

# 高速な乗車率推定機能を組み込んだ 対話的ダイヤ作成システムの開発

辰井 大祐\*    國松 武俊\*  
石原 裕介\*\*    坂口 隆\*

**Development of Interactive Timetabling System  
with Fast Estimation of Train Congestion under Planning Timetables**

Daisuke TATSUI    Taketoshi KUNIMATSU  
Yusuke ISHIHARA    Takashi SAKAGUCHI

Timetables are modified based on various results of investigations under current timetables, and timetable planners' intuition that comes from experience. But there is a problem in that it is difficult to estimate train congestion under modified timetables in a planning phase. If, in a planning phase, timetable planners can make sure that train congestion is such as they intend, timetable planners can make timetables more comfortable for passengers. Thus, in this research, we have built a new timetabling system with both user-friendly interfaces and fast estimation of train congestion under modified timetables.

キーワード：列車ダイヤ，乗車率推定，対話型システム，Dijkstra 法，ユーザビリティ

## 1. はじめに

鉄道事業者にとって列車ダイヤは商品の一つであり、旅客のニーズにより合致するような列車ダイヤを作成することが望まれている。

列車ダイヤは各種の統計調査をもとに、車両や設備、人的リソースといった制約を考慮して作成される。その際、変更後のダイヤを実施した場合に、各列車の乗車率が適正なものになるかについても検討はされているが、現状ではダイヤ検討時に乗車率をその場で定量的に予測することは困難であるため、ダイヤ作成担当者が経験的に予測をし、ダイヤの調整を行っている。このような背景のもと、列車ダイヤを検討している段階において、ダイヤ案作成後、①その場で乗車人数を推定することができる、②各列車の乗車率に関する問題点を視覚的に確認することができる、という2つの特徴をもつ対話的ダイヤ作成システムの開発が望まれていた。

そこで、本研究では、ダイヤ変更案のデータと過去の実績 OD データ（乗車駅，降車駅，降車駅改札通過時間帯）をもとに、従来から研究されている旅客流動推定手法を応用し、各列車の乗車人数を瞬時に推定する手法を構築

した。また、鉄道事業者のダイヤ作成担当者に対するヒアリングを実施し、ダイヤ変更案に対する乗車率推定に関する詳細なニーズを把握、整理したうえで、ダイヤ変更案の作成・修正と乗車率の推定が対話的に可能な、操作性の高いヒューマンインタフェースを有するダイヤ作成システムを構築した。最後に、構築したシステムに対してダイヤ作成担当者の試使用による評価試験を行い、システムの有用性を確認した。

## 2. ダイヤ作成業務の現状分析

### 2.1 ダイヤ作成業務フロー

現状のダイヤ作成手順を図1に示す。

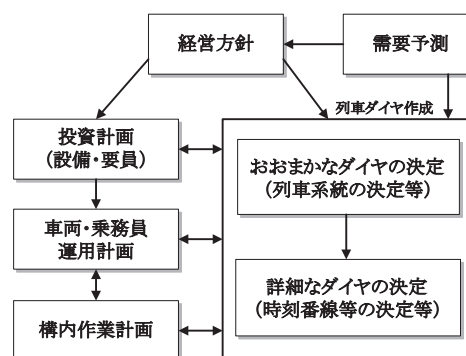


図1 列車ダイヤの作成手順

\* 信号・情報技術研究部 運転システム研究室

\*\* 信号・情報技術研究部 運転システム研究室 (現 西日本旅客鉄道株式会社)

特集：信号通信・運輸

まず現行のダイヤにおける輸送実績や混雑度合に関する現地調査を行い、現行のダイヤにおける問題点（特定列車の混雑度が高すぎる等）の抽出を行う。その後、統計調査の結果を基に、ダイヤに対する需要を予測した上で、経営的な施策（時間帯、運行区間、列車本数等）を立てる。その方針が決定した後、ダイヤ作成担当者自身の経験（どの区間、どの時間帯の列車が混みやすい等）をもとに、会社の投資計画、車両や人的リソース、構内作業計画と調整しながら秒単位の詳細な列車ダイヤを作成する。

