

孔内方位計測技術に関する基礎的検討

大橋武一郎・莊司泰敬

The consideration on the Orientation Measurement in a Borehole

Takeichiro OHHASHI and Yasunori SHOJI

Abstract

Knowing the measuring points in the boreholes is important to conduct a various kind of downhole surveys such as seismic tomography or 3D survey. It is also important to know the orientation of the sensors lowered down into the boreholes if the sensors have the directivity.

Some magnetic and angular velocity sensors are used to measure the azimuth of the sonde in vertical boreholes. However, a tilt sensor is essential as well as the directional sensors in case the boreholds are not vertical. This is because of the requirement to determine the three angles, namely the Eulerian angles that represent the tilt angle of borehole, the direction angle of tilt and the rotation of the sonde in the borehole.

Although a number of examples that measured the orientation in the boreholes are published, we could seldom find the discussion on the problems or the errors in the measurement. Therefore we did the theoretical consideration and some experiments to find the most suitable method.

A 2-axis magnetic sensor is only used to determine the azimuth angle on the certain planes such as horizontal plane unless the tilt of the plane and the dip angle of earth magnetic field are known. However, in case the tilt angle is small, the same sensor might be also applicable to use even in a tilt borehole. We estimated the error of azimuth angle with the formula to be applied in the vertical condition (Fig. 7).

Generally, when an angular velocity sensor is applied as a directional sensor, and the offset drift of the sensor cause serious problem. The error in measured angle might increase with time. This is caused by the accumulation of the offset in the process of the integration of the angular velocity to calculate the angle from the initial direction. Therefore we studied the factors that might affect to the offset as well as the basic characteristics such as its sensitivity by using the vibrating gyro developed recently for the car navigation. It became clear that the dominant factors that affect the offset values are the magnetic field and the temperature. The influence by magnetic field can be reduced by materials with high magnetic permeability such as amorphous metals or permalloys (Fig. 4). However, it is hard to reduce the influence caused by the temperature changes, for the characteristics affected by the the temperature dependence is very complicated with the hysteresis. Furthermore its characteristics varies depending on the sensor itself (Fig. 5). The sensitivity does not change even in slower rotation of the order of a few times of the spins speed of the earth (Fig. 2). The output voltage of the sensor

varies depending on the angle between the axis of rotation and the axis of sensor, which can be theoretically expected (Fig. 3). Therefore if any effective way to reduce the offset drift caused by the temperature, the sensor would be able to use as the directional sensor.

For the orientation measurement in a tilt borehole, it is required to measure the two orthogonal components of the tilt and three orthogonal components of the magnetic field or angular velocity. We determined the Eulerian angles from these measured values and then we ascertained the applicability of this formula by the experiment with the provisional sondes incorporating the sensors. The results demonstrated that the Eulerian angles can be practically determined under the condition of the temperature changes within a couple of degrees (Fig. 8 and Fig. 9).

We convinced that measuring the orientation in the boreholes is one of the useful technique for the various surveys and the monitoring and this remand would become more important from now on.

1 まえがき

ボーリング孔を利用して種々の計測を行う場合に、孔内の測定点の空間的な位置を把握しておかなければならないことが多くある。例えば、弾性波の伝播時間を用いるサイズミックトモグラフィでは、解析に必要な起振点と受振点の距離を正しく計算するためには、これらの2点の位置を正確に求めることが必要となる。また、指向性のあるセンサを用いて計測する場合には、センサがどのような方向に向いているかを知ることが必要である。これらの要求に応えるには、孔内における方位計測の技術が不可欠である。

一般に、方位を計測する代表的なセンサとしては、磁気センサと角速度センサが知られており、孔内における方位計測においても、これらのセンサが利用されている。また、傾斜したボーリング孔内におけるセンサの向きは、ゾンデがどの方向にどれだけ傾斜しているか、また、孔軸まわりにどれだけ回転したか、が判らないと決定することができない。そのために、方位センサの他に傾斜センサをも併せて用いることが必要になる。

これまでに、これらのセンサを用いて、孔内において方位計測が行われているが、計測する上で考慮すべき事項や原理的に生じるであろう誤差などについて議論された例は、ほとんど見受けられない。

本報文では、上記の方位センサや傾斜センサを用いて孔内で方位を計測する上で、留意すべき事項や原理的に生じる誤差について、理論的な考察を行うとともに、ゾンデの模型を用いて、誤差の検証のための実験を行った結果について述べる。

2 方位センサのみを用いる孔内での方位計測

2・1 方位計測に用いるセンサ

(1) 方位計測に用いるセンサの概要

鉛直孔では、ゾンデ内の計測用センサの向きは、水平面内の方位によって定められるので、水平面内の方位を測るセンサを用いればよい。ただし、複数のゾンデを連結して用いる場合には、各ゾンデは孔軸まわりに独立して回転すると考えられるので、個々のゾンデ内のセンサの向きをすべて計測することが必要となる。

このような方位計測では、一般に、地磁気の水平面内における直交2成分を測定するか、孔口において基準となる初期方位を定め、その方向からの相対角度を求めるかのいずれかの方法が採られている。地磁気成分を測る方法では、2軸磁気センサが用いられ、相対角度を測る方法では、多くの場合、孔軸を中心とするゾンデの回転を測るように配置された角速度センサが用いられる。

(2) 方位計測に用いる磁気センサ

磁気センサには、動作原理の異なるいろいろのものがあり、工業計測や医療計測などの広い分野で利用されているが、孔内で用いる方位センサとしては、少なくとも次の条件を満たすことが必要であると考えられる。

- ① 地磁気を検出できる十分な感度と分解能をもっていること。
- ② 特定した方向の成分が測定できること。
- ③ ゾンデ内に収納できる大きさであること。

これらの条件ならびに比較的安価で簡単に製造できるという理由によって、方位センサとしては、ほとんどの場合、フラックスゲート型磁気センサが利用されているが、最近では、半導体技術を利用してモジュール化した磁気薄膜型磁気センサなどが使用されるようになった。

