

# 鉄道における数理最適化技術の活用可能性

羽田 明生\* 土屋 隆司\*\*

## Utilization Possibility of the Mathematical Optimization Technologies in Railway System

Akio HADA Ryuji TSUCHIYA

Recently computing capability for solving large scale mathematical optimization problems has been developed because of dramatic improvements of the performance of computing machineries, progresses of parallel processing technologies and developments of massive data processing technologies. These technology developments are expected to make operations of railway system such that maintenance of railway facilities, and customer service more efficient. Under these circumstances, we widely researched and examined potential applications of mathematical optimization techniques to railway field. In this report, we briefly explain the results of our research and examination.

キーワード：鉄道，数理計画，最適化，アルゴリズム

### 1. はじめに

鉄道運営においては、列車運行、旅客サービス、設備保守などを含む、多様な業務の中で日々、様々な意思決定が行なわれている。これらの意思決定を的確に支援することは鉄道経営の効率化、鉄道の競争力の維持・向上にとって極めて重要である。特に、近年、対抗輸送機関との競争の激化、地球環境問題への対応の必要性等、鉄道をとりまく経営環境が益々厳しくなる中、さまざまな制約や評価指標を考慮して、最適な意思決定を行なうことが求められている。

このような状況の中、鉄道総研では鉄道における数理最適化技術の活用可能性に関する調査を実施した。鉄道は様々な技術分野から成る複合システムであることから、この調査では、鉄道システム関連分野を電力分野、信号通信分野、防災分野、車両分野、構造物分野、運輸・経営分野、軌道分野、浮上式関連技術分野に分類して、対象分野ごとに調査活動を行った。また、調査方法に関しては文献調査とヒアリングを中心に実施し、各対象分野において数理最適化技術により効率化が期待できる課題について検討した。そこで本稿では、上記の調査分野における数理最適化技術の活用可能性に関する調査結果の概要について報告する。

### 2. 数理最適化技術

最適化とは、一般的には「対象を最適な状態に近づけ

\* 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室

\*\* 信号・情報技術研究部

るための操作」のことであり、その考え方はこれまでも多くの学術・産業分野で活用されてきた。しかしながら、「最適な状態」に対する定義が分野ごとで大きく異なることもあり、最適化という用語の意味する内容は共通認識を持たないケースも散見される（図1参照）。例えば、工学分野における構造設計や物理現象モデル設計などで導入されるパラメータ最適化においては、手計算による試行錯誤的な手法でその値を決定する操作を最適化と呼ぶこともある。つまり、試行錯誤により生成されたものの中から最良のものを選択する操作を最適化としている場合もある。一方、情報科学分野においては、数学的に厳密に定義された問題を解析的に計算することを最適化と呼ぶ。つまり、手計算による試行錯誤的な方法は最適化ではなく、事前に定義された一定のルールに従って解析的に計算する方法を最適化としている。本調査で対象とする最適化とは、後者、つまり数理的な手法を活用して対象を最適な状態に近づけるための方法を指

直感的な方法	数理モデルに基づく最適化手法	
試行錯誤による方法	ヒューリスティクス	最適解法
手計算や実験を繰り返して、得られた解の中から最良のものを選択する方法	人間の経験則を計算機上に再現し、 <b>最良解に近い解を比較的短時間で求める方法</b>	多少計算時間をかけても <b>最良性を保証された解を求める方法</b>
工学分野(全般)		
情報科学		
数学		
本調査の対象範囲		

図1 数理最適化技術の分類

すものとし、特に数理最適化と呼ぶものとする。

数理最適化では数学的なアプローチによる問題解決を目指す。厳密に最適な解を見つけることを目的とする場合、最適な解に“近い”解を見つけることを目的とする場合の2つのケースが存在する。前者は数理最適化の中で最適解法または厳密解法と呼ばれる方法であり、計算時間はある程度大きくなっても最適な解を見つけることを目的とする。後者は数理最適化の中でヒューリスティクスまたは近似解法と呼ばれる方法であり、最適な解に近い解を少ない計算時間でを見つけることを目的とする。本調査で対象とする数理最適化では、最適解法とヒューリスティクスの両手法によるアプローチを含むものとする。

### 3. 鉄道における数理最適化技術の適用可能性

#### 3.1 電力分野

電力分野に関しては、変電所・電力貯蔵媒体の配置方法や制御方法、省エネルギーな運転曲線作成などに対して数理最適化技術が活用されてきた。しかし、これまでは基礎的なモデルを扱っている研究が多く、今後は実用化を意識した研究を進める必要があるものと思われる。電力分野においては、次の項目に関する実用性の高い研究を今後は進める必要があると考える。

