

運行のネットワークモデル化と計画策定支援

愛須 英之, 大槻 知史, 竹葉 豊幸

近年、日本の鉄道技術の海外への展開に向けた動きが活発化しつつある状況を踏まえ、運用ポリシーの全く異なる計画担当者でも運行計画策定の根拠となる考え方を容易に理解する手段として、ネットワーク構造のモデルによる問題の表現と可視化が有効であると考えている。運行計画を二種類のネットワーク構造のモデルで表現し、車両運用計画、ダイヤ、車両基地の構内作業計画の策定・修正支援に適用した研究開発事例について紹介する。

キーワード：鉄道、スケジューリング、ネットワーク、車両運用、経路探索、PERT、構内作業計画

1. はじめに

近年、新幹線をはじめとする日本の鉄道技術の海外への展開に向けた動きが活発化しつつある。昨年の11月、日本の鉄道技術を海外に売り込むことを目的として、複数の鉄道会社が連合を組み日本コンサルタンツ（株）[1]を立ち上げたのは記憶に新しい。鉄道では車両や信号など単体の輸出がメインであった日本は、システム全体の売り込みが弱いとされてきたが、運行ノウハウを持つ各社が協力することで、アジアの都市鉄道などで契約獲得を目指す。これまで日本の企業は、海外でのオペレーション事業には本格的に参入していない。しかし、グローバル市場での鉄道を含む交通オペレーション事業は巨大な潜在市場があり、年率15%程度で成長するとの試算もある。特に欧州では、1990年代に鉄道事業の再編によりインフラの管理・保有の主体と運営の主体を分ける上下分離方式が採用され、一定の要件を満たす企業であれば、自前でインフラを持たなくても保有主体に使用料を払うことで列車の運行が許可されるようになった。これにより、同じ軌道上で異なる企業が異なる列車を走行し輸送サービスで競合するような、日本では考えられない状況も発生している。

日本の鉄道会社の超過密・定時輸送を安全に運営する運行計画と運行管理の技術は、海外から高い関心を寄せられており、オペレーションの領域でも、海外に段階的に持ち込める形で、ノウハウと技術をセットで

整理し、モジュール化を進めることの重要性が増していると思われる。

本特集の各解説でも明らかであるように、日本、欧州とも、数理最適化技術を活用した鉄道運行計画の策定支援や自動化の試みが活発に行われている。しかし、日本のような超過密・定時輸送を安全に実現する運行計画を策定するためには、乗客の乗換えや混雑の予想など、対象地域の特性や路線の状況を知りつくした熟練者のノウハウがなければ難しい要素が残り、完全な自動化は難しい。このため、運用ポリシーや業務形態の異なる他国の計画担当者でも理解が可能であり、地域に依存した独自のノウハウを追加して活用することが可能な、可読性と汎用性の高い数理モデルが不可欠であるとする。自動提案される計画の質を高めることはもちろんだが、計画担当者がインタラクティブに計画の修正を加えることを前提と考えると、計画の根拠となる考え方、すなわちモデリング方法や評価基準が計画担当者にとってブラックボックスとなることはなるべく避けなければならない。

モデリングの過程を計画担当者に理解しやすくする手段として、特に鉄道や道路交通などの交通分野ではネットワーク（有向グラフ）構造のモデルによる問題の表現と可視化が有効であると考えている。対象とする計画問題をネットワークで図示可能な形式で表現することで、複雑な数式に馴染みのない計画担当者にもモデルの本質を直観的に伝えることができるので、海外展開にあたっての言語の壁も克服しやすくなることが期待できる。また、ネットワーク構造のモデルでは、計画とモデルの部分的な対応関係が理解しやすくなることも期待できる。このため、ナビゲーションの経路探索用の道路ネットワークモデルのように、フォーカスすべき領域や期間に応じて部分的にモデルの粒度を

あいす ひでゆき, おおつき ともし
株式会社東芝 研究開発センター
〒212-8582 神奈川県川崎市幸区小向東芝町1
たけば とよゆき
株式会社東芝 社会インフラシステム社
〒105-8001 東京都港区芝浦 1-1-1

変換するといったことにより、大規模な問題に対応するためのスケラビリティも実現しやすい [2].