磁気センサは、機械的な駆動部が無いので故障が少なく、簡便に利用できるために、従来から方位センサとして広く使用されているが、周囲に金属などの地磁気を乱すものがあると使用できないことは最大の欠点である。

(3) 方位計測に用いる角速度センサ

角速度センサとして古くから知られているものとしては、回転しているコマに働くコリオリの力を計測するジャイロがある。最近では、ガスレートジャイロや、精度の良い光ファイバジャイロなどのように、原理や特徴が異なる種々のジャイロが市販されている。振動体に働くコリオリの力を計測する振動ジャイロは古くからあったが、最近になって感度やドリフト特性などが改善され、性能が大幅に向上した。このように、角速度センサにはいろいろの方式のものがあ、り、分解能、最小検出感度、形状、寸法などがさまざまである。しかし、どの方式のセンサにおいても、程度の差こそあれ、温度変化や時間の経過に伴うオフセット値の変動は無視できないようである。

角速度センサは、磁気センサとは異なり、金属などの影響は受けず、磁気センサが利用できない環境でも使用できることは、孔内での方位センサとしての大きな魅力である。しかし、角速度を計測しているため、方位を求めるには、一定時間間隔でサンプリングして、これを積分して角度に換算しなければならない。そのために、部分的に方位を求めなくても良い区間があっても、計測を開始したら継続してサンプリングを行うことが必要である。このことは、必要な位置でのみ計測すればよい磁気センサに比べると扱いにくい点である。また、初期値を測定してからセンサのオフセット値が変動すると、センサの出力として積分される。たとえ、変動量は小さいと

しても累積されるので、計測時間が長くなればなるほど大きな誤差を生じることになる。このため、従来のジャイロを用いた方位センサでは、電源投入後、安定するまで数時間待ってから計測することを余儀なくされたり、1、2時間以内に計測を終了させねばならないというような制約が課されることも多かったようである。

上記のように、磁気センサと角速度センサは互いに補い合うという特徴を有しており、目的に応じて選定することが望ましい。

2・2 2軸磁気センサによる方位計測における誤差

本来、2軸磁気センサでは、原理的には、水平面内における方位しか計測できない。しかし、実際には、厳密に鉛直といえるボーリング孔は少なく、傾斜がわずかでほぼ鉛直とみなさせるような場合には、あまり問題にしないで2軸磁気センサを利用することが多いようである。しかしながら、この2軸磁気センサによる方法を用いる場合に、ボーリング孔が傾斜していることが、方位の計測に及ぼす影響の程度を把握しておく必要があると思われる。

2軸磁気センサは、磁場成分を検出する軸（以下、磁気センサ軸と呼ぶ）を水平面内で互いに直交する2方向にとる。一般に、方位角 β は、磁北と磁気センサ軸の1つがなす角度で表す。 $\beta=0$ のとき、北を向いている磁気センサ軸を ξ 軸とし、西を向いているセンサ軸を η と

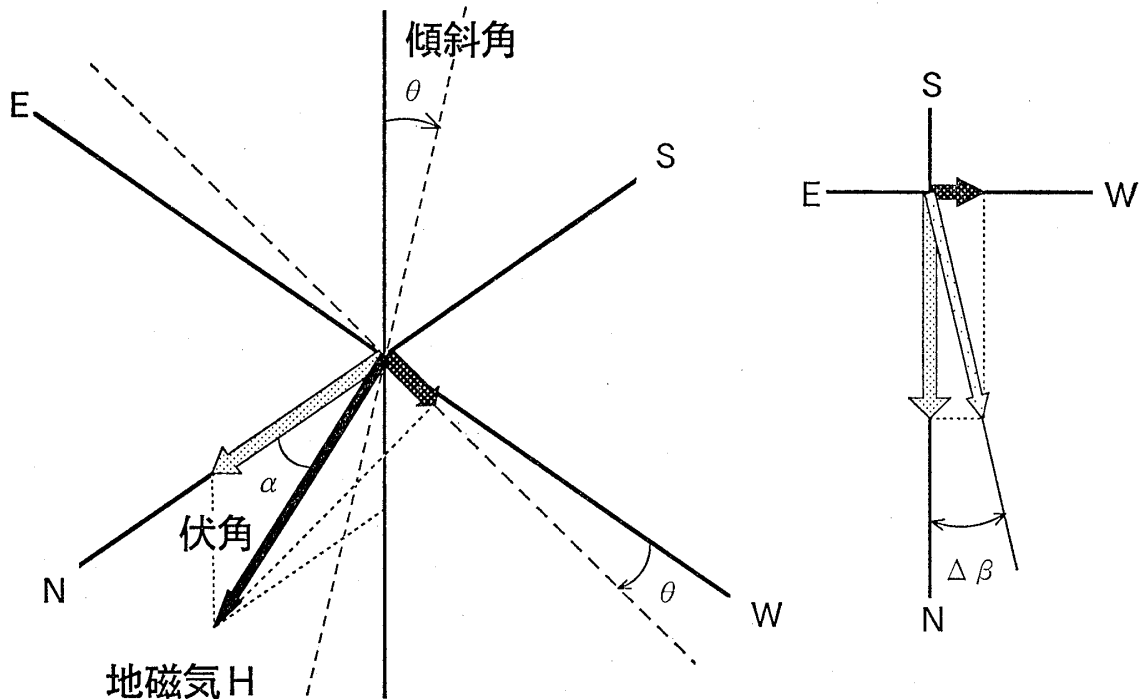


図-1 磁気センサが傾いたときの方位測定誤差 ($\beta=0$ の場合)

Fig.1 Measured azimuth error when the magnetic sensor is tilted

する。それぞれの軸の方向の磁場成分を H_x および H_y とすれば、方位角 β は次式で表される。

$$\beta = \tan^{-1}\left(-\frac{H_y}{H_x}\right) \quad (1)$$

ボーリング孔が鉛直で、ゾンデが傾いていない場合には、 H_x および H_y は水平面内の磁場成分であり、(1)式によって求められた方位角は、原理的には正しい値となる。

