

運転整理における局所的な接続考慮の手法と その得失に関する定量的考察

山口瑛史*, 原 和弘, 古関隆章 (東京大学), 高野 求 (京三製作所)

Method and Quantitative Consideration about Profit and Loss of Taking Connection Between Trains in Train-Rescheduling

Terufumi Yamaguchi, Kazuhiro Hara, Takafumi Koseki (The University of Tokyo),
Motomu Takano (Kyosan Electric Mfg. Co., Ltd.)

Abstract

Presently, train dispatchers take on train operation rescheduling by their experience and intuition when the train operation is disordered, so it is hard task.

In this paper, we propose the algorithm to improve the evaluation of rescheduling plan. We look for the points which make large loss for passengers by using passengers' behavior simulation established in former research, and make appropriate connections between trains running on different rail in quadruple track. As a result, it is proved that the algorithm is especially effective in case that the disturbance is small or the train many people getting on delays.

キーワード：運転整理、複々線、接続
(train rescheduling, quadruple track, connection)

1. はじめに

鉄道のダイヤが乱れた時、乗客の損失を少なくしながら乱れを収束させる運転整理という作業が行われる。この作業はさまざまな制約条件を考慮して行わなければならない。また提案した運転整理案の定量評価も難しいため、指令員にとって大きな負担となっている。

そこで筆者らは、計算機により運転整理案を自動的に提案し、指令員を支援するシステムの構築を目指しており、乗客の損失を考えることで乗客の立場から見た定量評価や、複線の路線において一部の運転整理手法の適用が可能になった⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、現在のところ複々線での手法は十分検討されていない。複々線では、一般に複線よりも列車の本数が多く、設備も大規模なので、運転整理にかかる時間も大きい。計算機により自動化するメリットも大きい。

本稿では、現在までに開発された運転整理支援システムに複々線特有の運転整理手法を追加し、複々線用に拡張することを検討する。具体的には、乗客行動シミュレーションを用いて乗客の流れを予測することにより、複々線区間や鉄道ネットワークにおいて走行線路が異なる列車間の接続を図ることができるアルゴリズムを提案し、所要時間を短くすることによって損失を少なくするような運転整理案を生成する方法について述べる。

2. 運転整理支援システムの概要

筆者らが提案する運転整理支援システムでは、乗客の行動を推定するための乗客行動シミュレーションと、列車のダイヤを算出する列車運行シミュレーションが行われる。本章ではそれについて述べる。

<2・1> 乗客行動シミュレーション 本システムでは、ダイヤ案の評価値として、各乗客が出発駅から目的駅まで移動する間に受ける3項目の損失を考える。

- ・所要時間
- ・乗り換え
 - －同じホームか、階段を渡るかにより異なる
- ・列車の混雑
 - －混雑が激しいほど乗客は不満を感じる

この3つは次元が異なるので、同一の次元(時間)に換算し⁽³⁾、乗客の立場から見たダイヤの評価値とする。

乗客は出発駅から目的駅までのグラフ上での最短経路、すなわち所要時間・乗換による損失評価値が最小となる列車に乗るものとする。ここで混雑度を評価に含めないのは、ダイヤが乱れている時には乗客は混雑をあまり気にせずに乗るだろうと考えられるからである。

最短経路は、図1のように各列車の停車駅毎に着・発をノード、その間の列車での移動や乗換を所要時間・乗換回数で重み付けしたリンクとしてグラフに表し、最短経路探索手法であるダイクストラ法を用いて求めることができる。

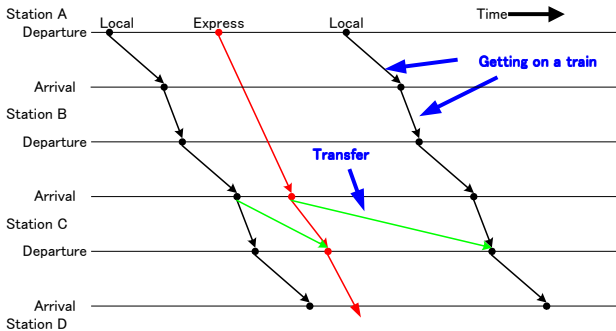


図 1 乗客行動グラフの例

Fig.1. An example of graph representing passengers' flow

<2・2> 列車運行シミュレーション 乗客行動シミュレーション

を行うには、各列車の各駅の着発時刻を決める必要がある。列車を運行するに当たっては、

- ・各駅間の走行時間
- ・各駅での停車時間
- ・同じ線路を使う列車間の順序

など、さまざまな制約条件がある。ここで、乗客行動シミュレーションと同様に、各列車の各駅の着・発をノード、順序制約があるノード間には必要な時間間隔で重みづけしたリンクで結ぶことにより、列車運行グラフが生成される。このグラフ上で最長経路探索を行うことにより、列車の着発時刻が決定される。

