TER－13－008
PHS－13－012

混合整数計画法を用いた方向別複々線の運転整理支援

森　拓哉＊　　古関　隆章（東京大学）

Rescheduling of Railway Operation in Direction-Working Quadruple Track Line Based on Mixed-Integer Programming

Takuya Mori＊, Takafumi Koseki, (The University of Tokyo)

Abstract

In train operation, when disruption happens, train rescheduling is conducted by train dispatchers to recover the train operation.

The authors introduce a train rescheduling algorithm for disruption. This algorithm evaluates all passengers' travel time in correct way and produces the rescheduling diagram based on mixed-integer programming. We also evaluate the deviation of passengers' loss time.

キーワード：運転整理，混合整数計画法，数理計画，旅客損失，旅客流動，複々線
(Train rescheduling, Mixed integer programming, Mathematical programming, Passengers' loss time, Passengers' flow, Quadruple track line)

1.　はじめに

鉄道の大きな特長の一つに専用軌道を持つことによる定時運行率の高さが挙げられるが，ホームドアの設置，線路の高架化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年々増加傾向にある。この輸送障害により乱れた列車ダイヤを調整する業務を「運転整理」と呼ぶ(1)。

運転整理は安全上の厳しい運行ルールや設備上の都合による数多くの制約を満たしつつ，様々な運転整理の手法を適切に組み合わせる非常に困難な作業である。近年，運行管理システムの導入が進み，平常時の運行管理に関しては自動化が進んでいるが，その一方で，運転整理については熟練指令員の経験と勘により行われており，鉄道事業者にとって大きな負担となっている。このような背景から，計算機により運転整理案作成を自動で作成するシステムの開発が強く望まれている(2)。

先行研究(3)～(4)において，今まであまり扱われていなかった旅客損失に主眼を置いた運転整理支援システムが提案された。これにより，旅客の旅行時間増大量の観点から最適な運転整理案を自動で作成することができた。しかし，先行研究におけるシステムには実用化に向けてまだまだ課題が残されている。本研究では先行研究の課題の中の一つである旅客流動の見直しを行い，現実の路線への対応を目的としてシステムの拡張を行った。

また同じような研究については文献がある(5)。この研究との相違点については最終章である第 7 章で述べることとする。

2.　提案する運転整理支援システム

〈2･1〉　システムの構成

本研究における運転整理支援システムでは，先行研究にて開発されたシステムの構成に基づくものとする。このシステムでは，列車運行や事故の状況に関する情報の収集が完了している状態を仮定しており，それらの情報を入力データとして与える。

最初に，運転整理を行わない場合，つまり余裕時分を用いた回復運転のみを行う場合の列車運行シミュレーションを行い，その結果から遅延収束目標時刻を決定する。次に，次節で述べる混合整数計画法と呼ばれる最適化手法を数理モデル化された列車運行と旅客流動に適用することでシミュレーションが行われる。遅延収束目標時刻を決定する指針は様々であるため，先行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を境界時刻とし，その時刻までに遅延が解消される仕様としている。最適化の指標として〈2･

3〉節で述べる旅客の損失を目的関数として用いる。

〈2･2〉　混合整数計画法

本研究では最適化手法として混合整数計画法を用いる。線形計画問題の変数の一部または全部に整数条件が付加されたものを整数計画問題といい，特に変数のすべてが整数でないものを混合整数計画問題という [6]。

混合整数計画問題の解法にはさまざまな手法が存在するが，それぞれの問題の性質によって得手不得手があり，万能なアルゴリズムは発見されていない。近年では数理計画ソルバと呼ばれるさまざまな数理計画を解くためのアルゴリズムが搭載されたソフトウェアの開発が進められており，本研究でも定式化した混合整数計画問題を実際に解く部分では，商用の数理計画ソルバ（CPLEX12.2）を用いて求解を行う。

〈2･3〉　最適化の指標

運転整理案の最適性の評価尺度を定めることは非常に困難である。これは，事故の規模や発生時間帯，線区の性格等によって重視する項目が異なることがあるためである。本研究における評価尺度は，鉄道事業者の都合だけではなく，旅客の視点が考慮される。しかし，乱れによる旅客損失にも旅行時間の増大や乗換の手間，混雑率など，様々な要因が絡んでくる。

本研究では旅客の損失のなかで最も顕著である列車待ち時間を含む旅行時間の増大量に着目し，平常時の旅客移動情報（OD データ）を用いて最適化を行う。ここで，旅行時間の総量を評価値として用いないのは，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。

