

# 削孔誘導装置の精度向上手法と その適用結果に関する報告

宮原 宏史<sup>1</sup>・山田 浩幸<sup>2</sup>・小笠原 光雅<sup>3</sup>

<sup>1</sup>マック株式会社 技術部(〒272-0832 千葉県市川市曾谷8-16-3)

E-mail:mmic@maple.ocn.ne.jp

<sup>2</sup>株式会社鴻池組 土木技術部(〒530-8517 大阪市北区梅田3-4-5)

E-mail:yamada\_hy@konoike.co.jp

<sup>3</sup>株式会社大林組 四国支店(〒760-0007 香川県高松市中央町11-11)

E-mail:ogasawara.mitsumasa@obayashi.co.jp

近年のトンネル掘削においては、余巻きによるコスト増のみならず、掘削残土（ズリ）処理など環境面の観点からも、余掘り低減が重要な課題となっている。そのため、発破掘削の場合、削岩機に各種の削孔誘導装置を装備した事例が増加しているが、誘導装置の精度が削岩機の経年劣化とともに低下する問題が指摘されていた。筆者らは、トータルステーションを活用した自動追尾式削孔位置誘導システムの開発によりその問題を解決し、実施工現場において平均余掘厚を従来技術と比較して約44mm低減させた。

*Key Words* : 削孔精度, 自動追尾トータルステーション, 削岩機, 余掘り

## 1. はじめに

近年の建設工事を取り巻く社会的情勢は非常に厳しく、建設コストの低減はもちろん、周辺環境への配慮など、求められる品質は急速に高まっている。その中で、トンネル掘削においては、覆工コンクリートの余巻き低減を始め、掘削残土（ズリ）処理場の用地問題や輸送時に排出されるCO<sub>2</sub>の低減、さらに廃出土に重金属等の有害物質が含有される場合の処理量低減など、環境面の観点からも、余掘り低減に対する要求が高まっている。

発破掘削の場合、トンネル断面形状に沿った掘削外周ライン上の正確な削孔位置と、適正なさし角(トンネル計画線に対する削孔角度)が重要な要素であることが過去の研究<sup>1),2)</sup>からも知られており、最適化のための設計例も示されている。

正確な削孔位置の表示は、切羽の掘削外周ラインにレーザー光によるマーキングを行う手法<sup>3)</sup>が広く採用されている。また、適正なさし角の維持のために削岩機が多関節ブームの動作を角度センサ等により検出する、ロボット工学で言う内界センサ方式を採用した削孔誘導装置<sup>2)</sup>、さらに自動削孔が可能な全自動削孔誘導装置を適用した事例等<sup>4),5)</sup>が増加している。

しかし上記削孔誘導装置には関節などの経年劣化による精度低下の指摘<sup>5)</sup>がある。唯一、経年劣化した装置データに補正を行い施工実績として利用した報告<sup>1)</sup>は見られるものの、正確な削孔位置を保つために精度低下を解決する手段は示されていない。

本報告では、経年劣化による精度低下の問題を解決するために、従来用いられた内界センサに、

外界センサとして自動追尾トータルステーションを組合わせた、自動追尾式削孔位置誘導システムを開発し、工場、実施工現場における精度測定、経年劣化状況の把握、施工結果の測定と過去の研究との比較を行い、その有用性を示した結果について述べる。

## 2. 従来技術の検討

### (1) 削岩機ブームの構成

削岩機のブームはその円滑な稼動のために多数の自由点を有している。回転部と伸縮部の要素をそれぞれ  $d$  とすると、一般的に回転部は  $d_1$ :ブームスイング,  $d_2$ :ブームチルト,  $d_3$ :ガイドチルト,  $d_4$ :ガイドスイング,  $d_5$ :ガイドロータリー,  $d_6$ :ガイドダンプの6箇所、伸縮部は  $d_1$ :ブームスライド,  $d_2$ :ガイドスライドの2箇所である(図-1)。よって削孔時のブームの持つ自由度は、 $6 + 2d$  と表すことができる。

