

# AIによるシールド工事の生産性向上の取り組み

安井 克豊

シールド工事では、既設構造物を避けるためにトンネル線形が複雑になる場合が多く、線形精度の確保に多大な労力を費やしている。著者らは、トンネルの計画線形に対するシールド機の掘進方法と、セグメントの割り付け方法を提示する「施工計画支援AI」をシールド工事に適用し、計画時間の大幅な短縮を図ることができた。また、シールド機のジャッキの制御方法を予測してオペレータにガイダンスする「掘進操作支援AI」を適用し、AIが示すシールド機の操作ガイダンスに基づきシールド機を制御したところ、高精度に掘進方向を制御できた。本稿では、導入したシールド工事用AIの概要と、現場に実装して検証した結果を紹介する。

キーワード：シールド，AI，線形管理，施工計画，生産性向上，掘進操作，ガイダンス

## 1. はじめに

シールド工事は、他の工種に比較して機械化が進んでおり、非常に少ない人員でも施工できることが特長である。その一方で、既設構造物を避けるためにトンネル線形が複雑になる場合が多く、線形精度を確保するために多大な労力を費やしている。また、シールド機の操作は長年の経験と技術が必要な部分として人間がかかわっている最後の部分でもある。筆者らは、これらの作業をAIに置き換えることにより、省人化、

合理化による生産性向上が期待できると考え、開発に取り組んでいる。図-1にAIによるシールド工事の生産性向上のイメージを示す。

本稿では、導入したシールド工事用AIの概要および現場に実装して検証した結果を報告する。

## 2. シールド工事用AIの概要

シールド工事では、一般に昼夜交替で作業が行われており、短い交替時間の中でシールド機の位置やセグ



図-1 AIによる生産性向上のイメージ

メントの出来形等の測量を行い、その結果に基づいて次の掘進計画を行っている。掘進計画では、次の掘進予定分のリングを対象にしてシールドの操作方法やセグメントの組立方法等が示された掘進指示書を作成する。そして掘進中においては、熟練のオペレータがその掘進指示書とシールドの状態が示されたモニターの情報を見ながらシールドの操作を行っている。そこで筆者らは、これらの作業をAIに置き換え、AIによる施工計画立案と、掘進操作支援AIによるガイダンス運転を実施・検証した。以下に、それぞれのAIについて詳述する。

### (1) 施工計画支援 AI

シールド機の操作は、シールドジャッキの長さを調節するとともに、中折れ機構と余掘り装置を併用して計画線形からの蛇行量を基準値内に収められるように管理してシールド機を前進させる。また、主に直線部で使用する標準セグメントと曲線部で使用するテーパセグメントを組み合わせることでトンネルを構築する。

施工計画支援AIは、上記のシールド機の操作方法やセグメントの割り付け等の施工計画の検討を担当するものであり、図-2にそのイメージを示す。セグメントの種類や在庫数、トンネル線形等の制約条件の中で、機械学習と遺伝的アルゴリズムを用いてシールドの操作方法やセグメントの割り付けの最適な組み合わせを探索させ、それらを掘進計画に活用するものである。

### (2) 掘進操作支援 AI

シールド機のオペレータは、シールド機のピッチング値やローリング値に加え、ジャイロコンパス等から得られるシールド機の姿勢・方向の情報や、カッタールクや総推力、ジャッキストローク値等、様々な情報を確認しながら掘進指示書に基づきシールド機を操作している。このような膨大な情報を瞬時に分析・判断し、掘進指示書通りの掘進を実現するためにシールド機の操作方法の最適解を提供するのが掘進操作支援AIである<sup>2)~4)</sup>。

## 3. シールド工事に AI の実装検証結果

以下にシールド工事に AI を実装した工事の概要と検証した結果を示す。

### (1) 工事概要

表-1に工事概要を、図-3、4にそれぞれトンネル平面図、縦断図を示す。シールドトンネルは、空港施設の滑走路・誘導路・エプロンのほかに、首都高速道路や国道、共同溝および東京モノレール等に近接し、それらがトンネル線形のコントロールポイントとなっている。非常に複雑なトンネル線形であることから、線形精度の確保が工事の重要課題の1つであった。

