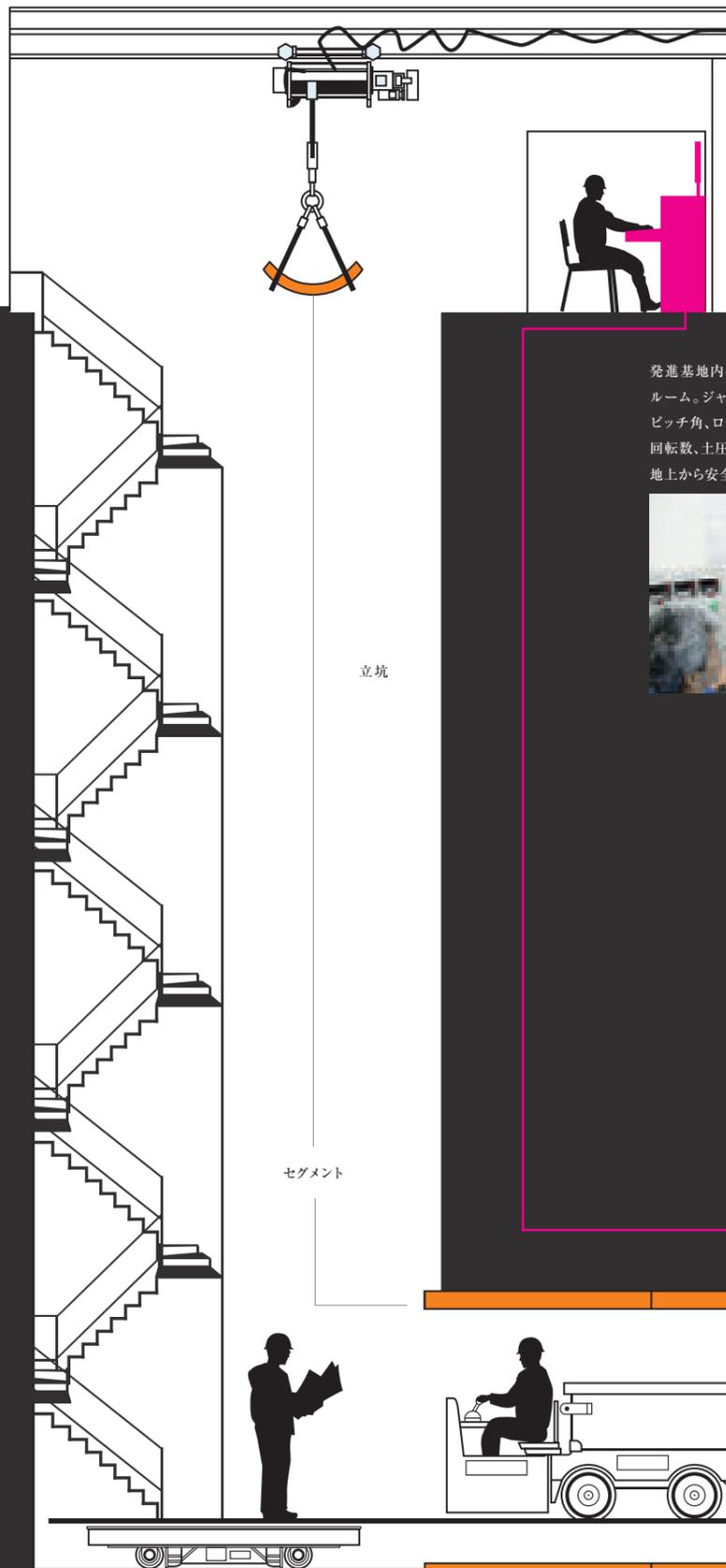


地下トンネルを掘り進むシールドマシン。

その知られざる 世界を見る

愛知県長久手市(ながくてし)は、名古屋市の東に隣接する人口約5万の中核都市。羽柴秀吉と徳川家康の陣営が争った「小牧・長久手の戦い」の場として有名ですが、2005年の「愛・地球博」(愛知万博)の開催地としても知られています。いま、ここ長久手市内において上水道送水管を新設するためのトンネル工事が行われています。長久手市内の北東部に位置する岩作三ヶ峯(やざこさがみね)地区には、今回の工事発注元の配水場があります。工事は、この配水場から長久手市街地や長久手市と隣接する日進市方面へ延びている送水管や配水管などの基幹管路の耐震化整備事業の一つとして行われるもので、「三ヶ峯幹線送水管布設工事その1」と呼ばれています。この工事を請け負っているのが株式会社クボタ工建です。クボタ工建は上下水道など水に関する社会基盤整備事業の設計・施工を手掛ける中堅ゼネコンであり、中小口径のシールド工事においては国内トップの施工実績を持っています。このたび、同社のご厚意によりトンネル掘削現場を取材する機会を頂戴しましたので、今号の特集ではトンネル工事の主役となるシールドマシン(掘削機)と、その推進管理に活躍している東京計器のシールドマシン用 光ファイバージャイロコンパス(以下、トンネルジャイロ)TMG-12Fについてご紹介させていただきます。



