

# 複数台の保守用車運用を考慮した軌道保守計画モデルの構築

三和 雅史\* 矢坂 健太\* 吉田 尚史\*  
 松本 亮介\*\* 佐々木 陽\*\* 松丸 和貴\*\*

## Modeling an Optimal Track Maintenance Schedule in Consideration of Operation of Several Numbers of Track Maintenance Machines

Masashi MIWA Kenta YASAKA Takafumi YOSHIDA  
 Ryosuke MATSUMOTO Akira SASAKI Kazutaka MATSUMARU

Through appropriate maintenance activity, railway track condition must be kept at a satisfactory level. Therefore, we have developed an optimal decision making model for scheduling operation of several numbers of track maintenance machines for each kind of maintenance work with consideration of restrictions. In order to determine the schedule, we apply integer programming technique to the scheduling model. By test computation, we confirm that our model is effective in terms of both quality and computation time.

キーワード：軌道保守用車，スケジューリング，数理計画モデル，ネットワークモデル

### 1. はじめに

鉄道線路（軌道）の保守には、保守工種に応じた様々な専用機械（保守用車）が使用されるが、導入には多くの費用がかかるため、図1のように数台の機械を複数の保線区で共用し、広範囲に運用して用いられることがある。これらの保守用車の年度運用計画については、従来は担当者が経験的に作成していたが、保守用車の故障時における再計画作業を含め、その効率化が課題である。また、作成された計画の妥当性が不明であるため、今後、計画作業に熟練した担当者が減少する中で、計画の質を維持・向上し続けることも課題である。

以上より、短時間で質の高い保守計画の作成を支援するために、これら保守用車の運用を考慮した保守計画モデルを構築し、試算により妥当性を検証した。

### 2. モデル構築の対象とする保守用車

本稿で計画モデルを構築する対象としては、道床交換に用いる道床交換機 [NBS]、道床安定作業車 [DGS]、軌道変位（狂い）保守に用いるマルチプル・タイ・タンパ [MTT]、レール削正に用いる削正車を想定する。このう

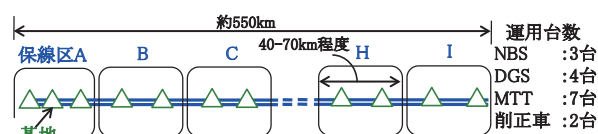


図1 保守用車を複数保線区で共有している線区の例

\* 軌道技術研究部 軌道管理研究室  
 \*\* 西日本旅客鉄道株式会社

ち、NBSは古道床を撤去して新道床を敷設する車両であり、DGSは道床交換後に軌道に振動を与えて道床を安定化させるために新幹線で用いられる車両である。また、MTTはバラスト軌道における軌道変位整正のための機械であり、削正車はレール表面の疲労層や凹凸を除去するための機械である。

### 3. 複数台 NBS, DGS の運用を考慮した道床交換計画モデル

#### 3.1 モデルの概要

本モデルは、各道床交換作業の箇所、実施日を考慮し、各NBS, DGSの各保線区への配備と担当作業の年度計画を日単位で作成するものである。本モデルの構造を図2に示す。

