

評価基準に沿った列車ダイヤ自動作成手法にかんする研究

浅見 雅之 有澤 誠
慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科

鉄道業界では、ダイヤの作成、評価は未だ人間の頭脳に依存しており、多大な労力を要している。これまでに、人工知能理論の範囲拘束探索手法を応用したダイヤ自動作成手法が考案された。しかし、この手法は、全ての列車順序パターンを探索するため、ダイヤ案の算出に時間を要する。他方、旅客流動の実測に基づく、列車ダイヤの定量的評価理論が考案された。自動作成と定量的評価を一貫して行うならば、評価値の悪いパターンを予め排除し、探索範囲を絞ることができる。本研究は、列車種別毎の等間隔な部分的ダイヤを重ね合わせるという発想に基づく、より効率的なダイヤ自動作成手法を提案する。本手法により、実際の鉄道路線のダイヤを再現できた。

キーワード：ダイヤ，自動作成，運転間隔，ダイヤ評価

Study on the Method of Automatic and Rational Train Scheduling

Masayuki Asami Makoto Arisawa
Keio University, Graduate School of Media and Governance

Most railway companies make train schedules manually. So, it takes a long, long time to schedule. The other studies proposed the method of scheduling automatically with a personal computer. But, it takes a long time to schedule with their method, because of calculating all patterns of train order. The parts of these patterns are nonsense, from the viewpoint of the theory of evaluating train schedules. I propose the method of automatic scheduling based on the idea of the combination of the partial schedules, which are meaningful from the theory. My method can make the real train schedules with less calculation.

Keywords: Train schedule, Automatic scheduling, Train interval, Evaluating train schedule

1.はじめに

鉄道業界では、多大な労力を要するダイヤ作成業務の省力化が望まれている。

本研究は、コンピュータによる列車ダイヤの自動作成手法について考察する。それに基づき、実用的な列車ダイヤ自動作成システムを模擬的に構築する。

2.研究の目的とコンセプト

本研究は、より効率的なダイヤ自動作成手法の開発を目的とする。このため、以下の手順で研究を行う。

主要な先行研究に触れ、それらの利点、問題点とその解決策について考察する。

ヒアリングを通じ、鉄道事業者のニーズ、

ダイヤ作成業務のノウハウを集約する。

- ～ を踏まえ、以下の点に留意したダイヤ自動作成手法を提案し、効果を検証する。
- ・列車ダイヤの自動作成、定量的評価に関する先行研究の成果を有機的に結合する。特に、旅客流動の実測に裏打ちされた、ダイヤの定量的評価理論を評価指標とする。
- ・ダイヤ作成業務第一線のニーズ、ノウハウを十分に反映させる。ある程度単純かつ周期的なダイヤのみを導出する、小規模なシステムとする。

3. 研究の背景

3.1. 学術的研究の現状

ダイヤ作成業務は、数学的には、旅客の利便性や鉄道事業者の収益を最適化するための資源配分問題と、停車駅や列車順序パターンの組合せ問題としてモデル化できる。しかし、そのような学術的研究は少ない。

3.2. 鉄道業界の現状

鉄道業界では、伝統的に熟達した職員が勘と経験に基づいてダイヤを作成している。ダイヤ改定の度に多大な労力と時間を要していることから、コンピュータによるダイヤ案の自動作成に対するニーズが高まっている。

これまで、ダイヤ案の自動作成、定量的評価を行うための理論、システムがいくつか考案された[文献 1 - 5]。しかし、その多くは、実用化に際して改良の余地を残している。そのため、ダイヤ案の自動的な作成、定量的な評価は鉄道業界に浸透していない。

4. 先行研究とその利点、問題点

ダイヤにかんする研究は、ダイヤ案の自動作成または作成支援、ダイヤ案の定量的評価の2分野に大別できる。以下では、各分野での代表的な研究について述べる。

4.1. 範囲拘束探索手法を用いた自動作成

福森らは人工知能理論の範囲拘束探索手法

を応用した自動作成手法を考案した[福森, 82]。これにより、ダイヤ案を列車順序の組合せ問題の解として導いた。

(1) コンセプト

各列車がダイヤ構成上走行可能な時間帯を時間 - 距離グラフ上で1つの領域として表すという発想に基づく。

単純に場合分けをすれば、列車の順序が同一でも、時刻が微妙にでも異なれば、それらを異なる場合とみなすことになる。これでは、場合の数は天文学的な規模に膨れ上がり、全ての場合を探索することは困難である。

