



Title	列車運転計画問題における対話型計画作成方式に関する研究
Author(s)	片岡, 健司
Citation	大阪大学, 1999, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.11501/3155448">https://doi.org/10.11501/3155448</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

列車運転計画問題における  
対話型計画作成方式に関する研究

1998年12月

片岡健司



列車運転計画問題における  
対話型計画作成方式に関する研究

1998年12月

片岡健司

## 内容梗概

本論文は、筆者が1989年から現在まで三菱電機株式会社産業システム研究所において従事した列車運転計画システムに関する研究開発業務の経験を背景に、1997年から現在にかけて大阪大学大学院工学研究科博士後期課程在学中に行ってきた、列車運転計画問題における計画作成支援手法に関する研究成果をまとめたものである。

鉄道会社は列車ダイヤを前もって利用者に提示するとともに、列車ダイヤを守って列車を運行する使命を帯びている。そのためには、列車ダイヤだけではなく、車両や乗務員の運用計画を含む様々な種類の計画を立案する必要があるが、これらの計画を列車運転計画と呼ぶ。

列車運転計画の作成は、多種多様な大量のデータを扱い、基本データ作成型、ダイヤ作成型、ジョブ作成型、資源割当型に分類される様々な種類の部分問題を含む高度に複雑な問題である。従来は複数の熟練者がそれぞれ分割された部分問題を担当し、経験的知識をもとに試行錯誤的に計画を作成し、評価することを繰り返して手作業で計画を作成してきた。しかし、大都市近郊路線における輸送需要の急速な拡大に伴い、運転計画の規模が拡大し、従来の熟練者による手作業での作成では対応しきれなくなりつつある。これに対応するため、乗客の利便性向上やサービスの多様化、列車運行の効率化などを目的とした運転計画の高品質化、ならびに専門家の負担軽減をめざし、運転計画のシステム化が図られてきた。しかしながら、運転計画の「品質」の評価指標が明確でなく、定式化が困難であることや、運転計画の多くは非常に大規模な組み合わせ問題となり、計算機で取り扱うにはハードウェアの進展が必要であったことなどから、数理計画法をはじめとする数学的な解法による自動作成は困難であった。また、前提となるデータや制約条件が少し変わると問題構造が大幅に変わり、既存の運転計画の流用が困難な場合が多いこと、その結果熟練者の経験的知識や勘に基づく試行錯誤的な作成が必要なことなどから、知識の体系化による知識工学的アプローチも、部分的な支援段階の適用にとどまっている。そのため、現状の運転計画システムは紙と鉛筆による作業をディスプレイとポインティングデバイスに置き換え、画面上で計画作成を行なうことを可能としたCAD的システムが大部分を占める。そのようなシステムでもある程度の負荷軽減は可能だが、知的判断の支援とは言えず、運転計画の高品質化に直接寄与するまでには至っていない。

このような背景を踏まえ、本研究においては、運転計画の作成において、専門家の意図を取り込みつつ高速に計画を作成することで、試行錯誤的な計画作成を支援するモデルおよび問題解決方式を提案する。

まず、時刻表に相当する列車ダイヤを作成するダイヤ作成型問題において、問題構造と既存システムの問題点について考察を加え、対話型支援システムの必要性を明らかにする。続いて、人間がダイヤを作成するときと同じようにシミュレーションとスケジューリングとを交互に行うことで、人間にとってわかりやすい手順でダイヤを自動作成する手法を提案する。本手法によれば、基本的には計算機が局所的な制約を満足するダイヤを自動的に作成し、専門家は作成過程を監視しながら、種々の要求を満足するために調整の必要性を感じた場合のみ主導権を握ることができる。提案手法に基づき、ダイヤの部分的な修正と再作成による試行錯誤を対話的に繰り返して各要求に対して調整を図りながら、ダイヤを効率的に作成するシステムを開発し、実規模のダイヤを作成して提案方式の有効性を評価する。さらに、分岐・合流を含む路線や単線、複々線といった複雑な路線形態へ対応するための拡張方式を提案する。

次に、運転ダイヤ(列車ダイヤに加え、営業外の列車運行も含んだダイヤ)に対し、乗務員や車両の運用ローテーションを決定するジョブ作成型問題においては、広大な探索空間や様々な種類の制約条件を処理し、作成者の負担をできるだけ減少させる仕組みが必要となる。本論文では乗務員運用計画問題を対象とし、まず、考慮すべき制約条件や専門家の計画作成手順を分析し、対話型の支援システムの構築を容易とするために、専門家モデルに基づいて階層的なデータモデルである多重組織化モデルを考案する。続いて、試行錯誤による作成を計算機で代行させるための枠組みとして、環境に対する適合度を持った個体が複数個存在する問題に対し、個体同士が生存競争を行うことにより全体の最適化を目指す手法である Simulated Evolution 手法を用い、短時間に制約充足解を探索する方式を考案する。また、考案方式に基づき乗務員運用計画作成支援システムを開発するとともに、実規模レベルの運転ダイヤに適用することにより考案方式の有効性を評価する。

