

地中の位置をジャイロで測る

鴨下 庄吾

車両構造技術研究部
(車両振動 主任研究員)

佐々木 君章

同
(同 研究室長)

朝比奈 峰之

総務部
(人事 課員)



かもした しょうご



ささき きみあき



あさひな みねゆき

はじめに

下水道管や電線管など、私たちの生活に不可欠なライフラインは、地下を通して配管されることが多くなっています。一般的には、地表から開削して配管を引き、その後に土砂を埋め戻せば良いわけですが、そのためには配管を引く経路全体にわたって工事のためのスペースを確保し、配管を埋める深度まで掘削する必要があります。そこで、図1のように余裕のある場所に堅穴を掘り、その堅穴から掘削機で水平方向に穴を掘り進めて配管を通す工法があります。このような配管工事方法を管推進工法、あるいは非開削管敷設工法と呼んでいます。

掘削機の先端にはカッタが取り付けられており、カッタを回転させながら堅穴に設置した元押しジャッキ装置で配管全体を横方向に押し進めて掘削していきます。掘削した土砂は、配管内の排土管を通して地上に排出します。1本の配管長さ分の掘削（つまり配管を地中に押し込むこととなります）が済むと、ジャッキを引き戻し、ジャッキ装置の空いたスペースに、地上から次の配管材を降ろして管を継ぎ足します。このようにして、順番に1本ずつ配管を地中に押し込んでいき、配管の埋設と掘削を同時に行います。

掘削機本体とカッタの間には油圧シリンダで動作する関節があり、地上のオペレーターが遠隔操作でカッタの向きを調整し、掘削方向を制御できます。こうして曲線状に配管を埋設することができます。埋設先には掘削を始めたところ（発進坑と呼びます）と同じような堅穴を掘っておき、その掘削先の堅穴（同様に到達坑と呼びます）に向けて掘削工を進めます。作業を終えた先端の掘削機は、到達坑から回収することになります。

管推進工法によって、地上にある建物や道路、河川などを横切るような工事ができるようになり、住宅地や市街地のよう、思うように地上作業スペースがとれない地域での工事ができます。発進坑から到達坑の間を予定された計画線に沿って掘削作業をすすめるためには、掘削機が現在どの位置に居るか計測することが必要になります。この計測精度が悪化すると、最終的な目標である到達坑まで配管を通すことができなくなってしまいます。また、地中に以前に埋設した機器や障害物などがある場合があります、それらを回避できない時には大きな問題となります。そのため、位置の計測精度はたいへん重要で、作業効率を維持するため迅速かつ正確な測定をする必要があります。

