

省エネルギー運転曲線最適化への 動的計画法の応用と数値計算上の問題点

古関 隆章 姚 景倩 (東京大学)

Application of the Dynamic Programming to a Calculation of Optimal Energy-Saving Running Profile of a Train and Problems in its Numerical Implementation

Takafumi KOSEKI and Chinchun YEO (The University of Tokyo)

Abstract

Authors propose an application of the DP, *Bellman's Dynamic Programming*, to a calculation of energy saving running profile of a train, which has theoretical flexibility for taking account of speed limitation, non-linear running resistance, effects of regenerative electric energy to energy objective function, etc. The fundamental algorithms for applying DP to the train running profile optimization and its advantages have been briefly described in the report. This approach has been applied to a system study of an effective usage of electric brake and its combination with Train Automatic Stopping Control. Although authors have found some problems in implementing the DP algorithm, the numerical results give you useful information on a energy-saving running profile of a train.

キーワード: 運転曲線, 省エネルギー運転, 最適化, 動的計画法, 運転制御

(Running profile, Energy-saving train operation, Optimization, Dynamic Programming, Train operation control)

1. はじめに

1 つの列車が同一路線を同一時間で走行しても、その運転方法により消費エネルギーは異なる。近年の電気鉄道の高速度化、高密度化を背景に、この点に関する問題意識から、消費エネルギー最適化を図る運転方法の研究がなされている。しかし、変分法などの解析的手法による最適化⁽¹⁾には、速度制限が非線形最適化問題としてみた場合の状態変数制約になっていることでアルゴリズムが複雑になる問題点がある。一方、定性的考察による基本計画を初期値とし、それに修正を重ねていく方法は⁽²⁾⁽³⁾、実用的に良い結果を与えているが必ずしも最適性が保証されないという問題点が残されている。電気ブレーキの有効活用と自動運転を組み合わせたシステム検討の道具として、この省エネルギー運転曲線算出のプログラムを用いる場合には、モータ特性の速度依存性も考慮した駆動力、ブレーキ時の回生電力の影響、き電系の回路方程式、列車の非線形走行抵抗、勾配の影響などの複雑な条件を比較的容易に組み込めて、しかも最適性が保証される理論的枠組みのあることが望ましい。筆者らは、先に、列車エネルギー最適運転曲線算出法への動的計画法⁽⁴⁾の応用を提案した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。本稿では、動的計画法を用いた省エネルギー運転曲線最適化法を整理し、1列車系への適用例を示し、アルゴリズム

実装上の問題点を整理する。

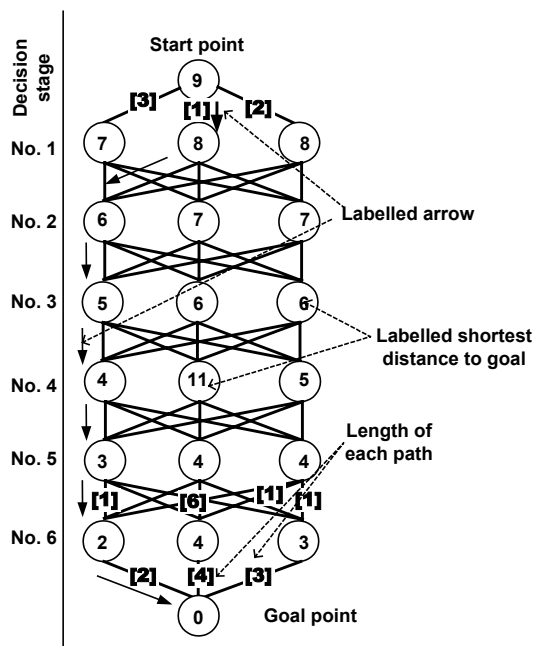


図1 最短経路探索問題の例題

Fig. 1 An example of the shortest path search.

2. ベルマンの動的計画法

教科書に良く載っている初歩的な例題として、図 1 のような複数の経路を取りうるネットワークで最短経路を探索することを考える。図中線上の値は、各ノード間の「道のり」を示すものとする。本例題の場合には、始点と終点の間で、斜め上か、真右か、斜め下かという3通りの道のどれを選択するかという $N=6$ 段階の「意思決定」を行う必要が生じる。仮に全数検索をすると、 3^{N-1} のパスを調べて、その中から最短のものを選ぶということになるが、この方法は問題の規模、あるいは意思決定段階の増加に伴い、検索数が指数関数的に増大するので、実用的な問題で容易に計算量の爆発を引き起こす可能性が有る。

そこで、問題を下記のように定義しなおす。

問題： 評価量 $J = \sum_{k=1}^6 l_{k-1,k}$ (ただし $l_{k-1,k}$: 段階 $k-1$ で選択した k 段階までの長さ) とし、 $J \rightarrow \min$ となる各段階での policy (この場合斜め上, 真右, 斜め下のいずれの進路を取るか) の系列を定める。

これに対して、Bellman は以下の解法を与えている。

- (1) $k=N$ から後ろ向きに $k=N-1, N-1, \dots$ と1つずつ戻って、すべての格子点で policy (図中の矢印) と評価量をラベルとして貼ってゆく。
- (2) $k=0$ の出発点から、policy p_k (各段階でどのパスを選択するかを示す系列) の矢印に従ってパスをたどれば最適解が得られる。

この方法は以下の特長を有する:

- (1) 通常、始点と終点の決まった最適化問題は、2 点境界値問題となるが、ここでは(1)で終点からラベリングをしながら始点へと最適パスの候補をたどり、その後(2)でもう一度始点からラベルに従って終点方向へラベルをたどるという操作を行うことで、この2点境界値問題を反復演算無しに解いている。
- (2) 1 度ラベルを貼ると、任意の始点からの最適パスがわかるようになるため、単なる最適パスの検索というよりは、解として与えられる policy の系列がフィードバック制御の指針となる情報を与えている。

問題の規模に対する計算量の依存性は、意思決定段階数の増加に伴い、指数関数的ではなく、ほぼリニアに増加するのみである。

3. 列車運転曲線計画最適化への適用

上記の例題でわかるように、動的計画法は、離散的な事象での多段階意思決定に有効であるので、問題の様々な複雑性に対して強い汎用性の有る解法である一方、図 2 のような連続系の

最適化には、状態空間を図 3 のように格子状に切って離散化するなどの工夫を要する。これは、連続系の偏微分方程式を、有限要素法等の手法で数値計算により解く場合の長所・短所と良く似ている。

すなわち、この手法を、従来の列車運転曲線計画手法と比較すると下記の特長を有する。

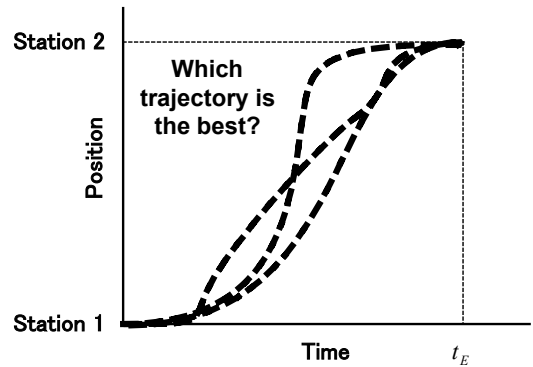


図 2 エネルギーから見た最適パス

Fig. 2 Optimal Energy Path.

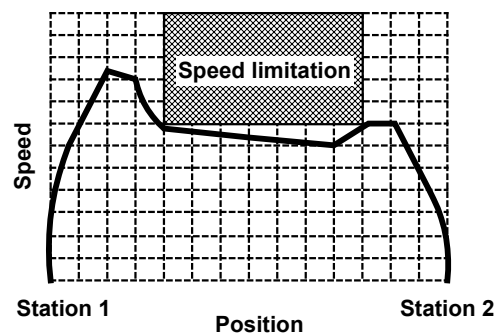


図 3 運転曲線と位相面

Fig. 3 Running profile and phase plane.

- (1) 手法の性格上、定性的な考察に基づく微修正を重ねて良い解に漸近するのではなく、与えられた条件のもとで、(量子化誤差の範囲で)必ず評価関数を最適にするパスが検索できる。
- (2) 前節の特長(2)により、実際の列車運転で当初の計画曲線から何らかの要因でずれを生じても、位置や速度が確実に検知できた時点で、その状態変数を初期値とするその段階での最適 policy の系列を、既に作成されているデータベースから読み出すことで、常にその状況における最適な方策を講じることができる。
- (3) 変分法などに基づく解析的方法では致命的な困難となる状態変数制約である、区間による「速度制限」を容易に取り入れるることができる。むしろ速度制限は、探索空間を狭めてくれるという意味では、計算上有利に働くこととなる。

(4) 同じく解析的方法では取り入れにくい多段のノッチ操作の「不連続性」を, policy の記述では, どのノッチを選択すれば良いかという形で素直にモデル化できる。(一方, 連続現象である無限段ノッチの場合には, 各段階での最適ノッチの決定に, 連続系での最適化手法を取り入れるなどの工夫を要する。)

最も簡単な1列車系の問題で, 以下に具体的な定式化を示す。

図 2 に示されているように駅の出発時刻 $t_0 = 0$, 到着時刻 t_E が拘束条件として与えられているとき, 無数に有る運転曲線群の中で, たとえば評価関数

$$J = \int_0^{t_E} W(t) dt \rightarrow \min \quad (1)$$

という形で最適化する運転曲線を定める。ただし, ここで評価関数の中の被積分関数 $W(t)$ は, たとえば, 架線から列車がもらう電力, およびブレーキ時には効率分を考慮した電力回生分を負の値として入れる。また, 機械ブレーキと電気ブレーキの関係を考察するならば, さらに機械ブレーキのエネルギー消費をペナルティ項として付加することも考えられる。

列車の位置, 速度の関係は連続系の微分方程式

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} F(v, p) - \frac{1}{m} F_r(x, v) \end{bmatrix} \quad (2)$$

の形で示されるので, 状態変数 x, v および時刻 t を図 3 に示すように離散化する必要がある。なお, ここで x は列車の位置, v は列車速度, m は列車の質量, $F(v, p)$ は図 4 に示されるような politics p (ノッチの選択) および列車速度の関数としての駆動力, $F_r(x, v)$ は列車位置に依存する勾配抵抗および列車速度に依存する抵抗からなる走行抵抗である。

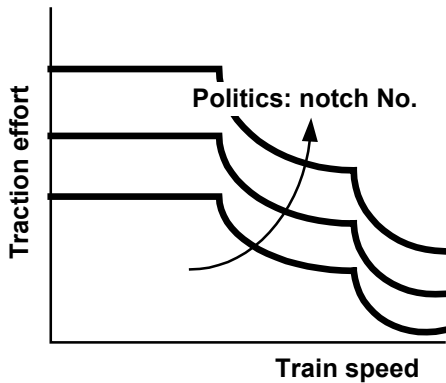


図 4 ポリシーの選択と駆動力

Fig. 4 Politics and traction effort

時間を N 分割: $t_E = t_N = (N-1)\Delta t$, 位置の状態変数 x を I_1

分割: $1 \leq i_1 \leq I_1$, 速度の状態変数 v を I_2 分割: $1 \leq i_2 \leq I_2$ すると, 1 つの位相面上の格子点数は図 3 で明らかなように

$I_1 \times I_2$ よりも速度制限の分だけ少なくなる。いま運動方程式に, 最も単純な前進差分を施せば

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + v_n \Delta t \\ v_{n+1} = x_n + \frac{\Delta t}{m} F(v_n, p_n) - \frac{\Delta t}{m} F_r(x_n, v_n) \end{cases} \quad (3)$$

という形で, 漸化式に書き下すことができる。ここでは説明の簡単のため, 前進差分法に基づく単純な離散化方法を取ったが, 実際の計算では計算精度の確保のため, この離散化にはより工夫を要する。すなわち, 4 章以降で述べる計算では, 走行抵抗の速度に対する非線形性も, テーラ展開して第 1 項までを残す形で線形近似をし, 台形積分を仮定した離散化方法を用いる。