この方法によれば、列車順序が同一ならば、時刻に関係なく、それらを同一の場合とみなせる。これにより、場合の数は現実的に全ての場合を探索しきれぬ程度に減少する。

(2) 利点

列車順序のみを探索すれば時刻もほぼ確定した案を導ける。この点で、この手法は大変優れている。

(3) 問題点

全ての列車順序パターンについて探索するため、ダイヤ案を導くまでに実際にはかなりの時間を要する[片岡, 92]。特に、列車の追い越しが可能な駅の密度が高いほど、計算量は飛躍的に増大する。

後に、時間短縮のため、明らかに探索不要な順序パターンを担当者が抽出、排除できる機能を追加している。しかし、これでは作成支援システムに近いものとなる。

4.2. 列車ダイヤ案の定量的評価

家田らは、列車ダイヤを定量的に評価するための理論を提唱した。この理論を基に、首都圏の通勤鉄道路線を対象に朝通勤時間帯のダイヤについて評価を行った[家田, 88]。後に、ダイヤ評価システムを開発し、一部の鉄道事業者を導入している[家田, 96]。

(1)理論の概要

評価の指標として不効用関数を定義する(図1)。これは、列車待ちや車内混雑などにかんする不便さ、不快さを時間価値に換算した、いわば不便さ指数である。ここで、(仮定1)全ての旅客は乗車駅にランダムかつ一様に到着する。

(仮定2)全ての旅客は自らの総不効用が最小となる列車、経路を選択する。

と仮定し、複数のダイヤ案について全旅客の総不効用の和を算出する。算出値が最小となる案がその中で最適解となる。

$$\begin{aligned} \text{総不効用} &= \text{乗車時間} \\ &+ \quad \times \text{駅での待ち時間期待値} \\ &+ \quad \times \text{混雑不効用} \\ &+ \quad \times \text{乗換不効用} \\ \text{混雑不効用} &= \{ \exp(\quad \times \text{乗車率} - 1) \} \\ &\quad \times \text{乗車時間} \end{aligned}$$

図1 不効用関数の定義(出展: [家田, 88])

なお、 α 、 β 、 γ は旅客の行動パターンの特性を表すパラメータである。これらは各列車の各駅間での乗車人数とOD^{注1}から算出される。家田らの計算によれば、 $\alpha=1.6$ 、 $\beta=0.22$ 、 $\gamma=0.15$ 、 $\delta=3.5$ である。

(2)利点

計算値と実測値との相関係数は0.9以上である。理論の信頼性は高い。

(3)問題点

これら一連の研究においては、鉄道事業者側の都合、収益性が考慮されていない。

また、分析対象は専ら朝の通勤時間帯である。その他の曜日、時間帯^{注2}への適用については言及がない。

4.3.作成と評価を一貫して行うシステム

大隈らは、旅客流動シミュレーション、作成したダイヤ案の定量的評価機能を備えた自動作成システムを考案した[大隈, 96]。

(1)システムの概要

予め登録した様々な停車駅パターンを組合せ、旅客需要に応じた柔軟なダイヤ案を複数作成する。その中で全旅客の所要時間の総和が最小となる案を解として選ぶ。このプロセスを一貫して自動的に行う。

(2)利点

ダイヤの作成から定量的評価までのプロセスを一貫して自動化したこと、予め登録したパターンの組合せにより解をヒューリスティックかつ限定的に導くことなどの点で画期的ではある。

