

多目的最適化を用いた鉄道の運行計画策定支援システムの開発

京都府立大学 *松原 史 MATSUBARA Fumito
01704424 京都府立大学 吉富 康成 YOSHITOMI Yasunari

1. はじめに

新型コロナウイルス感染症の影響による利用者の減少で、大手鉄道会社 20 社の 2020 年度期末の決算額はいずれも赤字となっており、中でも JR 東日本では過去最悪の 5,779 億円の赤字となった[1]。このため、鉄道各社は「最終電車の時間繰り上げ等の列車減便」や「運賃の値上げ」、「人員削減計画」などを実施することで対処している。

このような状況を踏まえて、本研究では経営コストと旅客の利便性を考慮した列車運行計画の最適化について検討する。経営コストについては、途中駅で鉄道車両を切り離すことで、車両運用に要する車両コストの削減を図る。一方で旅客の利便性の評価については、旅客の乗車時間を基にする。

2. 対象とする最適化問題とその定式化

既報の研究[2]を参考に、全駅にて退避可能な複線区間において普通、急行、特急の 3 種別が混在する鉄道路線を対象とし、片方向の列車運行計画を混合整数計画法を用いて策定した。鉄道車両の切り離しについては、車両基地が付近に存在する駅でのみ 1 回まで切り離し可能とした。旅客は、各駅にて均等に出現するものと仮定し、乗車駅での待ち時間、及び他の列車への乗り換えは考慮しないものとした。また旅客情報として駅間移動情報[2] (以下、「OD データ」と表記)を用いた。

2.1 記号の定義

特急、急行、普通の各種別を、 $Ltdexp$, exp , loc とし、列車種別の全体集合を K とし、特急、急行、普通、の各停車駅の集合を S_{Ltdexp} , S_{exp} , S_{loc} 、列車の全体集合を T 、特急、急行、普通、の各列車の集合を T_{Ltdexp} , T_{exp} , T_{loc} とし、駅 s での番線の集合を Q_s とした。また本研究では番線数を 2 とした。

駅 s での列車 j の到着時刻の変数 a_j^s 、発車時刻の変数 d_j^s 、車両編成数の変数 v_j^s 、車両切り離し数の変数 VDN_j^s 、列車 j' が列車 j 以降に発車するか否かの変数 $x_{j,j'}^s \in \{0,1\}$ 、列車 j が番線 q を使用するか否かの変数 $r_{j,q}^s \in \{0,1\}$ 、列車 j が車両を切り離すか否かの変数 $z_j^s \in \{0,1\}$ を用いた。

定数として、駅 s での列車 j の計画到着時刻 A_j^s 、計画発車時刻 D_j^s 、最小停車時分 LS 、基準運転時分 LR_j^s 、最小進入時隔 LI_s^{arr} 、最小進入時隔 LI_s^{dep} 、番線開通時隔 LI^{track} 、車両切り離し時間 VD^{time} 、十分に大きな定数 M 、駅 o から駅 d まで種別 $k \in K$ の旅客数 $P_k^{o,d}$ 、旅客乗車数 $P_{s,k}^{on}$ 、旅客降車数 $P_{s,k}^{off}$ 、駅間距離 $L^{o,d}$ 、1 両あたりの収容人数 P^{cap} 、始発駅での車両編成数 $V^{Stg Sta.}$ 、営業時間 BH 、目的関数の重みとして時間価値 τ 、近似最適解での利便性とコストの値の利率を概ね同じにするための乗数 α 、

1 両あたりの乗車率 λ を用いた。そして、車両切り離し駅を $VD Sta. (\in S_{loc})$ 、列車始発駅を $Stg Sta. (\in S_{loc})$ 、種別 $k \in K$ の駅 s の次駅を $next(s, k)$ 、前駅を $prev(s, k)$ と表記する。

2.2 最適化問題の定式化

目的関数として、旅客の利便性の評価関数(以下、「利便性の関数」と表記) C_1 、車両コストの関数(以下、「コストの関数」と表記) C_2 の重み付き線形和を用いた。ここで、 $\omega_1 = 4820.5$, $\omega_2 = 52288$, $\omega_3 = 45050$ 。制約条件として、列車運行上の制約式(5)~(19) ([2]をもとに作成)、車両編成上の制約式(20)~(30)を用いた。定数 α , τ の設定方法については第 3 章で述べる。また制約式(19)~(21), (25)~(27)は車両切り離し駅が 1 つの場合であり、複数の場合は異なる式を用いる。

$$\min C = \alpha\tau C_1 + \frac{1}{BH \times 365} C_2 \quad (1)$$

$$C_1 = \sum_{o,d \in S_{Ltdexp}: o < d} \sum_{j \in T_{Ltdexp}} P_{Ltdexp}^{o,d} \int_0^{a_j^d - d_j^o} t dt + \sum_{o,d \in S_{exp}: o < d} \sum_{j \in T_{exp}} P_{exp}^{o,d} \int_0^{a_j^d - d_j^o} t dt + \sum_{o,d \in S_{loc}: o < d} \sum_{j \in T_{loc}} P_{loc}^{o,d} \int_0^{a_j^d - d_j^o} t dt \quad (2)$$