### (2) 施工計画支援 AI の検証

施工計画支援AIの検証は、図-3、4に示す区間延長84m(70リング分)、平面曲線R=220m、縦

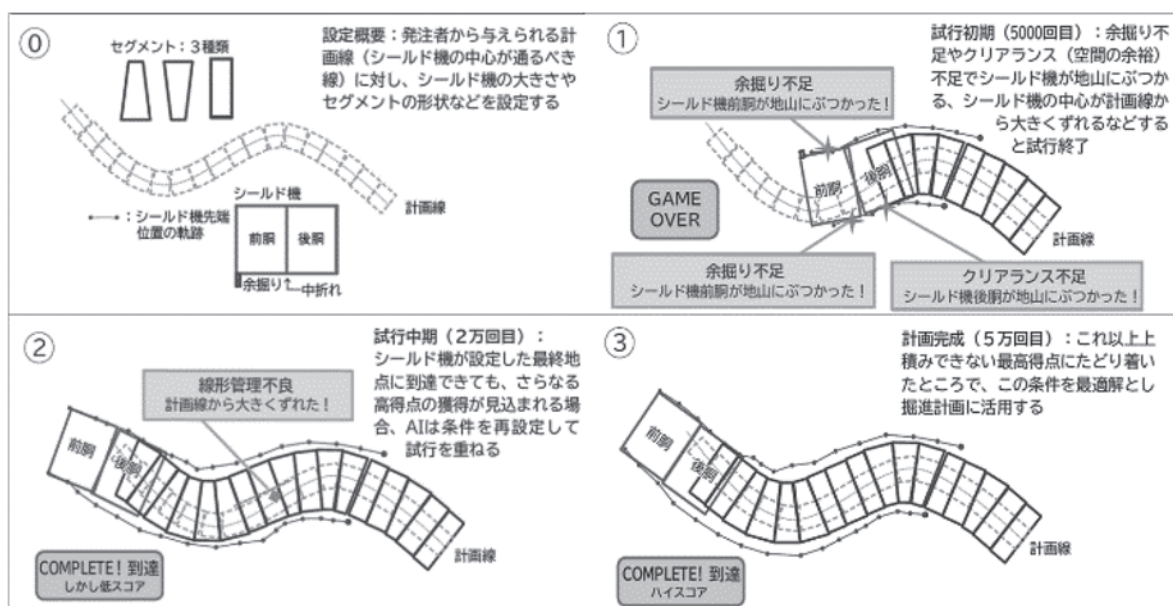


図-2 施工計画AIのイメージ<sup>1)</sup>

断曲線半径  $R = 530\text{ m}$  の三次元縦断曲線を含む区間で実施し、約 15 分で計画を立案できた。図-5 に施工計画支援 AI のモニター表示例を示す。本 AI では、テールクリアランスやテールボイド量を制約条件とし

てセグメントの組立パターンやシールド操作方法等を検討しており、掘進中のテール部の競りや過度な余掘りを防止する計画を立案することができた。

表-1 工事概要

工事名	東京国際空港隣内トンネル他築造等工事
工事場所	東京都大田区羽田空港内
工期	平成28年8月7日～令和2年8月31日
発注者	国土交通省関東地方整備局
施工者	清水・五洋特定建設工事共同企業体
シールド工	泥水式シールド工法 (φ11.93m, L=1853.6m)、 合成セグメント (外径11.7m, 内径10.7m, 直線部B=1.5m, 曲線部B=1.2m)
内部構築工	プレキャストボックスカルバート据え付け工、 流動化処理土充填工
発進立坑	地中連続壁工法, L=28.7m, W=18.7m, H=18.5m
アプローチ	函渠部L=83.0m (W=13.3~13.7m, H=7.8~8.0m)、 U型擁壁部L=168.5m (W=10.5~12.9m, H=1.0~12.9m)
地盤改良	流動化処理土置換工、 砂圧入式静的締固め工法
その他	舗装工、排水工、標識工