しかしながら、ボーリング孔が傾斜しているときには、それに応じてゾンデも傾き、 H_x および H_y は、水平面内の成分のみではなく、鉛直成分をも含み、それに応じた方向の成分が計測される。それにもかかわらず、計測された値を水平成分の値として、(1)式から方位角を求めると誤差が生じることになる。たとえば、図-1に示すように、 $\beta=0$ 、すなわち、 ξ 軸が北、 η 軸が西にあるときに、ゾンデが西方向に傾斜（図-1では θ として示す）すると、地磁気の鉛直成分を検出するようになり、それまでゼロであった η 成分は、ゼロではなくなる。しかし、このとき、 ξ 軸の方向はもとのままであるので、 ξ 成分には変化はない。これらの成分の比から計算される方位角は、図中に示す $\Delta\beta$ として求められることになる。すなわち、 ξ 軸の方向が、実際には磁北の方向にあるにもかかわらず、 $\Delta\beta$ だけ西に回転した方向にあるという結果が得られることになる。

なお、傾斜することによって $\Delta\beta$ がどの程度の大きさになるかを定量的に示すためには、ボーリング孔が傾斜している場合に、方位を記述する座標系を定め、測定値（この場合は H_x および H_y ）を方位角や傾斜角で表すことが必要になるので、これについては後節で論ずることとする。

2・3 角速度センサによる方位測定

角速度センサを用いて正確な計測を行うためには、オフセット値の変動の影響を受けにくい方法を見出すことが重要である。さきに述べたように、角速度センサにはさまざまなものがあり、センサの種類によって得られるデータは異なると考えられ、目的に応じて選定することが必要である。しかしながら、ここでは、角速度センサの種類によらず、重要と思われる事項を具体的に検討することにし、振動ジャイロをその1例として採りあげることとする。このセンサは、他のセンサに比べて小型で、感度や安定性などの性能も良好であることから、小孔径のボーリング孔内で使用するに適していると考えられたからである。

検討に用いた振動ジャイロは、自動車のナビゲーションシステム用として開発されたものである。したがって、必ずしも孔内方位計測で要求される性能が保証されているというわけではない。そこで、実際に孔内方位計測に使用できるかどうかを評価するために、以下の事項について調べた。

2・3・1 センサの出力感度

ゾンデが孔内を昇降する際には、ゆっくりと回転しながら移動することも考えられるので、それを検出できる感度について確認しておく必要がある。そこで、センサを回転台に乗せてゆっくりと一定速度で回転させ、回転台の角速度と出力電圧の関係を調べた。その結果は、図-2に示すように、メーカーの技術資料には示されていない小さい角速度の範囲においても直線性が保たれており、感度も等しいことが確認された。すなわち、1分間に1度程度のゆっくりとした回転の場合でも、正しく検出できる感度と分解能があり、この点では、十分な性能を有していることが確かめられた。

しかし、ボーリング孔が傾いている場合、角速度センサは、角速度を検出する軸（以下、センサ軸と称す）を中心とする回転だけでなく、独楽の歳差運動のように、センサ軸とある角度を持った軸のまわりに回転することを考えておく必要がある。そこで、センサ軸（ ξ 軸）と回転の中心軸（Z 軸）のなす角 θ を一定に保ちながら、

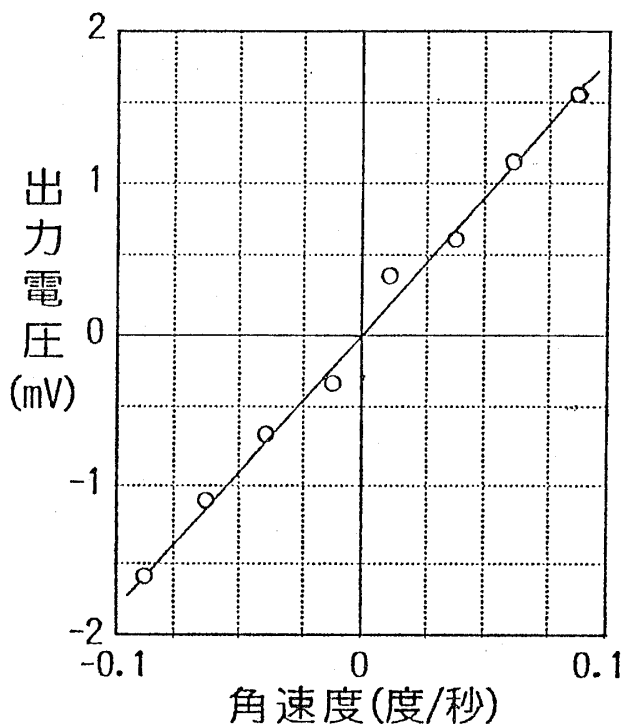
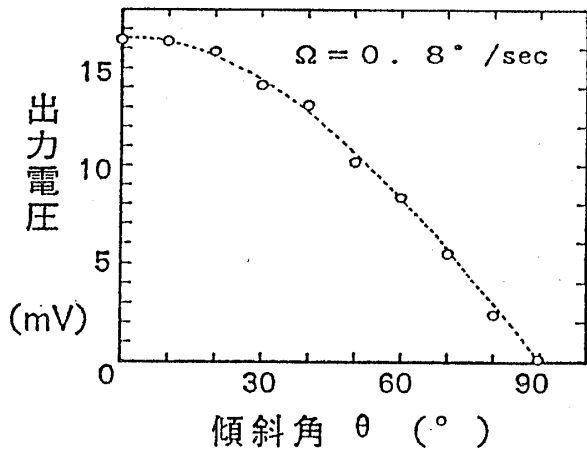
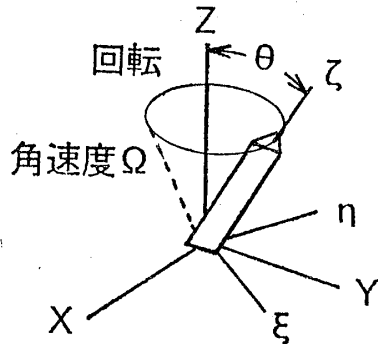


