算出されることになる。

f) 磁気ノイズの抑制方法

積算位置測定における地磁気の変動による誤差要因は以下の 3 つが考えられる。

- 1) 磁気を帯びた金属媒質の移動により生じる時間的な変動 (道路上を走行する乗用車など交通に伴うもの)。
- 2) 60/50 Hz の商用電源からの磁場による空間的な変動
- 3) 磁気を帯びた金属媒質に生じる自然の地磁気変動による誘導 (磁気を帯びた鉱床や, 埋設金属管などの場合)

1) については, 車両通過の影響があるため, 地磁気計測値の平均化 (平均回数約 20 回程度。1 回/秒で計測可能。), 及び短時間の異常データの削除を行うことにより抑制可能であり, 2) についても商用電源の周波数を制限するローパスフィルタなどで抑制可能である。しかし 3) のような地磁気の空間的な変動による磁気分布の歪に関しては平均化等では抑制することができない。

筆者らは, この地磁気変動による空間歪の抑制方法として, 2 つの磁気センサを利用する Dual Magnetic Sensors 方式 (以下 DMS) を考案した。一方で 1 つの磁気センサを利用するタイプを Single Magnetic Sensor 方式 (以下 SMS) と呼ぶことにする。Fig. 5 に示すように DMS では, 推進方向に沿ってヘッド内に 2 つの磁気

Fig. 5 Configuration of Dual Magnetic Sensors.

センサを一定距離間隔に固定し, この距離間隔に等しいピッチでヘッドを推進し, 磁気センサによる測定を行い, 同一位置における 2 つのセンサの地磁気計測方向の差分からヘッド全体の方向変化を算出する。

以下にその DMS を用いた場合の演算式について説明する。

K 地点における磁気センサの角度をそれぞれ $\theta_{s1,k}$, $\theta_{s2,k}$ とすると (10) 式中の θ_n に相当する角度は次式で求められる。

$$\theta_n = \sum_{k=1}^n (\theta_{s1,k} - \theta_{s2,k}) \quad (11)$$

これを (10) 式に代入すると以下ようになる。

$$\Delta Y = L \cdot \sin \left(\frac{\sum_{k=1}^{n-1} (\theta_{s1,k} - \theta_{s2,k}) + \sum_{k=1}^n (\theta_{s1,k} - \theta_{s2,k})}{2} \right) \quad (12)$$

このように DMS の差分演算処理を施せば, 地磁気の空間歪がある場合でもその影響を取り除き, ヘッドの方向変化のみを検出することが可能となる。

垂直方向の変位量算出に関しては傾斜センサを利用するので, 地磁気の空間的な変動は受けないため, ここでは改善の必要がなかったことを付記しておく。

以上のアルゴリズムを用いた先端位置演算フローチャートを Fig. 6 に示す。

3. 精度確認実験

地表面に掘削を想定した軌道を設置し, 軌道に沿って試作装置センサ部を移動させ, 位置測定精度の基礎的な

Fig. 6 Processing flow chart.

評価を行った。

DMSは2つの磁気センサによる差分方式を用いているため、測定精度を確保するためには、二つの磁気センサの軸アラインメント調整および各軸の感度校正が重要である。アラインメント調整および感度校正は、磁気シールド室内のヘルムホルツコイルで一定磁場を発生して行った。まず、DMSの3軸の磁場測定値から機械的な配置を決めるアラインメント調整を行った。さらに、DMSの3軸各々について、 $-30 \sim 30 \mu\text{T}$ の静磁場中で、校正を行い、各センサのバイアスおよびゲインの個体差を無くした。

以下に示す形状の想定軌道を製作、設置し、試作した先端位置測定システムによる積算位置測定試験及び、試作装置と磁気センサを利用した積算位置測定試験を実施した。

i) 直線推進を想定した直線軌道 (ただし13 m地点で約10 cm変化する直線下りの傾斜あり)。

ii) 水平面の方角変更を想定し、曲線部を有する水平方向軌道。

iii) 深さ方向 (垂直面) の方向変更を想定した曲線部を有する垂直方向軌道。

軌道はアルミ製の架台に設置したベース板 (材木) 上にアルミレールを敷設して製作し、組み立てのネジ等いずれも非磁性の材料を使用した。

実験概略を Fig. 7(a)に示す。センサ部は、軌道に対して常に一定の相対位置関係を維持できるように、Fig. 7(b)に示すような計測用治具上に固定し、計測は治具を軌道に沿って移動させることにより実施した。計測用治具にはトータルステーション (測量器) 用のターゲットを取り付け、トータルステーションにより計測用治具の位置を測量し、積算位置算出結果の検定を行った。磁気を歪める物質として鋼管と自動車を選定し、このような磁性体のない場合との比較を行った。

試験時の条件を Table 1に示す。試験に使用した軌道の寸法、概略を Fig. 8に、軌道風景を Fig. 9に示す。

4. 結果

直線軌道におけるセンサ部 (1センサ) の方位計測結

Fig. 7 Experiment configuration.