$$C_2 = \sum_{o,d \in S_{Ltdexp}} \sum_{j \in T_{Ltdexp}} \sum_{o \leq s < d} ((\omega_1 PK_{Ltdexp} - \omega_2) v_j^s + \omega_3) + \sum_{o,d \in S_{exp}} \sum_{j \in T_{exp}} \sum_{o \leq s < d} ((\omega_1 PK_{exp} - \omega_2) v_j^s + \omega_3) + \sum_{o,d \in S_{loc}} \sum_{j \in T_{loc}} \sum_{o \leq s < d} ((\omega_1 PK_{loc} - \omega_2) v_j^s + \omega_3) \quad (3)$$

$$PK_k = \ln(P_k^{o,d} L^{s,next(s,k)} \times (A_j^d - D_j^o) \times 365) \quad (4)$$

$$s. t. \quad x_{j,j}^s = 1 \quad \forall s \in S_{loc}, \forall j \in T \quad (5)$$

$$x_{j,j'}^s + x_{j',j}^s = 1 \quad \forall s \in S_{loc}, \forall j, j' \in T: j \neq j' \quad (6)$$

$$x_{j,j'}^s = 1 \quad \forall s \in S_{loc}, \forall j, j' \in T_{Ltdexp}: j \leq j' \quad (7)$$

$$x_{j,j'}^s = 1 \quad \forall s \in S_{loc}, \forall j, j' \in T_{exp}: j \leq j' \quad (8)$$

$$x_{j,j'}^s = 1 \quad \forall s \in S_{loc}, \forall j \in T_{Ltdexp}, j' \in T_{exp}: j \leq j' \quad (9)$$

$$x_{j,j'}^s = 1 \quad \forall s \in S_{loc}, \forall j \in T, j' \in T_{loc}: j \leq j' \quad (10)$$

$$\forall s, s' \in S_{loc},$$

$$x_{j,j'}^{s'} \geq x_{j,j'}^s \quad \forall j \in T_{Ltdexp} \cup T_{exp}, \forall j' \in T_{exp} \quad (11)$$

$$: s' = s + 1$$

$$x_{j,j'}^{s'} \geq x_{j,j'}^s \quad \forall s, s' \in S_{loc}, \forall j \in T, \forall j' \in T_{loc} \quad (12)$$

$$: s' = s + 1$$

$$d_j^s - a_j^s \geq LS \quad \forall s \in S_{loc}, \forall j \in T \quad (13)$$

$$a_j^{s'} - d_j^s \geq LR_j^s \quad \forall s, s' \in S_{loc}, \forall j \in T: s' = s + 1 \quad (14)$$

$$a_{j'}^{s'} - a_j^s \geq LI_s^{arr} - M(1 - x_{j,j'}^s) \quad (15)$$

$$\forall s, s' \in S_{loc}, \forall j, j' \in T: s' = s + 1, j \neq j'$$

$$d_{j'}^{s'} - d_j^s \geq LI_s^{dep} - M(1 - x_{j,j'}^s) \quad (16)$$

$$\sum_{q \in Q_s} r_{j,q}^s = 1 \quad \forall s \in S_{loc}, \forall j, j' \in T: j \neq j' \quad (17)$$

$$a_{j'}^s - d_j^s \geq LI^{track} - M \left(3 - x_{j,j'}^s - r_{j,q}^s - r_{j',q}^s \right) \quad \forall s \in S_{loc}, \forall j, j' \in T, q \in Q_s: s' = s + 1, j \neq j' \quad (18)$$

$$d_j^{VD Sta.} - D_j^{VD Sta.} = z_j^{VD Sta.} \cdot VD^{time} \quad \forall j \in T \quad (19)$$

$$a_j^s = A_j^s \quad \forall s \in S_k, \forall j \in T_k, \forall k \in K: s \leq VD Sta. \quad (20)$$

$$d_j^s = D_j^s \quad \forall s \in S_k, \forall j \in T_k, \forall k \in K: s < VD Sta. \quad (21)$$

$$v_j^{Stg Sta.} = V^{Stg Sta.} \quad \forall j \in T \quad (22)$$

$$2 \leq v_j^s \leq V^{Stg Sta.} \quad \forall s \in S_{loc}, \forall j \in T \quad (23)$$

$$v_j^s - v_j^{s'} = z_j^s \cdot VDN_j^{s'} \quad \forall s \in S_{loc}, \forall j \in T: s' = s + 1 \quad (24)$$

$$VDN_j^s = 0 \quad \forall s \in S_{loc}, \forall j \in T: s \neq VD Sta. \quad (25)$$

