

# シールド自動誘導システムに関する研究（その4）

——自動計測システムの信頼性向上と大断面シールドへの適用——

山下 幸夫 藤原 紀夫

## Study on Automatic Guidance System for Shield Machine (Part 4)

——Improvement in Reliability of Automatic Measuring System  
and Application to Large-Diameter Tunnelling——

Yukio Yamashita Toshio Fujiwara

### Abstract

It is the purpose of this study to develop a system for automatically measuring the location and posture of a shield machine and guiding it with minimum deviation from the designed route. This paper describes improvement in reliability and development toward an automatic guidance system centered on the use of gyro-compasses for measuring large-diameter tunnelling works.

The reliability of results is required above all in an automatic measuring system. The technique of using two gyro-compasses and taking average values is an effective means of stabilizing data and raising the accuracy level of shield location calculations. In addition, a method of using both gyro-compasses and laser beams is proposed in this paper. Through the use of automatic measuring systems of different techniques, the deficiencies of the respective systems can be offset for better reliability.

### 概要

この研究はシールド機の現在位置と姿勢を自動計測し、計画路線とのズレを最小にするよう誘導するシステムを開発することを目的としている。ここではジャイロコンパスを用いた自動計測システムを中心として、大断面シールド工事に適用する場合の信頼性向上と自動誘導システムへの展開について述べる。

自動計測では、何よりも計測結果に対する信頼性が求められる。2台のジャイロコンパスを使用し指示値を平均処理して用いる手法は、データの安定化を図り、シールド位置の計算精度を向上させるための有効な手段となる。またここではレーザビーム方式との併用についても提案した。異なった手法の自動計測手法を併用することにより、相方の欠点を補完し合った、より信頼性の高いシステムとすることができる。

### 1. まえがき

シールド自動誘導システムを機能面から大別すると、次の2工程に区分することができる。シールド機の現在位置および姿勢を自動計測する部分と、推進機構を制御して計画路線に沿うよう自動誘導する部分である。

中でも自動計測は、シールド機の掘進状況を常時把握すると同時に、計画路線からのズレを精度よく求めて的確な掘進指示を与える場合の基礎となるものであり、最も重要な機能であるといえよう。いかに精度よく測定できるかが問われており、システム全体の信頼性も含めて中心的な役割を担っている。この機能が確立できれば、あとは計画路線に近付けるようにジャッキ操作するだけであり、合理的な操作方法には工夫は必要であるが、技術的にはそれほど難しいことではない。

この研究では、ジャイロコンパスを用いた自動計測システムを開発し、現場実験を通じて測定精度の検証を行なってきた。その結果、実工事に十分適用できる精度を有していることが確認できている。この方式は計測機器をシールド機に直接搭載できることが大きな特長であり、坑内に制約が多い小断面シールドや曲線の多い路線では特に有効であると考えている。

ただ今後は、東京湾横断道路工事をはじめとして、地下空間利用プロジェクトなどの大断面シールドでの需要が高まっている。大断面になるとシールド機内に十分なスペースがとれるため、例えばジャイロコンパスを2台設置することも可能である。また、レーザビーム方式など他のシステムと合体した複合システムを構築し、計測の信頼性を向上することもできる。

この報告では、大断面シールド工事への適用を前提と

して、自動計測システムを再検討すると同時に、理想的な自動誘導システムの構成について述べる。

## 2. 自動計測による位置決め手法

シールド機の現在位置および姿勢を自動計測する方法には、レーザビームを利用するものと、ジャイロコンパスを用いるものがある。それぞれ一長一短があり、単独の手法で、シールド工事の要求をすべて満たすシステムを構成するまでには至っていないのが現状である。表-1にそれぞれの位置決め手法の相互比較を示す。

レーザビーム方式は、トンネル坑内の基準点に測角儀と光波測距儀の機能をもつレーザ照射装置を取付け、受光部で検出してシールド機の方向および計画路線からのズレなどを測定しようとするものである。従来のトラバース測量と同一の概念で、シールド機の絶対位置が測定できるため、計測の信頼性は極めて高い。

