−修士論文−

快速の積極活用で旅客の利便性を上げる列車スケジューリング最適化

Mathematical Programming for an Optimization of Passengers' Benefit in Railway Scheduling Focused on Rapid Service

平成 27 年 2 月 5 日提出

指導教員　古関 隆章 教授

工学系研究科

電気系工学専攻

学籍番号　37-136494

森 拓哉

内容梗概

日本では一日あたり 6470 万人もの人々が鉄道を利用しており，我々の生活になくてはならない交通インフラである。鉄道は，エネルギー効率，土地利用効率，安全性，定時性に優れており，日本のみならず世界でその性能が発揮されている。

鉄道では「速達性」と「定時性」が重要視される傾向にある。そのため，日中の駅を観察してみると，急行や快速のような速達種別の列車に旅客が集中している様子が見られる。鉄道会社は，新たな速達種別の設定，ハード補強による制限速度の緩和，新たなルートの設定によって旅客の需要に対応している。

鉄道は，設置された線路の上しか走行できないという性格上，あらかじめ定められた計画，鉄道ダイヤに沿って運行される必要がある。また事故によって，計画に沿った運行ができなくなった際，やはり計画ダイヤに沿った復旧作業，運転整理という業務が行われる。このダイヤを作成する作業や運転整理の業務は，人の経験や勘に頼って行われる部分も多く，最適なダイヤについての定量的な議論は未発達な分野である。

そこで，本研究では速達性を実現する手段として快速列車に着目し，運転整理や運行計画を混合整数計画法によって定式化することで，定量的に最適なダイヤ導くことを目的としている。

運転整理は，列車が事故などで遅れた時に見られる，旅客が滞留し混雑する状況を再現するための定式化を提案し，運転整理案の導出を行った。その結果，従来の旅客の遅延時分のみ考慮していた研究では得られなかった運転整理案を得ることができた。

運行計画では，各停のみ運行されている路線に，新たに快速を導入するための定式化を行い，実路線を用いて検証を行った。その結果，旅客総旅行時間が最も短縮される快速通過駅を最適解として導出し，計画ダイヤを設計した。また，快速を導入することにより，列車の消費エネルギーを削減できる可能性についても考察している。

目次

第 1 章　序論

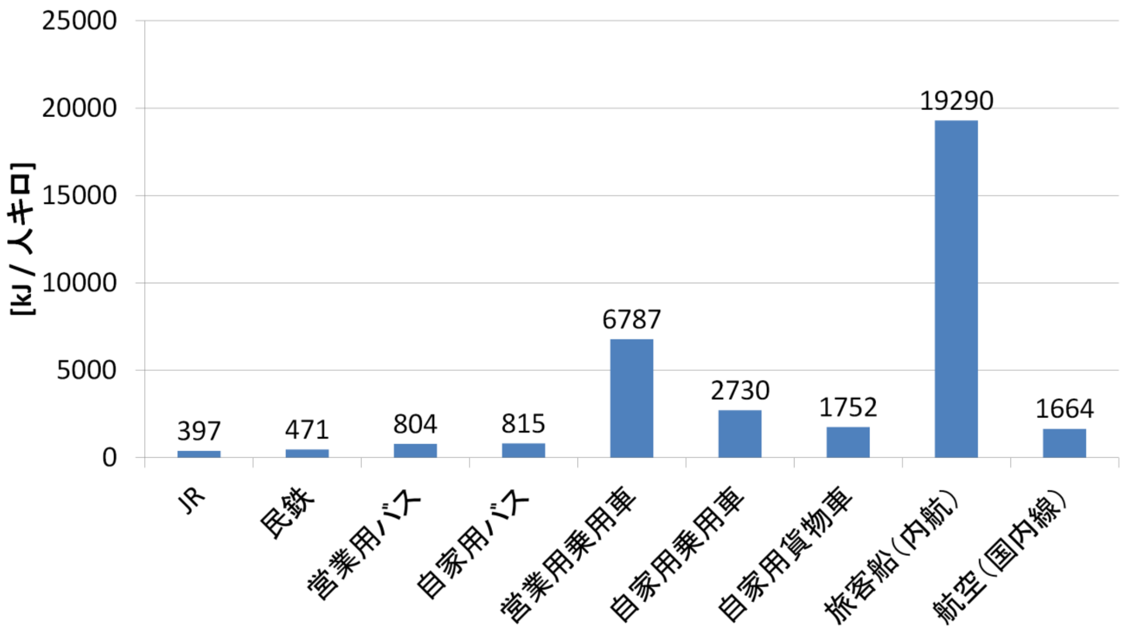
1.1 本研究の背景

鉄道は，日本のみならず世界各地で大いに利用されている。日本で見てみると，平成 25 年度の鉄道利用者は 1 年間で 236.1 億人，一日あたりにすると 6470 万人もの人が利用している[1]。

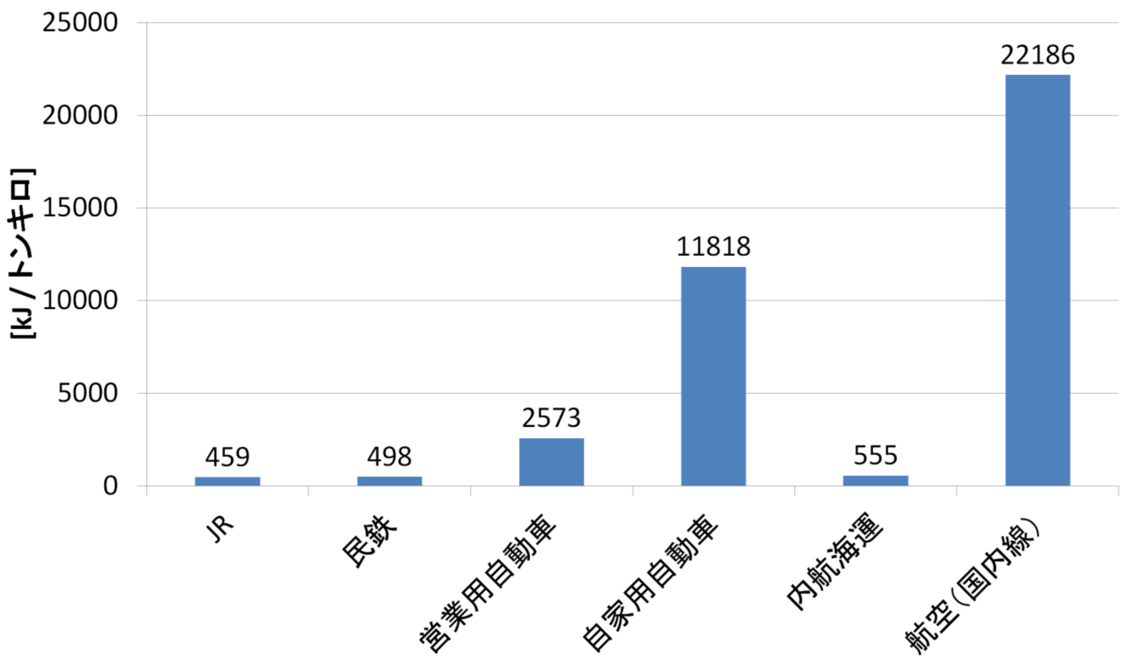
鉄道の特長として，エネルギー効率，土地利用効率，安全性，定時性が挙げられる。エネルギー効率で言えば，鉄道は鉄軌道であるため走行抵抗が少なく，また電気鉄道で言えば回生ブレーキを使って減速時に運動エネルギーを電気エネルギーとして回収できる強みがある。図 1.1 にエネルギー消費原単位（単位輸送量あたりに必要なエネルギー）図を示す[2]。図 1.1 より，鉄道は陸上交通機関の中ではエネルギー効率が最高であることが分かる。土地利用効率で言えば，たとえば東名間の場合，東海道新幹線は東名・名神高速に比べ単位幅当たり輸送量が 7 倍程度である。安全性，定時性で言えば，鉄道は専用の線路を持ち，運行を一元的に管理しているため高い。鉄道はこのように，他の交通機関に比べて優れている点が多く，発展が望まれている。

さて，我々がどこかに旅行や買い物に行くとして，交通機関を選ぶ決め手は何だろうか。一番便利なのは出発地から目的地まで乗り換えることなく，また荷物も運べる自動車であろう。旅客輸送の分野分担率を図 1.2 に示す[2]。図 1.2 によれば，乗用車は輸送人員で見ても，輸送人キロで見ても半分以上の割合を占めていることが分かる。安さを求めるなら高速バスを選ぶであろう。たとえば，東京～大阪を移動する場合，鉄道では特急に乗車しなくても 8750 円かかるが，JR バスでは最安値 3500 円で行くことができる。遠くに行くとすれば，速さを考えて飛行機を選ぶだろう。表 1.1 に，旅客輸送の乗車距離に対する輸送機関別シェアを示す。乗車距離が 750km を超えたところで，飛行機の占める割合が半分を超えていることが分かる。

では，鉄道に乗車する人は何を求めて乗るのか。柴田ら[3]は，旅客が鉄道に求めているものは「速達性」と「定時性」であると報告している。日比野ら[4]は，どの年代の旅客でも鉄道で一番重視するのは「乗車時間」であると示している。また，國松ら[5]は列車ダイヤ評価ツールを開発する上で，「最も早く到着する列車」を選択する旅客を最も重視する指標を取り入れている。つまり，旅客は鉄道に「乗車時間の短さ」や「速達性」を求めて乗っている割合が大きいことが分かる。図 1.3 に日中の駅の様子を示す。図 1.3(a)の急行では人が比較的多く乗車しているのに対し，図 1.3(b)の各停では席がほとんど埋まっていないような状態であり，旅客が乗車時間を重視して列車を選択していることが分かる。鉄道もそのような旅客の需要に応えるために，新しい速達列車の設定や，新ルートの設定，新幹線の開通などで応えてきたと言えよう[6] [7]。

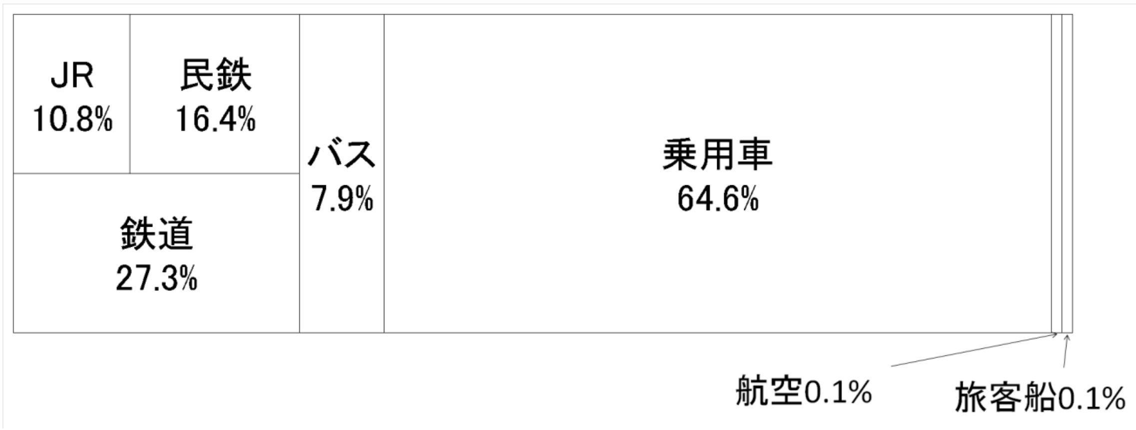


(a) 旅客

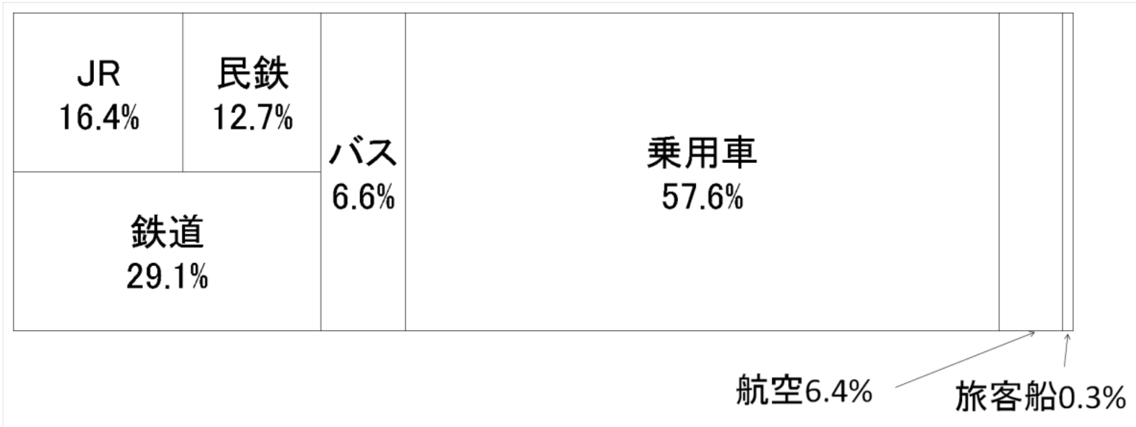


(b) 貨物

図 1.1 エネルギー消費原単位[2]



(a) 輸送人員



(b) 輸送人キロ

図 1.2 旅客輸送の機関別分担率（2002 年度）[2]

表 1.1 旅客輸送の乗車距離に対する輸送機関別シェア（2002 年度）[2]

乗車距離 [km]	鉄　道 [%]	自動車 [%]	航　空 [%]	旅客船 [%]
0～99	24.6	75.3	0.0	0.1
100～299	22.5	77.2	0.1	0.3
300～499	31.0	63.9	3.4	1.7
500～749	41.1	43.6	13.9	1.5
750～999	20.0	27.9	51.6	0.6
1000 以上	4.4	7.3	88.1	0.2

(a) 急行の車内風景

(b) 各停の車内風景

図 1.3 列車種別による乗車率の違い

このように速達性が求められている鉄道であるが，同時に定時性も要求されている。数多くの列車を安定的に走らせるためには，事前に計画を立てる必要がある。鉄道では，予め定められた鉄道ダイヤ（時刻表。以下ダイヤと略す）に沿って運転が行われる。図 1.4 に実際のダイヤを示す[8]。これは横軸を時間，縦軸を起点からの距離として，いつどこに列車が走行しているかを簡潔に分かりやすく記したものである。通常時の運行はもちろん，事故が発生し運行が乱れた際も，このダイヤを基に運転整理というダイヤ復旧作業が行われる。

鉄道の運行において，とても重要な役割を果たしているダイヤであるが，ダイヤを作成する作業や運転整理の業務は，人手に頼る部分が大きく，計算機による支援，また最適なダイヤ案作成支援に対する期待は大きい[9]。

ところで，「最適化」という言葉は「業務の最適化」，「資源の最適化」，「設計の最適化」など，日常的によく使われている。しかし，最適化という言葉は，使われる場面また分野でも意味が大きく違う言葉である。たとえば，構造設計や物理現象のパラメータの最適化，という場合，手計算による試行錯誤の上で一番良い値を取り出して最適化と呼ぶ。他方，物理現象を何かしらの式でもって表し，遺伝的アルゴリズムなどの方法で抽出された値を持って最適化ということもある。数学の問題を解くように，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こともある。図 1.5[10]に数理最適化技術の分類を示す。

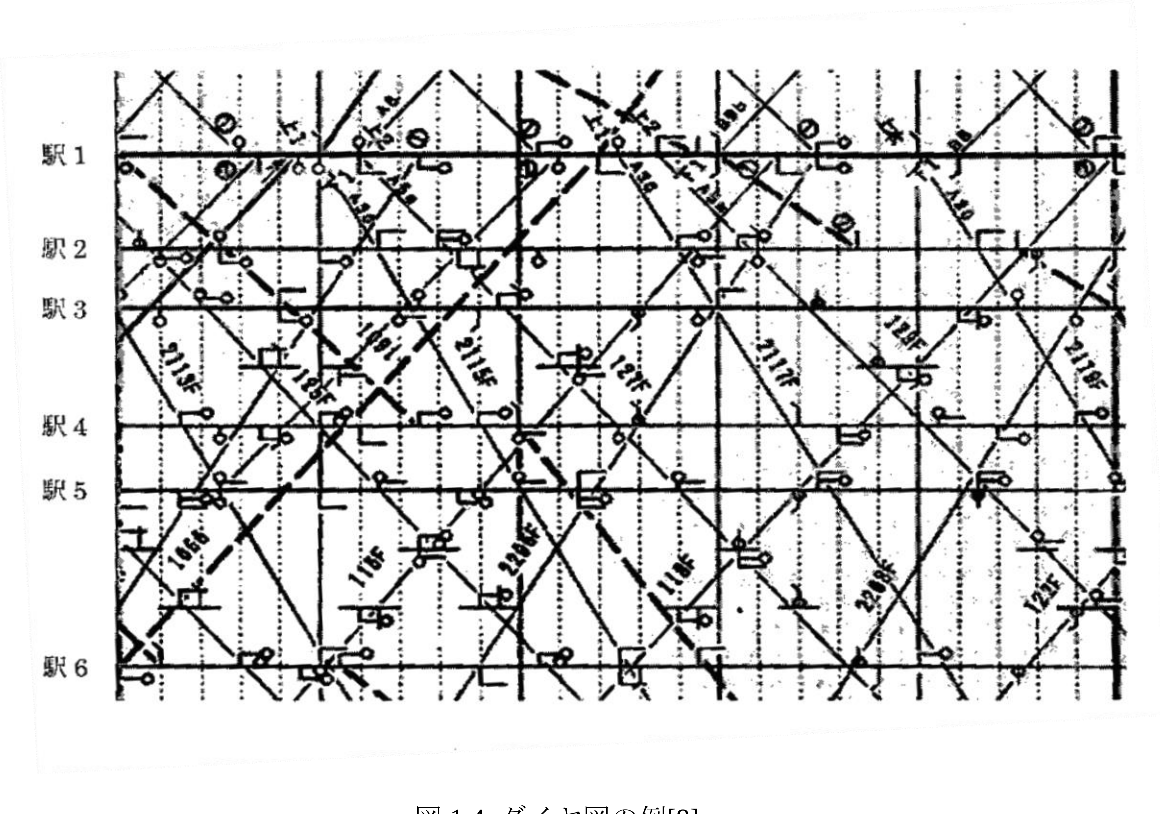


図 1.4 ダイヤ図の例[8]

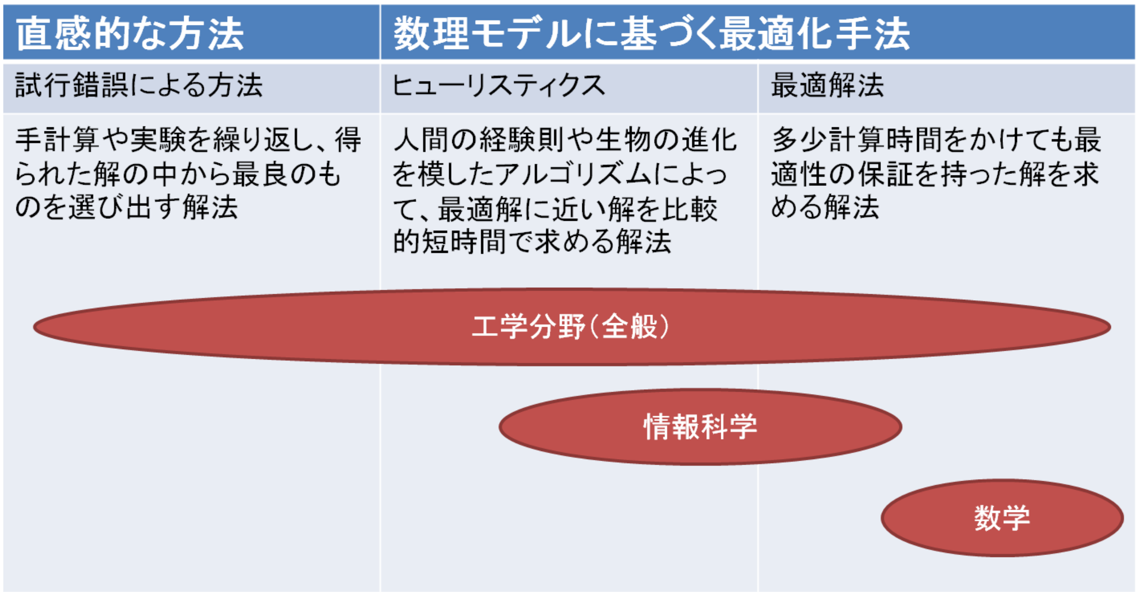


図 1.5　数理最適化技術の分類[10]

厳密な解を求める最適解法のうち，定式化した式の全てが線形であるものを線形計画問題，その変数に整数条件が含まれるものを整数計画問題という[11]。この整数計画問題について詳しくは次章に記すが，整数計画問題の応用範囲は広く，また同時に数理計画ソルバやハードウェアの進歩に伴い，サプライ・チェーン・マネジメント問題やエネルギー計画問題など様々な分野で活用されている[12][13][14][15]。

1.2 本研究の目的

背景で見てきたように，旅客の需要に応えるには速達性を高めることが重要である。その一つの方策として，一部の駅を通過しながら運行する快速列車に注目する。

本論文は大きく①運転整理と②運行計画の 2 パートからなる。両者とも列車スケジューリングという観点からみると同じであるが，運行計画が一から列車ダイヤを考える作業に対して，運転整理は元からあるダイヤに戻す作業，という違いがある。それぞれの詳細な目的に関しては，今後の章で記していくが，旅客の速達性重視の傾向に答える快速列車を取り入れつつ，混合整数計画法としてスケジューリングを定式化して最適性の保証のあるダイヤを導き，旅客サービスを向上することを共通の目的とする。

1.3 本論文の構成

第 2 章で，定式化の軸となっている混合整数計画法について紹介する。その後，運転整理パートとして第 3 章と第 4 章，運行計画パートとして第 5 章，第 6 章でそれぞれ記す。第 3 章では，運転整理における本研究の背景と目的を記し，先行研究において提案された運転整理を混合整数計画法で定式化する手法について紹介する。第 4 章では，先行研究に

おける問題点を指摘し，旅客の混雑に着目した定式化と，その運転整理における結果を示す。第 5 章では運行計画における本研究の背景と目的を記す。第 6 章では快速が走っていない路線で快速を導入するための定式化とその結果を記す。最後に第 7 章で，本論文の結論と考察，今後の課題を示す。

第 2 章　混合整数計画法

本章では，本研究の中心となっている混合整数計画法について説明していく。

2.1 線形計画法

混合整数計画法を説明する前に，その問題および解法の前提となっている線形計画法について説明する。

問題の条件に関する制約式およびその問題で最小または最大にしたい関数がすべて一次式で表される最適化問題のことを線形計画問題といい，この線形計画問題の解き方および解く立場から問題の性質を考えるのを線形計画法(Linear Programming)という[16]。

線形計画問題は$x_1, x_2, \cdots, x_n$を変数とするとき，条件式が以下の式(2.1)～(2.3)