$$z_j^s = 0 \quad \forall s \in S_{loc}, \forall j \in T: s \neq VD Sta. \quad (26)$$

$$0 \leq VDN_j^{VD Sta.} \leq v_j^{(VD Sta.)-1} - 1 \quad \forall j \in T \quad (27)$$

$$P_{s,k}^{move} \leq \lambda P_{s,k}^{cap} v_j^s \quad \forall s \in S_k, \forall j \in T_k, \forall k \in K \quad (28)$$

$$P_{s,k}^{move} = P_{s,k}^{on} \quad s = Stg Sta. \quad (29)$$

$$P_{s,k}^{move} = P_{s,k}^{move}^{prev(s,k)} + (P_{s,k}^{on} - P_{s,k}^{off}) \quad s > Stg Sta. \quad (30)$$

3. 数値実験

九州の民鉄「西日本鉄道」のメインルートである西鉄福岡駅から大牟田駅までを結ぶ駅数49の「天神大牟田線」を対象として本法の有効性を検証した。列車の種別は特急、急行、普通の3つとし、番線等の駅の構造は考慮しないものとした。運行計画については、大牟田方面を走行する平日の運行計画の1日分の計216列車を対象とした。また天神大牟田線での最早出発時刻から最遅到着時刻までの時間帯を西日本鉄道での1日の営業時間とした。

旅客数については、西日本鉄道が公表している2020年度における1日の駅別乗降平均人員の数値をもとに、ある駅で降りる旅客数は各駅からその降車駅まで乗ってきた旅客数に比例すると仮定して、特急、急行、普通の各列車種別で作成したODデータを用いた。鉄道車両の切り離しは、各車両基地に最も近い「筑紫駅」と「西鉄柳川駅」でのみ可能とした。

数値計算には数理最適化ソルバーのGurobi Optimizer[3]を用いた。パラメータについては、現行の運行計画を参考にし、最小停車時分 LS には0.1、番線開通時分 LI^{track} には1、始発駅での車両編成数 $V^{Stg Sta.}$ には6、1両あたりの収容人数 P^{cap} には130、1両あたりの乗車率には1、車両切り離し時間 VD^{time} には1とし、時間価値 τ には、所得接近法と厚生労働省が公表している令和2年度における数値[4]を用いて得られた39.3を用いた。定数 α は、利便性とコストを同程度に評価するための係数で、分母を利便性における近似最適解の値、分子をコストにおける最適解での値とした分数として求めた。

このとき、車両切り離し駅を「筑紫駅のみ」「西鉄柳川駅のみ」「筑紫駅と西鉄柳川駅」とした3つの場合において、目的関数 C の近似最適値を求めた。筑紫駅では急行、西鉄柳川駅で

は特急と急行の切り離しが可能とした。そして、比較のため、①現行の運行計画での C の値、②利便性の関数 C_1 のみの近似最適値とその近似最適解をコストの関数 C_2 に代入した際の C の値、③車両編成数 v_j^s に理論値を代入した上で利便性の関数 C_1 のみで近似最適解を求めた際の C の値を求めた。その結果を、単位を円/分として表1～表3に示す。いずれの結果においても、 C の値が、④(=本法)の場合において①(現行の運行計画)、②、③の場合より小さい。

表1 車両切り離し駅を筑紫駅のみとした目的関数値

	利便性の項	コストの項	C
①	201327.7	183476.4	384804.1
②	180695.1	183476.4	364171.5
③	182513.6	180695.1	363208.7
④	181902.2	180762.9	362665.1

表2 車両切り離し駅を西鉄柳川駅のみとした目的関数値

	利便性の項	コストの項	C
①	183369.5	183476.4	366845.9
②	183204.2	183476.4	366680.6
③	183589.6	183204.2	366793.8
④	183317.9	183358.5	366676.4

表3 車両切り離し駅を筑紫駅と西鉄柳川駅とした目的関数値

	利便性の項	コストの項	C
①	199676.2	183476.4	383152.6
②	180552.7	183476.4	364029.1
③	181097.2	180552.7	361649.9
④	180435.2	180762.9	361198.1

4. おわりに

本法による旅客の利便性と鉄道会社の車両費を考慮した列車運行計画の策定の有効性を示した。

参考文献

- [1] 日本経済新聞
https://www.nikkei.com/article/DGKKZ071480800Y1A420C2DTB000 アクセス 2022年1月11日
- [2] 千種健二, 古閑隆章, 佐藤圭介 「数理計画法に基づく旅客の観点から見た異常時列車運行計画の最適化」, 電気学会研究会資料, Vol. 2010, No. 51, pp. 33-38, 2010
- [3] Gurobi Optimizer
https://www.gurobi.com/ アクセス 2022年1月11日
- [4] 厚生労働省 毎月勤労統計調査
https://www.mhlw.go.jp/toukei/itiran/roudou/monthly/r02/20cr/dl/pdf20cr.pdf
アクセス 2022年1月11日