

AI を用いたシールド機の方向制御に関する 自動運転システムの実証実験

陳 剣¹・増田 湖一²・武本 怜真³・星野 壮一⁴・鎌田 浩基⁵
高本 尚彦⁶・杉山 博一⁷・山本 真哉⁸・野澤 剛二郎⁹・本多 眞¹⁰

¹正会員 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)
E-mail: chen.j@shimz.co.jp

²正会員 新名神高速道路枚方トンネル工事 清水・竹中土木・東亜 JV
(〒541-0051 大阪市中央区備後町 3-3-9)
E-mail: kissa-kyo@shimz.co.jp

³正会員 清水建設株式会社 関西支店土木第二部 姫路汐入川シールド作業所
(〒671-1105 兵庫県姫路市広畑区則直 109-1)
E-mail: r.takemoto@shimz.co.jp

⁴正会員 清水建設株式会社 関西支店土木第二部 姫路汐入川シールド作業所
(〒671-1105 兵庫県姫路市広畑区則直 109-1)
E-mail: shoshino@shimz.co.jp

⁵正会員 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)
E-mail: hiroki.kamada@shimz.co.jp

⁶正会員 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)
E-mail: n.takamoto@shimz.co.jp

⁷正会員 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)
E-mail: sugiyama.h@shimz.co.jp

⁸正会員 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)
E-mail: s-yama@shimz.co.jp

⁹正会員 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)
E-mail: nozawa@shimz.co.jp

¹⁰正会員 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)
E-mail: mac.honda@shimz.co.jp

シールド工事は、他の工種と比較して機械化が進んでおり、非常に少ない人数でも施工できることが特長である。一方、掘進指示書の作成や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関わっている最後の部分でもある。著者らは、これらの作業が、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部分であると考え、シールド機の方向制御に関する自動運転システムの開発に取り組んでいる。現在は、AI による計画支援と操作支援の連携や単調な線形区間での自動運転の達成を目標に開発を進めているところである。本報告では、掘進計画を支援する「計画支援 AI」とシールド機の操作を支援する「操作支援 AI」、それらを動作させるための自動運転システムの概要、現場実装検証の結果について報告する。

Key Words: shield machine, automatic direction control system, machine learning, gradient boosting decision tree, ϵ constrained discrete genetic algorithm

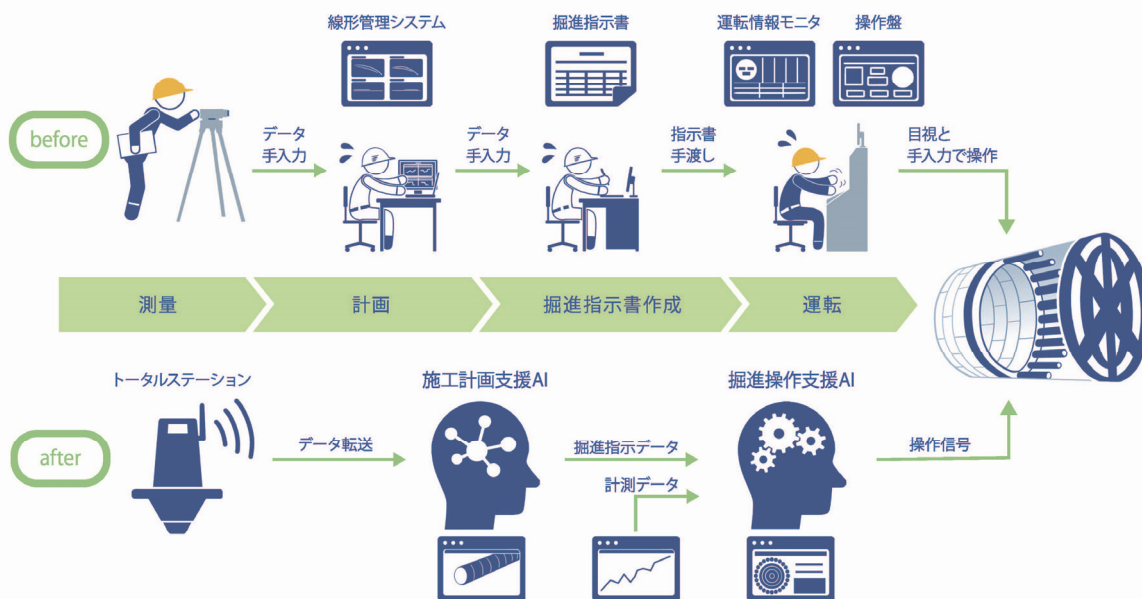


図-1 AIによるシールド掘進の合理化イメージ

表-1 シールド機自動運転の技術レベル

技術レベル	内容
レベル1 シールド工事支援	<ul style="list-style-type: none"> ● 計画支援 AI による掘進計画の立案 ● 操作支援 AI によるガイダンス運転の実施
レベル2 シールド機の自動運転	<ul style="list-style-type: none"> ● 計画支援 AI と操作支援 AI の連携 ● 単調な線形区間での自動運転
レベル3 シールド機の自動運転	<ul style="list-style-type: none"> ● 全区間での自動運転