本論文では、全体を以下の6章に分けて構成する。第1章に序論を述べ、第2章で運転計画の基本となる列車ダイヤの自動作成手法を検討する。第3章では、第2章で提案したモデルをより複雑な形態の路線に対応させるための拡張方式を示す。第4章では、乗務員運用計画を計算機上で取り扱うためのデータモデルである多重組織化モデルを提案する。第5章では、第4章で提案した基本モデルにおける大枠作成段階において、従来の数値計画法より短時間で運用計画を自動提案する方式を示す。最後に第6章で結論を述べる。以下に各章の概要を示す。

第1章の序論では、運転計画を構成する部分問題の問題構造を分析し、基本データ作成型、ダイヤ作成型、ジョブ作成型、資源割当型の4種類に分類されることを示す。そのうち、システム化が遅れているダイヤ作成型問題とジョブ作成型問題に着目し、これまでの

システム化技術、ならびに解決すべき課題について述べ、本論文の目的と位置づけを明らかにする。

第2章では、運転計画の基本となるダイヤ作成型問題を取り上げ、問題構造ならびに既存システムの問題点について考察を加える。また、列車ダイヤに対する多様な要求を満足させるために、基本的なダイヤを自動作成し、ダイヤ作成に伴う煩雑な作業を軽減するとともに、専門家の試行錯誤的な調整作業を対話的に支援する方式を検討する。

ダイヤ作成に対し離散型のスケジューリングモデルである思考整合型モデルを適用し、列車運行のシミュレーションと追越しを含めたダイヤ設定を専門家と同じような手順で組み合わせてダイヤを自動作成する方式を提案する。また、提案方式に基づく対話型の作成支援システム DIAPLAN を実現する。

第3章では、第2章で提案した手法をより複雑な路線に対応させるための拡張方式を示す。単線や複々線、合流や分岐を含む、多様な形態の路線でダイヤの自動提案を可能とする実用的なモデルを提案する。

DIAPLAN は複線の一方におけるダイヤのみを取り扱うことができたが、実際はより複雑な路線形態を持つ鉄道会社も多い。それらの路線に対応するため、後方からの列車に追い越される可能性、ならびに前方からの列車との行き違いを設定する可能性を調べ、その結果によって計画ダイヤの設定を保留することができるように DIAPLAN を拡張した DIAPLAN-II を実現する。また、DIAPLAN の特徴を保持したまま、複雑な路線のダイヤを実際に作成できることを示す。

第4章では、ジョブ作成型問題のうち乗務員運用計画問題を取り上げ、乗務員運用計画で考慮すべき制約条件ならびに作成手順を分析する。また、分析結果に基づき、運用計画業務の専門家モデルを構築するとともに、対話型の支援システムの構築を容易とするために、専門家モデルに基づいて階層的なデータモデルである多重組織化モデルを考案する。

多重組織化モデルはダイヤ作成型問題に対するアプローチと同様、専門家の思考過程を分析・階層化し、経験的知識による作成手順と各過程での思考単位に基づいたデータ構造を持つ。人間が考慮しなければならない組み合わせを減らすとともに、制約条件のチェックや計画割当ての候補提示、典型的な運用パターンの自動作成を実現することで、計画作成者を支援することを目的としている。これにより、専門家の思考過程と整合の取れた形で運用計画の作成を進めることができる。その結果、対話型の支援システムの構築が容易となるとともに、専門家の知識を作成段階毎に徐々に計算機上で模擬することで自動化レベルのステップアップを図ることが可能である。

第5章では、第4章で提案した多重組織化モデルの上で動作する、大枠作成段階での乗

務員運用計画の自動作成方式を提案する。

大枠作成段階は、制約条件をある程度緩めた上で制約充足解を短時間で求める段階である。計画作成の途中段階で運用計画全体を評価することができないため、試行錯誤による作成-評価-修正の繰り返しが要求される。さらに、多くの制約が労働協約に関連するものであり、融通が効くものも多いが、制約を緩めすぎると考慮すべき組み合わせ数が莫大となり、逆に強めすぎると制約充足解が存在しなくなる。

このような、試行錯誤的な計画作成の自動化を図るために、生物学的探索手法である Simulated Evolution 手法を適用する。考慮すべき制約、運用計画の評価指標がともに明確でないことから、考慮させる制約を作成者が入力すると制約を充足した運用計画を短時間で自動提案する方式を提案する。また、専門家の経験的知識を利用した制御知識を用意し、探索手順を調整可能にして効率的な探索を実現する。最後に、提案内容を実規模レベルの運転ダイヤに適用することにより、提案方式の有効性を確認する。