図-2 角速度と出力電圧との関係（感度特性）

Fig.2 Relation between angular velocity and output voltage (Sensitivity)



一定の角速度 ($0.8^\circ/\text{sec}$) でセンサを回転させて、出力電圧と角 θ との関係を探った。このように回転させた場合のセンサの出力は、理論的には $\cos\theta$ に比例する。測定された結果は、図-3に示すように、ほぼ理論通りであることが確認された。センサの出力が $\cos\theta$ に比例することから、ゾンデが傾斜していても、その傾斜角が小さければ、センサの出力は鉛直の場合とほとんど変わらないと考えてよいであろう。たとえば、5度傾斜しているとした場合でも、出力は約0.5%小さくなるだけであり、この程度の傾斜は、実用上、無視できる大きさといえるであろう。



2・3・2 角度の表示—積分による角度への換算

角度の表示についての実験においては、センサの出力をA/D変換し、一定の時間間隔でサンプリングしてコンピュータに入力し、データをサンプリングするごとに積分し、基準方向からの角度をリアルタイムで計算して表示するようにした。表示される角度と実際に回転した角度とを比較すると、0.1度以内の誤差で表示されることがわかった。しかしながら、当然なことではあるが、仕様を越える早い角速度で回転させると、数度以上の誤差が生じた。また、初期設定後、30分以上経過すると、センサが静止しているにもかかわらず、表示角度が時間とともに増大する現象が観測された。これは、オフセット電圧が変動したためと考えられる。

$$V(t) = \beta(\dot{\phi} \cos\theta + \dot{\Psi})$$

図-3 センサと回転軸のなす角と出力電圧との関係
Fig.3 Relation between angle of θ and output voltage

2・3・3 センサのオフセット電圧の変動要因

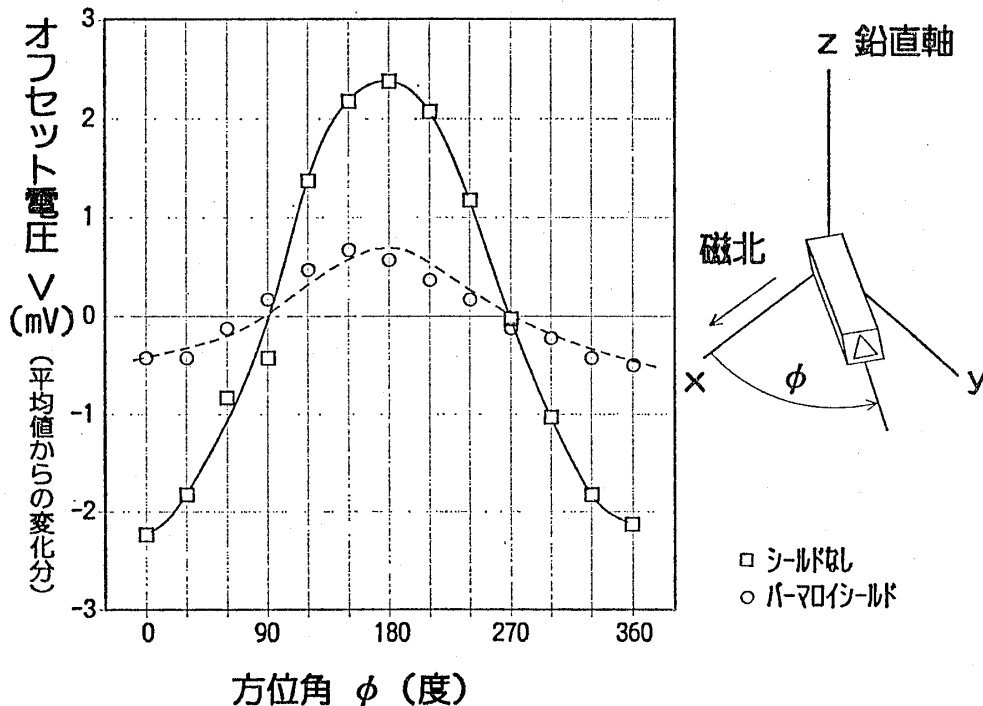


図-4 センサの方位とオフセット電圧との関係

Fig.4 Relation between azimuth of sensor and output voltage

オフセット電圧を変化させる最も大きな要因は、温度変化であることがわかった。また、磁場が加わると、その大きさに応じてオフセット電圧が変化することも明らかになった。したがって、温度を一定に保持し、さらに磁気シールドして、これらの要因を除去くと、オフセット電圧は変動せず、センサが静止している限り、角度は一定値を示すことが確認された。したがって、このセンサでは、他の要因があるとしても、無視しても差し支えないと考えられる。

(a) 磁場の大きさとオフセット電圧の関係

図-4は、センサ軸の方向を水平面内で 30° ごとに変えて、静止時のオフセット電圧を測定した結果を示したものである。図中の実線は、オフセット電圧と水平面内の方位角 ϕ との関係を示したものである。オフセット電圧が正弦曲線的に変化していることがわかる。その変化の大きさは最大で 5mV 程度で、角速度に換算すると、 $0.25^\circ/\text{sec}$ に相当する。この値自体はそれほど大きくないと考えられるが、累積したときの影響は大きい。センサ軸が磁北の向きにあるときには最小値、逆向きで最大値をとることから地磁気の大きさと関係していることが推定された。そこで、センサをパーマロイ板で覆い、磁気シールドして同様の実験を行うと、同図中の波線で示すデータが得られた。磁気シールドによって、オフセット電圧の変化幅が小さくなっていることから、地磁気の大きさに応じて、オフセット電圧が変化するものと判断した。さらに、センサに磁石を近づけてもオフセット電圧が変化することを確認した。これらのことから、オフセット電圧が磁場に影響されることが判明した。しかし、センサを磁気シールドすることによって、比較的容易に無視できるほどの大きさまでに軽減できることもわかった。この振動ジャイロは、振動体が強磁性体でできているために、磁場の影響を受けやすいものと考えられる。他のセンサを使用するにあたっては、この磁場の影響は確認しておくべき事項である。