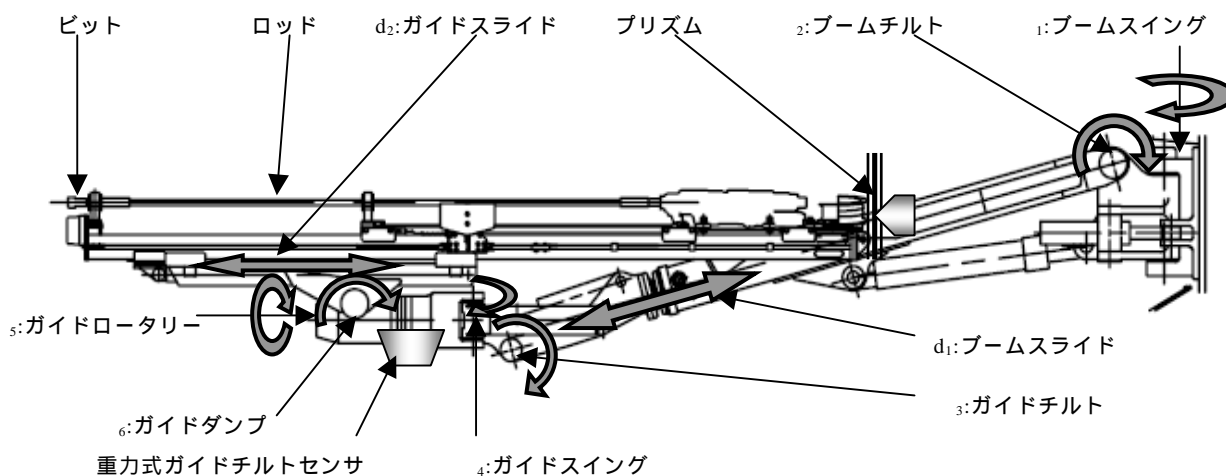
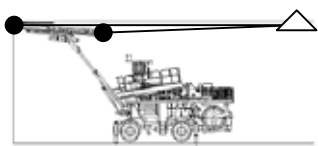
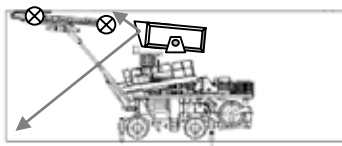
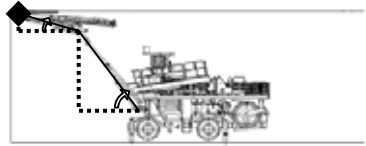


図-1 削岩機ブームの構成

表-1 従来技術の比較

	技術A	技術B	技術C
基本技術	レーザー応用システム <sup>3)</sup> (準外界センサ方式)	画像処理センサ <sup>6),7)</sup> (外界センサ方式)	関節センサ <sup>1),4),5)</sup> (内界センサ方式)
削孔誘導方法	切羽上の削孔点とガイドセル後端のレーザー光を目視する	ガイドセル上のマーカーを撮影し、画像解析する	ブーム各関節の角度センサ値を合成する
測定要素	2 (レーザーの目視確認を水平角, 鉛直角の測定と考える)	3 (前後マーカーによる水平角鉛直角の測定に加えガイドロータリーの測定)	$6 + 2d$ (全可動部の測定)
問題点	・削孔位置とさし角を数値として管理せず ・レーザー目視確認のみ	・削孔時にマーカー同士が近接した場合の誤認や、カメラからマーカーが隠れた場合に問題がある	・ブームに鋼製支保工等重量物を載せると精度に影響 ・切羽距離を距離テープで人力測定 ・基準レーザーセットは目視
説明図			

## (2) 従来技術とその問題点

削孔誘導方式の従来技術に関する比較を表-1に示す。技術Aの誘導方法は、レーザー光線を切羽上の削孔点と適正さし角を持ったガイドセル後端予想点の2箇所照射し、ガイドセル誘導の目安とする技術である。レーザー光の目視確認を水平、鉛直角の測定と考えると、ガイドセル長を定数として、測定要素は2である。これは視覚を使用した準外界センサ方式であるといえるが、さし角を目視確認するための補助的な位置づけであり、削孔位置とさし角を数値として管理しているものではない。

技術Bの誘導方法は、ガイドセル前後のマーカを撮影し、画像処理により求めたさし角と、マーカ位置とロッド中心の離れから削孔位置を算出する技術である。マーカ位置と削孔位置の関係は、ガイドロータリーにより変化する為、その値も測定する必要がある。よって、測定要素は3となる。これはカメラを利用した外界センサ方式の代表的な例である。この方法はブーム前面の切羽の存在や、作業性の問題により全方位からブームを撮影することは難しく、ブーム後方からの撮影となる。よってトンネル進行方向のガイドセル位置の特定が難しく、さらに掘削外周ライン全周でカメラがガイドセル画像処理用のマーカを理想的に捉えることは困難であった<sup>7)</sup>。

技術Cの誘導方法は、図-1中のブーム上 1～6,  $d_1 \sim d_2$  の各関節にセンサを内蔵することによりブーム全体をモデル化し、ビット先端座標とさし角を算出する技術である。よって測定要素は6 + 2dであり最も複雑な機構を有する。過去の報告によると、ブームの自重または本来の削孔以外の使用方法として鋼製支保工の建込みなどによる重量物の影響で、関節の機械的ガタの増加や部材の変形が経年的に発生し、さらに目視による基準レーザーセット、切羽距離測定への人的作業の介入による誤差も発生するなど、精度、作業性の両面で問題点が存在する<sup>1), 5)</sup>。しかし技術AやBと比較した場合、削孔位置とさし角算出が確実にできることから、削岩機の削孔誘導装置の主流であり、関連した研究や施工結果の報告も存在する<sup>1), 2), 5)</sup>。