##### ①高速化に関連した、電力設備の最適化

- ・パンタグラフの設計最適化
- ・トロッコ線の形状最適化

##### ②省エネルギーに関連した、運転方法の最適化

- ・運転曲線の最適化 (図2 参照) <sup>1)</sup>
- ・列車ダイヤの最適化 <sup>2)</sup>

#### 3.2 信号通信分野

信号通信分野においては、数理最適化技術を適用した研究はあまり見当たらない。ただし、近年検討されている無線式列車制御ネットワークや知能列車の取り組みでは、アンテナ基地局配置とカバーエリアの検討やネットワーク構成に対して数理最適化技術の活用可能性が考え

##### ・単一列車の最適運転制御

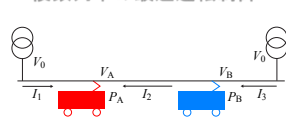
###### 単一目的最適化

回生ブレーキ、抑速ブレーキを考慮した運転曲線作成  
省エネルギーの観点からの運転曲線の最適化を行う

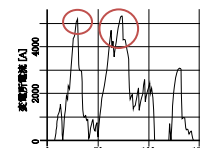
###### 多目的最適化

「乗り心地」、「操作性」などを目的関数に取り入れた上での運転制御の最適化  
より現実的な運転事象のモデル化を行う

##### ・複数列車の最適運転制御



複数列車の協調運転におけるブレーキ時の回生失効を最小化するような運転方法計画の作成

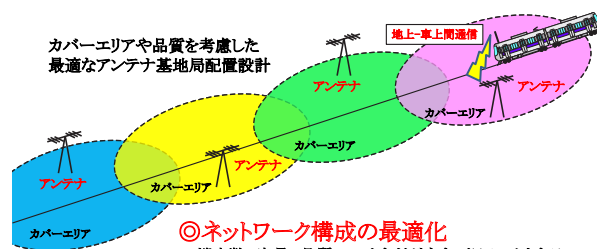


変電所電流のピーク電流最小化を目的とした、列車制御システムと電機システムの制御計画の作成

図2 実用化に向けた最適運転制御計画

#### ◎アンテナ基地局配置の最適化

- ・カバーエリアや品質などが主なパラメータとなる
- ・無線式列車制御用ネットワークや知能列車の地上アンテナ基地局配置設計



#### ◎ネットワーク構成の最適化

- ・端末数、容量、品質、コストなどが主なパラメータとなる
- ・センサーネットワークや知能列車のネットワーク部の設計

図3 基地局配置とネットワーク構成の最適化

られる (図3 参照)。今後は次の項目に関して数理最適化技術の活用可能性があると考えられる。

- ① 無線式列車制御用ネットワークや知能列車の地上アンテナ基地局配置設計の最適化
- ② センサネットワークや知能列車のネットワーク構成の最適化
- ③ 信号制御や列車制御と情報通信技術を融合させた列車群制御計画の最適化 <sup>3)</sup>

#### 3.3 防災分野

防災分野では、防災設備の配置計画において数理最適化技術が多数適用されている。現状では、防災に関連する設備設計や現象解明には主にシミュレーションが用いられているが、その部分を単純に最適化手法に置き換えるだけでは計算時間の短縮程度の効果しか期待できない。研究の新規性と鉄道事業者・社会的ニーズを鑑みると、今後は以下のような項目に関して、数理最適化技術を活用する意義があると考えられる。

- ① 鉄道システムの総合的な防災設計と評価
- ② ハザードマッピング技術を被害想定として活用した防災計画及び災害後の復興支援計画の策定 <sup>4)</sup>
- ③ シミュレーションと最適化を組み合わせることで、大規模な現象解明モデルの構築 <sup>5)</sup>

#### 3.4 車両分野

車両分野における数理的な取り組みは、パラメータ推定、シミュレーションが中心であり、数理最適化技術の適用実績は少ない。一方、電気自動車関係では、充電施設配置や充電戦略決定 <sup>6)</sup> などに数理最適化技術が活用されており、これらと同様な問題は鉄道現場に置き換えて考えることも可能であり、今後の鉄道車両への最適化技術適用の参考にすることができるものとする。今後の取り組みとしては以下の項目での検討が考えられる。

- ① ハイブリッド車両 (架線とバッテリーのハイブリッドなど) 導入における課題への活用 <sup>7)</sup>
- ・バッテリー制約下での回生失効最小化

- ・バッテリー寿命の延伸設計
- ②車両運動・挙動解析への活用
  - ・車両の挙動解析
  - ・定常周波数応答による諸元同定
  - ・実軌道波加振による車両諸元推定