2.2 ダイヤ作成ソフトと機能

ダイヤ作成に関して、具体的な列車本数や区間はダイヤ作成担当者が各種の制約を考慮して決定しているが、ダイヤ作成には専用のソフトウェアが使用され、一本一本の列車の時刻を決める担当者の労力は以前より低減されている。例えば、始発駅の時刻を入力したときに、中間駅の到着／出発時刻を予め定めた各駅停車時間、駅間運転時間に基づき単純計算して補間したり、ある列車をコピーして10分間隔で貼り付けることにより10分サイクルのダイヤを作成したり、連続する列車が安全上必要な間隔を開けて設定されているか確認したりすることは可能になっている。

2.3 輸送状況調査

列車ダイヤ作成の際、担当者による列車本数、各駅時刻等の意思決定をサポートするため、様々な調査を行っている。例えば、担当者の目視による輸送状況の調査、乗務員の目視による乗車人員報告、交通量調査といった人手を用いた調査だけでなく、車両全体の重量から乗車人数を推定する手法や、自動改札機から取得することができる旅客の乗車券データを活用して旅客流動を推定する手法も利用されるようになってきた。

2.4 ダイヤ作成業務の課題

前項で述べたように、事業者も現行ダイヤの問題点や輸送状況を調査する取り組みを行っている。しかし、仮に現行ダイヤでの利用傾向が明らかになったとしても、混雑率の高い列車等、現行ダイヤでの課題が明らかになるだけで、それに対する改善策としてダイヤの修正を行った場合、どの程度の効果があるのかを把握することは難しいことが多い。具体的には、例えば1本の列車の運転時刻だけを現行より1分遅い時刻に変更するといった小規模な変更ではなく、図2のように、列車本数の比率が快速：普通=1:2のダイヤから、快速：普通=1:1のダイヤに変更した場合や、普通が途中駅で快速を待避するようになる場合などである。その理由は、利用する線区や列車といった旅客の移動経路選択方法は、各旅客の

乗車駅、降車駅、乗車時刻によって異なり、図2のような変更の場合には、快速に乗るか普通に乗るか、旅客の列車種別の選択が変化する可能性があり、それによって移動経路も大きく変化するためである。また、一部の旅客は混雑を避けるような列車選択行動をとるものと思われるが、ダイヤ変更案の検討の際には、もし混雑による不便がなければ本来どれだけの乗車需要が見込めるのかといった潜在的な需要も考慮する必要がある。しかし、現行ダイヤの利用状況から類推する方法では、ダイヤの変更に伴って旅客がこのような理由により列車選択を変更することを考慮するのは難しい。したがって、このような本来の旅客需要に基づく乗車人数が推定可能な手法が望まれている。

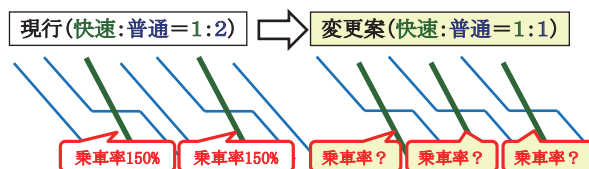


図2 乗車率推定が容易でないダイヤ変更の例

2.5 関連研究

列車ダイヤを実施した場合の各列車における乗車率を推定する研究としては、自動改札機で取得される旅客ODデータを利用した手法が多く提案されている。例えば、筆者らはODデータとダイヤデータから、各旅客の列車乗継経路、各列車の乗車率、遅延をシミュレーションで同時に推定する「列車運行・旅客行動シミュレータ」を構築した<sup>1)</sup>。また、逆方向からの予備探索を行なうという考え方にに基づき、ダイヤに対する乗客流推定を高速に行なう手法も提案されている<sup>2)</sup>。

しかしこれらの研究は、必ずしもダイヤ作成業務の実状を反映したものではない。ダイヤ作成の実務では、担当者が現行ダイヤをベースに様々な変更を加え、どのような案が望ましいのか、変更を繰り返しながら整理していき、最終的なダイヤ改正案に辿り着くことが多い。そのため、乗車率推定結果を直感的かつ容易に把握し、それを考慮してダイヤ変更を行った後、再度乗車率推定し結果を確認するという一連の操作が可能なシステムが望まれている。しかし、既往研究は作成したダイヤ案に基づいて推定用のダイヤデータを一度作成し、乗車率を推定することを前提としているため、ダイヤの修正を行って再度乗車率を推定したい場合は、ダイヤ変更案の作成だけでなく、乗車率推定用のダイヤデータを再度作成し直す必要があった。