3. 接続設定アルゴリズム

<3・1> 複々線区間における接続 複線と複々線での接続を図 2 に示す。

複々線では非常に短い時間で上位列車と下位列車の接続を取れることが特長であり、計画ダイヤでも利便性が上がるような接続を取ることが考慮されている。しかしダイヤが乱れた場合は、複線では設備によって追い越し可能な駅が決まっているため列車の順序を変えない限り接続を取れるのに対し、複々線では 2 本の列車間に物理的な制約はない、すなわち列車運行グラフ上でその 2 本の間には制約となるリンクがないため、どちらかの列車が数十秒でも遅れると接続は取れなくなってしまう。そこで、接続を取れるようにするためには何らかの制約リンクを張る必要がある。

<3・2> 接続設定 3.1 のようにダイヤが乱れた時

に接続の設定を行い、運転整理案の評価値を改善することを考える。接続設定の方法としては図 3 の 3 つが考えられる。

- (1) 何もしない
- (2) 遅れていない列車を遅らせて、計画ダイヤ通りの駅で接続を取る
- (3) 接続駅の変更

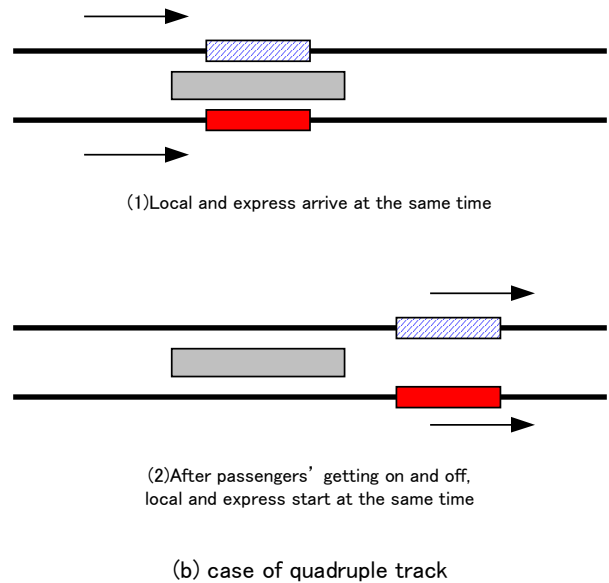
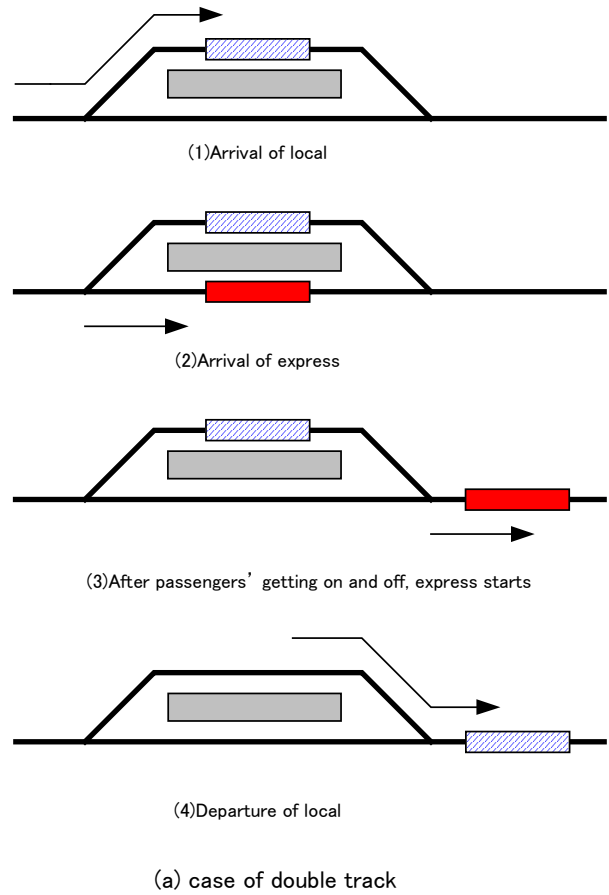