### 3.5 構造物分野

構造物分野では、様々な構造物を対象に数理最適化手法が多数適用されている。すでに基礎的な研究事例は多くあり、今後は、実務での問題解決への適用が期待される。そこで、実際の課題への数理最適化技術の適用にあたり、実務での適用効果の高いと考えられる次のような活用対象に取り組む価値があると考えられる。

- ①大規模システムの効率化 (図4参照)
  - ・新しい構造形式の構築
  - ・地震動シミュレーション (3次元構造同定)
  - ・災害発生後の即時被害高精度推定
- ②状態監視システムの構築<sup>8)</sup>
  - ・損傷検知手法の構築
  - ・センサネットワーク設計手法
- ③実務設計への適用<sup>9)</sup>
  - ・断面設定、鉄筋の配置
  - ・設計プログラムとの連携
  - ・復旧計画、補強計画策定システム

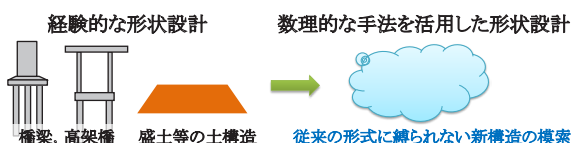
### 3.6 運輸・経営分野

運輸・経営分野ではこれまで様々な問題に対して数理最適化技術が積極的に活用されてきた。特に、乗務員運用計画、車両運用計画、乗務員区所配置計画、新線導入の検討、鉄道ネットワークにおける利用者配分の検討などの問題に対しては様々な数理最適化技術の適用例が存在する。今後は、これら既存研究の実用性を高めるための研究を進めるとともに、近年注目されている以下の新たな課題に関しても数理最適化技術の活用が期待される。

- ①イーロードマネジメントの適用可能性<sup>10)</sup>

都市間輸送 (新幹線、特急等) を対象に、需要に応じて運賃調整を行うなど、収益最大化のための弾力的

#### ①新しい構造形式の構築



#### ②2,3次元の地盤構造高精度推定

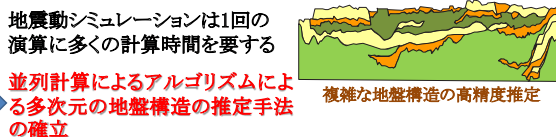


図4 数理最適化技術による大規模システムの効率化

運賃体系に関する研究

- ②大規模災害時の都市圏での運転再開
 

大規模災害が発生した際のダウンタイムを最小とするような運転再開スケジューリングに関する研究
- ③複数交通機関による都市交通ネットワークの評価手法
 

複雑な交通機関から構成されるネットワークにおいて、環境負荷や交通利便性、輸送効率性等の複数の指標による評価システム構築に関する研究

### 3.7 軌道分野

軌道分野では、主に保守計画に関する部分に数理最適化技術が適用されてきた。このような保守計画を最適化する試みについては、軌道と同様の走行路である道路分野においてもなされており、軌道においては今後も適用範囲は広く、研究の余地がある。具体的には以下の研究項目について数理最適化技術を適用する意義が大きいと考える (図5参照)。

- ①軌道保守の適正化のための研究
 

従来の保守のスケジュールに関する研究だけでなく、保守の体制やその規模、線区の特性に応じた整備レベル等に関する研究
- ② 軌道変位波形の処理や予測に関する研究<sup>11)</sup>

今後の普及が見込まれる多頻度軌道検測において、データ量が従来に比べて飛躍的に増加することを見越し、予測の目的に応じて適切にデータを選択、処理する研究
- ③軌道の設計の適正化に関する研究<sup>12)</sup>