ただ坑内に視準空間が必要であり、例えば曲線半径の小さな路線では、掘進に合わせて照射装置を頻繁に盛替えて行かなければならない。盛替えに伴う基準点の位置出しと計器の設置・調整に手間を要することが、この方式の問題点となっている。曲線が少なく、長距離に渡って視準空間が確保できる場合には有利である。

一方ジャイロ方式は、シールド機に直接搭載したジャイロコンパスの方位角検出機能を利用して、掘進前後の角度変化から現在位置を求めようとするものである<sup>1),2)</sup> 搭載型の計器を利用するためトンネル坑内の制約を受けず、どのような路線にも適用できる利点がある。最近ではシールド工事の多くにこの方式が採用されるようになってきているが、取扱いが容易な点が改めて見直された結果だと思う。

この方式では位置認識のための基準線がないため、掘

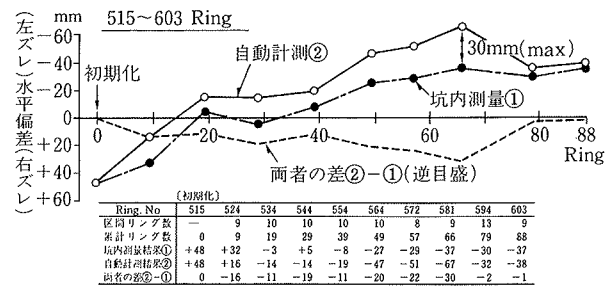


図-1 ジャイロ方式による測定精度の検証結果<sup>3)</sup>

進による位置変化は1リングごとに積算して求めて行かなければならない。計算過程で累積誤差が生じる可能性があり、路線途中で何度かチェック測量を行なうことが不可欠である。シールド工事ではセグメントを対象とした出未形測量が必ず実施されるため、この時期を利用して現在位置の計算誤差がチェックされる。

## 3. ジャイロ方式の測定精度

### 3.1. 精度の検証結果

自動計測システムとしてジャイロ方式を用いる場合、測定精度の検証に加えて、チェック測量をどの程度の間隔で実施しなければならないかを把握しておくことが必要である。そこで実際のシールド工事を対象として現場実験を行ない、これらを調査した<sup>3)</sup>。

図-1に実験結果を示す。ここでは自動計測によって求めた平面位置を、1日2回実施する坑内測量の結果と比較した。5日間(実掘進4.5日、88リング)の連続掘進に対して、自動計測は30mm以内の誤差でシールド位置を測定できていることが分かる。

測定誤差は小さいほど望ましいが、30mm以内であれば実用上は許容できる範囲にある。またチェック測量の間隔も、上記の例から5日以上に延ばすことも可能と考えられる。実際には工事開始直後は短い間隔で行ない、偏差の傾向を把握した上で、徐々にその間隔を延ばして行く方法を採用することが望ましい。

### 3.2. 精度向上のための方策

ジャイロ方式では、使用するジャイロコンパス自体の精度が、最終的なシールド位置の計算精度を支配する。前記の実験は横河電機製のジャイロコンパス(精度0.2 deg)を用いて行なったものであるが、途中でのチェック測量の間隔を延ばすためにも、計算誤差は可能な限り小さいことが望ましい。計算誤差を小さくする方法として、次の二つの手法が考えられる。