鉄道の分野では、一般旅客用のいわゆる乗換案内サービス向けに、評価尺度に応じた最適な経路を高速に求めるためにさまざまな工夫を凝らしたネットワークモデルが提案されている。例えば、駅探™の経路探索エンジン [3] での路線ネットワークは、路線図をベースに、駅をノード、路線と乗換えや隣接する駅への徒歩移動をアークで表現するが、候補として列挙される経路の多様性を実現するため、あらかじめアーク群を飛行機路線など種類に応じてグループ分けし、利用するアークの範囲を動的に変更している。また、最安運賃経路計算に焦点を当てたネットワークモデル [4] では、異なる料金体系の事業者間を横断した計算を容易にするため、同一事業者内の全駅間に運賃を重みとして持つアークを持たせるなどの工夫を凝らしている。

運行計画に関しても、列車計画、車両運用計画、乗務員運用計画、それぞれの分野でネットワーク構造のモデルを活用した研究開発が行われている。以降の章では、我々の過去の取り組みを振り返り、運行を二種類のネットワーク構造のモデルで表現し、車両運用計画、ダイヤ変更検証、車両基地構内作業計画のそれぞれの計画に適用した事例について簡単に紹介する。

2. 車両運用のネットワークモデル化

鉄道車両運用計画は、個々の編成に対しダイヤ上のどの運行を割り当てるかを決定する運行計画と、車両基地に入庫している間に各種の検査/清掃等の構内作業を割り当てる検査/清掃計画の、双方にまたがる総合的な計画である。熟練者が1カ月の基本運用計画作成に数日以上時間を要し、またダイヤ乱れが発生した場合は翌日の始発までに計画更新を完了する必要があり、負荷の高い業務である。

図1に、縦軸を駅と車両基地、横軸を時刻としたダイヤ上に対応させた運行の例を太線で示す。ここでは、図の例のように、車両基地または駅を出庫し所定のダイヤを走行した後に入庫するまでの車両の一連の運行経路(行路)群があらかじめ作成されており、各編成に運行単位を割り当てることで運行計画を作成することを前提とする。

運行計画は、各日ごとに定義された運行を各編成に漏れなく重複なく割り当てる必要がある。ある編成に1日に複数個の運行が割り当てられる場合や、逆に1個も運行が割り当てられない場合もある。1個も運行が割り当てられない場合、編成は1日車両基地に滞在す

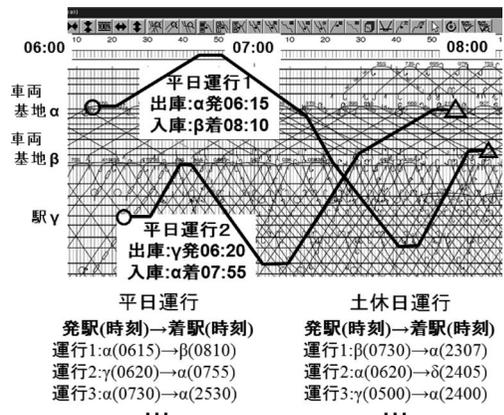


図1 運行の一例

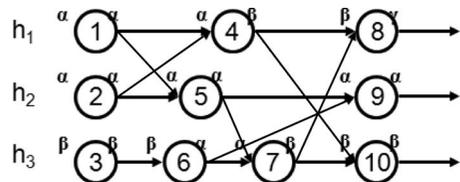


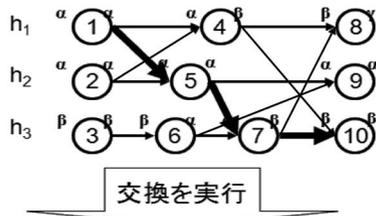
図2 運行のネットワークモデル化

る予備車両となる。さらに、編成によって走行できる運行が異なり、編成に検査/清掃計画が設定された場合は、所定の時間帯に所定の車両基地に滞在しなければならない。このほか、事業者や車両基地ごとに、独自の運用ルールに基づく制約条件があるのが一般的である。