第6章では、まず本研究で得られた成果を要約し、ついで今後に残された課題について述べる。

## 関連研究

### A 学術論文

- (1) 片岡健司, 駒谷喜代俊: 対話型ダイヤ作成支援システム DIAPLAN, 電気学会論文誌 D 分冊, Vol. 112-D, No. 2, pp. 153-162 (1992).
- (2) 北川英裕美, 片岡健司, 駒谷喜代俊: 多様な路線形態を対象とした列車ダイヤ作成支援システム-DIAPLAN-II-, 電気学会論文誌 D 分冊, Vol. 116-D, No. 8, pp. 874-882 (1996).
- (3) 片岡健司, 駒谷喜代俊: Simulated Evolution 法を用いた乗務員運用計画作成手法, 電気学会論文誌 D 分冊, Vol. 117-D, No. 7, pp. 808-814 (1997).

### B 国際学会

- (1) Kataoka, K. and Komaya, K.: A Model for Railway Crew Allocation Support System, in *Proc. of IEEE Systems, Man and Cybernetics*, pp. 1436-1441 (1992).
- (2) Kataoka, K. and Komaya, K.: Computer-aided railway scheduling systems for high-density train operations, in *Proc. of COMPRAIL '94*, Vol. 2, pp. 44-50 (1994).
- (3) Ikkai, Y., Ikeuchi, T., Kataoka, K. and Komoda, N.: Crew Operation Scheduling Using State Selection Method, in *Proc. of IEEE Int. Symp. on Industrial Electronics 1998*, pp. 726-731 (1998).
- (4) Kataoka, K. and Komaya, K.: Crew operation scheduling based on simulated evolution technique, in *Proc. of COMPRAIL '98*, pp. 277-285 (1998).

### C 国内学会・全国大会等

- (1) 片岡健司, 駒谷喜代俊: バスダイヤ作成における乗務員割当支援, 平成2年電気学会全国大会, No.6, pp.145-146 (1990).
- (2) 片岡健司, 駒谷喜代俊: 思考整合型モデルを用いた列車ダイヤ作成支援システム, 情報処理学会第41回全国大会, Vol.2, pp. 79-80 (1990).
- (3) 片岡健司, 駒谷喜代俊: 列車ダイヤ作成支援システムの開発, 第27回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp. 290-294 (1990).
- (4) 片岡健司, 駒谷喜代俊: 列車ダイヤ作成支援システムにおけるダイヤの逆引き, 平成3年電気学会全国大会, Vol.6, pp. 177-178 (1991).
- (5) 片岡健司, 駒谷喜代俊: 乗務員運用計画作成支援システムにおける基本モデル, 思考

- 整合型モデルを用いた列車ダイヤ作成支援システム, 情報処理学会第45回全国大会, Vol.1, pp. 419-420 (1992).
- (6) 片岡健司, 駒谷喜代俊, 角野敏子, 平野文弥: 乗務員運用計画作成支援システムの開発, 第29回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp. 202-206 (1992).
- (7) 片岡健司, 駒谷喜代俊, 角野敏子, 徳丸真: 運転計画システムの開発, 電気学会交通・電機鉄道研究会, TER-93-10, pp. 29-38 (1993).
- (8) 角野敏子, 西崎圭一, 平野文弥, 片岡健司: 乗務員運用計画支援システムの開発, 第30回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp. 256-259 (1993).
- (9) 片岡健司, 駒谷喜代俊: 乗務員運用計画システムの自動提案アルゴリズム, 情報処理学会第49回全国大会, Vol.1, pp. 401-402 (1994).
- (10) 片岡健司, 駒谷喜代俊, 角野敏子, 平野文弥: 乗務員運用計画システムの自動提案機能, 第31回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp.219-222 (1994).
- (11) 北川英裕美, 片岡健司, 駒谷喜代俊, 棟田恭弘: 複々線および分岐路線を対象とした列車ダイヤ作成システム, 平成7年電気学会全国大会, Vol.4, pp. 376-377 (1995).
- (12) 北川英裕美, 片岡健司, 駒谷喜代俊: 単線を含む路線を対象とした列車ダイヤ作成システム, 平成7年電気学会産業応用部門全国大会, Vol.I, pp. 95-98 (1995).
- (13) 片岡健司, 駒谷喜代俊: Simulated Evolution 法を用いた乗務員運用計画作成手法, 平成8年電気学会産業応用部門全国大会, Vol.I, pp. 449-454 (1996).
- (14) 竹田真也, 一階良知, 片岡健司: 状態選択法と条件緩和探索法による乗務員運用計画方式, 平成10年電気関係学会関西支部連合大会, G14-36, p. G333 (1998).