- (1) 精度の高いジャイロを選定し使用する。
- (2) 現状のジャイロコンパスを使用する中で、

計測手法	レーザビーム方式	ジャイロ方式
特徴	外部の基準点をベースにして位置認識を行なう手法【外界センサー方式】 トンネル坑内の基準点にレーザ照射装置を取付け、受光部で検出して、シールド機の位置・方向を測定する	内部の搭載型計器を利用して位置認識を行なう手法【内界センサー方式】 シールド機にジャイロコンパスを直接搭載し、掘進中の方位変化から現在位置を計算により求める
使用計器	レーザ発信器、受光器、光波測距儀、傾斜計など	ジャイロコンパス、圧力式沈下計、傾斜計、ストローク計
長所	・坑内基準点からの絶対位置が測定できる ・測定誤差が累積しない ・自動計測の信頼性が高い	・坑内の制約を受けないため、どのような路線にも適用できる ・計器の盛替えが不要 ・取扱いが容易
短所	・シールド機の後方に視準空間が必要 ・小断面シールドや曲線の多い路線では使用に制約を受ける ・計器の盛替えが必要(基準点測量)	・掘進に伴って累積誤差が生じる可能性がある ・チェック測量が必要 ・シールド機が横すべりした場合、ジャイロでは測定できない
備考	・レーザ照射距離は200mが限度 ・ジャッキ推力の影響を受けない位置に計器を設置	・鉛直位置については、基準水面からの高さを測定(誤差は累積しない)

表-1 位置決め手法の相互比較

工夫によって解決を図る。

この内、(1)については、ベンジュラスジャイロ、レート積分ジャイロなどがある。いずれも精度は1～3分程度と高いが、前者は振動・衝撃に弱く、また後者は時間ドリフト（経時的な指示値のズレ）がある。シールド工事では、長時間使用に対して信頼性が高いこと、振動・衝撃などの外乱に対して安定であること、などの特性を備えた計器が必要である。その点、標記のジャイロコンパスはシールド工事に適している。測定精度は0.2 degと幾分悪いが、測定範囲（フルスパン=360 deg）に対する直線性は0.2/360=0.0006と、一般の工業計器のそれが、0.001程度であるのと比べて遜色ないとも言える。

以上より、ここでは(2)に示した方法により、自動計測システムの計算精度を向上させることを考える。

#### 4. 2台のジャイロコンパスを用いた基礎実験

##### 4.1. 実験の目的

シールドが大断面の場合、機内への搭載スペースが十分にとれるため、2台のジャイロコンパスを搭載することが可能である。そこで、2台のジャイロコンパスで同時に測定を行ない、平均処理することにより測定精度を向上させることを考える。

自動計測では何よりも信頼性が求められており、安定性の良いデータが継続して得られることが必要である。ここでは実験により、平均処理した場合のデータの特徴を調べることにする。