Table. 1 Test Condition.

磁気センサ (磁気抵抗型)	3軸×2セット (センサ間距離: 1 m) 計測レンジ: $\pm 100 \mu\text{T}$ Honeywell 社製 HMR3200
傾斜センサ (加速度計型)	3軸×1セット 回転・ピッチ: ± 30 度以内 日本航空電子製 JA28GA
データ分解能 (信号処理後)	方位角: ± 0.05 度 傾斜・回転角: ± 0.01 度
安定性	温度ドリフト: 角度換算 ± 0.1 度以内 (動作温度範囲 $0 \sim 70^\circ\text{C}$ において) ノイズレベル(AC ノイズ): 角度換算 ± 0.1 度以内 (傾斜・回転角に関しては、 0.01 度以内の安定性あり)
測定データ通信仕様	通信方式: RS232C 通信速度: 4800 bps データ転送レート: 50msec、100msec 毎
検出部移動間隔	1m
周辺磁性体構造物	① なし (実験した自然磁場の大きさ(参考)): (上下) $27.71 \mu\text{T}$ 、 (東西): $-0.727 \mu\text{T}$ 、(南北) $31.93 \mu\text{T}$ 。時間変動は約 $0.09 \mu\text{T}_0$ 。 ② 鋼管 (材質: 鉄。口径: 100mm。センサーに対して $20 \mu\text{T}$ 程度の磁気異常を形成する。それによる方向の誤差は約 6 度) ③ 自動車 (センサーに対して $40 \mu\text{T}$ 程度の磁気異常を形成する。それによる方向の誤差は約 12 度)

果を Fig. 10(a)に示す。計測方位は地磁気に対するセンサ部の方向を示しており、ここでは計測開始点(軌道の端部)における方向を基準にした方位変化を示してい

る。計測は直線軌道で行っており、計測方位は常に 0° となるはずであるが、実際の計測においては方向の変化が生じており、空間的な地磁気の変動が存在しているこ

Fig. 8 Schematic view of orbits for testing the device.

(a) Straight line

(b) Line curved in horizontal plane

(c) Line curved in vertical plane

Fig. 9 Picture of orbits.

Fig. 10 SMS Data (Straight line).

とを示している。

センサによる計測方位の変化と、移動量からセンサ部の位置の積算位置演算を行った積算位置算出結果を Fig. 10(b)に示す。

Fig. 11には軌道の途中で他埋設管を模擬した鋼管(口径 100 mm, 長さ 5 m)を設置した場合の計測結果を示す。Fig. 11(a)に示すように鋼管は軌道の下方に離隔 50 cm の位置に軌道に直交する方向に設置している。鋼管の影響によるセンサによる計測方位の見掛け上の変位は Fig. 11(b)の距離 3000~7000 mm の範囲のデータに着目すると、 $4\sim 5^\circ$ となり、Fig. 11(c)に示す SMS 積算位置算出結果も実際の直線軌道から大きくずれ、3 m の積算を行った場合の誤差が 100 mm 以上となる場合がある。

これに対して Fig. 11(c)に示すように DMS による算出方位を元に積算位置演算を行った結果、算出位置の誤差は直線に対して ± 50 mm 以内に収まっており、DMS が地磁気の空間変動の影響を抑制可能であることが確認された。

Fig. 12 に軌道の近傍に自動車を設置した場合の計測結果を示す。Fig. 12(a)に示すように自動車は軌道上の検出部からの最短距離が約 1.5 m となる位置に設置した。実験では、軌道が地表面にあるため、自動車はセンサ部と同一水平面に位置しており、工事を実施した時とは位置関係が異なるが、距離的な条件としては検出部の直上に位置する場合に対応しており、予想される自動車による地磁気変動の影響は十分確認できる条件となっている。

Fig. 12(b)はセンサ単体の計測方位の変化を示しており、自動車の影響による地磁気の変化は 10° 以上と鋼管

Fig. 11 SMS/DMS Data (straight line with a steel pipe).