図 2 複線と複々線の接続の模式図

Fig.2. A model of connection in double track and quadruple track

本稿ではダイヤが乱れた時に接続設定を行うアルゴリズムとして、次のような手法を提案する。まず、ダイヤが乱れて何も運転整理を行っていない状態について乗客行動シミュレーションを行う。それによってできる乗客行動グラフの中の全リンクについて順番に、そのリンクが乗換リンクであるかを判別する。乗換リンクを見つけた場合には、その乗り換えについて、

- ・乗り換えている乗客数
- ・乗換のための待ち時間

の積を取り、そのリンクの損失値とする。これを順に求めていき、この損失値が大きいものについてはリンクやノードの情報を保存しておく。またこの段階で、着目した乗換が、それぞれ別の線路を走っている列車間の乗り換えであるかどうかをチェックし、同じ線路を走る列車間の乗換である場合には棄却する。これは、同じ線路を走る列車間の乗換は通常追いつきを伴う複線での接続（図 2a）と同じ形態であるため、この後に行う接続の設定をせずとも列車順序の関係で必ず接続を図れるためである。このようにして全ての乗り換えリンクについて調べ、損失値が大きく別の線路を走る列車間での乗換リンクを幾つか選び出し、損失値が大きい順にソートする。

次に、選んだリンクの中から損失値が大きいものを 1 つ取り出し、1 本前の列車と接続を取れるようにすることで評価値を改善することを考える。着目したリンクは乗換リンクなので、リンクの始端側のノードは乗換元列車の駅への到着ノード（ノード①）、終端側のノードは乗換先列車の駅からの出発ノード（ノード②）である。ここで、

- ・ノード①の発生時刻よりも早い時間に発生
- ・ノード②の列車と同じ種別の列車

という条件を満たす、最も遅い時刻に発生している列車の出発ノード（ノード③）を探し出す（図 4a）。1 本前の列車が見つかった場合は列車グラフ中にノード①を始端、ノード③を終端とし、その乗換に必要な時間を重みとする接続リンク（リンク④）をはる（図 4b）。これによってノード③の列車の出発時刻は「ノード①の列車の到着から乗り換え時間経過後」となるため、1 本前の列車と接続を図ったことになる（図 4c）。

この状況で、まずは列車運行シミュレーションを行い、新たに張った接続リンク④によって列車運行グラフ上にループが形成されないかを確認する。もしループができてしまった場合は今設定した接続リンク④を削除、つまり接続設定を行う前の状態に戻し、次に損失値が大きい乗換リンクに移る。

グラフにループが形成されず、正しく列車を運行することができる場合には、そのダイヤの元で乗客行動シミュレーションを行い、接続設定後のダイヤ案の評価値を求める。接続設定前と比較して評価値が改善された場合にはこの案を採用、悪化した場合には今設定した乗換リンク④を消去して設定前の状態に戻し、次に損失値が大