運行計画は、図2のように、各運行をノード、運行間の接続可能性をアークとするネットワークにより表現できる。図では、運行に相当する各ノードの左上には出庫場所を、右上には入庫場所を示す。また左端の h_1 等は編成の番号を示す。細線と太線は、それぞれの運行が場所と時刻の接続条件を満たしていることを示し、太線をたどる経路が各編成の実際の運行計画を表す。例えば、編成 h_1 の場合「運行1 → 運行4 → 運行8 →」が運行計画を表す。運行1から運行4に接続可能な条件として、運行1の入庫時刻より運行4の出庫時刻が一定の時間間隔以上空いており、かつ、運行1の入庫場所と運行4の出庫場所が一致していなければならない。

複数日をまたがって運行の接続可能性を考慮すると、ネットワークにおけるアーク数が膨大となり、長期的にわたる運行計画を作成することが難しくなる。このため、各運行が1日単位で完結していることを利用し、

元の計画



更新された計画

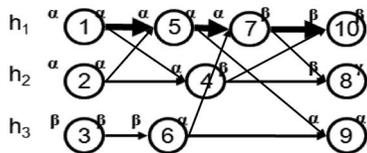


図3 経路交換処理の例

車両が車両基地もしくは駅に1日滞在していることを示す予備ノード(中間日ノード)を導入し、各ノードの接続は各日内と当日～翌朝に制限することにより、不要なアークを削減している。

車両運用計画におけるネットワーク構造のモデルの適用事例では、周期的な運用計画の作成を巡回セールスマン問題に帰着した研究事例[5]などがある。この例では基本運用計画の作成をターゲットとしているため、計画が周期的であることを前提として1度に巡回可能な経路を求めているが、日々の車両運用計画、特にダイヤ乱れの後の復旧計画などでは計画が周期的にならない条件も少なくない。我々は、運行計画をネットワーク上の複数の経路群として表現した。ネットワーク上のすべてのノードが、各編成に相当する複数経路によって漏れや重複なく含まれるように分割することにより、運行計画が作成できる。

図2のネットワークでは、起点編成 h の初日ノードを始点とし、ネットワーク上で最終日のノードに至る経路が発見できれば、編成 h については経路上で交換の発生を示すアーク(細線で示されるアーク)を通過する回数のアークの交換だけで運行計画を作成できるという性質を持つ。このことを利用し、現状の計画からアークの交換による変更の少ない候補計画を探索する問題を細線で示されるアークをなるべく通らないような経路を探索する問題に帰着し、高速かつ再帰的に処理することが可能である。

ネットワーク上の経路群発見の最適化問題の解法としては、制約違反箇所が少なくなるように経路の交換を反復することで効率的に計画を作成する解法を提案

した[6]。この解法では、制約違反が発生している編成を発見し、制約違反のある編成の経路の交換処理を行うことで制約違反を解消することを反復し、解の候補を生成する。

例えば、図3のように、 $1 \rightarrow 5 \rightarrow 7 \rightarrow 10$ の経路を考えると、 $1 \rightarrow 5$ および $5 \rightarrow 7$ が他編成との交換処理対象となりうる。この場合、最初に $1 \rightarrow 5$ にしたがって編成 h_1 のノード4以降と編成 h_2 のノード5以降の運行計画を入れ替え、次に $5 \rightarrow 7$ にしたがって編成 h_1 のノード9と編成 h_3 のノード7以降の運行計画を入れ替えることで、更新された運行計画が得られる。

提案方式は、初期解となる経路の割当を作成するグリーディー割当と、初期解に経路交換を繰り返し適用し、制約違反の合計数が小さい割当を逐次探索するバックトラック探索から構成される。まずグリーディー割当では、各運行を出庫時刻が小さい順に、割当可能な編成のいずれかに割り当てる。次にグリーディー割当により得られた割当を初期解とし、制約違反がある編成 h がある場合は、編成 h を起点編成としてバックトラック探索を実行する。このバックトラック探索では、経路交換回数の閾値の範囲内で、経路交換処理により指定された編成の制約違反を解消することを再帰的に反復、すべての編成の制約違反がなくなるまで交換処理を実行する。交換回数の閾値は順次増やしながら探索範囲を拡大する。