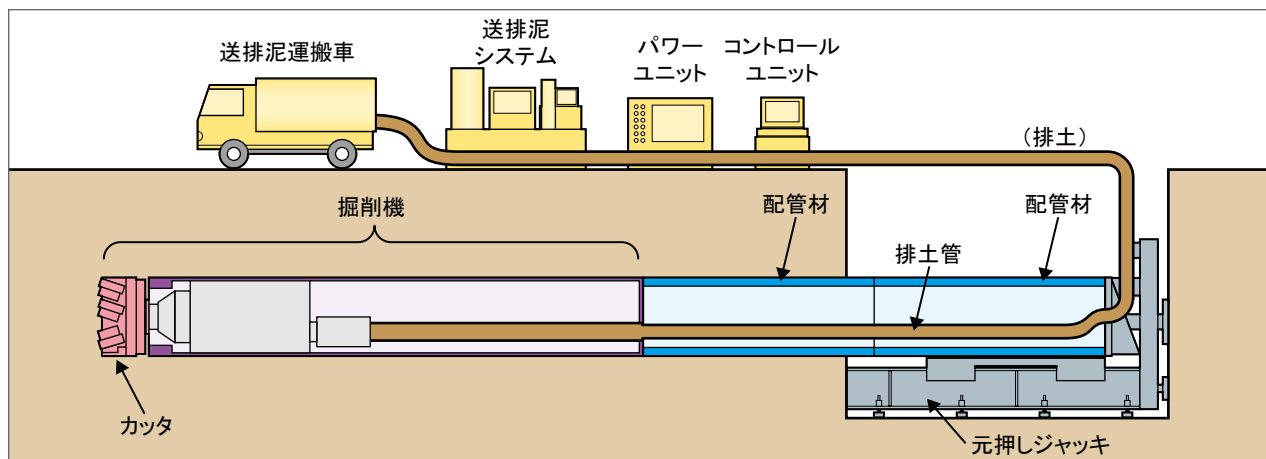


図1 推進工法の断面

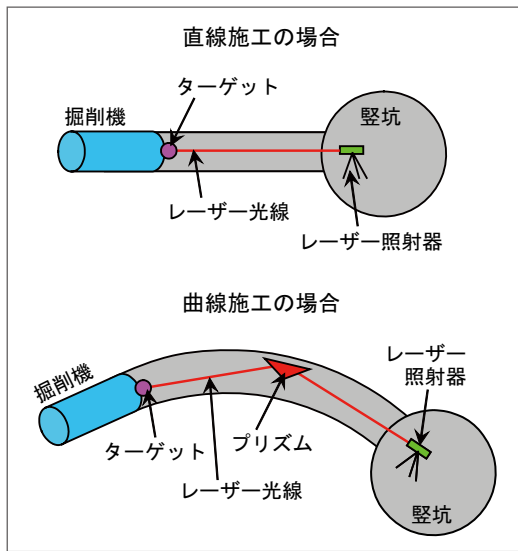


図2 レーザー方式の計測方法

これまでの測定技術

現在、管推進工法での位置計測として、レーザー方式と電磁誘導方式の2つの方法が主に用いられています。

レーザー方式

図2のように、発進坑に据えた元押しジャッキ装置から掘削機に向けてレーザー光線を発射し、レーザーが掘削機に取り付けたターゲットのどこに当たっているか計測します。レーザーの検出位置を基準にオペレーターが掘削機を操作して、埋設管がちょうど良い経路を通るように工事を進めます。他の方法に比べて計測精度は高いですが、レーザー光線は直進しますから、配管経路の途中に曲線部分がある場合にはレーザー光線が見通せなくなり、この方法は使えません。この対策として、曲線部分にプリズムを設置して、レーザー光線を屈折させてターゲットに導く方法がありますが、プリズムを適切に設置するため、作業員が工事中の配管内に入っていかなければなりません。従って、人間が入れる800mm以下の内径の配管では適用できません。埋設する配管の種類は細いもので200mm以下のものもあり、そのような配管では曲線区間の工事ができなくなります。

電磁誘導方式

電磁誘導方式は掘削機に電波の発信機を取り付け、発信された電波を地上の受信機で受信して現在位置を測定します。電磁誘導方式の計測方法を図3に示します。小口径の配管にも使える上、曲線施工も可能ですが、受信機は掘削作業を行っている位置付近まで作業員が運んでいき、現在掘削位置の真上で計測をする必要があります。そのため、地上に建物や道路、河川などがあると計測ができなくなります。地中を通して電波の届く距離が限られているため、適用できる埋設工事の深度は10m程度が限界です。また、

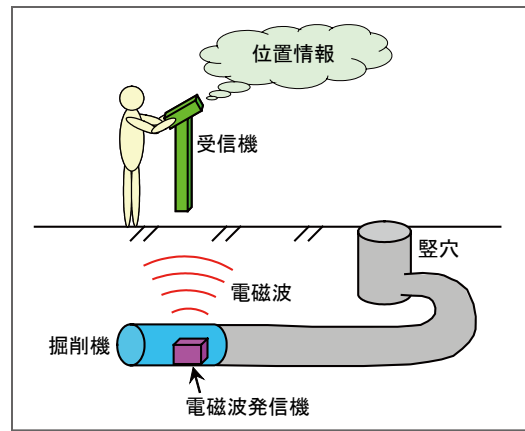


図3 電磁誘導方式の計測方法

電化された鉄道路線の架線近くでも、電波が乱れるため使用できません。

このように、従来の技術では小口径の配管を障害物の下を通して曲線施工することは、ほとんど不可能でした。そこで、施工条件の制約を受けずに利用できる、新しい計測方法を使った地中位置検知システム、「Sジャイロ」を開発しました。