きいリンクについて同様のことを行う。これを保存しておいた損失値が大きいリンク全てに対して繰り返す。

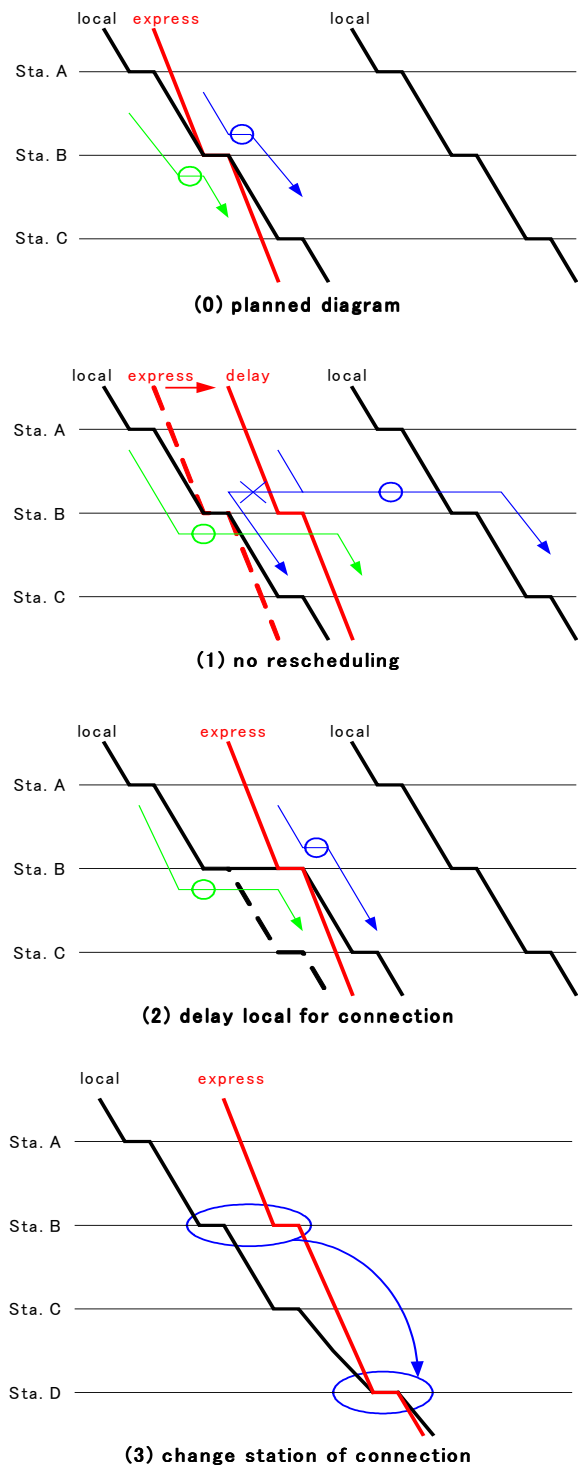
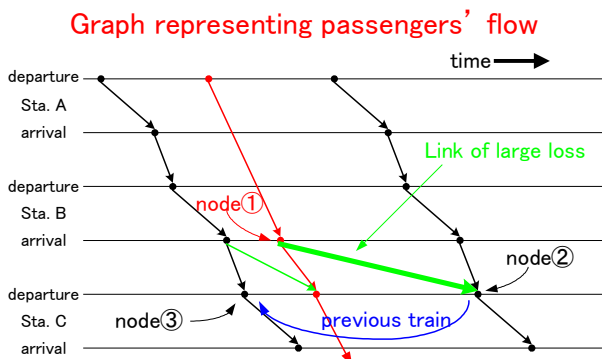


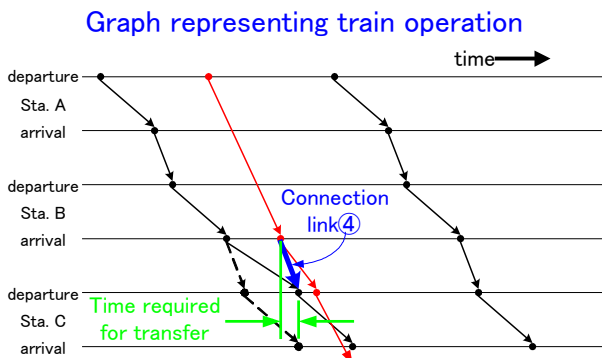
図 3 異常時の接続方法

Fig.3. Method of connection in case of accident

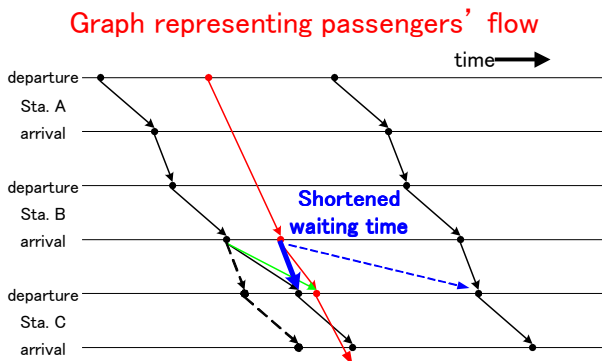
<3・3> 接続解除の必要性 今後、待避変更などのほかの手法と組み合わせて運転整理を行う際に、ここで設定した接続リンクが制約になることがある。線路の使用順序など、設備による制約リンクを変更すると、その影響が波及する範囲が大きいため変更が容易でないが、接続リンクは設備は全く関係ない制約なので、列車運行シミュレーションによりグラフにループができて正常な列車運行ができなく、そのループを構成するリンクに接続リンクがあった場合には、これを消去するのが最も容易である。