## 3. 解決のための手段

### (1) 自動追尾トータルステーションの適用

精度低下の問題解決のため、技術Cのブームの機械的ガタを無くし経年劣化の防止が可能な仕様に改造することは、費用面ばかりでなく稼働部クリアランスの減少が、多少の衝撃や荷重で削孔作業が不能になる危険性を高めてしまい、現実的ではない。

そこで、技術Cにおけるブームの経年劣化による誤差を解決する為に、トンネル掘削において多用される自動追尾トータルステーションを外界センサとして採用し、ガイドセルを直接測定する方法を検討した。ビットの先端(削孔位置)とロッドの後端を測定し、二点の座標からガイドセルのさし角を算出することが最も簡単かつ完全な解決手段ではあるが、削孔時のビットの先端は常に切羽面に向っており測定を行うことは困難である。そこで、ガイドセル後部のロッドの延長線上に設けたプリズム(図-1)を測定し、その正確な座標値を算出し、ブームには方向角を算出する為の最小限の角度センサを備え、削孔位置とさし角を算出する<sup>8)</sup>自動追尾式削孔位置誘導システム(以下、本システム)を開発した。本システムにより、ブームの機械的ガタ(図-2)に起因する削孔位置のズレを補正し、経年劣化による精度低下や、外周孔削孔中のアウトリガ沈下(図-3)等の誤差要因も低減できると考えた。

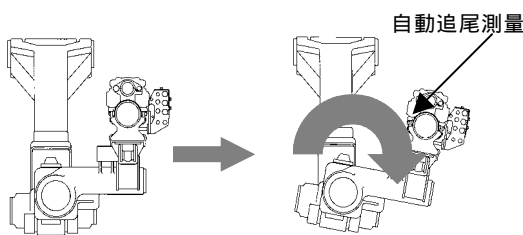


図-2 機械的ガタ（スライド部・ピン磨耗）発生状況

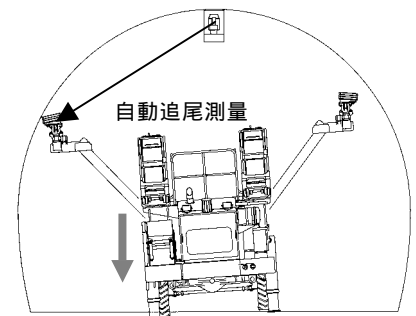


図-3 アウトリガ沈下発生状況

また、削岩機本体後部の3箇所にプリズムを設置し、これを自動追尾トータルステーションを用いて、全自動で測量することにより、さし角の基準となる削岩機方向角を求める手法を採用した。これにより技術Cにおける目視による基準レーザーセットの工程を自動化でき、人的誤差のない正確なさし角の算出が可能であると考えた。またトータルステーションは距離測定機能を持つため、同じく外界センサである技術Bのカメラと比較して、凹凸のある切羽面までの自動距離測定と、正確な誘導が可能であると考えた。

## (2) 内界センサ

内界センサとして、水平方向の関節1と4にレゾルバ式エンコーダ(角度精度:0.5°)を使用したブームスイングセンサ(BS)、ガイドスイングセンサ(GS)を装備した。また4と5の間に重力式傾斜計(角度精度:0.1°)を使用した重力式ガイドチルトセンサ(GT)(図-1)を装備することによりガイドセル傾斜角を検出し、ブーム内の測定要素を技術Cの6+2dから3に減少させた。ガイドセルに直接傾斜計を設置しなかった理由は、削孔時の振動や水の影響を避けるためである。そのためガイドセルのみを独立して動作させる。ガイドダンプは削孔時には使用せず、動作した場合アラームを表示することとした。

## (3) 外界, 内界センサ値の合成

本システムでは図-4に示す3種の座標系を定義し、図-5に示すフローに従い、各測定値を合成、変換する手法を採用した。

### a) 削岩機座標系 J

削岩機内における系であり、削岩機本体上の原点 $O_J$ より、基準方向を前方のX軸、平面状に直行するY軸、X,Yと直行するZ軸により設定する。

この系内において、BS, GT, GSにおける局座標系をそれぞれ $BS, GT, GS$ とおくと、局座標系は図-6の関係となる。さらにBS回転方向はその構造上、削岩機と水平方向、垂直方向の軸方向が同一であり、X軸方向も前方を0°とする座標系に設定すれば、 $BS$ と $J$ は平行な関係となり、 $J$ におけるセンサ合成値 $\bar{\mu}$ はBS, GT, GSの値を順次合成することにより求まる。