これにあわせて, 評価関数の方も時間軸にそった離散化を行う。まず, 評価関数の全区間における積分は, 級数和

$$J = \sum_{k=1}^{N-1} \Gamma_k \quad (4)$$

となり, ある途中時刻 t_n から終端時刻 $t_N = t_E$ までの評価関数の

部分的な積分を $J_n = \sum_{k=n}^{N-1} \Gamma_k$ ($1 \leq n \leq N-1$) とする。ただし, 被

加算数列 Γ_k は, 電力を示す被積分関数 $W(t)$ を時刻 t_k と t_{k+1} の間で積分した値に, 終端制約(すなわち時刻 t_E で駅停車位置 x_E にいるという条件)を外れたことに対するペナルティを重み係数 κ で最終項に付加して

$$\Gamma_k = \begin{cases} W_k \Delta t & (1 \leq k \leq N-1) \\ W_{N-1} \Delta t + \kappa \{ (x_N - x_E)^2 + v_N^2 \} & (k = N) \end{cases} \quad (5)$$

と与えることにする。なお, 最後のペナルティの与え方には, 2乗ノルム以外にも自由度が有る。(実は, このペナルティ値の与え方は, 結果に大きく影響するため難しく, 本稿ではこれを 4.2 節でより詳しく扱う。)

これだけの準備をしておいて, 以下の手順で図 5 に示される複数の位相面にラベリングと軌跡を書き込むことで, 具体的に最適運転曲線を探る。

- (1) k 番目の決定段階 $t_k = (k-1)\Delta t$ (あるいは k 番目の位相面上) で格子点 $S(i_1, i_2, k)$ にいるとする。そこでの politics (ノッチの選択) を p としたとき, 式(3)の漸化式を解いて, 図 6 に示すように $t_{k+1} = k\Delta t$ で到達する $k+1$ 枚目の位相面上にある格子点の部分評価関数のラベル J_{k+1} を読み, それに Γ_k を足して, その時点での部分評価関数 J_k を計算する。
- (2) この J_k を最小にする p とそのときの $\min J_k$ を, ラベルとして位相面上の状態格子点 $S(i_1, i_2, k)$ に貼る。これを k 番目の位相面上のすべての格子点 $S(i_1, i_2, k)$, $1 \leq i_1 \leq I_1$; $1 \leq i_2 \leq I_2$ について繰り返す。
- (3) それが終わったら位相面を一枚戻して, $t_{k-1} = (k-2)\Delta t$ におけるすべての格子点上で, 探索とラベリングの同じ操作を繰

り返す。

- (4) 同様な作業を1枚ずつ位相面の戻しながら $t_1 = 0$ まで続け、合計 $(N-1)$ 枚の位相面上の格子点にラベルを貼り終えたら後ろ向きの探索作業を終了する。
- (5) 初期点 $S(1,1,1) = (0,0,0)$ から politics のラベルを図5のイメージ図にあるように辿りながら、politics の系列 p に従ってノッチ操作を行うと、最適な運転曲線が得られる。

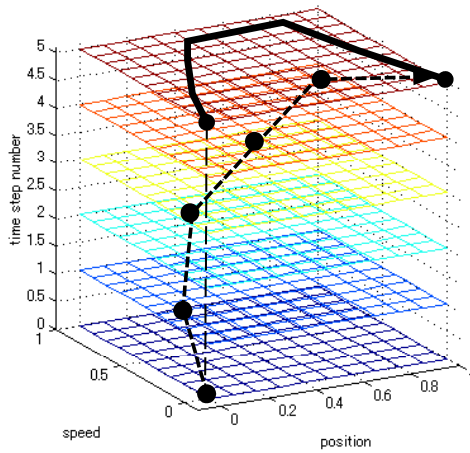


図5 複数の位相面間での最適軌道追跡
Fig. 5 Optimal path tracking in multiple phase planes.

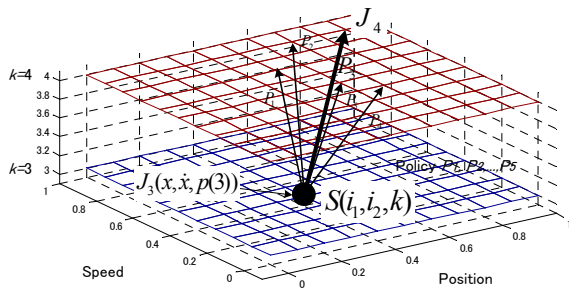


図6 ある1段階における最適軌道の検索
(すべての格子点で同様の検索操作を行う。)
Fig. 6 Optimal path searching in a stage:
Identical process is executed on every grid points.

なお、図6に示す手順(1)における「 $t_{k+1} = k\Delta t$ で到達する $k+1$ 枚目の位相面上にある格子点の部分評価関数のラベル J_{k+1} 」の読み取りに際しては、格子点上ではなく格子点間にある平面上の点に軌道が当たるのが普通なので、 J_{k+1} の具体的な値としては、周囲の4点から線形補間した値を用いる。
この作業の最大計算量は、 P (politics の選択個数最大値) $\times I_1 \times I_2 \times (N-1)$ 回の探索数となり、ラベリングに必要なデータ量

は、1格子点あたり、部分評価関数のラベル J_k と politics p のラベルの2つを記憶する必要があるので $2 \times I_1 \times I_2 \times (N-1)$ となる。

4. 一列車系の計算結果

4.1 基本的一列車モデル

まずは、平坦な区間で、速度の二次式で近似される速度に対して下に凸の走行抵抗を有する普通の列車の条件で、速度制限のない1000mの駅間を比較的余裕のある90秒で走行するという条件で計算を行う。ノッチと、引張力・制動力特性を図7に示す。この計算の中では、惰行をノッチ5にわりあて、ノッチ1から4が力行、ノッチ6から10を回生に割り当てている。通常の電気鉄道ではノッチは加減速度の値と対応させているが、ここでは、各速度において最高の加・減速度を出す場合(それぞれノッチ1および10に対応)に対し、ノッチ2から4、ノッチ9から6は比例的に低い加・減速度を段階的に調整するものとして記述している。

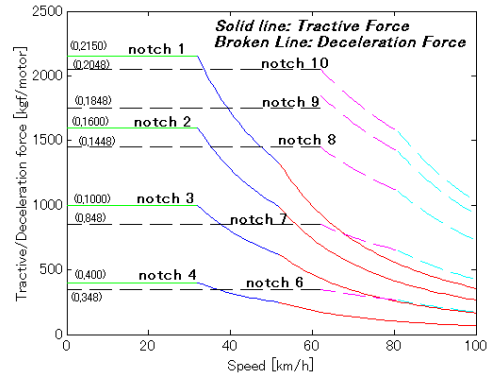
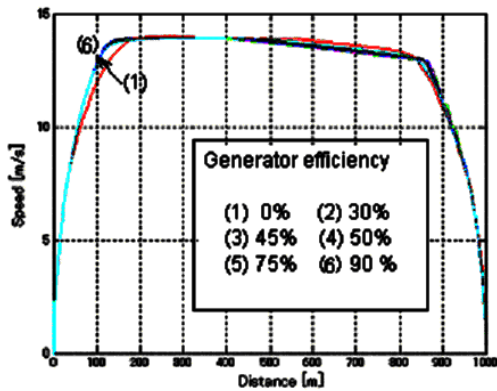


図7 仮定した力行および制動特性とノッチ
Fig. 7. Assumed acceleration and deceleration characteristic curves and notch numbers.

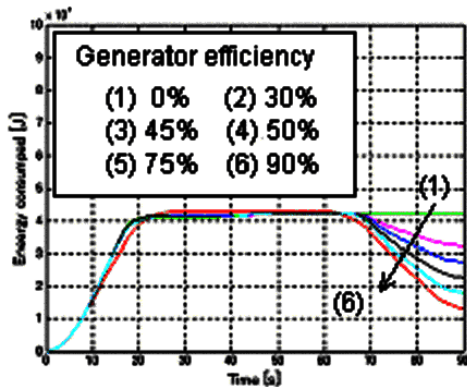
また、回生制動の「程度」を表現するモデルは、実車両では本来複雑だが、ここでは全体的な傾向を論じるため簡単に扱うこととし、回生モードで機械エネルギーが電気エネルギーとして変換される効率が一定として、その発電機効率をパラメータとして回生制動の効きを表現している。

その計算結果を図8に示す。先行研究⁽²⁾により、このような単純な条件で、回生制動の効果を考えないとき、すなわち、制動時の機械エネルギーはすべて熱に変換されてしまうという条件で、比較的走行時間に余裕があるときにエネルギー消費を最小化する走り方は、まず、能力いっぱいに加速する、続いてできるだけ長く惰行をする、そして能力いっぱいに加減速して停止するという方法であることが示されている。図8(a)の(1)を見ればわかるように、何の定性的な条件も加えず動的計画法を適用して数値的に導いた運転曲線は、これに近い条件になっている。また、回生制動によりエネルギーが返る場合も、走り方は基本的にほとんど変わらないことがわかる。ただし、回生エネルギーが多く返る場合には、

回生制動を若干手前から行うことにより、ややオフブレーキ運転に近づくような傾向が(6)のケースで少しだけ見られている。回生時の効率が良いほど多くのエネルギーが返るため最終的なエネルギー消費が小さくなることが図 8(B)の(1)-(6)から良くわかる。



(a) Running profile



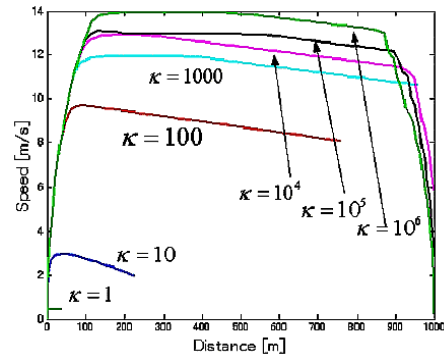
(b) Energy consumption

図8 平地における最適運転: 基本ケース

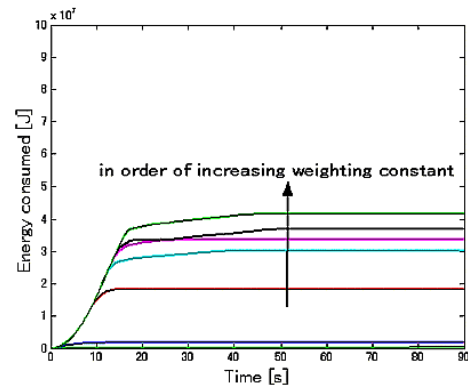
Fig. 8 Optimal operation at flat condition: basic case.

4.2 終端ペナルティ係数の問題

式(5)で示したように、ここでは 90 秒後に距離 1000m の終端駅に確実に着くことを、最終時刻 90 秒における状態量の終端目標値(すなわち距離 1000m, 速度 0m/s)からの偏差の二乗に係数 K をかけ、ペナルティとして評価値に加算することで保証している。実際には、最終値がずれ 0 で最終目標点に着くことはなく、このことが計算結果の「消費エネルギーに関する」最適性を曖昧にする。具体的に数値計算を行う際には、何らかの方法で適切な K を定める必要がある。この様子を図 9 に示す。 K が小さすぎれば、列車はエネルギーを節約するため走ることを怠って、目標点に着かない。逆に K を大きくしすぎれば、エネルギーを無視して最終値の誤差を小さくするためブレーキ時間を長く取り、低い減速度で停止点を微調整するような走り方になる。そこで、実用的に良い解を得るには、最終値誤差の基準を設け、 K を小さい方から徐々に増やし、この基準を初めて満たした曲線を最適運転曲線とした。したがって、個々の走行条件により適切な K の値は異なる。



(a) Running profile



(b) Energy consumption

図9 終端値ペナルティ係数の影響

Fig. 9 Effects of terminal penalty coefficients.