1. はじめに

トンネル工法の一つであるシールド工法は、シールド機による掘進とセグメントの組立を繰り返すことによりトンネルを構築するものである。図-1の上半分は従来の施工サイクルのイメージである。シールド工事は一般的に昼夜交替で作業が行われるが、短い交替時間の中にシールド機の位置やセグメントの出来形などの測量作業を行い、その結果に基づいて次の施工計画を行っている。施工計画では半日の掘進予定分のリングを対象に1リングごとにシールド機の制御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、熟練のオペレーターが掘進指示書とシールド機の状態が示されたモニターの数値を見ながらシールド機の方方向制御を行っている。

シールド機の方方向制御を行う際には、掘進指示書に基づき、シールド機に装備している複数の推進ジャッキの合力の作用点（以下、力点）の位置を調整する必要がある。

掘進指示書の作成やジャッキ力点の調整は、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部分であると考え、開発に取り組んでいる。

表-1は、AIによるシールド機自動運転に向けた技術レベルを整理したものである。現在は、AIによる計画支援と操作支援の連携や単調な線形区間での自動運転を行うレベル2の達成を目標に開発を進めているところである。本報告では、掘進計画を支援する「計画支援 AI」とシールド機の操作を支援する「操作支援 AI」、それらを動作させるための自動運転システムの概要、現場実装検証の結果について報告する。

2. 計画支援 AI システム

シールド工事では曲線を含むトンネル線形に対して、シールド機の中折れ機構と余掘り装置を併用しながらシールドジャッキストロークを調節して掘進する。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異形セグメントを組み合わせることでトンネルを構築する。上記内容の検討は工事着手前に実施されるが、施工時にはトンネル線形の計画値と実測値との間にわずかな誤差が発生するため、日常的に坑内測量を実施して再度計画する必要がある。これらの計画は従来、シールド機の形状や計画線形に基づいて三角関数を用いた理論計算によって算出し、掘進指示書を作成してトンネル作業員に周知している。

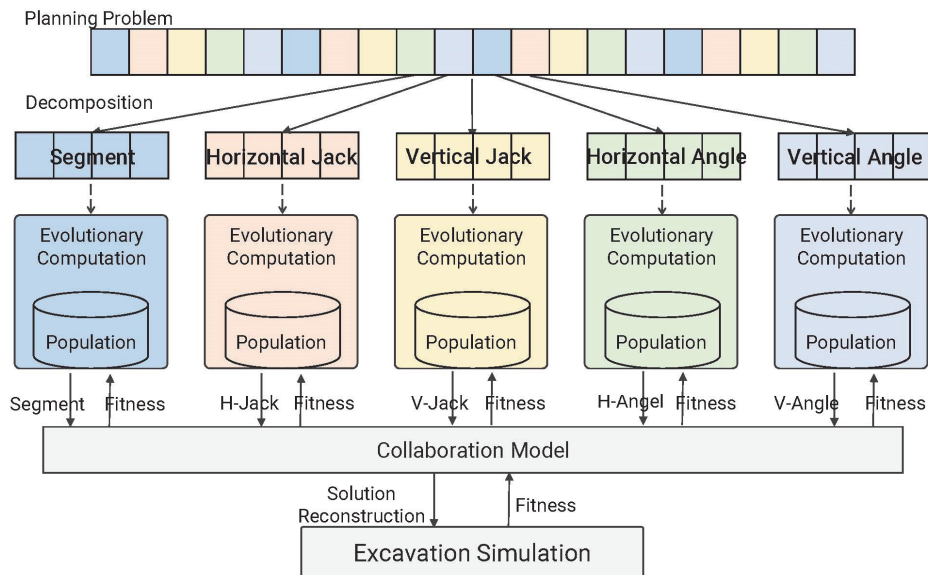


図-2 計画 AI の試行方法

計画支援 AI はシールド掘進をゲームに見立て、生命進化に着想を得た計算手順で最適な施工プランを生成する AI シミュレーションプログラムある。

与えられた計画線形に対して、AI が自ら設定した曲線部でのシールド機の運転制御方法、セグメントの割り付けといった試行条件に基づき模擬掘進を行い、その結果をトンネル線形に対する掘進軌跡の誤差や、シールド機とセグメント・掘削地山との干渉度合等を評価指標として得点化する。試行中に掘進誤差の許容値を上回った場合や、シールド機とセグメントが干渉する可能性が出てきた場合には、その時点で試行終了となり、試行条件を再設定して新たなシミュレーションを実行する。AI は膨大な試行を重ねる中で、どのような条件を選択すれば高得点が獲得できるかを進化・学習していき、最終的にそれ以上は上積みができない最高得点を示したプランを解とし、掘進計画に展開する。

図-2 に具体的な AI の試行方法を示す。セグメント割付、シールド機のジャッキ制御（水平・垂直）および中折れ制御（水平・垂直）の 5 つに問題分割し、相互に強調しながら個別に変動要素を探索することで全体を最適化して行く。

図-3、図-4 は AI の試行により得られる掘進計画内容および 3D シミュレーターの試行画面である。本システムの特徴として、人間の計画では困難であったテールクリアランスの予測と最適なシールド外面の余掘り計画が実施できることが挙げられる。このため、施工時におけるセグメントの競りや過大推力発生を防止できるためセグメントの品質を低下させることなく施工可能となる。また、過大な余掘りを行うことなく掘進できるため、周辺地盤の安定に寄与することが可能となる。