入力データとして、NBS等の台数や運用上の制約（各NBS等の検査計画等）の他、各保線区間の距離、経年等

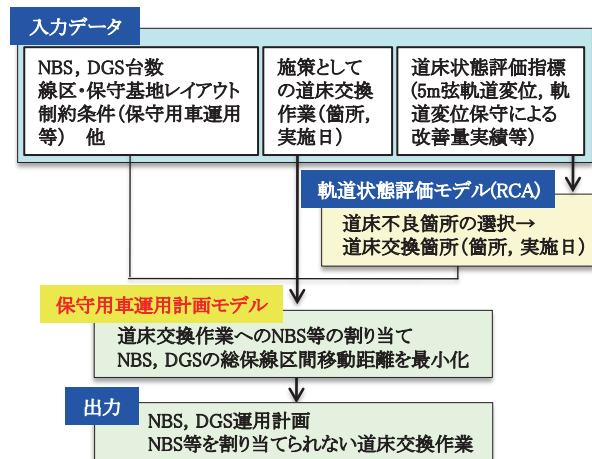


図2 NBS, DGS 運用計画モデル

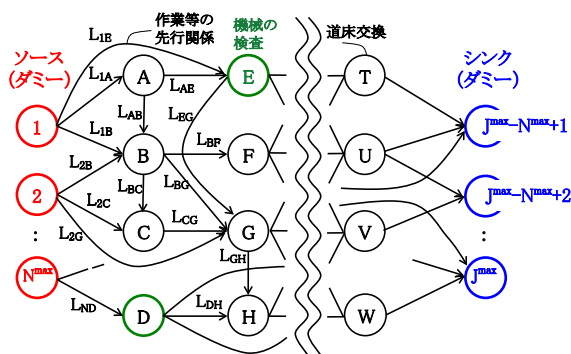


図3 本モデルの構造の概念図

を考慮して施策として行う道床交換の箇所、実施日、また各箇所の道床状態を評価して交換箇所を選定し、実施日を与える。この状態評価には、既開発の軌道状態評価モデル (RCA) <sup>1)</sup> を用いる。なお、道床交換箇所によっては、NBS を使用する / しない場合があるため、NBS 運用計画モデルでは、NBS を使用する作業のみが入力データとなる。一方、DGS は全道床交換作業に用いられるため、DGS 運用計画モデルでは、全作業が入力データとなる。

次に、制約を考慮しながら、各 NBS 等に交換作業を割り当てる。この際、各車両の保線区間移動距離の総和が最小になるように計画を作成する。

### 3.2 モデルの定式化

ここでは、NBS と DGS の各々についてモデル化するが、モデルの構造は殆ど同じであるため、以下では NBS を対象としてモデルの詳細を示す。

本モデルの構造の概念図を図3に示す。本モデルは各作業や各機械の定期検査をノードとし、各パスに保線区間移動距離というコストが付与されたネットワーク問題としてモデル化できる。また、各作業等の時間的な先行関係はアークとして示される。このネットワーク問題を解いて得られるソースからシンクまでのパスが各 NBS の運用計画となる。ここで、ソースとシンクは作業等ではないが、フローの始終点としてダミーノードによりネットワーク上に配置する。

集合として NBS 集合  $N = \{1, 2, \dots, N^{max}\}$ 、検査及び道床交換集合 (作業集合)  $J = \{1, 2, \dots, J^{max}\}$  (ダミー作業を含む) を定義する。また、決定変数、制約条件、目的関数についての詳細を以下に示す。

a) 決定変数

- i)  $w_{nj}$  : 0-1 型整数変数,  $n \in N, j \in J$   
 $= 1$  No.  $n$  の NBS が作業等  $j$  を行う  
 $= 0$  " " を行わない
- ii)  $x_{npq}$  : 0-1 型整数変数,  $n \in N, (p, q) \in J$   
 $= 1$  No.  $n$  の NBS が作業等  $p$  の実施後に作業等  $q$  のために移動する  
 $= 0$  " " しない

- iii)  $g_j$  : 0-1 型整数変数,  $j \in J$   
 $= 1$  作業等  $j$  をいずれの NBS 等によっても実施できない  
 $= 0$  " " できる

b) 主な制約条件

i) 作業実施及び担当可能 NBS 制約

各作業には、担当可能な NBS の No. (複数可) が予め与えられ、必ず実施するものとする。なお、NBS の運用上、どうしても NBS を割り当てられない道床交換については、変数  $g_j$  が 1 となって出力される。

$$g_j + \sum_{n \in N} N_{nj} w_{nj} = 1 \quad j \in J \quad (1)$$

$N_{nj}$  : No.  $n$  の NBS が作業  $j$  を担当できる場合に 1、できない場合に 0

ii) 検査等の実施必須制約

NBS の稼働開始作業 (作業等 No.1 ~  $N^{max}$  のダミー作業 [ソース])、稼働終了作業 (作業等 No.  $J^{max}-N^{max}+1$  ~  $J^{max}$  のダミー作業 [シンク])、検査については、指定された No. の NBS が必ず実施する。なお、これらの作業等を担当できる NBS の No. は 1 つだけである。

$$w_{nj} = 1 \quad (n, j) \subseteq N \times J \quad (2)$$

iii) 作業等実施論理制約

2 種類の決定変数の関係を表す制約である。

$$w_{nj} - \sum_{p \in J} x_{npj} \leq 0 \quad n \in N, j \subseteq J \quad (j=N^{max}+1 \sim J^{max}) \quad (3)$$

