車両運用計画作成モデルによる What-If 分析

- 方策案に対する試算・意思決定の OR による支援の可能性-

○ [電] 今泉 淳 (東洋大学) 椎名 孝之 (早稲田大学)

What-If Analysis using a Rolling Stock Scheduling Model:

The possibility of a Trial Calculation for Policies and Decision Support

in Railways by OR

OJun Imaizumi, (Toyo University) Takayuki Shiina, (Waseda University)

Rolling stock schedule is integrated with the train schedule (timetable). However, the operation and scheduling of rolling stock are subject to other factors such as depots and parking places as resource, their location and capacity, as well as the cycle of inspection and the maintenance. On the other hand, the constraints of rolling stock scheduling are the results of some policies or the objects of decision making from a higher perspective. In this paper, we will discuss the possibility of trial calculations and decision support for policies related to rolling stock by What-If analysis using a rolling stock scheduling model by mathematical programming in OR.

キーワード:車両運用計画,数理計画,資源,試算,意思決定支援,What-If分析

Key Words: rolling stock schedule, mathematical programming, resources, trial calculation, decision support, What-If analysis

1. はじめに

車両は事業者に不可欠な資源であり、その運用の巧拙の 重要性は議論を待たない.その車両運用計画はダイヤと表 裏一体をなし、車両数(編成数)以外にも各種の制約下で 作成される.しかしそれらは計画立案の上では制約でも、 元々何らかの方策や上位の意思決定の結果である.

本研究では、車両に関連する各種意思決定を支援する目 的で、オペレーションズ・リサーチ(OR)の数理計画によ る車両運用作成モデルを用いた What-If 分析の例を示す. そこでは、運用計画を作成するのみならず、その作成の制 約となる各種条件を意思決定対象とした場合のモデルの用 法・可能性に関して議論をする.

2. 研究の背景

2.1 車両運用計画

車両運用計画は車両の使用内容を事前に定めたもので,

その要領は国や事業者,車両による違いはあるが,ここで は一日単位の「仕業・行路」とその順序の「交番」からな るケースを想定する.

運用計画は計画階層中「基本計画」¹⁾に対応し,同一ダイヤの反復を前提に,各車両が仕業順序に従い,定期検査 もそれに組み込む.

ダイヤ・車両運用は現有車両数以外の他の資源の制約の 影響も受ける.具体的には,昼間の閑散時間帯・運行終了 後の車両の留置場所の線区内の位置や容量,検査可能場所 の位置次第で,回送が生じるとともに,検査周期(日数・ 時間・距離)に応じて検査可能場所への出入りが生じ,ダ イヤ・運用計画,運用効率に影響を与える.さらに,検査 に要する時間やその可能な時間帯の影響も受け得る.

2.2 車両に関連する方策・意思決定

一方,ダイヤ作成上の制約である車両数は運行計画より も上のレベルでは意思決定の対象で,列車増発を伴うダイ ヤ改正では車両増備や設備改変等,投資の一部にも踏み込 むことになる. それ以外にも,車両基地・留置線の位置や 容量は,一般にその変更は容易ではないが,留置線の開設 がダイヤや運用を改善する場合も考えられ,新線建設や路 線延伸の場合はまさに意思決定の対象となる.

そこでは、ダイヤや各種条件が変わった場合に何が起こ るのかを把握・試算できれば意思決定の助けになり得る.

2.3 What-If 分析による意思決定支援

鉄道の「基本計画」「実施計画」¹⁾のような計画の階層構 造があるのと同様,生産・ロジスティクス分野にも「スト ラテジック」「タクティカル」「オペレーショナル」と意思 決定レベルがある一方,各階層の意思決定支援の数理モデ ルがある(久保²⁾).そこでは,上位のレベルの意思決定は 下位のモデルを用いた What-If 分析(もしこうなったら分 析)で可能とする考えがあり(久保²⁾),本研究では生産・ ロジスティクス分野のこの考え方を鉄道分野に応用する.

3. 関連する研究

鉄道分野にも「下位のモデルを上位の意思決定に用いる」 考え方は存在し,機関車基地内留置計画(北古賀ら³⁾),車 両数の見積もり(Tsunoda et al.⁴),乗務員基地配置の検討

(小池ら⁵⁾,本研究の基点である今泉と椎名⁶などがある. 一方,車両運用計画立案の数理的方法の研究は北米や欧 州に多くあるが,運用事情の国や事業者による違いが大き く日本の場合への適用可能なものは少ない.その中でイタ リアの Giacco et al.⁷は交番を作る意味で日本のやり方に 類似し,列車を「点」,2列車間のつなぎを「枝」に対応さ せたネットワークで,交番に対応する制約付き巡回路を求 める.これを日本の運用実態に拡張したものとして,検査 周期が日数であることへの対応の諸岡ら⁸,分割併合に対 応した Kato et al.⁹,相互直通運転に対する拡張の中野・ 今泉・椎名¹⁰がある.