(b) 温度変化に伴うオフセット値の変化

センサを恒温槽に入れて、槽内の温度を変えながらオフセット電圧を測定した。このようにして得られたオフセット電圧と温度との関係（以下、温度特性と称す）を図-5に示す。この図から明らかなように、このセンサの温度特性は非線形であり、ヒステリシスもみられる。また、若干個の同種のセンサの温度特性を調べたが、類似の傾向を示しているが、個々の温度特性はかなり異なっていることが判った。したがって、2つのセンサの差分をとって、温度によるドリフトを補償することは困難である。また、振動体の温度を直接計測することは簡

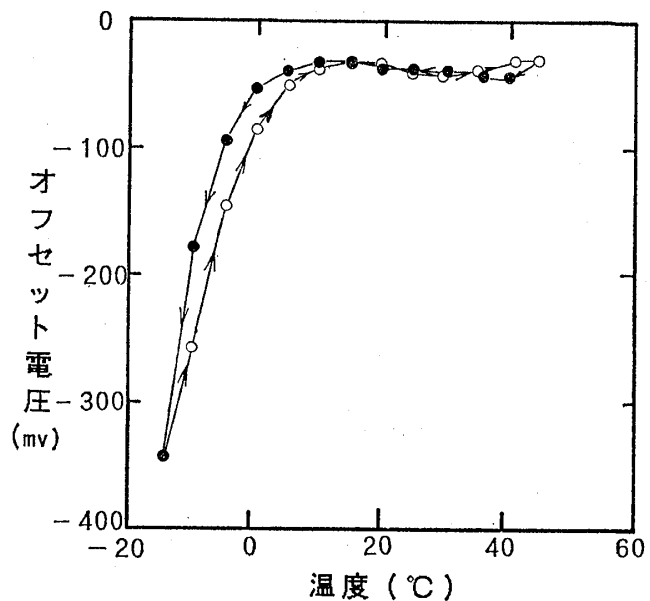


図-5 温度とオフセット電圧との関係 (温度特性)

Fig.5 Relation between temperature change and output voltage (Temperature coefficient)

単ではなく、どの位置の温度を計測すれば最もドリフト量との相関が良いのか不明であること、および、熱平衡に達するのにある程度の時間を要するために、温度が変化する速度によってもオフセット電圧の変化の様子が異なることなどから、個々のセンサの温度特性を正確に求めることは難しく、温度を計測してオフセット値を補正することは現実的ではないことが判った。

3 方位センサと傾斜センサの両方を用いる方法

3・1 センサの組み合わせ

さきに述べたように、傾斜孔においては、方位センサと傾斜センサの両者を用いる必要がある。方位センサとして磁気センサを用いる場合は、地磁気鉛直成分も測定する必要があるため、3軸磁気センサを用いる。角速度センサを用いる場合は、センサ軸が孔軸と一致するようにゾンデ内に配置する。

これらのセンサを用いて方位を計測する方法は、原理的には、鉛直に近い孔でも水平に近い孔でもあまり変わらない。しかし、実際の装置を製作する場合には、方位を測定しようとする範囲で高い感度が得られるように、最適なセンサの数や配置方法を検討する必要がある。広い範囲を対象とするには、多数のセンサが必要になると思われる。

ここでは、鉛直から数十度の傾斜の範囲を計測することを目標にして、傾斜センサについては、孔軸と直交す

る2方向の成分を計測する方法について検討する。

3・2 基本式の導出

傾斜したボーリング孔内における方位を議論するための座標系を、図-6に示すように設定する。XYZ座標系は、X軸を磁北に、Z軸を鉛直方向にとり、空間に固定した直交座標系とする。また、 $\xi\eta\zeta$ 座標系は、 ζ 軸を孔軸方向にとり、ゾンデに固定した直交座標系である。 ξ 軸は、Z軸と ζ 軸が作る平面から ζ 軸のまわりに角度 ϕ だけ回転した方向である。

孔内における方位を定めるには、図-6に示す3つの角度 θ （ボーリング孔の傾斜角）、 ϕ （ボーリング孔の傾斜方向を示す方位角）および ψ （孔軸を回転軸としたゾンデの回転角）が必要である。これらの角度は、2つの直交座標系の回転変換を表すオイラー角と呼ばれる角に相当する。

傾斜孔において方位を定めるためには、孔内のセンサで計測された測定値からオイラー角を求めればよい。

傾斜センサは ξ 方向および η 方向の傾斜を測定するように配置される。また、磁気センサは ξ 、 η および ζ の3成分を測定する。角速度センサを用いる場合には、 ζ 軸まわりの角速度を測定する。今、地磁気の大きさをH、伏角を α 、重力加速度の大きさをgとして、それぞれ、 ξ 、 η 、 ζ 成分を添え字で表すと、測定値とオイラー角の関係は、つぎのように表すことができる。