に比べて更に大きくなっている。Fig. 12(c)には SMS による積算位置算出結果、及び DMS による積算位置算出結果を示す。

SMS による積算位置算出結果では、地磁気分布の歪による見掛け上の方位変化が大きいため 3 m の積算を

Fig. 12 SMS/DMS Data (straight line with automobile).

行った場合、200 mm 以上の位置誤差を生じており、目標精度の実現は困難である。DMS では自動車の影響による見掛け上の方位変動は $\pm 2^\circ$ 前後に抑制されており、SMS の場合に比べ積算位置の算出誤差も小さくなり、3 m の積算での誤差は最大 ± 75 mm であり、十分目標精度を確保することが可能と考えられる。

DMS において、鋼管の存在する場合に対して誤差が増加する原因としては、2つの磁気センサの特性の差等が考えられる。しかし Fig. 11 (b) の距離 8000–10000 mm の範囲のデータに着目すると、鋼管のない部分で Table. 1 に示した安定性を越える誤差が発生する場合があります。磁気に対する特性の差以外に2つのセンサのアラインメントによる誤差も含まれる傾向にあると考えられる。すなわち、2つのセンサの特性差の調整、3軸のアラインメント補正を行えば、地磁気変動による空間歪変動の影響をより低減し、誤差を更に低下できる可能性がある。

Fig. 13に、水平曲線軌道における計測結果を示す。

Fig. 13 (a) は水平曲線軌道の平面図であり、Fig. 13 (b) は SMS 及び DMS により得られた積算位置算出結果を示す。

Fig. 14には、垂直曲線軌道における計測結果を示す。

垂直曲線軌道に関しても、SMS 及び DMS により得られた積算位置算出結果のみを示す。垂直曲線軌道では、センサの傾斜角が変化するため、3軸加速度センサ

Fig. 13 SMS/DMS Data (Curved in horizontal plane).

Fig. 14 SMS/DMS Data (Curved in perpendicular plane).

Fig. 15 SMS/DMS data.
(Curved line in perpendicular plane)

による重力加速度測定値からセンサ部の傾斜角を算出し、その傾斜角と磁気センサの測定値からセンサ部の磁北に対する方位角を算出している。各図は、算出された方位角の変化から得られる水平方向の積算位置算出結果を示す。

垂直曲線軌道において、垂直方向位置をセンサ部の3軸加速度センサ（重力加速度計測）による傾斜角及び回転角の測定値から積算位置演算を行った結果を Fig. 15 に示す。この場合、磁気センサを用いないため SMS と DMS の結果はほぼ同じであった。

今回の軌道試験では、センサの回転角を 0° （十二時姿勢）で行ったが、方位角 γ は(7)式からも判るよう

Fig. 16 Power line and No power line.

に、回転角 α が変動しても姿勢変換演算によって測定可能である。ただし、回転角が大きくなると(7)式中の $\tan \alpha$ で効いてくるので、演算誤差が大きくなる。 $\tan \alpha < 0.3$ 程度であれば($\tan \alpha$ の項の影響小)測定精度が十分確保できるので、 $\tan 15^\circ = 0.27$ であることから、回転角を十二時姿勢に対して、 $\pm 15^\circ$ 以内を測定許容範囲と結論づけた。

さらに、電力ケーブルの通電有無によって影響があるかどうかについても調べた。Fig. 16(a)に直線軌道上の電力ケーブルの設置位置を示す。Fig. 16(b)に通電した場合と通電しなかった場合の比較データを示す。通電した場合と通電しなかった場合とではほとんど違いが見られなかった。

5. 議 論

自然の地磁気の空間変動の影響により、直線軌道であっても若干積算位置データにも変動が生じており(例: Fig. 12)、積算を行う距離が大きくなれば誤差が増加すると考えられる。

水平曲線軌道においても、直線軌道の場合と同様の傾向を示し、SMSでは周辺磁性体構造物の影響を顕著に受け、目標精度の確保が困難と思われるが、DMSを用いれば周辺磁性体構造物による地磁気の空間歪の影響が低減でき、積算位置算出精度を向上し、目標精度の確保

が可能であるとの見通しが得られた。

垂直曲線軌道においても直線、水平方向軌道と同等の結果が得られており、鋼管や自動車が近接し、地磁気の空間変動が大きい場合でも目標精度の確保が可能であるとの見通しが得られた。