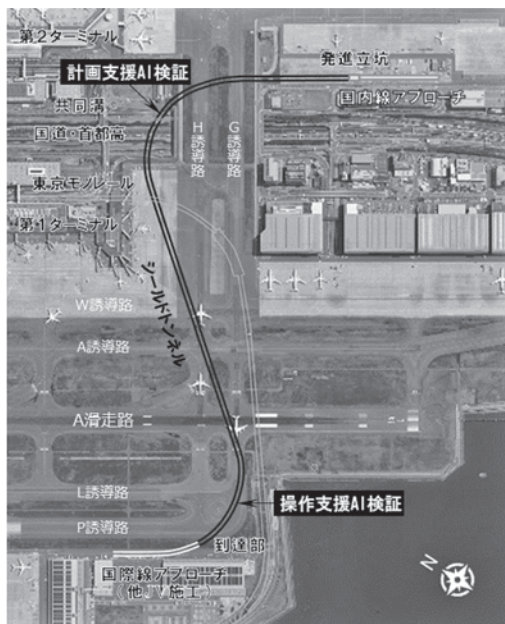


図-3 路線平面図

(3) 掘進操作支援 AI の検証

掘進操作支援 AI によるガイダンスシステムの検証は、計 3 か所、10 リングにわたって実施した。最初の 2 か所は左カーブ区間と直線区間で行ったが、ガイダンス運転の途中でオペレータの判断で介入操作が行われたため、完全なガイダンス運転とはならなかった。3 か所目は図-3、4 に示した位置であり、1 リング分の掘進をすべて AI のガイダンスどおりに掘進することができた。なお、当該箇所は、上り勾配が 0.8%

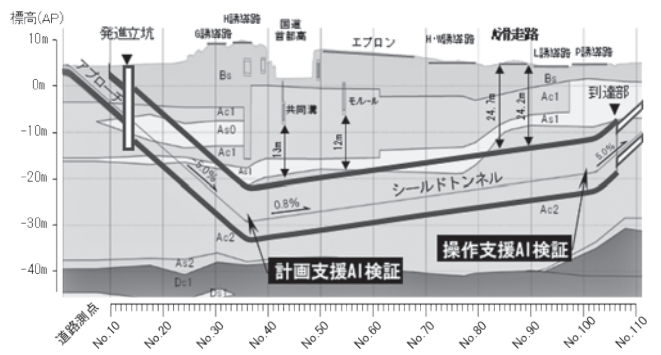


図-4 路線縦断面図

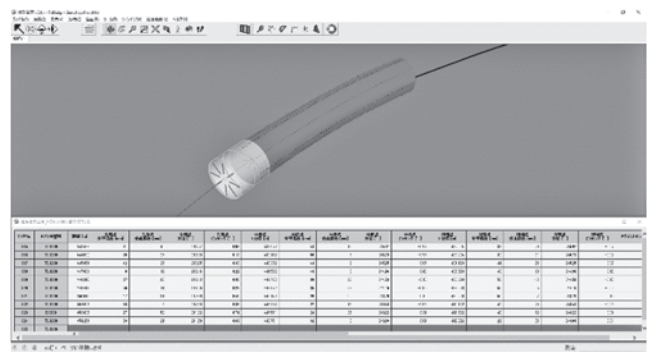
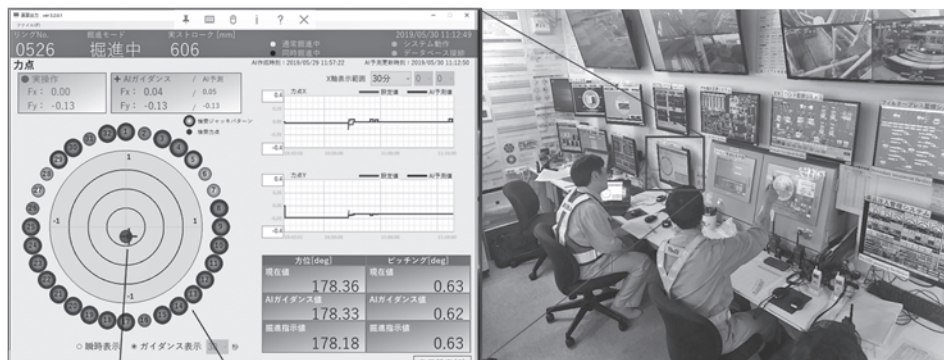