$$w_{nj} - \sum_{p \in J} x_{npj} \leq 0 \quad n \in N, j \subseteq J \quad (j=1 \sim J^{max}-N^{max}) \quad (4)$$

iv) 先行作業等制約

作業等  $p$  が作業等  $q$  より先行して行えない場合、 $q$  から  $p$  へのパスを構成できない。

$$x_{npq} = 0 \quad n \in N, (p, q) \subseteq J \times J \quad (5)$$

v) ソースノード制約

ソースノードからは、いずれかの作業等に至るパスを必ず構成する。

$$\sum_{j=N^{max}+1}^{J^{max}} x_{mj} = 1 \quad m \in N \quad (6)$$

vi) シンクノード制約

シンクノードには、いずれかの作業等から到着するパスを必ず構成する。

$$\sum_{j=1}^{J^{max}-N^{max}} x_{nj\{J^{max}-(n-1)\}} = 1 \quad n \in N \quad (7)$$

vii) フロー保存制約

ソースノードとシンクノードを除く各ノードにおいて、到着パスが構成された場合には出発パスを構成する。

$$\sum_{p \in J} x_{npj} - \sum_{q \in J} x_{npj} = 0 \quad n \in N, j \in J \quad (8)$$

viii) フロー制約

各ノードにおいて到着/出発するフローは1以下である。

$$\sum_{n \in N} \sum_{p \in J} x_{npj} \leq 1, \sum_{n \in N} \sum_{p \in J} x_{njp} \leq 1 \quad j \in J \quad (9)$$

c) 目的関数

計画期間中のNBSの保線区間移動距離の最小化とする。ここで、 $g_j$ を含む第2項は制約i)に示したようにNBSを割り当てられない道床交換が存在しなければ0であるが、存在する場合は正の大きな値となる。

$$\min. \sum_{n \in N} \sum_{p \in J} \sum_{q \in J} L_{pq} \cdot x_{npq} + L' \sum_{j \in J} g_j \quad (10)$$

$L'$  : (総移動延長に対して十分) 大きな数

$L_{pq}$  : 作業  $p$  から  $q$  の実施のためのNBS移動距離

3.3 モデルの適用例

本モデルを用いてNBSとDGSの各運用計画(年度計画)を試作成する。ここでは3台のNBSと4台のDGSが9保線区で共有・運用されている図1の線区における過去の年度の計画を作成する。

(1) NBS運用計画

NBSによる道床交換として、施策や道床状態を考慮した上で、実施箇所、実施日を指定した93作業を与える。また、各NBSの検査時期、保線区の組み合わせ(計7検査)と稼働可能範囲を表1のように与える。本表には、いずれかのNBSが検査中の期間には、他のNBSの稼働可能範囲を拡大することを考慮してある。

以上の条件に対してモデルを適用した結果、全作業にいずれかのNBSが割り当てられ、総移動距離が3419.5kmの表2に示す計画を得た。ここでの最適化計算にはFICO社製の汎用ソフトウェアXPRESS7.5を使用し、計算時間は1.4秒であった。この計画を当時の実績と比較すると、交換作業と担当NBSの組み合わせは98%の作業で一致した。また、当時の総移動距離は3467.1kmであり、モデル解の方が1.4%(47.6km)短かった。これは、6月に保線区Cで予定されていた3つの作業について、実績ではNBS①が割り当てられたのに対し、モデル解ではNBS②が割り当てられた違いによるものである。この3作業の直前における両NBSの配備保線区は、モデル解、実績共に①がB、②がDであった。保線区CへのB、Dからの距離は各々81.2km、57.4kmでありCへはDの方が近い。モデルでは、この距離の差(23.8km)を考慮し、保線区Cに近いDに直前まで配備されていた②に3作業を割り当てることで、その往復距離分(23.8×2=47.6km)短い計画が出力された。

以上に示した計画の質や計算時間を考慮すると、本モデルの性能は、実用上、十分であると考えられる。

(2) DGS運用計画

DGSを用いる道床交換として、実施箇所、実施日を

表1 NBSの稼働可能範囲

パターン	道床交換作業数(全93)	1			2			3			4		
		①	②	③	⊕	②	③	①	⊕	③	①	②	⊕
A	2	○			-	○		○	-		○		-
B	0	○			-			○			○		-
C	18	○	○		-	○		○	-		○	○	-
D	14	○	○	△	-	○	△	○	-	△	○	○	-
E	7		○		-	○		○	-		○	○	-
F	0		○		-	○		-		○		○	-
G	15		○		-	○		-		○		○	-
H	20		○		-			○			○		○
I	17			○	-			-		○		○	-