## 目次

第1章 序論	1
1.1 列車運転計画問題の概要	1
1.2 従来研究	8
1.2.1 ダイヤ作成問題	8
1.2.2 乗務員運用計画作成問題	11
1.3 本研究の方針	13
1.4 本論文の構成	15
第2章 思考整合型モデルに基づく対話型ダイヤ作成支援システム	17
2.1 まえがき	17
2.2 ダイヤ作成問題	18
2.3 思考整合型モデル	21
2.4 思考整合型モデルの DIAPLAN への適用	23
2.4.1 部分シミュレーション	24
2.4.2 列車運行の予測とダイヤ設定の保留	25
2.4.3 基本指令	26
2.4.4 ダイヤの逆引き	29
2.5 DIAPLAN で用意される知識	30
2.5.1 戦術知識	30
2.5.2 戦略知識	32
2.6 DIAPLAN によるダイヤ作成手順と設定条件	35
2.6.1 DIAPLAN によるダイヤ作成の手順	35
2.6.2 設定可能な条件	37
2.7 DIAPLAN の動作例と評価	38
2.7.1 動作例	38

2.7.2	作成例	40
2.7.3	有効性の評価	41
2.8	むすび	43
<b>第3章</b>	<b>多様な路線形態を対象とした対話型ダイヤ作成支援システム</b>	<b>45</b>
3.1	まえがき	45
3.2	多様な路線形態におけるダイヤ作成	45
3.2.1	複々線・分岐を含む路線	45
3.2.2	単線を含む路線	47
3.3	DIAPLAN-IIにおける機能の拡張	49
3.3.1	運行予測ダイヤの設定保留方式	52
3.3.2	後方区間の状況による保留設定	53
3.3.3	前方区間の状況による保留設定	55
3.3.4	列車運行の再予測方式	57
3.4	DIAPLAN-IIの適用範囲	58
3.4.1	設定可能な条件	58
3.4.2	取り扱い可能な駅	60
3.5	ダイヤ作成例	62
3.6	むすび	63
<b>第4章</b>	<b>乗務員運用計画業務の分析と対話型作成支援モデル</b>	<b>65</b>
4.1	まえがき	65
4.2	乗務員運用計画作成問題	66
4.2.1	運用計画	66
4.2.2	運用計画の基本単位	67
4.2.3	制約条件	69
4.2.4	専門家の計画作成手順	70
4.3	計画作成支援モデル	71
4.3.1	専門家モデル	71
4.3.2	多重組織化モデル	72
4.3.3	リソース	74
4.3.4	結合ネットワーク	77
4.4	対話型計画作成支援システム	78

4.4.1	支援システムの構成	78
4.4.2	運用計画作成の手順と作業階層	78
4.4.3	対話型支援の対象となる操作	81
4.5	むすび	82
<b>第5章</b>	<b>Simulated Evolution法を用いた乗務員運用計画の自動作成方式</b>	<b>85</b>
5.1	まえがき	85
5.2	乗務員運用計画作成問題	86
5.2.1	運用計画の指標	86
5.2.2	問題点	88
5.2.3	専門家の運用計画作成手順	88
5.3	SE法による計画作成手法	90
5.3.1	SE法	90
5.3.2	乗務員運用計画問題への適用	90
5.3.3	制約条件の取り扱い	91
5.3.4	仕業の作成	93
5.3.5	仕業および運用計画の評価	96
5.3.6	仕業の淘汰	97
5.4	適用例	98
5.4.1	仮想路線による作成効率の確認	98
5.4.2	実路線への適用	100
5.4.3	対話的計画作成への適用	106
5.5	むすび	106
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>109</b>
	<b>謝辞</b>	<b>113</b>
	<b>参考文献</b>	<b>114</b>

# 第1章 序論

## 1.1 列車運転計画問題の概要

鉄道会社は、列車の駅ごとの着発時刻を示す列車ダイヤを前もって利用者に提示するとともに、列車ダイヤを守って列車を運行する使命を帯びている。そのためには、列車ダイヤだけではなく、車両や乗務員の運用計画を含む様々な種類の計画を立案する必要があるが、これらの計画を列車運転計画と呼ぶ[1]。

列車運転計画の作成は、多種多様な大量のデータを扱い、図1.1に示すような様々な種類の部分問題に分割して計画を作成する、高度に複雑な問題である[2, 3]。従来は複数の熟練した専門家が各部分問題を担当し、手作業で計画を作成してきた。ところが、大都市近郊路線における輸送需要の急速な拡大に伴い、運転計画の規模が拡大し、ダイヤ改正の一年前から準備に取りかからねば間に合わないところもあり、従来の専門家による手作業での作成では対応しきれなくなりつつある。また、少子化時代を迎え、今後の乗客数の伸びが見込みにくくなってきたことから、経営を安定させるためにはより一層の運営効率の向上が重要となってきている。これらの動向に対応するため、乗客の利便性向上やサービスの多様化、列車運行の効率化などを目的とした運転計画の高品質化、ならびに専門家の負担軽減をめざし、運転計画の支援システム構築が進められてきた[4]。