##### 4.2. 実験方法

2台のジャイロコンパスをそれぞれ同時に測定し、同時刻の指示値を平均したデータと、元の指示値の変化とを比較する。

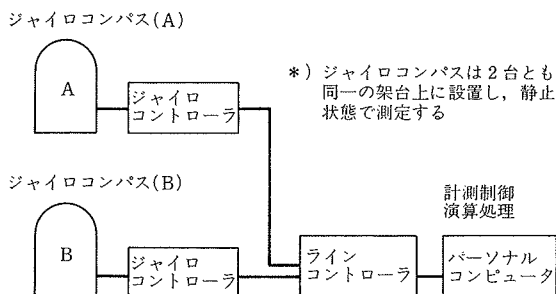


図-2 計測系統図

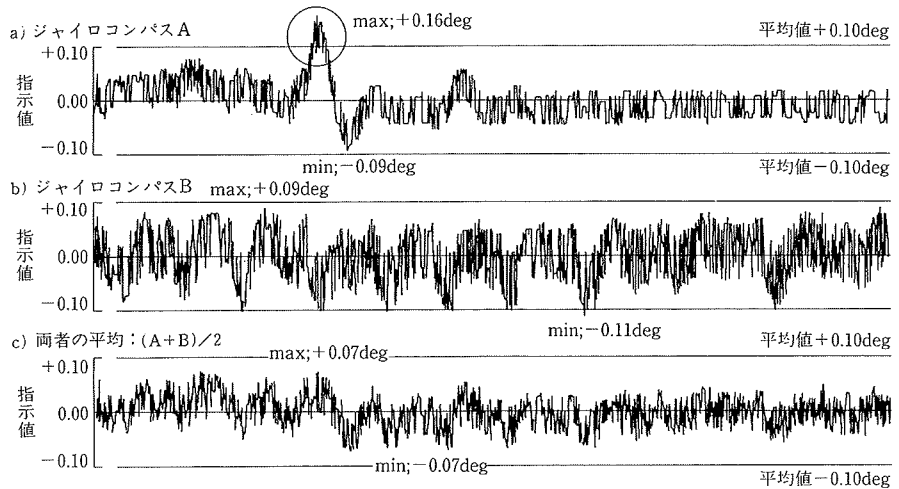


図-3 ジャイロ指示値の測定結果（20時間）

図-2に計測系統図を示す。ジャイロの指示値は10秒間隔で、20時間にわたって連続測定した。使用ジャイロの仕様は次の通りである。

- ・ジャイロコンパス；横河電機製・SG-300X
- ・ジャイロ回転数；20,000 rpm
- ・方位分解能；0.01 deg
- ・指北精度（公称精度）；±0.2 deg

##### 4.3. 実験結果と考察

図-3に実験結果を示す。ジャイロ指示値は各々の測定ごとに全データの平均値（真北方位角に相当する）を求め、これからの偏差で表示した。20時間の実験期間を通じて、測定データはほぼ、公称精度の半分である±0.1 deg以内の範囲で変動していることが分かる。実験結果をまとめて示すと次のとおりである。

(1) ジャイロコンパスを1台のみ使用した場合 Aのジャイロコンパスでは、一部に指示値が大きいくずれる部分がある。平均値からの偏差はmax=+0.16 deg, min=-0.09 degである。

一方Bは、急激な変動もなく全期間にわたって一定範囲内で変動しているが、その変動幅は一般にAよりも大きい。平均値からの偏差は、max=+0.09 deg, min=-0.11 degである。

(2) 2台の指示値を平均処理した場合 2台のジャイロコンパスの指示値をそれぞれ同時刻で平均し、新たな指示値として求めたものである。指示値の範囲は±0.07 degの範囲に全データが収まっており、1台のジャイロコンパスを単独で使用するよりも、変動の少ない安定性のよいデータとなっていることが分かる。

以上は20時間の連続測定の結果であるが、実際のシールド工事では、上記のように長時間かけて計測が行なわれる訳ではない。1リングの掘進が終了しセグメントを組立てている期間が、位置計算のための重要な測定時期

にあたる。その期間はシールド径によっても異なるが、一般には20~30分程度である。そのためAの例のように指示値が大きく変動した時期に、丁度測定が行なわれるとすれば、シールド位置の計算結果に重大なエラーが生じることになる。2台のジャイロコンパスを用いて平均処理することは、データの安定化を図り、計算精度を向上させるうえでの有効な手段となる。

また、このほかにも、2台の計器を用いることのメリットとして、計測異常に対する相互監視機能が挙げられる。指示値の差を常時監視することにより、万一、片方の計器に故障または何らかの異常が生じた場合、速やかに発見し対処することも可能となる。

### 5. 自動誘導システムへの展開

#### 5.1. 自動誘導のために必要な機能

今までに述べてきた自動計測システムに、推進機構の自動制御機能を付加すると、自動誘導システムを構成することができる。

図-4に自動誘導システムのフローチャートを示す。自動計測によってシールド機の現在位置および姿勢が決定されると、計画路線に近付けるための最適のジャッキパターンが選択され、推進が行なわれる。これら一連の手順の中で、最も重要な機能は次の2点に集約できる。

- (1) 進路予測とジャッキ選択機能
- (2) 自動計測結果のフィードバック機能

この内、進路予測とジャッキ選択は自動誘導の中心となるものである。複雑な地盤内をジャッキ操作だけで掘進して行かなければならないため、その進路を正確に予測することは容易ではないが、安定した掘進を維持するためにも、使用ジャッキパターンと進路との関係を早期に把握する必要がある。

一方、自動計測結果のフィードバックは、シールド掘進中の位置変化を常時計測し、ジャッキ選択の適否を判定するものである。計画路線からのズレが許容限度を越えそうな場合には、あらかじめ定めた手順に従って使用ジャッキの変更が行なわれる。