4. 本研究で用いる数理モデルとその前提

4.1 数理モデルの概要

営業列車の発着地である「旅客駅」,夜間留置が可能な「留 置線」,夜間留置に加え検査が可能な「基地」を総称し「駅」 と呼ぶ.実際には「旅客駅兼留置線」や,旅客駅に基地が 隣接する「旅客駅兼基地」も存在する.なお,翌日の初列 車のために車両が滞泊する旅客駅も便宜上「旅客駅兼留置 線」とする.

本研究で用いるモデルは Giacco et al. ⁷に対して,検査 周期を日数に変更した(諸岡ら⁸⁾)他,夜間の基地・留置 線の容量の考慮(中野ら¹⁰⁾)に加え,基地の検査可能数(回 数/日)や同時検査可能数,その他の拡張を施した.

そこでは、入力としてダイヤ(原則営業列車の発駅・発 時刻、着駅・着時刻)に加え、各駅で折り返しの最低・最 大時分を設定し異なる二列車間のつなぎの可能性や、車両 の検査場所や検査の所要時間・可能時間帯、夜間の基地・ 留置線の場所やその容量などをパラメータ・設定として与 えた.また、ダイヤデータに元々はなくパラメータの変化・ 操作と最適化の結果として生じ得る回送は、時間帯や方向 に応じて所要時間を仮定して「候補」として設定する.

最適化は運用計画案(仕業・交番,施行検査数とその場所・時間,夜間留置駅,総回送距離)を出力するが,使用 車両数や検査回数の最小化モデルへの修正は容易である. 4.2 定式化

混合 0-1 計画問題としての定式化は煩雑なので,目的関数・制約条件の意味のみ列挙する.

目的関数は総回送距離でその最小化(他の評価項目との 線形和とすることも可能),制約条件は(1)各列車に先行・ 後続列車が必ずある,(2)交番は一組,(3)検査の条件を 守る(仕業検査の前回施行からの経過日数カウント,検査 期限の順守,検査間隔の下限,交番内で交番検査(仕業検 査を兼ねる)を1回施行),(4)交番長・使用可能車両数制 約,がGiacco et al. ⁿによる,もしくは修正で,(5)各基 地・留置線の夜間留置可能数制約⁸,(6)基地での一日当 たりの検査可能車両数制約,(7)検査可能時間帯内での同 時可能検査車両数制約がGiacco et al. ⁿに対する拡張であ る.その他,変数の0-1・整数・実数条件がある.

4.3 最適化モデルによる計算時間

参考文献¹¹などに基づきデータを作成したある例題の 列車数は約140, 駅数は約10, 車両数は21(「データ1」 と称する)で,その他の状況や4.1節で述べた各種パラメ ータ値は適当な仮定を置いて設定した.したがって,現実 とは異なる部分があることに留意する.

これを数理計画パッケージの IBM CPLEX 12.10 により PC (CPU は Ryzen 5 3500,メモリ 16GB) で解いたとこ ろ, CPLEX の最適化パラメータを初期設定のままで概ね 1 分以内で最適解が得られた.ただし,問題規模や目的関 数次第で計算時間や挙動の変化が生じる可能性はある.





図 1 本研究の What-If 分析の枠組み

ネットワーク	点数	139
	枝数	2916
整数計画問題	行数 (rows)	4659
	列数(columns)	6036
	非ゼロ要素(nozeros)	98069
	0-1 変数数(binaries)	2168
	一般整数変数数(generals)	1677

表1 問題の規模(参考)

図1に本研究が想定する枠組みを示す.図の「IF」部が 本研究で想定する意思決定対象の候補で,これらを入力(場 合によっては評価項目)として最適化を行い,図の「What」 部にある結果を算出,それらを評価の上で意思決定項目の 候補値を再設定して最適化を反復する.また,列車データ を複数用意すれば同一条件下での比較も可能である.

5. 分析例

以下にいくつかの分析の視点や例を示す.なお、分析の 視の観点から 4.2 節の制約条件(7)は除外した.

5.1 路線·車両の詳細

4.3 節で言及したデータの詳細で,当該線区は都心側に 複数の始発・終着駅(A駅・B駅)がある一方,郊外側の 輸送段差がある駅(E駅)が旅客駅兼基地である.さらに 郊外側の旅客駅(H駅)に隣接して交番検査の実施場所で ある本車両の所属基地があるが,その容量の関係から近隣 の留置線(F駅)との間で回送が発生する.郊外側終点(J 駅)まで直通する列車は少なく,本線区・車両系列はA・ B駅とE・G・H駅の間の列車が大多数である.