\* [パターン5] 2台が検査の期には残り1台が全保線区で稼働可能  
△: 検査時のみ配備可

指定した169作業を与える。また、各DGSの検査時期、保線区の組み合わせ(計14検査)等の条件を与える。

以上の条件にモデルを適用した結果、全作業にいずれかのDGSが割り当てられ、総移動距離が3843.0kmの計画を2.7秒で得た。この計画を当時の実績と比較すると、交換作業と担当するDGSとの組み合わせは93%の作業で一致し、総移動距離はモデル解の方が3.6%(136.5km)短かった。

以上のことから、本モデルはDGS運用計画の作成にも、実用上、十分な性能を有していると考えられる。

3.4 システム化

上記のモデルによるNBS、DGSを用いた道床交換計画を容易に行うためのシステムを作成した。本システムは、Microsoft社製のExcel上で動作するものであるが、最適化計算には国産の汎用ソフトウェア(NTTデータ数理システム社製 Numerical Optimizer)を使用する。本システムでは、NBS、DGSの計画を別々に作成できる他、両方の計画を1回の処理で作成することもできる。

4. 複数台MTTの運用を考慮した軌道変位保守計画モデル<sup>2)</sup>

MTTによる軌道変位保守については、これまでに軌道変位保守計画モデルとして構築した実績がある<sup>3)</sup>。しかしながら、本モデルは1台のMTTを対象に計画を出力するものであり、複数台のMTTを運用する計画の作成には適用できない。そこで、従来のモデルを改良し、複数台のMTTの運用を考慮した軌道変位保守計画モデルを構築した。

4.1 モデルの考え方

従来のモデルでは、1台のMTTが担当するエリア内の線区・保守基地レイアウトと軌道変位推移履歴、計画作成上の制約条件を入力データとし、MTT配備計画(各期[週や旬等の期間長さ]にMTTを配備する保守基地)



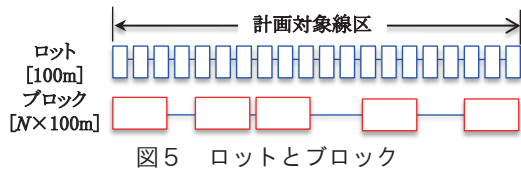


図5 ロットとブロック

えるまでの期間であればいつでも保守できる。よって、NBS 等運用計画モデルとは別の運用計画モデルを構築する必要がある。

集合としては MTT 集合  $N = \{1, 2, \dots, N^{max}\}$ ，期集合  $K = \{1, 2, \dots, K^{max}\}$ ，保線区集合  $D = \{1, 2, \dots, D^{max}\}$  を定義する。また，決定変数，制約条件，目的関数については以下に詳細を示す。

a) 決定変数

- i)  $n_{mkd}$  : 0-1 型整数変数,  $n \in N, k \in K, d \in D$   
 = 1 No.n の MTT を期 k に保線区 d へ配備する  
 = 0 " しない
- ii)  $x_{nkpq}$  : 0-1 型整数変数,  $n \in N, k \in K, (p, q) \in D$   
 = 1 No.n の MTT を期 k に保線区 p から q に移動する  
 = 0 " しない

b) 主な制約条件

i) 期別 MTT 総配備台数制約

MTT は  $N^{max}$  台とし，各期にいずれかの保線区へ配備する。

$$\sum_{n \in N} \sum_{d \in D} z_{nkd} = N^{max} \quad k \in K \quad (11)$$

ii) 期別 MTT 配備基地指定制約

特定期に MTT を配備する保線区を指定する。MTT の検査計画については本制約で考慮する。

$$z_{nkd} = 1 \quad (n, k, d) \subseteq N \times K \times D \quad (12)$$

iii) 期別保守ブロック数制約

各 MTT の各期における保守可能ブロック数の上限を与える。また，各保線区において，各期までに保守しなくてはならないブロック（軌道変位が上限値を超えるロットを含むブロック等）数の下限を与える。なお，計画期間末までには全ブロックを保守する。

$$A_{kd} - \sum_{n \in N} \sum_{k=1}^k B_{nk} \cdot z_{nkd} \leq 0 \quad d \in D \quad (13)$$