#### 5.2. 掘進データの蓄積および検索

推進ジャッキの選択を行なう場合、当初は使用ジャッキパターンに対するシールド軌跡が仮定される。例えば有限要素法などによりシールド掘進をモデル化し、解析的にその進路を予測することもできる。図-5はこのようにして求めたシールド軌跡の一例を示したものである。

ところが実際には微妙な地質の変化、シールド機固有のくせなどによって、想定した軌跡とは異なった挙動を示すことが多い。そのため、どのようなジャッキパターンで、実績としてどれだけ曲がったかのデータ蓄積が必

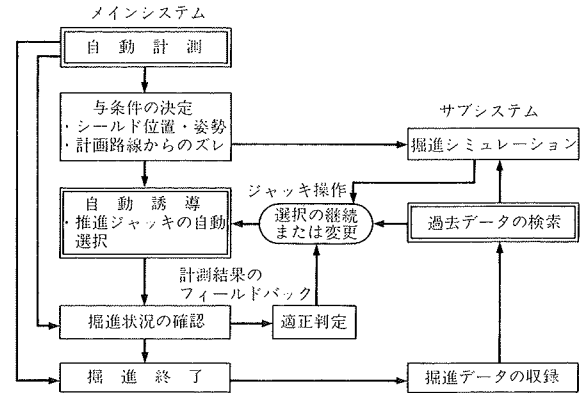


図-4 自動誘導のフローチャート

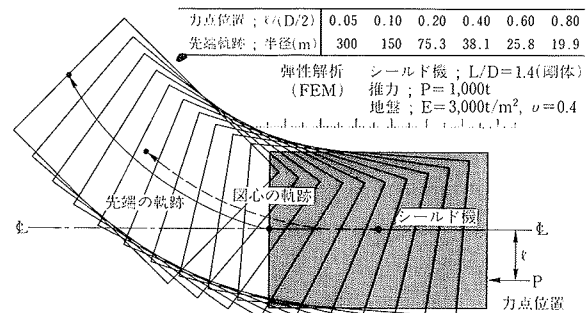


図-5 シールド軌跡の解析例

要である。工事の進捗に合わせて順次ジャッキの選択を見直し、その現場に合った合理的な選択手法を見出して行く必要がある。地質の変化を考慮すれば、直近のデータほど重要であることは言うまでもない。

ジャッキパターンは、図-6に示すように、使用するジャッキの組合せによる合力位置(力点)で代表させることができる。多くの組合せ

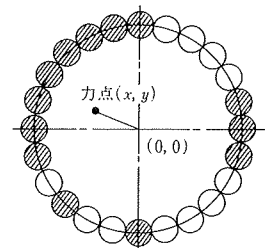


図-6 使用ジャッキと力点位置

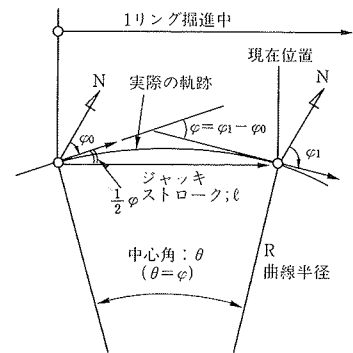


図-7 シールド軌跡と方位変化

があるが、運用上は20種類程度の基本パターンを準備しておけばよい。あまり多すぎるとデータ活用の面では不都合である。

またシールド機の軌跡は、図-7に示す掘進前後の方位変化から次式により求めることができる。

$$R = \frac{\ell}{2} \cdot \frac{1}{\sin[(\varphi_1 - \varphi_0)/2]} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、R；シールド軌跡を円形と仮定した場合の曲線半径、 $\ell$ ；ジャッキストローク、 $\varphi_0$ 、 $\varphi_1$ ；掘進前後の方位角である。

### 5.3. 進路予測とシミュレーション

あるジャッキの組合せで推進した場合に、シールド機がどのような軌跡で掘進されるかを想定することは、自動誘導の基礎となるものである。通常はあらかじめプログラム化され、自動誘導システムのジャッキ自動選択機能の中に組込まれている。ただし施工管理の一環として、ジャッキ選択を人為的に変更する場合も生じてくる。過去の掘進データを参照しながら、掘進状況をシミュレーションする機能が必要である。