3.　先行研究からの拡張点

本研究では，旅客の旅行時間の増大量を指標としているため，旅客の流動を考える必要がある。先行研究においても旅客流動は考えられていたが，乗換回数の上限を 1 回としていた。そのため普通列車と快速列車が混在し，緩急接続が考慮されている路線で快速が停車しない駅間を移動するとき，旅客は普通列車を乗り通すものと仮定されていた。しかし，図 3.1 で太線で示したように途中駅間を快速で移動した方が旅客は早く目的駅に到達することができる。

上記で示した例は非常に簡単なものであったが，普通列車と快速列車の 2 種別があり，また旅客が最速達列車を選択するモデルでは乗換回数の最大値は 2 回とすることが必要十分である。したがって，本研究では乗換回数の最大値が 2 回となるように変更を加えた。

2 回乗換のへの定式化は 5 章にて行う。

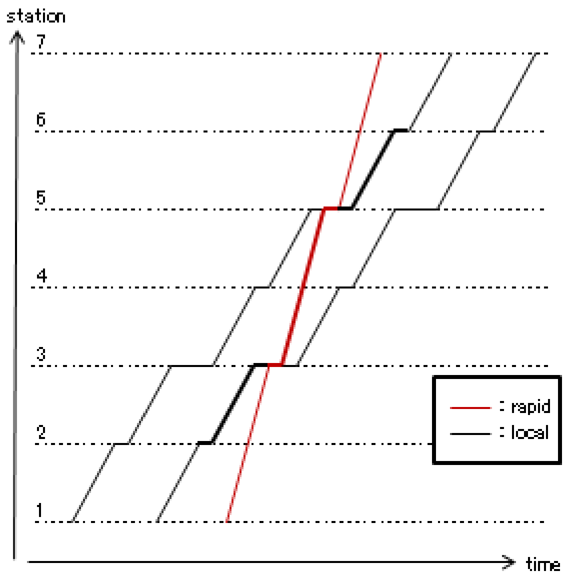

図 3.1　二回乗換例

Fig. 3.1 Transfer two times

4.　前提条件および制約条件

〈4･1〉問題設定

本研究における路線モデルを図 4.1 に示す。

図 4.1　路線モデル

Fig. 4.1 The model of the line

本研究では路線は複々線を想定しており，その上を普通列車と快速列車の 2 種類の列車が走るダイヤについて，片方向のみを考えている。普通列車と快速列車はお互い別々の線路を走り，途中で行き来することはない。また，快速の停車駅と通過駅は交互にあるものとしている。このような路線において，何らかの障害によって初期遅延が発生した際に，遅延発生以降の最適な運転整理ダイヤを決定する。

〈4･2〉列車運行の制約条件

列車を運行するうえで線路設備の都合，また営業の都合上満たさなければいけない制約が存在する。その制約条件を以下に示す。

【物理的制約】

①　各駅間の走行時分は定められた基準運転時分以上でなくてはならない

②　各駅での停車時間は定められた最小停車時分以上でなくてはならない

③　各駅での進入・進出の際，先行列車との間隔は最小進入・進出時隔以上でなくてはならない

④　単一番線上での追い抜きはできない

⑤　各駅で同時に停車・通過できる列車数は，着発線数以内でなくてはならない

【論理的制約】
⑥　計画時刻より早く出発してはならない
⑦　同種別の列車間で追い抜きをしてはならない
⑧　普通列車が快速列車を追い抜いてはならない

〈4･3〉旅客流動の制約条件

旅客の経路選択に関する近似および仮定を以下に示す。
a)　旅客は列車運行に乱れが生じていても，平常時と同時刻に出発駅に出現し，目的駅に向かう
b)　旅客は常に目的駅への最速達列車を選択する
c)　旅客はある一定の時間ごとにまとまって駅に出現する
d)　乗換が発生する場合，乗換回数を 2 回とする

また，旅客群の経路選択を定式化するにあたって，満たさなければならない条件を以下に示す。
ⅰ．各旅客群は一つの経路しか選択できない
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
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
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