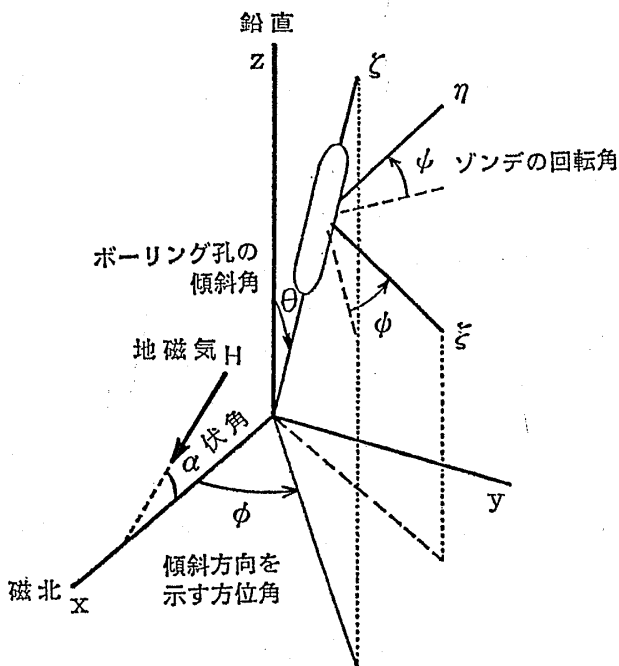


図-6 傾斜した孔内における方位を表すための座標系
Fig.6 Coordinates for expressing the azimuth in the tilt borehole

$$g_{\xi} = g \sin \theta \cos \psi \quad (2)$$

$$g_{\eta} = -g \sin \theta \sin \psi \quad (3)$$

$$H_{\xi} = H(\cos \theta \cos \phi \cos \psi - \sin \phi \sin \psi) \cos \alpha + H \sin \theta \cos \psi \sin \alpha \quad (4)$$

$$H_{\eta} = H(-\cos \theta \cos \phi \sin \psi - \sin \phi \cos \psi) \cos \alpha - H \sin \theta \sin \psi \sin \alpha \quad (5)$$

$$H_{\zeta} = H \sin \theta \cos \phi \cos \alpha - H \cos \theta \sin \alpha \quad (6)$$

また、角速度センサの出力Vは、角加速度および角速度の2乗を微小量と考えて無視すると、近似的に次のようになる。

$$V = \beta \left(\frac{d\phi}{dt} \cos \phi + \frac{d\psi}{dt} \right) \quad (7)$$

ここで、 β は角速度センサの出力感度、 $d\phi/dt$ および $d\psi/dt$ はそれぞれ ϕ 、 ψ の時間微分を表す。

(7)式をtについて積分すると、次式が得られる。

$$\int V dt = \beta (\phi \cos \theta + \psi) \quad (8)$$

(2)式、(3)式および(8)式において、重力加速度gおよび角速度センサの出力感度 β は、既知の量と考えられ、独立な式の数と未知数の数が同じとなり、(2)~(6)式、または(2)式、(3)式および(8)式から、 θ 、 ϕ および ψ が求められる。これらは、孔内方位計測を行う上で基本となる式である。

3・3 2軸磁気センサによる方位計測における誤差の定量的考察

ボーリング孔が傾斜している場合には、2・2節において示したように、方位角を(1)式を用いて計算すると誤差が生じる。そこで、その誤差を見積もるために正しい方位角を β 、誤差を $\Delta\beta$ として(1)式を書き直すと、

$$\beta + \Delta\beta = \tan^{-1} \left(-\frac{H_{\eta}}{H_{\xi}} \right) \quad (1')$$

あるいは

$$\tan(\beta + \Delta\beta) = -\frac{H_{\eta}}{H_{\xi}} \quad (1'')$$

のように表すことができる。

ボーリング孔が方位 ϕ の方向に傾斜角 θ で傾斜しているとき、地磁気の ξ 成分(H_{ξ})および η 成分(H_{η})は、それぞれ、(4)および(5)式で表されるが、議論を簡単にするために、ボーリング孔がゾンデの ξ 軸方向に傾斜している場合を考えることにする。誤差が最大および最

小になるのは、ゾンデがどちらかのセンサ軸方向に傾く場合と考えられるので、最大誤差を見積もる上では、上記のようにしても、一般性は失われない。ゾンデがき軸方向に傾斜することは、 $\phi = 0$ の場合に相当し、この場合に、(4)式および(5)式は、それぞれ、次のようになる。

$$H_z = H \cos \theta \cos \phi \cos \alpha + H \sin \theta \sin \alpha \quad (4')$$

$$H_y = H \sin \phi \cos \alpha \quad (5')$$

$\cos \theta$ および $\sin \theta$ は、

$$\cos \theta = 1 - \frac{\theta^2}{2!} + \frac{\theta^4}{4!} - \frac{\theta^6}{6!} + \dots$$

$$\sin \theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} + \dots$$

と表すことができ、 θ が小さいときには、 θ の2次以上の項は省略しても差し支えない。

したがって、ボーリング孔の傾斜角 θ が小さい場合には、(4')式は、つぎのように表すことができる。

$$H_z \approx H \cos \alpha \cos \phi + H \theta \sin \alpha \quad (4'')$$

式(4'')および式(5')を式(1')に代入すると、

$$\tan(\beta + \Delta\beta) = \frac{\cos \alpha \sin \phi}{\cos \alpha \cos \phi + \theta \sin \alpha} \quad (9)$$

となる。(9)式を $\tan \Delta\beta$ について整理すると、次式が得られる。

$$\Delta\beta = \tan^{-1} \left(-\frac{\varepsilon \sin \phi}{1 + \varepsilon \cos \phi} \right) \quad (10)$$

ただし、 $\varepsilon = \theta \tan \alpha$

(10)式から、方位の誤差 $\Delta\beta$ は、地磁気の伏角やボーリング孔の傾斜角だけではなく、傾斜の方向 ϕ によっても異なることがわかる。

(10)式において、地磁気の伏角 α を 50° 、ボーリング孔の傾斜角 θ を 5° および 10° とした場合について、方位の誤差 $\Delta\beta$ が、ボーリング孔の傾斜方向 ϕ によって、どのように変化するかを図-7に示す。

また、 $\Delta\beta$ の最大値を大まかに見積るために、(10)式をさらに近似すると、 $\Delta\beta = \theta \tan \alpha$ と表すことができるので、方位の誤差は、傾斜角のおよそ $\tan \alpha$ 倍であることがわかる。