(a) Search for links that make large loss



(b) Make connection link



(c) Shortened waiting time

図4 接続設定アルゴリズム

Fig.4. The algorithm of making connection

4. 接続設定シミュレーション

<4・1> モデル路線 各種別の停車駅は図5のとおりである。計画ダイヤでは15分周期に特急1本、急行1本、各駅停車2本が走る。複々線となっていて特急が急行線、急行・各駅停車は緩行線を走り、駅14、駅20、駅26では特急と各駅停車がほぼ同時に到着、出発して接続を取っている。

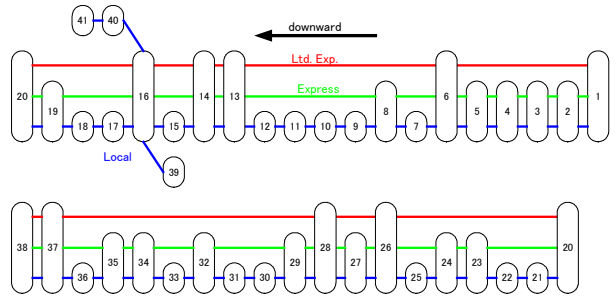


図5 各種別の停車駅
Fig.5. Stopping pattern of trains

<4・2> 実際の乗客数との比較 乗客の行動、特に乗換客を基にして接続設定を行うためには、各種別間の乗客数が実際のものに近くなければならない。ここでは、乗客の行動モデルとして次の2つを考える。

モデル1：出発駅に均等に現れる

モデル2：目的駅での到着時刻が均等に与えられる
全ての乗客がモデル1としてシミュレーションを行ったもの、モデル2として行ったもの実際の乗客数を比較したものが図6である。この結果より全ての乗客をモデル1として扱えば現実の乗客流を推定できているとみることができる。

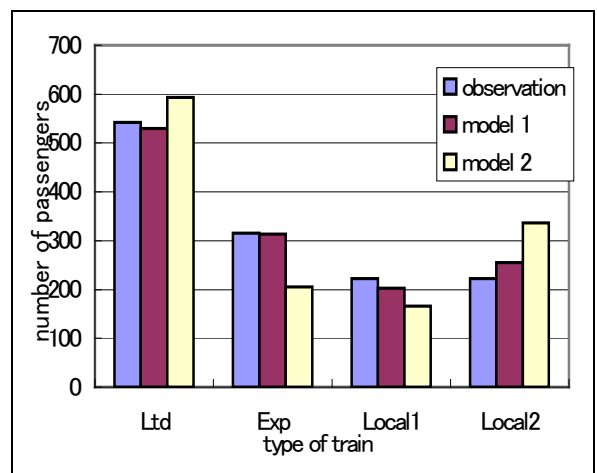


図6 乗客数の比較

Fig.6. Comparison of number of passengers

<4.3> 接続設定シミュレーション 計画ダイヤで

接続を行っている駅よりも前の駅である列車が遅れたことにより接続が取れなくなった場合に接続設定を行った結果を示す。ここでは待ち時間を「計画ダイヤにおける列車の出発時刻を基準（0 秒）として、そこから遅延を生じた列車との接続をとるために必要とする余分な停車時間（秒）」、改善率を「計画ダイヤ時からダイヤが乱れることによって悪化した所要時間損失値」と「それを接続設定によって改善した値」の比と定義する（図 7）。この値が 100%に近いほど、接続設定により計画ダイヤ程度まで評価値が改善され、0%に近づくほどダイヤが乱れた状態と評価値は同程度になり、負の値の場合は接続設定を行ったことにより、ダイヤが乱れた状況よりも更に評価値が悪化したことを示す。