(3)問題点

現状にとらわれず、全く新しい停車駅によるダイヤ作成を目指している。鉄道事業者の実情を考慮していない。

シミュレーションでは、全ての旅客はランダムかつ一様に乗車駅に到着する。目的地まで最速な手段を選択すると仮定している。計算結果と実測値との整合性を検証していない。

5.先行研究の問題点に対する対策

以上の利点、問題点を踏まえ、鉄道事業者の実情に合ったより実用的なダイヤ自動作成システムのあり方を提案する。

5.1.システムの基本設計にかんする提案

(提案1)先行研究の利点の有機的結合

先行研究の利点を結合した、以下のようなシステムを提案する。

- ・探索する場合の数を最小限とし、効率的に組合せ問題を解く(4.1.の利点)。
- ・実測に裏打ちされた理論によりダイヤ案を定量的に評価する(4.2.の利点)。
- ・ダイヤ案の複数作成から定量的評価を一貫して自動的に行う(4.3.の利点)。

(提案2)シンプルな周期的ダイヤの導出

最近の鉄道事業者は、旅客の利便性向上を

主目的として、列車間隔の等間隔化、停車駅パターンの統一、パターンダイヤ化^{注3}などを推進している。東京圏の JR 線の多くは、もとより複々線運転により、各線路上でのダイヤは比較的単純である。

このような事情を踏まえ、シンプルな周期的ダイヤのみを導くシステムを提案する。

(提案3)現実的なニーズに基づく機能

ダイヤ案を先の理論のみにより評価することは現実的ではない。例えば、計算上の評価結果がどんなに良くとも、局所的に不便な箇所が生じ、苦情が多発する可能性があれば、鉄道事業者は現実的にその案を採用しない。

停車駅や列車本数の変更は鉄道事業者にとって経営判断であり、容易には行えない。1回のダイヤ改定で大幅に変えることは難しい。したがって、実用的には、現状と全く異なる停車駅などを考慮する必要性は低い。

以上を踏まえ、まずコストや運転間隔、停車駅など、現実的に無視、変更できない制約条件を前提とし、その上で評価理論による最適化を目指すという順序が望ましい。

5.2.より効率的な自動作成手法の提案

5.2.1.コンセプト

列車順序とは、本来ダイヤを作成した結果の産物である。全ての列車順序パターンを探索すれば、その中には一定の評価基準の下では無意味なパターンも含まれる。また、本研究は作成から定量的評価までを一貫して行う手法を目指している。以上を踏まえ、予め後の評価プロセスを見越して探索範囲を絞った作成方法を提案する。

列車種別毎になるべく等間隔に設定するのがダイヤ作成上の定石である。そこで、

- ・列車種別毎になるべく等間隔とする
- ・物理的な制約等により等間隔を維持できない場合、間隔の偏りを最小限とする

という考え方にに基づき、ダイヤを作成する。この方法は、原理的には、片方向のダイヤ作成のみならず、単線区間での上下線ダイヤの作成にも適用できる。

5.2.2.作成手順

(手順1)

駅間、種別毎の指定した列車本数の下で、各種別のみ等の間隔なダイヤを仮想的に生成する。これらを重ね合わせる(図2)。

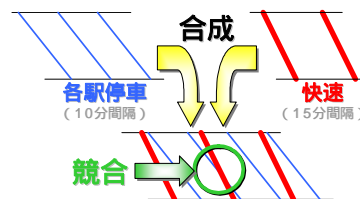


図2 等間隔なダイヤの合成例

(手順2)

2つの列車が競合する場合、これらを前後にスライドさせ、運転間隔を調整する。このとき、各列車の時刻は、一方を固定して他方をスライドさせる場合、一方をスライドさせて他方を固定する場合の範囲内になる。この範囲を領域として表す(図3)。

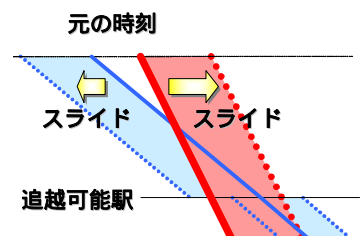


図3 時刻が競合する場合の修正

この領域は、物理的に設定可能であり、評価理論の下で意味のある時間帯を指す。

(手順3)