(a) 一次不等式

$$a_1x_1 + a_2x_2 + \cdots + a_nx_n \leq d$$

または (2.1)

$$a_1x_1 + a_2x_2 + \cdots + a_nx_n \leq d$$

(b) 一次等式

$$a_1x_1 + a_2x_2 + \cdots + a_nx_n = d \tag{2.2}$$

(c) 変数の符号の制約

$$x_j \geq 0 \quad \text{または} \quad x_j \leq 0 \tag{2.3}$$

の組み合わせによって構成されていて，その条件の下で，式(2.4)に示す一次式の関数

$$f(x) = c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_nx_n + c_0 \tag{2.4}$$

を最小または最大にする問題である。 $f(x)$のことを目的関数という。以下に，線形計画法の例を文献[16]に記された例題を基に説明する。

<u>例</u>

A 社では，2 種類の製品P_1, P_2を生産している。製品P_1を 1 トン生産するには，原料が 2.5 トン，電力が 5kWh，労力が 3 人時必要でありる。製品P_2を 1 トン生産するには，原料 5 トン，電力が 6kWh，労力が 2 人時必要である。1 日の原料，電力，労力の使用可能量は，それぞれ 350 トン，450kWh，240 人時である。また，製品P_1, P_2の 1 トンあたりの利益はそれぞれ 4 万円，5 万円である。表 2.1 にこれらの条件をまとめる。

この条件下で利益を最大にするには，P_1, P_2をいくらずつ生産すればよいか。

x_1をP_1の生産量，x_2をP_2の生産量とすると，この問題は以下の条件式(2.5)～(2.8)と目的関数(2.9)によって定式化できる。式(2.5)～(2.9)を見て分かる通り，すべての式が一次式として表されている。このように表せる問題を線形計画問題といい，このような問題を扱うことを線形計画法という。

この例題の可能解（条件を全て満たす(x_j)の組）をx_1x_2平面上に図示すると図 2.1 のように表すことができる。図の塗りつぶしている範囲が可能解の範囲である。

表 2.1 製品P_1, P_2の生産条件と利益

	1 トン生産するときの必要量		1 日の使用可能量
	P_1	P_2	
原　料　（トン）	2.5	5	350
電　力　（kWh）	5	6	450
労　力　（人時）	3	2	240

	P_1	P_2
1 トンあたりの利益（万円）	4	5

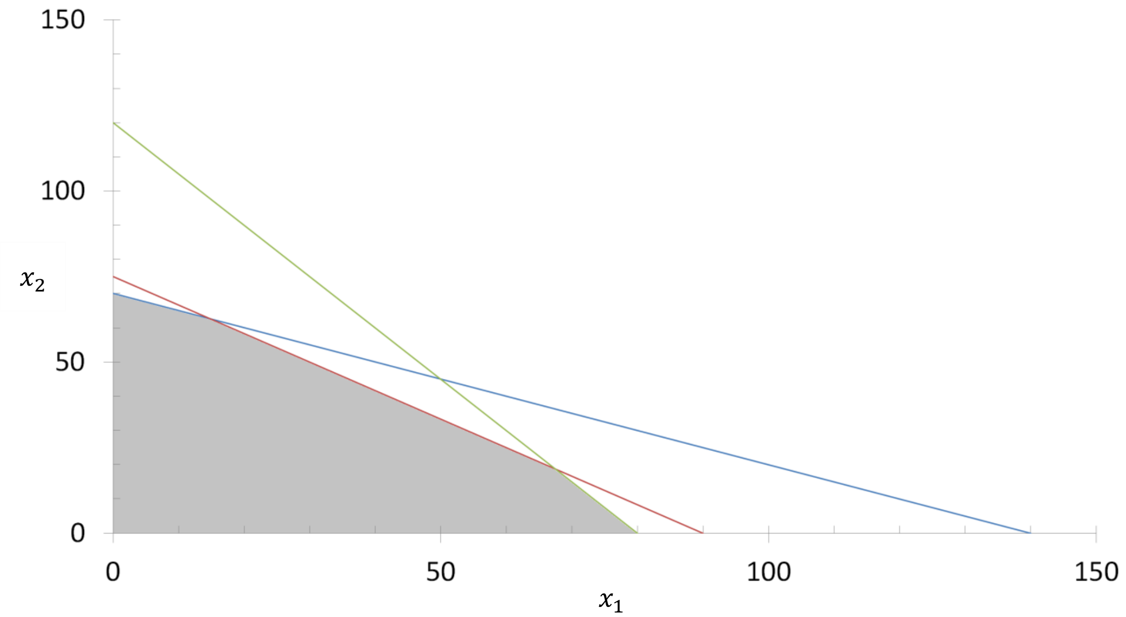


図 2.1 例題の可能解の領域

条件

$$2.5x_1 + 5x_2 \leq 350 \tag{2.5}$$

$$5x_1 + 6x_2 \leq 450 \tag{2.6}$$

$$3x_1 + 2x_2 \leq 240 \tag{2.7}$$

$$x_1, x_2 \geq 0 \tag{2.8}$$

目的関数

$$\mathrm{y} = 4x_1 + 5x_2 \tag{2.9}$$

この線形計画問題を解くアルゴリズムとして著名なものに単体法（シンプレックス法）がある。単体法とは，最適解が多面体のいずれかの頂点になるという幾何学的イメージをもとに，多数の変数と条件式からなる線形計画問題に対して，次々と隣接する頂点を登っていく方法である。図 2.2 でイメージを示す。灰色の部分の頂点を順にたどっていき，最適なものを導き出すという方法である。

他にも内点法やカーマーカー法などの著名なアルゴリズムがあるが，本研究では線形計画問題を解くアルゴリズムを考案することは対象にしていないため，説明は省略する。

線形計画法の応用は，生産計画問題や輸送・配送問題，スケジューリング問題，クラス編成問題にはじまり，資産運用問題，超 LSI 設計問題，エネルギー計画問題，サプライ・チェーン・マネジメント問題等々，きわめて広い範囲に及んでいる[11]。

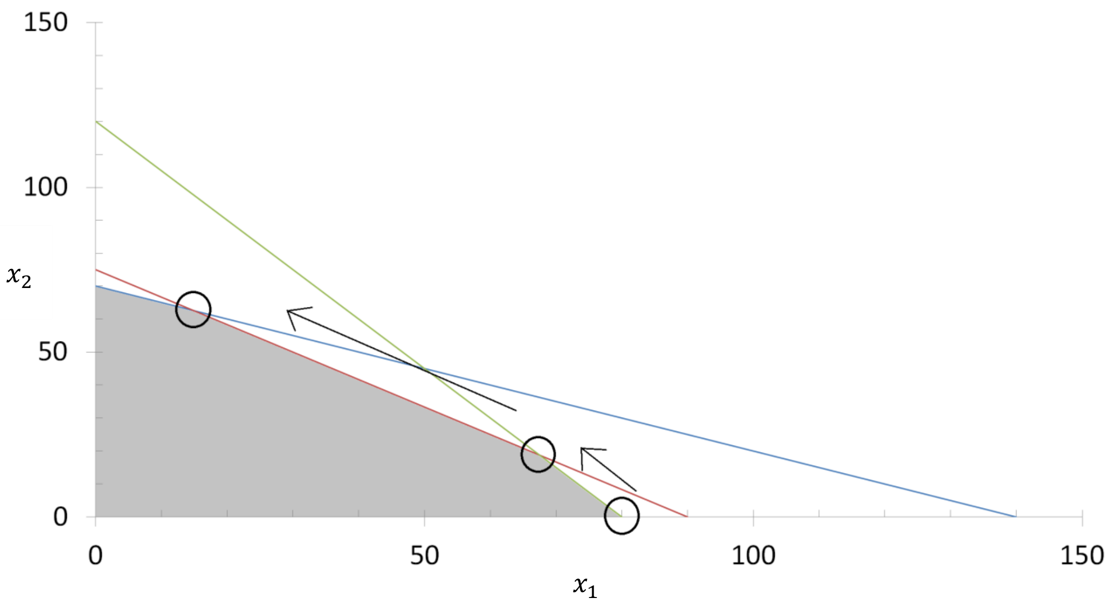


図 2.2 単体法の解法イメージ

2.2 混合整数計画法

前節では線形計画法について説明した。一方，混合整数計画法とは，線形計画問題の変数の一部に整数条件が付加された混合整数計画問題を解くことを指す。つまり，式(2.1)～(2.3)の条件に，以下の式(2.10)が加わった問題のことである。

$$x_j \in Z \qquad \mathrm{j} = 1, 2, \cdots, n_1 (\leq n) \tag{2.10}$$

この整数条件を付加することで，線形計画法では考えられなかった以下のような問題を考えることができるようになる[17]。

①分解不可能な最小単位をもつ問題

化学製品や農産物などのように，生産量を連続量として扱うことができる商品ではなく，自動車や住宅のように分割不可能な最小単位をもつ商品の生産計画問題などを考えることができる。

②論理条件式のある問題

(ⅰ) 変数$x \in R$は$M_1, M_2, \cdots, M_m \in R$のいずれか一つの値をとる

(ⅱ) 変数$x \in X \subset R^n$は以下の制約式(2.11)

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \leq b_i, \qquad i = 1, \cdots, m \tag{2.11}$$

のうちの少なくとも一つを満たす

このような論理条件を 0 と 1 のみをとる変数y_iを導入することにより定式化できる。それぞれについて標準的な手法を(ⅰ)については式(2.12)，(2.13)に，(ⅱ)については式(2.12)，(2.14)に示す。

$$y_1 + y_2 + \cdots y_m = 1 \qquad 0 \leq y_i \leq 1, \quad y_i \in Z \quad i = 1, \cdots, m \tag{2.12}$$

$$x = M_1 y_1 + M_2 y_2 + \cdots M_m y_m \tag{2.13}$$

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \leq b_i + M(1 - y_i), \quad i = 1, \cdots, m \tag{2.14}$$

式(2.12)は 0 と 1 の値のみをとる整数変数y_iを導入し，そのうちちょうど一つの成分が 1 で残りは 0 をとることを表している。この変数y_iを利用し，式(2.13)を立てることによって，xは$M_1, M_2, \cdots, M_m$のうちいずれかをとることを表すことができる。

式(2.14)は十分に大きい数字である M を導入し，$y_i = 1$のときのみ不等式が意味をもつようにすることにより，(ⅱ)の条件を表している。式(2.12)の右辺を 1 以外の数字にすることにより 2 つ以上の値を選択することもでき，また式(2.14)の右辺を$M(2 - y_i - y_j)$，$i, j = 1, \cdots, m \ i \neq j$ などとすることにより，複数の制約式を選び出すことができ，多様な論理条件を表すことができる。

混合整数計画問題の解法としては，分枝限定法が有名である。整数条件を緩和した連続緩和問題を考え，そこから導き出された実行可能解も元に問題を分割し，最適解を与える見込みのない問題を切り捨てていくことで徐々に最適解に近づくという方法である。他にも切除平面法など様々な方法がある[11]。

近年では，数理計画を解く最適化アルゴリズムの進歩，またハードウェアの進歩により，数年前まで解けなかった大きさの問題が解けるようになるなど，計算機で解ける問題の範囲が広がっている[18]。本研究では定式化について提案し，解を導く部分では商用ソルバである CPLEX12.2[19]を使用する。またこれ以後の計算について, CPU は AMD Phenom(tm) Ⅱ X6 1090T 3.20GHz，メモリは 16.0GB，OS は Windows 7 Professional の環境で行っている。

第 3 章　混合整数計画法による運転整理

3.1 運転整理研究の背景

自動車は道路の渋滞により，航空機は天候に弱いことにより，定時性運行の確保が難しい。一方鉄道は専用の軌道を保有しているという点で定時性運行の信頼性が高いという特長がある[20]。しかし，事故や天候，設備の故障など様々な原因で予め定められたダイヤ通りに運行できないことがある。図 3.1 は我が国における輸送障害の件数を表したものである[21]。近年では，ホームドアの設置など障害を防ぐための対策が講じられているにも関わらず，輸送障害の件数は増加傾向にあり，昭和 63 年度には 1883 件であった輸送障害が，平成 24 年度では 5883 件と約 3 倍となっている[21]。また，鉄道では設備面や安全運行上の厳しい制約のもとで綿密に定められた秒単位の運行計画（列車ダイヤ）に従って運行しているため，輸送障害が発生した際に列車同士の競合が発生しやすく，遅れが拡大しやすいという側面も持っている[22]。

そのように列車ダイヤに乱れが生じたときに，遅延の伝搬などを最小限にとどめ，速やかに元のダイヤに戻すための作業を「運転整理」と呼ぶ。ダイヤの乱れがない通常時では，駅のポイントの操作や信号機の操作，駅の放送などではほぼ自動化されている。一方，ひとたびダイヤが乱れると，運転整理を支援する技術は発達してきているものの，依然人手に頼る部分が多いのが現状である[9]。

この運転整理の業務をなるべく人手をかけずに，迅速に行えるようにする期待は大きい。また，従来の運転整理の指針は，平常運行への早期回復や列車遅延の最小化などに重点を置かれることが多かった。しかし近年，列車だけではなく，旅客が被る不満である「旅客の不効用」に注目しようとする動きが高まってきている[9]。

国内では近年旅客の視点を考慮した研究が盛んである。田中ら[23]，熊澤ら[24]，長崎ら[25]は，旅客の行動原理をアルゴリズム化し，運転整理案の評価をする研究を行っている。富井ら[26]や國松ら[27]は，旅客損失を評価し運転整理ダイヤを作成する手法の検討を行っている。しかし，これらの研究は人間の経験則などを元にアルゴリズム化した，局所的判断を繰り返すメタヒューリスティクス手法を用いており，最適性の保証のある解を得ることができない。一方，ヨーロッパでは，メタヒューリスティクスや混合整数計画法など様々な手法を用いた手法が提案されている[28][29][30]。しかし，これらの研究は列車遅延に着目した研究であり，旅客損失を評価したものでも，旅客流動に関する厳密な検討は行われていないのが現状である[31]。

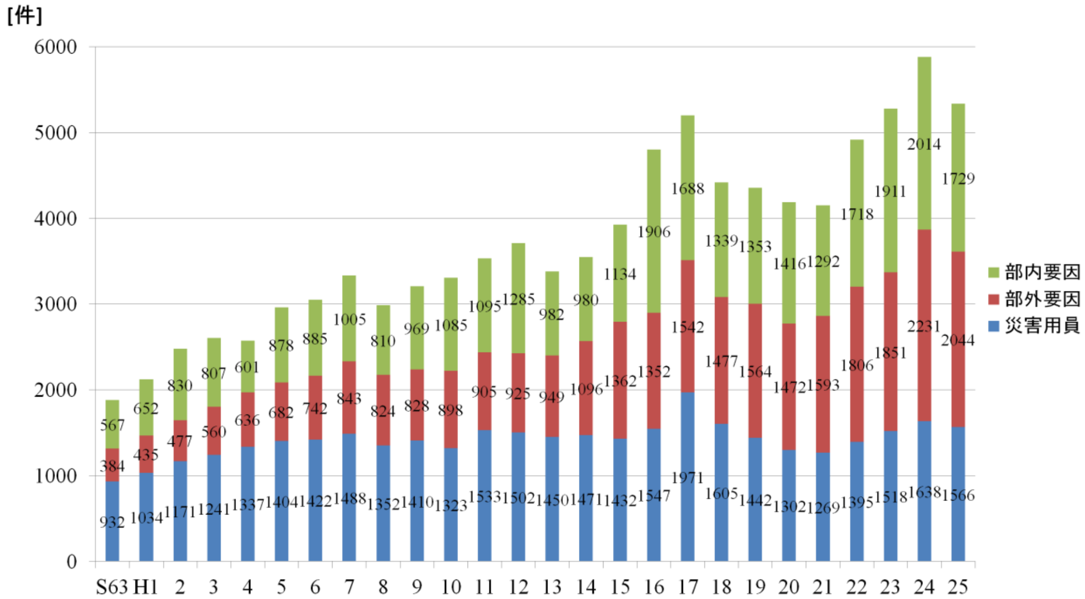


図 3.1 輸送障害数の推移[21]

3.2 運転整理研究の目的

そのような背景の中，当研究室で千種が混合整数計画問題として列車運行と旅客流動を定式化し，旅客損失が最小となる運転整理案を自動作成する手法の提案を行った[32][33]。この手法では，従来得ることができなかった，旅客流動を考慮しつつ最適性の保証のある運転整理案を得ることができるようになった。

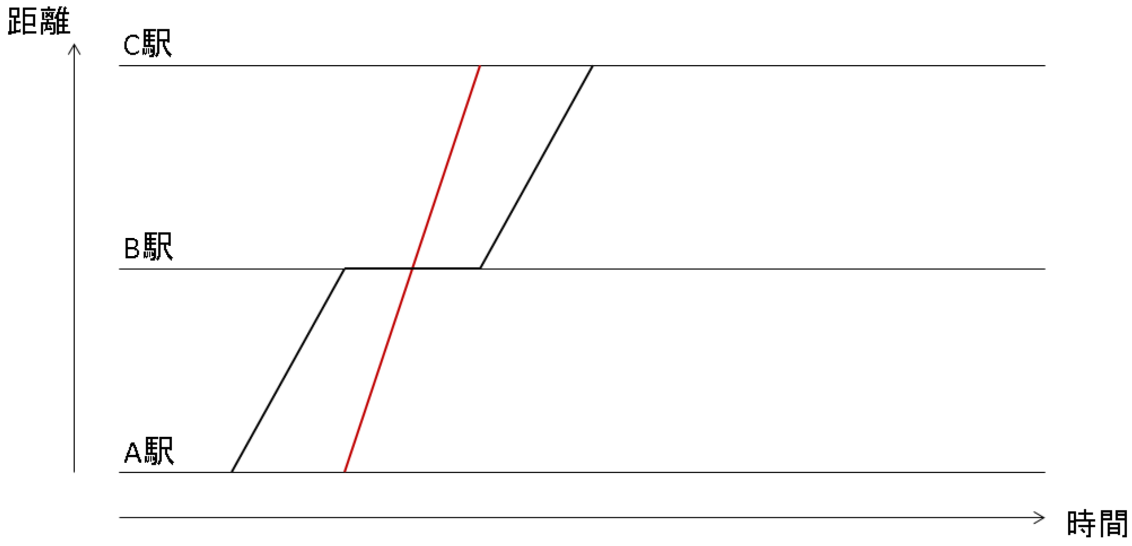
以下の節で運転整理の概要，および先行研究で示された定式化について紹介し，仮想路線を用いた運転整理の例を示す。

3.3 運転整理の概要

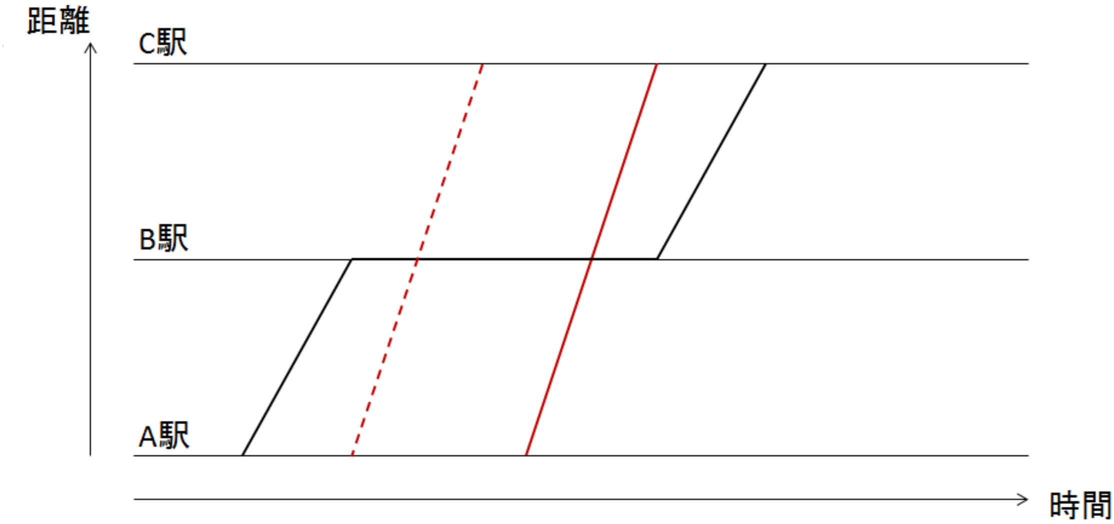
前節で述べた通り，鉄道ではあらかじめ作成された列車ダイヤに従って列車運行が行われる。しかし，時に天災，事故，機器の故障などで列車ダイヤ通りに運行できないことがある。このような場合，一時的に列車ダイヤに変更を加えて，乱れたダイヤを元に戻す運転整理の業務が行われる。運転整理には表 3.1[34]に示すように様々な手法が存在する。その中で順序変更の例を図 3.2 に示す。図 3.2 のような図をダイヤ図と呼び，電車がいつどこを運転する予定かを横軸に時間，縦軸に起点駅からの距離をとり視覚的に分かりやすく描いたものである。さて，図 3.2(a)を通常ダイヤとして A 駅と B 駅の間で何らかの障害が発生し，快速列車に遅延が生じた場合を考える。そのまま放置すると図 3.2(b)のように各停列車にも遅延が波及してしまう。そこで図 3.2(c)のように B 駅での発順序を変更することで，各停列車の遅延を防ぐことができる。いま示したものは運転整理のほんの一例であるが，実際には状況に応じて表 3.1 で示したような様々な手法を適切に組み合わせることで，遅延の伝搬を防ぐことが行われている。

表 3.1 運転整理手法例[34]

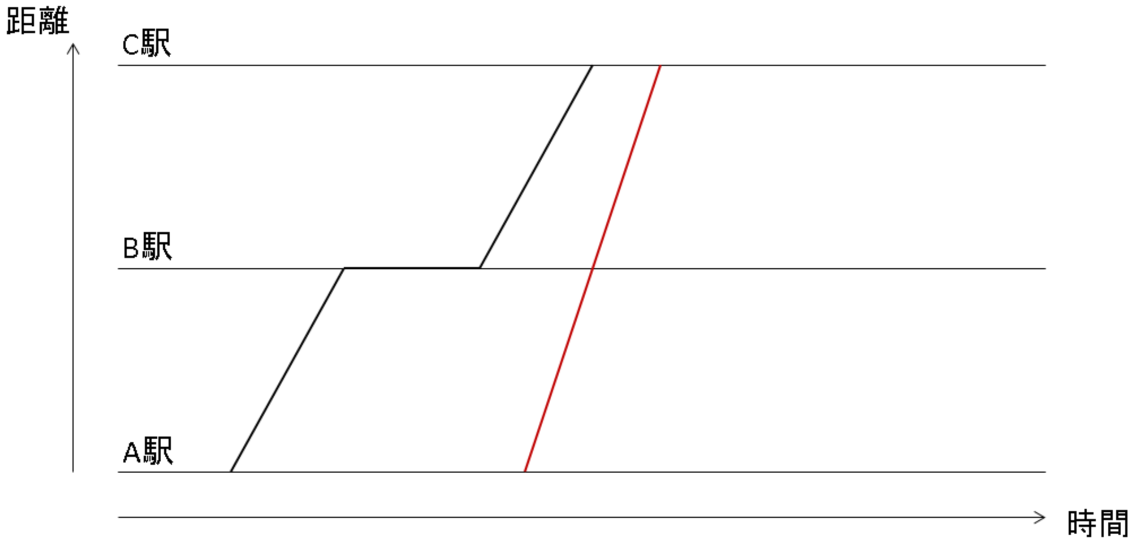
名　　称	内　　容
運　休	列車の運転を取りやめる
部分運休	列車の一部区間の運転を取りやめる
臨時列車	臨時列車を運転する
延長運転	列車の運転区間を延長する
車両運用変更	車両の使用計画を変更する
番線変更	駅での列車の番線を変更する
発順序変更	列車の出発順序を変更する
着順序変更	列車の到着順序を変更する
停車種別変更	通過を停車に変更する
発時刻変更	列車の発時刻を変更する
列車種別変更	列車の種別を変更する
運転線路変更	列車を運転する線路を変更する