一方で、ダイヤに対する評価結果を容易に把握するための可視化の研究として運行管理システムから取得された複数日の実績運行時刻データを集約し、各列車各駅に

おける到着／出発時の遅延の統計値（平均，分散等）を求め，その大小に応じてダイヤ図のスジを異なった色で着色する手法が提案されている<sup>3)</sup>。これにより，ダイヤ上の遅延が発生しがちな箇所の特長が容易になるが，実績データをそのまま使用するため，その箇所のダイヤを仮に修正した場合に，遅延がどのように推移するのかまでは把握不能である。

## 2.6 対話型ダイヤ作成システムに求められる要件

実際のダイヤ作成担当者にヒアリング調査を行い，ダイヤ作成に関する詳細な業務フローや，システムに望まれる機能等を整理した。その上で，既往研究における課題を考慮し，本研究で構築するシステムは①高い即応性，②乗車率の高い視認性，③ダイヤ作成に関する高い操作性という3つの要素を満たすシステムである必要があると考えた。①に関しては，対話的なシステムでは，作成したダイヤの乗車率をその場で（すぐに）推定できる必要があると考え，後述のような高速な乗車率推定アルゴリズムを考案し，システムに実装した。②，③に関しては，システムを用いたダイヤ作成フローがダイヤ作成に関する実務の流れと合致し，出力する推定乗車率が易くかつ直感的に把握可能なように表示し，ダイヤ上に問題があればすぐに修正できるようなインターフェースを構築する必要があると考え，ダイヤ作成者の意見も考慮しながら3章のようなシステムを構築した。

## 3. 高速な乗車率推定機能を組み込んだ対話型ダイヤ作成システム

### 3.1 システムを用いたダイヤ作成業務のフロー

前述のように，ダイヤ作成担当者は各種の制約をもとに，乗車率など旅客の利便性を考慮しながら，ダイヤに様々な変更を加える検討を重ね，最終的に実施するダイヤを作成する。そのような実際の業務フローと合致するように，本研究では，図3のような新しいダイヤ作成業務フローを提案する。

- Step1) 初期ダイヤ案として，現行ダイヤ等，検討中のダイヤの素案をシステムに入力する。
- Step2) システムの乗車率推定機能を利用し，初期ダイヤ案における乗車率の推定を，旅客データ等を利用して行う。乗車率推定結果は，システムの画面上に提示され，ユーザである担当者は結果を把握する。
- Step3) ユーザは乗車率推定結果を確認した後，より望ましい乗車率バランスとなるよう，初期ダイヤ案に対し時刻の修正，運転区間の延長や短縮等のダイヤ修正操作を，システムの画面上で行う。
- Step4) 修正後のダイヤに基づき，再度乗車率推定を行う。

Step5) Step1 から Step4 までの手順を，ユーザが望ましいと考える乗車率バランスのダイヤ案が作成できるまで繰り返す。

このフローにより，適切な乗車率バランスを有する有望なダイヤ案のみを効率的に作成することが可能となる。なお，ダイヤ作成に必要な環境（駅，配線，番線情報）や，乗車率推定に利用する旅客データ（OD データを変換したもの）については，事前にシステムに組み込むため，ユーザがその都度作成する必要はない。

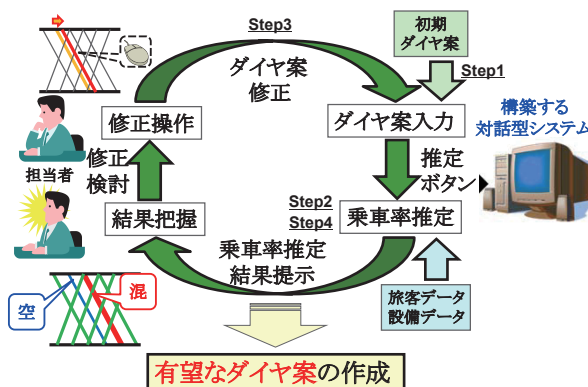


図3 構築システムを用いたダイヤ作成業務フロー

### 3.2 旅客データの作成

構築したシステムでは，各旅客に対し「乗車駅，降車駅，乗車駅における出現時刻」の情報を有する旅客データを与え，列車乗継経路の探索を行っている。しかし，自動改札機で取得可能な OD データは，「乗車駅，降車駅，降車駅の改札通過時間帯，人数」という降車駅時間帯や人数に関してまとまった形式のデータになっているため，前処理として，一人一人の旅客について「乗車駅，降車駅，乗車駅の改札通過時間」というデータに変換する必要がある。