シールド機を計画路線に近付ける場合、ズレの程度にもよるが、一般には短い区間で急激に修正することは望ましいことではない。シールド機の現在の姿勢および計画路線との位置関係を考慮しながら、5～10リング前方でズレを収束できるよう、徐々に修正して行くのが普通である。図-8は掘進シミュレーションの概念を示したものであるが、シールド機を計画路線に近付けるための最も合理的な方法が、コンピュータ画面上で検討される。

## 6. 大断面シールドへの適用

図-9に大断面シールドにおける自動誘導システム概念を示す。

自動計測としてジャイロ方式を用いる場合には、4章で述べたように2台の計器を使用するなどして指示値の安定化と信頼性向上に努めるべきである。また図中に示すようにレーザビーム方式を併用して、現在位置の測定結果を相互にチェックする方法を採ることもできる。この方法では、レーザ照射装置の盛替えが必要となった場合でも、掘進工程に影響を与えないようにジャイロ方式で自動計測を行ないながら、余裕のある時間帯に盛替えて、その後のチェックに備えることも可能となる。

シールド機の自動誘導は、現在オペレータが行なっている方向制御に関する運転操作を、全て自動化することを目指している。言わばシールド掘進の無人化である。そのためには地上に掘進データの集中管理機能を設け、そこからの指令をもとに合理的な掘進操作が行なえるよ

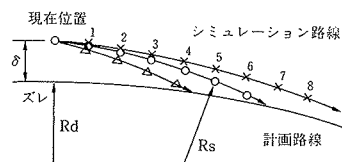


図-8 進路のシミュレーション

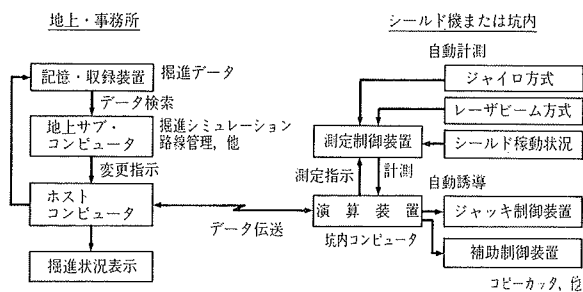


図-9 大断面シールドでの自動誘導システム

うな管理体制を整えることが必要である。

坑内の演算装置（コンピュータ）は、自動計測を制御するとともに、地上からの変更指示も含めて推進機構を制御して、シールド機を自動誘導するために用いる。

## 7. むすび

ここではジャイロコンパスを用いた自動計測システムを中心として、大断面シールド工事に適用する場合の信頼性向上と、自動誘導システムへの展開について述べてきた。

自動計測では何よりも計測結果に対する信頼性が求められており、シールド機の掘進中の位置変化を精度よく測定できる技術を確認することが重要である。2台のジャイロコンパスを使用し、指示値を平均処理して用いる手法は、データの安定化を図り計算精度を向上させるための有効な手段となり得る。ここではさらにジャイロ方式とレーザビーム方式の併用についても提案したが、異なる方式の自動計測手法を併用することにより、相方の欠点を補完し合った、より信頼性の高いシステムとすることができる。2台の計器あるいは2系統の計測手法を用いることは経済面では問題があるが、計測異常に対する相互監視機能を付加することにより、自動計測の信頼性向上に役立つものと思う。

今後は、ここで提案した自動誘導システムの完成を目指して、さらに研究を続けて行きたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 山下, 藤原: シールド自動誘導システムに関する研究 (その1) —ジャイロなどを用いた位置・姿勢測量の検討—, 大林組技術研究所報, No. 32, (1986), pp. 67～71
- 2) 山下, 藤原: 同題 (その2) —シールド模型装置による測定精度の検証—, No. 34, (1987), pp. 37～41
- 3) 山下, 藤原: 同題 (その3) —現場実験による測定精度の検証—, No. 37, (1988), pp. 26～30