領域を持った列車同士が競合する場合、同様に一方を固定して他方をスライドさせる場合の範囲内になる(図4)。

以上の手順1~3を全ての列車、駅間の組合せについて繰返す。領域の幅や場合の数は一旦増加する。しかし、列車間隔の上下限値や列車順序の変更禁止といった制約条件と矛

盾する場合が生じてくる．それらは順次排除できる．矛盾無く最後まで残ったものが求める解となる．

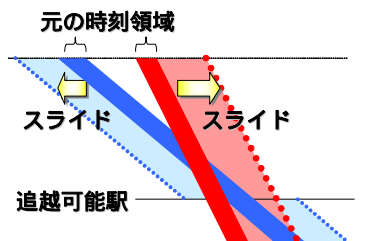


図4 時刻に幅を持った列車同士の競合

5.2.3.本手法の効果

小田急線新宿～相模大野間下り線を例として計算を行ったところ，制約条件の工夫により，2004年7月現在での実際の日中帯ダイヤを再現できた．

5.3.拡張した定量的評価理論の提案

5.3.1.旅客の行動パターンの実測

家田らのダイヤ評価理論の他時間帯，特に平日日中帯への適用性について検証するため，東京圏の様々な駅で日中帯の旅客流動を実測した．その結果の一例を示す(図5)．なお，グラフの横軸は前列車の発車から次列車到着までの時刻，縦軸は単位時間あたりの駅ホームへの旅客到着数^{注4}である．

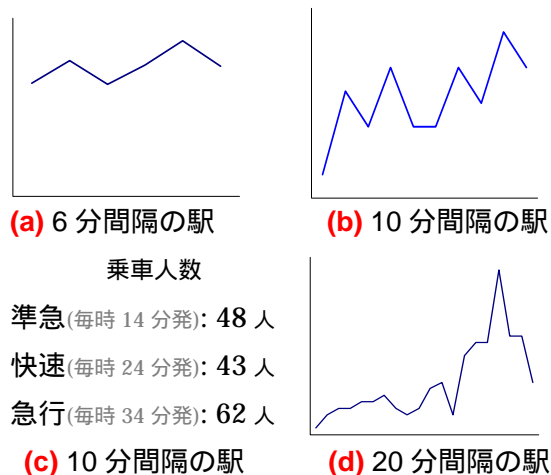


図5 日中帯の旅客の乗車駅到着分布

(a)～(d)の駅はいずれも，

- ・列車の運転間隔は等間隔である
- ・他鉄道への連絡は無い

・駅に乗入れるバス路線は希少であるという条件を満たしている．ただし，(c)駅のみ，列車により速度，行先が異なる．

実測の結果，以下の傾向が見られた．

乗車駅にランダムに到着する旅客，発車時刻に合わせ発車数分前に到着する旅客にほぼ二分される．

列車の運転間隔が短いほど，乗車駅にランダムに到着する旅客の割合が増える．

列車間で速度，利便性に差がある場合，速い，利便性の良い列車に利用が偏る．

混雑する時間帯，着席するために後の列車をホームで並んで待つ旅客が存在する．

5.3.2.評価理論の矛盾点の抽出

先の不効用関数の定義の下では，混雑不効用は着席の可否に関わらず，その列車の乗車率から一意的に決まる．これは と矛盾する．また， ～ は先の(仮定1)と矛盾する．このように，家田らの理論では実際の日中帯の旅客流動の全てを説明できない．

5.4.3.定量的評価理論の見直し

以上を踏まえ，家田らの理論を以下のように見直すことを提案する．

(1)(仮定1)を取り止める．

(2)不効用関数の定義(図1)において，数式はそのままに，待ち時間のパラメータ の値を以下のように2種類定義する．

- ・ 1...駅ホームで列車を待つ場合
- ・ 2...駅ホーム以外の場所で待つ場合

ここで， $1 > 2$ である．

(3)先の(仮定2)を以下のように拡張する．

(仮定2')全ての旅客はトリップ開始地点から降車駅までの総不効用が最小となる列車，乗車経路を選択する．

(4)座席が埋まる段階(乗車率約90%)までは混雑不効用がほぼ0であることに着目し，着席した旅客の混雑不効用を0とみなす．

5.3.4.見直しの効果

(1)～(3)に基づけば，ランダムに乗車駅に到着するよりも，特定列車の発車時刻に合わせて乗車駅に到着する方が不効用は小さくなる．例えば，直近の各駅停車に乗車するよりも，家などで待ってから後発の快速に乗車する方が不効用は小さくなる．これにより，先の傾向～を説明できる．