具体的には，データの変換は①降車駅の改札通過時間帯から乗車駅の改札の通過時間帯に変換する，②確率的に旅客が発生するとし，集団でなく，データを一人一人のデータに変換する，という手順で行う。

①については，標準所要時間を基に逆算を行い，乗車駅で改札機を通過した時間の推定を行う。例えば改札機から「A 駅乗車，B 駅降車，B 駅の改札通過時間帯 10:00～11:00，60人」という OD データを変換するケースを考える。A 駅から B 駅へ移動する場合の標準所要時間が 30 分である場合，降車駅の改札通過時間から 30 分遡って「A 駅乗車，B 駅降車，B 駅の改札通過時間帯 9:30～10:30，60人」というように変換を行う。

②については，「各旅客は乗車駅に，OD データとして集約された時間内では単位時間あたり一定の割合で出現する」という前提のもと，ポアソン分布に従って旅客

特集：信号通信・運輸

が発生するとし、乗車駅の改札通過時間帯内で旅客を確率的に発生させる。上記の場合には、9:30 から 10:30 の間には平均して 1 分に 1 人が駅に出現する。この平均出現率を用いて 1 秒当たりの出現率を計算し、「A 駅乗車、B 駅降車、A 駅 9:30:01 出現」、「A 駅乗車、B 駅降車、A 駅 9:31:05 出現」、・・・というように、平均的に 1 分に 1 人の旅客が出現するように旅客を発生させる。

3.3 乗車率推定手法

(1) 旅客の列車選択基準

旅客は目的地に辿り着くために、なんらかの判断を行った上で乗車する列車を選択する。その基準としては、最も早く目的地にたどり着けるような列車を選択する、乗換を可能な限り回避して列車を選択する、混雑していない列車を選択する、という 3 つが挙げられる。

本システムでは、全ての旅客が最も早く目的地にたどり着けるような列車を選択することを前提のもとで乗車率推定を行う。理由としては、2.4 節で述べたように、ダイヤ変更案の検討の際には、「列車ダイヤを、混雑列車を回避しない本来の旅客需要に見合う輸送力が提供可能なよう設定する」という考え方のもと、ダイヤを作成する必要があるからである。この本来の需要が多く、混雑が予想される場合には、混雑を避けたい旅客が他の列車を選択し、自然と混雑緩和が図られるのを期待するのではなく、当該列車の編成両数を増やす、前後に同種別の列車を増やす等、本来需要に応じたダイヤ変更を行うことで対応する。

(2) 旅客の移動経路推定アルゴリズム

本システムの移動経路推定アルゴリズムとして、点（ノード）と有向辺（アーク）により構成されるネットワークでダイヤ上の旅客の移動をモデル化し、ネットワークを探索することにより移動経路を推定するものを開発した。

まず、対象となるダイヤをもとに、ネットワークを作成する。ノードとして、各列車各駅の着発事象に対応して着ノードおよび発ノードを生成する。ノード間を結ぶアークとして、走行アーク（走行列車に乗車しての移動）、乗車継続アーク（停車中の列車に乗車している状態）、および乗換アーク（列車乗り換え行動）を設定する。各アークの重みは、2 つの事象の時間差とし、例えば走行アークであれば、駅間走行時間が重みとなる。

次に、構成したネットワークを用いて各駅の各ノード間に到着する旅客毎に移動経路を探索する。探索は Dijkstra 法を基本とするが、一般の Dijkstra 法は 1 個のノードからすべてのノードに対する最短経路を求めるアルゴリズムであり、これを単純に適用するとノードの数だけ Dijkstra 法を繰り返す必要があり、膨大な手間を要する。そこで次の考え方に基づくアルゴリズムを開発し

た。

- ①全てのノードから全ての降車駅に対する最短経路探索を一度に行う
- ②探索中に既に探索が終了したノードに辿り着いた場合、そのノードの既に得られている最短経路情報を参照することで、そこから先の同じ経路探索を省略する