4.3 状態変数の量子化と補間の問題

電磁界の渦電流場や流体の、領域分割法に基づく時間依存性のある数値解析の場合と同様、状態変数の「空間分割」と時間ステップの幅には密接な関係があり、低速域での位置の分割、加減速度が必然的に低くなる高速域での速度の分割を、細かくしないと好ましい計算結果が得られなかった。また、図 6 で示される、各ステップにおける最適戦略による時間ステップごとの軌道の位相面到達点は、格子点をはずれているので、最終的に連続軌道を算出するためにこれらをつなぐ際には、双一次補間を行った。

4.4 制御入力(ノッチ操作)が振動的になる傾向

図 10 に図 8(1)の場合の、制御入力(ノッチ・シーケンス)を示す。先行研究(2)の知見によれば、ノッチは 10(最大加速)→5(惰行)→1(最大減速)となるはずだがそれと比較してノッチ・シーケンスが若干ばたついて振動的になっていることがわかる。今回の計算では、周波数特性的な考察をいっさい行わぬまま、機械的にタイムステップを 1 秒と決めて離散化を行い、動的計画法の意志決定と、軌道計算デジタルシミュレーションのための時間周期を同じにとった。しかし、本来の現象が、連続的な状態空間、連続時間における微分方程式で記述されていることを考慮すれば、良い計算のためには、意志決定周期に対して軌道計算の時間

周期を十分細かくとる必要がある。その上で軌道計算の結果が「等価的に連続系」と見なせるのであれば、意志決定のための標本化を行う際に、周波数特性も考慮して、この連続系モデルに折り返し雑音を防止のためのローパス・フィルタの要素を入れるなど、デジタル制御の基本的技法の適用が必要と考えられる。

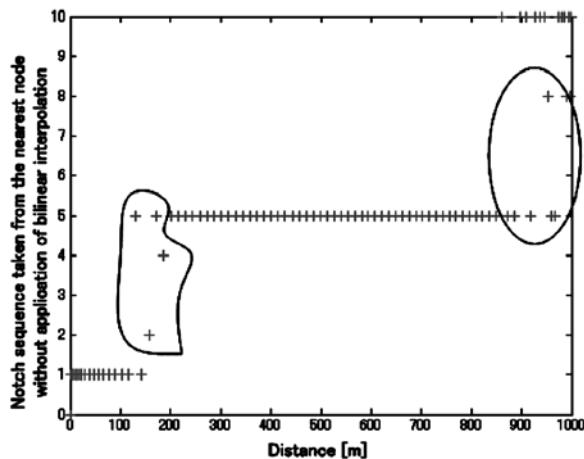


図 10 図 8(1)の場合のノッチ・シーケンス
Fig. 10 Notch sequence of Fig.8 (1).

4.5 区間の速度制限の影響

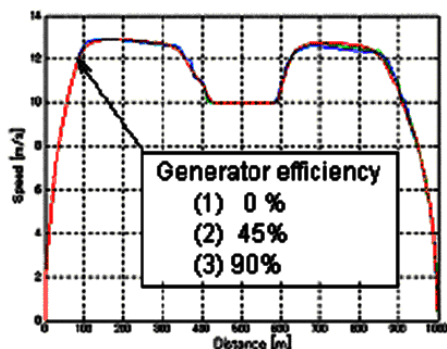


図 11 速度制限区間がある場合の最適運転曲線
Fig. 11 Optimal operation with speed limitation.

図 11 に示すように、状態変数不等式制約となるためこれまで難しいとされてきた区間の速度制限のある場合も、本手法では問題なく解くことができた。速度制限のために高速で走行距離を稼ぐことができず、時間に余裕が無くなるため等速走行のモードが多く表れている。回生能力にかかわらず走行曲線がほぼ一意に決まってしまうこともわかる。

5. おわりに

本資料では、列車運転の最適運転や自動運転の研究のために、Bellman による動的計画法を応用することを提案した。そして、1 列車運転の簡単な系を例題として、その具体的なアルゴリズムと特長を論じた。そして、実際に簡単な条件では先行研究から得られている知見と概ね似た解が得られることを確認した。さら

に、従来の方法では計算が難しいとされてきた速度制限区間が一部に存在する場合の省エネルギー運転曲線を求め、この方法が条件の複雑な場合にも有力な計算手法であることを確認した。一方、本計算法では、終端条件をペナルティという形で評価関数に組み込んで与えていることから、その重みの与え方が解に影響すること、本来連続な状態変数および時間の現象を量子化・標本化して離散問題として解くことに伴う問題点があり、プログラム実装や数値解を求める際に、工夫を要することもわかった。最後に、本方法の特長と今後の検討課題をまとめる。

- (1) 本方法によれば、き電系の回路方程式、列車の非線形走行抵抗、勾配の影響などを任意に入れることは容易である。
- (2) 2 列車の最適協調運転の探索、閉塞システム・信号保安システムによる運転上の制約の影響、変電所送り出し電圧のタップ制御と最適運転ノッチ制御の検討なども、探索空間が広がることを容認できれば原理的に可能である。
- (3) 上記の複数列車の協調運転に関しては、特にブレーキ時に回生失効を防ぐことを考慮した運転方法を定量的に示すことが今後の検討の大目標になる。
- (4) 複数列車系を扱い、さらに電気系の回路方程式をも考慮する場合には、「状態変数」の数が、本資料に示した例とは異なり 2 より大きくなるため、探索空間が大きくなり、計算量やメモリの削減の工夫が必要となる。

参 考 文 献

- (1) R. Takagi and S. Sone :「列車の最適走行パターン問題の数値解」, Proceedings of Annual Meetings of IEEJ-IAS 1994, August 1994, *written in Japanese*
- (2) 金良模「省エネルギーを考慮した列車運転制御」, Doctoral Thesis at the University of Tokyo 1985, *written in Japanese*
- (3) 村田, 永田, 秋山:「駅間の速度制限を考慮したエネルギー運転曲線作成方法」平成 7 年度鉄道技術連合シンポジウム pp.479-482
- (4) R. Bellman and R. Kalaba: "Dynamic Programming and Modern Control Theory," Academic Press 1965
- (5) T. Koseki and T. Suzuki, "Application of the Dynamic Programming to a Calculation of Energy Saving Running Profile of a Train for Investigating Optimal Electric Brake," Proceedings of IEEJ-IAS 2001, pp. 1289-1292, Tokushima, Japan, August 1994, *written in Japanese*
- (6) Chinchun Yao and T. Koseki, "Optimization of Running Profile of Train by Dynamic Programming," IEEJ National Convention 2002, Tokyo, Japan, March 2002

都市近郊鉄道における運転整理案の作成と評価

長崎 祐作*, 古関 隆章
(東京大学)

Generation and Evaluation of Urban Railway Rescheduling Plan

NAGASAKI Yusaku*, KOSEKI Takafumi (The University of Tokyo)

Abstract

In current railway rescheduling, there is no consideration of benefit and loss from the viewpoint of passengers. There is no quantitative index to evaluate rescheduling plan except the time at which schedule is recovered to original plan. This paper shows the method to assist generation of rescheduling plan by computer and to calculate evaluation index from the viewpoint of passengers automatically.

キーワード: 運転整理、都市近郊鉄道、評価、格上げ
(train rescheduling, urban railway, evaluation, upgrading)

1. はじめに

現状の運転整理においては、評価は正常運転に復帰した時刻というような鉄道事業者の立場から見たものがほとんどで、乗客の立場から見た評価を運転整理に反映させることは行われていない。林の先行研究^[1]においては、まず運転整理案に対する乗客の立場から見た評価指標を提案し、時隔調整や林の提案する新しい運転整理手法「格上げ」について、ある1つの運転中止パターンについてその有効性を検証している。本論文では、この乗客の立場から見た評価指標をコンピュータを用いて自動的に計算し、運転整理案の作成を支援できるようにする方法について説明する。またそのツールを用いて「格上げ」といふ運転整理手法についてより一般的にその有効性を検証する。

2. 運転整理案の評価

2.1. 評価項目

先行研究^[1]に従って、評価項目としては損失時間、混雑度、乗換回数³の3つを金額に換算して一元的に評価する。

2.1.1. 損失時間

損失時間は、出発駅から到着駅まで直行する列車があったと仮定した場合の所要時間に比べてどれだけ余計に時間がかかったかを表すものである。従って、正常運転時であっても乗換や待ち時間があるため損失は発生している。損失時間の評価式は式(1)に示した通りである。

$$L_1 = \mathbf{w} \times \sum_{i=0}^N (t_i' - t_i) \quad (1)$$

N : 乗客の総数

t_i : i 番目の乗客の直行時の所要時間

t_i' : i 番目の乗客の運転整理時の所要時間

\mathbf{w} : 時間価値(円/分)

時間価値 \mathbf{w} は、乗客の時間あたりの賃金をもとにした所得接近法により、都市圏ではおよそ50[円/分]と求められている^[2]。

2.1.2. 混雑度

混雑度の評価については、混雑時に1分を何分に感じるか、人間の感覚の非線形性を表した係数^{[2][3]}を用いて時間に換算し、それにその混雑を経験した人の人数と時間をかけ、これに時間価値をかけて金額に換算する。

$$L_2 = \mathbf{w} \times \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=1}^{H_j} \{ f_c(c_{jk}) \cdot q_{jk} \cdot t_{jk} \} \quad (2)$$

n : 全駅数

\mathbf{w} : 時間価値

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} : その乗客数(人)

t_{jh} : その所要時間(分)

f_c : 表1に示す混雑に対する人間の非線形な感覚を表す係数

表1 混雑に対する人間の
非線形な感覚を表す係数

Table 1. Coefficient representing nonlinear
human feeling against train congestion

混雑度R(%)	f _c (係数)
0 ~ 100	0.00027R
100 ~ 150	0.000828R-0.0558
150 ~ 200	0.00179R-0.2
200 ~ 250	0.0069R-1.22

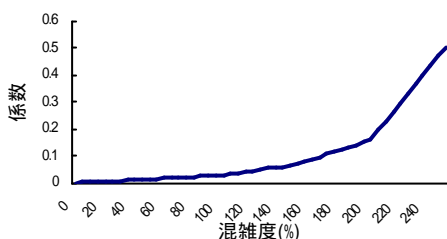


図1 混雑度と係数の関係

Fig. 1. Characteristic curve of

the human feeling factor against congestion rate

2.1.3. 乗換回数

乗換は、実際に乗換にかかる時間以上に乗客に負担となるため、乗換にかかった時間を損失時間として評価する以外に、その回数自体を評価する。乗換1回を10分に換算して、それを金額に換算する。

$$L_3 = 10 \times w \times \sum_{i=1}^N r_i \quad (3)$$

N: 乗客の総数

: 時間価値(円/分)

r_i: 乗客iの乗換回数

2.2 乗客行動推定

2.1に示した評価値を実際に計算するためには、与えられたダイヤの上で乗客がどのように行動したかを知る必要がある。このため、以下の乗客行動仮定をおくこととする。

- ・ 逆方向乗車は認めない
- ・ 乗客は目的地への到着時刻が最も早くなる経路で移動する
- ・ 到着時刻が同じになる経路が複数ある場合は、乗換回数が最も少なくなる経路で移動する
- ・ 乗換回数も同じになる経路が複数ある場合は、乗換待ち時間が最も少なくなる経路で移動する

この仮定をすべて適用してもなお複数の経路が残るときには、それぞれの経路に需要を等配分する。

この経路を実際に計算するアルゴリズムは、図2に

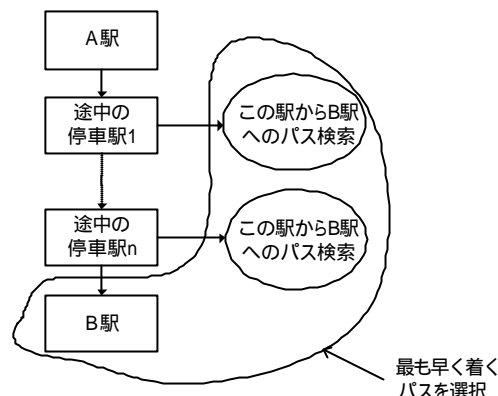


図2 乗客経路計算アルゴリズム

Fig. 2. Passenger path calculation algorithm

示したようになる。A駅からB駅への経路を計算する場合、まずA駅を通る列車で出発する経路全てを候補とする。そして、その列車についてB駅に到着する時刻を調べ、またその途中の停車駅全てで乗り換え可能な列車について同じ計算を再帰的に実行してB駅への到着時刻を求める。こうして得られた経路の中から乗客行動仮定に従って実際の経路を決定する。またこうして得られた経路の中には通過追い抜きなどにより、後に出発した方が先に到着する経路が入っている可能性があるため、不適切な経路を探して棄却する。

2.3. 評価値の算出

2.2に示したアルゴリズムである出発駅と到着駅間の経路を全て求め、その駅間の単位時間当たりの乗客需要を与えると評価値を算出できる。各経路に割り当てられる乗客数は、その経路と前の経路の時間間隔に単位時間当たりの乗客需要をかけたものとして計算できる。経路ごとに損失時間と乗換回数は決まるので、式(1)と式(3)により評価値を算出できる。混雑度については全ての駅間の経路の計算と乗客需要の割り当てを行い、各列車の各停車駅間ごとに乗客数を計算することによって得られる。