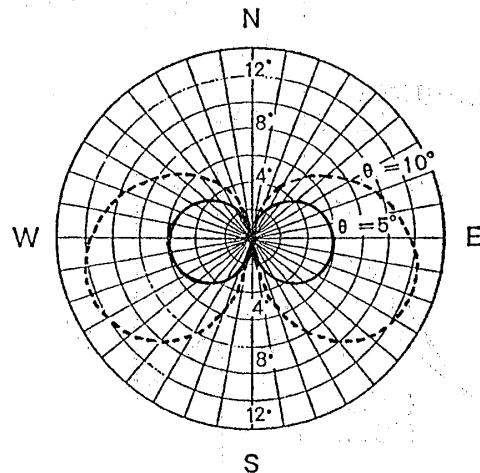
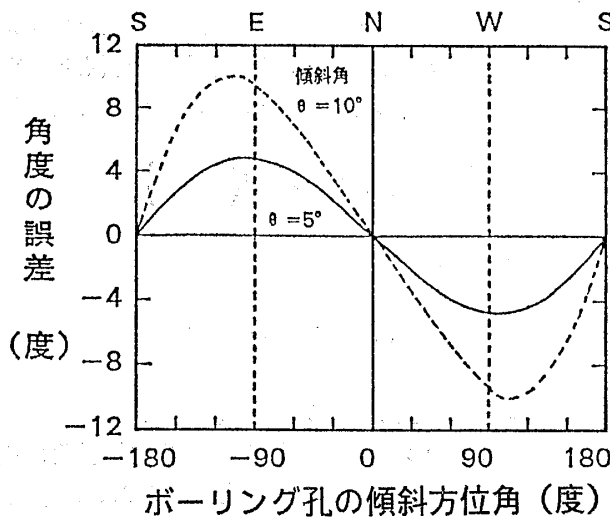
日本国内における地磁気の伏角は、 $40^\circ \sim 60^\circ$ の範囲にあるので、方位の誤差は、ボーリング孔の傾斜の $0.8 \sim 1.7$ 倍の範囲にあることになる。しかし、傾斜角が 5° 程度までなら $\Delta\beta$ は最大でも 10° 以内であり、実用上はあまり問題にならない範囲といえることができるであろう。

3・4 3軸磁気センサと傾斜センサを組み合わせた測定

この方法では、3軸磁気センサと2つの傾斜センサを用いて測定する。測定値から方位を計算するための θ 、 ϕ および ψ に関する式は、(2)~(6)式から簡単に求められ、つぎのようになる。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{S}{\sqrt{g^2 - S^2}} \right) \quad (11)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{A}{(SH_z + \sqrt{(1 - S^2)B})} \right) \quad (12)$$



角度誤差の絶対値の方位による変化パターン

図-7 磁気センサの傾斜方向と方位角の測定誤差との関係

Fig.7 Relation between actual azimuth ϕ and measured azimuth error when tilting at the angle of θ

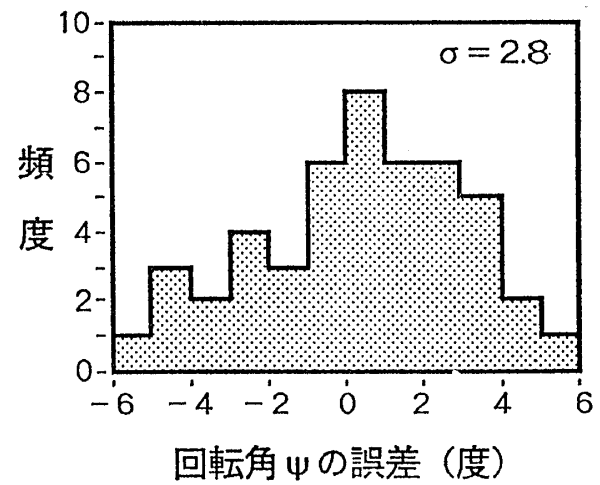
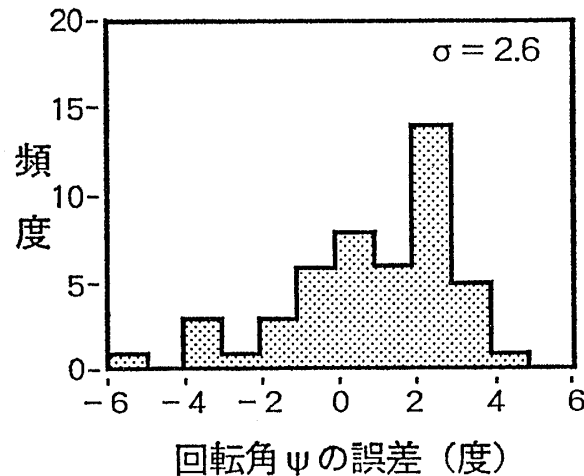
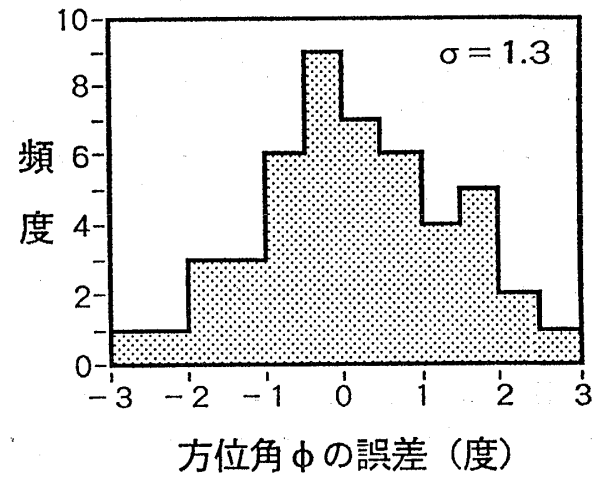
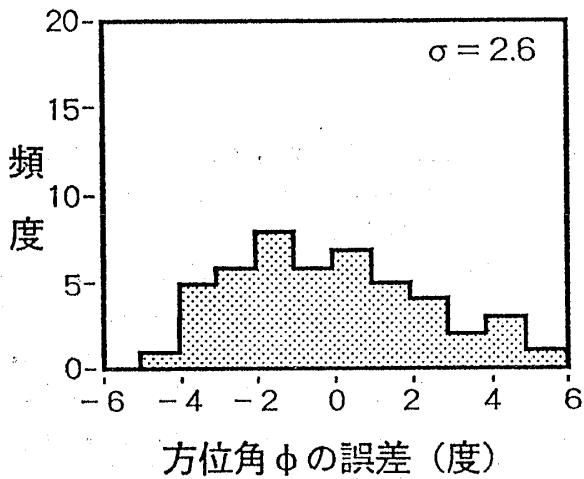
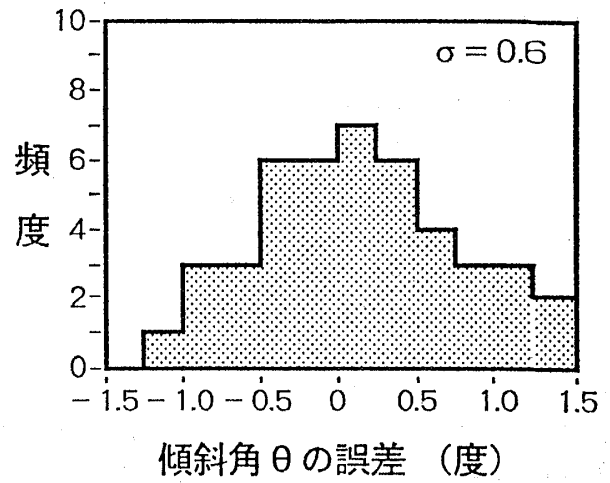
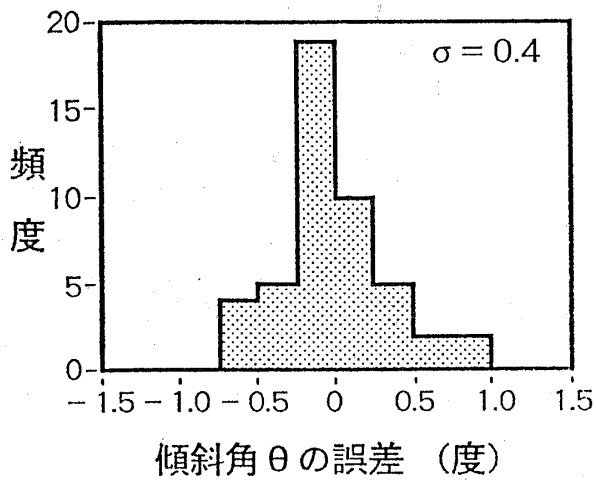