5.2 比較の対象:現状

図1の「IF部」のパラメータ値を基本値(詳細は省略) に設定したものを「現状」と称し、その値を操作する出発 点となる.問題規模は表1(「整数計画問題」はCPLEXの 前処理後のサイズ)で、総回送距離181.9キロ、仕業検査 4回(加えて交番検査1回)という運用計画案が得られた.

5.3 留置場所に関する設定の変更

留置線の容量操作は回送距離の変化を誘発する一方,B 駅近隣,E駅,G・H駅近隣に基地や留置線があるため長 距離の回送は起きづらい.一方,入力ダイヤの特定駅の発 着数が一致していないと回送が生じる.E駅は比較的多く の車両が滞泊する路線上の中間的な駅であるため,その容 量操作は現状に対して長距離の回送を招く.

5.4 検査に関する設定の変更

使用車両数と検査周期から仕業検査4回(加えて交番検 査)と見積もれ、これをE・H両基地に割り振ったところ、 E基地で3回以上の検査を許さないと実行可能にならない.しかし、実行可能な状況下では回送距離は現状と変化 しない.また、現状に対して検査時間(120分)を長くしても一定の範囲で回送距離には変化がなく、現状の検査時 間の設定を緩くしても良いことを意味する.

一方, B駅に近い留置線 C駅を「基地」に変更し検査可

能かつ最低1検査を行う設定にしたところ,検査可能時間 帯(9:30~16:30)を広げない限り解が得られなかった.現 行ダイヤのままC駅で検査を施行するには,C駅での検査 可能時間帯の変更が現状に対して必要である.

このように、検査場所や時間・時間帯、各基地での検査 数の上下限を操作した場合の実行可能性や運用計画への影 響などを簡単に調べることができる.

5.5 複数の時刻表案の比較検討と定式化の変更

(1)分析の視点

データ1と同一の線区・車両系列だが別ダイヤによるデ ータ(データ2)を文献¹²⁾などを参考に作成しこれを「ダ イヤ比較」と見立て、また、より高い意思決定を意識し「必 要な列車に対する結果としての所要車両数はどうなるか」 という視点に立つ.

(2) 定式化の変更

元の定式化から車両数の上限制約を除去し、目的関数を

M×使用車両数+m×仕業検査数+総回送距離 とする. MおよびmはM≫mを満たす大きな数で,それ らが乗じられている項が相互に影響を及ぼさない値に設定 し、「まず使用車両数を,次に仕業検査数を,最後に総回送 距離を」最小化する.なお元の定式化の検査間隔の下限は 短い間隔の検査の抑止が目的だったが,変更後の定式化で は下限値を1に設定し間隔の平準化を最適化に任せた.

(3)計算上の挙動

CPLEX は、最適化のパラメータを初期値のままで計算 を行うと、一定精度の実行可能解が得られた時点で終了す る.一方、定式化の変更により目的関数値の絶対値が大き くなったため、上記の理由から最適解でなくても計算が終 了することがある.ここではその初期値での結果を示す.

データ2は、データ1のダイヤに対して輸送力の増強を 意図して列車数も多くなり、結果として所要車両数も多く なるはずである.またA駅とE駅で営業列車の発着数が 釣り合わずこれら駅間で回送列車があると考え、時刻表1 に対して昼間に比較的長距離の回送列車を許す変更をした ほか、A駅で早朝の発列車があるため夜間・昼間の長時間 留置も許し、データ1との違いに対応する修正をネットワ ーク生成部分に施した.そのような違いが二データの間に あるため、同一条件下の比較にならないことに注意する. そのような前提下での最適化の結果として、

- 使用車両数 24
- 仕業検査数 4(加えて交番検査1回)
- 総回送距離 325.6 キロ

(上界-下界) ÷下界×100=0.16(%)
の解が4分程度で得られた.なおここではA駅を基地としそこで1回の仕業検査の強制を試み実行可能解が得られたことから、A駅でのつなぎ方により検査のための間合い確保が可能なことが分かった.そのため、E駅での検査数上限は2回でも5.4節と違い実行可能となる.

6. 補足

前節では二つの各ダイヤに対して、ダイヤ作成上の前提 条件をダイヤとは基本的に独立して操作した.しかし、ダ イヤは各種制約に対応して作成され、前提条件を変動させ た状況(問題設定)に対して同一のダイヤを入力とするの は実務にはない発想と考えられる.

これはあくまでも実験実施上のデータとして用意したダ イヤを用いるために発生する都合であり、鉄道のこの種の What-If 分析の趣旨からいえば前提条件が変化すれば入力 側もそれに対応したものとなることはあり得よう.