設計においては安全性や使用性を満たすことが主に考慮されるが、建設費と維持費を考慮した経済性も含めた設計や現状の軌道構造の改良法の選択を最適化する研究



図5 軌道の検査周期や保線設備・保守機械の規模の最適化

### 3.8 浮上式関連技術分野

浮上式関連分野では、超電導磁石、磁気シールド、コイル形状などの設計、変電所配置と列車群制御などの間

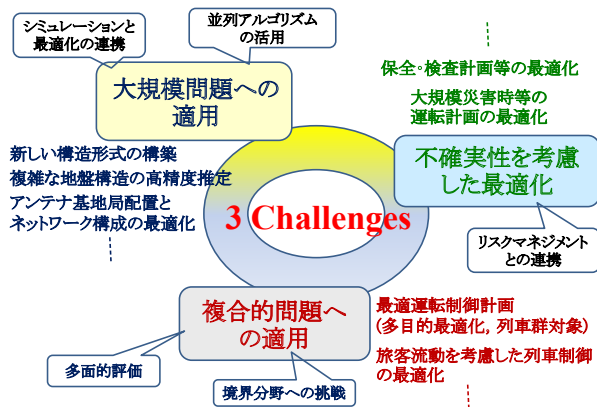


図6 数理最適化技術適用の今後の方向性

題に対して、数理的な手法を適用した研究が行われてきた。しかし、数理最適化技術の活用という観点からは必ずしも十分な検討が行われた訳ではない。今後は、高温超電導材料、極低温技術、コイルなどの基礎研究、また在来方式鉄道への応用であるフライホイールの開発等における設計手法などに対して、数理最適化技術の活用意義があると考え<sup>13) 14)</sup>。

#### 4. おわりに

鉄道に関する電力分野、信号通信分野、防災分野、車両分野、構造物分野、運輸・経営分野、軌道分野、浮上式関連技術分野の各分野における数理最適化技術適用の動向と今後の可能性について幅広く調査を行なった。潜在的には、数理最適化技術が適用可能な分野が多いことが確認できた。今後の数理最適化技術適用の方向性としては、従来は計算機性能の限界で適用が難しかった大規模問題への適用、分野横断的な問題や境界領域への適用、不確実性や将来予測を考慮した問題への適用などがある(図6参照)。解決すべき課題は多いものの、鉄道の効率性、利便性の向上に向けて数理最適化技術の果たす役割は大きく、引き続き、この分野の要素技術の最新動向を注視するとともに、並行して対象領域ごとの個別の検討を深度化していきたいと考える。

#### 文 献

1) 田部典之, 平井力, 山下修, 富井規雄, 平栗滋人, 今清人: 省エネ運転曲線作成アルゴリズムの開発と評価, 鉄道総研

報告, Vol.16, No.11, pp.7-12, 2002  
 2) 宮武昌史: 数理計画モデルによる省エネ列車ダイヤの生成法, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, Vol.18, pp.585-588, 2011  
 3) 石川了, 中村英夫: 遺伝的アルゴリズムによる列車制御の最適化, 京三サーキュラー, Vol.50, No.4, pp.4-9, 1999  
 4) 岡田勝也, 土田泰弘, 杉山友康, 村石尚: 鉄道盛土の降雨災害危険度評価法のべき乗積重回帰式の最適化, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.54, No.A, pp.454-455, 1999  
 5) 矢崎忍, 谷貝勇, 松浦知徳: 全球気象モデルの最適化並列化プログラム構築に関する研究, 防災科学技術研究所年報, Vol.10, pp.158-159, 1999  
 6) 石亀篤司, 松田真典: 充電インフラの適正配置に関する検討, オペレーションズ・リサーチ, Vol.56, No.7, pp.388-394, 2011  
 7) 小川知行, 若尾真治, 近藤圭一郎: 鉄道車両への導入を想定したハイブリッド電源システムの多目的最適化設計, 電気学会論文誌 D 産業応用部門誌, Vol.126, No.12, pp.1690-1698, 2006  
 8) 羽田明生, 廣瀬壮一: 鉄道構造物ヘルスマonitoringにおける無線センサネットワークの総費用最小化計画, オペレーションズ・リサーチ, Vol.57, No.9, pp.518-523, 2012  
 9) 一井康二: トータルコストに基づく重力式岸壁の設計震度の最適化, 土木学会論文集 I, Vol.724, No.1-62, pp.13-23, 2003  
 10) Heike Link: A Yield-Management Scheme for Rail Passenger Fares in Germany, Japan Railway & Transport Review, No.38, pp.50-55, 2004.  
 11) 田中博文, 福山幹康, 三和雅史: レール凹凸評価指標と削正車最適運用計画策定システム, 鉄道総研報告, Vol.23, No.10, pp.5-10, 2009  
 12) 三和雅史, 河西智司: 鉄道設備のコストダウン経済的な軌道保守計画, Railway Research Review, Vol.60, No.9, pp.18-21, 2003  
 13) 土谷隆, 笹川卓: 2次錐計画問題による磁気シールドのロバスト最適化, 統計数理, Vol.53, No.2, pp.297-315, 2005  
 14) 樋口剛, 野中作太郎, 安藤正博: 地下鉄リニア誘導モータの高効率化について, 電気学会論文誌 D 産業応用部門誌, Vol.120-D, No.8/9, pp.1008-1014, 2000