(4)に基づけば，着席により混雑不効用が0となるため，駅のホーム上で長い時間待っても，その待ち不効用を相殺できる．不効用を最小にするため駅で後の列車を並んで待つという先の傾向を説明できる．

以上より，定義や仮定を殆ど変更することなく，理論の適用範囲を拡張できた．

6. ダイヤ自動作成プログラムの開発

以上の提案を踏まえ，第一段階として，ダイヤを自動作成するコンピュータプログラムを作成する．

6.1.基礎データの抽出とモデル化

(1)線路の構造と列車の進路

まず，対象とする鉄道路線を複数の区間に分割してゆく．区分する箇所はポイントのある駅同士の間である．小田急線を例とすると，図6のようになる．

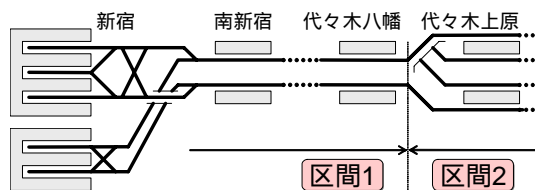


図6 線路上の区分

次に，線路上の地点を適宜抽出し，図7のように番号を与える．

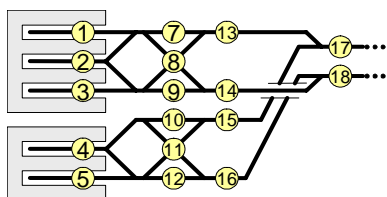


図7 線路上の地点への番号付け

列車同士の進路の競合判定（後述）を矛盾無く行えるよう，抽出する地点は必要最低限度の数とする．各区間の列車進路は，列車の通過地点の番号を組合せて表現する（図8）．

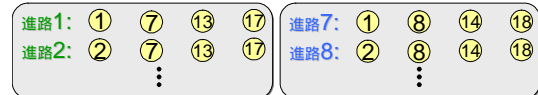


図8 通過地点の組合せによる進路の表現

ホームに隣接する地点，進路の始末端となる地点をピックアップしておく（図9）．



図9 進路接続地点とホーム隣接地点

(2)列車の時刻，所要時間

各進路，地点につき，地点間の所要時間，物理的な最小運転間隔，駅停車時間（ホーム隣接地点のみ）などを付与する（図10）．

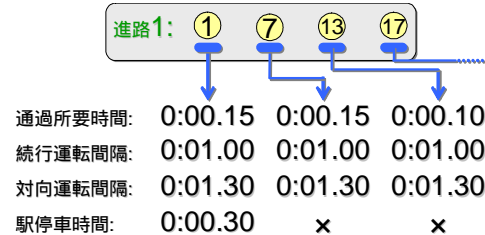


図10 時間にかんするデータの付与

(3)列車の追越し禁止，接続の指定

2つの列車種別の全ての組合せについて，区間毎に追越しの可否を指定する（図11）．

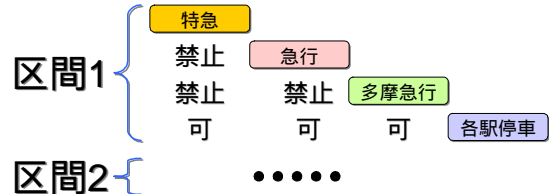


図11 追越し禁止の指定の例

同様に，列車種別の全組合せについて，駅毎に接続の有無を指定する（図12）．

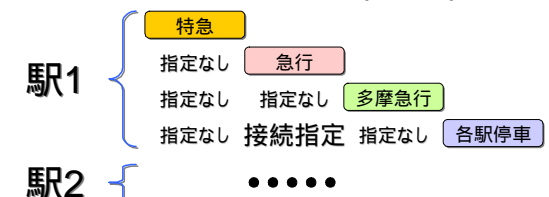


図12 接続の指定の例

急行は駅1で直近の各駅停車と接続せねばならない。各駅停車が次の駅まで逃げ切れなくても、強制的に待たせ接続する。

(4) 運転間隔，所要時間増の上下限值

区間，列車種別毎に運転間隔の上下限値を指定する (図13)。

区間	種別	運転間隔	所要時間増
区間1	特急	9 - 15分	1分00秒以内
	急行	5 - 15分	1分00秒以内
	多摩急行	指定なし	1分00秒以内
	各駅停車	2 - 10分	指定なし