またこの枠組みでは入力の列車ダイヤが想定する本来の 運用計画(現実)は当然実行が可能であるところ,ダイヤ は不変だが状況が変化して生成された運用計画の実行可能 性も保たれる前提を置いている.すなわち,折り返し駅で のつなぎが入力データのダイヤが想定するそれから変わっ た場合,例えば駅・基地構内での各種作業が(入力データ に対応する)本来の運用とは変わるはずだが,そこで不具 合は発生しない前提に立っている.回送列車に関しても, 二列車の着・発駅,時間帯を考慮して「回送によりつなぎ が可能」と仮定した場合に対して最適化の結果としてそれ を解(結果の運用計画)で選択されたら発生するわけだが, 二列車間のつなぎが可能である時点では具体的なスジを想 定しているのではなく,二列車・二駅で一定以上の時間が あれば回送のスジが設定可能という前提になっている.

このようなことは、運用計画の立案の視点からはモデル 使用の上でなんらかの留意を要する可能性がある.しかし、 車両運用計画立案モデルの前提として回送列車に関して本 研究のような扱いが他にも見られるとともに、本研究がモ デル内で考慮する要因よりさらに詳細を取り込むことには 困難があり、出力された計画案の段階でそれらに関する検 討がなされるべきであろう.一方、より高い意思決定では 一定範囲の抽象化も必要で、本研究が想定するレベルの仮 定は許される範囲であると考える.

7. おわりに

本研究では、車両運用計画作成の数理計画モデルを用いた What-If 分析例を示した.これにより、各条件を前提・制約とする運用計画立案のみならず、前提の変化に応じた 試算や、在来路線に対する要因変化や新線建設など経営視点の意思決定の支援の可能性を示した.

一方,本研究の視点や発想は実務のそれらや手続きと違う部分を含むと考えられる.それは,運用計画立案を最適 化問題として表現したためでもあり,特性を踏まえた上で 最適化モデルの実務での活用の発展を今後の課題とする.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP18K04619 の助成を受けたも のです.

参考文献

- 1)鉄道技術ポケットブック編集委員会編:鉄道技術ポケットブック,オーム社,2012.
- 2) 久保幹雄: ロジスティクス工学, 朝倉書店, 2001.
- 3) 北古賀圭祐, 今泉淳, 重田英貴, 森戸晋:機関車の基地 内留置計画に対する整数計画アプローチ, オペレーショ ンズ・リサーチ, Vol.55, No.2, pp. 121--127, 2010.
- 4) Tsunoda, M., Imaizumi, J. and Morito, S. : A model for estimating the required number of train units under split-and-merge policy for decision making in railways: A mathematical formulation by integer multicommodity network flow. In *Proceedings of 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis*, pp. 113-1 - 113-19, 2015.
- 5) 小池大樹, 今泉淳, 重田英貴, 森戸晋: 乗務員運用のた めの最適化モデル分析: 貨物鉄道における基地の配置と 担当範囲を中心として, 日本オペレーションズ・リサー チ学会 2012 年春季研究発表会 アブストラクト集, pp. 196-197, 2012.
- 6) 今泉淳, 椎名孝之:鉄道車両運用計画作成モデルの上位の意思決定への活用の試み,日本オペレーションズ・リサーチ学会 2020 年春季研究発表会アブストラクト集, pp.46-47.日本オペレーションズ・リサーチ学会,2020.
- 7) Giacco, G.,D'riano,A. and Pacciarelli,D. : Rolling stock rostering optimization under maintenance constraints, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol.18, No.1, pp.95-105, 2014.
- 8) 諸岡祐太, 福村直登, 椎名孝之, 今泉淳, 森戸晋:鉄道 車両運用計画における交番作成の数理計画モデル, 日本 オペレーションズ・リサーチ学会 2016 年秋季研究発表 会アブストラクト集, pp.172-173. 日本オペレーション ズ・リサーチ学会, 2016.
- 9) Kato, S., Fukumura, N., Morito, S., Goto, K. and Nakamura, N. : A mixed integer linear programming approach to a rolling stock rostering problem with splitting and combining. In *Proceedings of 8th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis*, pp. 548-564, 2019.
- 10) 中野颯大, 今泉淳, 椎名孝之:鉄道車両運用計画の定 式化に対する相互直通運転の拡張, 日本オペレーション ズ・リサーチ学会 2018 年秋季研究発表会 アブストラク ト集, pp.146-147, 2018.
- 11) ジェー・アール・アール編:普通列車編成両数表 Vol.35, 交通新聞社, 2015.
- 12) ジェー・アール・アール編:普通列車編成両数表 Vol.38, 交通新聞社, 2017.
- 13) ジェー・アール・アール編: JR 電車編成表 2015 夏, 交通新聞社, 2015.
- 14) ジェー・アール・アール編: JR 電車編成表 2018 冬, 交通新聞社, 2017.