5.　定式化

本章で，第 4 章で述べた列車運行および旅客流動の制約条件の定式化について述べる。

〈5･1〉列車運行の定式化

本研究室では先行研究[4]にならって列車運行を定式化し，複々線のモデルを検討する。そのため，本校での定式化の記述は省略する。

〈5･2〉列車運行の定式化

以下に，本節で用いる記号の定義を示す。

【記号の定義】

添え字

s, o: 駅

k: 旅客出現時刻

集合

$\boldsymbol{K}$: 旅客出現時刻の集合

定数

$\mathrm{LI}^{\mathrm{trans}}$: 乗り継ぎ所要時分

$\mathrm{LT}_k^{o,d}$: 各旅客の平常時の旅行時間

$\mathrm{P}_k^{o,d}$: 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

$\mathrm{MT}_k^{o,d}$: 時刻 k に出現し，駅 o〜d 間を移動する旅客が平常時に要する旅行時間

変数

$$z_{k,j}^{o,d} := \begin{cases} 1 & o\text{で列車}j\text{に乗車し，駅}d\text{まで直接移動する} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases}$$

$$w_{k,j,j'}^{o,s,d} := \begin{cases} 1 & \text{駅}o\text{で列車}j\text{に乗車し，駅}s\text{で列車}j'\text{に乗り換えて駅}d\text{へ移動する} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases}$$

$$t_{k,j,j',j''}^{o,d} := \begin{cases} 1 & \text{駅}o\text{で列車}j\text{に乗車し，2 回乗り換えで駅}d\text{へ移動する} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases}$$

$\tau 1_{k,j}^{o,d}$: 経路$z_{k,j}^{o,d}$を選択した際$\left(z_{k,j}^{o,d}=1\right)$の駅 o〜d間旅行時間

$\tau 2_{k,j,j'}^{o,s,d}$: 経路$w_{k,j,j'}^{o,s,d}$を選択した際$\left(w_{k,j,j'}^{o,s,d}=1\right)$の駅 o〜d間旅行時間

$\tau 3_{k,j,j',j''}^{o,d}$: 経路$t_{k,j,j',j''}^{o,d}$を選択した際$\left(t_{k,j,j',j''}^{o,d}=1\right)$の駅 o〜d間旅行時間

これらの記号を使い，〈4･3〉節の旅客流動の制約条件は式(1)〜(28)で記述される。

出発駅と目的駅の組み合わせは
・小駅→小駅
・大駅→大駅
・小駅→大駅
・大駅→小駅

の 4 通りとなる。以降，これを場合分けαとする。場合分けαに基づいて条件ⅰを定式化すると，それぞれ式(1)〜(5)のように表すことができる。

小駅→小駅

$$\sum_{j\in T_{loc}} z_{k,j}^{o,d}=1 \quad (\forall o, d\ \in \boldsymbol{S_{loc}}, \forall k\in\boldsymbol{K}: o<d<o+4) \qquad (1)$$

$$\sum_{j\in T_{loc}} z_{k,j}^{o,d}+\sum_{j\in T_{loc}}\sum_{j'\in T_{rap}}\sum_{\substack{j''\in T_{loc}\\ :j>j''}} t_{k,j,j',j''}^{o,d}=1 \quad (\forall o, d\in \boldsymbol{S_{loc}}, \forall k\in\boldsymbol{K}: o+4\le d) \qquad (2)$$

大駅→大駅

$$\sum_{j\in T} z_{k,j}^{o,d}=1 \quad \left(\forall o, d\ \in \boldsymbol{S_{rap}}, \forall k\in\boldsymbol{K}: o<d\right) \qquad (3)$$

小駅→大駅

$$\sum_{j\in T_{loc}} z_{k,j}^{o,d}+\sum_{j\in T_{loc}}\sum_{j'\in T_{rap}}\sum_{\substack{s\ \in S_{rap}\\ :o<s<d}} w_{k,j,j'}^{o,s,d}=1 \quad \left(\forall o\ \in \boldsymbol{S_{loc}}, \forall d\ \in \boldsymbol{S_{rap}}, \forall k\in\boldsymbol{K}: o<d\right) \qquad (4)$$

大駅→小駅

$$\sum_{j\in T_{loc}} z_{k,j}^{o,d}+\sum_{j\in T_{rap}}\sum_{j'\in T_{loc}}\sum_{\substack{s\ \in S_{rap}\\ :o<s<d}} w_{k,j,j'}^{o,s,d}=1 \quad \left(\forall o\ \in \boldsymbol{S_{rap}}, \forall d\ \in \boldsymbol{S_{loc}}, \forall k\in\boldsymbol{K}: o<d\right) \qquad (5)$$

なお，2 回乗換に関しては，今回のモデルでは大駅と小駅は交互に現れるとしているため，小駅が 4 駅以上離れれば間に大駅が必ず 2 つ入るため，式(22)のような制約式になっている。

次に，

・普通列車のみで移動
・快速列車のみで移動
・普通列車から快速列車へ乗り継ぎ
・快速列車から普通列車へ乗り継ぎ
・普通列車から快速列車へ乗り継ぎまた普通列車へ乗継
という5通りのパターンを考える。以降, これを場合分けβとする。場合分けβに基づいて条件ⅱを定式化すると，それぞれ(6)～(10)のように表すことができる。