ここで最短経路情報とは次の 3 つの情報の組合せのリストである。

第 1 項：次に辿るアーク（次に旅客がとる行動に対応する）

第 2 項：降車駅

第 3 項：第 1 項のアークを辿って第 2 項の駅で降車する場合の最短到着時刻（不明の場合は - と表記する）

開発したアルゴリズムの探索手順は次の通りである。

あるノード  $P_i$  から、降車駅 A への最短到着時刻が未定となっている X アークを辿った先のノード  $P_j$  を見て、 $P_j$  の最短経路情報が登録済（未定の情報が無い）ならば、その中で降車駅 A への最短到着時刻の最小値  $t$  を求め ( $t$  を  $P_j$  の降車駅 A への最短到着時刻と呼ぶ)、 $P_i$  の X アークの最短経路情報を (X アーク, A 駅,  $t$ ) に更新し登録する。

例として、図 4 のようなネットワークの状態から開始した場合の A 駅降車に関する最短経路探索について説明する。なお、以下ではノード  $P_1 \sim P_4$  に対応する A 駅の列車到着時刻情報に関して、 $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$  と仮定する。 $P_9$  が登録済であることより  $P_9$  の最短到着時刻  $t_4$  が  $P_8$  に（乗換アーク, A 駅,  $t_4$ ）として登録される。これにより  $P_8$  が登録済となり、その最短経路情報は（走行アーク, A 駅,  $t_3$ ）と（乗換アーク, A 駅,  $t_4$ ）であるから最短到着時刻は  $t_3$  となり、 $P_7$  に（乗車継続アーク, A 駅,  $t_3$ ）として、 $P_6$  に（乗換アーク, A 駅,  $t_3$ ）として登録される。更にこれにより登録済となった  $P_6$  の最短到着時刻は  $t_1$  であるから、 $P_5$  に（乗車継続アーク, A 駅,  $t_1$ ）が登録される。同様に  $P_7$  の最短到着時刻  $t_3$  が  $P_{10}$  に（走行アーク, A 駅,  $t_3$ ）として登録される。

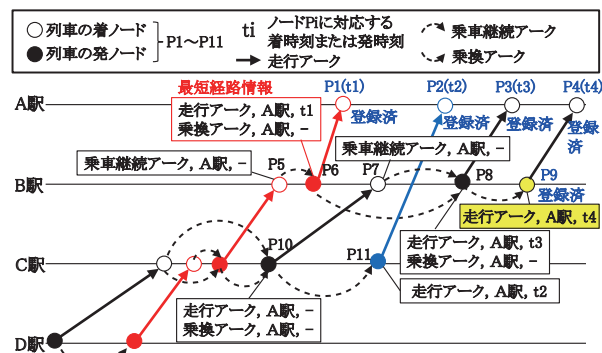


図 4 探索開始前

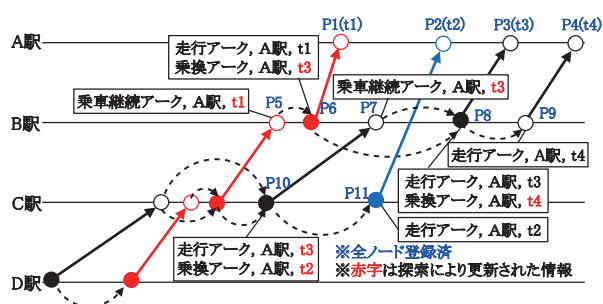


図5 探索終了後

また、P11の最短路時刻t2がP10に（乗換アーク、A駅、t2）として登録され、P10は登録済となる。以上のようにして、各アークを1回ずつ辿ることにより前ノードが登録済になり、任意のノードからA駅への最短路が得られる。探索終了後のネットワークの状態を図5に示す。実際には、ネットワークのすべての降車駅について同様の1回の探索で最短路を得ることができる。また、各ノードに対応する時刻の遅い順に探索することにより、登録済であるか否かの判定を不要とし、更なる高速化を図った。