今回の軌道実験は、南北に近い(磁北から西に 20° 程度)ラインで行ったが、東西方向にヘッドが推進し、(7)式の右辺の分母がゼロに近づく場合の測定誤差を議論する。仮に $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 90^\circ$ として、東西から方位が 0.1° ずれて推進した場合の方位角演算を考えると、 $\tan \gamma = \tan 89.9^\circ = B_y/B_z = (\text{約 } 3.0 \mu\text{T} / \text{約 } 0.05 \mu\text{T})$ オーダーの演算を行うことになり、磁気センサの精度($0.05 \mu\text{T}$ 程度)を考慮すると最大で 0.1° 程度の誤差を生じることになる。しかしながら、本方位角誤差は1m推進した時の水平方向誤差換算で $1\text{m} \times \tan 0.1^\circ = 1.7\text{mm}$ 程度であり、測定精度において問題にならないレベルであると考えている。また急激な曲がりのある場所においてもDMSの採用により誤差の低減が見込められると思われる。

電力ケーブルの通電有無による影響については、使用した磁気センサにおいて、遮断周波数17Hzのローパスフィルタを持ち合わせている上、計測データの平均化処理を行っているため、電力ケーブルに励起された60Hz(商用交流)の交流磁場の影響を受けなかったと思われる。

6. 結 論

DMS 積算位置計測手法を考案し、計測システムを試作した。

比較的磁気変動の少ない場所においてDMS 積算方式で位置測定を行った場合、直線軌道では、ほぼ軌道値に一致した位置計測を実現しており、ヘッド位置測定精度を確保できることを確認した。

DMS 積算方式では、1m間隔に配置したDMSの同一計測箇所における差分演算処理を行うことによって、地磁気の空間歪みの影響を軽減できることが確認できた。

例えば、ドリルの近傍に自動車・鋼管埋設物等の大きな磁性体構造物が存在する場合、DMS 積算位置測定により、目標精度 $\pm 10\text{cm}$ 程度でのヘッド位置測定が可能であることを確認でき、目標仕様が達成できたと考える。

今後は、磁気シールド室内で校正したDMSを現場で適用した際に、2セットのセンサ間に一定の感度ずれが生じた場合、直線軌道における2セットのセンサ間の差分処理から感度ずれを自動補正する等現場適用における測定誤差を低減する検討を行いたい。

謝 辞

本研究は、1998年度から2003年度にかけて社団法人日本ガス協会が経済産業省より受託した『ガス導管漏えい対策技術開発事業』の中で検討されたものである。ガス導管漏洩対策技術開発特別委員会メンバーとして参加

しておられた，東京工業大学 渡邊隆名誉教授，東京大学 新井民夫教授，国土館大学 金成英夫教授，電気通信大学 荒井郁男教授，下水道管渠推進技術協会 石橋信利前常務理事には，本開発を行うにあたり有益なご指導を賜った。

また，日本ガス協会のワーキングメンバーとして参加しておられた，東京ガス(株)南智之氏，若狭匡輔氏，大阪ガス(株)森崎弘康氏，東邦ガス(株)高坂正道氏，深津彰省氏，西部ガス(株)泉泰則氏には有益な助言を頂いた。

本稿執筆にあたり匿名の査読者からは有益なご意見を頂いた。ここに謝意を示す。

参 考 文 献

楠見晴重・谷口敬一郎・加々美幸一 (1993)：電磁誘導法による推進管の探査方法について，物理探査，**46**, 3, 175-182.
楠見晴重・加々美幸一・田中英之 (1995)：電磁誘導法による

傾斜した小口径管の探査に関する研究，物理探査，**48**, 2, 99-106.

Mercer, John E. (1998)：“Locating systems for horizontal directional drilling - Part 1,” No-Dig Engineering, **4**, 5, 2-4.

Mercer, John E. (1999)：“Locating systems for horizontal directional drilling - Part 2,” No-Dig Engineering, **5**, 1, 6-11.

中内啓雅・林 光俊・長谷川良一・太田和幸 (2000)：インテリジェント非開削工法の開発，物理探査学会第103回学術講演会講演論文集，181-184.

中内啓雅・林 光俊・長谷川良一・太田和幸・野津俊光 (2001)：インテリジェント非開削工法の開発—他埋設物検知システム：レーダ画像処理アルゴリズムの開発—，物理探査学会第104回学術講演会講演論文集，213-219.

中内啓雅・林 光俊・飯塚健二・野津俊光・上坂進一 (2002)：インテリジェント非開削工法の開発—他埋設物検知システム：レーダ画像処理アルゴリズムの開発その2—，物理探査学会第106回学術講演会講演論文集，21-24.