普通列車のみ

$$d_j^o \ \geq \ k z_{k,j}^{o,d} \qquad (\forall o, d \ \in \boldsymbol{S}, \forall j \in \boldsymbol{T_{loc}}, \forall k \in \boldsymbol{K}: o < d) \tag{6}$$

快速列車のみ

$$d_j^o \ \geq \ k z_{k,j}^{o,d} \qquad (\forall o, d \ \in \boldsymbol{S_{rap}}, \forall j \in \boldsymbol{T_{rap}}, \forall k \in \boldsymbol{K}: o < d) \tag{7}$$

普通列車→快速列車

$$d_j^o \ \geq \ k \sum_{j' \in T_{rap}} \sum_{\substack{s \in S_{rap} \\ : o<s<d}} w_{k,j,j'}^{o,s,d} \qquad \left(\forall o \ \in \boldsymbol{S_{loc}}, \forall d \ \in \boldsymbol{S_{rap}}, \forall j \in \boldsymbol{T_{loc}}, \forall k \in \boldsymbol{K}: o < d\right) \tag{8}$$

快速列車→普通列車

$$d_j^o \ \geq \ k \sum_{j' \in T_{loc}} \sum_{\substack{s \in S_{rap} \\ : o<s<d}} w_{k,j,j'}^{o,s,d} \qquad \left(\forall o \ \in \boldsymbol{S_{rap}}, \forall d \ \in \boldsymbol{S_{loc}}, \forall j \in \boldsymbol{T_{rap}}, \forall k \in \boldsymbol{K}: o < d\right) \tag{9}$$

普通列車→快速列車→普通列車

$$d_j^o \ \geq \ k \sum_{j' \in T_{rap}} \sum_{\substack{j'' \in T_{loc} \\ : j>j''}} t_{k,j,j',j''}^{o,d} \qquad (\forall o \ \in \boldsymbol{S_{loc}}, \forall d \ \in \boldsymbol{S_{loc}}, \forall j \in \boldsymbol{T_{loc}}, \forall k \in \boldsymbol{K}: o+4 \leq d) \tag{10}$$

また，式(11)～(14)によって条件ⅲが表される。

$$d_{j'}^s - \left(a_j^s + \mathrm{LI^{trans}}\right) \geq \ -\mathrm{M}\left(1 - w_{k,j,j'}^{o,s,d}\right) \qquad (\forall o \ \in \boldsymbol{S_{loc}}, \forall s, d \ \in \boldsymbol{S_{rap}}, \forall j \in \boldsymbol{T_{loc}}, \forall j' \in \boldsymbol{T_{rap}}, \forall k \in \boldsymbol{K}: o < s < d) \tag{11}$$

$$d_{j'}^s - \left(a_j^s + \mathrm{LI^{trans}}\right) \geq \ -\mathrm{M}\left(1 - w_{k,j,j'}^{o,s,d}\right) \qquad (\forall o, s \ \in \boldsymbol{S_{rap}}, \forall d \ \in \boldsymbol{S_{loc}}, \forall j \in \boldsymbol{T_{rap}}, \forall j' \in \boldsymbol{T_{loc}}, \forall k \in \boldsymbol{K}: o < s < d) \tag{12}$$

$$d_{j'}^s - \left(a_j^s + \mathrm{LI^{trans}}\right) \geq \ -\mathrm{M}\left(1 - t_{k,j,j',j''}^{o,d}\right) \qquad (\forall o, d \ \in \boldsymbol{S_{loc}}, \forall s \ \in \boldsymbol{S_{rap}}: s = o+1 \ \cap \ d \geq o+4, \forall j \in \boldsymbol{T_{loc}}, \forall j' \in \boldsymbol{T_{rap}}, \forall j'' \in \boldsymbol{T_{loc}}, \forall k \in \boldsymbol{K}) \tag{13}$$

$$d_{j''}^s - \left(a_{j'}^s + \mathrm{LI^{trans}}\right) \geq \ -\mathrm{M}\left(1 - t_{k,j,j',j''}^{o,d}\right) \qquad (\forall o, d \ \in \boldsymbol{S_{loc}}, \forall s \ \in \boldsymbol{S_{rap}}: s = d-1 \ \cap \ d \geq o+4, \forall j \in \boldsymbol{T_{loc}}, \forall j' \in \boldsymbol{T_{rap}}, \forall j'' \in \boldsymbol{T_{loc}}, \forall k \in \boldsymbol{K}) \tag{14}$$