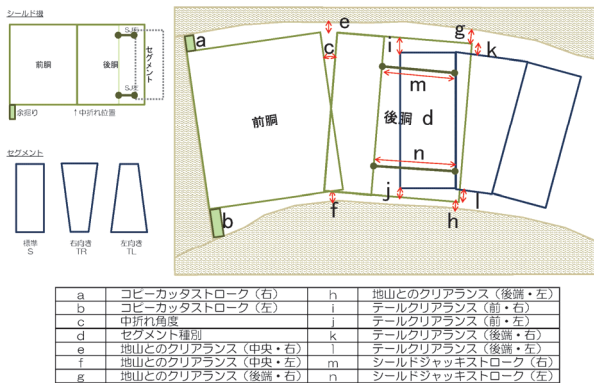


図-3 シミュレーションから取得できる計画内容

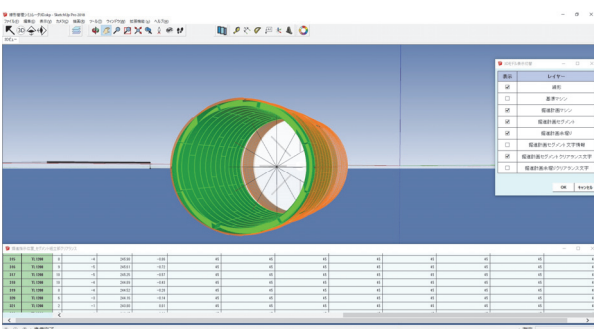


図-4 3D シミュレーターの試行画面

計画支援 AI システムはこれらの検討作業を担当するものであり、当社が保有するシールド工事の経験と、名古屋工業大学大学院工学研究科・加藤昇平教授の AI アルゴリズムのノウハウを融合した AI シミュレーションプログラムとして開発した^{1), 2)}。

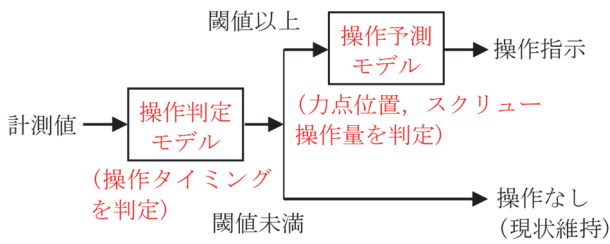


図5 操作支援 AIモデルの構成

- ① 操作有無の判定
- ② データの重みづけ

操作無しレコード			操作有レコード		
レコード番号	操作判定値	重み	レコード番号	操作判定値	重み
1	0	1	1	1	n_0/n_1
2	0	1	2	1	n_0/n_1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n_0	0	1	n_1	1	n_0/n_1

- ③ 操作判定モデルの作成



- ④ 閾値の決定

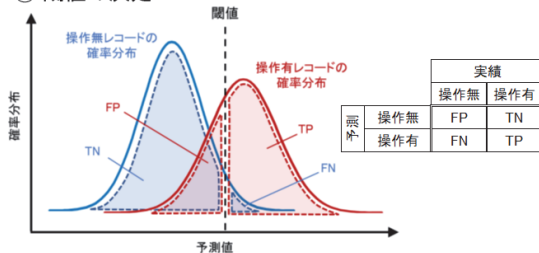


図6 操作判定 AIモデルの学習

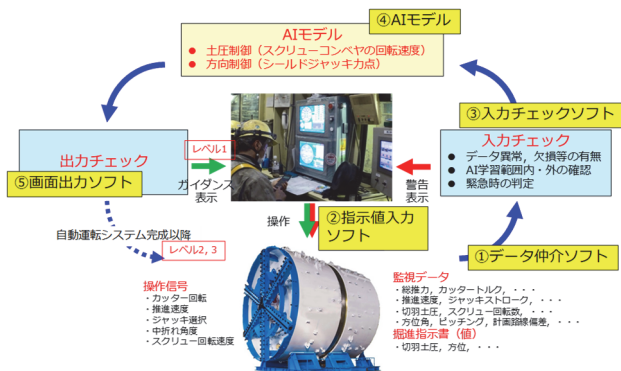


図7 自動運転システムのソフトウェア構成

3. 操作支援 AI システム

シールド機の操作はオペレーターが掘進指示書に基づき、ピッチング値やローリング値に加えジャイロコンパスから得られる姿勢・方向の情報や、カッタートルクやジャッキの総推力、およびジャッキストローク値など様々

な情報を監視しながら操作内容に反映する必要がある。このような膨大な情報を瞬時に判断し、計画線形通りの掘進を実現するため、シールド機操作方法の最適解を提供するのが「操作支援 AIモデル」^{3), 4)}である。

施工時にはシールド機から得られるデータ情報（特徴量）は時々刻々と変化するため、それに伴い AI モデルの予測値も変動する。しかし、AI モデルの予測値に合わせて常に操作することは現実的ではない。そこで、図-5に示すように、操作の必要性の有無を判定する「操作判定モデル」と、操作の設定値を判定する「操作予測モデル」の2種類で構成することとした。すなわち、時々刻々のデータで操作が必要な状態かどうかについても AI で判定し、操作が必要な状態であれば操作量を予測して指示するという方式とした。