発進基地

立坑

セグメント

発進基地内に設置されたシールドマシンのオペレーションルーム。ジャイロコンパスから出力されたマシンの方位角、ピッチ角、ロール角などのほか、推力や掘削速度、カッターの回転数、土圧の状態などが一元管理され、シールドマシンは地上から安全かつ効率的に運転される。



モグラのようにトンネルを掘るシールドマシン

日本の都市部では用地確保や交通渋滞などの問題があるため、地面を掘り起こしてパイプなどを埋設する開削工法が難しく、モグラのように地下を掘り進むことができる非開削工法が発展してきました。その非開削工法の一つにシールド工法があります。シールド工法とは、茶筒のような形状をした鋼鉄製の外筒を持つシールドマシンを地中に埋め込み、その先端に付けられたカッターヘッドを回転させることによって前面の土を少しずつ削り取りながら前進することでトンネルを掘り進んでいくという工法です。マシンが掘削した部分には「セグメント」と呼ばれる外壁を取り付けてトンネルを築造していきます。シールドマシンはこのセグメントにシールドジャッキ（油圧ジャッキ）をあて、シリンダーを伸ばすことで推進力を得ます。このシールド工事で重要となるのがマシンを計画線に沿って正確に掘り進めることです。しかし、地中には衛星からのGPS(全地球測位システム)信号が届きませんので、カーナビのようにルートガイダンスをしてくれるような便利な装置はありません。そこで東京計器が開発したのがシールドマシン用のジャイロコンパスTMGシリーズです。これは、搭載された高精度ジャイロコンパスとサーボ傾斜計によってマシンの方位角、ピッチ角、ロール角をリアルタイムで計測し、正確な姿勢制御を行うことによってシールドマシンを計画線通りに導くというシステムです。また、進路の方向は正しくても軟弱な地盤ではシールドマシンの自重で沈み込みが発生し、垂直位置が計画線とずれてしまうこともあります。こちらは、水レベル計TL-300BPで計測します。



シールドマシン。
先端に付けられた超合金のカッターを回転させることで地底を削りながらトンネルを掘り進んでいく。



トンネルジャイロはこうした曲線施工で偉力を発揮する。

おかげさまで発売以来ご好評をいただき、トンネルジャイロは累計700セット以上の販売実績を頂戴しています。そして、このたびの「三ヶ峯幹線送水管布設工事 その1」では、TMGの心臓部に新開発の光ファイバージャイロを搭載したTMG-12Fをご採用いただき、シールドマシンの推進管理にご利用いただいています。

レベル管理には水レベル計も活躍。

「三ヶ峯幹線送水管布設工事 その1」では10%の下り勾配が設定されており、シールドマシンにも正確なレベル管理が求められます。こうした高低差はジャイロコンパスでは計測できないため、東京計器のレベル検出装置TL-300シリーズをご採用いただいています。シールドマシン内部に計測ユニットを設置し、基準タンクとの圧力差を計測することでマシンの縦断方向の変化を確実にセンシングします。