(3) 旅客の経路再探索の高速化

ダイヤ案に対する乗車率推定を一度行った後、ダイヤ案の一部を修正し、再度乗車率推定を行う場合を考える。既存手法では、仮にダイヤ修正が列車1本の順序変更のみで、ほとんどのノードに関する移動経路の変動が考えられない場合であっても、変動範囲の絞込を行わず、全ての経路探索を最初からやり直していた。

本システムでは、ダイヤ修正によって影響を受ける可能性があるノードに関してのみ、移動経路の再推定を行うアルゴリズムを考案して実装した。例えば図6のダイヤにおいて、緑線で示すように、列車P、Rの順序を駅C～A間で変更する修正を行った場合、ダイヤ修正の影響により移動経路が変動する可能性のあるノードは、橙点線で囲まれた列車PのC～A駅間である。このノードに関する経路探索のみを再度実施、最短路情報を更新したうえで、それを旅客データに適用、集計し、乗車

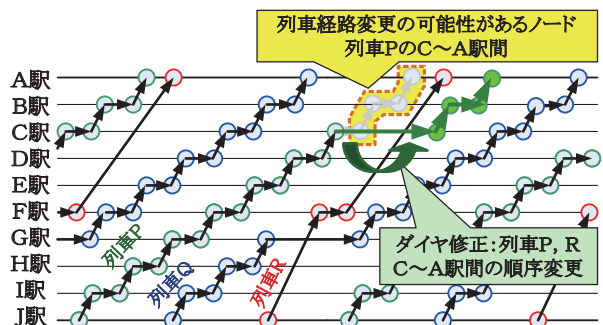


図6 ダイヤ修正と列車経路変更ノードの特定

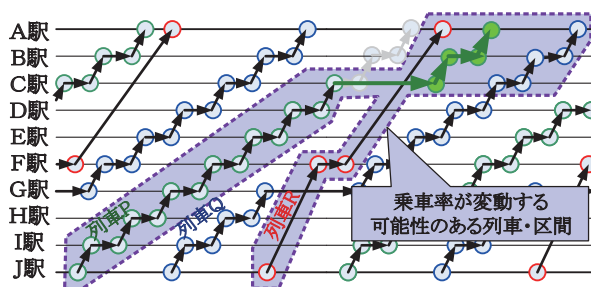


図7 ダイヤ修正時の乗車率変動範囲

率の再推定を行う。その結果、図6のダイヤ修正において乗車率が変動する可能性のある範囲は、図7の紫点線で囲まれた列車、区間となる。

(4) 旅客の移動経路に基づく乗車、乗降人数集計

探索した各旅客の移動経路をもとに、全ての列車、区間ごとの乗車人数、および各駅での乗降人数を集計する。

3.4 ユーザインタフェース

構築するシステムは、乗車率の高い視認性、ダイヤ作成に関する高い操作性をもつと同時に、担当者が現在実務で使用しているダイヤ作成ソフトと違和感なく使える必要がある。その点を考慮し、ユーザインタフェースの設計を行った。

(1) ダイヤ作成・編集のためのインタフェース

ユーザによるダイヤ作成・編集操作を効率化するため、本システムに実装したインタフェースの例を下記に示す。

- ・マウスのドラッグ&ドロップ等による時刻変更、運転区間変更操作
- ・コピー&貼り付け等による列車繰り返し設定操作
- ・操作を1つ前に戻る/進む機能
- ・列車種別毎に指定の色でスジを表示する機能

(2) 乗車率推定結果把握のためのインタフェース

ユーザが乗車率推定結果を容易に把握するため、本システムに実装したインタフェースの例を下記に示す。

- ・乗車率による列車スジの色分け
  - ・指定OD間を移動する旅客の移動経路を表示する機能
- 乗車率推定結果の画面例を図8に示す。乗車率の高低は列車スジの色を介して確認することができる。図8では、赤色が最も高い乗車率を表し、青色が最も低い乗車率を表している。さらに、指定するOD間を移動する旅客の移動経路を矢印で表示した画面例を図8右下に示す。この機能によって、旅客の詳細な列車乗継を視覚的に確認することができる。なお、過去に乗車率を推定している場合は過去の推定結果を再度確認することもできるようになっている。