図-5 施工計画支援 AI のモニター表示例<sup>1)</sup>



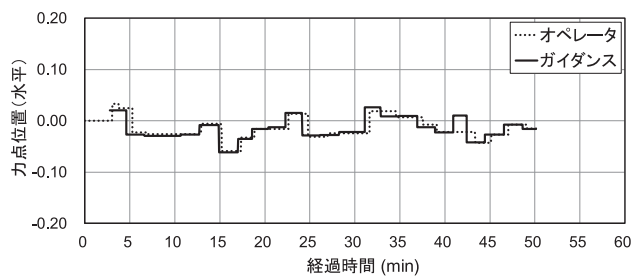
● ; 現在のジャッキ力点  
+ ; AI が予測した力点  
● ; オペレータが選択しているジャッキ  
○ ; AI が予測した力点となるジャッキパターン  
図-6 操作支援 AI によるガイダンス運転の状況<sup>5)</sup>

から5%に変わりながら曲線半径 220 m の右方向にカーブする区間となっている。

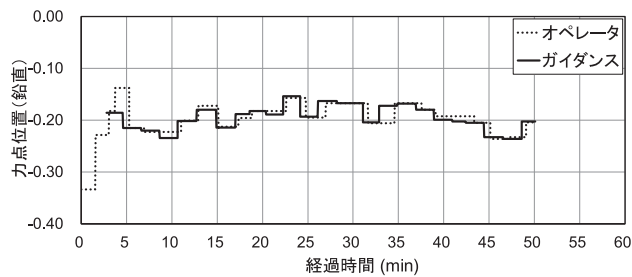
図-6はガイダンス運転を実施しているときの状況であり、オペレータがガイダンス画面に示されたとおりに使用するジャッキを選択（操作）していることが分かる。

図-7はガイダンス運転をしたときのシールドジャッキの力点位置の時間推移である。実線はAIが提示した力点を、点線はオペレータが設定した力点を示している。なお、掘進開始時にAIからの出力が無いのは、特徴量の移動平均値を計算する際に、一定のデータが得られるまで結果を出力できないことから、待機する必要があるためである。

図-8にガイダンス運転の実施結果として、線形管理項目の時間推移を示す。図中の実線は掘進開始時の各状態値と掘進指示値（最終値）を直線で結んだものであり、点線が観測値である。両者を比較して分かるように、左右ジャッキストローク差と方位角については、掘進終了時の指示値との差がそれぞれ+2 mm、-0.02 degであり、ほぼ指示通りに掘進できたといえる。しかし、ピッチング角は指示値には近づいているが満足な結果にはならなかった。この要因として、今回検証を行った箇所は勾配が遷移している区間であり、学習データにはこのような区間を掘進したデータが少なく、AIが十分に学習できていなかったためと考えられる。しかし、いずれの管理項目も許容範囲に収まっており、本システムの適用性を確認することができた。