バックトラック探索の例を図4に示す。本例では、先に編成 h_1 の制約をパス交換により解消し、次に編成 h_2 の制約違反を解消、結果的に編成 h_3 の制約違反も解消されている。

本稿で紹介したネットワーク構造のモデルおよび探索方式は、実路線のデータに基づくテストセットによる評価において、整数計画問題として定式化し汎用ソルバーで解いた場合に比べ10~100倍高速に、実用上十分な精度の計画が求められることを確認している。

我々は、本方式を計画エンジンのコア部分とし、東京地下鉄(株)と共同開発することでさまざまな現場のノウハウを導入し、運行計画だけでなく、検査/清掃計画の素案の自動配置まで含めて一貫して日々の車両運用計画作成を支援するシステムを開発した[7]。検査/清掃計画の作成では、各々の場所における作業リソースの制約条件(各作業の実施可能上限数、実施可能時間帯、同時に実行可能な作業の数など)、各検査や清掃の実施可能場所、実施可能な曜日、最大周期(法定周期)などの条件を元にして、各編成ごとに検査/清掃の実施日時と実施場所までを決定する。高速な運

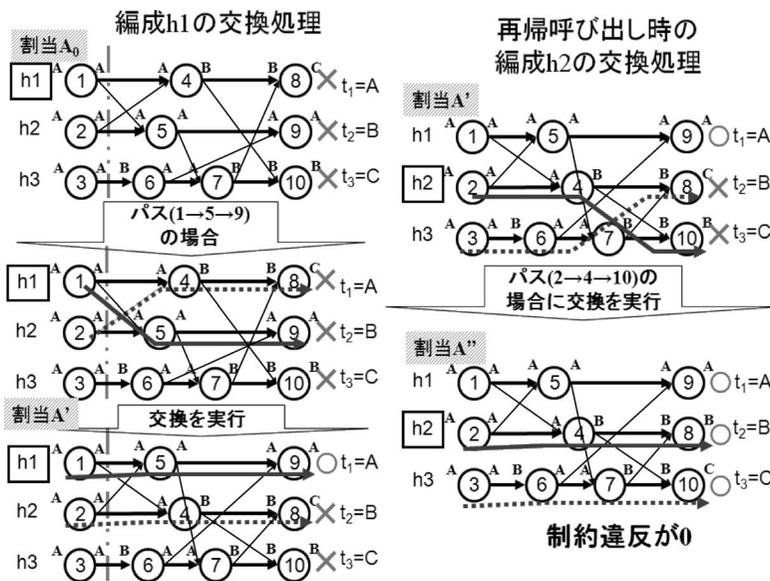


図4 探索時の経路交換処理の例

行計画エンジンと密に連携することで、各日の運行の接続性まで同時に考慮した精度の高い検査清掃計画の作成が可能である。

3. 車両走行のネットワークモデル化

生産スケジューリングなどの分野で実績のある手法であるPERT (Program Evaluation and Review Technique) は、ネットワーク構造により表現されるため可読性が高く、制約の矛盾する部分の発見や変更波及範囲のみの再計算が高速に実施できるメリットがある。このため、運行計画のモデリングに活用した研究事例がいくつか報告されている [8][9]。

車両走行をネットワーク形式のモデルとして表現するため、各駅への列車の到着と出発をそれぞれイベントとして、列車の走行する順番に連結する。モデリング方法の一例を、図5を用いて説明する。図で、ネットワークの各ノードは車両の到着と出発に相当し、アークはそれぞれのノードのイベント間における発生順序と時間制約を表現する。

PERTでは、イベント間で要する最小の時間のみ制約として扱うのが一般的である。しかし、鉄道の車両走行のモデリングでは、イベント間で許される時間の上限值に関する制約が数多く存在する。従来のPERTモデルのみでは、これらの時間の上下限の制約を同時に満たすような実行可能解を簡易に計算することが難しい。例えば、指定した車両の着発時間や走行時間を延長した際、従来のPERTモデル単体では、隣接する移動