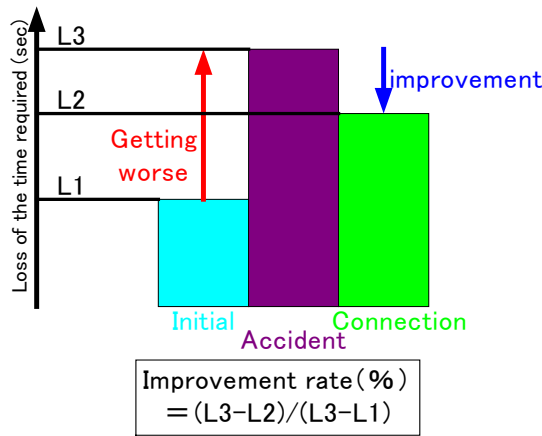


図 7 改善率の定義

Fig.7. The definition of the improvement rate

図 8 は、駅 20 の直前で上下の各停、特急が遅れた場合についてそれぞれ接続を取った場合の待ち時間と改善率の関係を示したものである。これより、待ち時間が短い場合ならどのケースでも接続を取ることにより評価値を改善できること、特急の方が待ち時間を長くしても改善の効果があることが分かる。これは特急の方が遅延の影響を受ける乗客が多いためと考えられる。

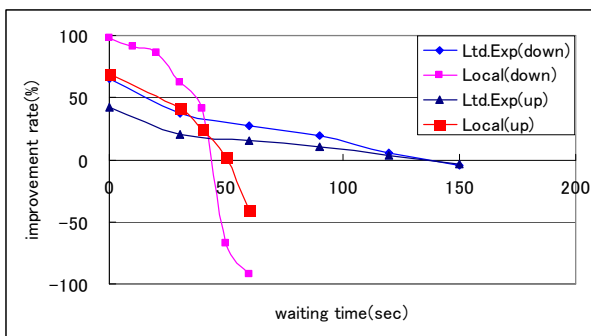


図 8 駅 20 での接続設定

Fig.8. Take connection at Sta. 20

図 9、図 10 は遅れた駅による違いを表しており、下りの場合は末端駅（数字が大きい）方に近づくほど効果が大きくなるが、上りの場合は一部でそのようになっていない。末端に近づくということはその先で遅延の影響を受ける乗客が少ないため改善効果が大きくなると考えられるが、それ以上に他の列車への影響の波及などが大きくこのような結果になったと考えられる。

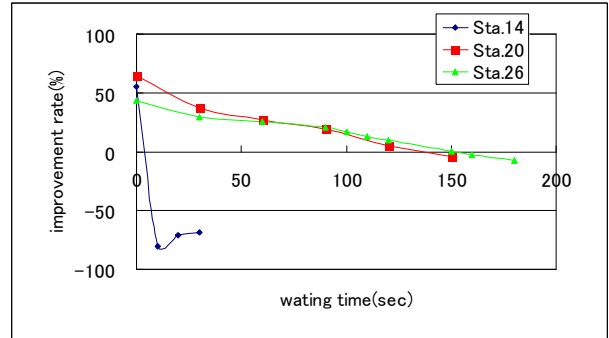


図 9 下り特急が遅れた場合

Fig.9. In case of the downward Ltd. Exp delaying

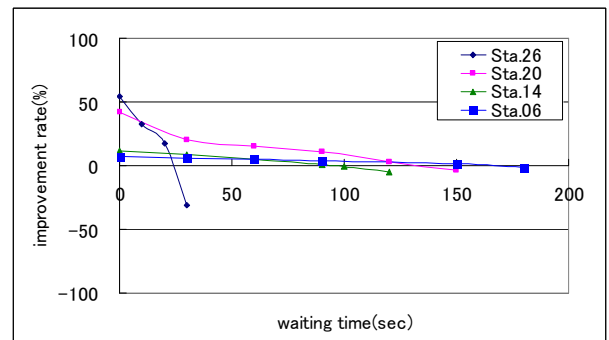


図 10 上り特急が遅れた場合

Fig.10. In case of the downward Ltd. Exp delaying

図 11 は駅 16 で接続している本線と支線の列車に対して、図 8 と同様のシミュレーションを行った結果である。複雑な場合と同様、鉄道ネットワークにおける別路線の列車間の接続でも同様に扱って改善できていることが分かる。

