輸送計画における車両及び乗務員の運用計画業務の効率化に向けた最適化AI技術

Optimization AI Technologies to Enhance Efficiency of Rolling Stock and Crew Scheduling Operations in Railway Transportation Planning

玉井　知樹 TAMAI Kazuki　　大槻　知史 OTSUKI Tomoshi　　井山　仁志 IYAMA Hitoshi

公共交通の輸送計画業務では，多数の制約条件を踏まえた計画立案が必要であり，熟練者の知識と経験に依存する部分が大きく，計画変更時の再検討（再計画）に多大な時間を要するため，この時間を短縮することが課題となっている。

これに対し，東芝は，輸送計画ICT（情報通信技術）ソリューション TrueLineにおいて，車両運用計画と乗務員運用計画を高度化する最適化AIの実用化を進めてきた。これらの運用計画において，従来は個別に調整していた部分を，計画工程を統合データベースでつなぎ，最適化AIを連携させることで，一連の業務として自動化支援できるようにした。また，これまでの検査清掃計画AI，配車計画AI，留置提案AIに加え，乗務員行路計画AIを開発し，計画品質の向上，再計画の迅速化を実現した。

Public transport planning operations still depend on the knowledge and experience of a limited number of skilled workers due to a variety of specific constraints, resulting in considerable time being required for replanning when changes occur. Reducing replanning time has therefore become an issue of vital importance.

To address this issue, Toshiba Corporation is promoting the practical application of optimization artificial intelligence (AI) technologies for TrueLine, a transit scheduling information and communication technology (ICT) solution, to enhance rolling stock and crew scheduling operations. TrueLine makes it possible to automatically create rolling stock and crew schedules through a set of previously separate processes by linking optimization AI technologies via an integrated database. To improve planning quality and speed up rescheduling operations, we have also developed crew duty planning AI in addition to existing optimization AI technologies, including inspection and cleaning planning AI, rolling stock allocation planning AI, and stabling planning AI.

1. まえがき

輸送計画とは，輸送需要に応じて列車をどのように走らせるかを決める一連の計画業務の総称であり，運転曲線の作成，列車ダイヤの作成，車両運用計画，乗務員運用計画，検査・配車計画，構内作業計画などで構成される。これらは日々の安全かつ安定した輸送を支える基盤であり，公共交通事業者にとって欠かすことのできない中核業務である。

一方で，輸送計画業務は多様な制約条件の下で最良の解を求める必要があり，熟練者の知識と経験に依存する部分が依然として大きい。車両数や検査周期，番線容量など，相互に関連する要素を同時に考慮しなければならず，計画変更が生じた場合には再検討に多大な時間を要するため，この時間を短縮することが課題である。また，人口減少や労働力不足が進む中，こうした輸送計画業務のデジタル化と高度化が強く求められている。

東芝は，この課題に対し，長年培ってきた鉄道向け輸送計画技術と最新のデジタル技術，更に数理モデルに基づく最適化AIを融合した輸送計画ICTソリューション TrueLineを提供している。ここでの最適化AIは，機械学習を用いるものではなく，数理モデルを基に構築したものである。それぞれの計画を作成する上で普遍的な原理を制約条件として設定しておくことが特長であり，制約条件を満たす解の中から，評価関数の値が最も良いものを最適解として選ぶ。機械学習とは異なり，学習用データの準備や学習プロセスは不要で，適用事業者ごと，ダイヤ改正ごとに再学習が不要であることも特長である。ここでは，TrueLineの概要と，TrueLineに用いられる最適化AIについて述べ，その適用例に関して述べる。

2. TrueLineの概要

TrueLineとは，公共交通事業者向けに提供する輸送計画クラウドサービスであり，運転曲線・時隔曲線，基本ダイヤ計画，車両運用基本計画，乗務員運用基本計画，検査清掃計画，配車計画，基地構内作業計画の作成支援など，輸送計画に必要な機能を統合的に提供するソリューションである。各機能は統合データベースを介して連携しており，ある工程で作成したデータを次の工程へ自然に引き継げるため，基本計画から日々の実施計画（車両検査計画や乗務員割り当て