2.4. 評価範囲の決定法

この評価指標は、列車間を乗換える乗客が存在するために、1列車ごとに計算したりある時間範囲について計算したりできるものではない。都市近郊の鉄道について考えると通常同じパターンのダイヤが周期的に繰り返される「パターンダイヤ」となっているので、このパターンを単位に評価することができる。最悪でもパターンの周期長が1日であると考えればほとんどのダイヤについて当てはめて考えられる。

正常運転時については、評価対象範囲としてこのパターン1周期分を選べば、ダイヤ全体について評価したことになる。一方運転整理時には話は単純ではなく、単

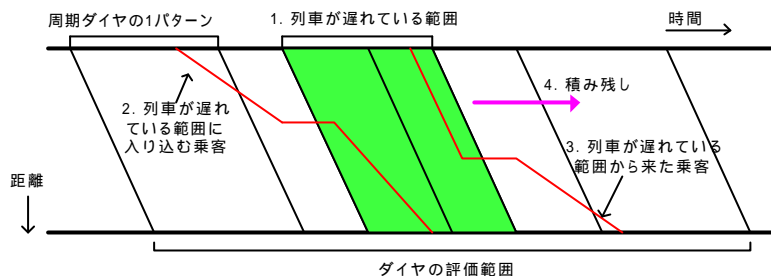


図3 運転整理時のダイヤの評価範囲の概念

Fig 3. A concept of time slot to be evaluated in train rescheduling

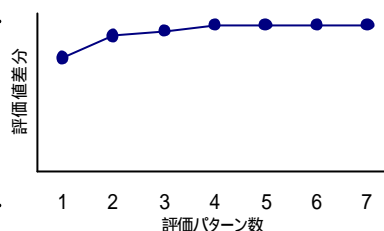


図4 評価範囲決定法の概念

Fig 4. Decision of the time slot to be evaluated

に列車が遅れている範囲について評価すればよいということにはならない。図3に示したように、列車が遅れている範囲に入り込む乗客、出て行く乗客、積み残しなどの影響が考えられるからである。

この範囲を実際に求めるには、評価対象周期を増やしながら毎回評価して、その差分を取ることが有効である。計画ダイヤの2周期分の評価値は1周期分の評価値の2倍になる。このことから、運転整理範囲の前後に計画ダイヤの1周期分を付け加えて評価すると、評価値は計画ダイヤの1周期分の評価値だけ増加するはずである。しかし、ダイヤ乱れの影響を受けている乗客がその範囲に存在すると、この増加量が1周期分の評価値に一致しなくなる。したがってこの増加量が計画ダイヤの1周期分になる地点まで評価範囲を広げていけば、評価範囲を確定できることになる。これを定式化すると式4のようになる。

$$\Delta_n = E_n - E_{std} \times n \quad (4)$$

これを元に、 $n_{+1} - n = 0$ となる n まで評価範囲を広げればよい。この概念を示したのが図4である。

3. 運転整理案の作成

3.1. 運転整理案作成の前提条件

運転整理案を作成する前提条件として以下のものを設定した。

- ・ 計画ダイヤより早く走る列車を認めない
- ・ 緩行列車が急行列車を追い抜くことは認めない
- ・ 駅間を走行するのにかかる時間は、両方の駅と列車の種別によって一意に決まる
- ・ 事故による運転中止が起きているときには、できるだけ駅間に列車を止めないようにしながら、進めるだけ先の駅に進めておく

また、線路同士の平面交差支障関係や乗務員運用、車両運用などは現状では考慮されておらず、将来の課題となっている。

運転整理案を作成するシステムに与える情報をまとめると、表2のようになる。

表2 運転整理システムに与える情報

Table 2. Information necessary for train rescheduling system

与える情報	その目的
正常時ダイヤ	早着・早発の禁止
待避可能駅・折り返し可能駅の情報	待避変更・出発順序変更の検討
基準時分	駅間走行時分と停車時分の決定
事故条件	列車の動きを制約

3.2. 運転中止条件に基づく運転整理案の作成

指定された運転中止条件に基づき、運転中止後の運転整理案を作成する方法としては、図5に示したようなアルゴリズムを使用した。これは、全ての列車について現在の位置と状態を保持しておいて、一定時間ごとに現在位置を更新していき、条件を判定して状態を変更していくものである。駅間を走行している列車が駅に到着するための条件は、現在までの走行時間が基準時分より長くなっていること、ダイヤより早着ではないこと、先行列車との時隔が守られていること、を全て満たす必要がある。駅に停車している列車が駅を出発するための条件は、現在までの停車時間が標準停車時間より長くなっていること、ダイヤより早発で無いこと、先行列車との時隔が守られていること、そして自列車の出発順序が来ていること、を全て満たす必要がある。

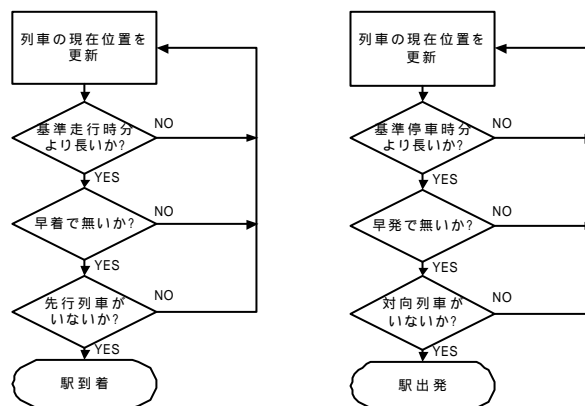


図5 時刻の決定アルゴリズム

Fig 5. Time deciding algorithm

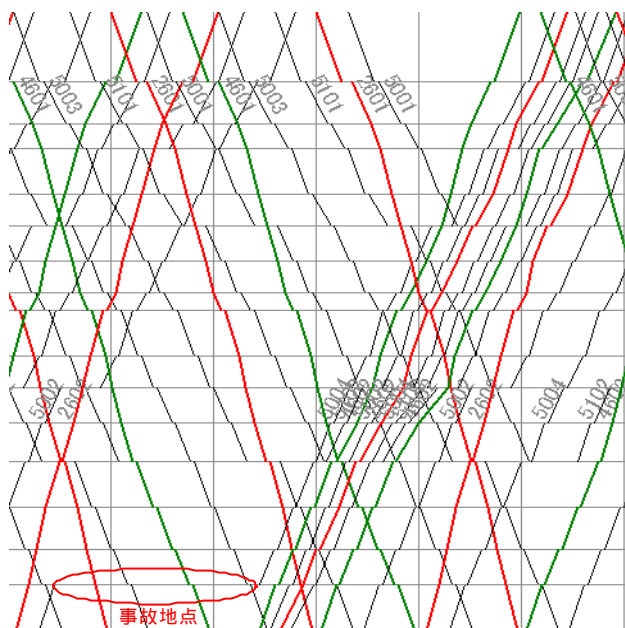


図6 計算機により作成された事故後のダイヤ

Fig 6. Diagram after the accident generated by computer

図6にこのアルゴリズムを実装したプログラムにより作成されたダイヤを示した。この例では20分周期で、1周期に上下それぞれ急行1本、準急1本、各停2本、途中駅折り返しの各停1本の5本が運行されているダイヤを与え、上りの各停列車が途中駅で20分間事故により運転を中止したという設定にしている。また、運転再開後の列車には何も運転整理をせず、正常時のダイヤと同じ列車順序を守って、ただ詰めただけのダイヤとなっている。このため事故が起きた列車と逆方向の各停列車に、折り返し列車の遅れの影響を受けて長く待避している箇所が見られる。

3.3. 待避変更検討の自動化

待避変更の検討は複雑な組み合わせ問題であり、計算機により最適化することは一般に困難であることが知られている。しかし、図6に見られるように、明らかに

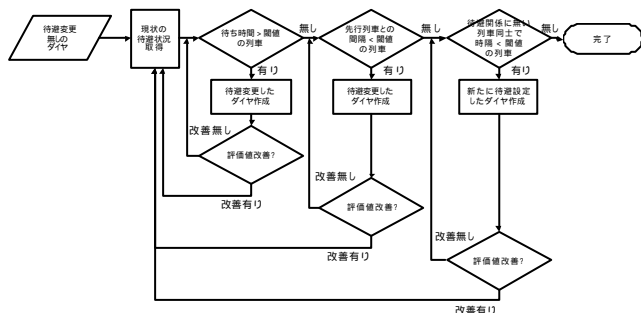


図7 待避変更検討アルゴリズム

Fig 7. Sideout change deciding algorithm

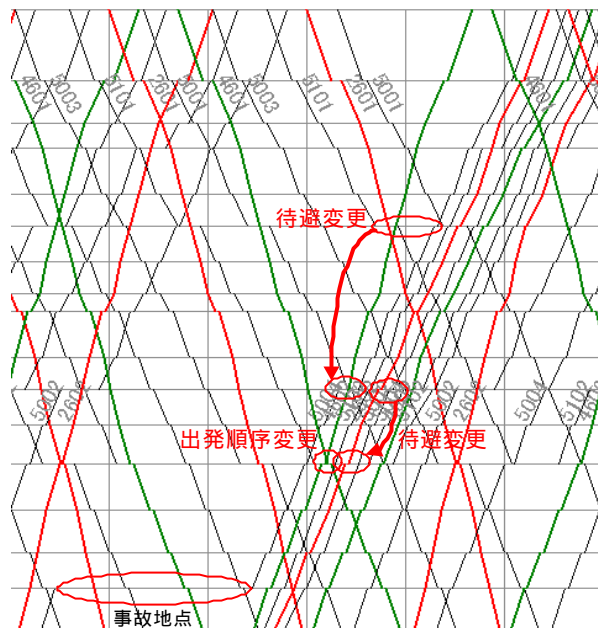


図8 待避変更を検討した後のダイヤ

Fig 8. Diagram after deciding sideout changing

待避変更を実施した方が良くなると思われる箇所もあり、こうした箇所を計算機によって自動的に検出して変更することを検討した。図7にそのために用いたアルゴリズムのフローチャートを、図8にそれによって得られた待避変更後のダイヤを示す。

アルゴリズムは、緩行列車が閾値の時間以上待避している場所、急行列車が緩行列車に閾値以下の時間まで接近している場所を探して、順に待避変更したものとしなかったものの列車の総遅延時間を比べて、良かった方を採用していくものになっている。それが結果的に第2章で記述した評価関数をどれくらい小さくしたかを見ることにした。

3.4 格上げ検討の自動化

「格上げ」という運転整理手法は、都心部のターミナルから郊外へ向けて延びている鉄道で、上り方向の列車に事故が起きて運転が中断した場合に、運転再開後の各停列車を急行に種別変更して、溜まっている乗客を一気にさばくという方法である。こうした鉄道においては、多くの需要が都心部の1つか2つのターミナル駅と、郊外の各駅との間に存在すると考えられ、上り方向の乗客はほとんどが終点まで乗るということに着目した方法である。この手法を使うことによって、溜まっていた多くの乗客にとっては目的地へ速く到達することができるようになるが、急行が通過する途中駅からの乗客にとっては逆に運転再開後の列車の到着が遅くなる可能性があり、また途中駅までの乗客にとっては乗り換えが必要となる。この得失を定量的に評価するために格上げの機能をプログラムに実装した。

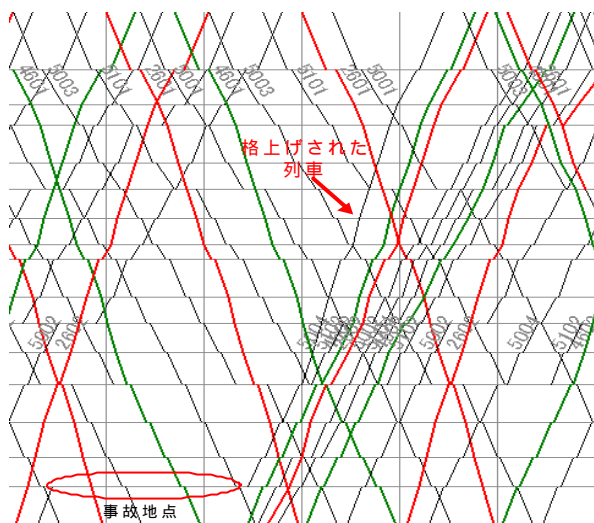


図9 格上げを実行したダイヤ
Fig 9. Diagram after upgrading of train type

格上げ対象列車としては、運転再開直後に最初に運転される各停列車とし、乗客の混乱や逆行乗車を避けるために、格上げを実行するのは急行停車駅に限ることとした。つまり、格上げ対象列車は次の急行停車駅までは各停のまま走り、そこで種別を変更して急行に格上げするものとした。図9に格上げを実行したダイヤを示す。運転再開直後の列車が急行になることにより、その後ろを走っていた準急と急行も早く走ることができるようになり、折り返しの逆方向の列車も早く運転再開されていることが分かる。