図1.1に示した流れに沿って、各部分問題の概要を説明する。

### (1) 運転曲線作成

車両種別ごとに運転曲線（路線条件や設備条件などから課される制限速度を越えない範囲で車両を自由に走行させた場合の、線路上の位置と速度または経過時間との関係を示す曲線）を求め、駅間最小走行時分（駅間を最も短時間で走行可能な時間）を決定する。

### (2) 運転時隔作成

作成した運転曲線および信号条件に基づき、2列車間の運転時隔（各駅における列車の最小進入／進出時隔）を、先行列車と後続列車の車両種別や、駅での停車／通過で

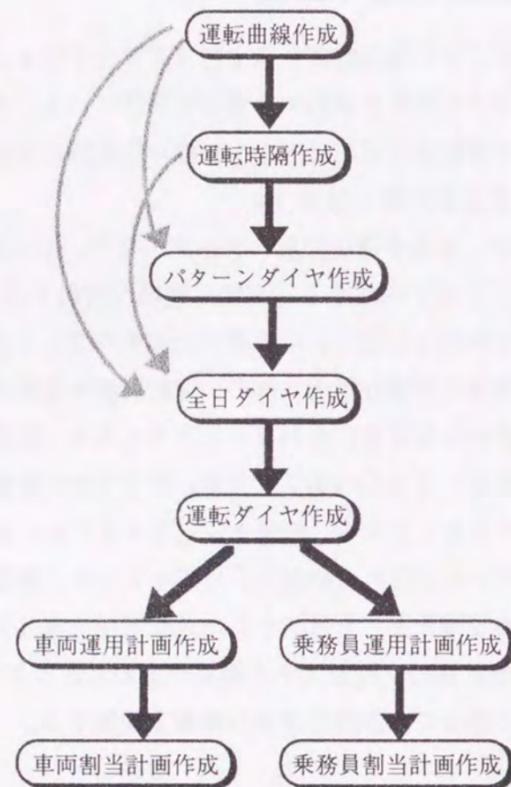


図 1.1: 列車運転計画問題の流れ

### 1.1. 列車運転計画問題の概要

それぞれ分類して計算する。

#### (3) パターンダイヤ作成

交通需要や鉄道会社の経営方針にもとづき、ある時間帯（朝ラッシュ、夕ラッシュ、昼間の閑散時間帯など）に走行させる列車の設定条件（列車種別、始発駅、始発時刻、終着駅など）を与えて、パターンダイヤ（利用客の覚えやすさを考慮して一定時間ごとにローテーションで同一種別の列車が駅に到着するようなダイヤ）を作成する。運転曲線や運転時隔の作成結果が参照される。

#### (4) 全日ダイヤ作成

早朝／深夜／ラッシュ時などの時間帯ごとの交通需要を考え、上り／下り別にパターンダイヤを重ね合わせて1日分の営業列車の走行を示す全日ダイヤを作成する。

#### (5) 運転ダイヤ作成

上り／下りの全日ダイヤをもとに、車両種別ごとの車両運用を考慮した回送ダイヤの設定や、端末駅での着発線数や折り返しに必要な時間を制約とした折り返しの設定を行い、営業外の列車運行も含んだ一日分の全列車の運行を示す運転ダイヤを作成する。

#### (6) 車両運用計画作成

運転ダイヤをもとに、検査条件などを考慮してすべての車両が少なくとも数日毎に車両検査を受けるために車庫に戻ることができるように、車両種別ごとに循環して走行する運用の順序である車両運用計画を決定する。適切な運用計画が作成できない場合、運転ダイヤを修正する場合もある。

#### (7) 車両割当計画作成

作成された車両運用計画に対し、検査条件や走行キロの均等化などの条件を考慮しながら、作成対象前日までの各車両の走行実績をもとに、数日先までの車両運用計画と実際の車両編成を対応づける車両割当計画を作成する。

#### (8) 乗務員運用計画作成

運転ダイヤをもとに、労働条件などを考慮しながら1日もしくは2日で所属する乗務所に戻ってくる乗務員運用計画を作成する。適切な運用計画が作成できない場合、運転ダイヤを修正する場合もある。運転士と車掌の運用計画を別々に作成する鉄道会社もあるが、その場合考慮する制約が異なるだけで、基本的な問題構造は変わらない。

#### (9) 乗務員割当計画作成

作成された乗務員運用計画に対し、勤務時間や走行キロの均等化などの条件を考慮しながら、作成対象前日までの勤務実績ならびに休暇や研修などの予定をもとに、二週

間程度先までの乗務員運用計画と実際に勤務する乗務員を対応づける乗務員割当計画を作成する。

これらの問題は、問題の性質ならびに作業効率の観点から、組織運営上別々の部門で計画を作成するために切り分けられたものであり、理想的には全ての部分問題を統一的に取り扱うことが望ましい。しかしながら実際は、作業量の問題や計画作成の部門が複数にまたがることなどから、複数の専門家が個別に解決を図ってきた。