シールドジャッキ

シールドマシン

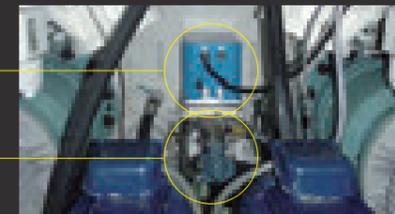
レベル計

ジャイロコンパス

スクリーコンベア

トンネルジャイロのセンサユニット

水レベル計の計測ユニット





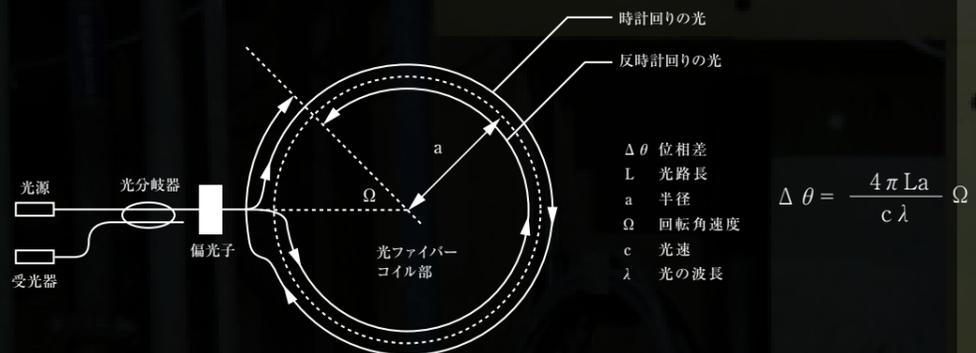
Rの数字は半径を表し、この数字が小さいほど急な曲線となる。



地下6m、直径2,000mmの地底空間で繰り広げられるミッション

今回お邪魔した「三ヶ峯幹線送水管布設工事 その1」は、直径2,000mmのトンネルを全長648mに渡って掘り進むというものです。トンネルは地下の埋設物を避けるため、地表の道路の直下をトレースするように掘削していきます。道路にはカーブもありますので、この工事区間では6か所の曲線施工があります。シールドマシンの推進管理はトランシットやトータルステーション（光波測器）を利用した測量が一般的です。これは、レーザ測定器を発進側の立坑内に設置し、シールドマシンのレーザターゲットに向けて照射することでマシンが計画線通りの方向や傾度を保っているかを計測するものです。しかし、この方法の場合、曲線施工時は計画線のカーブに合わせて小刻みに測量を繰り返す必要があります。その度にシールドマシンの運転を停止させなくてはならず、工事の効率化という面で問題があります。また、直線でもレーザが届く距離は限定的です。東京計器のトンネルジャイロは、こうした曲線や長距離施工時であってもマシンを停止することなく、その挙動をリアルタイムで計測・出力できるという優れた特長を備えています。正確で効率的な推進管理が行いやすいことからお客様に高い評価をいただき、国内外の非開削工事において数多くご採用いただいています。

さて、それでは立坑から地下に降りてシールドマシンが稼働している切羽口（トンネル掘削の最先端箇所）に向かうことにしましょう。立坑の深さはおよそ6m。立坑の最深部に降り立って上を見上げると地上が遠く感じ、異空間にいるような錯覚を覚えます。取材当日は既に450mのトンネルが掘り進められていました。掘削時のトンネルの直径は2,000mmですが外壁には電源や通信ケーブルなどを収めた各種配管や床に敷設されたトロック用のレールなどの機材があるため、背を屈めないと頭が天井にぶつかってしまいます。坑内は気温、湿度ともに高く、この狭小空間で作業を行う方々のご苦労は並大抵ではないでしょう。シールドマシンの内部はマシンの運転に必要なさまざまな制御装置やカッターを回転させる駆動装置などで占められており、トンネルを掘る建設機械というよりは複雑な機構を持った工作機械の内部に紛れ込んだかのような印象です。「今回の工事は泥土圧（でいどあつ）式と呼ばれるシールド工法によって行っています。これは、切削した土砂に添加剤を注入して泥土状態にし、シールドジャッキの推力で泥土に圧力を発生させることで切羽面（切削面）の崩壊や地下水の流入を防ぎながら掘削を進めるという工法です。シールドマシンの推進量と排土量のバランスを保ちながら慎重に作業を行う必要があるため、一日に掘削できる距離は10m位です」（クボタ工建 中部支店 工事グループ 安江憲亮さん）シールドマシンの最前方部には光ファイバージャイロを内蔵したTMG-12Fのセンサ部が装備されています。「トンネルジャイロの登場によってシールドマシンの自動化が進みました。測量回数を大幅に減らすことができるため工期の短縮に繋がりますし、マシンの監視やコントロールが地上のコントロールセンターで行えるようになるなど合理化が実現しています。また、シールドマシンは縦横10ミリの精度で設定した計画線に沿って掘削することが求められますが、こうした高いニーズにもトンネルジャイロは応えてくれています」



光ファイバージャイロを搭載したトンネルジャイロ

今回の施工現場でご採用いただいているのが、東京計器のトンネルジャイロTMGシリーズの最新機種であるTMG-12Fです。センサ部には最先端技術を駆使した3軸の光ファイバージャイロと加速度計を搭載しており、3軸姿勢角(方位角、ピッチ角、ロール角)をリアルタイムで検出し、シールドマシンの姿勢角を正確に捉えます。