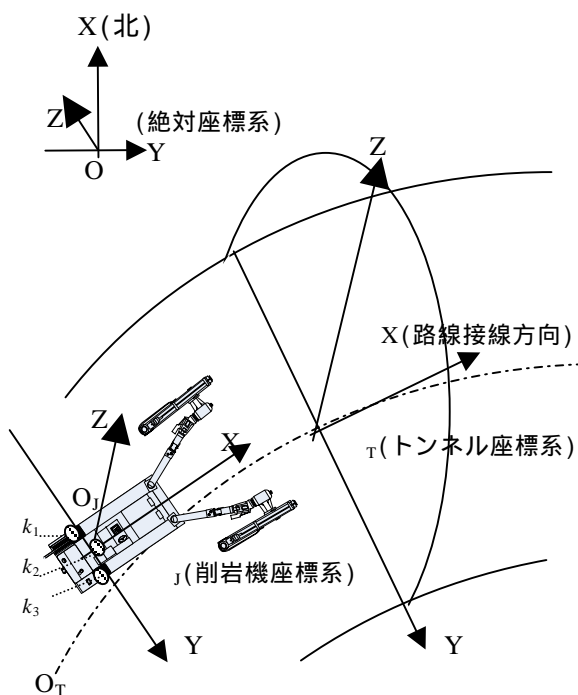


図-4  $J, T, J$ の関係

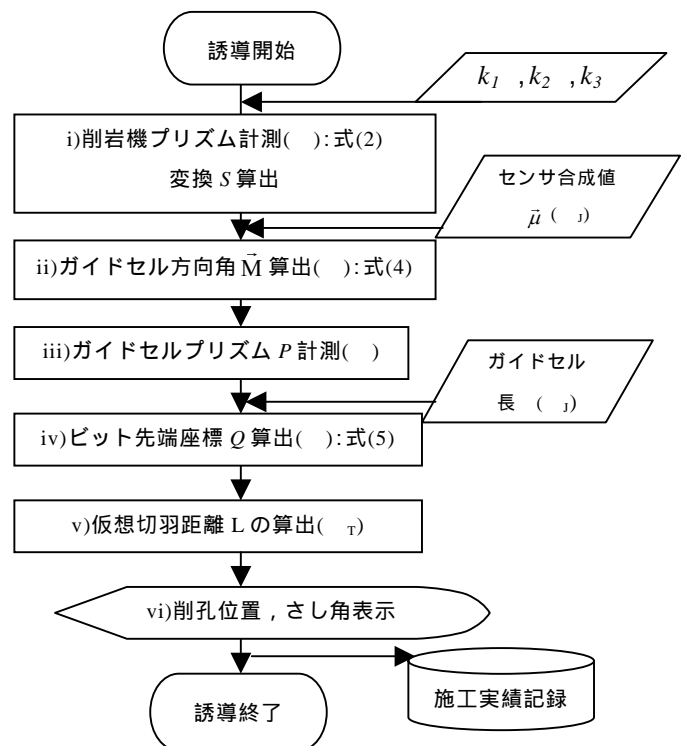


図-5 データ処理フロー

b) 絶対座標系

工事の際の測量を行う座標系である。原点Oを各公共基準点に置き、南北をX軸、東西をY軸、鉛直方向をZ軸として設定する。

この系内では、ガイドセル後部プリズムの測量と、削岩機後部プリズムの測量による削岩機方位角の算出が行われる。まず装置製作時に、式(1)に示す三箇所の削岩機プリズムの削岩機座標系 $k_j$ 内の座標値 $k_1, k_2, k_3$ を求め、定数としてシステムに記憶させておく。

$$k_1 = \begin{pmatrix} x_{k1} \\ y_{k1} \\ z_{k1} \end{pmatrix} \quad k_2 = \begin{pmatrix} x_{k2} \\ y_{k2} \\ z_{k2} \end{pmatrix} \quad k_3 = \begin{pmatrix} x_{k3} \\ y_{k3} \\ z_{k3} \end{pmatrix} \quad (1)$$