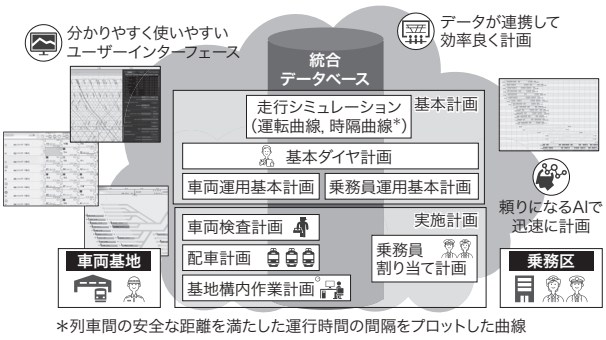


図1. TrueLineの機能構成

TrueLineの各機能は統合データベースを介して連携しており，一貫した計画業務を実現できる。

Functional framework of TrueLine

計画など）まで，一貫した計画業務を実現できる。TrueLineの機能構成を**図1**に示す。

このようにTrueLineは，個別の計画業務を単独で支援するのではなく，輸送計画業務全体をデータでつなぎ，各段階で最適化AIやシミュレーションを活用して，一連の計画の整合をとりながら計画業務支援をできる点に特長がある。また，分かりやすいユーザーインターフェースと統合データベースを備えることで，熟練者の知見を生かしつつ，計画品質の向上，再計画の迅速化，部門間の情報共有の円滑化を実現する。

これまで輸送計画最適化AIとして検査清掃計画AI，配車計画AI，留置提案AIを開発してきたが，今回，乗務員運用関係の乗務員行路計画AIを新たに開発した。

3. 最適化AIの車両検査計画・配車計画・基地構内作業計画への適用例

車両検査計画・配車計画・基地構内作業計画の領域では，検査清掃計画，配車計画，構内での入出庫・留置計画が相互に密接に関係している。このため，一部に計画変更が生じると，他の計画にも影響が波及し，全体を見直す必要がある。従来は，熟練者が多数の制約条件を個別に確認しながら段階的に調整していたため，計画作成に時間を要するだけでなく，計画変更時の再計画の作業負荷が大きく，これらを軽減することが課題であった。

このような業務に対して，TrueLineでは，検査清掃計画AI，配車計画AI，留置提案AIを組み合わせることで，一連の業務の自動化を支援できる。以下に，これらの最適化AIの制約条件及び評価関数を示す。

(1) 検査清掃計画AI

(a) 制約条件

・法定検査周期を満たすように検査を計画する。
・各日で実施可能な検査容量を遵守する。
・検査には包含関係があり，上位検査を実施した場合，下位検査は実施したものとみなす。

(b) 評価関数

・コスト削減の観点から月間の実施回数を最小化したい。
・リスク削減の観点から法定周期よりも短い目標周期に近い日数で運用したい。

(2) 配車計画AI

(a) 制約条件

・営業に必要な運用を過不足なく編成に割り当てる。
・前段で決定した検査日に対して適切な運用を割り当てる。
・直前の運用の入庫場所と直後の運用の出庫場所とが一致する（駅留置の場合は留置箇所の一致）。

(b) 評価関数

・編成の効率的な利用の観点から予備などの運用をなるべく割り当てる。

(3) 留置提案AI

(a) 制約条件

・同一番線（縦列）の車両は“後入庫→先出庫”の順序を満たす。
・番線の収容容量を超えないように留置する。
・各運行は必ずどこかの番線に割り当てられる。

(b) 評価関数

・省力化の観点から転線回数を最小化したい。

これらの制約条件や評価関数は，混合整数計画と呼ばれる数理モデルにより表現することができ，適用路線ごとに制約条件や評価関数を適切に設定しておくことにより，所望の計画を高速に自動提案できる。

最適化AIによる業務改善適用例を業務フローとして**図2**に示す。まず検査清掃計画AIが，各車両に定められた周期，作業時間，作業容量などの制約条件を満たしながら，日々の検査清掃計画を立案する。続いて配車計画AIが，その計画結果を踏まえて使用可能な車両に各運用を割り当て，日別の配車計画を作成する。最後にこれらの結果は基地構内作業計画へ連携され，留置提案AIによって基地内での入出庫順，留置位置，入れ替えの流れまで含めて整合的に計画できる。すなわち，従来は個別に検討していた検査清掃計画，配車計画，基地構内作業計画までが，データ連携した一連の業務となり，自動化の支援が可能となった。