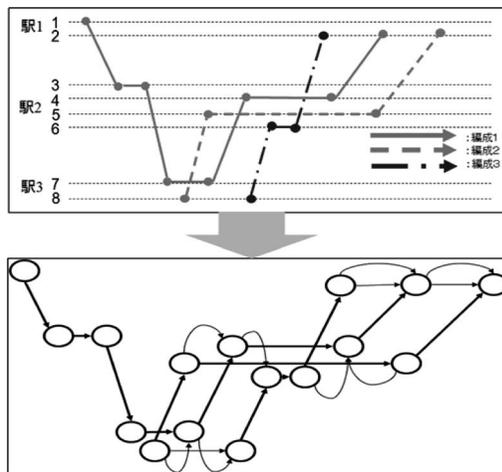


図5 車両走行のネットワークモデル例

や留置の開始終了時間が無制限に延長されるだけでなく、時間の上限を守るために全体に影響を波及させるような時刻修正は行わないため、他のヒューリスティクスと組み合わせる必要があった。我々は、PERTモデルと同形式のネットワーク形式モデルにおいて、時刻更新演算の拡張を試みた [10]。

最小時間と最大時間の双方を満足する解を求めるために、各ノードの時刻の値が変化しなくなるまで、時刻更新演算を反復する。以下に時刻更新演算の概略を示す。まず、記号を以下のように定義する。

$ETs(i)$: ノード i の最も早い時刻 (更新後)

$ETs-1(i)$: ノード i の最も早い時刻 (更新前)

LTs(i): ノード i の最も遅い時刻 (更新後)

LTs-1(i): ノード i の最も遅い時刻 (更新前)

Tmin(i, j): ノード $i - j$ を結ぶアークの最小時隔

Tmax(i, j): ノード $i - j$ を結ぶアークの最大時隔

preds(i): ノード i に流入 (先行) するノードの集合

succs(i): ノード i から流出 (後発) するノードの集合

演算の概略は以下の手順となる.

①初期化

全ノードについて, ETs(i) を ETs(i) の取りうる下限値に, LTs(i) を LTs(i) の取りうる上限値に初期化

②順方向時刻更新演算

トポロジカルオーダー (ノード u から v への経路があれば, 必ず u が v より先になる順序) に従い式 (1) を全ノードについて実施

$$\begin{aligned} \text{ETs}(i) &= \max_{h \in \text{preds}(i)} [\text{ETs}(h) + T_{\min}(h, i), \text{ET}_{s-1}(i)] \quad (1) \end{aligned}$$

③逆方向時刻更新演算

トポロジカルオーダーの逆の順序で式 (2) を全ノードについて実施

$$\begin{aligned} \text{ETs}(i) &= \max_{k \in \text{succs}(i)} [\text{ETs}(k) - T_{\max}(i, k), \text{ET}_{s-1}(i)] \quad (2) \end{aligned}$$

④終了判定

全てのノードの ET の値が不変なら終了し, そうでなければ②に戻る

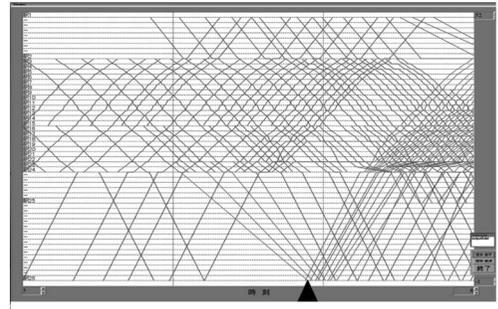
⑤LT 更新演算

ET の③~④の演算とはほぼ同様に, 以下の式 (3), (4) の演算を LT の値が収束し変化しなくなるまで交互に反復

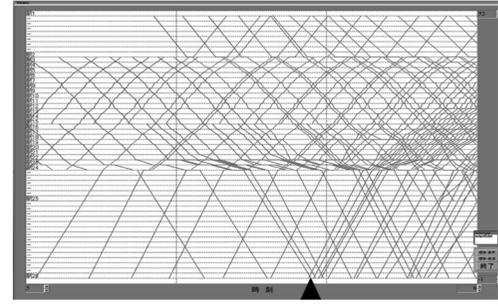
$$\begin{aligned} \text{LTs}(i) &= \min_{h \in \text{preds}(i)} [\text{LTs}(h) + T_{\max}(h, i), \text{LT}_{s-1}(i)] \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{LTs}(i) &= \min_{k \in \text{succs}(i)} [\text{LTs}(k) - T_{\min}(i, k), \text{LT}_{s-1}(i)] \quad (4) \end{aligned}$$