(a)水平方向

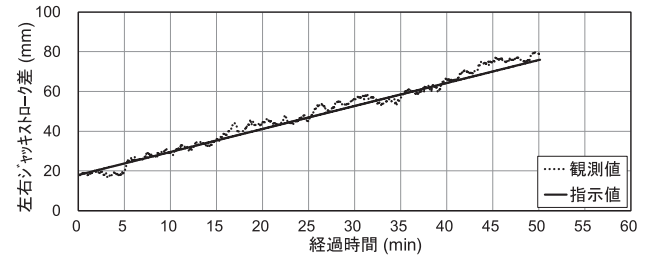


(b)鉛直方向

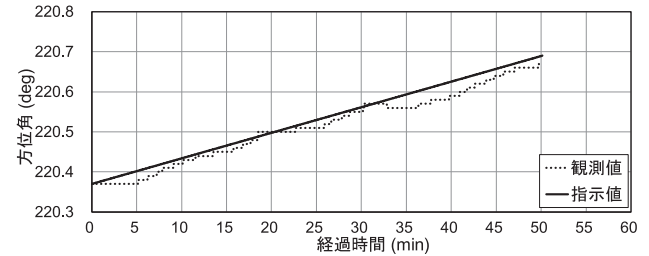
図-7 シールドジャッキ力点の時間推移<sup>6)</sup>

#### 4. 今後の展望

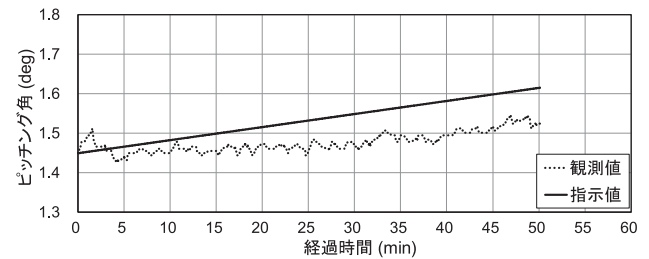
今後、両 AI を統合し、さらには自動測量システムとデータを連動させることで、計画から施工までのシールド工の完全自動運転を実現したい。また、図-9に示すとおり、複数のシールド現場を AI により遠隔操作・監視するシステムを構築し、さらなる品質



(a)左右ジャッキストローク差



(b)方位角



(c)ピッチング角

図-8 線形管理項目の時間推移<sup>6)</sup>

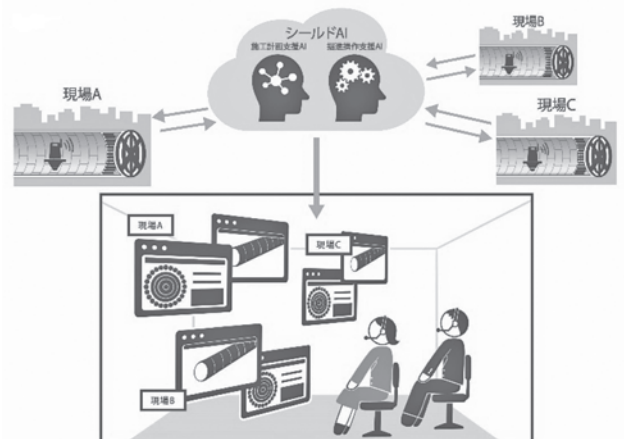


図-9 シールド工専用 AI の今後の展望

向上及び生産性向上につなげていきたいと考えている。



《参考文献》

- 1) 増田湖一, 新宮康之, 杉山博一, 和田健介, 安井克豊, 加藤昇平, 鈴木誠, 田崎仁久: AIによるシールド掘進合理化技術の開発状況報告, 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会, VI-556, 2020
- 2) 杉山博一, 和田健介, 中谷武彦, 大木智明: 人工知能によるシールド機操作に関する予備的検討, 土木学会年次学術講演会, VI-338, 2017
- 3) 和田健介, 杉山博一, 野澤剛二郎, 本多眞, 中谷武彦, 大木智明: AIによるシールド機の自動方向制御, 土木学会第73回年次学術講演会, VI-143, 2018
- 4) 和田健介, 杉山博一, 野澤剛二郎, 本多眞: シールドマンの操作特性を考慮した自動操縦 AI モデル, 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会, VI-814, 2019

- 5) 安井克豊: AIによるシールド工の計画・施工の省力化, 建設機械, 2022年9月号, 2022
- 6) 和田健介, 杉山博一, 野澤剛二郎, 本多眞, 西田充, 鈴木誠, 田崎仁久: AIを用いたシールド機用ガイダンスシステムの実証実験, 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会, VI-557, 2020

【筆者紹介】

安井 克豊 (やすい かつとよ)  
清水建設㈱  
関西支店 新名神枚方トンネル建設所  
管理技術者