ところで、列車運転計画作成問題の9つの部分問題は、問題の性質によって図1.2に示すような4種類に大別することができる。

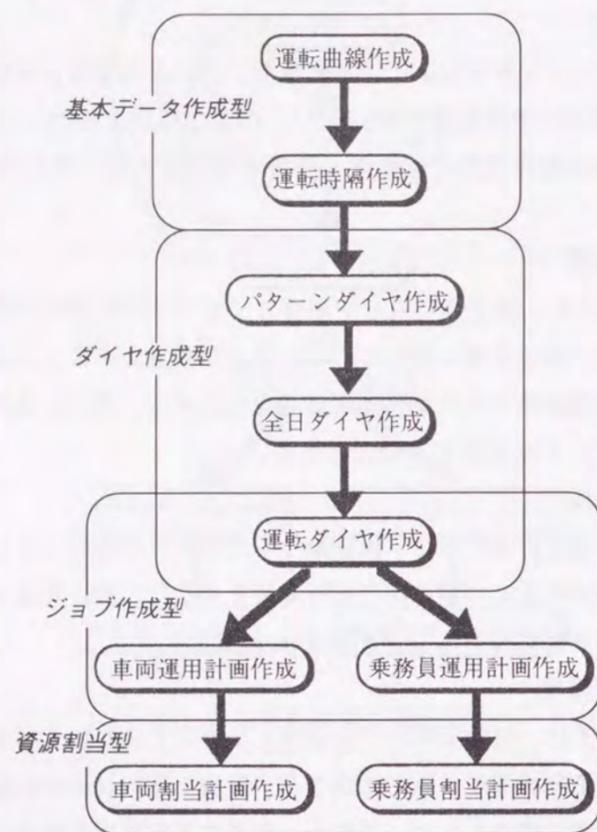


図 1.2: 列車運転計画問題の分類

#### (1) 基本データ作成型

#### 1.1. 列車運転計画問題の概要

与えられたデータから所定の計算式にもとづく演算を行ない、運転計画に必要なデータを作成するタイプの問題であり、運転曲線作成や運転時隔作成がこのタイプの問題に相当する。

厳密には計画そのものを作成するのではなく、計画作成に必要な前提条件を決定する問題として位置付けられる。目的とするデータの作成のために、様々な条件の下での車両の走行軌跡を求めることが必要であり、所定の計算式にもとづく演算によるシミュレーション技術が適用される。他のタイプと異なり、作成する複数のデータ間の相互影響はほとんどないため、自動作成は比較的容易であり、計算式と必要な前提条件が与えられれば目的のデータを作成することが可能である。しかしデータの自動作成後に作成者の判断にもとづく修正作業が必要なことが多いため、対話性に優れたユーザインタフェースが必要となる。

運転設備の変更に伴い更新されることが多く、作成の周期は数年に一度程度である。

#### (2) ダイヤ作成型

与えた前提条件の下で様々な制約条件を満たし、かつ複数の目標をできるだけ達成するようにダイヤを作成する問題であり、パターンダイヤ作成、全日ダイヤ作成、運転ダイヤ作成のうちの回送ダイヤ設定がこのタイプの問題に相当する。

制約条件を満たす限り列車の着発時刻は自由に設定可能なため、可能解はほとんど無限に存在するが、目標達成可能な解を機械的に作成することは困難であり、多くは専門家の判断を必要とする。計画を作成するために時間の進行に伴い離散的に現れる列車の着発イベントを次々処理する必要があるため、離散型のシミュレーション技術が適用される。ダイヤ作成型の問題では、計画作成途中での計画全体の品質評価はある程度可能である。

既存の計画に対する小規模な修正はほぼ毎年、大規模な修正あるいは新規作成は数年に一度行われる。

#### (3) ジョブ作成型

様々な制約条件を満たし、かつ複数の目標をできるだけ達成するようにダイヤから複数のジョブ（仮想的な資源運用スケジュール）を作成する問題である。ここで、資源とは実際の車両編成や乗務員を指す。運転ダイヤ作成のうちの折り返し設定、車両運用計画作成、乗務員運用計画作成がこのタイプの問題に相当する。

乗務員運用計画作成の場合、運転ダイヤが入力となり、ジョブに相当する仕業（一日分の勤務単位）に対して運転ダイヤを分割して割り当てることで、ジョブを必要数作成する。運転ダイヤの取り扱いは離散型ではあるが、ジョブ作成時に時間の進行の概

念は取り扱わず、休憩などのために運転列車を交代することにより生じる待ち時間の長さが主として問題となる。ダイヤ作成型ほど解の自由度は高くない一方、列車の乗り継ぎ場所やジョブへの割り当て方によって考慮すべき属性値が離散的に変化し、また多くの属性値が相互影響しているため、複数目標を達成する解を作成することが困難である。ジョブ作成型の問題では、計画作成途中での計画全体の品質評価は非常に困難である。