PERT 形式のネットワーク上で最小時隔と最大時隔の双方を満足する解を求める問題は, 最大時隔に相当する負の重みを持つアークを追加したネットワーク上で, 各ノード間の最長経路を求める問題と見なせるため, 最長経路の解法である Bellman-Ford 法等価な反復計算を実施している. Bellman-Ford 法におけるアークの処理順序を, 重みの正負により分離し, それぞれ元のネットワークのトポロジカルオーダーと, その逆順に処理している. 反復演算においては, 値が更新



(a) 最大時隔制約無し



(b) 最大時隔制約あり

図 6 ダイヤ一部変更時の検証の例

されたノードのトポロジカルオーダーにおける先頭および最後尾をそれぞれ記憶し, 次回の時刻更新範囲を限定することで, 演算を高速化できる.

図 6 は, 実路線における 24 時間分のダイヤデータをモデリングし, 駅での出発順序を変更しない条件下で運行のシミュレーションを実施した例の一部を表示したものである. 他路線の遅延列車との接続をとるための事前検証を想定し, 指定した列車の発車時刻 (図の ▲) を元のダイヤから 30 分遅らせたと仮定した. (a) は最大時隔制約がない場合, (b) は各駅の駅停車時間と駅間走行時間の延長可能時間をそれぞれ 5 分以下に制限した場合を示す. (b) は指定車両の発車変更時刻より手前まで遡って制約条件を守るための着発時刻の調整が行われていることがわかる. 本例はノード数 2 万以上の規模のネットワークモデルであるが, 演算反復回数はたかだか 4 回で収束し, 演算時間は 15 ms 程度 (CPU 3.2 GHz) であった.

我々は, 本稿で述べた拡張した PERT モデルをコアとし, ヒューリスティックス探索手法と組み合わせ, 高負荷・大規模な車両基地において構内作業計画を作成するための自動提案システムを試作した [11].

本システムでは, 計画担当者の計画ノウハウを反映するため, 車両基地内における個々の車両の基本的な

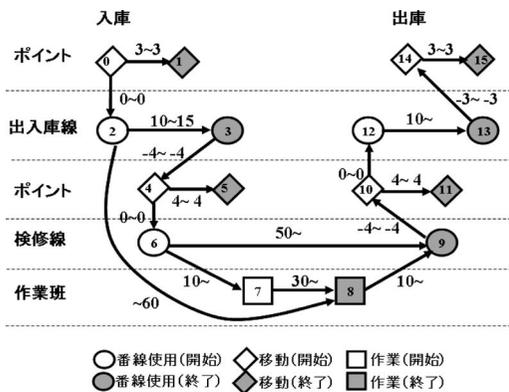


図7 工程テンプレートの例

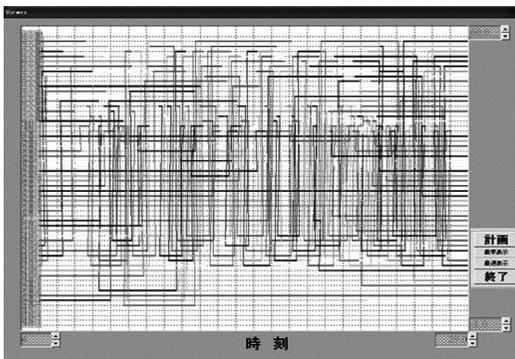


図8 作成された計画の例 (編成数 112 本)

転線移動パターンと作業工程のフローを示す工程テンプレートを、図7の例のようなPERTのネットワーク形式で事前に可視化し登録することを前提とした。図は、「入庫→出入庫線→検修線→出入庫線→出庫」の工程テンプレートの例である。各アークに付与された数字は時間の制約を示している。移動時には、複数の番線を同時に閉塞することを示すため、マイナスの時間条件が定義されたアークが追加されている。