(a) 通常ダイヤ



(b) 運転整理を行わない場合



(c) 運転整理を行った場合

図 3.2 運転整理（順序変更）の例

3.4 提案システムの概要

運転整理の一般的な流れを図 3.3 に示す[9]。先行研究[32][33]では運転整理案作成部分を担うシステムについて提案された。システムの構成を図 3.4 に示す。まず事前情報として，以下の 4 点が与えられているとする。

Ⅰ. 施設情報

駅ごとの構造。駅が追い越し可能構造か，などの情報

Ⅱ. ダイヤ情報

事故が発生しなかったときの元ダイヤの情報。駅間を最短で何分で運転できるかを示す基準運転時分や最小停車時間などの情報

Ⅲ．障害情報

いつどこで障害が発生し，当該列車がどれだけ遅れるかという情報

Ⅳ．平常時の駅間移動者数情報（Origin-Destination データ。以下 OD データと記す）

平常時に駅間ごとに単位時間あたりどれだけの旅客が移動するかという情報

提案システムでは，まずこれらⅠ～Ⅲの情報を使い，運転整理を一切行わない場合の列車運行をシミュレーションし，その結果から遅延収束目標時刻を決定する。ここで，運転整理を行わない場合とは，列車順序の変更などを行わず，計画時の列車の走行時分に与えられている余裕を用いた，回復運転を行う場合を指す。遅延収束目標時刻に関しては，各鉄道事業者によっても異なるが，本研究では運転整理を行わない場合に遅延が収束する時刻とする。

次に，決定された遅延収束目標時刻とⅣの旅客情報を基に，旅客流動を考慮した最適な運転整理案（ダイヤ）の作成を行う。最適化の指標として，旅客が列車のダイヤが乱れたことに対して被った不満を表す不効用を数値化したものを考える。詳しい式は 3.6 節に記すが，具体的には旅客の総遅延時分を最小にするダイヤを最適なダイヤとしている。

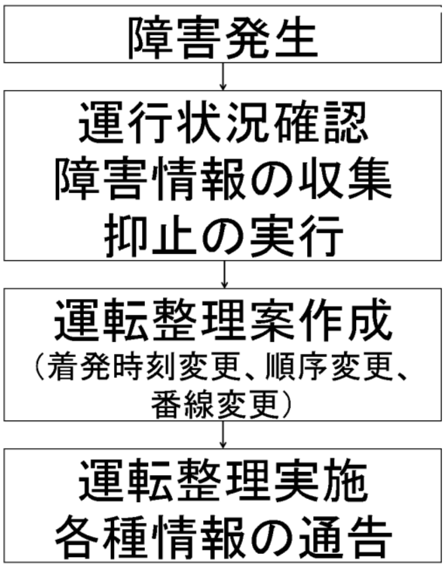


図 3.3 小～中規模の運行乱れに対する運転整理の流れ

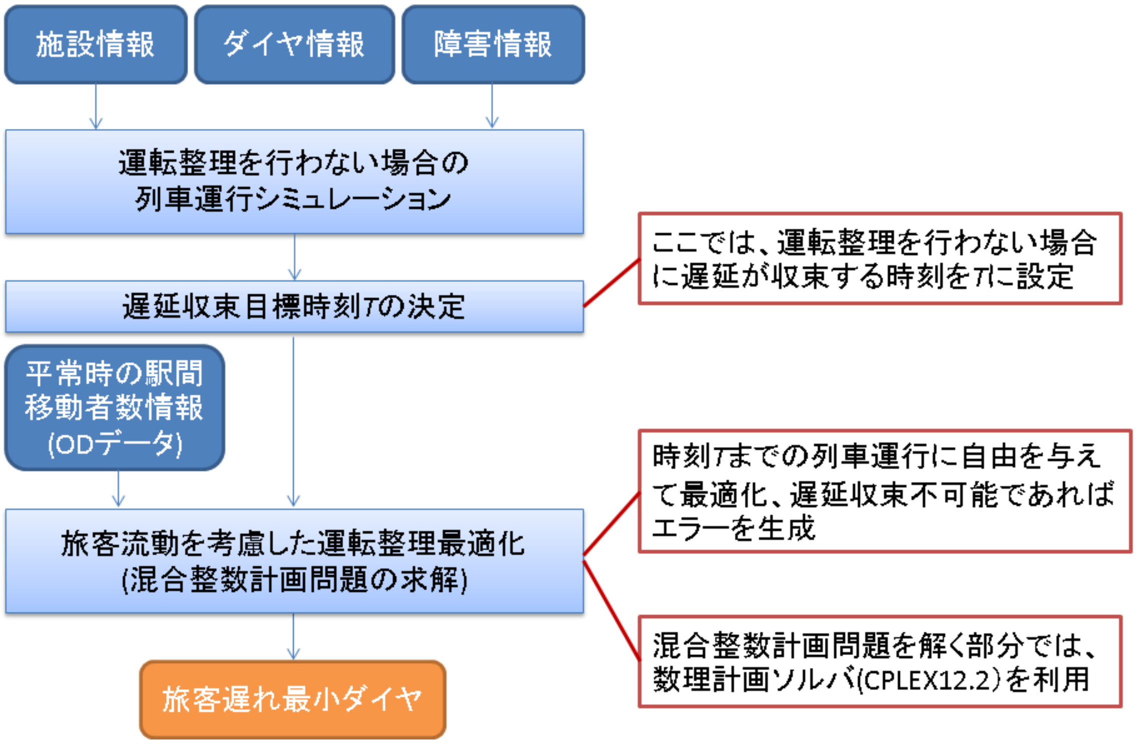


図 3.4 システムの構成

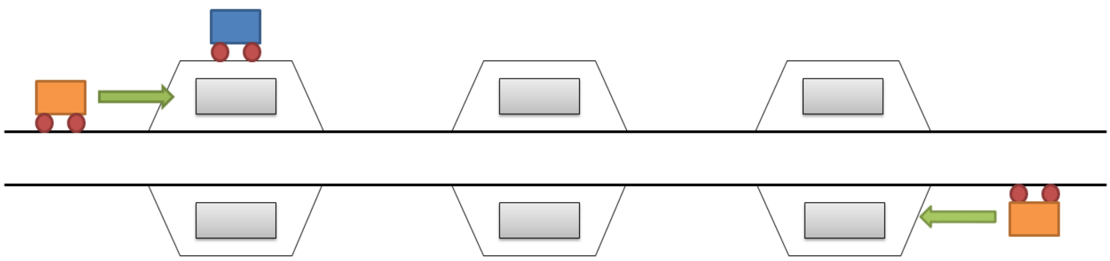


図 3.5 路線モデル

3.5 運転整理のための定式化

先行研究で提案された運転整理の定式化について以下に記していく。

3.5.1 路線モデル

本研究における路線モデルを図 3.5 に示す。本研究では複線区間に全駅に停車する各停と，一部の駅に停車する快速の 2 種類の種別が混在する列車ダイヤについて考える。待避施設（列車が前を走る列車を追い越す施設）は全駅に存在すると仮定する。このような路線で，何らかの障害によって初期遅延が発生した際に，それ以降の最適な列車ダイヤを決定する。

3.5.2 定式化で使用する記号

以下に，本定式化で使用する記号を記す。

<u>集合</u>

$\boldsymbol{S}$　駅の集合

$\boldsymbol{S}_{loc}$　快速通過駅の集合

$\boldsymbol{S}_{rap}$　快速停車駅の集合

$\boldsymbol{R}$　列車の集合

$\boldsymbol{R}_{loc}$　各停列車の集合

$\boldsymbol{R}_{rap}$　快速列車の集合

$\boldsymbol{Q}^{s}$　s 駅における番線の集合

$\boldsymbol{T}$　旅客出現時刻の集合

<u>定数</u>

LR_j^s　列車 j の s～s+1 駅間における基準運転時分

LD　最小発発時隔

LA　最小着着時隔

LT　最小発着時隔

LS_j^s　列車 j の s 駅における最小停車時分

D_j^s　列車 j の s 駅における計画発時刻

A_j^s　列車 j の s 駅における計画着時刻

$SD\_arr_j^s$　列車 j の s 駅における初期到着遅延

$SD\_dep_j^s$　列車 j の s 駅における初期出発遅延

LI^{trans}　乗継所要時分

$MT_k^{o,d}$　時刻 k に o 駅に出現し d 駅に移動する旅客の平常時の旅行時間

M　十分に大きい数

<u>ブーリアン変数（＝１のとき）</u>

$x_{j,j'}^s$　s 駅で列車jが列車j'よりも先に発車する

$r_{j,q}^s$　s 駅で列車jが番線 q を利用する

$z_{t,j}^{o,d}$　時刻 t に o 駅に現れた旅客群が列車 j を利用して駅 d に移動する

$z_{t,j,j'}^{o,s,d}$　時刻 t に o 駅に現れた旅客群が列車 j に乗車し，s 駅で列車j'に乗り換えて駅 d に移動する

<u>実数変数</u>

a_j^s　列車 j の s 駅における着時刻

d_j^s　列車 j の s 駅における発時刻

$\tau_{t,j}^{o,d}$　$z_{t,j}^{o,d} = 1$の時の駅 o～d 間旅行時間

$\tau_{t,j,j'}^{o,s,d}$　$z_{t,j,j'}^{o,s,d} = 1$の時の駅 o～d 間旅行時間

$e_k^{o,d}$　駅 o に時刻 k に現れた旅客群の駅 d への旅行時間増大量

表 3.2 列車運行上の物理的制約

項 番	制 約
①	基準運転時分
②	時隔
③	線路（複線の場合、駅間での追い越しは不可）
④	進路
⑤	番線および番線の有効長
⑥	プラットホーム
⑦	停車時間（乗降時間などに要する時間）

3.5.3 列車運行上の制約

列車計画を作成する際には，列車運行に関する各種の制約を守りながら作成する必要がある。制約には設備条件に起因する【物理的制約】と，列車運行業務上の理由に起因する【論理的制約】の 2 種類がある。まずは，物理的制約のうち主なものを表 3.2 に示し，それぞれの制約について説明する[20]。

【物理的制約】

①基準運転時分：制限速度の条件を守りながら列車がその性能をフルに発揮して駅間を走行した場合の所要時分のこと

②時隔：列車と列車の間に最低限確保しなければならない時間のこと

③線路：単線の場合，駅間で行き違いができない。単線・複線の場合，駅間で他の列車を追い越すことができない制約のこと。

④進路：駅の番線に対する進入，進出のルートが存在しなければならないこと

⑤番線：番線の長さに関する制約。通常，番線の長さより長い列車はその番線を利用できない

⑥プラットホーム：プラットホームがない番線では旅客の乗降はできない

⑦停車時間：最低限必要な停車時間を確保しなければならないこと。営業列車の場合，開扉・閉扉の時間，乗客の乗降に要する時間以上を停車時間としなければならない

前節の記号を使って，物理的制約の定式化を式(3.1)～(3.8)に示す

① 基準運転時分

・全ての列車は基準運転時分以上の時間で駅間を走行する

$$a_j^{s+1} - d_j^s \geq LR_j^s \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j \in \boldsymbol{R} \qquad (3.1)$$

②時隔

・駅での発発時隔は最小出発時隔以上

$$d_{j'}^s - d_j^s \geq LD \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j, j' \in \boldsymbol{R} \qquad (3.2)$$

・駅での着着時隔は最小到着時隔以上

$$a_{j'}^s - a_j^s \geq LA \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j, j' \in \boldsymbol{R} \qquad (3.3)$$

・同じ番線を利用する際，その発着時隔は最小発着時隔以上

$$a_{j'}^{s} - d_{j}^{s} \geq LT - M(3 - x_{j,j'}^{s} - r_{j,q}^{s} - r_{j',q}^{s}) \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j, j' \in \boldsymbol{R}, q \in \boldsymbol{Q}^{s} \tag{3.4}$$

③線路

・順序関係の制約

$$x_{j,j'}^{s} = 1 \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j, j' \in \boldsymbol{R} \tag{3.5}$$

$$x_{j,j'}^{s} + x_{j',j}^{s} = 1 \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j, j' \in \boldsymbol{R} \tag{3.6}$$

④進路

・行けない進路はないと仮定する

⑤番線

・どの番線でも列車がはみ出ることはないと仮定する

・各列車の使用する番線は一線に定められる

$$\sum_{q \in \boldsymbol{Q}^{s}} r_{j,q}^{s} = 1 \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j, j' \in \boldsymbol{R} \tag{3.7}$$

⑥プラットホーム

・どの番線でもプラットホームが存在すると仮定する

⑦停車時間

$$d_{j}^{s} - a_{j}^{s} \geq LS_{j}^{s} \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j, j' \in \boldsymbol{R} \tag{3.8}$$

【論理的制約】

続いて論理的制約について，本研究で考慮するものを以下の式(3.9)～(3.20)に示す。

⑧同種別の列車間，及び各停列車による快速列車の追い抜きの禁止

$$x_{j1,j2}^{s} = 1 \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j1, j2 \in \boldsymbol{R}_{rap}: j2 \leq j1 \tag{3.9}$$

$$x_{j1,j2}^{s} = 1 \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j1 \in \boldsymbol{R}_{loc}, j2 \in \boldsymbol{R}: j2 \leq j1 \tag{3.10}$$

$$x_{j1,j2}^{s+1} \geq x_{j1,j2}^{s} \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j1 \in \boldsymbol{R}_{loc}, j2 \in \boldsymbol{R}: j2 \leq j1 \tag{3.11}$$

⑨早発の禁止

$$d_{j}^{s} \geq D_{j}^{s} \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j \in \boldsymbol{R}_{loc} \tag{3.12}$$

$$d_{j}^{s} \geq D_{j}^{s} \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}_{rap}, \forall j \in \boldsymbol{R}_{rap} \tag{3.13}$$

⑩快速列車は快速通過駅では停車しない

$$d_{j}^{s} = a_{j}^{s} \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}_{loc}, \forall j, j' \in \boldsymbol{R}_{rap} \tag{3.14}$$

⑪遅延発生前は通常ダイヤ通りに運行する

$$\mathrm{if}(A_{j}^{s} \leq AccidentTime)\ a_{j}^{s} = A_{j}^{s} \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j \in \boldsymbol{R} \tag{3.15}$$

$$\mathrm{if}(D_{j}^{s} \leq AccidentTime)\ d_{j}^{s} = D_{j}^{s} \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j \in \boldsymbol{R} \tag{3.16}$$

⑫遅延収束後は通常ダイヤ通りに運行する

$$\mathrm{if}(A_{j}^{s} \geq RestoredTime)\ a_{j}^{s} = A_{j}^{s} \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j \in \boldsymbol{R} \tag{3.17}$$

$$\mathrm{if}(D_{j}^{s} \geq RestoredTime)\ d_{j}^{s} = D_{j}^{s} \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j \in \boldsymbol{R} \tag{3.18}$$

⑬遅延要因

$$a_j^s - A_j^s \geq SD\_arr_j^s \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j \in \boldsymbol{R} \tag{3.19}$$

$$d_j^s - D_j^s \geq SD\_dep_j^s \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j \in \boldsymbol{R} \tag{3.20}$$

3.5.4 旅客の行動仮定

旅客の経路選択に関する近似および仮定は以下のものを用いる。

(A) 旅客は列車運行に乱れが生じても，平常時と同時刻に出発駅に出現し，目的駅に向かう

(B) 旅客はある一定の時間ごとにまとまって駅に出現する

(C) 旅客は常に目的駅への最速達列車を選択する

以上の近似，仮定を基に旅客群の経路選択を定式化するにあたり，満たさなければならない条件を以下式(3.21)～(3.38)に示す。

ｉ. 各旅客群は一つの経路しか選択できない

$$\sum_{j \in \boldsymbol{R}_{loc}} z_{t,j}^{o,d} = 1 \qquad \forall o, d \in \boldsymbol{S_{loc}}: o < d, \forall t \in \boldsymbol{T} \tag{3.21}$$

$$\sum_{j \in \boldsymbol{R}} z_{t,j}^{o,d} = 1 \qquad \forall o, d \in \boldsymbol{S_{rap}}: o < d, \forall t \in \boldsymbol{T} \tag{3.22}$$

$$\sum_{j \in \boldsymbol{R}_{loc}} z_{t,j}^{o,d} + \sum_{j \in R_{loc}} \sum_{j' \in R_{rap}} \sum_{\substack{s \in S_{rap} \\ : o < s < d}} z_{t,j,j'}^{o,s,d} = 1 \qquad \forall o \in \boldsymbol{S}_{loc}, \forall d \in \boldsymbol{S}_{rap}: o < d, \forall t \in \boldsymbol{T} \tag{3.23}$$

$$\sum_{j \in \boldsymbol{R}_{loc}} z_{t,j}^{o,d} + \sum_{j \in R_{rap}} \sum_{j' \in R_{loc}} \sum_{\substack{s \in S_{rap} \\ : o < s < d}} z_{t,j,j'}^{o,s,d} = 1 \qquad \forall o \in \boldsymbol{S}_{rap}, \forall d \in \boldsymbol{S}_{loc}: o < d, \forall t \in \boldsymbol{T} \tag{3.24}$$

ⅱ. 各旅客群はそれぞれの出現時刻以降に出発する列車にしか乗車できない

$$d_j^o \geq t z_{t,j}^{o,d} \qquad \forall o, d \in \boldsymbol{S}: o < d, j \in \boldsymbol{R}_{loc}, \forall t \in \boldsymbol{T} \tag{3.25}$$

$$d_j^o \geq t z_{t,j}^{o,d} \qquad \forall o, d \in \boldsymbol{S}_{rap}: o < d, j \in \boldsymbol{R}_{rap}, \forall t \in \boldsymbol{T} \tag{3.26}$$

$$d_j^o \geq t \sum_{j' \in R_{rap}} \sum_{\substack{s \in S_{rap} \\ : o < s < d}} z_{k,j,j'}^{o,s,d} \qquad \forall o \in \boldsymbol{S}_{loc}, \forall d \in \boldsymbol{S}_{rap}: o < d, j \in R_{loc}, \forall t \in \boldsymbol{T} \tag{3.27}$$

$$d_j^o \geq t \sum_{j' \in R_{loc}} \sum_{\substack{s \in S_{rap} \\ : o < s < d}} z_{k,j,j'}^{o,s,d} \qquad \forall o \in \boldsymbol{S}_{rap}, \forall d \in \boldsymbol{S}_{loc}: o < d, j \in R_{loc}, \forall t \in \boldsymbol{T} \tag{3.28}$$

ⅲ. 各旅客群は乗り継ぐ余裕のある列車の組み合わせしか選択できない

$$d_{j'}^s - \left(a_j^s + LI^{trans}\right) \geq -M\left(1 - z_{k,j,j'}^{o,s,d}\right) \tag{3.29}$$

$$\forall o \in \boldsymbol{S_{loc}}, \forall s, d \in \boldsymbol{S}_{rap}: o < s < d, j \in \boldsymbol{R}_{loc}, j' \in \boldsymbol{R}_{rap}, \forall t \in \boldsymbol{T}$$

$$d_{j'}^s - \left(a_j^s + LI^{trans}\right) \geq -M\left(1 - z_{k,j,j'}^{o,s,d}\right) \tag{3.30}$$

$$\forall o, s \in \boldsymbol{S}_{rap}, \forall d \in \boldsymbol{S}_{loc}: o < s < d, j \in \boldsymbol{R}_{rap}, j' \in \boldsymbol{R}_{loc}, \forall t \in \boldsymbol{T}$$

ⅳ. 各旅客群の旅行時間は選択した経路の所要時間に依存する

$$\tau_{t,j}^{o,d} \geq 0 \qquad \forall o, d \in \boldsymbol{S}: o < d, \forall j \in \boldsymbol{R}, t \in \boldsymbol{T} \tag{3.31}$$

$$\tau_{t,j,j'}^{o,s,d} \geq 0 \qquad \forall o, d \in \boldsymbol{S}, s \in \boldsymbol{S}_{rap}: o < \boldsymbol{s} < d, \forall j, j' \in \boldsymbol{R}, t \in \boldsymbol{T} \tag{3.32}$$

$$\tau_{t,j}^{o,d} \geq \left(a_j^d - t\right) - M\left(1 - z_{t,j}^{o,d}\right) \qquad \forall o, d \in \boldsymbol{S}: o < d, \forall j \in \boldsymbol{R}_{loc}, t \in \boldsymbol{T} \tag{3.33}$$

$$\tau_{t,j}^{o,d} \geq \left(a_j^d - t\right) - M\left(1 - z_{t,j}^{o,d}\right) \qquad \forall o, d \in \boldsymbol{S}_{rap}: o < d, \forall j \in \boldsymbol{R}_{rap}, t \in \boldsymbol{T} \tag{3.34}$$

$$\tau_{t,j,j'}^{o,s,d} \geq \left(a_{j'}^d - t\right) - M\left(1 - z_{t,j,j'}^{o,s,d}\right) \\ \forall o \in \boldsymbol{S_{loc}}, \forall s, d \in \boldsymbol{S}_{rap}: o < s < d, j \in \boldsymbol{R}_{loc}, j' \in \boldsymbol{R}_{rap}, \forall t \in \boldsymbol{T} \tag{3.35}$$

$$\tau_{t,j,j'}^{o,s,d} \geq \left(a_{j'}^d - t\right) - M\left(1 - z_{t,j,j'}^{o,s,d}\right) \\ \forall o, s \in \boldsymbol{S}_{rap}, \forall d \in \boldsymbol{S}_{loc}: o < s < d, j \in \boldsymbol{R}_{rap}, j' \in \boldsymbol{R}_{loc}, \forall t \in \boldsymbol{T} \tag{3.36}$$

$$e_k^{o,d} \geq 0 \qquad \forall o, d \in \boldsymbol{S}, t \in \boldsymbol{T} \tag{3.37}$$

$$e_k^{o,d} \geq \tau_k^{o,d} - MT_k^{o,d} \qquad \forall o, d \in \boldsymbol{S}, t \in \boldsymbol{T} \tag{3.38}$$

3.6 混合整数計画法による運転整理例

先行研究で示された定式化を基に，仮想路線を用いて運転整理を行った時の例を示す。

3.6.1 前提条件

運転整理最適化の指標として，旅客損失の中で最も顕著である列車の待ち時間を含む旅行時間の増大量に着目し，平常時の OD データを用いて最適化を行った。式(3.39)に目的関数を示す。ここで，旅行時間の総量ではなく平常時の旅行時間からの増大量を用いるのは，旅行時間の総量を評価値として最小化すると旅客全体での損失は最適化されるが，平常時よりも旅行時間が短くなる旅客と旅行時間が長くなる旅客の間で損得の偏りが生じる恐れがあるためである。

$$P_k^{o,d} \times e_k^{o,d} \qquad \forall o, d \in \boldsymbol{S}, t \in \boldsymbol{T} \tag{3.39}$$