計画の更新頻度はダイヤ作成型とほぼ同じである。

#### (4) 資源割当型

あらかじめ設定された複数のジョブに対し、制約条件を満たし、かつ複数の目標をできるだけ達成するように実際の資源を割り当てる問題であり、車両割当計画作成、乗務員割当計画作成がこのタイプの問題に相当する。データの取り扱いに関してはジョブ作成型と同様に時間的順序関係が問題となる。但し、資源割当型ではジョブに対してもれなく資源を割り当てるのが第一目標であり、運転時間や走行キロの均等化などといった他の目標に比べて重要度が高い。そのため、すべての資源が割り当てられれば、他の目標があまり達成されていない解でも採用される場合がしばしばある。

車両故障や乗務員の休暇など、資源量の一時的な変動によって計画の再作成が必要となる。実際の運行の数週間前～当日に作業が行われるため、他のタイプの問題と比べて計画作成時間に対する制約が大きい。

これらの各部分問題のうち、基本データ作成型問題は問題の定式化が進んでおり、また作成データを直接修正する必要はないため、計算式が定義できれば自動作成は比較的容易である。また資源割当型は、多くの研究が進められている生産スケジューリング問題と問題構造が類似しているため、これら二者のシステム化は比較的進展している。一方、ダイヤ作成型及びジョブ作成型問題は、運転ダイヤの品質および運営効率に大きく影響することから、運営者としての大局的な判断が必要とされる。ところが、作成する計画の「品質」の評価指標が明確でなく、定式化が困難であるため、専門家が経験的知識をもとに設定データを修正するなどして、試行錯誤的に計画を作成し、評価することを繰り返している。このような問題は専門家に多大な負担を強いる場合が多いため、専門家の判断を取り込むことができるような、計算機と専門家との共同作業による計画作成の可能な対話型の支援システムが求められている。しかしながら、どちらも非常に大規模な組み合わせ問題であり、計算機で取り扱うにはハードウェアの進歩が必要であったことなどから、数理計画法をはじめとする数学的な解法による自動作成手法は実用化に至っていない。また、

#### 1.1. 列車運転計画問題の概要

前提となるデータや制約条件が少し変わると問題構造が大幅に変わり、それまでに作成された運転計画の流用が困難な場合が多いこと、その結果専門家の経験的知識や勘に基づく試行錯誤的な作成が必要なことなどから、知識の体系化による知識工学的アプローチも、部分的な支援段階への適用にとどまっている。そのため、現状の運転計画システムは紙と鉛筆による作業をディスプレイとポインティングデバイスに置き換え、画面上で計画作成を行なうことで作図作業およびチェック作業を代行したCAD的システムが大部分を占める。そのようなシステムでもある程度の負荷軽減は可能だが、知的判断の支援とは言えず、運転計画の品質向上に直接寄与するまでには至っていない。

このような背景をもとに、本研究では運転計画問題のうちのダイヤ作成型問題およびジョブ作成型問題を取り上げ、局所判断の自動化を実現し、専門家の意志を取り込みつつ高速に計画を自動作成することで、試行錯誤による対話的作成を支援する方式を提案する。

まずダイヤ作成型問題では、人間にとってわかりやすい手順でダイヤを自動作成する手法を提案する。また、提案手法に基づき、ダイヤの部分的な修正と再作成による試行錯誤を対話的に繰り返して各種の要求に対して調整を図りながら、ダイヤ作成を効率的に支援するシステムを開発し、実規模のダイヤを作成して提案方式の有効性を評価する。さらに、分岐・合流を含む路線や単線、複々線といった複雑な路線形態へ対応するための拡張方式を提案する。

次に、ジョブ作成型問題においては乗務員運用計画作成問題を取り上げる。まず、考慮すべき制約条件や専門家の計画作成手順を分析し、階層的データ構造の導入によって、考慮すべき組み合わせ数を減少させつつ専門家の思考過程と整合の取れた手順で計画作成を可能とし、経験的知識を利用した対話型の計画作成支援を実現する枠組みを考案する。続いて、多少の制約逸脱を許容する大枠作成段階において、設定した制約条件に対する制約充足解を短時間で探索する方式を考案する。また考案方式に基づき、乗務員運用計画作成支援システムを開発するとともに、実規模の運転ダイヤに適用することにより考案方式の有効性を評価する。