Sジャイロの原理

Sジャイロでは、重力のかかる方向と地球の地軸を基準とした計測結果を使って、幾何学的な計算で現在の掘削位置を求めます。ここでは、説明を簡単にするために平面上で位置を求める場合について説明します。図4のように、測定原点P0を基準に、現在の掘削機の先端位置をP1、次の時点の位置をP2、・・・とします。実際の配管が通っている掘削経路を緑の線で表します。測定原点P0の座標が解っているととして、2点間の距離をLとすると、配管の真北からの角度 θ_1 が解れば、現在の配管先端位置P1を(南北位置, 東西位置)で表すと式(1)の形で求められます。

$$P1 = (L\cos\theta_1, L\sin\theta_1) \dots\dots\dots (1)$$

掘削を進めていき、さらに配管1本分掘り進めると、先ほど計算を行った際の原点がP1点に来ていることになり、次の時点の先頭座標P2は(2)式で計算できます。

$$P2 = P1 + (L\cos\theta_2, L\sin\theta_2) \dots\dots\dots (2)$$

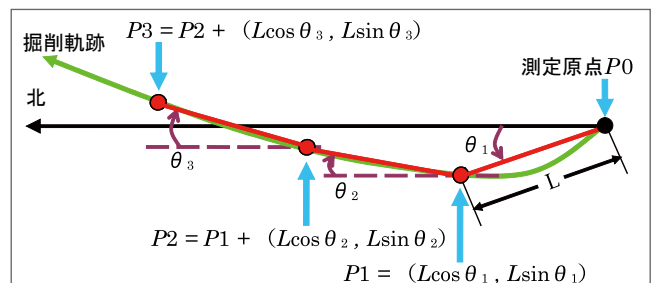


図4 Sジャイロの計測原理

このように、同じ計算方法を順次あてはめていき、1点ずつ位置をずらして計算していくと、原点位置から追いかけて行って積算した現在位置が求められます。ここで、2点間の距離は掘削を進めた長さに相当しますので、配管1本分の長さが式中の L になります。従って、管推進を進めた方向、角度 θ が解れば現在位置が求められることとなります。

ただし、実際には平面上での計算方法を3次元空間での計算に拡張する必要があります。このためには、測定器本体の姿勢を計測する必要があります。長手方向の傾き（ピッチング）と横方向の傾き（ローリング）を傾斜センサで測定しています。傾斜センサは重力のかかる方向を求め、本体が重力の方向に対してどの程度傾いているか計測することができるセンサです。このセンサを2組使用して、ピッチング、ローリングの傾斜角度を測定します。

方位角を計測する

位置計測のために方位角の情報が必要になりますが、方位角は地球の自転による動きを計測して求めます。地球は地軸を中心に1日で1回転しています。従って、この運動によって発生する角速度を計測し、角速度が最大になる方向を探すと真北が解ります。

回転角速度の計測にはジャイロセンサという計測器を使います。ジャイロセンサにはいろいろな種類がありますが、ここでは精度に優れ、微小な角速度も計測できる光ファイバジャイロを用いました。光ファイバジャイロの外観を図5に示します。このジャイロは本体の中に糸巻き状のポピンを持ち、このポピンに何回転も光ファイバを巻き付けておき、この光ファイバの両端から右回りと左回りのレーザー光線を通します。光ファイバを巻き付けた方向に回転角速度が発生すると、2つのレーザー光が光ファイバを通過するために要する時間が変化します。この時間変化を検出することで、本体で発生している角速度が得られます。光の進む速度は非常に高速なため、実際は光の位相変化を捉えて計測し、角速度に換算して出力します。光ファイバを巻いた長さや半径などによってその性能が決まりますが、地球の自転を計測できる精度を持つ光ファイバジャイロも一般に市販されています。