図 3.6 に，仮想路線の路線図，図 3.7 に平常時のダイヤ図を示す。列車は 1 駅を発車し 7 駅へ向かう片方向のみを考える。また，平常時に 1 駅を発車する順番に 1 列車，2 列車と呼ぶことにする。この路線で，5 列車の 2 駅への到着が 600 秒遅れたと仮定して運転整理を行う。定式化で用いた定数については，式(3.40)～(3.45)の値を使用する。また，通常時の OD 表を表 3.3 に示す。

$$LD = LA = 1\text{ 分} \tag{3.40}$$

$$LT = 1.5\text{ 分} \tag{3.41}$$

$$LS_j^s = 1\text{ 分} \tag{3.42}$$

$$LR_j^s = 8\text{ 分} \quad (j = \text{各停}) \tag{3.43}$$

$$LR_j^s = 5\text{ 分} \quad (j = \text{快速}) \tag{3.44}$$

$$LI^{trans} = 1\text{ 分} \tag{3.45}$$

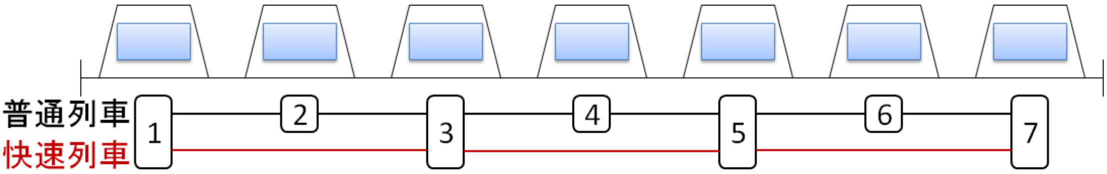


図 3.6 路線図

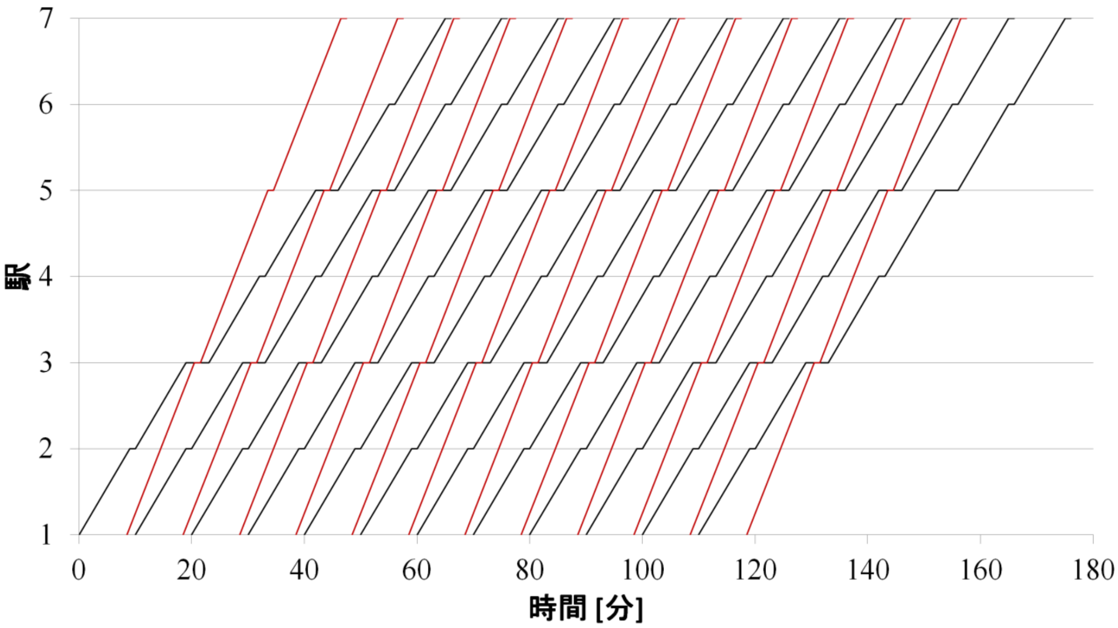


図 3.7 元ダイヤ

表 3.3 通常時の 2 分あたりの OD 表（単位［人]）

発＼着	1 駅	2 駅	3 駅	4 駅	5 駅	6 駅	7 駅
1 駅	0	70	200	70	200	70	200
2 駅	0	0	70	20	70	20	70
3 駅	0	0	0	70	200	70	200
4 駅	0	0	0	0	70	20	70
5 駅	0	0	0	0	0	70	200
6 駅	0	0	0	0	0	0	70
7 駅	0	0	0	0	0	0	0

3.6.2 結果

初めに詰めダイヤを図 3.8 に示す。この図より，運転整理対象の時間を 29 分から 89 分として，以降の運転整理ダイヤを計算した。図 3.9 に列車遅れを最小にする運転整理（以下，列車遅れ最小ダイヤ），図 3.10 に式(3.39)に示した目的関数を最小にする運転整理結果（旅客遅れ最小ダイヤ）を示す。また，図 3.11 にそれぞれの目的関数の値の比較を示す。

まず，運転整理を行わない詰ダイヤに比べ，運転整理後のダイヤでは列車遅れ最小ダイヤ，旅客遅れ最小ダイヤ双方とも，旅客遅れは 50%ほど改善していることが分かる。また，旅客遅れ最小ダイヤは列車遅れダイヤに比べて旅客遅れは約 5～6%改善されており，運転整理の結果，旅客にとって有利なダイヤが得られていることが分かる。

以上が，先行研究[32][33]で提案された混合整数計画法による運転整理である。しかし，目的の部分で述べたように，旅客の不効用改善を目的にしているにもかかわらず，目的関数は旅行時間のみに着目している。列車が乱れた際は，列車が遅れる分，普段より列車が混雑することが多い。そのため，列車の混雑率についても考慮しなければ，場合によっては乗り切れないほどの旅客が 1 本の列車に集中し，積み残しが発生するおそれがある。

次章では，列車の混雑に着目して定式化を行い，運転整理案を得た研究を記す。

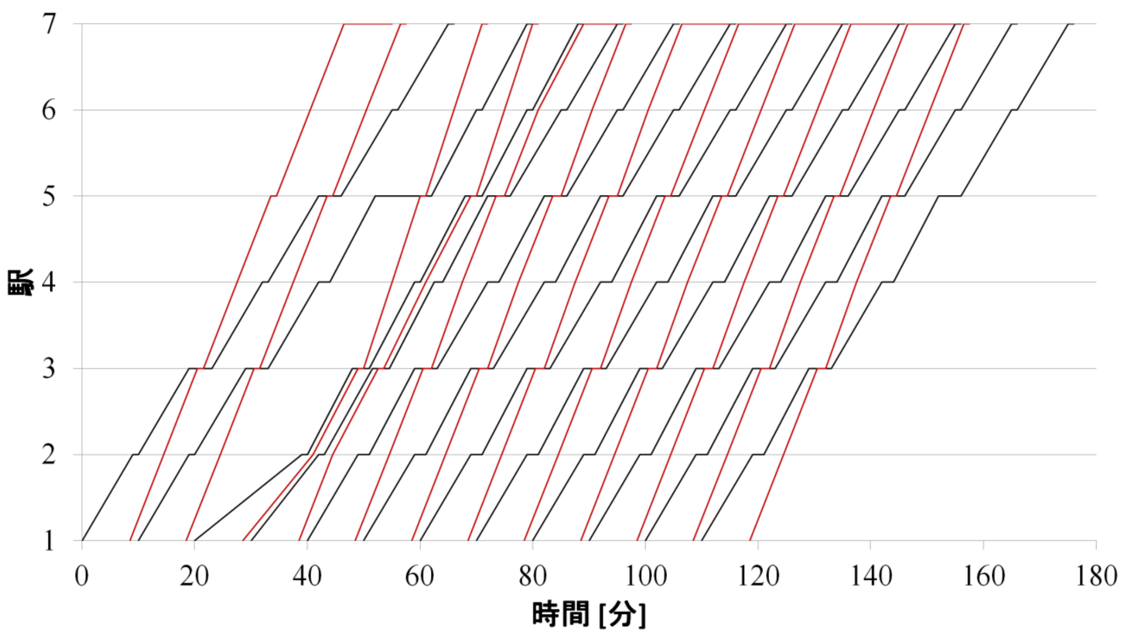


図 3.8 詰ダイヤ

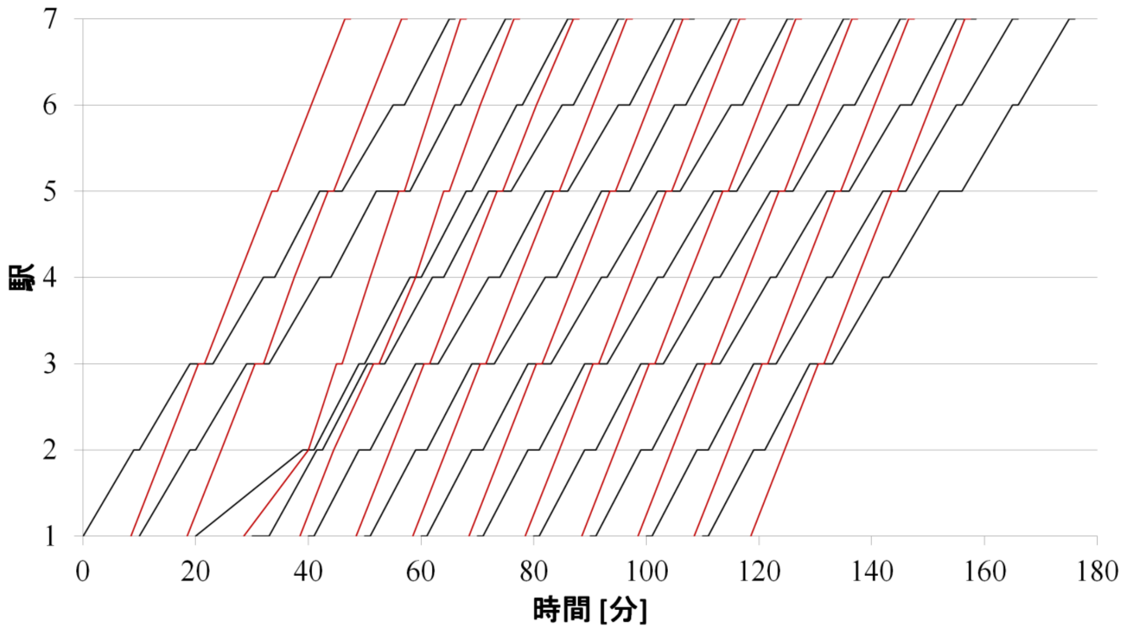


図 3.9 列車遅れ最小

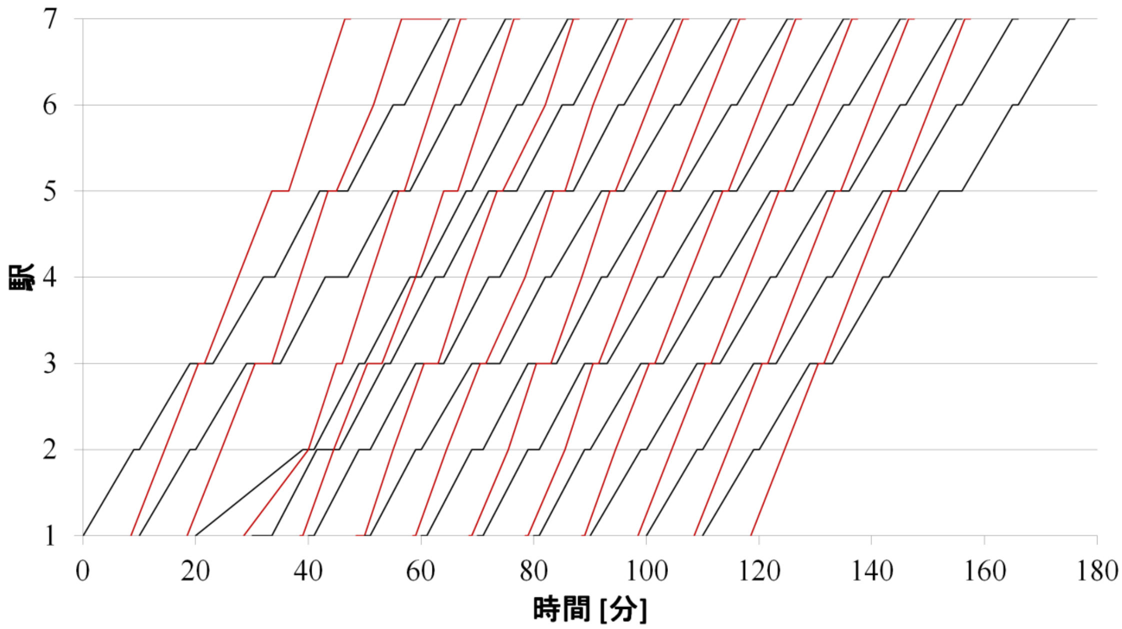


図 3.10 旅客遅れ最小

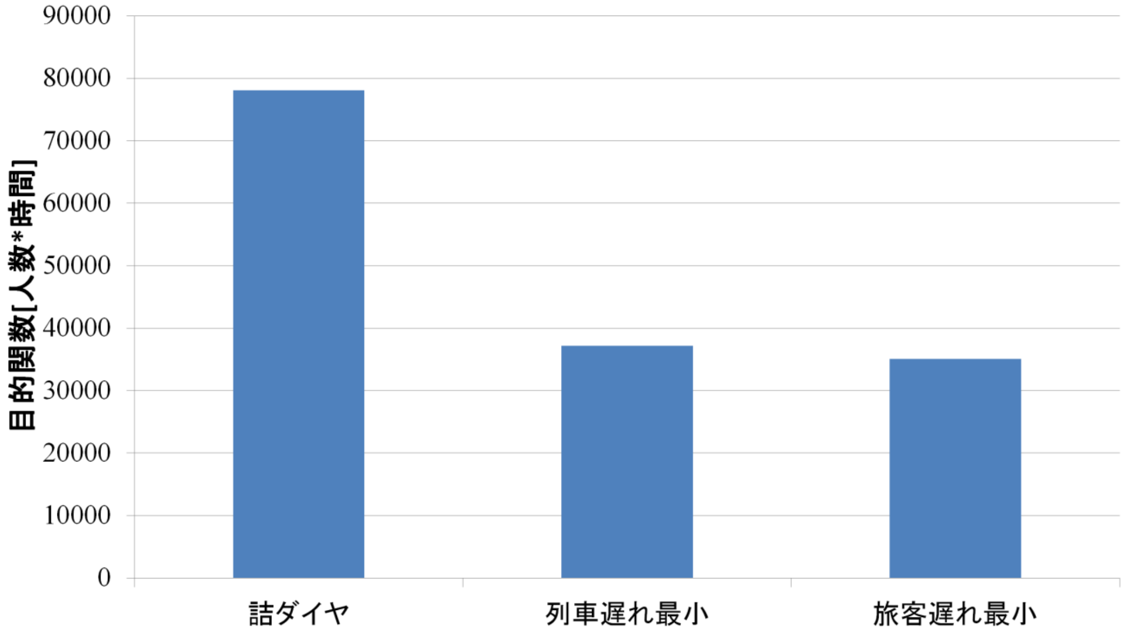


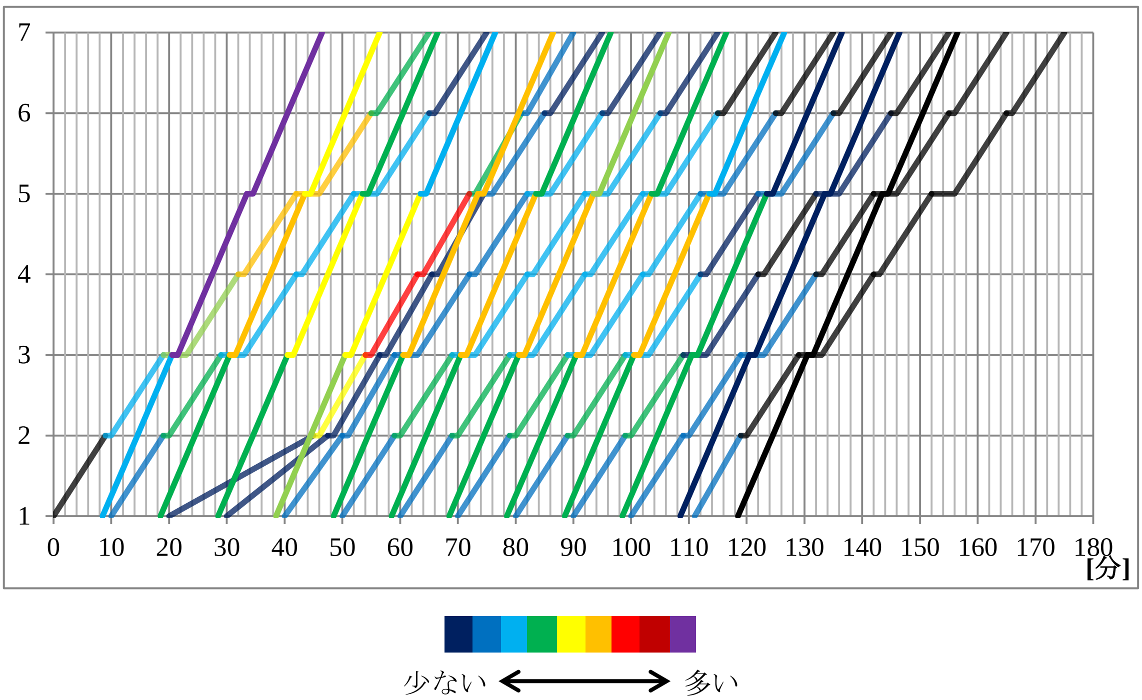
図 3.11 目的関数値比較

第 4 章　列車混雑度を反映した運転整理

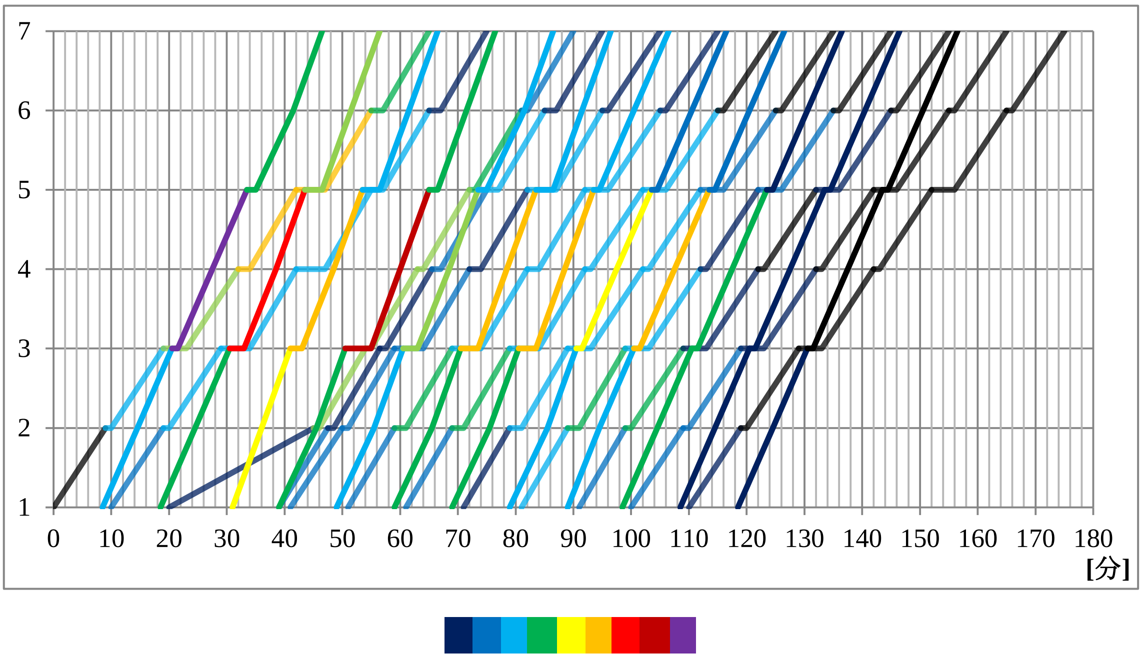
4.1 乗車率考慮の必要性

前章では，旅客の遅延時間増大量を評価関数として，運転整理案を得た研究について紹介してきた。しかし，列車が遅延した際は，旅客が駅に滞留し，平常時以上に列車に旅客が集中し混雑することがある。そのため，列車の遅延によって旅客が被る不効用を評価するには，列車の混雑について評価することが不可欠である。

まず，図 4.1 に筆者がおこなった先行研究[35]の運転整理結果の図を示す。この図は，運転整理の結果に，旅客の乗車率に応じて色をつけ，どの列車に旅客が集中しているのかを表した図である。この研究は，3 章で紹介した研究と同じく，旅客の遅延時分を最小化することを目的として運転整理を行ったものである。図 4.1(a)の運転整理を行わなかったものに比べ，図 4.1(b)では旅客の遅延時分を短くするため接続を改善した結果，1 本の列車に旅客がより集中している様子が確認できた。この旅客の集中が，乗り切れないほどの集中となってしまった場合，旅客の不満は逆に増大してしまう恐れもある。そのため，通常時よりも混雑が集中しやすい運転整理という場面では，旅客混雑について考えることが必要となる。



(a) 運転整理なし



(b) 運転整理あり

図 4.1 列車ごとの乗車率分布[35]

4.2 乗車率考慮のための定式化

乗車率を考慮する上で，以下の 2 つの視点から定式化する。

①積み残しの考慮

旅客が集中することで一番問題となるのは，列車に乗りきれない人が出てしまう，積み残しである。積み残しは，式(4.1)のように制約によって列車乗車人数に上限を加えることにより，乗り切れない旅客を表現する。

$$p_j^o \leq P\_max \qquad \forall o \in \boldsymbol{S}, j \in \boldsymbol{T} \tag{4.1}$$

p_j^o：o 駅を発車する j 列車の o～o+1 駅間の乗車人数

P_max：列車の乗車人数上限

②混雑による不効用

積み残しが発生するほど乗車率が高くなくても，乗車率が高くなり混雑が増すと，旅客の不効用は増加する[36]。そのため，混合整数計画法で運転整理を考える場合，旅客の遅延時分だけでなく，乗車率に関する項も目的関数に取り入れる必要がある。

参考文献[36]によると，鉄道車両内混雑による不効用は，式(4.2)のように表せる。

$$\omega \times \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{h=1}^{H_j} \{ f(c_{jh}) \cdot q_{jh} \cdot t_{jh} \} \tag{4.2}$$

ω：乗車中の時間評価値[円／分]
n：全駅数
H_j：駅 j に停車する列車本数
c_{jh}：駅 j に h 番目に停車する列車の，次の駅までの区間における混雑度
q_{jh}：駅 j に h 番目に停車する列車の乗客数[人]
t_{jh}：駅 j に h 番目に停車する列車の所要時間[分]
f：図 4.1 に示す混雑に対する人間の感覚を表す係数