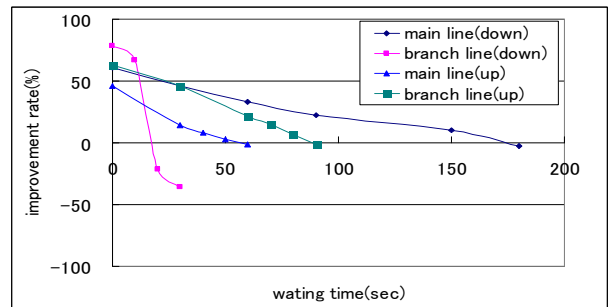


図 11 別路線の列車間の接続

Fig.11. Connection between trains running on different lines

図 12 は乗換損失 (左 2 つ)、混雑度損失の変化 (右 2 つ) を表したものである。接続設定は所要時間損失に着目して行ったが、これらの損失についても問題になるほど悪化していることはないことが分かる。

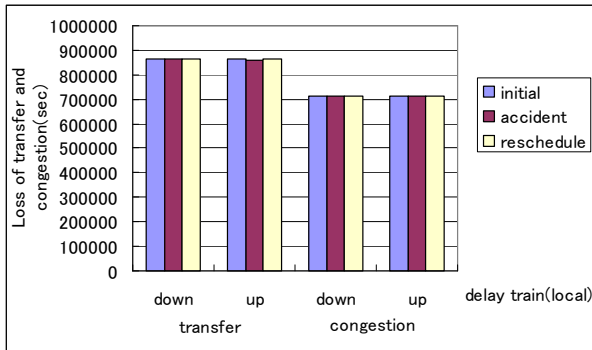


図 12 乗換損失・混雑度損失の変化
Fig.12. Loss of transfer and congestion

図 13 は、下り特急が遅れた時に接続設定を行う駅を駅 26 から駅 28 に変更した時の効果を表したものである。これによって特急を待つ各駅停車は待ち時間が短くなり、特急から各駅停車に乗り換える乗客にとっては特急に乗っている区間が長くなるため所要時間が短くなるので損失が更に改善されている。

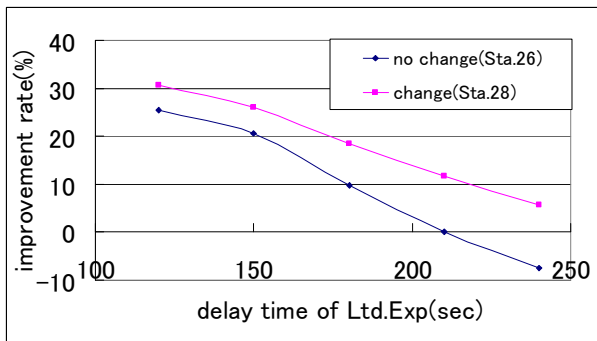


図 13 接続駅の変更

Fig.13. Change the station for taking connection

5. おわりに

本稿では、複々線特有の運転整理手法として、異なる線路を走る列車間の接続を図ることで乗客の所要時間を短縮し評価値を改善する方法を提案し、効果の検証を行った。その結果、

- (1) 数十秒程度であれば、ほとんどの場合遅れている列車を待ったほうがよい
- (2) 上位の列車が遅れたときの方が、待ち時間を長くしても効果が見込める
- (3) 所要時間短縮に着目して行ったが、乗り換え・混雑度による損失には大きな影響はない

ことが分かった。

実際の現場で行われている運転整理手法は他にも様々なものがあり、それらと組み合わせることで今回提案した手法もより効果的になると考えられる。

参考文献

- (1) 長崎祐作・高野求・古関隆章：「グラフ理論に基づく乗客経路決定機能を持つ運転整理評価・支援システム」, 電気学会システム・制御研究会, SC-04-11, pp.25-29, Mar. 2004.
- (2) 高野求・立木将人・大山大介・山口瑛史・古関隆章：「乗客流を考慮した都市近郊鉄道運転整理支援システムのための整理案自動生成と評価手法」, 電気学会システム・制御研究会, SC-05-14, pp.39-44, Mar-05
- (3) 美谷邦章・家田仁・畠中秀人：「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