(1) 操作判定モデル

操作判定 AI モデルの学習方法について図-6 に示す。まず、①オペレーターが操作したときのレコードと操作しなかったレコードを区別する。基本的には操作しなかったときのレコード数が多いため、両者のバランスをとるため、②に示すようにデータの重みづけを行う。③操作判定値を目的変数とする教師あり学習によって操作判定モデルを作成する。④学習済みの操作判定モデルより出力された予測値から確率分布を求め、操作必要の有無を判定するための閾値を決定する。

(2) 操作予測モデル

操作の設定値を予測するモデルは、その設定値を目的変数とする教師あり学習によって作成する。教師データは図-6の④における TP と FN とする。これは、操作判定 AI モデルで閾値以上と判定されたレコード、すなわちオペレーターが必要に応じて操作したときのレコードと、操作する必要があったにもかかわらず操作しなかったときのレコードである。これにより、操作変更が必要であると判定されたデータのみを用いた学習となり、常に操作しないことを良しとする AI モデルになることを避けることが可能となる。

4. 自動運転システム

図-7に自動運転システム全体のソフトウェアの構成とデータの流れを示す。また、図-8にそのフローチャートを示す。自動運転システムは以下の5つのソフトウェアより構成される。データ仲介ソフトはシールド機からデータを受け取り、記録するソフトウェアである。

指示値入力ソフトは、掘進指示書の値を入力するソフトウェアである。後述する管理値及び限界値などもここ

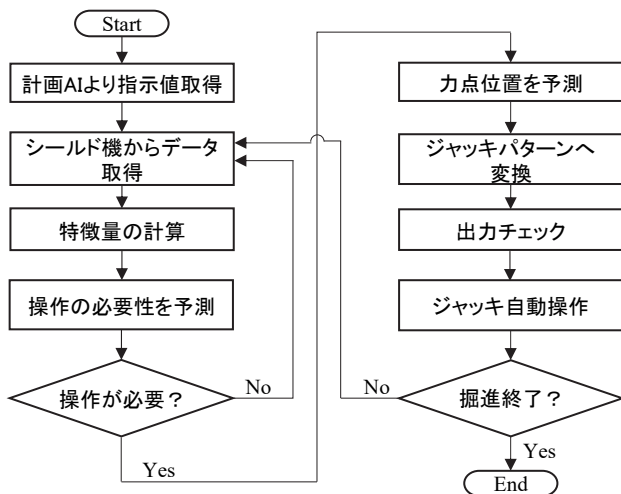


図-8 自動運転システムのフローチャート

で入力する。

入力チェックソフトは、受け取ったデータをチェックするソフトウェアである。まず、特徴量となるデータを読み込み、データチェック部においてデータの欠損、あるいは計測器の測定範囲外となるようなデータがないかを確認する。また、シールド機の計画線形からのずれ量（水平偏差、鉛直偏差）や、指示した方位やピッチングとの偏差が管理値・限界値を超えていないかも確認する。管理値を超えた場合は異常時と判定し、限界値を超えた場合は緊急時と判定する。これらの判定機構は自動運転の安全管理に必要なものである。最後に、未学習チェック部において AI モデルの学習範囲内のデータであるかを確認する。これらの全てが正常であれば AI モデルにデータを渡して予測させる。

AI モデルは、3章の第1節で示したように、操作の必要性を判定したうえで、その瞬間の操作量を予測する。

出力チェックソフトは、ジャッキパターン選択ソフトで決定したジャッキパターンを実際にシールド機側に出力するタイミングと AI との違いをチェックし、最終的にシールド機側に出力、または自動運転を中止してオペレータに操作権を返すソフトウェアとなる。

画面出力ソフトは、AI の予測結果などを表示するソフトウェアである。シールドジャッキの操作がしやすいようにジャッキパターン等を表示する機能も持っている。

なお、本章で説明した操作支援 AI はシールド機の操作全般（ジャッキ操作、スクリーコンベア操作など）に適用することを想定しているが、次章以降に示す現場実証結果はシールド機の方向制御を目的としたジャッキ操作に関する自動運転の結果である。

5. 計画支援 AI, および操作支援 AI の現場実証

表-2 AI システムの実装検証をした現場の概要

工事名	姫路市汐入川才西川放水路幹線建設工事
発注者	日本下水道事業団 兵庫事務所
シールド機	外径 φ4.08m 泥土圧式シールド機
トンネル線形	全長 1,526m 急曲線区間 2 箇所 (R=30m, 60m)

(1) 現場の概要

計画支援 AI, および操作支援 AI の検証を姫路市汐入川才西川放水路幹線のシールド現場を対象に実施した。工事概要を表-2 に示す。トンネルの全長は 1,526m であり、外径 φ4.08m の泥土圧シールド機によって施工された。このトンネルには、0.2%の勾配と半径 R=30, 60m の二つの急曲線が含まれている。

(2) 計画支援 AI の検証

計画支援 AI の検証として、図-9 の□印で示した直線かつ 0.2%より勾配区間を対象に 40 リング分 (R1390～R1429) の計画を試験的に行った。計画における条件設定は、シールド機の外径 φ4.08m, 前胴長さ 3.17m, 後胴長さ 3.365m, 使用セグメントはストレート、2 種類の片テーパー（蛇行修正セグメント）で、計 3 種類を設定した。計画時の制約条件として、線形誤差±35mm 以内、テールクリアランス 5mm 以上、蛇行修正セグメント 5 リング使用を設定した。このような条件下において今回開発した AI を用いて当該区間の計画を 5 分で完了できることが確認できた。以下では計画結果の評価を、一般的な一日分の掘進リング数である 12 リング (R1390～R1401) において行う。