4. 運転整理手法の有効性分析

前章までで説明した方法をプログラムとして実装し、実際の路線のモデルを使って「格上げ」という運転整理手法の有効性分析を試みた。

4.1. 路線のモデル

都市部のターミナルから郊外へ延びる鉄道のモデルとして西武鉄道新宿線を採用した。このうち、田無以遠では急行が各駅停車となり格上げの効果が無くなるため、西武新宿-田無間を対象として評価を行った。この区間の路線図を図10に示した。の新宿線の昼間のダイヤにあわせて、20分周期で1周期に上り、下りそれぞれ

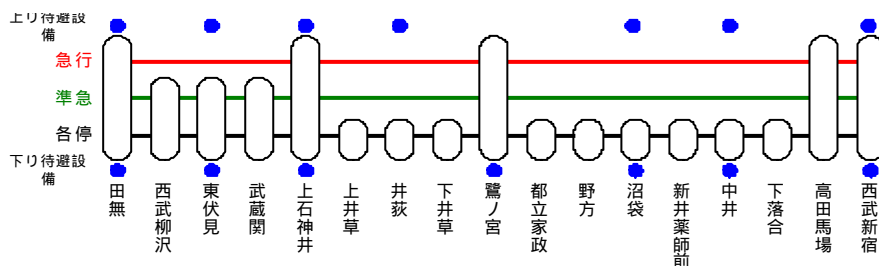


図10 西武鉄道新宿線路線図
Fig 10. The map of Seibu Railway Shinjuku line

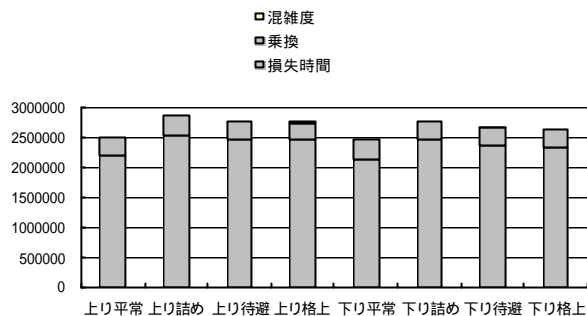


図11 上井草で20分運転中止したときの評価
Fig 11. Evaluation in case of stopping operation for 20 minutes at Kamiigusa

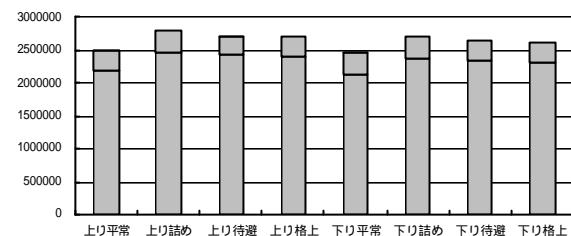


図12 西武柳沢で20分運転中止したときの評価
Fig 12. Evaluation in case of stopping operation for 20 minutes at Seibu-Yagisawa

急行1本、準急1本、田無までの各停2本、上石神井止まりまたは始発)の各停1本とした。列車の定員は1両当たり40人で、急行と準急は10両編成の1400人、各停は8両編成の1120人とする。

4.2. 評価結果

図11に上井草駅で上りの各停列車が20分運転中止したときの評価結果、図12に西武柳沢駅で上りの各停列車が20分運転中止したときの評価結果を示した。それぞれ、上り方向の乗客需要が多いときと下り方向の乗客需要が多いときの2種類の乗客需要を与えて評価している。平常というのは、正常運転時のダイヤ1周期分を評価したものである。それ以外の運転整理時の評価については、評価対象周期数で割って1周期あたりの評価値を求めている。ただし、ここではどの運転整理手法でも評価対象周期数が同じになったために、1周

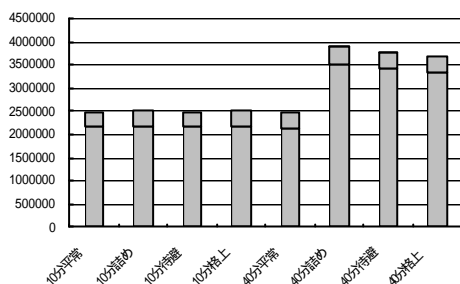


図13 西武柳沢での運転中止時間を変えた評価
Fig 13. Evaluation changing operation stopping time at Seibu-Yagisawa

期あたりの評価値で比較することができるが、対象周期数が異なる場合には1周期あたりの評価値ではうまく比較できなくなることには注意しなければならない。

評価値を見ると、列車順序を全く変更せずに作ったダイヤに比べて、待避変更を実行すると評価値が改善しており、格上げを実行するとそれよりさらに評価値が改善していることがわかる。また、昼間の比較的需要が少ない時間帯の乗客需要を入力したため、混雑度による損失はどのケースでもほとんど現れていない。事故が発生した列車と同方向の需要が多いときに大きな効果が現れるものと予想していたが、実際には逆方向の需要が大きいときでも同様に効果を発揮している。これは、列車が早くターミナル駅(西武新宿駅)に到着して折り返しを早くすることができるためであると考えられる。これと同様の効果は下り列車の時隔調整によっても得ることができると思われる。

図13では、西武柳沢駅での運転中止時間を10分と40分に変更したものを評価した結果を示した。10分の運転中止時間では平常時に比べても評価値はあまり悪化していないが、40分の運転中止時間では大きく悪化しており、また格上げによる改善効果が大きく現れていることがわかる。

これらの結果から、格上げは乗客需要の偏りによらず、運転中止時間が長いときに効果を大きく発揮するということがわかる。

4.3. 混雑度の評価

表3に待避変更のみと格上げを含めた運転整理手法で作成したダイヤについて、最混雑区間とその混雑度を示した。格上げの方が最大混雑度が悪化しているのは1例のみで、他はいずれも混雑度を改善していることがわかる。

表3 最混雑区間と混雑度

Table 3. Most crowding section and its congestion rate

事故条件	運転整理手法	最混雑区間	混雑度 (%)
上井草 下り需要大	待避変更	馬場 - 下落合	146.70
	格上げ	馬場 - 下落合	107.86
上井草 上り需要大	待避変更	下落合 - 馬場	162.50
	格上げ	下落合 - 馬場	126.88
西武柳沢 下り需要大	待避変更	馬場 - 下落合	142.41
	格上げ	馬場 - 下落合	87.05
西武柳沢 上り需要大	待避変更	下落合 - 馬場	158.66
	格上げ	下落合 - 馬場	175.18
西武柳沢 運転中止 10 分	待避変更	馬場 - 下落合	78.75
	格上げ	馬場 - 鷺ノ宮	57.93
西武柳沢 運転中止 40 分	待避変更	馬場 - 下落合	260.09
	格上げ	馬場 - 下落合	196.70

5. まとめ

本論文では、まず運転整理手法を乗客の立場から見た方法で評価する方法を示し、その評価値を計算機を用いて自動的に計算する方法を示した。またその方法を実装したプログラムを用いて、格上げという新しい運転整理手法について実際の路線のモデルを用いて評価を試みた。その結果として、格上げは乗客需要の偏りには大きな影響を受けず、運転中止時間が長いほど大きな効果を発揮することがわかった。

今後の課題としては、特発や運休・打ち切り、運用変更や格上げ以外の種別変更など、実際に用いられているさまざまな運転整理手法を含めて評価ができるようにプログラムを改良すること、車両運用や乗務員運用、平面交差支障など現状では考えられていない制約条件を考慮できるようにすることなどがある。また、遺伝的アルゴリズムなどの最適化手法を適用した待避変更の検討を詳しく調べてみたいと考えている。

文献

- [1] 林・古閑:「都市圏鉄道における運転整理の評価と効果的手法の提案」, 平成13年電気学会全国大会 4-234, 2001
- [2] 「鉄道プロジェクトの費用対効果分析マニュアル99」, 運輸政策研究機構, 1999
- [3] 美谷、家田、畠中:「乗車位置選択行動モデルを用いた混雑費用の定量的評価法」, 土木計画学研究・論文集, No.5, pp.139-146, 1987

モバイル端末による個別誘導案内を用いた鉄道の 再スケジューリングとその効果分析

古関 隆章, 長崎 祐作 (東京大学), 楊 中平 (東芝), 曾根 悟 (工学院大学)

Train Rescheduling and Effect Analysis Using Personal Guidance for Passengers by Mobile Terminals
KOSEKI Takafumi, NAGASAKI Yusaku (The University of Tokyo), YANG Zhongping (Toshiba)
SONE Satoru (Kogakuin University)

Abstract

Authors propose a novel train scheduling in a railway network taking advantage of information on passenger flow at each path with a modern personal information service at an abnormal operation. The personal guidance information shall be determined through the application of traffic equilibrium theory and supplied to each passenger's personal mobile information terminal. The optimal train rescheduling is calculated also by using the traffic equilibrium analysis. The control method of passenger's flow is positively evaluated through a case study on a standard railway network model.

キーワード：運転整理，選択停車，迂回経路，モバイル情報端末
(train rescheduling, selective stop, roundabout route, mobile information terminal)

1. はじめに

台風、車両事故、人身事故などによる列車運行乱れは、乗客に時間的・精神的・肉体的な不利益を与えることになるため、乗客に対するサービス品質が急速に低下してしまう。鉄道事業者は運行乱れによる乗客の被害を低減するために、リアルタイムに列車運行スケジュールの変更いわゆる運転整理を行うことで対応している。多大な努力と長年の蓄積で運転整理支援システムの実用化や様々なノウハウを得たことにより、運行乱れ時のサービス低下は改善されつつあるが、運転整理案の定量評価や異常時に適切な乗客個別誘導案内など課題も依然多く残されている。

運行乱れを生じた際の混乱を回避するためには、乗客にリアルタイムに事故状況や列車運行変更情報の伝達や乗客個別に取るべき乗車行動の指示が重要である。しかし、現状の鉄道情報環境システムでは、乗客個別案内ができないため、良い運転整理案の作成が可能でも、案内に起因する制約から実施できない場合がある。例えば、運転再開後の列車運行を急行から普通列車に変更するという格下げは許されるが、その逆は許されていない。それは列車運行変更情報の案内を全乗客に徹底させられないことによる誤乗車を防ぐためである。また、現状では異常時に乗客に乗るべき列車、迂回ルートの個別案内もできていないので、乗客

の損失時間の増大、システム全体の混乱を避けたい状況になっている。

上記の状況を踏まえて、本稿では、リアルタイム乗客個別案内機能を持つモバイル情報端末を鉄道システムに導入する前提で、大事故による鉄道ネットワークにおける一路線あるいはその路線の一部が長時間不通になった際の、迂回ルートを活用した乗客個別誘導案内法とその効果を検討する。

2. 鉄道におけるモバイル情報端末の利用

近年、高度道路システム (ITS: Intelligent Transportation Systems) を代表する高度情報通信技術による交通システムへの応用は目覚ましい発展を成し遂げてきた。その中で、鉄道システムにおける画期的なサービス改善が期待できる非接触 IC カードシステムの研究開発が注目を浴びている。現在、非接触 IC カードシステムはすでに数ヶ国で実用化されている。これらのシステムを導入する主な目的は、乗車ルートと運賃を調べ、切符を購入し、改札機に切符を通すといった鉄道システムを利用する際の煩雑さを排除することである。1997 年に実用化された香港のオクトパスカードシステムは当時世界最大規模であり、このシステムの成功により世界中に大反響を起こした。その後、JR 東日本では 2001 年年末に「Suica」(Super Urban Intelligent

Card) という非接触 IC カードシステムを導入し、乗客から好評を博している。また、スイスでも 2005 年に「Easy Ride」システムが実用化に向け開発中である。