管推進工事施工現場の鉛直な軸まわりに、ジャイロセンサの角速度検出方向を回転させることを考えてみましょう。そうすると、ジャイロの角速度検出方向と地球の自転方向が一致した時、センサ出力は最大となり、直角になった場

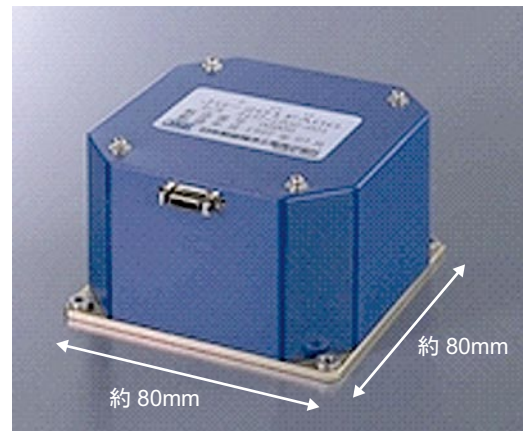


図5 光ファイバジャイロの外観

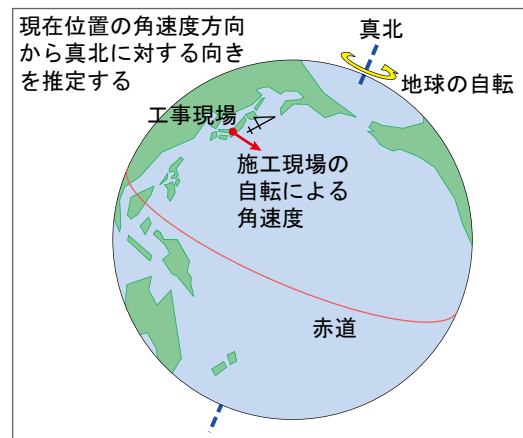


図6 地球の自転と角速度の発生方向

合には出力がゼロ、逆向きに一致したときはマイナスの最大値になります。従って、センサ出力が最大となった位置の角度によって、地球の自転軸に対して掘削機本体がどのような向きを向いているか計測することができます。地球の自転とジャイロの角速度検出方向の関係を図6に示します。ジャイロの角速度検出方向の回転角度と、検出される地球の自転角速度の出力信号は、図7の緑線のようなサイン波状に観測されます。

ジャイロを搭載している掘削機本体は、ピッチング、ローリング方向に傾いているので、ジャイロは鉛直な軸まわりで回転するわけではありません。そこで、その補正が必要になります。補正は、加速度センサで計測した傾斜角を用いて行いますが、具体的な補正計算は非常に複雑なためここでは省略します。幾何学的な補正計算によって、正確な方位角が求められるようになります(図7)。このためには計測を行う場所の緯度が必要ですが、緯度は現場でGPSなどを使って測量するか、または国土地理院の地形図などを参照して求めることができます。Sジャイロが管推進工事を行う範囲は200m以内を想定しているため、この施工範囲内では一定の緯度であると想定して構いません。