式(4.2)では，変数が 3 つの 3 次式となっており，線形式のみで構成される混合整数計画問題の定式化にとして適さない。そこで，今回特に着目している乗車率に関するもののみを変数として考え，乗客数と所要時間に関する部分は平常時の値を使う，線形の目的関数を提案する。目的関数を式(4.3)に示す。第 1 項は旅客の時間に関する不効用の項であり，第 2 項が旅客の乗車率に関する不効用の項である。

$$P_k^{o,d} \times e_k^{o,d} + K \times Q_j^o \times T_j^o \times f\left(c_j^o\right) \tag{4.3}$$

$P_k^{o,d}$：駅 o〜d 間を移動する旅客の，時刻 k における駅 o 出現人数
$e_k^{o,d}$：時刻 k に駅 o に出現した旅客の，平常時の駅 o〜d 間旅行時間からの増大量
K：定数
Q_j^o：駅 o を発車する列車 j の通常時の乗車人数
T_j^o：駅 o を発車する列車 j の通常時の所要時間
c_j^o：駅 o を発車する列車 j の乗車率
f：図 4.1 に示す混雑に対する人間の感覚を表す係数

以上，①積み残し考慮，②乗車率考慮のそれぞれについて，混合整数計画法のための定式化は以下の式によって行った。
①積み残し考慮
【目的関数】式(3.39)
【列車運行上の条件】式(3.1)〜(3.20)
【旅客の行動仮定】式(3.21)〜(3.38)，(4.1)

②乗車率考慮
【目的関数】式(4.3)
【列車運行上の条件】式(3.1)〜(3.20)
【旅客の行動仮定】式(3.21)〜(3.38)

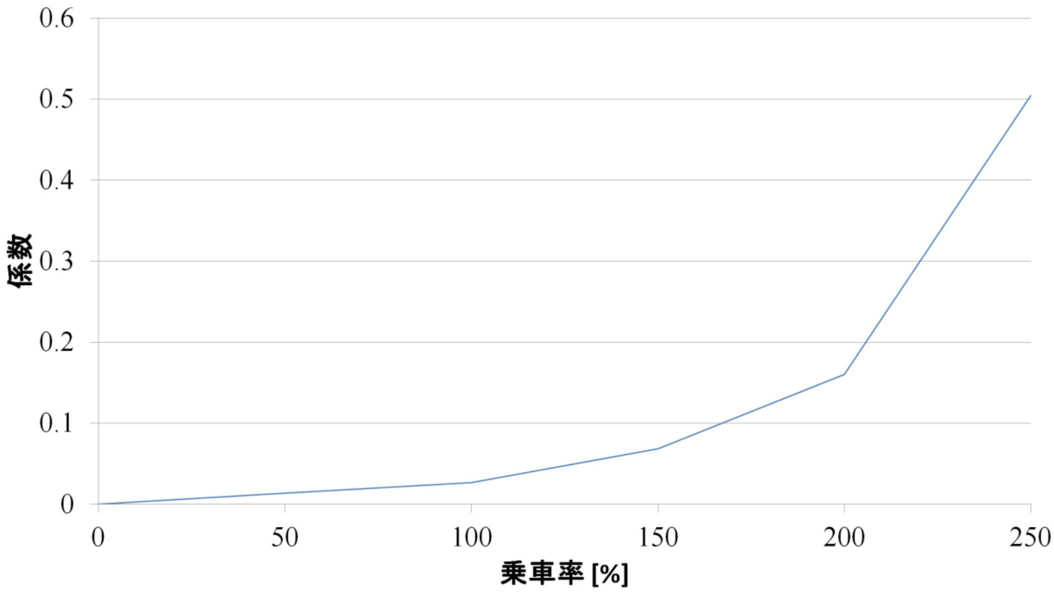


図 4.1 混雑に対する人間の感覚を表す係数[36]

4.3 仮想路線による提案手法の検証

前節まで，乗車率を混合整数計画法で定式化するにあたり，制約として考える方法と，目的関数として考える方法の 2 種類を提案した。本節では，その 2 つの手法について検証を行う。

図 4.2 に本検証で使用する仮想路線の元ダイヤ図を示す。全 5 駅で 24 列車が走っており，各停と快速が交互に始発駅を出発する。始発駅から 1 駅，2 駅…5 駅と呼ぶ。1 駅を発車する順番で 1 列車，2 列車…24 列車と呼ぶ。また，表 4.1 に本路線の 2 分あたりの OD 表を示す。本路線では，現実の路線によくある通り，快速停車駅の乗降人数が多い路線を想定している。旅客は 2 分あたりにまとまって表 4.1 の人数が出現すると仮定する。

このダイヤで 1 駅を発車する 7 本目の列車の 2 駅の到着が 15 分遅れたときの運転整理結果を比較する。運転整理対象時間は，前章と同じく遅延が発生した時間から，運転整理を行わず遅延が収束するまでの時間とする。具体的には詰ダイヤから導出した 31 分から 88 分の 57 分間である。

式の中に表れる定数を式(4.4)～(4.9)に，Q_j^o，T_j^oの値をそれぞれ表 4.2，4.3 に示す。Q_j^oに関しては，通常時の各駅間の平均乗車人数とした。各列車の定員は 120 人とした。

$$LD = LA = 1 \text{ 分} \tag{4.4}$$

$$LT = 1.5 \text{ 分} \tag{4.5}$$

$$LS_j^s = 1 \text{ 分} \tag{4.6}$$

$$LR_j^s = 8 \text{ 分} \quad (j = \text{各停}) \tag{4.7}$$

$$LR_j^s = 5 \text{ 分} \quad (j = \text{快速}) \tag{4.8}$$

$$LI^{trans} = 1 \text{ 分} \tag{4.9}$$

表 4.1 2 分あたり OD

発駅＼着駅	1 駅	2 駅	3 駅	4 駅	5 駅
1 駅	0	7	20	7	20
2 駅	0	0	7	2	7
3 駅	0	0	0	7	20
4 駅	0	0	0	0	7
5 駅	0	0	0	0	0

表 4.2 Q_j^oの値（単位[人]）（13 列車以降も 1～12 列車と同一）

駅間＼列車	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1～2	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
2～3	158	158	158	158	158	158	158	158	158	158	158	158
3～4	158	158	158	158	158	158	158	158	158	158	158	158
4～5	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135

表 4.3 T_j^oの値（単位[分]）

駅間＼列車	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1～2	9	6	9	6	9	6	9	6	9	6	9	6
2～3	9	6	9	6	9	6	9	6	9	6	9	6
3～4	9	6	9	6	9	6	9	6	9	6	9	6
4～5	9	6	9	6	9	6	9	6	9	6	9	6

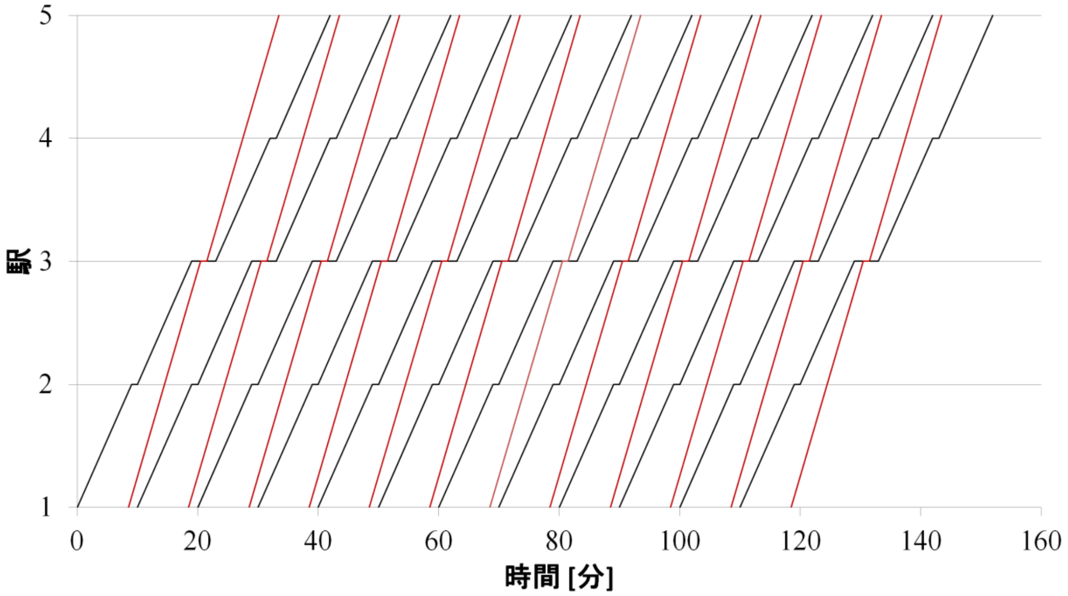


図 4.2 元ダイヤ

4.4 結果

結果ダイヤ図の凡例を図 4.3 に，図 4.4～図 4.8 にそれぞれ，詰めダイヤの場合，乗車率考慮なし（第 3 章と同じ条件）の場合，制約によって列車への乗車を 200%に制限し積み残しを表現した場合, 目的関数で乗車率を考慮した場合のダイヤ図を K = 0.001 の場合, K=0.01 の場合について示す。結果については，見やすさを考慮し，通常ダイヤに戻った後の列車については省略し，1 列車から 16 列車の結果について示している。

図 4.4，4.5 の詰めダイヤおよび旅客の遅延時分のみを考慮したダイヤでは，乗車率 300%を超える列車が出現してしまっており，正しく旅客流動を表しているとはいえないことが分かる。詰めダイヤでは遅延の原因となっている 7 列車が 3 駅で直後の快速である 8 列車と接続をとっているため，3 駅以降快速の乗車率が高くなりすぎてしまっている。また，乗車率考慮なしダイヤでは，1 駅で快速である 8 列車が発車待ちをしているため，その間に出現した 3 駅以降に向かう旅客が全員乗車し，現実では乗り切れないほど列車に乗車してしまっている。

その一方，乗り切れない旅客を表現した結果である図 4.6 では，後発の快速である 10 列車にも乗車していることが分かる。また，ダイヤに関しても，旅客流動の多い 3 駅，5 駅に向かう旅客を優先的に運ぶために，快速を乗車率を考慮しなかったダイヤに比べて早く 3 駅や 5 駅に到着するような運転整理が実施されていることが分かる。目的関数に旅客の混雑に対する不満を加えた結果である図 4.7，4.8 に関しては，混雑に対する不満が大きいほど，快速を早く 3 駅や 5 駅に到着できるよう，運転整理が実施されている。また，遅延列車の前を走る列車では，通常ダイヤよりも敢えて列車の発車を遅らせることにより，最も混雑する列車の乗車率を下げている。

これらの結果より，旅客の乗降人数が大きい駅に停車する快速が運行されている路線では，快速の乗車率がネックになり人が溢れてしまうこと。また，その状況を解消するため，各停を長時間停車させてでも快速を早く走らせることが，結果的に混雑解消および旅客の満足向上に重要であることが確認できた。

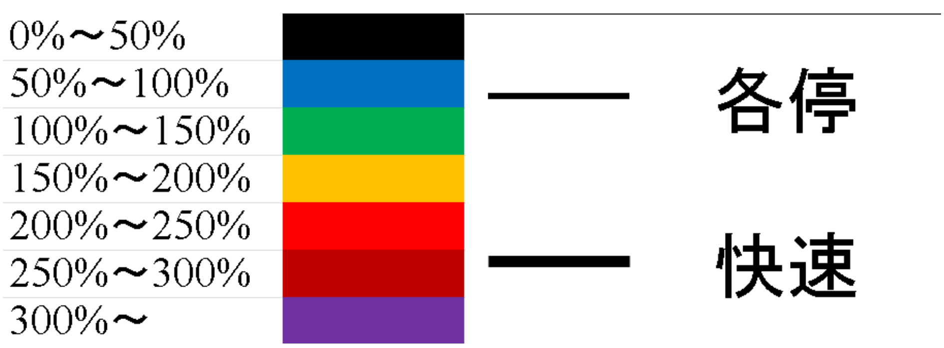


図 4.3 凡例

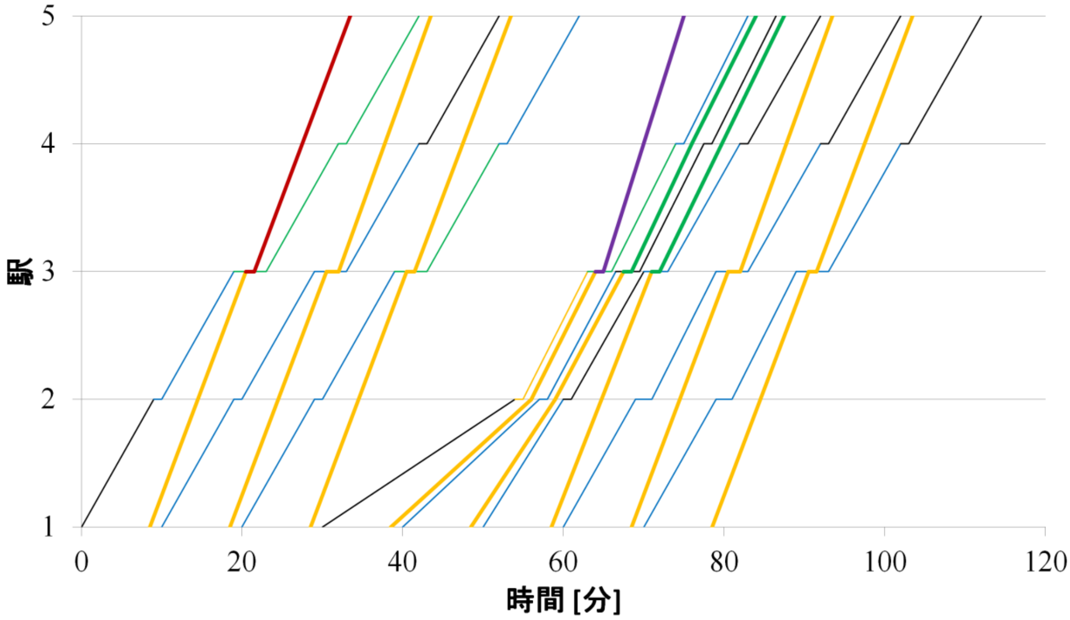


図 4.4 詰めダイヤ

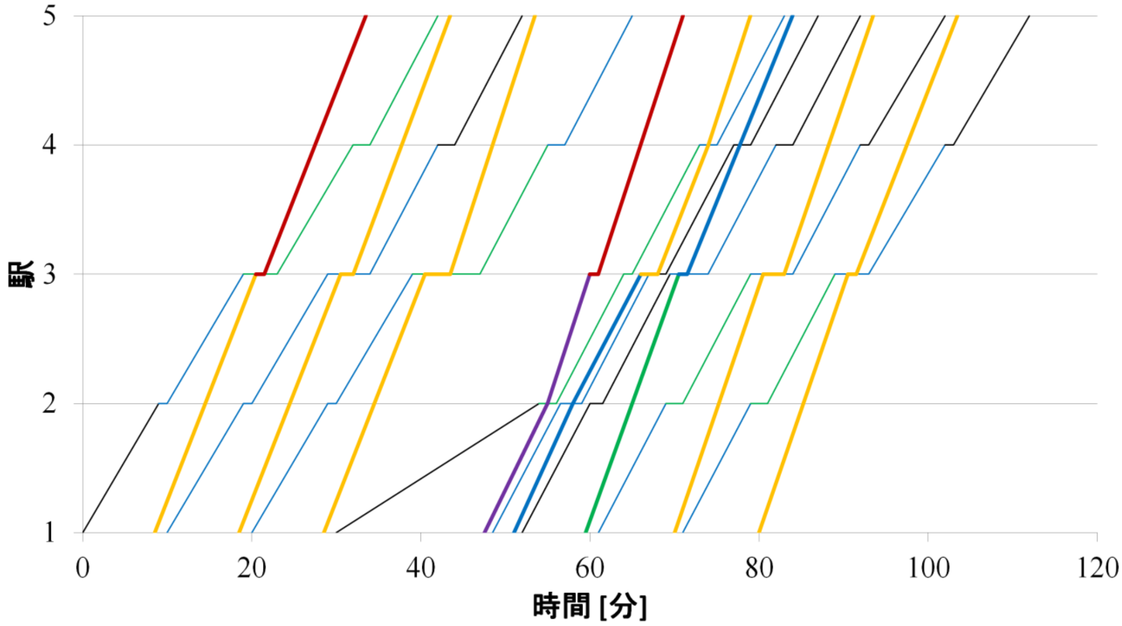


図 4.5　乗車率考慮なし

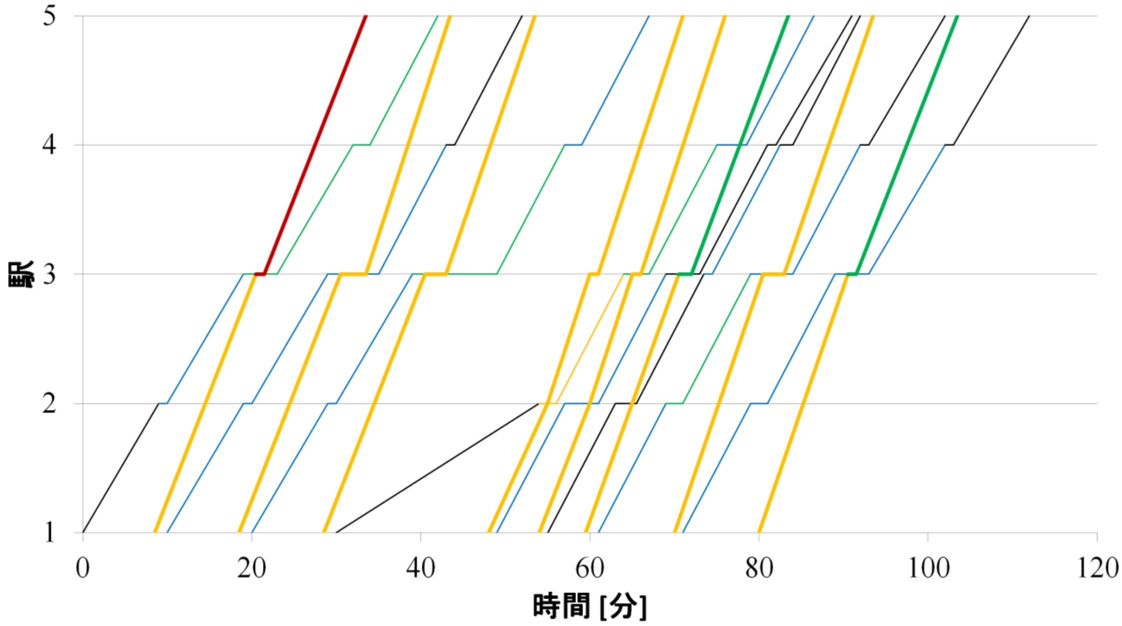


図 4.6　積み残し考慮あり

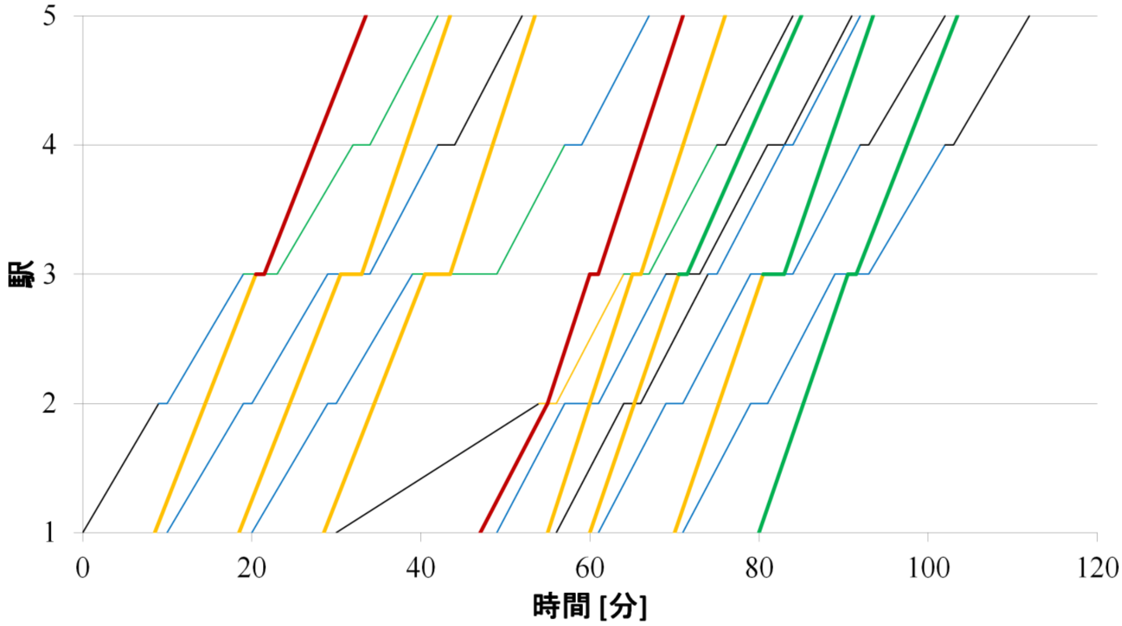


図 4.7 乗車率考慮あり（K=0.001）

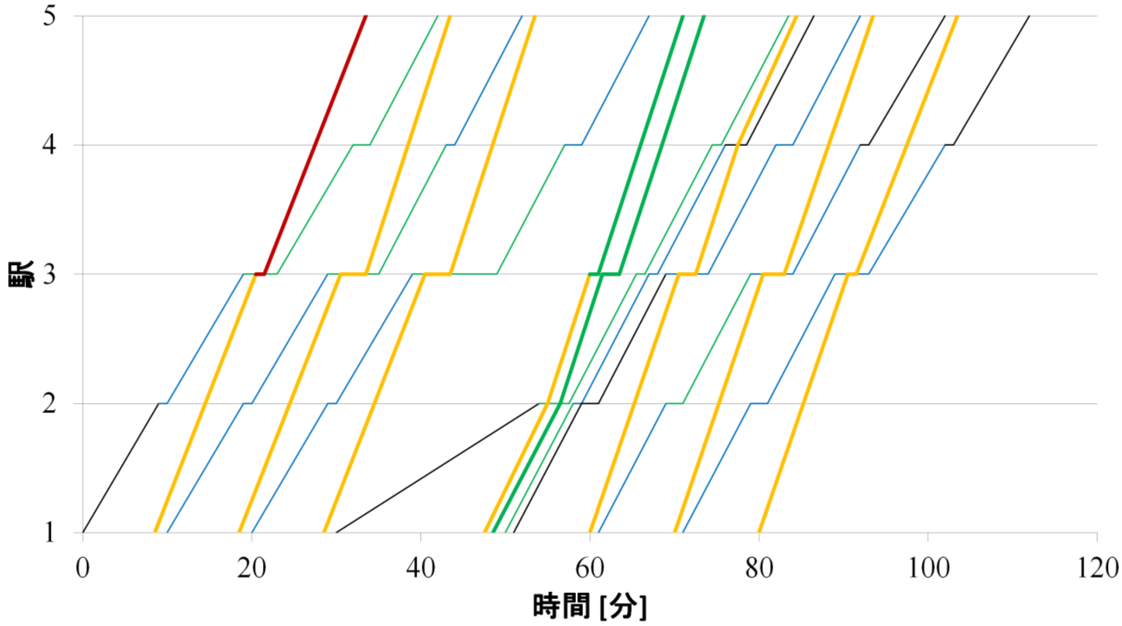


図 4.8 乗車率考慮あり（K=0.01）

4.5 考察

今回，旅客の乗車率を考慮しつつ，混合整数計画法によって運転整理案を得るための定式化を提案し，仮想路線を使って検証を行った。その結果，列車ダイヤについて以下の知見が得られた。