図-10 に上述の条件において計画支援 AI によるシミュレーション結果のうち、リング毎の計画線形との偏差とテールクリアランスの値を示す。設定した制約条件である線形誤差±35mm 以内（発注者規格値：水平±100mm, 鉛直±50mm）、テールクリアランス 5mm 以上を満足しており、品質上問題のない計画ができたといえる。

次に、計画支援 AI を用いた計画の結果と実際に職員が作成した掘進指示との比較を図-11 に示す。計画支援 AI による指示値が職員の作成したものから大きく逸脱していないことから、合理的な指示値を計画できていることがいえる。しかし、人間が作成した指示値に対し、変動が大きいことがわかる。これは、人間による掘進指示値は片番で概ね一定の指示値にするのに対し、AI では 1 リングずつで最適な値を探索することが要因の一つと考えられる。その他にも、計画支援 AI において最適解を求める際の問題設定が要因と考えられるため、さらに合理的な計画を行うためにどのような条件設定を付与する必要があるかについて検討する必要がある。

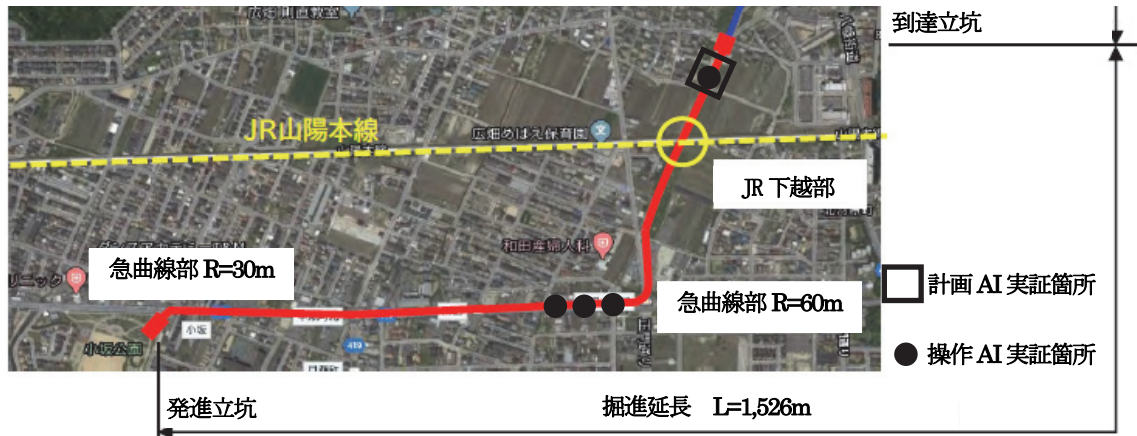


図-9 現場の路線概要と実証実験の位置

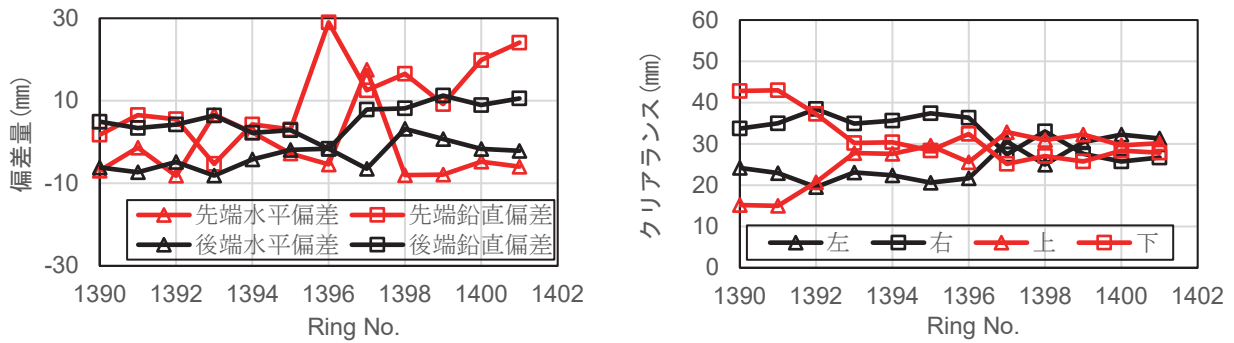


図-10 計画線形との偏差およびクリアランス

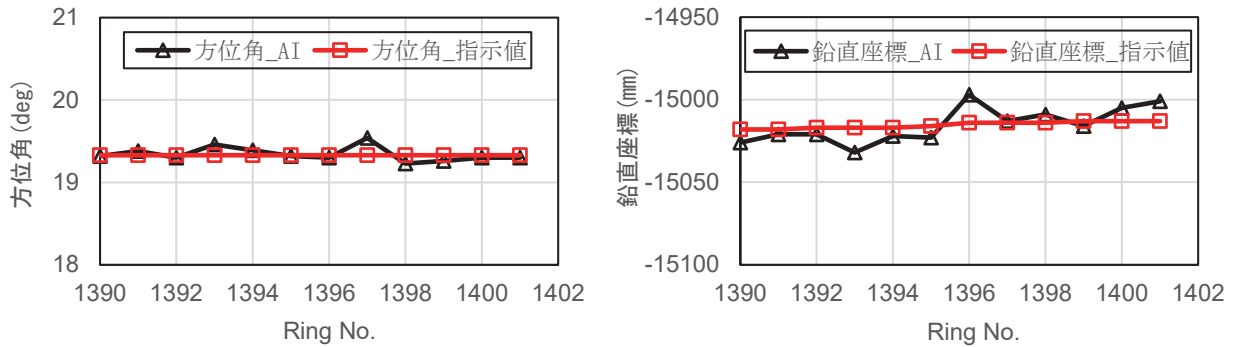