$A_{kd}$  : 期 k' までに保線区 d において保守すべきブロック数の下限

$B_{nk}$  : No.n の MTT が期 k に保守可能なブロック数

iv) 期別保線区配備可能台数制約

各期に各保線区に配備できる MTT を 1 台以下とする。

$$\sum_{n \in N} z_{nkd} \leq 1 \quad k \in K, d \in D \quad (14)$$

v) MTT 移動制約

各 MTT は連続する期において，同じ保線区に留まるか，別の保線区に移動するかのいずれかとする。

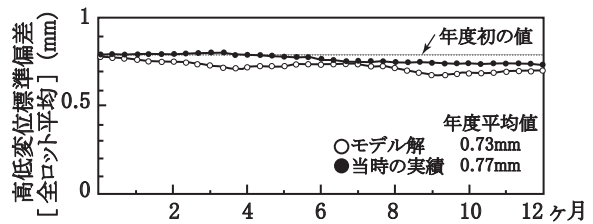


図6 軌道状態推移の予測結果

$$\sum_p \sum_q x_{nkpq} = 1 \quad (p, q) \in D \quad (15)$$

vi) MTT の保線区間移動に関する論理制約 2 種類の決定変数の関係を表す制約である。

$$\begin{aligned} x_{nkpq} - z_{nkp} &\leq 0, \quad x_{nkpq} - z_{n(k+1)q} \leq 0 \\ z_{nkp} + z_{n(k+1)q} - x_{nkpq} &\leq 1 \\ n \in N, k \in K, (p, q) \in D \end{aligned} \quad (16)$$

c) 目的関数

MTT の保線区間の総移動距離の最小化とする。

$$\min. \sum_{n \in N} \sum_{k \in K} \sum_{p \in D} \sum_{q \in D} L_{pq} \cdot x_{nkpq} \quad (17)$$

なお，移動距離が同じ解が複数見つかった場合には，同じ移動距離の解において，計画通りの保守を行った場合に予想される軌道状態が最良の解を採用する。

(3) 保守スケジュール作成モデル

(2) で得られた各保線区への MTT 配備期を制約とし，先に (1) で得られたブロックに保守期を割り当てて，MTT の保守基地運用と軌道変位保守のスケジュールを作成する。本モデルでは，MTT の各保守基地への配備期と保守するブロックを決定する変数が存在する。制約条件は MTT の稼働に関する制約，軌道変位に関する制約等から構成され，目的関数は軌道変位の計画期間中平均値の最小化である。

定式化の詳細については文献<sup>3)</sup>に示す。

4.2 モデルの適用例

本モデルを用いて MTT 運用計画（年度計画）を試作成する。ここでも 7 台の MTT が運用されている図 1 における過去の年度の計画を作成する。

最初に，保線区別に保守対象区間選択モデルを適用した結果，計 625 ブロックを得た。このブロックと当時の保守箇所との一致率は 71% であった。そして，複数台 MTT 運用計画モデルを適用した結果，6.7 秒で総移動距離 4990.1km の計画を得た。この距離は，当時の実績における距離より 30% (2121km) 短い。最後に，本運用計画を考慮し，保守スケジュール作成モデルにより各保線区での軌道変位保守計画を作成した。得られた計画に基づいて保守した際に予想される軌道状態（有道床区間平均）の推移を図 6 に示す。本図には，当時の保守実績に基づいて推定した推移も示す。モデル解によれば，軌

特集：軌道技術

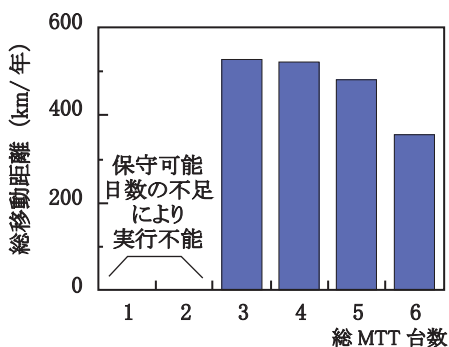


図7 MTT台数と総移動距離

道状態は年度初より年度末の方が小さく良化を期待できる。当時の実績においても状態は良化するが、その程度はモデル解より小さい。よって。モデル解の方が計画の質は高いと考えられる。