①遅延が発生したことにより，遅延してしまった快速に旅客が集中し，それを解消するために後続の快速をなるべく早く走らせることが，混雑解消および旅客不満の減少に重要であること

②遅延列車の前を走る列車は，時間調整を行い発車を遅らせることが，同じく混雑解消および旅客不満の減少に重要であること

しかし，実際に列車が遅延し，列車に乗りきれないほどの旅客が集中した際は，停車時間が伸びてしまい，本提案ダイヤが実現できないことも考えられる。そのため，実際の場面においては

①前を走る比較的空いている列車への乗車を呼びかけること

②最も混雑した快速に乗車する旅客に対して，後続の快速がすぐに続いて到着すること

を案内することが肝要である。

第 5 章　数理計画法による運行計画作成

前章までは，元から定められたダイヤに戻すことを目的とした運転整理の研究について記してきた。この章からは，その元となるダイヤを決める研究，つまり運行計画作成について記していく。

5.1 運行計画作成の背景

鉄道輸送における輸送サービスを改善する取り組みとして，ハードウェア的アプローチとソフトウェア的アプローチの 2 種類が考えられる。ハードウェア的アプローチとしては，線路増設，ルート変更，車体傾斜装置の採用，車両の出力向上による加速度，減速度，登坂速度の上昇がある[37]。しかし，これらの方法は莫大な費用を要する。そのため，ソフトウェア的アプローチであるダイヤの改善により輸送サービスを改善することが低コストで有用であると報告されている[38]。

一口にダイヤの改善と言っても，何を目的にして改善するのが良いのか，というのは路線ごとに異なる。過去のダイヤ最適化の研究として，列車の混雑抑制を目的としてダイヤの最適化を行ったもの[39]，路線が網目のように張り巡らされている都市で，乗換時間抑制を目的としてダイヤの改善を図ったもの[40]，日々の旅客のデマンドを反映したダイヤを考えたもの[41]などの研究が報告されている。

5.2 運行計画作成の目的

しかし，これらの研究もまた，第 3 章で記した運転整理のときと同じく，メタヒューリスティクス手法を用いて準最適解を得る方法であり，最適性の保証のある解は得られない。運行計画を考える作業は，運転整理の時のように瞬時に求めたいという要望は低く，時間がかかっても真に最適なダイヤを得ることはとても有用である。

そこで，本研究では，運転整理を考えるために定式化された[32][33]列車運行と旅客流動の式の一部を使い，運行計画問題を混合整数計画法によって定式化し，旅客にとって最適なダイヤを得ることを目的とする。第 1 章で記したように，旅客が鉄道に一番に求めていることは「速達性」あるいは「乗車時間の短さ」である。そこで，旅客の満足を計るための指標として「旅客の総旅行時間」を目的関数とし，旅客総旅行時間が最小となるダイヤを最適なダイヤと定義する。この最適なダイヤを求めることが目的である。

第 6 章　快速導入による旅客総旅行時間最小化

6.1 はじめに

日本では東京を始め，大阪，名古屋，札幌など大都市を中心に地下鉄が走っており，その総延長は 763.9km にも及ぶ[42]。世界に目を向けても同じように，大都市を中心に地下鉄は世界各地で運行されている。

地下鉄の運行形態は，アメリカのニューヨークなど一部の都市，路線を除いて全列車各駅停車で運行されていることがほとんどである[43]。日本で言えば銀座線や御堂筋線のように混雑が激しい路線では，快速列車を走らせてしまうと混雑が偏り，遅延を誘発してしまい得策ではない。実際に混雑が激しかった路線で快速運転を取り止め，全て各駅停車で運行し効果を上げた例がある[44][45][46]。一方，地下鉄といえども乗車率が高くない路線も存在する。そのような路線では逆に快速列車を走らせ，速達性を高めることで旅客の満足を高めることが重要となってくる[47]。

快速列車を導入することにより，旅客の総旅行時間を下げようとする取り組みとしては，遺伝的アルゴリズム[48]や動的計画法[49]を用いたものが先行研究として挙げられる。しかし，これらの研究では準最適解は得られるものの，原理的に最適性の保証のある解は求まらない。計画時に列車ダイヤを設計する作業は，運転整理のように瞬時に解を求めることは必ずしも求められず，時間がかかっても真に最適な解を導出できることが有用である。そこで本研究では，最適性の保証のある解が得られる数理計画問題として，快速導入の問題を定式化し，最適性の保証のある旅客総旅行時間最小ダイヤを導出する方法論を提案する。

6.2 快速列車運行のための定式化

本節では，地下鉄のように全列車各駅停車で運行されている路線に，旅客総旅行時間が最小になるように快速列車を導入するという問題を，混合整数計画問題として定式化する手法を紹介する。本節で登場する記号一覧を以下に示す。

集合

$\boldsymbol{S}$	駅の集合
$\boldsymbol{S_{end}}$	端末駅の集合
$\boldsymbol{R}$	列車の集合
$\boldsymbol{R_{loc}}$	各停列車の集合
$\boldsymbol{Q^s}$	s 駅における番線の集合
$\boldsymbol{T}$	旅客出現時刻の集合

定数

LR_j^s	列車 j の s～s+1 駅間における基準運転時分

LD　最小発発時隔

LA　最小着着時隔

LT　最小発着時隔

LS_j^s　列車 j の s 駅における最小停車時分

D_j^s　列車 j の s 駅における計画発時刻

A_j^s　列車 j の s 駅における計画着時刻

$P_k^{o,d}$　時刻 k に駅 o に出現し，駅 d に移動する旅客の人数

M　十分に大きい数

ブーリアン変数（＝1 のとき）

$r_{j,q}^s$　s 駅で列車 j が番線 q を利用する

$z_{t,j}^{o,d}$　時刻 t に o 駅に現れた旅客群が列車 j を利用して駅 d に移動する

$pass_j^s$　列車 j が s 駅を通過する

実数変数

a_j^s　列車 j の s 駅における着時刻

d_j^s　列車 j の s 駅における発時刻

$\tau_{t,j}^{o,d}$　$z_{t,j}^{o,d} = 1$の時の駅 o～d 間旅行時間

6.2.1 目的関数

旅客にとって，鉄道を利用する項目で特に重視する項目は時間と費用に関する項目である[36]。そのため，本来ならば旅客目線で鉄道を評価する場合は費用と時間の双方を考慮することが望ましい。しかし，鉄道の費用に関しては，非常に多くの要素が絡み，また鉄道ダイヤを考える本研究の目的とも大きく外れる。そのため，目的関数は旅客総旅行時間を用いる。その式を式(6.1)に示す。

$$P_k^{o,d} \times \tau_k^{o,d} \qquad \forall o, d \in \boldsymbol{S}, t \in \boldsymbol{T} \tag{6.1}$$

6.2.2 問題の前提

本章で扱う問題の前提を説明する。

本章では，地下鉄のように全列車各駅停車で走っている路線の一部列車を一部の駅を通過する快速に変更し，旅客総旅行時間最小のダイヤを求める問題を考える。その際，列車同士の追い越しは考えないものとする。これは，全列車各駅停車で走っている路線では，元々追い越し用の施設を持っていないことも多く，そのような路線でも快速導入の有用性を示すためである。

6.2.3 列車運行上の制約

今までの章で述べてきたように，列車計画を作成する際には列車運行に関する各種の制約を守る必要がある。物理的制約については第 3 章に述べたものを基本とし，その式を式

(6.2)～(6.6)及び式(3.7)に示す。

① 基準運転時分

$$a_j^{s+1} - d_j^s \geq LR_j^s - K \times pass_j^s \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j \in \boldsymbol{R} \qquad (6.2)$$

② 時隔

・発発時隔

$$d_{j+1}^s - d_j^s \geq LD \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j \in \boldsymbol{R} \qquad (6.3)$$

・着着時隔

$$a_{j+1}^s - a_j^s \geq LA \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j \in \boldsymbol{R} \qquad (6.4)$$

・発着時隔

$$a_{j+1}^s - d_j^s \geq LT(2 - r_{j+1}^{s,q} - r_j^{s,q}) \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j \in \boldsymbol{R}, q \in \boldsymbol{Q}^s \qquad (6.5)$$

⑤番線

・各列車の使用する番線は一線に定められる。

$$\sum_{q \in \boldsymbol{Q}^s} r_{j,q}^s = 1 \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j \in \boldsymbol{R} \qquad (3.7)$$

⑦ 停車時間

$$d_j^s - a_j^s \geq LS_j^s(1 - pass_j^s) \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j \in \boldsymbol{R} \qquad (6.6)$$

本章では新たに$pass_j^s$というブーリアン変数を導入する。この変数は列車が駅を通過するかどうかを表す変数である。この変数によって式(6.2)では列車が駅を通過すると運転時分が短くなることや, 式(6.6)では駅通過によって停車時分が 0 になることを表現することができる。

続いて論理的制約については以下の⑧～⑭の 7 項目を考える。

⑧ 列車の種別は各駅停車と快速列車の 2 種類

⑨ 各駅停車と快速列車は始発駅を交互に出発する

⑩ 各駅停車のダイヤは固定

⑪ 各列車は前を走る列車を追い越さない

⑫ 各停は全駅停車

⑬ 端末駅は通過しない

⑭ 快速列車が通過する駅の総数は固定する

⑧～⑪について，図 6.1 のダイヤを使って説明する。図 6.1 は，本章で対象とする路線の本来のダイヤ，つまり全列車各駅停車で運行しているダイヤを表している。⑧～⑩は図 6.1 に描かれた線のうち，細線で書かれたダイヤは各駅停車として固定し，太線で書かれた列車を一部の駅を通過する快速列車にすることを意味している。⑪は快速列車が各駅停車を追い越すことなく，各停と各停の間を物理的制約が満足する範囲で運行することを意味している。これにより追い越し設備がない路線でも提案手法を使用することが可能となる。

⑩～⑭について，定式化をそれぞれ以下の式(6.7)～(6.13)に示す。

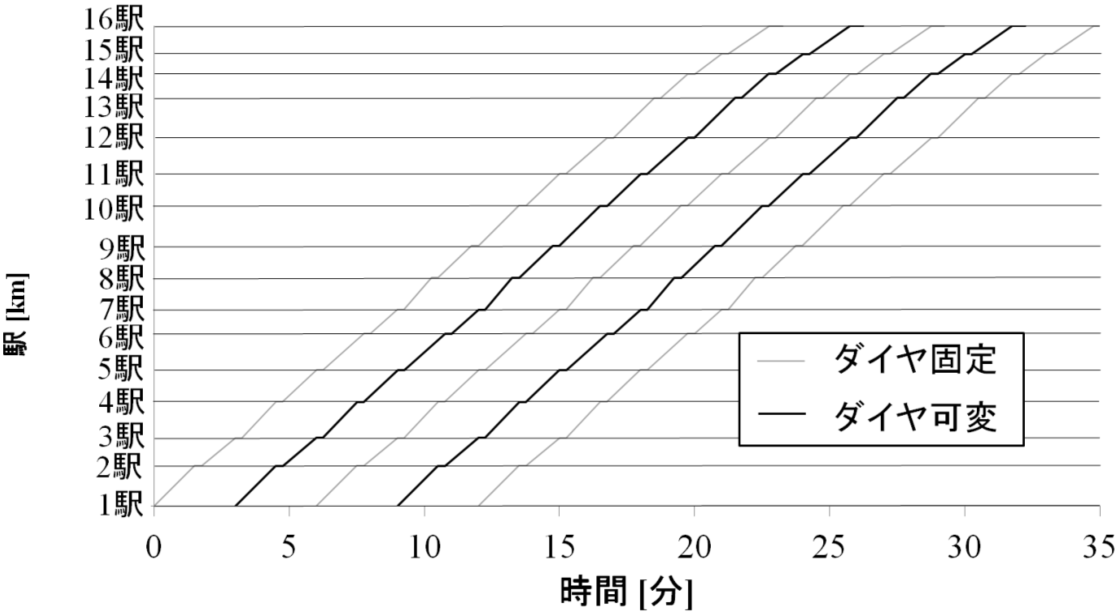


図 6.1 想定ケースでの元ダイヤ

⑩ 各駅停車のダイヤは固定

$$d_j^s = D_j^s \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j \in \boldsymbol{R}_{loc} \tag{6.7}$$

$$a_j^s = A_j^s \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j \in \boldsymbol{R}_{loc} \tag{6.8}$$

⑪ 各列車は前を走る列車を追い越さない

$$d_{j+1}^s \geq d_j^s \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j \in \boldsymbol{R} \tag{6.9}$$

$$a_{j+1}^s \geq a_j^s \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j \in \boldsymbol{R} \tag{6.10}$$

⑫ 各停は全駅停車

$$pass_j^s = 0 \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}, \forall j \in \boldsymbol{R}_{loc} \tag{6.11}$$

⑬ 端末駅は通過しない

$$pass_j^s = 0 \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}_{end}, \forall j \in \boldsymbol{R}_{rap} \tag{6.12}$$

⑭ 快速列車が通過する駅の総数は固定する

$$pass_j^s = N \qquad \forall s \in \boldsymbol{S}_{end}, \forall j \in \boldsymbol{R}_{rap} \tag{6.13}$$

6.2.3 旅客の行動仮定

旅客の経路選択に関する近似および仮定は，第 3 章と同じく以下のものを用いる。

(A) 旅客は列車運行に乱れが生じても，平常時と同時刻に出発駅に出現し，目的駅に向かう

(B) 旅客はある一定の時間ごとにまとまって駅に出現する

(C) 旅客は常に目的駅への最速達列車を選択する

以上の近似，仮定を基に旅客群の経路選択を定式化するにあたり，満たさなければならない条件を以下の式(6.14)～(6.18)及び式(3.31)に示す。

ｉ. 各旅客群は一つの経路しか選択できない

$$\sum_{j \in \boldsymbol{R}} z_{t,j}^{o,d} = 1 \qquad \forall o, d \in \boldsymbol{S}, \forall t \in \boldsymbol{T} \tag{6.14}$$

ⅱ. 各旅客群はそれぞれの出現時刻以降に出発する列車にしか乗車できない

$$d_j^o \geq t z_{t,j}^{o,d} \qquad \forall o, d \in \boldsymbol{S}: o < d, j \in \boldsymbol{R}, \forall t \in \boldsymbol{T} \tag{6.15}$$

ⅲ. 各旅客群は列車が停車しないと列車に乗降できない

$$\sum_{\substack{d \in \boldsymbol{S}: o < d \\ t \in \boldsymbol{T}}} z_{t,j}^{o,d} \leq M(1 - pass_j^o) \qquad \forall o \in \boldsymbol{S}, \forall j \in \boldsymbol{R} \tag{6.16}$$

$$\sum_{\substack{o \in \boldsymbol{S}: o < d \\ t \in \boldsymbol{T}}} z_{t,j}^{o,d} \leq M(1 - pass_j^d) \qquad \forall d \in \boldsymbol{S}, \forall j \in \boldsymbol{R} \tag{6.17}$$

ⅳ. 各旅客群の旅行時間は選択した経路の所要時間に依存する

$$\tau_{t,j}^{o,d} \geq 0 \qquad \forall o, d \in \boldsymbol{S}: o < d, \forall j \in \boldsymbol{R}, t \in \boldsymbol{T} \tag{3.31}$$

$$\tau_{t,j}^{o,d} \geq \left(a_j^d - t\right) - M\left(1 - z_{t,j}^{o,d}\right) \qquad \forall o, d \in \boldsymbol{S}: o < d, \forall j \in \boldsymbol{R}, t \in \boldsymbol{T} \tag{6.18}$$

第 3 章と大きく異なるところは，ⅲ. の定式化である。第 3 章及び第 4 章では，快速列車の停車駅が固定されていたため，駅の集合を快速が通過するか否かで分けることで旅客の行動を定式化していた。しかし，本章では快速の駅停車を可変とし変数で表現したため，式(6.16)，(6.17)で旅客の乗降可否を表現した。

6.3 定式化の検証

6.2 節で行った定式化によって，正しく問題が解けるかどうかを簡単な路線を使って検証した。

6.3.1 路線モデル

総駅数 5 駅，列車数 3 本の簡単な路線を考える。3 本の列車のうち，1 本目と 3 本目の列車を各停として，2 本目の列車が快速運転をする。路線図を図 6.2 に示す。想定する OD として，以下の 3 パターンを考え，それぞれのパターンの 1 分あたりの OD 表を表 6.1～6.3 に示す。各停の時刻については，1 駅の発時刻のみ条件として与える。このように条件を設定することにより，快速は旅客が乗車しない駅は通過するように運行する解が得られるはずである。

・パターン 1：1 駅～2 駅～5 駅を移動する旅客のみ

・パターン 2：1 駅～3 駅～5 駅を移動する旅客のみ

・パターン 3：1 駅～4 駅～5 駅を移動する旅客のみ

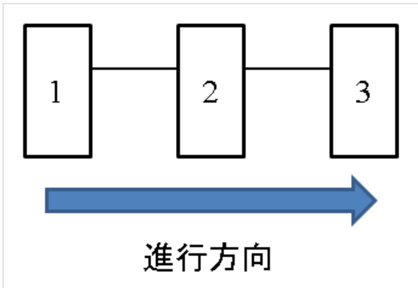


図 6.2 仮想路線図

表 6.1 パターン 1 の OD 表

[人]		着駅				
		1 駅	2 駅	3 駅	4 駅	5 駅
発駅	1 駅	0	1	0	0	1
	2 駅	0	0	0	0	1
	3 駅	0	0	0	0	0
	4 駅	0	0	0	0	0
	5 駅	0	0	0	0	0

表 6.2 パターン 2 の OD 表

[人]		着駅				
		1 駅	2 駅	3 駅	4 駅	5 駅
発駅	1 駅	0	0	1	0	1
	2 駅	0	0	0	0	0
	3 駅	0	0	0	0	1
	4 駅	0	0	0	0	0
	5 駅	0	0	0	0	0

表 6.3 パターン 3 の OD 表

[人]		着駅				
		1 駅	2 駅	3 駅	4 駅	5 駅
発駅	1 駅	0	0	0	1	1
	2 駅	0	0	0	0	0
	3 駅	0	0	0	0	0
	4 駅	0	0	0	0	1
	5 駅	0	0	0	0	0

6.3.2 シミュレーション結果

図 6.3，6.4，6.5 にパターン 1〜3 の時の結果をそれぞれ載せる。想定通り，旅客の乗降がある駅のみに快速が停車し，正しく定式化できていることが確認できた。