最小時間と最大時間の双方を扱うことが可能なため、計画ノウハウに基づく多様な時間制約条件を反映できる。例えば、出入庫の際に本線の運転士が直に移動させるか、車両基地内所属の運転士が対応するかの違いで出入庫線に留置可能な上限時間が異なるような、特殊な条件も反映可能である。

計画作成時は、与えられた出入庫時刻を制約とし、各編成が利用する工程テンプレートの組み合わせを山登り探索で決定する処理と、作業計画全体に相当するネットワークに選択された工程テンプレートを追加合成する処理の、二段階の処理を反復する。

大規模な車両基地を模擬したモチーフを用いて、現場

業務におけるさまざまな制約を考慮した構内入換・作業計画が作成できることを出入庫ダイヤサンプルを用いて実験を行い、30秒～5分以内の演算時間（CPU1GHz）で計画を作成することが可能であることを確認している。図8に、本方式により作成された構内ダイヤ形式の計画の例を示す。本例では、工程テンプレートは、計画担当者からのヒアリング結果を元に、それぞれ転線する経路等が異なる40パターン程度を定義した。

4. おわりに

運用ポリシーや業務形態の異なる計画担当者でも理解可能な可読性と汎用性の高い数理モデルとして、ネットワーク構造のモデルが有効であることを述べ、例として、運行を二種類の汎用的なネットワーク構造のモデルで表現し、車両運用計画、ダイヤ変更検証時、車両基地構内作業計画のそれぞれに適用した事例について紹介した。今後は、技術者間での基本的なモデルの共有化とベンチマーキングを進め、各モデルの適用可能な範囲を明確化していくことが、日本が得意とするオペレーションの領域で海外展開を図るための準備としても重要ではないかと考えている。

参考文献

- [1] <http://www.jicttransport.co.jp/organization.html>
- [2] 宮本裕一郎, 宇野毅明, 久保幹雄: 最短路高速探索の新解法: 階層メッシュ疎化法, スケジューリングシンポジウム 2008 予稿集, pp. 127-132, 2008.
- [3] 半田恵一, 田中俊明: 乗換え案内サービスにおける経路探索手法, 電子情報通信学会論文誌, **J88-D-I** (2005), pp. 1525-1533.
- [4] 池上敦子, 森田隼史, 山口拓真, 菊地丞, 中山利宏, 大倉元宏: 鉄道運賃計算のための最安運賃経路探索一複数の鉄道会社を含む場合-, 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, **51** (2008), pp. 1-24.
- [5] 福村直登, 中村達也, 西森進矢, 坂口隆: 鉄道の車両運用計画作成アルゴリズム, スケジューリングシンポジウム予稿集, pp. 167-172, 2008.
- [6] 大槻知史, 愛須英之, 田中俊明: 車両運用計画に対する制約充足解法の提案, 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, **53** (2010), pp. 30-55.
- [7] 安本高典, 永吉中作, 大槻知史, 中島正貴: 車両運用計画システムの開発, 第46回鉄道サイバネシンポジウム論文集, CD-ROM, 2009.
- [8] 富井規雄, 周利剣, 福村直登: 確率的局所探索とPERTを組み合わせた駅構内入換計画作成アルゴリズム, 電気学会論文誌C, **119** (1999), pp. 289-295.
- [9] 富井規雄, 田代善昭, 田部典之, 平井力, 村木国満: 利用者の不満を最小にする列車運転整理アルゴリズム, 情報処理学会論文誌, 数理モデル化と応用, **46, SIG_2** (2005), pp. 26-38.
- [10] 愛須英之: 反復時刻更新演算型PERTによる鉄道シミュレーション, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2009年春季研究発表会予稿集, pp. 108-109, 2009.
- [11] 愛須英之, 梨田浩二, 高橋浩樹: 車両基地構内入換・作業計画システムの開発, 第46回鉄道サイバネシンポジウム論文集, CD-ROM, 2009.