最後に，駅 o～d 間の経路選択に応じた旅行時間 $\tau 1_{k,j}^{o,d}$，$\tau 2_{k,j,j'}^{o,s,d}$，$\tau 3_{k,j,j',j''}^{o,d}$ に関する制約を示す。$\tau 1_{k,j}^{o,d}$，$\tau 2_{k,j,j'}^{o,s,d}$，$\tau 3_{k,j,j',j''}^{o,d}$ の非負制約は式(15)により示される。また，場合分けβに基づき条件ⅳを表現すると，それぞれ式(16)～(22)のように表される。

$$\tau 1_{k,j}^{o,d} \geq 0 \qquad (\forall o, d \ \in \boldsymbol{S}, \ \forall j \in \boldsymbol{T}, \forall k \in \boldsymbol{K}: o < d) \tag{15}$$

$$\tau 2_{k,j,j'}^{o,s,d} \geq 0 \qquad \left(\forall o, d \ \in \boldsymbol{S}, \forall s \in \boldsymbol{S_{rap}}, \forall j, j' \in \boldsymbol{T}, \forall k \in \boldsymbol{K} : o < d\right) \tag{16}$$

$$\tau 3_{k,j,j',j''}^{o,s,d} \geq 0 \qquad (\forall o, d \ \in \boldsymbol{S_{loc}}: o+4 \leq d, \forall j, j'' \in \boldsymbol{T_{loc}}; j > j'', \forall j' \in \boldsymbol{T_{rap}}, \forall k \in \boldsymbol{K}) \tag{17}$$

$$\tau 1_{k,j}^{o,d} \geq \left(a_j^d - k\right) \ - \ \mathrm{M}\left(1 - z_{k,j}^{o,d}\right) \qquad (\forall o, d \ \in \boldsymbol{S}, \forall j \in \boldsymbol{T_{loc}}, \forall k \in \boldsymbol{K} : o < d) \tag{18}$$

$$\tau 1_{k,j}^{o,d} \geq \left(a_j^d - k\right) \ - \ \mathrm{M}\left(1 - z_{k,j}^{o,d}\right) \qquad (\forall o, d \ \in \boldsymbol{S_{rap}}, \forall j \in \boldsymbol{T_{rap}}, \forall k \in \boldsymbol{K} : o < d) \tag{19}$$

$$\tau 2_{k,j,j'}^{o,s,d} \geq \left(a_{j'}^d - k\right) \ - \ \mathrm{M}\left(1 - w_{k,j,j'}^{o,s,d}\right) \qquad (\forall o \ \in \boldsymbol{S_{loc}}, \forall s, d \ \in \boldsymbol{S_{rap}}, \forall j \in \boldsymbol{T_{loc}}, \forall j' \in \boldsymbol{T_{rap}}, \forall k \in \boldsymbol{K} : o < s < d) \tag{20}$$

$$\tau 2_{k,j,j'}^{o,s,d} \geq \left(a_{j'}^d - k\right) \ - \ \mathrm{M}\left(1 - w_{k,j,j'}^{o,s,d}\right) \qquad (\forall o, s \ \in \boldsymbol{S_{rap}}, \forall d \ \in \boldsymbol{S_{loc}}, \forall j \in \boldsymbol{T_{rap}}, \forall j' \in \boldsymbol{T_{loc}}, \forall k \in \boldsymbol{K} : o < s < d) \tag{21}$$

$$\tau 3_{k,j,j'}^{o,s,d} \geq \left(a_{j''}^d - k\right) \ - \ \mathrm{M}\left(1 - t_{k,j,j',j''}^{o,d}\right) \qquad (\forall o, d \ \in \boldsymbol{S_{loc}}: o+4 \leq d, \forall j, j'' \in \boldsymbol{T_{loc}}: j < j'', \forall j' \in \boldsymbol{T_{rap}}, \forall k \in K) \tag{22}$$

ここで，$\tau 1_{k,j}^{o,d}$，$\tau 2_{k,j,j'}^{o,s,d}$，$\tau 3_{k,j,j',j''}^{o,d}$の総和を最小化する目的関数を設定することで，各旅客群は最速達経路を選択し，選択された経路の所要時間のみが旅行時間として求まる。また，選択されなかった経路に対応する

$\tau 1_{k,j}^{o,d}$，$\tau 2_{k,j,j'}^{o,s,d}$，$\tau 3_{k,j,j',j''}^{o,d}$の値は全て 0 になる。