次に削岩機を切羽にセットしたのち、式(2)に示す各プリズムの絶対座標系 $K_j$ 内の座標値 $K_1, K_2, K_3$ を後方のトータルステーションから測量する。

$$K_1 = \begin{pmatrix} X_{k1} \\ Y_{k1} \\ Z_{k1} \end{pmatrix} \quad K_2 = \begin{pmatrix} X_{k2} \\ Y_{k2} \\ Z_{k2} \end{pmatrix} \quad K_3 = \begin{pmatrix} X_{k3} \\ Y_{k3} \\ Z_{k3} \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで $k_j$ を $K_j$ に移す変換を、 $3 \times 3$ 行列 $S$ と定めると、 $n=1 \sim 3$ において式(3)を満たす $S(a \sim i)$ を求めることにより $k_j$ から $K_j$ への変換を一義的に定めることができる。

$$\begin{pmatrix} X_{kn} \\ Y_{kn} \\ Z_{kn} \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} x_{kn} \\ y_{kn} \\ z_{kn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{kn} \\ y_{kn} \\ z_{kn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

また、ガイドセル後部のロッドの延長線上に設けたプリズムの測量もこの系で行われ、絶対座標系 $K_j$ におけるガイドセル方向 $\vec{M}$ およびビット先端座標 $Q$ はそれぞれ式(4)、式(5)のように表せる。

$$\vec{M} = S \cdot \vec{\mu} = S \cdot (BS + GT + GS) \quad (4)$$

$$Q = P + \ell \cdot \vec{M} \quad (5)$$

但し、 $\ell$ : ガイドセル長  
 $P$ : ガイドセル後部プリズム座標

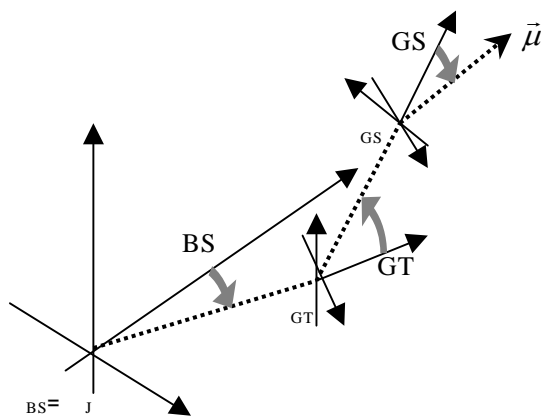


図-6 局座標系の関係

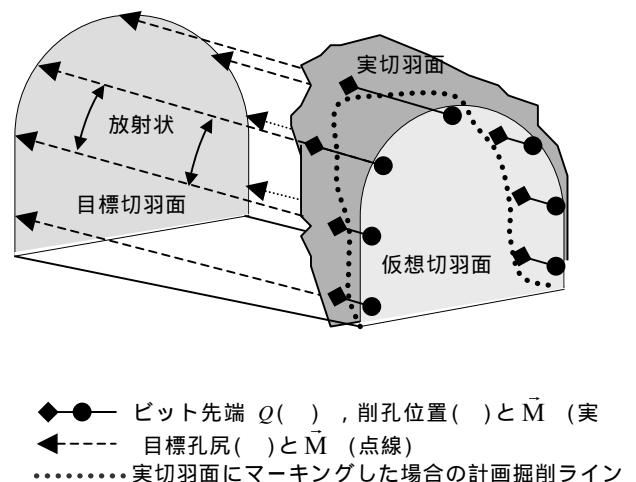


図-7 削孔位置の概念図

c) トンネル座標系  $T$

トンネル内の構造物の評価を行う座標系である。原点 $O_T$ を路線の基点に置き、トンネル進行方向をX軸、直交するY軸、鉛直方向をZ軸として設定する。この系では、路線にカーブが存在しても、任意の切羽における路線の接線方向をX軸方向と考える。

しかし施工時の実切羽面にはYZ平面より数十cmの凹凸の発生が避けられない。そこにマーキングした設計掘削ラインから目標切羽面へ、所定の余掘厚になるように削孔長、さし角を設定すると、外周孔全体のさし角が非放射状になり、結果として発破効率や掘削形状を悪化させる。

本システムでは目標孔尻に各孔が到達するまでのさし角を、均一な放射状に保つことを目的とし、 $T$ 上のYZ平面に、仮想切羽面と呼ぶ基準平面をシステム内に設定し、削孔位置の基準を実切羽面とビットの接点ではなく、仮想切羽面とさし角方向 $\vec{M}$ の交点として管理する手法を採用した(図-7)その際、実切羽面が仮想切羽面より凸な場合には $Q$ が計画掘削ラインよりも内側になり、アタリ(計画掘削ラインの内側に岩が残った状態)が発生する。そのため、実切羽において最も凸な地点に、仮想切羽面を設定した(図-8)。

以上述べた本システムを採用した5台の削孔誘導装置付き削岩機を製作し、実機試験を行った。

4. 実機試験結果

(1) 精度測定

誘導装置の精度を検証するため、削岩機製作工場にて新品時の誘導装置付き削岩機No.1~5の5台と、その中から実施工現場にて1200時間稼働したNo.5の精度を求めた。測定は最も部材のたわみが起こりやすく、かつ精度が要求される切羽掘削外周ライン付近を想定し、ビット先端座標の測量値を正とし、システム算出座標値との差である  $Y$ ,  $Z$  を求めた。なお、検証時にはビット先端にも測量用プリズムを取付け、後方から自動追尾を行うトータルステーションと同精度(角度精度3秒、プリズム測距精度2mm+2ppm)の機器を使用した。