4. 最適化AIの乗務員行路計画への適用例

乗務員運用基本計画では，乗務員の1日（夜間をまたぐ場合2日）の動きを表す複数の行路を生成する乗務員行路計画

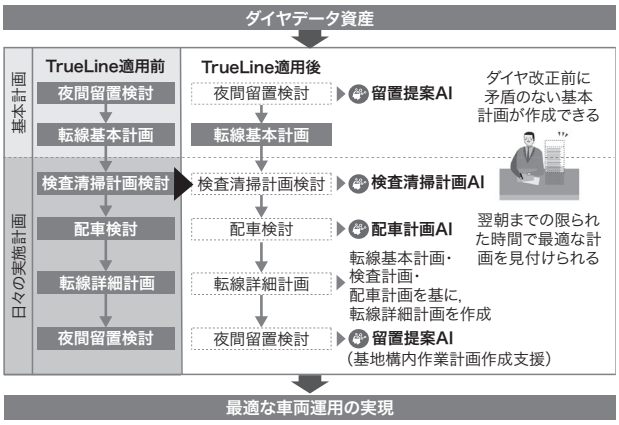


図2. 最適化AIによる業務改善適用例

人手で実施していた業務を，TrueLineの最適化AIを活用することで自動化の支援が可能となり計画作成の効率が向上した。

Examples of process improvement using TrueLine's optimization AI technologies

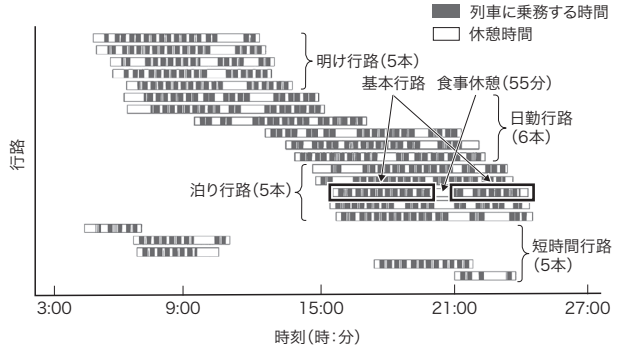


図3. 最適化AIで作成された乗務員行路計画の例

制約条件を基に最適化AIにて作成した乗務員行路計画の例である。

Example of crew duty schedule created by TrueLine

と，作成された各行路を乗務員に割り当てる交番計画に分かれることが多い。ここでは，より難易度の高い乗務員行路計画について述べる。

行路計画は，多数の列車乗務を限られた乗務員で効率的に組み合わせながら勤務規則や公平性を同時に満たす必要があり，輸送計画業務の中でも特に複雑な計画問題である。各行路は，ダイヤ全体をカバーする必要があり，また乗務員の勤務計画とも密接な関係にあるため，以下のような勤務規則や公平性の制約条件を満たす必要がある。

- 行路全体の時間帯や長さの制約
- 食事休憩及びそれ以外の休憩の時間帯や長さの制約
- 連続乗務時間や総勤務時間の制約

特に近年は，乗務員の人手不足や働き方改革の流れがあり，勤務・休憩などの時間帯や長さに関する要求が複雑化している。また，各行路は列車による移動を原則とする一方で，列車本数の少ない夜間・早朝の乗務員の移動の都合や車両基地への入出庫の都合から便乗と呼ばれる乗務員の相乗りを設定する場合がある。行路計画は，このような複雑な制約条件にもかかわらず，現在も人手で作成されることが多く，手間が掛かる作業となっている。

行路計画を作成する上で，実際に列車に乗って業務を行う区間（例えばA駅からB駅までの区間の列車運転や車掌業務を行う区間）を“乗務”と呼ぶ。当社は，乗務を組み合わせて作成した一連の業務を“基本行路”と呼び，これを更に組み合わせて最終的な“行路”を構成する手法を提案している。このように基本行路を単位として行路を構成するのは，乗務員間の公平性を確保する上で，基本行路の長さや1日の基本行路数が重要な評価指標となるためである。また，この基本行路を基準にしてモデル化を行うことで，休憩の時間帯や，食事休憩の長さなどを，容易にモデル化することができる。

このシステムで設定可能な行路に関する制約条件は，例えば以下のものがある。

- 行路全体は，明け行路（4:00～13:00）5本，日勤行路（7:00～22:00）6本，泊り行路（12:00～25:00）5本及び短時間行路から成る。
- 短時間行路は，通常は乗務員専任ではない駅勤務者などが補助的に担当できる短時間の乗務行路であり，朝夕の輸送需要が高い時間帯を中心に最大5時間の範囲で設定される。
- 明け行路，日勤行路，泊り行路は，それぞれ基本行路2～3本，2～4本，2～4本から成る。
- 基本行路の連続乗務時間は2時間30分以内とする。
- 明け行路及び泊り行路については，食事休憩時間として45分以上の休憩を確保する。