〈5･3〉目的関数

第 2 章で記したとおり，本研究では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を低くすることを指標にしている。そこで，旅行時間の増大量に対応する非負の変数を$e_k^{o,d}$を定義する。ここで，$e_k^{o,d}$が満たすべき制約は(23)～(28)により表される。式(23)は$e_k^{o,d}$の非負制約を表す。また，式(24)～(28)はそれぞれ場合分けαに従い，$e_k^{o,d}$の定義に基づく下限を表している。

$$e_k^{o,d} \ \geq \ 0 \qquad (o, d \in \boldsymbol{S}, \forall k \in \boldsymbol{K}) \tag{23}$$

小駅→小駅

$$e_k^{o,d} \geq \sum_{j \in T_{loc}} \tau 1_{k,j}^{o,d} - \mathrm{MT}_k^{o,d} \qquad (\forall o, d \in \boldsymbol{S_{loc}}, \forall k \in \boldsymbol{K}: o < d < o+4) \tag{24}$$

$$e_k^{o,d} \geq \left(\sum_{j \in T_{loc}} \tau 1_{k,j}^{o,d} + \sum_{j \in T_{loc}} \sum_{j' \in T_{rap}} \sum_{\substack{j'' \in T_{loc} \\ : j>j''}} \tau 3_{k,j,j',j''}^{o,d} \right) - \mathrm{MT}_k^{o,d} \qquad (\forall o, d \in \boldsymbol{S_{rap}}, \forall k \in \boldsymbol{K}: o+4 \leq d) \tag{25}$$

大駅→大駅

$$e_k^{o,d} \ \geq \ \sum_{j \in T_{rap}} \tau 1_{k,j}^{o,d} \ - \ \mathrm{MT}_k^{o,d} \qquad (o, d \in \boldsymbol{S_{rap}}, \forall k \in \boldsymbol{K}) \tag{26}$$

小駅→大駅

$$e_k^{o,d} \ \geq \left(\sum_{j \in T_{loc}} \tau 1_{k,j}^{o,d} + \sum_{\substack{s \in S_{rap} \\ : o<s<d}} \sum_{j \in T_{loc}} \sum_{j' \in T_{rap}} \tau 2_{k,j,j'}^{o,s,d} \right) - \mathrm{MT}_k^{o,d} \qquad (o \in \boldsymbol{S_{loc}}, d \in \boldsymbol{S_{rap}}, \forall k \in \boldsymbol{K}: o < d) \tag{27}$$

大駅→小駅

$$e_k^{o,d} \geq \left(\sum_{j \in T_{loc}} \tau 1_{k,j}^{o,d} + \sum_{\substack{s \in S_{rap} \\ :o<s<d}} \sum_{j \in T_{loc}} \sum_{j' \in T_{rap}} \tau 2_{k,j,j'}^{o,s,d} \right) - \mathrm{MT}_k^{o,d}$$

$$(o \in \boldsymbol{S}_{\boldsymbol{rap}}, d \in \boldsymbol{S}_{\boldsymbol{loc}}, \forall k \in \boldsymbol{K}: o < d) \quad (28)$$

これより，列車運行に乱れが生じた際の旅客の旅行時間増大量最小化問題は，以下の混合整数計画問題として定式化される。

minimize	$\sum_{o,d \in S} \sum_{k \in K} \mathrm{P}_k^{o,d} e_k^{o,d}$	(29)
subject to	〈5･1〉節，式(1)～(28)	

6. ケーススタディによる有効性の検証

〈6･1〉拡張手法の検証

図 6.1 に基本となるダイヤを示す。

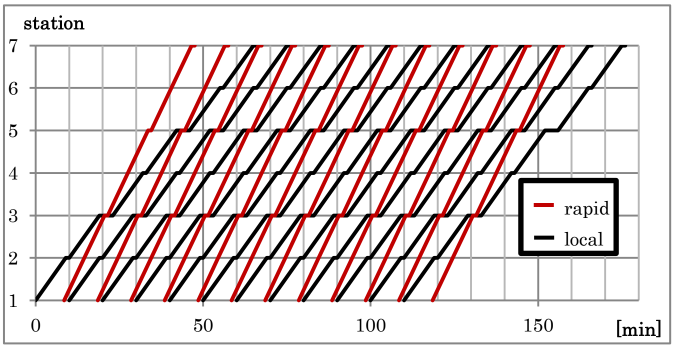

図 6.1 計画ダイヤ

Fig. 6.1 Initial regular train diagram

このダイヤに対し，列車番号 5 の 2 駅への到着に対し，600 秒の遅延を与えた。その後先行研究と本提案手法による運転整理の結果で特に違いが現れた拡大部分を図 6.2，6.3 に示す。