以上より、本モデルについても、実用上、十分な性能を有していると考えられる。

ところで、本モデルにおいて、MTT台数をパラメータとして試算することで、MTT保有台数の適正化を検討することができる。上記と別の線区データにおいて検討した例(MTT台数別移動距離)を図7に示す。本条件では、全ブロックを保守するためには3台以上のMTTが必要であり、6台を5台に減らすことで移動距離は約130km/年増えること等を確認できる。

4.3 システム化

従来のシステムを改良し、図4に示したフローに従って計画を作成するシステムを開発した。本システムについても、従来のシステムやNBS等の運用計画システムと同様にExcel上で動作し、Numerical Optimizerを用いる。本システムでは、従来と同様に1台のMTTを対象として各保線区での保守計画を作成することもできる。

5. 複数台削正車の運用を考慮したレール削正計画モデル

レール削正計画モデルについても、これまでに構築したモデルがある<sup>4)</sup>が、1台の削正車の運用を対象としたものであり、複数台削正車の運用計画の作成には適用できない。そこで、4章と同様の考え方により従来モデルを改良し、複数台削正車の運用を考慮したモデルを構築した。

本モデルについても、2台の削正車が運用されている図1における過去の年度の計画を作成した。その結果、モデル解における削正箇所は当時の実績と87%で一致した。また、削正車の総移動距離は1526.5kmであり、当時の実績より20%短かった。更に、得られた計画に基づく削正を行った際に予想されるレール状態(ここでは軸

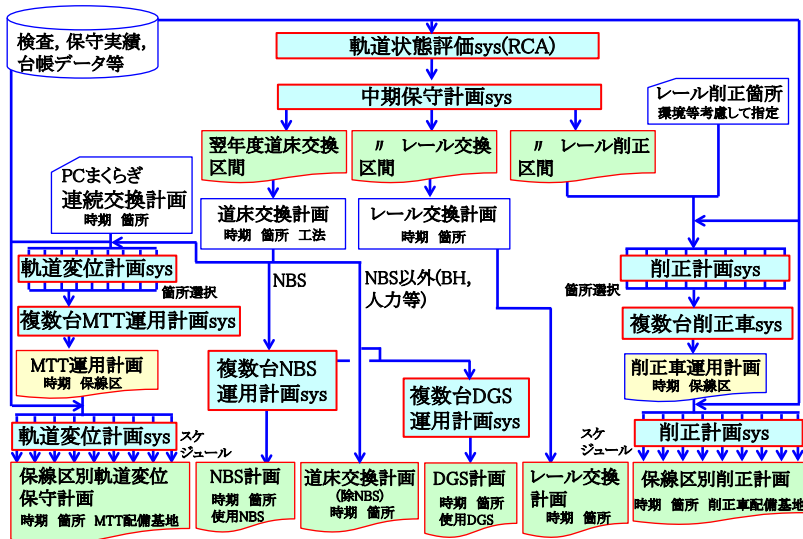


図8 各システム間の連携による保守計画の作成

箱加速度標準偏差を指標に用いる)は、年度初3.7m/s<sup>2</sup>に対して年度末では3.6m/s<sup>2</sup>であり、実績よりも良好であった。なお、計算には2865秒を要し、先に述べた各モデルに比べて長かった。削正車については、2台とも稼働可能範囲が全保線区であり、実行可能解が存在する空間が広いことが理由と考えられる。

以上より、本モデルについては、計算時間はやや長いですが、実用上、十分な性能を有していると考えられる。

6. まとめ

品質の高い軌道保守計画を短時間で作成するためのモデルとして、道床交換、軌道変位保守、レール削正に用いる各種保守用車の複数台運用を考慮した保守計画モデルを構築し、試算によりその妥当性を確認した。今回開発したモデルやシステムを既開発のシステムと図8のように連携させることで、より効率的な保守の実現に寄与できるものと考えられる。今後は、実証試験等を行って、モデル、システムの実用化を目指す。

文献

- 1) 三和他：レールおよび道床状態を考慮した軌道保守方法の最適選択モデルの構築，鉄道総研報告，vol.26，No.2，pp.13-18，2012
- 2) 矢坂他：複数台の軌道保守用車の運用を考慮した軌道保守計画モデルの開発，第20回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2013)講演論文集，pp.49-52，2013
- 3) 三和他：最適軌道保守計画作成モデルの実証検証に基づく性能評価と運用実施の汎用化，土木学会論文集D3，vol.69，No.2，2013
- 4) 田中他：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