これらの制約条件に基づき作成された乗務員行路計画例が**図3**である。対象は約350個の乗務から構成される路線であり，明け行路，日勤行路，泊り行路，及び短時間行路から成る合計21本の行路を作成している。各行路のグレー部分が列車に乗務する時間に相当する。一連の乗務を基本行路として定義し，その間が休憩時間であり，そのうち長いものが食事休憩に相当する。図3から，明け行路・日勤行路・泊り行路について所定本数の行路を確保しながら，乗務時間や勤務時間が行路間でおおむね均等化されていること，食事休憩を適切に確保できていること，更に短時間行路を利用することで朝夕ピーク時の乗務需要に対応できていることが分かる。

次に，便乗については，この手法では便乗列車を事前に固定することなく，便乗可能な時間幅だけを制約条件として

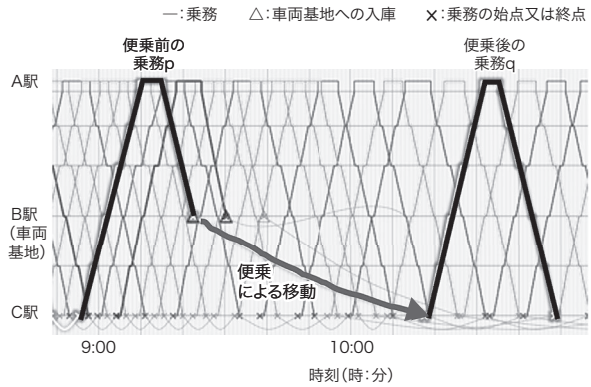


図4. 便乗設定の例

便乗設定に関する制約条件を基に，最適化AIにて作成した乗務員行路計画の便乗乗務の例である。

Example of crew deadhead schedule created by TrueLine

設定できる点に特長がある。早朝・深夜の便乗はあらかじめユーザーが設定し，日中の便乗は最適化AIが時間幅の制約条件に基づいて探索・提案する。便乗に関しては，例えば以下のような制約条件の設定が可能である。

- 9:20にB駅に到着する乗務pの乗務終了後は，便乗を設定したい。
- B駅からC駅への便乗を設定可能であるが，30分以上60分以下の間隔を空ける。

図4は便乗設定の例である。この例では，B駅で乗務pを終了後，便乗によってC駅へ移動し，60分以内に開始する乗務qへ接続する行路を自動作成できている。従来は具体的な便乗列車を事前に決定する必要があったが，“便乗による移動を挟む”という制約条件だけの設定でよいため，利用者の意図を反映しながら柔軟に行路を作成できる。

以上で述べた乗務員行路計画AIは，事業者ごとに異なる勤務規則や働き方のニーズに対応した乗務員行路計画の作成や，ユーザーの意図に沿った便乗設定が可能であり，高品質な乗務員行路計画を効率的に作成することができる。

5. あとがき

ここでは，輸送計画の概要とその課題，TrueLineの機能と特長，更に最適化AIの適用例として車両運用基本計画，基地構内作業計画及び乗務員行路計画について述べた。輸送計画業務は多くの制約が絡み合う複雑な業務であるが，統合データベースと数理モデルに基づく最適化AIを活用することで，計画作成の効率化だけでなく，計画品質の向上や再計画の迅速化が可能となった。

今後は，車両運用計画における当日の運用乱れへの対応や，複数交通機関の連携を含めた地域全体の最適化に向けた対象拡大を進めていく。TrueLineをはじめとするデジタルサービスと最適化AI技術を通じて，公共交通の持続的な発展と安全・安心な輸送の実現に貢献していきたい。



玉井　知樹　TAMAI Kazuki
モビリティ・インフラソリューション事業部
鉄道システム技術第二部
Railway Systems Engineering Dept.2



大槻　知史　OTSUKI Tomoshi, Ph.D.
総合研究所 AIデジタルR&Dセンター システムAI研究部
博士(情報理工学)　日本オペレーションズ・リサーチ学会会員
System AI R&D Dept.



井山　仁志　IYAMA Hitoshi
モビリティ・インフラソリューション事業部
鉄道システム技術第二部
Railway Systems Engineering Dept.2