従来の非接触 IC カードシステムは自動運賃徴収という機能しかないが、筆者の研究グループでは近い将来実現されるべき次世代のシステムとして、情報提供機能などを持つ IPASS (Intelligent Passenger Assistance System) と名付けるモバイル情報端末を提案し、様々なアプローチからの検討を行ってきた [1]。IPASS では、公共交通を利用する際の様々な観点からの利便性の向上につながる機能を想定している。それをまとめると

1. ゲートレス運賃徴収
2. リアルタイム個別乗客案内
3. 高精度乗客情報収集

となる。

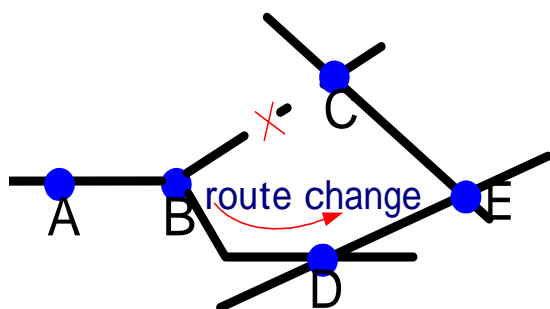


図 1 迂回経路の利用
Fig.1. Taking a roundabout route

3. 乗客個別誘導案内法の提案

多くの場合、乗客が自分の目的駅に行くのに、複数のルートが存在するのが一般的であるので、ネットワーク内のある路線あるいはその路線の一部の区間が不通になっても、図 1 に示されるように迂回ルートで目的地に行くことが可能である。勿論、迂回ルートを選択するかどうかは、事故の状況、復旧時刻、迂回経路の所要時間、混雑状況などの情報が決め手となる。現状では、これらの完全情報を正確に乗客に伝達できないため、迂回経路を取るかどうかは完全に乗客の自己責任になっている。

しかし、モバイル情報端末を導入すれば、乗客に対して事故状況、運転再開時刻、列車運行変更情報などの情報提供ができる。また、乗客個別誘導案内機能を活用すれば、事故発生時における運行状況事故回復予測時間などに基づいて、個々の目的地に応じた迂回ルートを案内することもでき、不要な混雑を招くことなく、乗客の所要時間短縮も可能と考えられる。ただし、ここでいう迂回ルートは路線のことを指すだけでなく、どの路線のどの列車に乗るべきかという情報をも含むものとする。

<3.1> 誘導案内情報の生成と評価のための前提条件
本稿で提案する個別案内情報を生成し、乗客の流れを解析し個別案内の効果を実量評価するために、以下の仮定をおく。

1. 平常時に事故路線の不通区間を通らない乗客は、事故が発生した際にも、通常と同じルートで目的地に行く。
2. 非事故路線の運行スケジュールは事故と関係なく、従来通りの運行とする。事故路線のスケジュールのみ変更可能とする。
3. モバイル情報端末を持つ乗客は、システム側の誘導案内を信頼し完全に従うとする。

<3.2> 乗客個別誘導案内の基本戦略
乗客個別誘導案内を行うために、基本的に二つの戦略がある。すなわち、

1. システム最適化配分
2. 利用者均衡配分 [2]

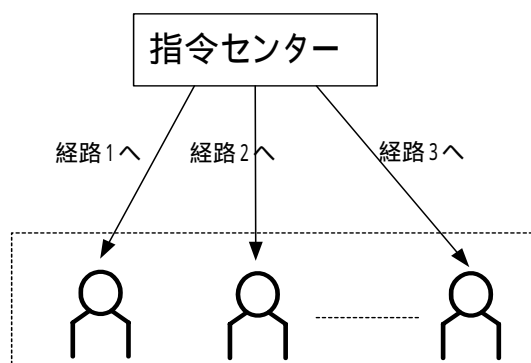


図 2 乗客個別誘導案内
Fig.2. Personal guidance for passengers

である。ここで、両者の違いについて考えてみよう。システム最適化配分はシステム全体の最適化、例えばネットワーク全体の乗客総所要時間の最小化を狙った配分方法である。配分した結果は個々の乗客から見て最適なものと言えない。極端な例でいうと、ある乗客が次の駅に行くのに数分しかかからないにも関わらず、システム最適化配分を行った結果、迂回ルートを利用させ1時間以上かかってしまうということもありうる。また、同じ出発駅、同じ目的駅に行く数人の乗客の間でも、所要時間や混雑率が異なる経路になったりして、乗客間の不公平を生じやすい。このような場合は利用者がシステム側の誘導に不満を持ち信頼しないという場合が少なからず発生し、<3.1>の仮定3が守られないことになる。

一方、利用者均衡配分の結果は個々の乗客からみて自分にとっては常に不効用が最も小さいルートを利用することとなるうえに、極端に特定のルートの負荷が大きくなるという

可能性を小さくするアルゴリズムも含んでいるので、システム利用率の観点からも合理的な解を与える性質を有する。

均衡分析は全ての乗客の完全最適行動を想定した場合の乗客需要予測手法であり、乗客の完全最適行動は乗客の長時間の自己学習によって獲得できるものである。しかし、図2のように、もしシステム側の「中央情報センター」が乗客の自己学習の代わって、利用者均衡分析の原則に従って経路指示を行うなら、利用者均衡分析はリアルタイム性を持つ制御の方法として用いられるようになって考えられる。したがって、本稿では、モバイル情報端末を持ち、事故によって迂回ルートへの誘導案内が必要な乗客について、利用者均衡配分法を用いた個別誘導案内法を提案する。

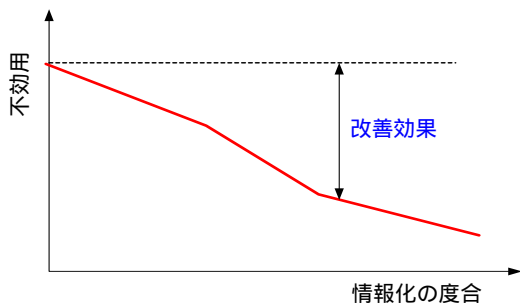


図3 情報化の度合による改善効果

Fig.3. The improvement effect according to information ration

4. 乗客個別誘導案内の効果検証にむけて

<4.1> モバイル情報端末所有率の定義

異常時における乗客個別誘導案内方法を確立することが重要であると同時に、情報化の度合と改善効果の関係を定量的に示すことも重要である。図3に示すように、情報化の度合と改善効果の関係が分かれば、事業者側にとって、鉄道システムにモバイル情報端末を導入するための投資根拠となる。

しかし、情報化の度合には広範な意味が含まれている。つまり、情報化の度合は多次元量であって、画一的に定義することは不可能である。例えば、全部の交通機関におけるモバイル情報端末の普及率やネットワークの全体の何パーセントの領域にモバイル情報端末を導入したかなど普及程度の観点から情報化の度合を定義することも可能であるし、乗客に提供する情報量、情報の中味などの観点から定義することも可能である。本論文では、情報化の度合を鉄道ネットワーク内におけるモバイル情報端末の普及率で表すこととする。さらに、モバイル情報端末の普及程度と異常時の乗客個別誘導案内効果の関係を定量的に解析するため、モバイル情報端

末の普及程度をモバイル情報端末所有率で代表させることとする。モバイル情報端末所有率を ϕ で表すこととすると、

$$\phi = \frac{q_m}{q} \quad (1)$$

を用いて表すことができる。ただし、ここでは、 q_m は総乗客人数の中でモバイル情報端末を持っている乗客数であり、 q は総乗客人数である。したがって、この値の範囲は

$$0.0 \leq \phi \leq 1.0 \quad (2)$$

となる。

モバイル情報端末所有の乗客と非所有の乗客の本質的な違いはシステム側の誘導案内を受けることが可能かどうかにある。すなわち、モバイル情報端末所有の乗客は常に列車運行情報を完全に得られるし、システム側の誘導案内も受けられる。一方、モバイル情報端末非所有の乗客は、異常時にシステム側の誘導案内を受けることが不可能なので、自分の知っている情報に基づいて迂回ルートの選択を行う。ただし、異常時にモバイル情報端末非所有の乗客に対して、列車運行再開時刻、再開後の列車運行スケジュールなどの情報をどの程度まで提供するかによって、乗客の自主的迂回ルート選択結果も異なる。そこで、定量評価のためには、モバイル端末非所有乗客に提供する情報内容、提供時点を明確に決めておく必要がある。

<4.2> 乗客個別誘導案内の評価量

路線あるいは路線の一部が不通になると、平常時にその不通区間を通る乗客の目的地に到着する時刻が余儀なく遅れてしまう。乗客誘導案内の目的は、乗客をスムーズに流し、かつ乗客の所要時間の延長を最小化するように乗客流制御を行うことである。乗客流を円滑化するには、特定の路線あるいは列車への乗客集中を避けるべきである。これは、定性的には、列車が混むほど実際の駅間の所要時間に対して乗客が感じる等価所要時間が長くなる効果を評価に導入することで図られる。本稿では、文献[7]のように混雑による不効用を時間換算にして表現することとし、列車の駅間等価所要時間を次の式を用いて表す。

$$t_a(x_a) = \begin{cases} t_{0a} \left[1 + \alpha \cdot \left(\frac{x_a}{C} \right)^\beta \right] & (x_a > C) \\ t_{0a} & (x_a \leq C) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、

t_{0a} : 区間 a の列車実所要走行時間

x_a : 区間 a 列車乗車人員

$t_a(x_a)$: 区間 a の列車等価所要時間

C : 列車の定員

α : 単位所要時間を 1 としたときの混雑不効用の重みを表すパラメータ

β : べき乗の形を決めるパラメータ

そこで、乗客個別誘導案内の良し悪しを事故時の等価所要時間と平常時の等価所要時間の差で評価する。式で表すと、

$$T_{loss} = T_1 - T_2 \quad (4)$$

となる。但し

T_{loss} : 総乗客等価損失時間の差

T_1 : 異常時の総乗客等価損失時間

T_2 : 平常時の総乗客等価損失時間

である。

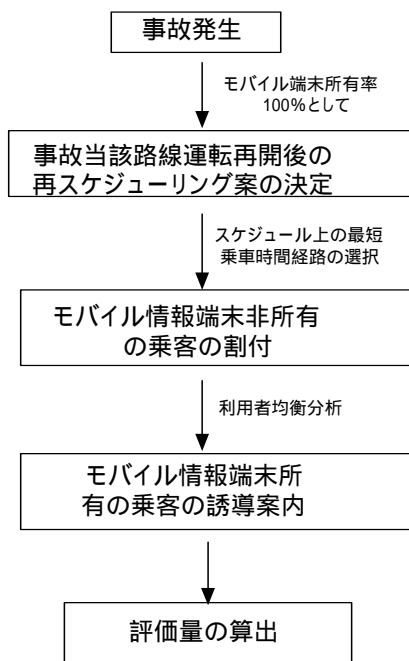


図4 乗客個別誘導案内の効果検証基本アルゴリズム

Fig.4. The basic effect verification algorithm of personal guidance

<4.3> 乗客個別誘導案内の効果検証アルゴリズム

乗客個別誘導案内の効果検証の基本アルゴリズムを図4に示す。乗客の乗車経路を決めるために、二つの問題を考慮しなければならない。

まず、第一の問題は、モバイル情報端末非所有の乗客の乗車経路をどう決めることである。モバイル端末非所有の乗客

はシステム側の誘導案内を受けられず、基本的に自分に都合の良い経路を選択するとするが、しかし本当に都合の良い経路を選べるかどうかは乗客の知っている列車運行情報次第である。現状では、乗客は鉄道ネットワークにおける地理的最短乗車経路を知っているが、日常使われていない経路の列車運行情報を完全に把握していないのが普通である。本論文では、モバイル端末非所有の乗客に列車運行情報を提供し、これらの乗客は混雑不効用を考慮せずにスケジュール上の最短乗車経路を選択するとする。

第二の問題は、モバイル端末所有と非所有の乗客のどちらを先に該当列車に割付けるかという問題である。もし、均衡分析理論に基づいてモバイル端末所有の乗客を誘導案内経路に、次にモバイル端末非所有の乗客を割付けると、結果的に割付を行った時とは混雑率が異なってしまう、システム側に提示された経路が端末所有者にとって必ずしも最適でなくなってしまう。したがって、本論文では、乗客の乗車経路の割付として、まず端末非所有の乗客を割付けてから、端末所有の乗客を割付けることとする。