$Y$ ,  $Z$  とともに、 $n$ (個)のデータを標準正規分布からの標本と考え、i)標準偏差  $S_Y, S_Z$ , ii)平均値  $\bar{x}_Y, \bar{x}_Z$ , を求め、これらより iii)信頼度 95%の精度  $Y_A, Z_A$ , iv)水平、鉛直さし角の精度  $\alpha_A$ ,  $\beta_A$  を求めた。

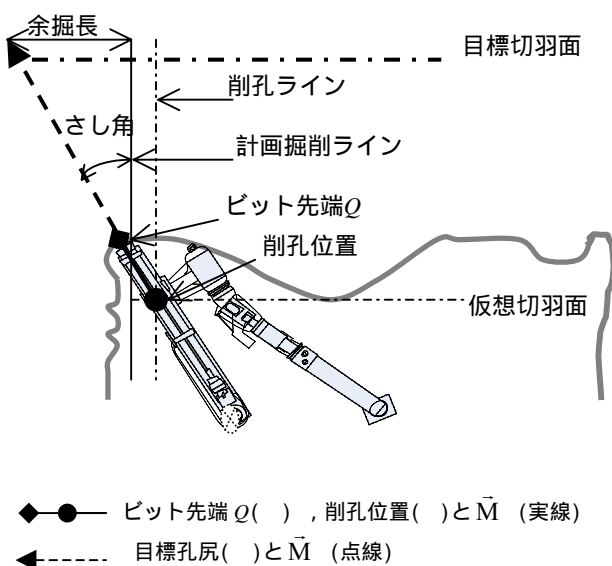


図-8 仮想切羽概念図

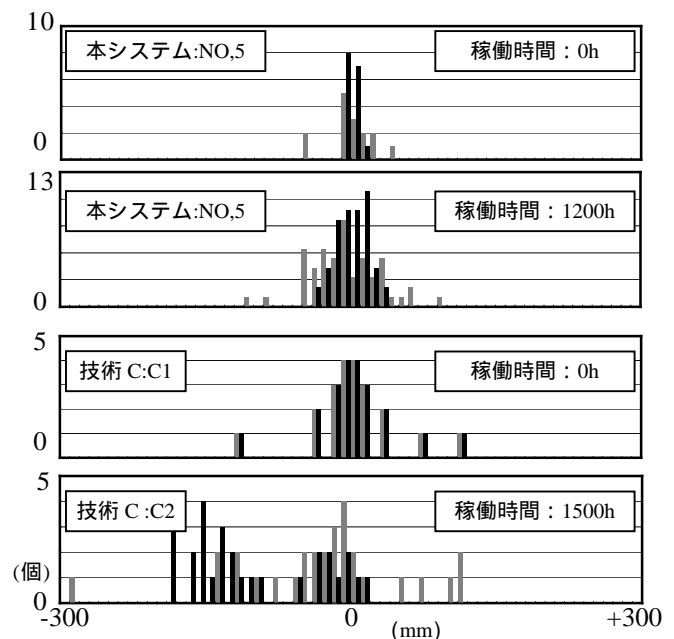


図-9 本システムと技術Cの  $Y$ ( )  $Z$ ( )分布図

表-2 本システムと技術Cの位置，さし角精度比較

機械NO.	本システム			技術C	
	1～5	5	5	C1 <sup>4)</sup>	C2 <sup>1)</sup>
稼働時間 (h)	0	0	1200	0	1500
$\ell$ (mm)	5台の平均値:5518	5860	5860	10806	10806
n (個)	94	16	54	20	29
$S_Y$ (mm)	28.80	23.59	37.19	43.73	82.58
$S_Z$ (mm)	9.63	4.68	17.47	43.73	65.24
$\bar{x}_Y$ (mm)	0.05	0.00	-5.28	3.57	-27.00
$\bar{x}_Z$ (mm)	1.41	-0.06	0.80	3.57	-97.28
$Y_A$ (mm)	-57.55 ~ +57.65	-47.18 ~ +47.18	-79.66 ~ +69.10	-83.89 ~ +91.03	-192.16 ~ +138.16
$Z_A$ (mm)	-17.85 ~ +20.67	-9.42 ~ +9.30	-34.14 ~ +35.74	-83.89 ~ +91.03	-227.76 ~ +33.20
$\alpha_A$ (°)	-0.60 ~ +0.60	-0.46 ~ +0.46	-0.78 ~ +0.68	-0.45 ~ +0.48	-1.02 ~ +0.73
$\beta_A$ (°)	-0.19 ~ +0.21	-0.09 ~ +0.09	-0.33 ~ +0.35	-0.45 ~ +0.48	-1.21 ~ +0.18