二回乗換では 2 駅から 6 駅への移動客が快速列車を使う。そのため，3 駅で普通列車から快速列車に乗り換える乗客数は多くなるはずであるが，図 6.2，6.3 の丸で囲った所を見ると，一回乗換では接続を取らなかったものが，二回乗換では接続を取るような運転整理ダイヤになっている。これは，2 駅から 6 駅に移動する乗客が乗換上限 2 回としたとき，3 駅で接続を取らないと接続を取ったときに比べ所要時間が 10 分ほど伸びてしまうという乗客の旅行時間の増大が考慮されているためである。

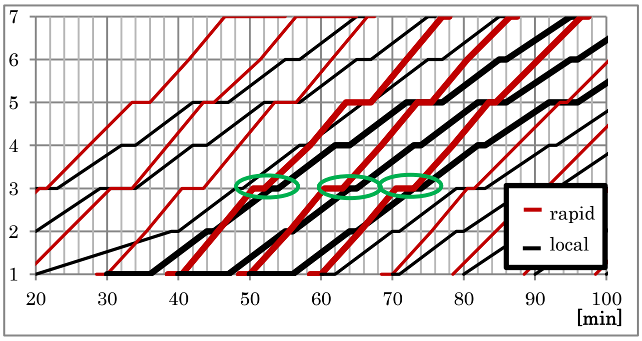

図 6.2 乗換上限を一回とした時の運転整理ダイヤ

Fig. 6.2. Rescheduled train diagram when the number of transfer is limited to once

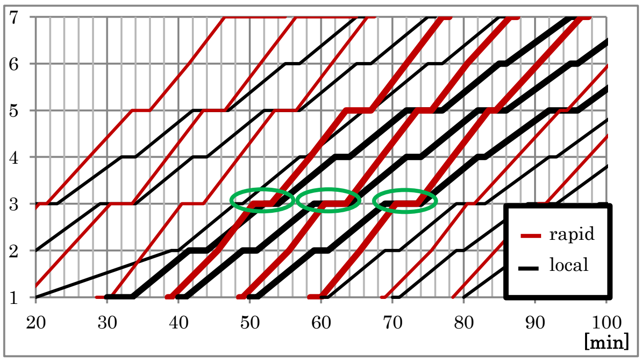

図 6.3 乗換上限を二回とした時の運転整理ダイヤ

Fig. 6.3 Rescheduled train diagram when the number of transfer is limited to two

〈6･2〉乗客不効用の不平等に関する検討

全体の最適化を図った時に，一部を犠牲にして全体を最

表 6.1 ケース 1 における遅延時分平均と標準偏差

Table 6.1 Mean and standard division of passengers' loss time at Case 1

	Pattern 1				Pattern 2				Pattern 3			
	PLT(1)	Passenger(2)	Mean(3)	SD(4)	PLT	Passenger	Mean	SD	PLT	Passenger	Mean	SD
No-Rescheduling	83950	9700	8. 65	5. 39	50960	5920	8. 61	5. 48	99875	11650	8. 57	5. 34
Rescheduling	64000	9200	6. 96	4. 97	38830	6840	5. 68	4. 92	75925	10650	7. 13	4. 56

(1)PLT = Passengers' Loss Time (2)The number of passengers who experience the delay (3) Mean = PLT / Passenger (4)SD = Standard Division

表 6.2 ケース 1 における遅延時分平均と標準偏差

Table 6.2 Mean and standard division of passengers' loss time at Case 2

	Pattern 1				Pattern 2				Pattern 3			
	PLT	Passenger	Mean	SD	PLT	Passenger	Mean	SD	PLT	Passenger	Mean	SD
No-Rescheduling	127206	13000	9. 79	7. 12	140327	15960	8. 79	6. 38	118305	11250	10. 5	7. 35
Rescheduling	81500	9600	8. 49	4. 15	95100	13180	7. 21	4. 23	75625	8200	8. 86	4. 05

適にするように動作することは，数値最適化問題ではよく起きてしまうことである。そのため，今回の運転整理の最適化において，乗客の不効用がどのように散らばっているのかについても調査した。

想定するダイヤは先ほどと同じく図 6.1 のダイヤである。OD パターンについては,

(a) Pattern 1：全駅間の移動人数が共通

(b) Pattern 2：大駅の利用人数が多いパターン

(c) Pattern 3：小駅の利用人数が多いパターン

という 3 パターンについて考察する。

このとき，以下の 2 種類の初期遅延を与え，本提案で運転整理を行った場合と行わなかった場合で比較を行った。

①列車 5 の駅 2 への到着が 16 分遅れた(ケース１)