図-11 計画AIによる算定値と掘進指示値

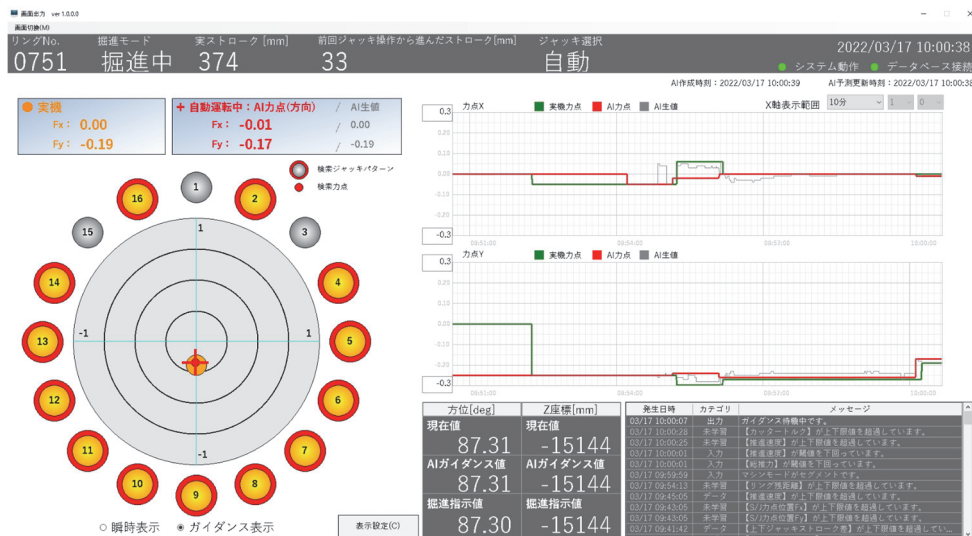


図-12 方向制御を行う自動運転システムの画面

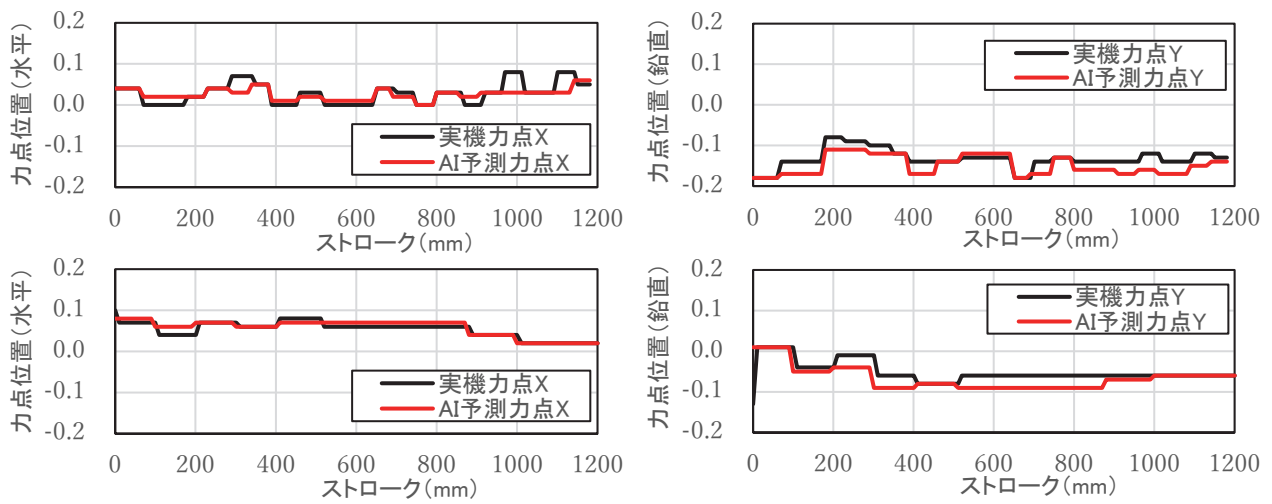


図-13 ジャッキ力点の時間推移

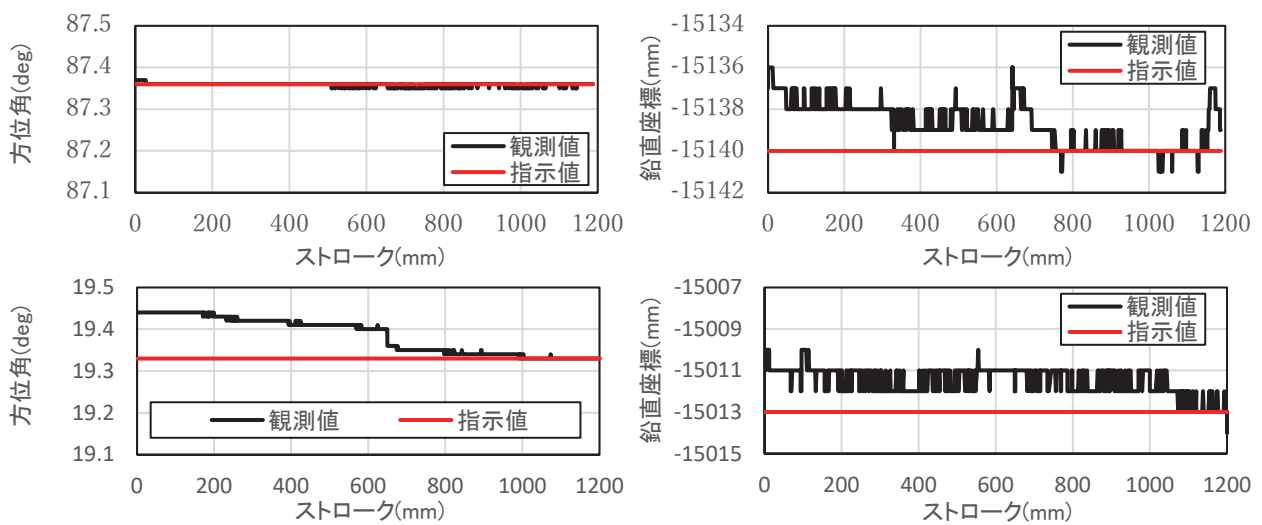


図-14 管理項目の時間推移

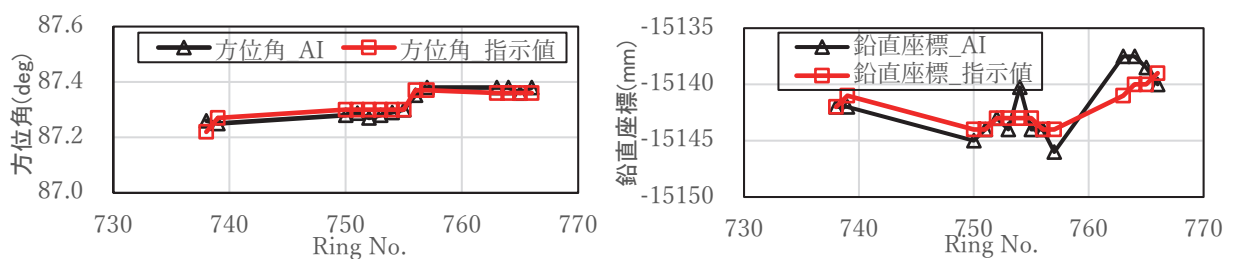


図-15 自動運転実施区間における算定値と掘進指示値

(3) 操作支援 AI の検証

操作支援 AI による自動運転システムの検証として、図-9の●印で示した計4箇所、16リング分 (R738~R739, R750~R757, R763~R766, R1399~R1400) にわたってリング全体のシールド機の方向操作に関する自動運転を実施した。自動運転の対象リング内において、掘進開始やズリ函交換において掘進速度や総推力が管理値・限界値の下限値を超えた時を除き、操作支援 AI による力点及び推奨ジャッキパターンに基づく自動運転を許容値以

内で行うことができた。

図-12はR751リングにおいて自動運転を実施しているときの出力画面である。

図-13はR765リング及びR1399リングにおいて自動運転時のシールドジャッキの力点位置の時間推移である。赤線はAIシステムが予測した力点を、黒線は実機の力点を示している。なお、掘進開始時にAIシステムで特徴量の移動平均値を計算するために、一定のデータが得られるまで前リングの力点を引き継いでいる。