区間2 { }

● 図13 運転間隔の指定の例

6.2. ダイヤ作成のアルゴリズム

先に提案した，列車種別毎の等間隔な部分的ダイヤを合成するという手法により，ダイヤ案を作成してゆく (図14)。

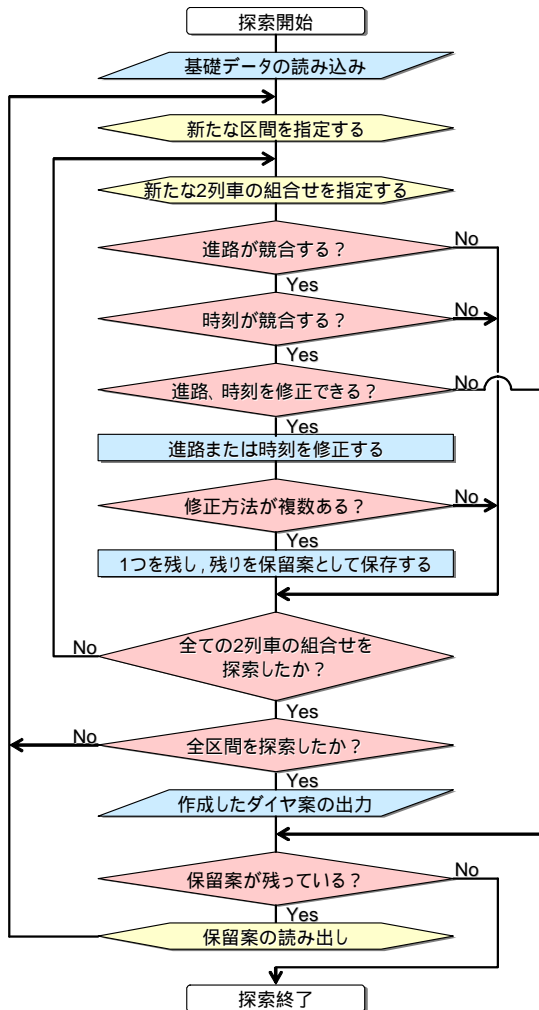
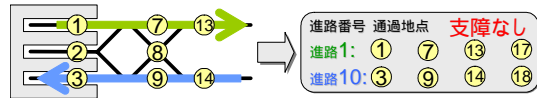
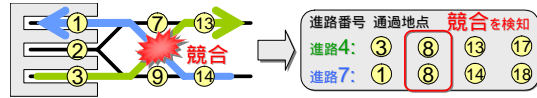


図14 ダイヤ作成のフローチャート

ここで，進路の競合の有無は，通過地点の重複の有無により判定できる (図15)。



(a) 進路が競合する場合



(b) 進路が競合しない場合

図15 通過地点の重複の有無による判定

6.3. プログラムの開発，動作環境

以下の環境で開発を行った。また，同一環境での動作を確認している。

言語: C 言語

CPU: Pentium M 1GHz

RAM: 64MB

OS: Microsoft Windows XP

6.4. プログラムの実行手順

(1) 基礎データの入力

一定のルールに従い，線路条件などの基礎データをテキストファイル上に記述する。HTML 言語を模して，< ~ > の記号で囲まれたタグ，および数値，名称データを構造化して記述する (図16)。