5. 乗客個別誘導案内法の効果検証

<5.1> 鉄道ネットワークモデル

図5に示す鉄道ネットワークモデルを用いてシミュレーションを行う。1時間のODデータは表1に示す通りである。図6のように平常時のネットワークスケジュールは規格スケジュールパターンを採用することとする。想定する事故は図7のタイムチャートに示すように、11:00から図5の路線1の駅0 駅6方向の列車運行が事故で中止され、他の路線および路線1の6 0駅方向の列車運行は平常時通りに運行するとする。そして、運転再開は11:50とした。さらに、11:55分から路線1の駅0 駅6方向の列車運行が正常に復帰するとする。

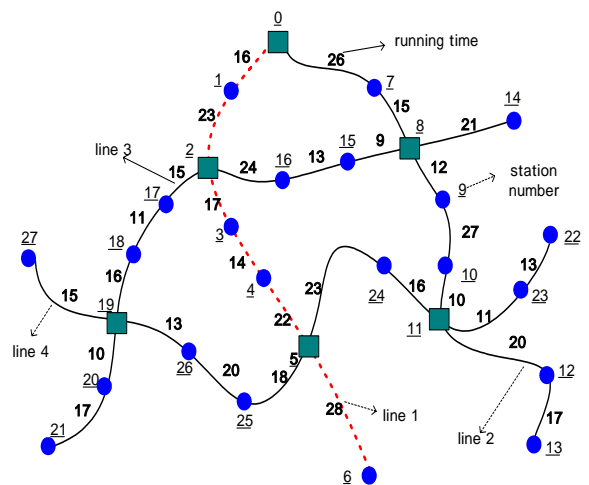


図5 鉄道ネットワークモデル

Fig.5. The railway network model

表1 ネットワーク1時間のODデータ表

Table 1. OD table of the network (per hour)

OD	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
0	0	62	131	129	88	96	228	90	136	91	84	84	64	162	17	14	10	9	8	14	15	20	14	21	13	24	8	16
1	74	0	40	52	31	122	206	57	4	8	31	7	11	16	23	12	8	6	12	24	7	12	12	19	12	13	4	12
2	50	67	0	9	40	151	180	33	24	28	31	14	4	16	38	67	72	91	24	81	69	76	23	8	7	16	28	14
3	108	74	91	0	14	100	151	21	55	13	19	13	26	43	14	20	9	16	8	7	14	9	24	9	16	20	24	9
4	76	9	48	16	0	172	235	23	20	48	76	22	38	48	20	9	11	13	14	16	21	12	21	12	15	9	32	25
5	184	76	97	41	28	0	168	10	15	16	7	67	23	32	18	9	14	6	4	96	12	38	62	28	23	12	31	16
6	218	60	86	55	28	84	0	81	81	26	27	32	16	32	35	18	12	15	19	40	36	49	14	26	19	48	38	30
7	98	12	52	12	50	36	40	0	55	33	79	57	26	80	48	20	30	14	7	15	8	22	16	10	16	28	9	16
8	76	21	74	10	20	26	20	48	0	79	44	84	38	60	34	42	54	26	22	38	16	53	12	21	28	12	7	26
9	72	8	36	12	19	9	12	64	76	0	4	76	57	72	24	11	8	10	12	8	11	6	7	7	14	2	5	9
10	110	5	22	8	12	14	20	59	95	36	0	75	47	88	8	14	16	7	13	9	12	16	9	12	2	4	7	12
11	92	12	19	15	4	86	26	70	99	74	86	0	48	86	16	24	7	12	14	50	11	30	60	48	57	86	36	86
12	86	9	5	10	13	8	9	50	96	46	77	108	0	64	6	19	10	8	11	8	19	22	14	26	33	21	4	20
13	235	12	18	24	14	10	5	69	63	47	68	146	64	0	9	16	8	13	12	21	12	28	21	11	30	18	23	10
14	12	3	26	9	5	4	9	12	30	2	14	7	9	16	0	32	37	21	23	10	43	120	9	8	7	19	10	18
15	9	6	25	8	7	9	4	6	36	12	8	9	9	15	22	0	13	19	10	28	19	62	14	10	8	14	7	15
16	16	21	60	9	15	9	8	11	50	16	13	12	6	5	72	45	0	51	34	28	60	42	13	12	11	24	18	12
17	7	14	7	11	8	13	30	17	60	14	6	7	8	12	81	68	40	0	28	61	32	76	25	8	35	19	14	25
18	7	3	19	12	4	18	14	9	4	8	15	4	13	23	14	38	76	41	0	74	40	86	12	13	18	20	12	28
19	15	6	56	5	6	14	20	84	12	8	28	17	9	78	12	57	50	31	0	14	88	76	91	76	36	55	134	24
20	7	8	70	18	11	5	9	3	60	8	12	15	8	16	86	50	21	68	19	51	0	74	28	39	49	11	36	27
21	23	11	84	12	13	10	4	8	28	20	15	9	12	10	173	55	69	54	81	74	93	0	34	36	23	41	12	44
22	19	8	7	5	8	42	9	19	17	7	19	76	31	15	20	24	14	10	24	72	69	60	0	99	65	72	96	211
23	14	10	9	14	18	60	6	18	8	3	4	91	5	27	16	9	12	13	9	79	24	2	121	0	84	52	45	101
24	13	4	7	10	12	74	7	10	4	8	9	74	23	9	30	10	15	9	19	38	16	21	94	42	0	79	50	86
25	8	5	8	4	11	64	13	6	6	3	7	60	2	31	29	7	7	24	4	60	79	62	86	40	64	0	24	81
26	11	10	14	9	9	47	4	4	2	7	6	60	12	20	6	3	10	14	8	64	18	20	75	55	91	55	0	82
27	19	12	7	10	6	57	26	12	10	9	12	96	40	24	16	6	9	6	14	108	43	15	167	68	59	44	76	0

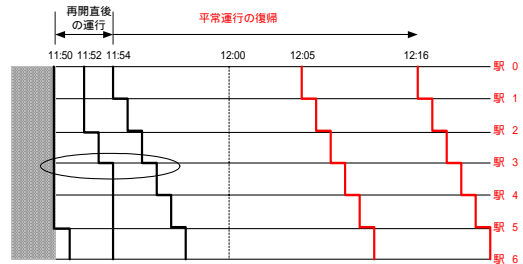


図8 運転再開後の事故路線の運行スケジュール

Fig.8. Train reschedule of an accident line after restarting

<5.2> 検討ケース

現状では、事故発生した直後にネットワーク内にある乗客に、どの路線のどの区間が不通になったかを伝えるが、事業者側からは運転再開時刻や正常スケジュールへの復帰時刻を伝えていない。ただし、鉄道事業者側からでなく、ラジオやテレビ局など第三の情報プロバイダを通じて列車運転復帰見込み時刻を伝えるケースはある。

いつ、どんな情報を乗客に提供するかによって、モバイル情報端末非所有の乗客の自主的な迂回ルートの選択結果が当然違ってくるし、乗客個別誘導案内の結果も違ってくる。本稿は図7に示すように、事故発生した直後に、全乗客に運転再開時刻、再開後の列車運行スケジュールおよび列車運転復帰時刻を知らせる。システム側からモバイル情報端末を持つ乗客に対して、どの列車を乗るべきかを指示するが、どの車両に乗るかは指示しない。また、モバイル情報端末非所有乗客は、スケジュール上の最短乗車時間ルートを選ぶとする。

<5.3> 運転再開直後の当該事故路線の再スケジュールリング案の決定

事故当該路線の運転再開直後の列車運行法として、選択停車[4]を利用した再スケジュールリング案の自動生成法を採用する。詳細は文献[5]を参考されたい。

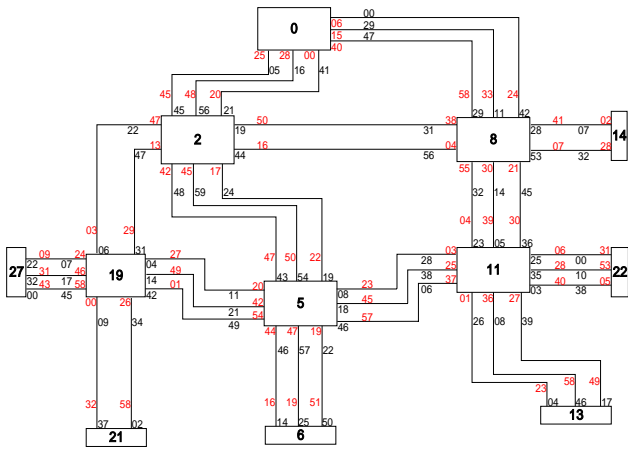


図6 平常時の列車運行スケジュール

Fig.6. The normal train operation schedule

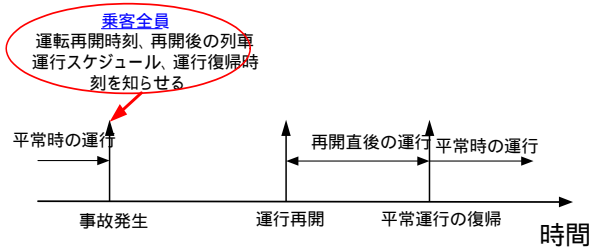


図7 検討ケース

Fig.7. Study case

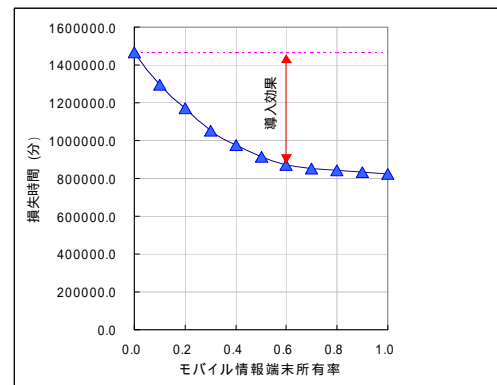


図9 モバイル情報端末の導入効果 (α=0.2, β=4)

Fig.9. Introduction effect of mobile terminals (α=0.2, β=4)

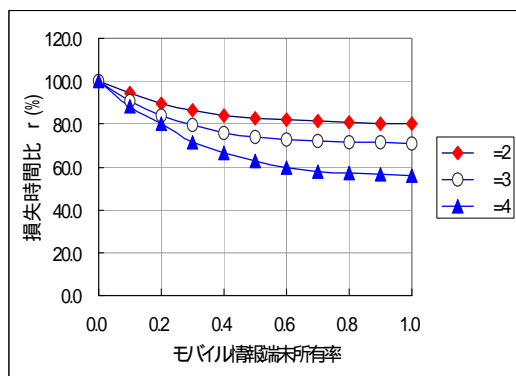


図 10 感度分析 (=0.2)

Fig.10. Sensitivity analysis(=0.2)

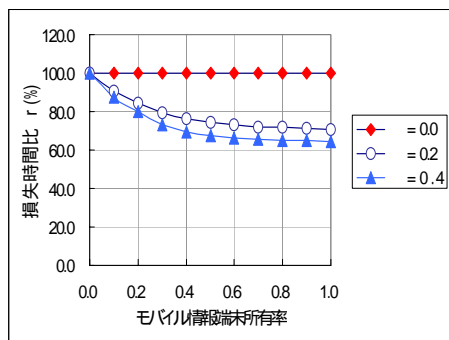


図 11 感度分析 (=3)

Fig.11. Sensitivity analysis(=3)

<5・4> 検証結果と考察

文献 [5] と同じように、運転再開直後の列車運行パターンの探索は SA 法 [6] を用いて行った。得られた運転再開直後の列車運行パターンを図 8 に示す。

図 9 はモバイル情報端末所有率と乗客損失時間の関係を示す。図中、所有率が 1.0 の結果は全乗客がモバイル情報端末を持つということである。図 9 をみると、全体の傾向として、モバイル情報端末所有率が高くなることに伴って、乗客の総損失時間も低くなる。したがって、モバイル情報端末が普及すればするほど、異常時における乗客サービス改善効果が大きいことを示している。

列車混雑不効用を乗車時間に換算するパラメータ α の感度解析結果を図 10 と図 11 に示す。縦軸の損失時間比はモバイル情報端末所有率 ϕ に対する総乗客損失時間評価量と乗客全員が端末を所持しない場合の総乗客損失時間評価量の百分比を表す。この二つの図から次のようなことがいえる。