また技術Cについても参考文献<sup>1),4)</sup>から同様に計算した．ここで技術C<sup>1),4)</sup>は同一機体ではないが，i) 名称が同一<sup>1),4)</sup>，ii)初期精度が同一<sup>1),4)</sup>，iii)ブームの基本的構造が図-1と同様<sup>4)</sup>であることから，技術Cの経年劣化を示し，さらに本システムと比較対照できるデータと考え，機械No.は新品時をC1<sup>4)</sup>，1500時間経過後をC2<sup>1)</sup>とした．結果を表-2に示す．また図-9に本システムNo.5と技術C<sup>1),4)</sup>のY，Z範囲分布を示す．本システムNo.5の1200時間経過後のデータは，新品時における技術CのデータであるC1<sup>4)</sup>と比較しても， $Y_A$ の数値(表-2)で約+4mm～-22mm， $Z_A$ で約-50mm～+55mm良好なデータを示している．

本システムでは，外界センサ採用の効果により，削岩機が新品時から持つ関節クリアランスなどの誤差要因を低減しており，1200時間使用後においても技術Cの新品時を上回る精度があることが示されている．

## (2) 施工結果

実施工現場における，レーザーマーキング(切羽面の照射のみを行った為，技術Aとは区別する)，技術C，本システムを適用した区間の余掘厚測定結果を図-10，表-3に示す．測定には，角度精度3秒，距離精度3mm+2ppmのノンプリズム断面測定機を用い，断面毎の平均余掘厚と，測定された断面の凹凸を標準正規分布と考えた標準偏差を算出した．これを各技術の適用区間で平均したものが区間余掘厚，区間標準偏差である．技術Cの削岩機は，表-2とは別のC3を用いた．

本システムは技術Cと比較して，区間余掘厚に約44mm，区間標準偏差に約20mmの低減が認められた．これは4(1)にて示した精度面での優位性を本システムが有する事によるものと考えられる．

## 5. まとめ

筆者らは，自動追尾式削孔位置誘導システムを開発し，内界センサ方式である技術Cに対して経年劣化を低減する手法を示した．またカメラを利用した外界センサ方式である技術Bに対して確実にさし角算出が行え，トンネル進行方向の距離測定が確実な手法を示した．さらに，レーザー光の目視確認が必要である技術A，Cにおける人的誤差を排除した．

その結果，1200時間稼働後の削孔精度の標準偏差は，高さ方向で約17mm，横方向で約37mmであり，過去の研究と比較して本システムの優位性を確認した．また適用事業所において，技術Cに対して，約44mmの余掘り低減および約20mmの断面平滑化効果を確認した．

しかし発破方式のトンネル掘削において，削孔精度の向上は余掘り厚低減のための1要因に過ぎない．そのほか発破技術は勿論のこと，発破後のコソクや吹付け精度，鋼製支保工が必要な支保パターンではその建込み精度の確保など，多様な要因が存在する．近年は各種トンネル計測システムが一般化し，その数値測定は容易になっているが，その数値のほとんどは数サイクル施工後に測定されている．施工と測定の間隔が短いほど施工に反映し易くなるが，人的コストの増加や，夜間，休日作業の増加の一因ともなり得るため，その間隔の短縮は難しい．