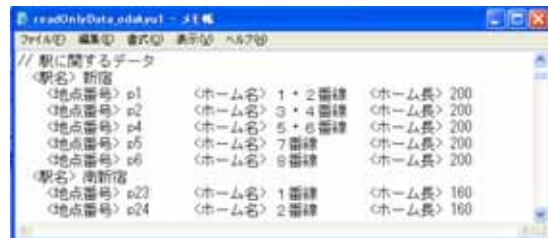


図16 基礎データの例

(2) プログラムの実行

コマンドプロンプトを立ち上げ，プログラム名と基礎データファイル名を入力する。

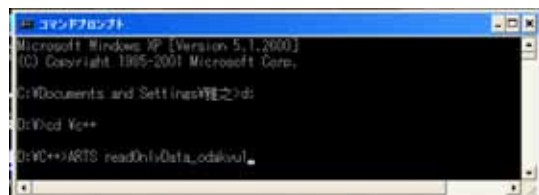


図17 プログラム実行の例

(3)作成したダイヤ案の出力

自動作成したダイヤ案を指定したフォルダ内にテキストファイルとして出力する(図18)。一般には、複数の案を出力する。



	特急15	急行05	各停01	特急16	急行07
新宿	発 12:00.00	12:01.00	12:05.00	12:10.00	12:11.0
南新宿	着 ---	---	12:06.30	---	---
	発 12:01.15	12:02.15	12:07.00	12:11.15	12:12.1
御堂橋	着 ---	---	12:08.30	---	---
	発 12:02.15	12:03.15	12:09.00	12:12.15	12:13.1

図18 出力されたダイヤ案の例

6.5.本プログラムの効果

制約条件を強弱させることで、出力するダイヤ案の数を増減できる。さらに、定量的評価を行うプログラムを追加すれば、先の提案に沿ったシステムが実現する。

7.課題と展望

2005年1月現在、片道あたりの周期的な列車ダイヤ案を自動作成するプログラムが完成している。これを既存の鉄道事業者の輸送システムに組込めば、実用化できる。

本研究は以下のような課題を残している。
単線区間、路線の分岐などの条件を考慮した、上下線全線でのダイヤ作成
時間帯毎に作成した周期的ダイヤ案を合成した、終日にわたるダイヤ案の作成
列車運行コストの試算などを含めた、作成したダイヤ案の定量的評価
車両、乗務員運用作成システムとの統合
ダイヤの情報に関する不効用を考慮したダイヤ評価理論の提案と実証

今後は、これらを実現するため、機能面でのより一層の充実を図ってゆく。

8.おわりに

今回、列車ダイヤ案を自動的に作成する模擬的なシステムを構築した。この成果はダイヤ作成業務の効率化、鉄道輸送サービスの向上に繋がるものと確信している。引き続き、システムの改良に努めてゆきたい。

謝辞

本研究を通じ、様々な面で有益なご指導をいただきました交通運輸情報プロジェクト関係者の皆様に感謝申し上げます。

参考文献、資料

- [1] 福森孝司: コンピュータによる列車ダイヤ作成の基本手法 - 範囲拘束探索手法の応用 -, 近畿日本鉄道技術研究所技報 Vol.13, pp.80-90, 1982年
- [2] 片岡健司, 駒谷喜代俊: 対話型ダイヤ作成支援システム DIAPLAN, 電気学会論文集 D, 112 巻 2 号, pp.153-162, 1992年
- [3] 家田仁, 赤松隆, 高木淳, 畠中秀人: 利用者均衡配分法による通勤列車運行計画の利用者便益評価, 土木計画学研究, 論文集 No.6, pp.177-184, 1988年
- [4] 家田仁, 加藤浩徳, 城石典明, 梅崎昌彦, 石丸浩司: 東京圏鉄道旅客流動予測システムの開発とその適用-乗降駅選択及び経路, 列車種別選択モデル-, 土木計画学研究, 論文集 No.13, pp.721-732, 1996年
- [5] 大隅英貴, 安部恵介, 阿部健一: 乗客流評価に基づく需要適応型列車ダイヤ作成法, 電気学会論文集 D, 116 巻 4 号, pp.471-476, 1996年
- [6] 有澤誠, 西村俊介: アルゴリズムとデータ構造, 実教出版, 1998年

注釈

注1: 任意の2駅間の時間帯別旅客数

注2: 例えば、平日夕方は着席志向性が相対的に強いという特徴がある。平日日中や土休日は列車本数や旅客数が相対的に少なく、利用者層やニーズが多様である。

注3: 一定の周期で同じダイヤを繰返すこと

注4: 各駅とも、通過旅客数が500人程度に達するまで計測し、その結果の平均をとったもの