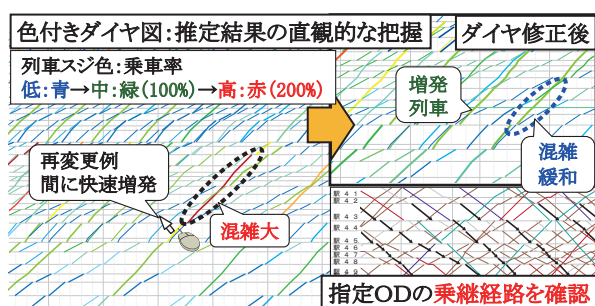


図8 乗車率推定結果の表示画面例

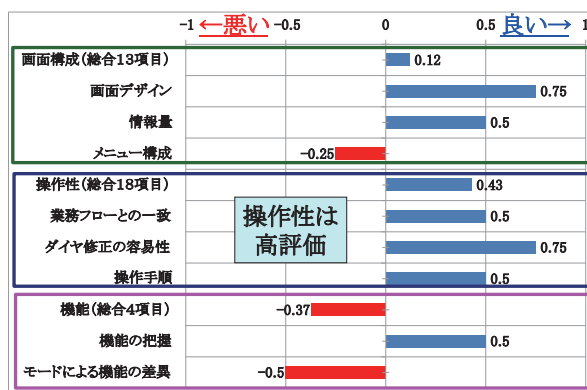


図9 ユーザビリティ評価結果(平均値, 抜粋)

#### 4. ユーザビリティ評価試験

開発したシステムの評価を行うため、大都市圏の通勤路線(103 駅、現行ダイヤでの終日列車本数 2,319 本、旅客数約 160 万人)を対象にシステムを構築し、乗車率推定に要する時間の測定や、実際のダイヤ作成担当者によるユーザビリティ評価試験を行った。

##### 4.1 乗車率推定に要する時間の評価

即応性を評価するため、ハイスペックノートパソコン(CPU:Pentium Core i7 2.4GHz, メモリ 8GB, 64 ビット)を用いて乗車率推定に要する時間を測定した。終日のダイヤに対する乗車率推定を最初から行った結果、10 秒程度で推定結果が表示されることを確認した。既存研究の手法を用いた場合には 180 秒程度であったため、大幅な高速化が実現され、対話型システムでの計算時間として耐えうる時間であることを確認した。また、ダイヤの微修正を行った後に再度乗車率推定を行った場合は、7 秒程度で結果が表示され、更なる高速化が実現したことを確認した。

##### 4.2 ユーザビリティ評価

評価試験では、①画面構成、②操作性、③機能に関する合計 32 項目に対して 4 名のダイヤ作成担当者による 3 段階評価を行った(図 9)。全体として、操作性については高評価であったが、メニュー構成、機能がわかりにくい、複雑なダイヤを作成する、実際に一からダイヤを作成する場合(白紙改正を検討中の場合)は多少労力を要するという意見があった。小規模なダイヤ修正に対する有用性は確認できたものの、メニュー構成の見直しによるわかりやすさの向上や、複雑な路線網や大規模なダイヤ改正に対応した機能、インタフェースを今後検討する必要がある。

#### 5. まとめ

本研究では、ダイヤ改正案作成段階で、検討中のダイヤにおける各列車の乗車率を対話的に推定するシステムを構築し、ダイヤ担当者によるユーザビリティ評価試験を行うことでシステムの有用性を確認した。乗車率推定に要する時間については、既存研究の手法では 180 秒程度かかっていたものが 10 秒程度(乗車率の再推定には 7 秒)となり、高速化が実現した。また、ユーザビリティ評価試験では、操作性に関して高い評価が得られた。

今後は乗車率推定のさらなる高速化、より実態に近い乗車率を推定するための乗換、混雑を回避する旅客行動特性の組み込み、操作性の向上等が挙げられる。引き続き、よりダイヤ作成担当者の業務支援に資するシステムを検討していきたい。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なるご協力をいただきました西日本旅客鉄道株式会社の関係各位に心より感謝申し上げます。

#### 文献

- 1) 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 (産業応用部門)，Vol.129, No.1, pp.10-20, 2009
- 2) 長崎祐作，明日香昌，駒谷喜代俊：鉄道における乗客流推定方式の高速化，電気学会論文誌 C, Vol.126, No.11, pp.1406-1413, 2006
- 3) 稲川真範，富井規雄，牛田貢平：列車運行実績データの可視化，J-Rail2009, 2009