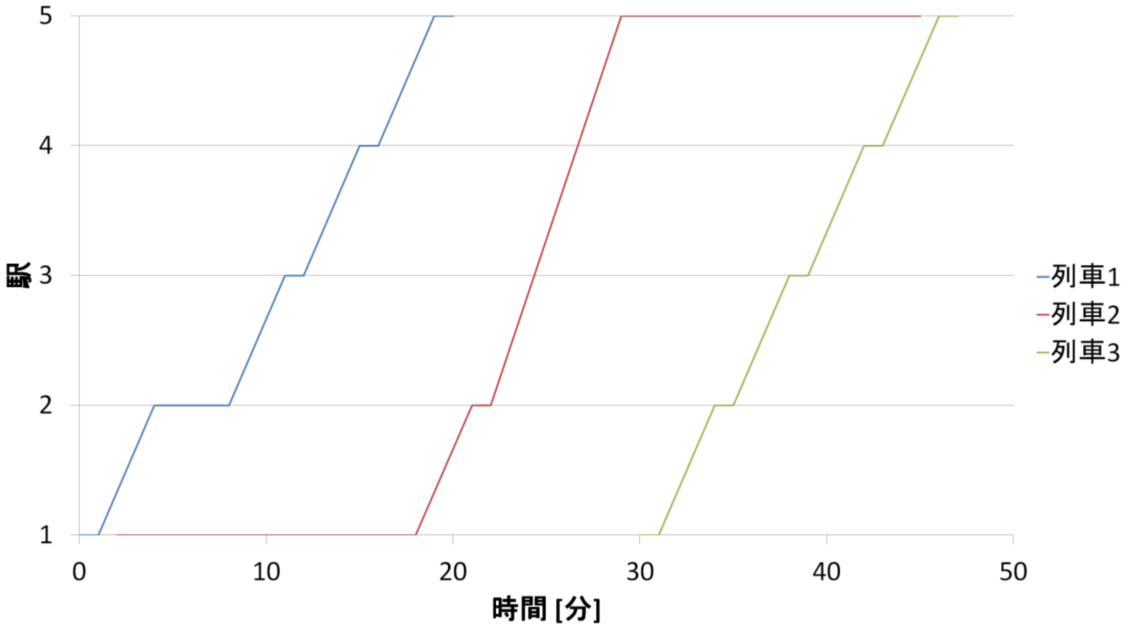


図 6.3 パターン 1 の結果

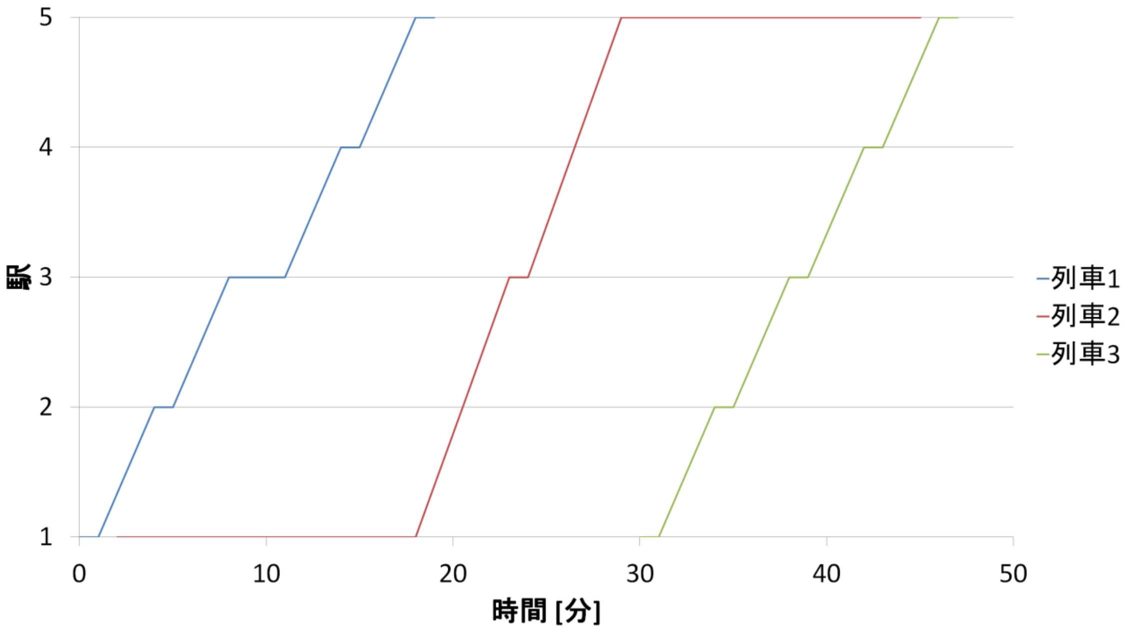


図 6.4 パターン 2 の結果

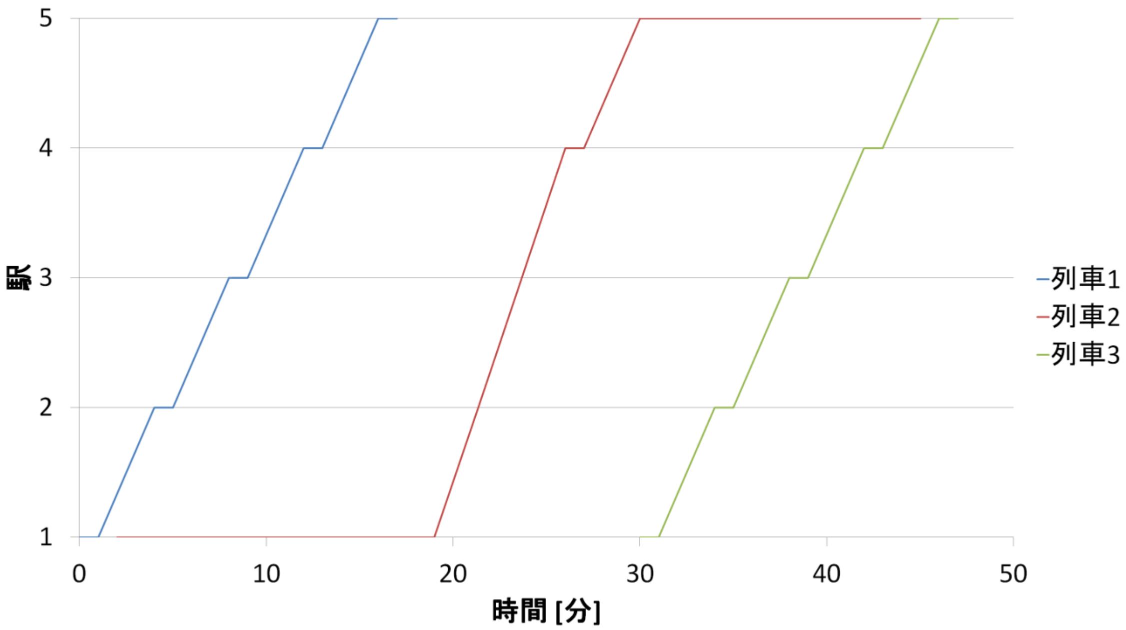


図 6.5 パターン 3 の結果

6.4 離散 OD 表の作成

列車ダイヤを考えるにあたり, 旅客が駅間で何人移動しているかを表す OD 表はとても重要なデータである。しかし，それらの OD 表は一日単位で何人移動するか，という形で与えられていることがほとんどである。その与えられた OD 表を 1 分あたりなどの単位で割ると，本来整数値であるはずの旅客の人数が少数の形で表されることになる。本研究ではこの問題を解決し，旅客を整数単位で扱えるようにするため，離散的に旅客が現れるモデルを提案する。そのイメージ図を図 6.6，6.7 に示す。この図では 10 分に 3 人の旅客が出現するというデータが与えられた時にどのようにデータを扱うかを説明している。1 分あたりの旅客移動を考えると図 6.6 のように 1 分あたりに 0.3 人移動する計算になるが，旅客を整数値で扱うため，図 6.7 のように 1 分，5 分，8 分に 1 人ずつ旅客が出現する，というように離散的に旅客が出現する，というように考える。この際図 6.8 のように旅客の出現がある時間に集中することなく，図 6.6 のようになるべく均一になるように注意する。

本研究では離散 OD 表を作成するにあたって，以下のようにルールを定める。

① 旅客はある時間間隔以上でしか出現しない

② 各駅停車が現れる間隔で OD パターンは周期化

③ 各駅停車の発車時間（ダイヤ固定）に必ずどの駅間 OD も 1 人以上の旅客が現れる

④ なるべく均等になるように旅客は出現する

このルールについてそれぞれ表 6.4 を使って説明する。表 6.4 は一日あたりの OD データのみが与えられている路線で，駅 1〜駅 16 の 16 駅ある路線の駅 1 から駅 2〜駅 16 に向かう旅客がいつ何人移動するかを表した離散 OD 表である。①は前章の旅客群出現と同じ間隔

で考えることを意味している。今回は 15 秒単位で現れるとしている。表 2 の一番上の行は一日あたりの OD 表を基に，15 秒ごとに何人の旅客がどの駅に移動するかを表したものである。この路線では各駅停車は 6 分に 1 本走っており，各駅停車の間に快速を走らせることを考える。②は 0〜6 分の旅客出現パターンと 6〜12 分の旅客出現パターンが同一であることを意味している。つまり，この路線は 6 分に 1 回同じパターンで旅客が出現する。ところで，旅客は 15 秒単位でしか出現しないため，6 分で 24 回出現チャンスがあることになる。表 6.1 の 3 行目の値は 6 分あたりに出現する旅客の数を表したものである。この数を N とすると N は 24/N が 1 行目の 15 秒あたりの OD と一番値が近くなるように選ばれた値である。たとえば駅 1 から駅 7 に向かう旅客は 6 分の間に 5 人出現する。この 5 人が何秒の時点に出現するかのルールを表現したものが③と④である。この路線の各駅停車の 1 駅の発車時間は 0 分，6 分，12 分発であるので 0 分と 6 分は必ず 1 人出現し，その間に均等に出現するように，出現パターンを考えている。各駅停車の発車時間に必ず旅客が出現するようにルールを設定しているのは，各駅停車のダイヤが固定されていると考えるため，各駅停車の発車時間に旅客が一番出現するようにし，他の特定の時間に旅客が集中することがないようにするための工夫である。以上①〜④のルールを元に各駅間 OD を考える。

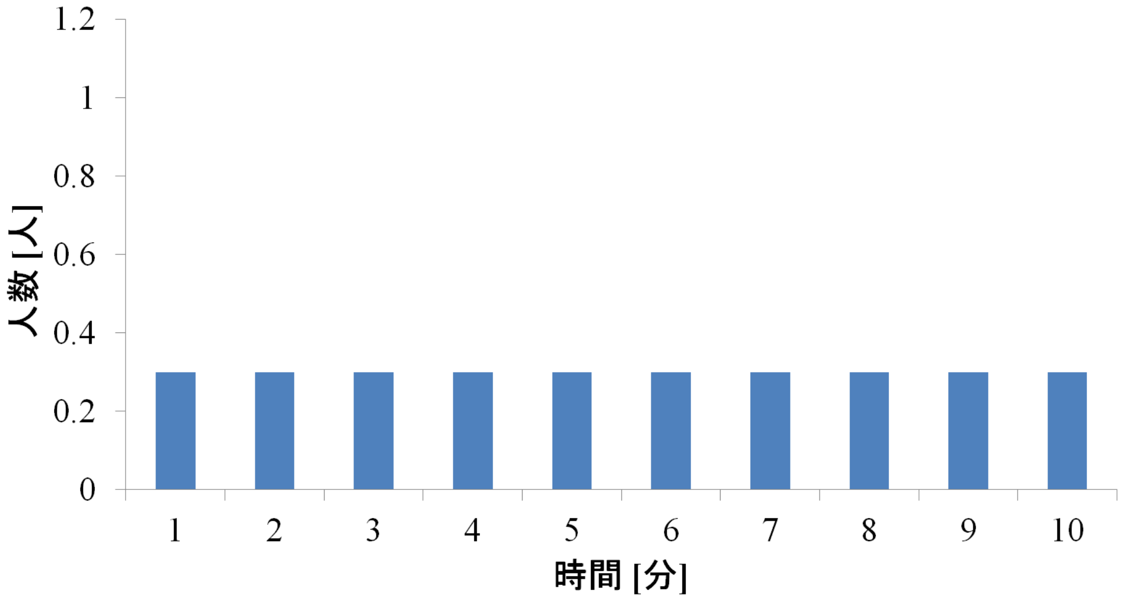


図 6.6 従来の旅客出現パターン

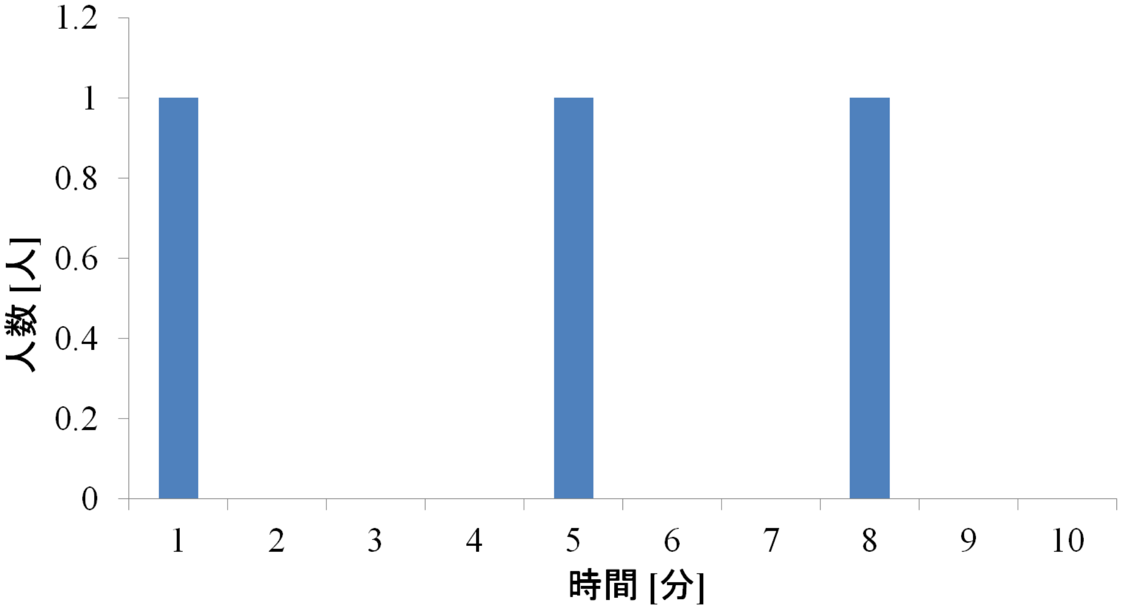


図 6.7 旅客離散出現パターン

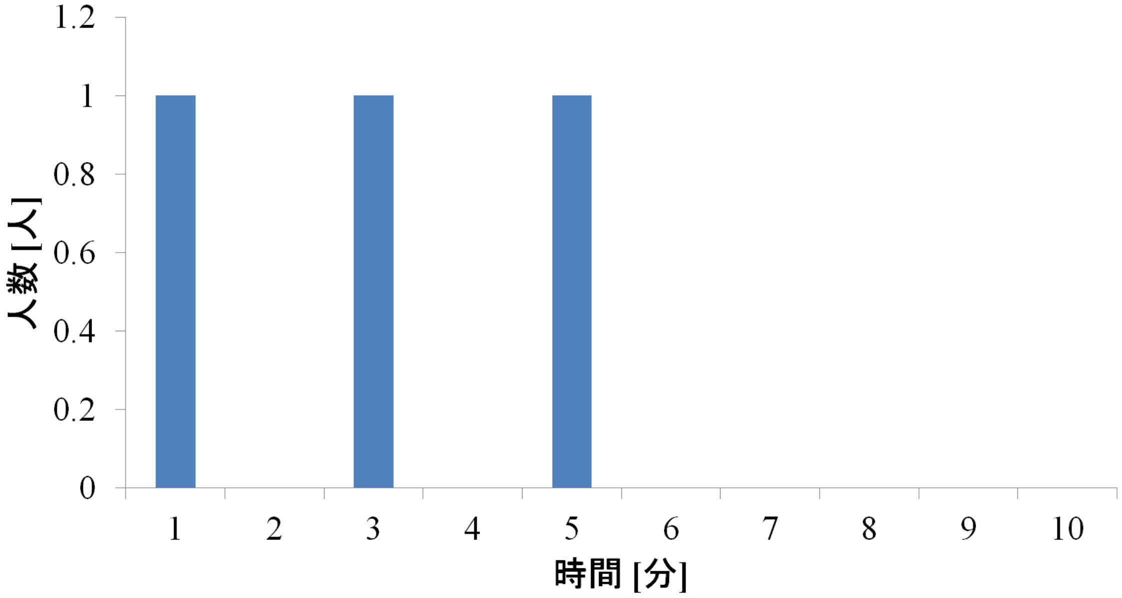


図 6.8 偏った旅客離散出現パターン

表 6.4 離散 OD 表例

		OD tabke of each 15 second		0.138	0.135	0.181	0.066	0.341	0.217	0.138	0.105	0.237	0.194	0.083	0.129	0.421	0.130	1.124
	Arr St.		St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	St.6	St.7	St.8	St.9	St.10	St.11	St.12	St.13	St.14	St.15	St.16
Dep St.	St.1	The number of passenger of each 6 minutes		3	3	4	2	8	5	3	3	6	5	2	3	10	3	27
Min	Sec	N/24		0.125	0.125	0.1667	0.0833	0.3333	0.2083	0.125	0.125	0.25	0.2083	0.0833	0.125	0.4167	0.125	1.125
0	0			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
	15			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	30			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	45			0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
1	0			0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
	15			0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1
	30			0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	45			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0			1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	2
	15			0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	30			0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1
	45			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
3	0			0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1
	15			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	30			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	45			0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1
4	0			1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	2
	15			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
	30			0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	45			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5	0			0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1
	15			0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	30			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
	45			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
6	0			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
	15			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	30			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	45			0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
7	0			0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
	15			0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1
	30			0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	45			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
8	0			1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	2
	15			0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	30			0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1
	45			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
9	0			0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1
	15			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	30			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	45			0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1
10	0			1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	2
	15			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
	30			0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	45			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
11	0			0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1
	15			0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	30			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
	45			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
12	0			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2

6.5 実路線を用いた快速導入の数値検証

本節では実際の路線を用いた数値検証について記していく。

6.5.1 ケース設定

図 6.9 に想定する路線の概要を示す。全 16 駅，全長 12.0km の路線である。今回のケーススタディでは 1 駅から 16 駅へ向かう列車について考える。表 6.5 は一日あたりの OD データから導いた想定する路線の 15 秒あたりの OD 表である。この OD データを基に 6.3 節で提案した手法を用いた離散 OD 表を作成した。すべての駅間を載せることは紙面の都合上省略する。その一部として 1 駅発の離散 OD 表を表 6.4 に示す。表 6.5 の OD データから分かる通り，この路線は終着駅である 16 駅に向かう旅客が多い路線である。2 章で示した各定数について，各駅停車の各駅発着時刻は図 6.1 の細線のものを，基準運転時分は図 6.5 のものを，その他の定数については表 6.6 に示したものを使用する。また，末端駅に関しては 2 つホームを使用でき, それ以外の駅に関しては 1 つしかホームを使用できないものとする。

表 6.5 15 秒あたりの OD 表

Dep. \ Arr.	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6	St. 7	St. 8	St. 9	St. 10	St. 11	St. 12	St. 13	St. 14	St. 15	St. 16
St. 1	-	0.138	0.135	0.181	0.066	0.341	0.217	0.138	0.105	0.237	0.194	0.083	0.129	0.421	0.130	1.124
St. 2	-	-	0.094	0.126	0.046	0.236	0.150	0.095	0.073	0.164	0.135	0.057	0.089	0.291	0.090	0.778
St. 3	-	-	-	0.123	0.045	0.231	0.147	0.093	0.071	0.160	0.131	0.056	0.087	0.284	0.088	0.760
St. 4	-	-	-	-	0.061	0.313	0.199	0.126	0.097	0.218	0.178	0.076	0.118	0.386	0.120	1.032
St. 5	-	-	-	-	-	0.111	0.070	0.045	0.034	0.077	0.063	0.027	0.042	0.136	0.042	0.364
St. 6	-	-	-	-	-	-	0.393	0.249	0.190	0.428	0.351	0.150	0.233	0.760	0.236	2.030
St. 7	-	-	-	-	-	-	-	0.153	0.117	0.263	0.216	0.092	0.143	0.467	0.145	1.249
St. 8	-	-	-	-	-	-	-	-	0.073	0.163	0.134	0.057	0.089	0.290	0.090	0.774
St. 9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.124	0.102	0.043	0.067	0.220	0.068	0.588
St. 10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.237	0.101	0.157	0.512	0.159	1.369
St. 11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.082	0.127	0.415	0.129	1.110
St. 12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.053	0.172	0.053	0.459
St. 13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.271	0.084	0.723
St. 14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.297	2.560
St. 15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.732
St. 16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

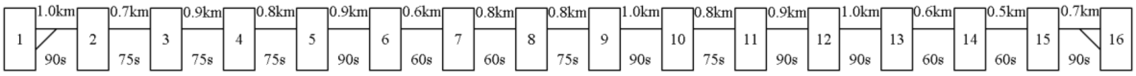


図 6.9 路線概略と基準運転時分

表 6.6 定数一覧

LS_j^s	15 秒 (終着駅は 30 秒)
LA	60 秒
LD	60 秒
LT	90 秒
K	30 秒
M	1000

6.5.2 結果と考察

総通過駅数と旅客総旅行時間の関係を図 6.10 に示す。ここで通過駅数が 0 のものは，元のダイヤ，つまり全列車各駅停車のダイヤのものを意味する。快速列車の総通過駅数が増えることは，快速列車停車駅間を移動する旅客にとっては旅行時間の短縮につながるが，快速列車が停車しない旅客にとっては待ち時間増加に伴い旅行時間の増加につながるというトレードオフがあり，総通過駅数には最適点が存在することになる。今回設定した条件下では，総通過駅数が 4 駅の時が最も旅客総旅行時間が短い点となった。元ダイヤである総通過駅数 0 駅に比べ，旅客総旅行時間は 3.3%の改善が得られた。今回の数値計算では，均等に旅客が出現するようなモデルを考えた。しかし，実際に快速列車を走らせた際は，旅客はより快速列車に集中することが考えられるため，本数値計算結果よりも改善量はより大きくなるものと考えられる。ところで，今回各駅停車の発車間隔は 6 分であった。すべて各駅停車の場合，各駅での最小続行時分は$LT + LS$の 1 分 45 秒である。快速が 2 駅と 15 駅に停車した場合，前後の各駅停車とそれぞれ 1 分 45 秒ずつ，合計で 3 分 30 秒空けな

ければならない。つまり，快速を運転した場合最大で 6 分から 3 分 30 秒を引いた 2 分 30 秒の時間，1 駅から 16 駅の運転時分を短縮することができる。快速が 1 駅通過するごとに $LT + LS$ の 45 秒ずつ走行時分が短くなるので，4 駅通過した時点でこれ以上駅を通過しても運転時分は短くならない駅数となる。これは総通過駅 4 駅の時に目的関数が最小となっている理由の一つと考えられる。ただし，2 駅が通過となった場合は 15 秒，15 駅が通過となった場合 45 秒ずつ詰められる時間が増える。そのため，15 駅を通過，もしくは 2 駅と 15 駅の双方を通過した場合は，5 駅を通過した時点でこれ以上通過しても運転時分は短くならない駅数となる。

次に最適な総通過駅数であった，通過駅数 4 駅の時のダイヤを図 6.11 に示す。この路線では乗車人数が少ない順に 5，12，9，15，13 駅である。図 6.11 から分かる通り，通過駅には駅 9，12，13，15 駅が選定された。旅客の乗車人数が少ない順に 4 駅選ばれるとすると，駅 5，9，12，13 駅のはずであるが，最も少ない乗車人数である駅 5 は選ばれず，5 番目の乗車人数である駅 15 が選ばれている。これはこの路線が終着駅である駅 16 に向かう旅客が多く，乗車時間が長い始発駅に近い駅から乗る旅客を快速列車で拾い乗車時間が短い旅客は拾わない，という選択をしたこと。また，15 駅を通過することで前述した通り端末駅間の走行時分を短くできるためである。これらの結果，最適な通過駅数の導出だけでなく，通過駅選定の際も本論文のように数理最適化の枠組みに載せるなどの方法による検証が必要であることが分かった。

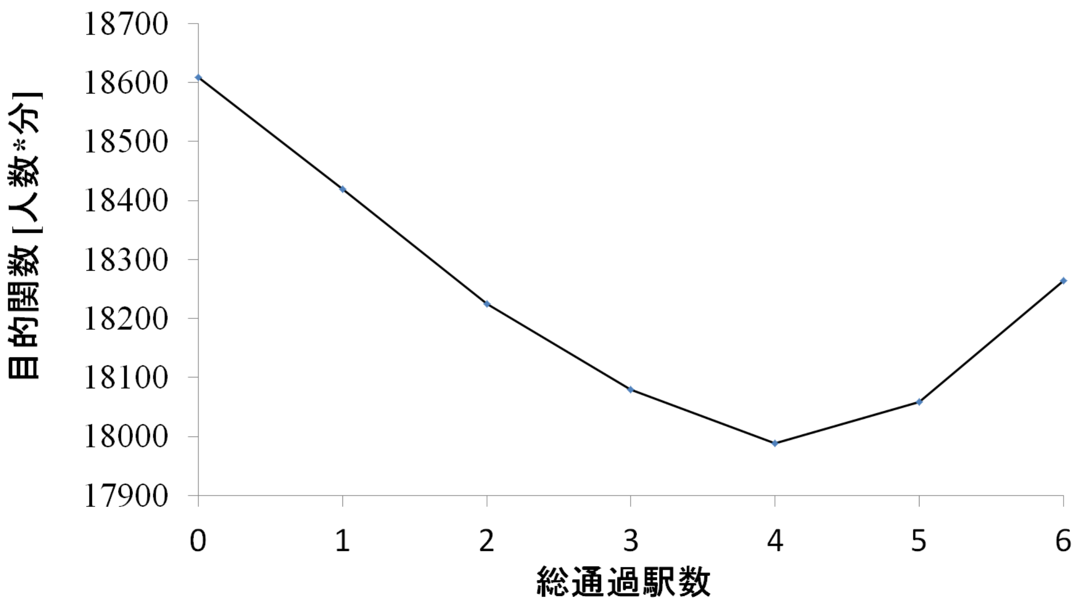


図 6.10 総通過駅数と目的関数値の関係

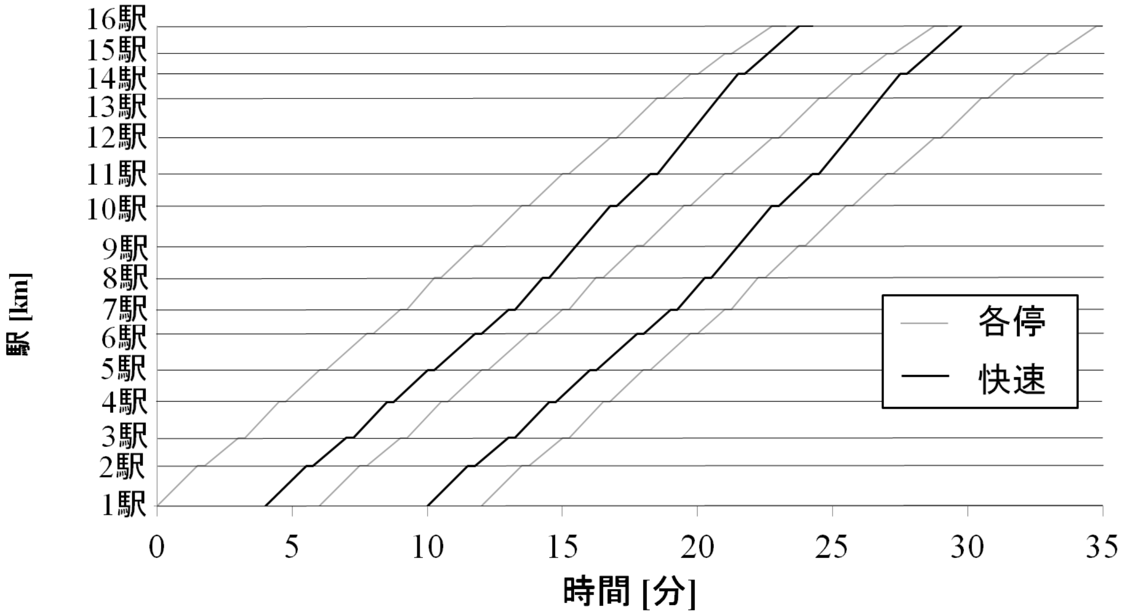


図 6.11 最適なダイヤ

6.6 まとめ

今回，全列車各駅停車で運行されている路線に快速列車を導入し，旅客の総旅行時間を最小化するダイヤを得るための, 数理計画問題としての定式化および離散 OD 表の作成についての提案を行った。その結果，従来得ることのできなかった，最適性の保証をしつつ，旅客総旅行時間が最小となる通過駅の組合せおよび各駅発着時刻を得ることができた。本ケーススタディでは旅客総旅行時間で 3.3%という改善結果が得られた。前章で考察したとおり，実際に快速列車を導入した効果はこの数値を上回ることが予想される。