②列車 6 の駅 3 への到着が 16 分遅れた(ケース２)

運転整理の有無による，旅客の遅延時分の平均，標準偏差の値をケース 1，ケース 2 についてそれぞれ表 6.1，6.2 に示す。この表において不効用値とは目的関数の値であり単位は[人・分]である。人数は遅れを経験した人数[人]であり，平均，標準偏差は遅れを経験した人についてのみ計算し，単位は[分]である。

まず，表 6.1，6.2 を見ると目的関数の値である不効用値は当然ながら運転整理を適用したほうが，適用しなかった時に比べて低減できることが示されている。また，標準偏差の値を見ると，どのケース，パターンにおいても運転整理がないときに比べて小さくなっており，運転整理によって乗客に生じる不効用が偏っていないことを明らかにした。

7. 結論

〈7･1〉まとめ

本論文では，先行研究において提案された旅客損失に着眼した運転整理最適化手法を，より正しく旅客損失を評価できるように拡張した。すなわち，従来手法における乗換回数 1 回の制限は，短い路線モデルでは影響は小さいが，実路線に基づいて路線が長くなると，小駅間を移動する旅客を，本来移動するであろう経路に基づいて評価できないという問題があった。しかし，緩急結合の列車運行において旅客の行動で実際によく見られる，乗換回数を 2 回まで拡張することにより，快速，普通の二種別が走る路線における全ての駅間の旅客を正しく評価することを可能にした。また，乗換回数 2 回を考えれば，優等種別が 2 種類あるような路線でも優等列車同士の追い抜きがない路線では乗換回数 2 回は必要十分であることを付記しておく。

次に，仮想の路線モデル，OD を用いて乗換回数制限の緩和の有無および運転整理の有無といったケースで本手法の有効性を検証した。最適化問題においては，全体を最適化する際に一部に悪い値が集中することがあるが，今回のモデル設定の中ではそのようなことは起きず，大きな不平等が生じないことを定量的に明らかにした。今回の都市鉄道でよく見られるモデルのように，同じ間隔で同じ種別，同じ行先の電車が来るような路線では，旅客の遅延時間増大量を目的関数に設定することで大きな不平等は生じないと考えられる。

最後に文献(5)との差異について述べる。この文献では乗換回数の制限をなくすために制約式の数が多くなっている。しかし，優等列車と各駅停車からなる緩急結合運行モデルにおいては 2 回乗り換えまで定義していれば旅客はどの駅間においても最速達経路を選択できるため，本研究で提案した定式化には，制約式がシンプルで直感的に理解しやすいという長所がある。ただし，この制約式の違いが計算時間や計算量，メモリ必要量に与える影響など，実装上の観点からも問題の記述法の適否を判断することが望まれる。。

〈7･2〉今後の展望

運転整理手法の増加などほかにも改善すべき点はあるが，乗車率を考慮することを最優先すべきと考えている。それは，乗車率が増えると旅客が感じる不効用は無視できないほど大きくなり，また著しく大きくなった場合は旅客が駅で乗り切れない積み残しの問題が発生するからである。そのため，乗車率について考慮することが最優先の課題と考え，拡張することを考えている。

本研究を進めるにあたり，「旅客サービス及びエネルギー消費の観点からみた列車運行の合理的計画・管理とその評価に関する科学的検討」に参加された各大学及び西日本旅客鉄道株式会社，鉄道総合技術総合研究所の関係者の方々に多大なる御指導，御支援を頂いたことを厚く御礼申し上げます。

文　　献

(1) 富井規雄：「列車ダイヤのひみつ－定時運行のしくみ」，成山堂書店 (2005)

(2) (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)

(3) K.Chigusa,K.Sato,T.Koseki:”A Passenger-Oriented Optimization of Train Rescheduoing Based on Mixed Integer Programming”, IEEJ Transactions on Industry Applications Vol.132 No.2, pp170-177 (2012) (in Japanese)
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客損失に主眼を置いた運転整理最適化」，電気学会論文誌.D，産業応用部門誌，pp170-177 (2012)

(4) 角谷太郎，古関隆章：「実在する線路配置を考慮した混合整数計画法に基づく運転整理支援システム」，交通・電気鉄道研究会，TER-12-025 (2012)

(5) 田村啓，富井規雄：「旅客損失を最小にする混合整数計画法による運転整理アルゴリズムとその評価, 交通･電気鉄道研究会, TER-12-050 (2012)

(6) 今野浩：「整数計画法」，産業図書 (1981)