1. α の値が大きければ大きいほど、混雑の均等化をすべく個別の経路誘導案内の果たす役割が大きなものとなる。

なる。そのため、モバイル端末による改善効果が顕著に表される。

2. しかし、いずれにしても、混雑不効用パラメータに関係なく、モバイル端末の初期導入効果は大きい。

すなわち、モバイル情報端末の普及程度による乗客個別誘導案内の乗客損失時間の削減効果を定量的に示すことで、提案する個別誘導案内手法の有効性を確認することができた。

6. まとめ

本稿では、まずリアルタイム乗客個別案内など複数の機能を持つ次世代のモバイル情報端末 IPASS を鉄道システムに導入することとして、鉄道ネットワークの迂回ルートを活用した異常時の乗客個別誘導案内の基本思想を示した。そして、利用者均衡分析理論を一種の制御方法として異常時における乗客個別迂回経路誘導案内法を提案した。モバイル情報端末導入効果を分析するために、モバイル情報端末所有率という概念を導入し、効果分析アルゴリズムを提案した。最後に、シミュレーションでモバイル情報端末導入効果を確認した。シミュレーションの結果から、提案手法により、乗客損失時間を低減できること、特にモバイル端末の初期導入効果が大きいことを示した。すなわち、モバイル情報端末導入の潜在的効果を定量化できた。このことは、今後のモバイル情報端末の導入に肯定的理由と重要な動機づけを与えるものと考えられる。

参考文献

- [1] 高木, 原口, 曾根: 「公共交通利用個別支援システム IPASS」, 平成 9 年電気学会交通・電気鉄道研究会資料, TER-97-50, 1997
- [2] 「交通ネットワークの均衡分析 - 最新の理論と解法 -」, 土木学会, 1998
- [3] Smith, M. J. and T. Van Vuren: "Traffic Equilibrium with Responsive Traffic Control", Transportation Science, No.27, pp.118-132, 1993
- [4] S.Sone: "Novel Train Stopping Patterns for High-Frequency, High-Speed Train Scheduling", COMPRAIL'92, pp.107-118, 1992
- [5] 楊, 古関, 曾根: 「選択停車を利用した運転再開直後の運転整理案の自動生成」, 電気学会産業応用部門誌, Vol.122 - D, No.2, pp.104-110
- [6] Kirkpatrick, S., Gelatt Jr., C.D. and Vecchi M.P.: "Optimization by Simulated Annealing", Science, Vol.220, pp.671-680, 1993
- [7] Zhongping YANG, Takafumi KOSEKI: "Scheduling for Railway Network by Consideration of the Effect of Congestion on Passenger Flow", 東京大学工学部・工学系研究科紀要, Vol.XLIII, pp.13-24, 2001

都市近郊鉄道における運転整理時の 乗客行動経路再決定の高速化手法

江口 誠*, 長崎 祐作, 古関 隆章 (東京大学)

Faster Method to Re-decide Routes of Passengers' Behavior during Rescheduling in Urban Railway
Makoto Eguchi, Yusaku Nagasaki, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

1. はじめに

鉄道では、事故などによりダイヤが乱れた場合、乗客への影響を最小限に抑えながら迅速に復旧させるために、運転整理という作業が行われる。現在、運転整理案は指令員の勘と経験に基づいて作られているが、乗客への影響を知るためには、与えられたダイヤに基づいて乗客がどのように行動するのかを把握する必要がある。すでに、文献[1]によって、乗客への影響を計るための評価方法は提案された。また文献[2]によって、これを計算機上で自動的に行うツールの開発が行われた。本稿では、先のツールで最も処理時間がかかる乗客行動経路決定部分に着目し、乗客行動をグラフ上で表し、運転整理時に乗客行動が変化する場合のある経路のみを再探索することで、全体の処理時間を高速化する方法を論じる。

2. グラフによる乗客行動の表現

<2・1>乗客行動の前提条件 与えられた乗客需要とダイヤに基づき、全ての乗客行動経路を決定する。そのため、乗客行動に以下の仮定を立てる。乗客は、

1. 時間的に均等に出発駅に訪れる。
2. 逆方向乗車はしない。
3. 目的駅へ最も早く着く経路を選択する。
4. 到着時間が同じ経路が複数ある場合は、乗換回数の最も少ない経路を選択する。
5. 乗換回数が同じ経路が複数ある場合は、目的駅に最も近い駅で乗り換える経路を選択する。
6. 乗換駅が同じ経路が複数ある場合は、その駅に最も早く着く経路を選択する。

の条件を満たしながら自らの行動する経路を決定する。

1～6の仮定は、都市近郊鉄道に最も多くある乗客パターンである、時刻表を見ずに駅にやってくるという前提条件から立てている。長距離幹線鉄道のように、あらかじめ時刻表で列車の出発時刻などを調べて駅に来るケースの場合は、この仮定は成り立たない。

<2・2>グラフによる表現^[3] 各列車の到着と出発イベントをノードで表し、列車運行・停車・乗換などで乗客が移動する可能性のあるノード同士を重み付き有向リンクで接続する。乗換リンク接続列車を以下の2つに限定する。

- ・その列車の直後に停車する異種別列車

・その駅で終点の列車の場合は直後に来る同種別列車
重みには所要時間・乗換回数の2項目を与え、経路探索における重みの比較はこの順に行う。乗客行動遷移グラフの一例を図1に示す。

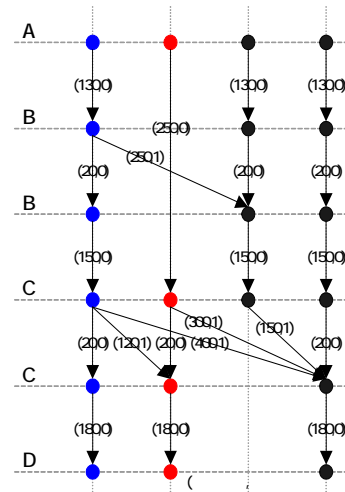


図1 乗客行動遷移グラフ

Fig.1. Graph of passengers' movement

<2・3>最短経路探索 乗客は出発駅の任意の出発ノードを起点として、最も経路長が短くなる目的駅の到着ノードを終点とする経路を選択する。全ての起こりえる経路を探索するために、以下のように処理する。

- ・グラフ上のすべての出発ノードを基点として、そのノードから到着可能である全ての駅の最短経路が確定するまで、ダイクストラ法最短経路探索を行う。
- ・同一 OD (Origin-Destination) の経路を出発ノードの時間順に並べて、次の経路のほうが早く到着する場合は、その経路を利用しないように処理する。

<2・4>乗客の定量的評価 損失時間・乗換回数・混雑度を金額に一元換算して評価する。各係数は[1][2]に基づくものとする。グラフ上では以下のように処理を行う。

- ・乗客需要から全ての経路に利用乗客数を入力し、経路上のリンク全てに乗客数を加算する。
- ・全てのリンクの損失時間・乗換回数・混雑度の金額換算値を合計する。

3. 乗客経路再探索法

<3・1>経路が変わるケース 運転整理によって本来の乗客行動経路が変わるケースは、以下の3通りである。

1. 待避駅変更などで駅の列車到着順序が変わったとき
2. 列車の増発・運休が行われたとき
3. 種別変更によって列車の停車駅が変わったとき

最も多く起こるケースは1である。2は車両運用の制約があり、3は利用者に余計な混乱を招く恐れがあるので、多用することはできない。本稿では、1において乗客行動がどのように変化するか論じることとする。

<3・2>グラフの修正 修正されたダイヤに基づいて各リンクの重みを再設定する。また、駅到着順序が入れ替わった列車に対してその駅での乗換リンクの見直しを行う。

<3・3>変更対象経路と変更開始時刻 変更される可能性のある経路は、駅到着順序の入れ替わった列車を利用する経路である。また、乗客の行動が変わり始める時刻は、新しいダイヤを取得した時である。事故発生と同時に事故復旧時刻が分かり、直ちに新しいダイヤを作成し、利用者全員に何らかの方法で伝えられるものとする、乗客行動が変わり始める時刻は、事故発生時刻と同じになる。

<3・4>乗客経路再探索 変更される可能性のある経路が、新しいダイヤ取得時刻以降に最初に停車する、到着順序変更列車が2列車以上停車する駅の到着ノードを基点として、その経路の目的駅までの最短経路をダイクストラ法により探索し、元の経路と置き換える。

<3・5>処理時間の比較 従来のように、案ごとに全ての乗客行動経路を再探索する必要がないので、微小な変更案を繰り返し評価する必要のある運転整理案作成に対してとても親和性が高い。初期グラフの作成・乗客経路再探索に要する時間と従来手法の処理時間の一例を図2に示す。

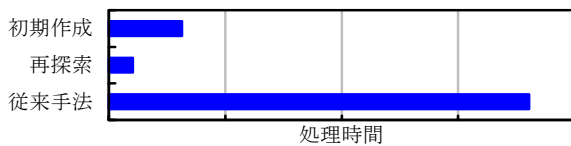


図2 乗客行動経路探索及び再探索時間

Fig.2. Computing times to decide or re-decide routes

4. 積み残し処理

積み残し処理とは、乗客が本来乗る予定であった列車に、定員オーバーで乗れなくなってしまった場合に、次に早く目的駅に到着する別の経路に割り当てる処理のことである。

グラフ上では、利用者が許容値を超えたリンクとして表現される。よって、その先行隣接ノードから新たに乗車する乗客に対して、乗車可否の振り分けを行えばよい。

新たに乗車する乗客を、以下の2つに分類する。

1. その駅を出発駅とする乗客
2. その駅で乗り換える乗客

1の乗客は先の仮定より駅に時間的に一様に集まり、2の乗客は乗換前の列車が到着した時間に駅に一斉に集まる。乗客がホームで駅に来た順に並んでいるならば、その列車に乗れる乗客と乗れない乗客が分かれる境界時刻が分かる。よって、その境界時刻以降に駅を訪れる、乗れない乗客に対して、その駅を出発駅として次に目的駅に早く着く経路を選択し、割り当てればよい。その際に、<2・2>で定義した乗換リンクの接続条件を無視して、新たにリンクを接続する場合もある。

以上の作業を、許容値を超えるリンクがなくなるまで行うことで全ての乗客を乗車可能列車に割り当てる。積み残し処理による利用者の変化を、図3・図4に示す。

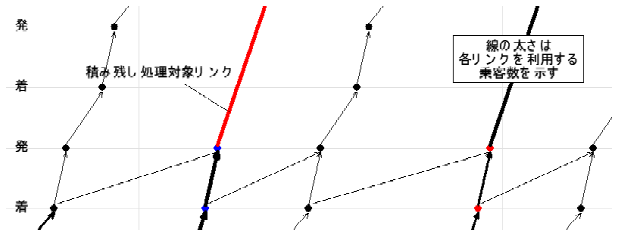


図3 積み残し処理前

Fig.3. Before procedure for left-off passengers

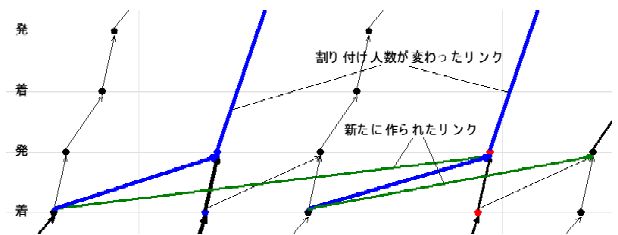


図4 積み残し処理後

Fig.4. After procedure for left-off passengers

5. まとめ

本稿では、乗客の行動遷移をグラフに表すことで、運転整理時の乗客経路再探索の処理を高速化できることを示した。これにより、運転整理案の探索範囲を広げることが可能となる。今後は、実際に運転整理案自動生成システム[2][3][4]に組み込み、新たな運転整理手法を提案しながら、ダイヤの乱れに対する乗客への影響をさらに少なく抑えられる、運転整理案自動生成システムを開発する予定である。

文献

- [1] 林・古関：「都市圏鉄道における運転整理の評価と効果的手法の提案」, 平成13年電気学会全国大会, 4-234, 2001
- [2] 長崎・楊・古関：「都市近郊鉄道における運転整理案の自動生成と評価」, 平成14年電気学会全国大会, 4-380, 2002
- [3] 安部・荒屋：「最長径路法を用いた列車運行シミュレーション」, 昭和61年情報処理学会論文誌, Vol.27 No.1 103, 1986
- [4] 清水・野末：「新しい計画技術と鉄道運行管理 一制約プログラミングを用いた新幹線運行管理システム一」, 平成14年電気学会産業応用部門大会, S7-4 831, 2002