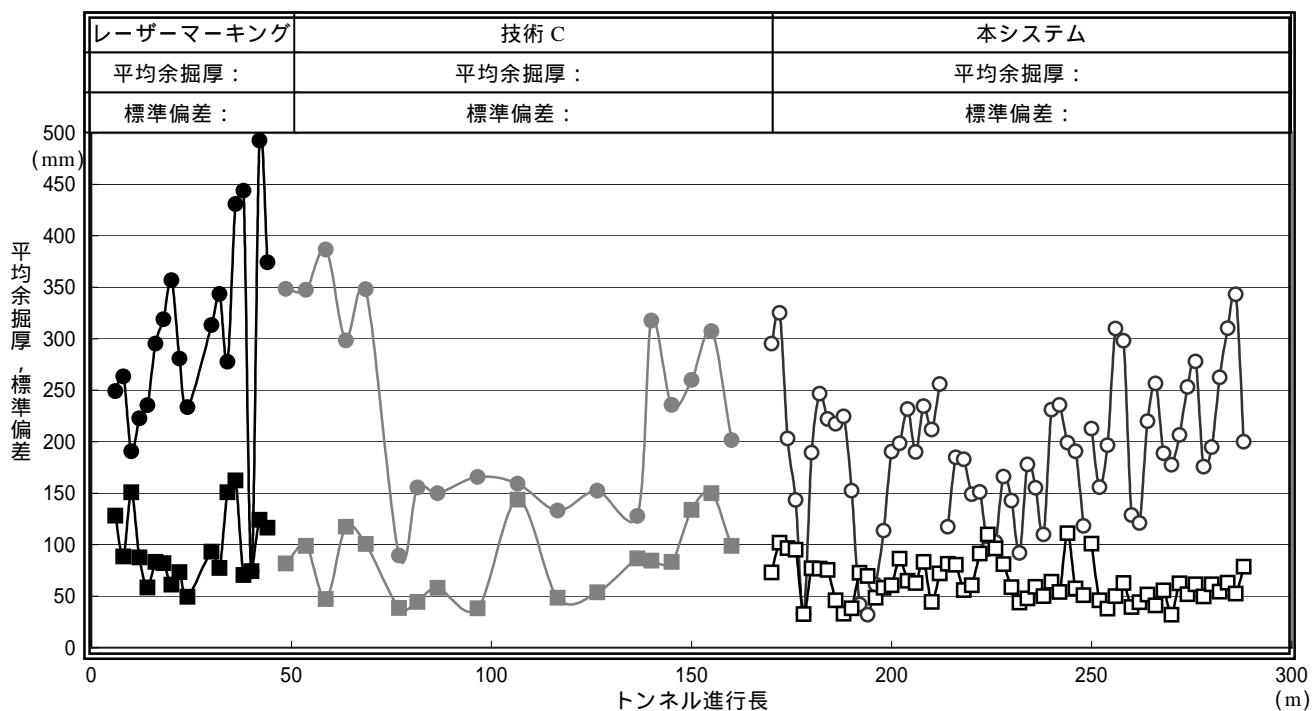


図-10 平均余掘厚，標準偏差推移グラフ

表-3 現場諸条件と断面測定結果

岩種	花崗閃緑岩		
支保パターン	B相当		
一発破進行長 (m)	2.5		
掘削断面積 (m <sup>2</sup> )	38.0 ~ 50.8		
外周孔ピッチ (mm)	900		
稼動状態	レーザーマーキング	技術C	本システム
機械No.	4 (2ブームホイール式)	C3(2ブームホイール式)	4 (2ブームホイール式)
ガイドセル長 $l$ (mm)	5,860	4,267	5,860
区間余掘厚 (mm)	299.8	232.5	188.4
区間標準偏差 (mm)	96.2	83.7	63.6

今後は掘削断面形状の常時投影システムや，吹付け厚制御システム等，リアルタイムに施工に反映できる測定方法の開発を進め，建設工事を取り巻く社会的情勢に少しでも応じられる技術開発を続ける所存である。

謝辞：本システムにおける現場実績の作成と精度測定にあたり，大前伸一氏(株式会社大林組)の協力を得た。また，削岩機の製作に関しては古河ロックドリル株式会社の協力を得た。ここに記して深く感謝する。

#### 参考文献

- 1) 中川浩二，古川浩平，鈴木宏平，吉見憲一：削孔ロボットを用いた硬岩トンネルのスムーズブラスティングに関する研究，土木学会論文集，第367号 pp. 52-61，1986年3月。
- 2) 古川浩平，吉見憲一，瀬戸口博昭，中川浩二：硬岩トンネルのスムーズブラスティング孔設計の最適化に関する研究，土木学会論文集，第379号 pp. 107-115，1987年3月。
- 3) 河邊信之，加藤清策，稲葉秀雄：特開 2002-227579，レーザー光による削孔位置決め方法，2002年8月
- 4) 真下亨，板村雅弘：全自動油圧ジャンボ，トンネルと地下，第12巻3号 pp.225-229，1981年3月，土木工学社。



- 5) 原和利, 及川修二, 北川隆: 日本初の全自動コンピュータジャンボによる施工, トンネルと地下, 第 35 巻 1 号 pp.15-20, 2004 年 1 月, 土木工学社.
- 6) 和田節, 大橋昭, 松生隆司, 山本俊夫, 柚木孝治, 澤芳幸: 特公平 8-23260, 削岩機の削孔位置決め制御方法及びその装置, 1996 年 3 月.
- 7) 林稔, 高屋英永, 白坂紀彦, 名村均: 新たな情報化施工システムに向けて, 土木施工, vol46, pp106-108, 2005 年 10 月, 山海堂.
- 8) 和田節, 大橋昭, 松生隆司, 山本俊夫, 柚木孝治, 澤芳幸: 特公平 7-47918, 削岩機の削孔位置決め制御方法及びその装置, 1995 年 5 月.