図-8 方位を表す角度の測定値の誤差の頻度分布
(磁気センサと傾斜センサを用いる方法)
Fig.8 Frequency of measured angle errors
(when using magnetic sensor and
inclinometer)

図-9 方位を表す角度の測定値の誤差の頻度分布
(角速度センサと傾斜センサを用いる方法)
Fig.9 Frequency of measured angle errors
(when using angular velocity sensor
and inclinometer)

$$\phi = \tan^{-1}\left(-\frac{g_y}{g_x}\right) \quad (13)$$

ここに, $0 < \theta < 90^\circ$

$$S = \sqrt{g_x^2 + g_y^2}$$

$$A = H_x g_y - H_y g_x$$

$$B = H_x g_x + H_y g_y$$

これらの式に基づいて、実際に、どの程度の精度で方位を決定できるか調べるために、3軸磁気センサと2つの傾斜センサを内蔵した模型ゾンデを作製した。そして、三脚台にパイプを取り付け、その中に模型ゾンデを挿入して、 θ 、 ϕ および ψ を変化させ、 θ 、 ϕ 、 ψ の48通りの組み合わせについて測定を行なった。測定値から計算した角度と設定した角度との差を求め、それぞれのヒストグラムを作成した。その結果を図-8に示す。 θ 、 ϕ および ψ のいずれの誤差も正規分布に近い。しかし、それらの標準偏差は異なっている。

図-8から明らかなように、誤差は ψ の場合が一番大きく、 $\pm 6^\circ$ の範囲にある。ただし、実験時の設定誤差を考慮すれば、実用上は許容できる範囲にあるといえることができる。

3・5 角速度センサと傾斜センサを組み合わせたの測定

傾斜孔における方位計測では、方位を計算するための θ 、 ϕ および ψ に関する式は、(2)、(3)および(8)式から、次のようになる。

$$\theta = \sin^{-1}\sqrt{g_x^2 + g_y^2} \quad (14)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(-\frac{g_y}{g_x}\right) \quad (15)$$

$$\psi = \int \frac{V}{\beta} dt - \frac{\phi}{\cos \theta} \quad (16)$$

これらの式を用いて方位を求める方法についての評価をするために、角速度センサと傾斜センサを組み込んだ模型ゾンデを作製して実験を行った。この実験においても、磁気センサの場合と同様に、 θ 、 ϕ および ψ を変化させてデータを収録し、上記の式から求めた結果と設定した角度を比較して、ヒストグラムを作成した。それらを図-9に示す。誤差は、 ϕ と ψ が同程度で θ よりも大きい。実験時の設定誤差を考えれば、ほぼ許容できる範囲にあるといえる。

4 あとがき

孔内で方位を計測する場合に、留意しなければならない事項や誤差について、理論的な考察とゾンデの模型を用いた実験により検討した。

今後、ボーリング孔を利用する計測は、探査や土木計測、施工管理などさまざまな分野で実施され、ますます多様化、高度化するものと予測される。それに伴って、孔内における方位計測技術もますます重要になってくるものと思われる。ここで検討した結果が、今後、方位計測を行う上で少しでも役立てばと希望する次第である。