図-14に R765 リング及び R1399 リングにおいて自動運転の実施結果として、管理項目である方位角、管理点鉛直座標の時間推移を示す。図中の黒線から分かるように、方位角、管理点鉛直座標については、掘進終了時の指示値に向かうように、ほぼ指示通りに掘進できたといえる。

図-15 に自動運転実施区間全体におけるリング毎の掘進終了時の方位角、管理点鉛直座標とそれぞれの指示値を示す。これをみると、自動運転による掘進が掘進指示値に基づいて行われており、掘進終了時の誤差が方位角では±0.05deg 以内、管理点鉛直座標では±5mm 以内での掘進を行うことができたことがわかる。このことから今回の実証では、操作支援 AI を用いた自動運転による掘進において、品質管理上問題のない掘進を行うことができたといえる。

今回は直線の線形に限定した検証であったが、今後はより頻繁なジャッキ操作が必要とされる曲線部における自動運転を実施することや、種々の現場に対応可能な統一的・汎用的な操作支援 AI の作成が課題である。

計画支援 AI で計画した掘進指示を操作支援 AI へと直接送信し、これらの連携が可能であることを確認することができた。今後は計画支援 AI による指示値を使用した自動運転を実工にて実施し、シールド工事現場の生産性の向上を図る考えである。