また，本ケーススタディの結果，快速列車の通過駅を選定するにあたり，単純に乗降客数が少ない駅を選ぶだけでは最適なダイヤが得られないことが分かった。路線の傾向に応じた通過駅を本論文のように数理最適化の枠組みに載せるなどの方法により選定する必要があることが分かった。

本論文の想定ケースのように，全列車各駅停車で運行されており待避施設を持たない路線は多い。つまり定式化は同一のままデータ型を変更するだけで数値計算を行うことができ，本論文で提案した手法の汎用性は高いと考えている。しかし，列車の待避および旅客の乗換も考慮できるようにすることは，待避施設が存在する路線の考慮に加え，最適ダイヤを得るための待避施設の検討にも応用範囲が広がる。そのため，列車の待避および旅客の乗換が存在するモデルの定式化を行えば，より効果的に旅客をサービス向上させることができる。また，快速列車を導入することは旅客サービスの向上だけでなく，運転手法を工夫することにより惰行時間を延ばし，省エネルギー化も達成できる。図 6.12[d]は 500m の駅間が 2 つ連なる区間を，一方は真ん中の駅に停車し，もう一方は真ん中の駅を通過した際の消費エネルギーを表した図である。真ん中の駅を停車した場合，2 駅間合計の消費エネルギ

ーは走行時分 103 秒で 10.2kWh である。一方真ん中の駅を通過した場合の消費エネルギーは走行時分 73 秒で 6.5kWh である。一駅通過することにより約 17%の消費エネルギーの削減が見られた。駅間を一つ通過するごとにほぼ線形に消費エネルギーは減少していくと考えられ，速達化と消費エネルギーの双方を達成できると考えられる。

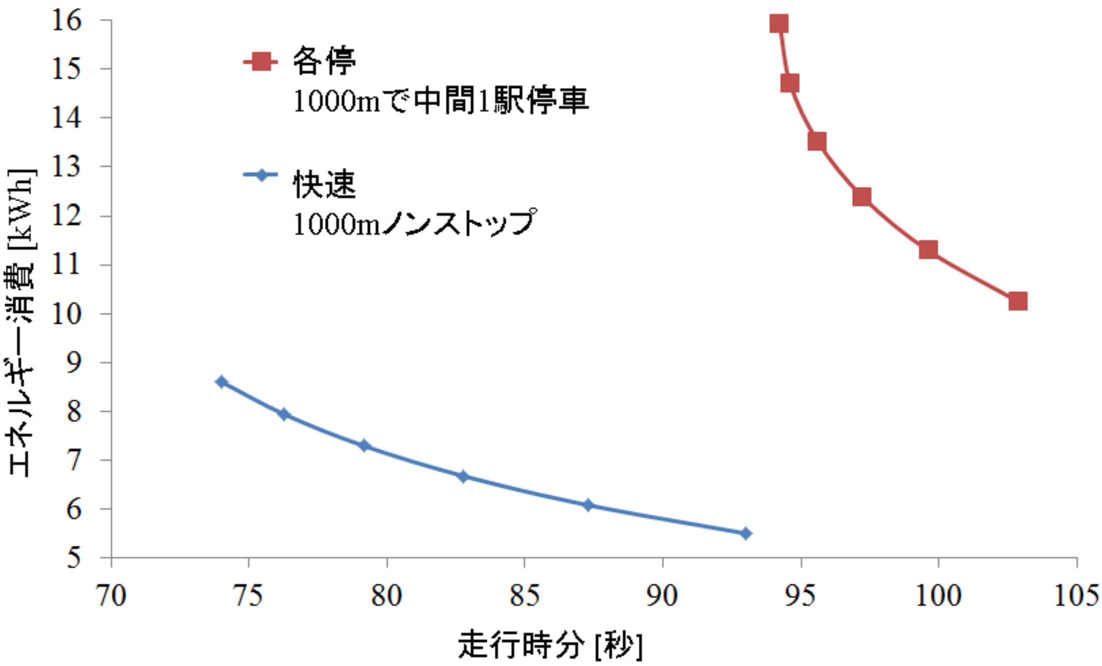


図 6.12 駅停車と通過の場合の消費エネルギー比較[d]

第 7 章　まとめ

7.1 本研究の結論

本論文では，旅客の目線に立って列車のスケジュールを最適化することを目的に，混合整数計画法での定式化の検討を行った。その上で，旅客が「速達性」を重視して鉄道を利用していることに着目し，快速を活かすことにより，運行計画では旅客の総旅行時間を小さくすることによって旅客の満足を上げ，また運転整理では旅客が被る遅延時分と列車の混雑を下げることによって不満を下げる手法について検討した。

まず，運転整理のパートについてまとめる。運転整理を行う場面では，旅客混雑に着目した定式化を提案し，最適な運転整理案の検討を行った。快速が運行されている路線では，快速の停車駅の乗降人数が多い，早く目的地につける快速に旅客が集中しやすい，という特徴がある。そのような路線では①遅れた列車の前を走る列車の発車を遅らせ，②後続の快速を各停よりも先に通す，この 2 点が重要であることが明らかになった。その際，さらなる遅延拡大を防ぐためにも，旅客の案内の場面で①前を走る列車に乗車するよう呼びかけ，②後続の快速が続行していること案内する，ことが運転整理案を実際に運用する上で重要であるという知見が得られた。

続いて，運行計画のパートについてまとめる。地下鉄のように全列車各駅停車で運転されている路線に快速を導入するための定式化を行い，旅客の総旅行時間を最も効率よく下げる運行計画作成についての検討を行った。その結果, 実路線によるケーススタディで 3.3% という改善結果を得ることができた。両端を乗り通す旅客にとって，時間の削減は約 13% であり，従来鉄道を利用していなかった旅客を引き込める可能性がある。また，快速を導入することは惰行時間増加によるエネルギー削減につながり，旅客の満足向上だけでなく，それを導入する鉄道事業者にとってもメリットが大きい手法であることが示せた。

7.2 今後の課題

～運転整理～

・最適性の保証

第 4 章の乗車率を考慮した運転整理を考える場面では, 8 分程度の遅れケースでは最適性の保証を得る運転整理案が得られたが，15 分遅延のケースに対しては最適性の保証を得ることができなかった。ハード面からは，スーパーコンピュータの活用で，運転整理の問題は現段階で数理最適化の問題として求解できる問題の大きさかという検証を行いたい。ソフト面からは，さらなる計算領域削減の検討，またより素早く計算できるモデル化の見直しが必要である。

・運転整理手法の充実

今回，列車の時間調整および順序変更のみを考えたが，実際に行われている運転整理手法は数多くあり，それらの手法の定式化が望まれる。現実には折り返し駅の線路の輻輳，また車両不足が起きるといった問題があり，折り返しを含めた最適解の探求が望まれる。

〜運行計画〜

・追い越しができる路線の検討

第 6 章では，追い越し設備のない地下鉄を想定して検討を行った。しかし，追い越し設備を持つ路線を検討することで，地下鉄以外の路線にも適用可能であること，最適な追い越し設備新設検討にも使えること，を検討することができるため，追い越しができるよう定式化に改良を加えることが肝要である。

参考文献

[1] 国土交通省　鉄道輸送統計年報
http://www.mlit.go.jp/k-toukei/10/annual/10a0excel.html

[2] 電気鉄道ハンドブック編集委員会：「電気鉄道ハンドブック」，コロナ社，2007.

[3] 柴田宗典，武藤雅威，奥田大樹：「旅客の嗜好を考慮した交通機関分担率推定手法の開発」，鉄道総研報告，Vol.25，No.12，pp.35-40，2011.

[4] 日比野直彦，山下良久：「年齢階層別鉄道経路選択行動の時系列変化に関する研究」，土木計画学研究・論文集，No.27，Vol.3，pp.515-522，2010.

[5] 國松武俊，平井力，富井規雄：「マイクロシミュレーションを用いた利用者の視点による列車ダイヤ評価手法」，電気学会論文誌 D，Vol.130，No.4，pp.459-467，2010.

[6] 東京急行電鉄「東横線に『特急』を新設」http://www.tokyu.co.jp/file/010202.pdf

[7] 東日本旅客鉄道「2015 年 3 月のダイヤ改正について」
http://www.jreast.co.jp/press/2014/20141222.pdf

[8] 富井規雄：「鉄道ダイヤのつくりかた」，オーム社，2012.

[9] (財)鉄道総合技術研究所　運転システム研究室：「鉄道のスケジューリングアルゴリズム」，NTS，2005.

[10] 羽田明生，土屋隆司：「鉄道における数理最適化技術の活用可能性」，鉄道総研報告，Vol.27，No.2，pp.45-48，2013.

[11] 今野浩：「役に立つ一次式 整数計画法『気まぐれな王女』の 50 年」，日本評論社，2005.

[12] 依田和大，古林敬顕，中田俊彦：「混合整数計画法を用いた自動車用バイオエタノールのサプライチェーンの設計」，日本エネルギー学会誌，Vol.92，No.11，pp.1173-1186，2013.

[13] 守屋智之，龍原哲：「収益の安定性を考慮した持続可能な木材供給量水準の予測」，日本森林学会誌，Vol.96，No.2，pp.109-116，2014.

[14] B. Moradzadeh, and K. Tomsovic : “Mixed Integer Programming-Based Reconfiguration of A Distribution System with Battery Storage”, North American Power Symposium, pp.1-6, 2012.

[15] K. Kritikos, and D. Plexousakis : “Mixed-Integer Programming for QoS-Based Web Service Matchmaking”, IEEE Transactions on Services Computing, Vol.2, No.2, 2009.

[16] 古林隆：「線形計画法入門」，産業図書，1980.

[17] 今野浩：「整数計画法」，産業図書，1981.

[18] 宮平隆平，松井知己：「ここまで解ける整数計画」，システム/制御/情報，『数理計画』特集号，Vol.50，No.9，pp.363-368，2006.

[19] IBM ILOG CPLEX
http://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer/

[20] 久保田博：「鉄道工学ハンドブック」，グランプリ出版，1995.

[21] 鉄軌道輸送の安全にかかわる情報(平成２５年度版)の公表について
http://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_fr8_000019.html

[22] 電気学会・鉄道における運行計画・運行管理業務高度化に関する調査専門委員会：「鉄道ダイヤ回復の技術」，オーム社，2010.

[23] S. Tanaka, K. Kumazawa, and T. Koseki : “Passenger Flow Analysis for Train Rescheduling and Its Evaluation”, Proc. International Symposium on Speed-up, Safety and Service Technology for Railway and Maglev Systems (STECH’09), Niigata, Japan, 2009.

[24] K. Kumazawa, T. Hara, and T. Koseki : “A Novel Train Rescheduling Algorithm for Correcting Disrupted Train Opeation in a Dense Urban Environment”, COMPRAIL 2008, pp.565-574, 2008.

[25] Y. Nagasaki, M. Eguchi, and T. Koseki : “Automatic Generation and Evaluation of Urban Railway Rescheduling Plan”, Proc. International Symposium on Speed-up, Safety and Service Technology for Railway and Maglev Systems (STECH’03), Tokyo, Japan, 2003.

[26] 富井規雄，田代善昭，田部典之，平井力，村木国満：「利用者の不満を最小にする列車運転整理アルゴリズム」, 情処学会数理モデル化と応用, Vol.46, No.SIG2(TOM11), pp.26-38, 2005.

[27] 國松武俊，平井力，村木国満，高場基司：「旅客流動と評価に基づく運転整理案作成アルゴリズム」，電気学会交通・電気鉄道研究会，No.TER-08-15，2008.

[28] S. Wegele, R. Slovak, and E. Schnieder: “Automatic dispatching of train operations using hybrid optimization method”, Proc. The 8th World Congress on Railway Research (WCRR2008), Seoul, Korea, 2008.

[29] A. D’Ariano, F. Corman, and M. Pranzo: “Reordering and Local Rerouting Strategies to Manage Train Traffic in Real Time”, Transportation Science, Vol.42, No.4, pp.405-419, 2008.

[30] J. Törnquist: “Computer-based decision support for railway traffic scheduling and dispatching: A review of models and algorithms”, Proc. The 5th Workshop on Algorismic Methods and Models for Optimization of Railways (ATMOS 2005), Palma de Mallorca, Spain, 2005.

[31] Twan Dollevoet, Dennis Huisman, Marie Schmidt, Anita Schöbel, “Delay Management with Re-Routing of Passengers”, Econometric Institute Report (EI), 2010.

[32] 千種健二：「混合整数計画法に基づく列車運行乱れ時の旅客損失に主眼を置いた運転整理最適化」，東京大学大学院情報理工学系研究科修士論文，2011.

[33] 千種健二，佐藤圭介，古関隆章：「混合整数計画法に基づく列車運行乱れ時の旅行時間増大量に主眼を置いた運転整理最適化」，電気学会論文誌 D，Vol.132，No.2，pp.170-177，2012.

[34] 富井規雄：「列車ダイヤのひみつ—定時運行のしくみ—」，成山堂，2005.

[35] 森拓哉：「旅客の遅延時分を混合整数計画法で最小化する運転整理支援システム」，東京大学工学部卒業論文，2013.

[36] 「鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル（２０１２年改訂版）」
http://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_fr1_000040.html

[37] 曽根悟：「ソフトウェアによる旅行時間短縮の可能性とその評価」，電気学会論文誌 D,

Vol.107，No.3，pp.351-357，1987.
[38] 電気鉄道インテリジェント化調査専門委員会編：「電気鉄道のインテリジェント化」，電気学会技術報告(Ⅱ部)，第 341 号，1990.
[39] 大澤実, 赤松隆 : 「“列車の渋滞”を抑制するための制御方策と運行ダイヤの同時決定」，土木計画学研究・講演集，Vol.46，No.233，2012.
[40] C. Liebchen : “The First Optimized Railway Timetable in Practice”, Transportation Science, Vol.42, No.4, pp.420-425, 2008.
[41] 國松武俊，平井力，富井規雄：「利用者デマンドを反映した列車ダイヤ作成アルゴリズム」，電気学会論文誌 D，Vol.129，No.1，pp.10-20，2009.
[42] 日本地下鉄協会「世界の地下鉄データ一覧表」 http://www.jametro.or.jp/world/index.html
[43] 日本地下鉄協会編集 : 「世界の地下鉄 : 151 都市のメトロガイド」, 日本地下鉄協会, 2010.
[44] 東急電鉄「田園都市線の混雑緩和策を積極的に推進します」
http://www.tokyu.co.jp/file/070115.pdf
[45] 東京メトロ「平成 19 年 3 月 18 日(日)東京メトロ東西線のダイヤ改正」
http://www.tokyometro.jp/news/2007/2007-05.html
[46] 東京メトロ「平成 21 年 3 月 14 日（土）東京メトロ東西線ダイヤ改正」
http://www.tokyometro.jp/news/2009/2009-01.html
[47] カナロコ「市営地下鉄ブルーラインに『急行』，14 年度運行目指す /横浜」
http://www.kanaloco.jp/article/46026/cms_id/45817
[48] 香取照臣，高橋寛，泉隆：「優等列車の運行による総旅行時間短縮―遺伝的アルゴリズムを用いた停車駅の決定―」，電気学会論文誌 D，Vol.125，No.4，2005.
[49] T. Katori, T. Izumi, and Y. Takahashi: “Shortening total trip time by short station dwell time and passing local trains”, WIT press, Computers in railways VIII, pp.769-777, 2002.

発表文献

[a] 森拓哉，古関隆章：「混合整数計画法を用いた列車乱れ時の再スケジューリング最適化ー列車混雑度反映法の基礎的検討ー」，電気学会交通・電気鉄道研究会，TER-13-048，2013.

[b] 森拓哉，古関隆章：「選択停車型を用いた旅客総旅行時間の数理的最適化」，電気学会交通・電気鉄道・フィジカルセンサ合同研究会，TER-14-014，PHS-14-014，2014.

[c] 森拓哉，渡邉翔一郎，古関隆章：「混合整数計画法による全列車各駅停車の路線に快速列車を取り入れることによる旅客総旅行時間最小化」，NU-Rail，2015（発表予定）.

[d] Shoichiro Watanabe, Takuya Mori, and Takafumi Koseki, "ENERGY-SAVING SCHEDULE DESIGN BY INSTALLING OPTIMIZED RAPID SERVICE IN DC-ELECTRIC RAILWAYS", The International Symposium on Speed-up and Sustainable Technology for Railway and Maglev Systems (STECH2015), November 2015, Chiba, Japan (Accepted).

[e] 渡邉翔一郎，森拓哉，古関隆章：「省エネルギー運行管理のための運転法の比較分析と列車群電力可視化」，電気学会交通・電気鉄道研究会，TER-13-017，2013.

[f] 大橋和也，森拓哉，古関隆章：「運転整理時における乗車率に応じた旅客行動の変化のモデル化」，日本電気学会第 20 回鉄道技術連合シンポジウム(J-Rail 2013)，No.S9-10，2013.

論文誌

[A] 森拓哉，渡邉翔一郎，古関隆章：「数理計画法に基づく全列車各駅停車の路線に優等列車を取り入れることによる旅客総旅行時間の最小化」，電気学会論文誌 D（査読中）.

[B] 大橋和也，森拓哉，古関隆章：「運転整理時における乗車率に応じた旅客行動の変化のモデル化」，電気学会論文誌 D，J-Rail 2013 特集，2015（採録決定）.

謝辞

本論文の執筆にあたり，多くの方々からご支援，ご協力をいただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

指導教員である古関隆章先生には，研究室ミーティングや他所との共同打ち合わせ，輪講発表の場で，貴重なご意見，またクリティカルなご支援をいただきました。先生自身がご多忙なため，実際に議論できた回数は多くはなかったかもしれませんが，その数少ない議論の中で頂いた指摘はいつでも核心をついており，本研究を進める上で大きな助けとなりました。
しかし，一番の思い出はやはりインドで過ごした 1 週間弱です。私が高熱を出して寝込んだ時に支援物資を頂いたこと，復帰した後の先生の笑顔，そしてなによりも空港で飲んだお酒は人生で一番美味しいお酒だったと思います。
学部 4 年の時から 3 年間，大変お世話になりました。改めて御礼申し上げます。

共同研究先である，西日本旅客鉄道の皆様，鉄道総合研究所の皆様，工学院大学の曽根先生には鉄道の専門家としての立場から，いつも厳しいコメントをいただきました。そのコメントは，本研究を進める上ではもちろん，学内の審査などの場では自身を持って現状について意見することができたと感じております。ありがとうございました。

同じく共同研究先である千葉工業大学富井規雄先生，工学院大学高木亮先生，上智大学宮武先生には，学生 WG などを通じて細かく面倒をみていただきました。至らない発表をしてしまった時も，厳しい口調になりながらも熱心にご指導いただきました。ありがとうございました。

当研究室の技術職員の髙田様には，研究や生活に必要な資材を迅速に存分に準備していただきました。おかげでスムーズに研究生活を送ることができました。ありがとうございました。
秘書の松崎様，尾崎様は，陰からいつもご支援をいただいておりました。時々声をかけていただけることがとても励みになっておりました。ありがとうございました。
博士課程の Shin さんには，研究でも私生活でも本当にお世話になりました。研究では数多くの論文を通してきた実力を活かし，論文誌投稿の際には実にクリティカルで熱心なご指導をいただきました。初めて論文を書くにあたり困惑している私に，たくさんのヒントをいただきました。私生活では，日中の喫煙所でのトーク，終わったあとの飲み。休日に旅行に行ったこともありました。最高のリフレッシュになっておりました。ありがとうご

ざいました。

博士課程の渡邉さんには，同じく鉄道の研究をやっている立場から，多大なるご指導，また多数の研究のアイディアをいただきました。研究歴や年齢では先輩ながら，古関研究室歴としては同期として，気軽に議論に付き合っていただきありがとうございました。唯一の心残りは合コン，お見合いの機会をセッティングできなかったことです。また，いい案件がありました際は，お誘いいたします。お楽しみに。

修士課程の趙さんは，学年の同期として，輪講の前などにお互いに励まし合いながら研究を進めていきました。平日は食堂で一緒にご飯を食べたり，休日に時々でかけたりと，楽しい 2 年間でした。ありがとうございました。中国に帰ってもお元気で。甘いものにはお気をつけください。

卒論生の大橋くんには，同じ研究分野の立場から，時々ハッとするような意見をいただきました。この修論がまともな形でまとまったのも，大橋くんからの助言があったからです。ありがとうございました。

その他，Valerio さん，Duc さん，Cuong さん，渡辺さん，Travis さん，松岡くん，成田くん，川野辺くん，前田くん，美浦くんには，研究室ミーティングの場や研究室，飲み会など様々な場面でお世話になりました。ありがとうございました。

私生活では，電気系の同期，サークルのメンバー，またバイトの同僚，社員の方々など，研究外の場面でとても楽しい経験ができました。大学院生活での 2 年間，本当にいろいろな場所に行き，様々な経験をさせていただきました。深く御礼申し上げます。

最後に，全ての場面で支えていただいた両親の最大限の感謝の意を表し，謝辞とさせていただきます。

森 拓哉