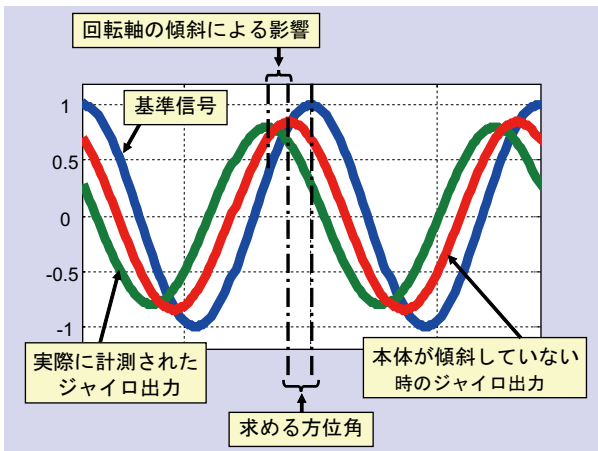


図7 ジャイロ信号の例

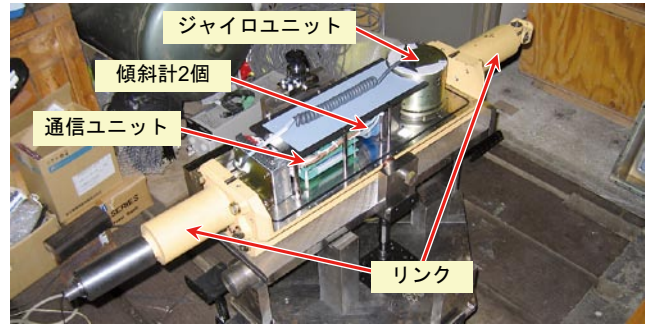


図8 Sジャイロの外観

こうして得た方位角，2つの方向の傾斜角，前回測定点から推進を行った距離の情報を使って現在の位置を知ることができます。

測定試験結果

Sジャイロの試作器を実際の配管埋設をしている工事現場に持ち込み，掘削機に取り付けて性能評価試験を行いました。試験で使用したSジャイロ計測ユニットの外観を図8に示します。ユニットの全長が推進距離（配管長さ）と等しくなるよう，両端にリンクが取り付けられています。試験施工を行った現場は総延長が120mほどの距離の敷設工事で，途中に2ヶ所の曲線部があり，河川をくぐって施工する現場です（図9）。

試験施工の結果，掘削機を無事に到達坑まで誘導することに成功し，最終的な到達位置での実測値に対する計測誤差は35mm程度に収まりました。120mに渡る掘削工事を行って，ずれが35mmですから，管推進施工上，問題ない範囲に収まったと考えられます。

おわりに

今回開発したSジャイロのSには“総研”の頭文字S，曲がりくねった“曲線の形”をイメージさせるSを合わせた意味合いがあります。また，開発にあたった我々は土木関係の専門家ではありません。管推進工法の現場での位置検知に関する開発ニーズから，土木関係者の依頼を受けて本装置の開発を進めました。元々，我々は車両関係の仕事をしておりますが，走行中の車両姿勢などを測るため，様々な形式のセンサを応用しています。今回，Sジャイロの開発にあたって，各種センサ信号の取り扱い経験がたいへん役に立ちました。このような観点から，センシング・モニタリング技術は系統を超えて，応用範囲の広がる技術分野であると考えられます。これからも系統の壁に阻まれることなく，新しい技術開発に取り組んでいきたいと考えています。

最後になりましたが，Sジャイロの開発にあたりまして多大なるご協力を頂きましたJR総研情報システム殿他，多くの関係者の皆様に深く感謝いたします。[RRR]

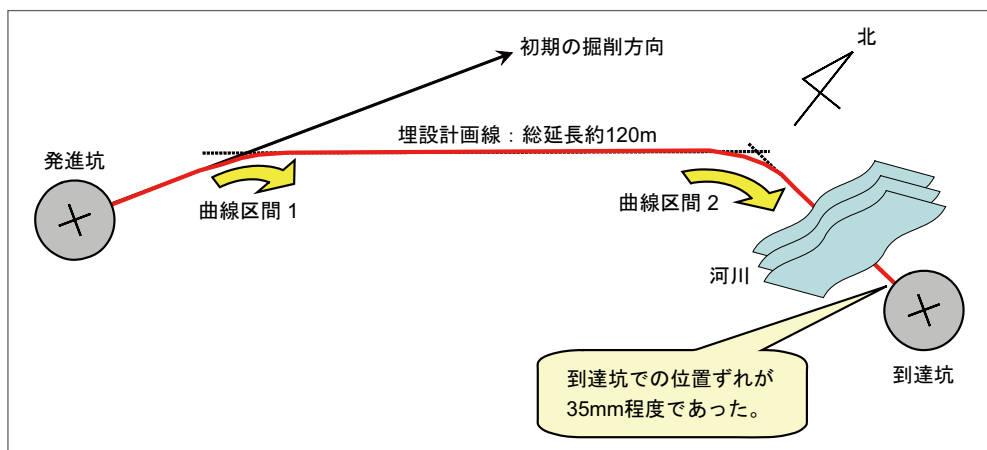


図9 Sジャイロの性能試験現場