(4) 掘進管理における生産性向上評価

実施した計画支援 AI と操作支援 AI の現場実証をもとに、本技術の実装で実現可能なシールド工事の掘進管理における生産性向上についての評価を行う。表-3 に掘進管理における作業内容のそれぞれについて、従来方法と計画支援 AI と操作支援 AI のそれぞれの場合で要する時間を示す。ただし、ここではシールド工事片番当たりの

時間を対象とし、それぞれの作業内容に要する割合は一般的なものを示している。これより、オペレーターの負担を時間で評価した観点から、従来方法では掘進管理に 285min 要していたのに対し、開発した計画支援 AI と操作支援 AI を併用することによって 141min (従来方法の約 49%) まで削減が期待できる。これよりシールド工事の掘進管理において大幅な生産性向上を達成することができるといえる。

さらに、計画支援 AI については、将来的な統合管理を想定し、クラウド環境にて AI を運用するシステムであり、クラウドを通じて収集した多様なデータ、技術との組み合わせによりさらなる生産性向上が期待できる。

6. まとめと今後の展望

今回の現場実証検証において、計画支援 AI システムと操作支援 AI システムの 2 種類のシステムの展開に一定の成果を得ることができた。計画支援 AI に関しては、線形誤差やテールクリアランス、蛇行修正セグメントの使用回数といった諸条件を満足する掘進計画の作成が短時間で可能であることを確認することができた。操作支援 AI に関しては、計 16 リングで自動運転を実施し、方位角や管理点鉛直座標の観点から品質管理上問題のない掘進を行うことができた。この 2 つの AI システムを用い、連携させることにより、掘進管理に要する時間を従来方法の約 49% にまで削減することが可能であり、シールド工事の生産性の大幅な向上が実現可能であるといえる。

今後も上記 AI システムの開発を推進し、これらの技術を実工に逐次適用しながら、シールドトンネル現場

表-3 掘進管理の生産性向上 (片番当たり 6 リング分、1 リングあたり 30 分の掘進を想定)

作業区分	作業内容	従来方法 (min)	計画支援 AI (min)	操作支援 AI (min)
計測結果の整理	<ul style="list-style-type: none"> ● 測量結果から現状の計画線形からのズレやクリアランスを把握 ● 計画線形からのズレやクリアランスの増減の現状を把握 	30	0	-
掘進計画立案、掘進指示書作成	<ul style="list-style-type: none"> ● 測量結果より以降の出来形を予測 ● 線形制度を確保するためのセグメント配置計画立案 ● クリアランスを確保し、線形精度を確保するための操作方法を立案 	60	15	-
指示説明	<ul style="list-style-type: none"> ● 掘進計画の趣旨説明 	15	0	-
掘進操作 (6 リング分掘進時の 180min を想定)	● 切羽圧力管理・制御 (添加剤注入を含む) : 30%	54	-	54
	● 排土状況管理・制御 : 30%	54	-	54
	● 方向制御 : 30%	54	-	0
	● シールド機稼働状況管理 (トルク・推力など) : 10%	18	-	18
合計		285	141	

の生産性・安全性の向上を図り、国民の生活と安全を守る良質な社会インフラの整備に寄与していく考えである。

謝辞：本システムの開発にあたり、現場における検証を快諾いただいた発注者の皆様、計画支援 AI の開発にご尽力いただいた名古屋工業大学の加藤昇平教授、伊原滉也様に心から感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 伊原滉也, 加藤昇平, 中谷武彦, 大木 智明: シールド工法における制約付 GA を用いたセグメント割当, 人工知能学会全国大会論文集, 1M3-04, 2018.

- 2) 伊原滉也, 加藤昇平, 増田湖一, 新宮康之: シールド工法における幾何シミュレーションを用いたセグメント割付の進化的最適化, 人工知能学会全国大会論文集, 2O5-GS-13-03, 2020.
- 3) 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 を用いたシールドマシン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.
- 4) 杉山博一, 増田湖一: AI によるシールドトンネル施工管理の合理化ー計画支援 AI と操作支援 AI の開発, 清水建設研究報告, 第 98 号, 2020.

(2022. 8. 26 受付)

AUTOMATIC DIRECTION CONTROL SYSTEM FOR SHIELD TUNNELING USING MACHINE LEARNING TECHNIQUES

Jian CHEN, Hiroichi MASUDA, Ryoma TAKEMOTO, Souichi HOSHINO,
Hiroki KAMADA, Naohiko TAKAMOTO, Hirokazu SUGIYAMA,
Shinya YAMAMOTO, Kojiro NOZAWA and Makoto HONDA

In shield tunneling, it is essential to assign tunneling plans and to control the shield jacks appropriately so that the shield machine follows a planned alignment. However, the quality of the directional control of the shield machine depends on the skills of its operators. Herein, an automatic direction control system considering the amount of soil excavated along a tunnel as an objective and the deviation limits as constraints, and force acting points of shield jacks that is equivalent to the techniques utilized by a skillful operator is described. The developed control system uses particle swarm optimization (PSO) based constrained combinatorial optimization technique to assign tunnel segments. In addition, the control system adopts machine learning models trained by gradient tree boosting with the operational data related to the actions of skilled operators. To validate the performance of the control system, a shield machine was driven according to the system at a site under construction. Deviation from the planned path and the attitude of the shield machine were within set tolerances. The results show that our control system has applicability in real environments.