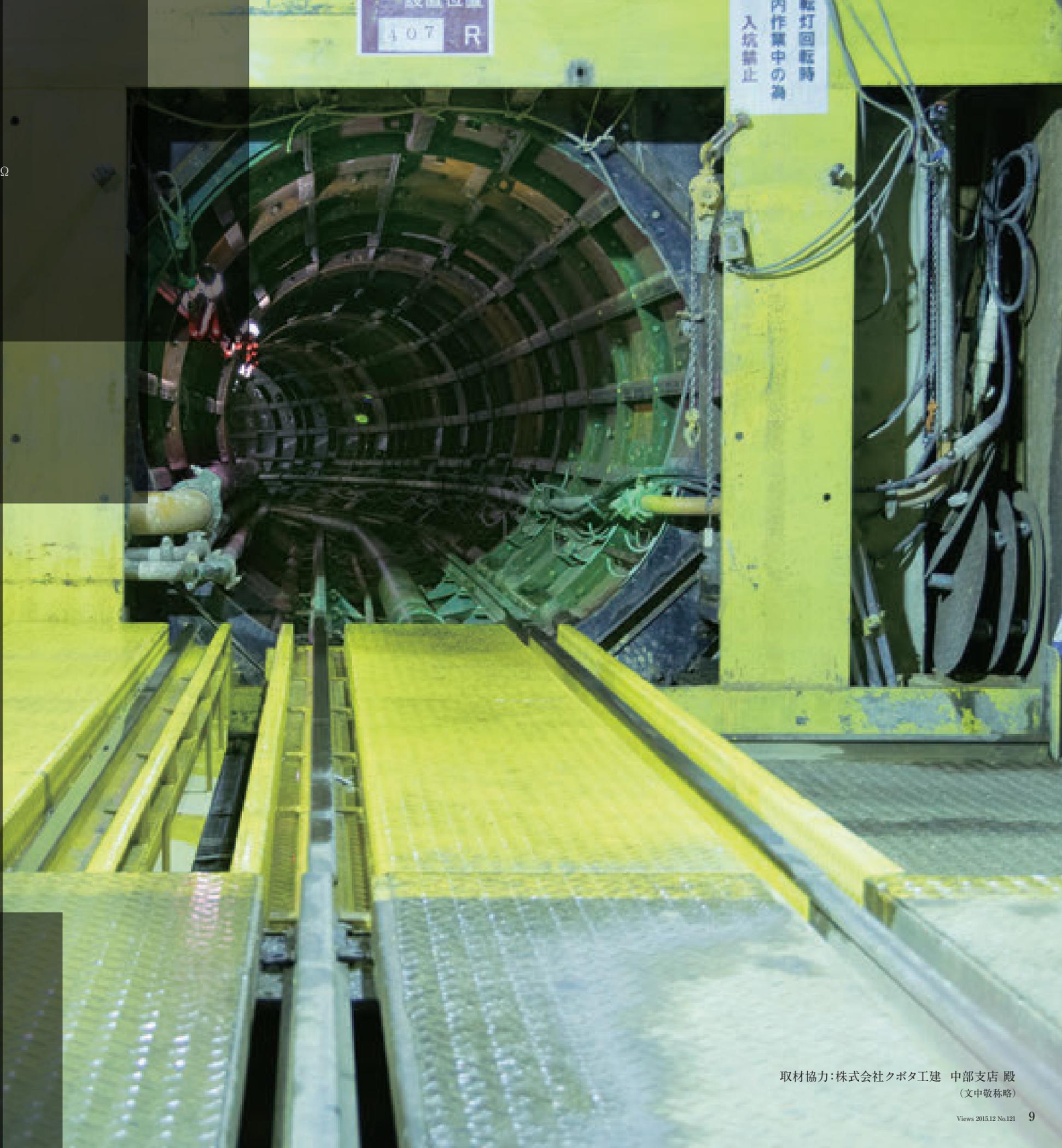
ジャイロとは物体の角速度を検出するセンサの1つ。回転するコマの軸は常に宇宙空間に対して一定の方向を向き続けるという性質をもち、一般的な機械式ジャイロはこの慣性の法則を用いて測定対象の物理的な運動を計測します。一方の光ファイバージャイロは光の干渉を利用してセンシングするのが特徴で、回転するコマの代わりにコイル状に巻かれた光ファイバーがセンサの役割を果たします。たとえば、時計回りと反時計回りに光を入射する場合、何も動きが無ければ出力される光は同距離を進むために同位相となります。しかし、コイルの軸方向に角速度が加わるとサニャック効果によって双方の光の間に位相差が発生します。光が出口から出てくる時間差や位相差が光路の回転速度に比例するという原理を応用して角速度を求めるのが光ファイバージャイロの仕組みです(上図参照)

光ファイバージャイロには可動部分がないため振動に強く、静定時間も従来の機械式に比べて短時間なので素早く計測を開始することが可能です。また、サイズも小型化しているので、従来の機械式ジャイロでは使用できなかった内径300mmという小口径のトンネル施工にも対応できます。「TMG-12Fは、シールドマシンの制御に必要な方位角、ピッチ角、ロール角の計測値が1/100度まで高精度に表示されるので、運転を預かるオペレータからの評価は非常に高いですよ」(安江憲亮さん)

「三ヶ峯幹線送水管布設工事 その1」の工期は2016年3月末までとなり、トンネル施工も最終局面に入ってきました。ゴールとなる到達立坑の手前には施工に高度なテクニックを要するS字カーブが待ち受けており、TMG-12Fの活躍はまだまだ続きます。



シールドマシン用光ファイバージャイロコンパスTMG-12F



取材協力:株式会社クボタ工建 中部支店 殿
(文中敬称略)