## 1.2 従来研究

本節では、ダイヤ作成問題と乗務員運用計画作成問題に関して、作成作業の効率化や計画の品質向上を目指した既存システムについて説明する。

### 1.2.1 ダイヤ作成問題

鉄道分野においては、東海道新幹線開業(1964年)を契機に列車運転計画作成をはじめとするシステム化が始まったと言える。当時のダイヤは比較的単純ではあったが、運転計画のシステム化はその頃から検討されてきた[5]。しかしながら、当時の計算機性能から実用的なダイヤ作成までには到らず、設備投資効果やシステムの特性把握を主目的としたものであった。その後、東海道・山陽新幹線の運行管理システム COMTRAC(1972年)の導入により、ダイヤを計算機上で取り扱う必要が生まれ、ダイヤのデータ化の重要性が増していた。1980年代半ばになり、計算機性能の向上や人工知能をはじめとするソフトウェア技術の発展に合わせダイヤ作成のシステム化が再度注目されることとなった[6]。まず、チェック機能および作図機能のみを計算機に担当させるマンマシン方式が検討され始めた[7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]。続いて、局所判断も計算機が主体となって行う自動作成方式に対する研究が盛んとなった[16, 17, 18, 19]。これらの技術に基づく実用化システムが1990年以降開発されている。これらのシステムで用いられている、計算機データ化ならびにチェック作業代行などの支援機能を実現する計算モデル、および自動作成方式に関する技術について以下で概観する。

#### 計算モデル

稲田らは、システム化の前提となる計算機上でのダイヤの数値表現モデルならびに列車設定モデルを提案した[5]。しかしながら、ダイヤ設定の数多くの候補からダイヤを決定するには社会的・経済的な要求と、鉄道会社の営業政策との調整が必要なことから、人間による意志決定を必要とする。そのため、計算機と人間との対話の必要性が大きな問題として明らかになった。その後、グラフィックディスプレイの出現により、作成者が計算機と対話しながらダイヤを作成するマンマシン方式が提案されるようになった。初期のシステムは計算機性能が不足していたことから実用化には至らなかったが、ハードウェアならびにソフトウェア技術の向上に伴い実用的な対話システムを製作できるようになった。鶴田らは「協調推論型知識情報処理」という概念で、運転計画全体をマルチエージェント

指向により協調しながら作成する手法を提案している[17, 18]。この概念では、作成者もエージェントの一人と見なし、計算機内で部分問題を解決するために定義された複数のエージェントと協議することで、多数の専門家の総合判断を要するスケジューリングを一人の人間で可能とする。しかしながら、抽象的な概念の提示にとどまっており、実規模のダイヤへ展開した場合の具体的な作成手順については触れられていない。富井らは、ダイヤ作成型問題の様々な派生問題を統一モデルで扱うためのフレームワークをカラードベトリネットによって構築した[20]。この手法はプログラム再利用率の向上に主眼をおいており、一定の成果を示しているが、対話性に関しては検討されていない。

一方、高度な局所判断機能は備えていないが、基本データ作成型問題も統合して扱うことで、従来より厳密かつ柔軟な運転計画の検討を可能とするアプローチもある。奥村らは、オブジェクト指向により実際の鉄道を構成する様々な設備をクラス化し、物理的な制約をクラスと対応づけて設定することで、ダイヤ作成問題と運転曲線作成問題、運転時隔作成問題の統合化を目指している[21, 22]。従来では部分問題がそれぞれ作成するデータの参照はファイル渡しであったが、提案手法では、抽象化を含む参照関係を継承により実現し、様々な抽象度でのダイヤ作成を可能にしている。一方、応答性は犠牲にされているため、対話型システムとして利用するためには応答性の向上が要求される。

#### 自動作成方式

ダイヤ作成問題における解の自動作成方式に対しては、主に以下の手法が提案されている。

- 数学的解法

DIAPS[10]では単一列車のダイヤ決定アルゴリズム、ならびに競合する二列車の競合回避アルゴリズムの基本概念を示した。しかし、ある競合を回避させるためにダイヤを変更すれば、新たに他の列車との競合が発生する可能性があるが、複数の列車に対する影響は考慮されていない。ある局所問題を解決するために行う修正内容が、どの程度の範囲に渡るかを知ることができない。

海外においては、数理計画的なアプローチで制約充足解を探索する試みがある[23]が、初期解探索に数時間を要している。

- 制約論理(拘束の伝播)

福森らはダイヤ作成問題を「列車順序の組み合わせ」の探索問題ととらえて、拘束の伝播による制約充足解を「ベルト」と呼ぶ時間幅を持たせた列車運行グラフ（スジ）で表現し、ダイヤの素案を自動作成する手法を提案している [16]。列車の相互影響を考慮しつつすべての列車の着発時刻を一度に決定しようとする、膨大な探索空間が発生する。しかし、列車ダイヤ作成問題を、各駅における列車の着発順序決定問題と、着発順序を乱さない範囲での着発時刻決定問題とに分割してとらえると、前者の探索空間は大幅に減少する。着発順序を制約充足問題とし、制約の伝播で順序を決定する。その時点では、列車の各駅の着発時刻は一意に決定できないため、これをスジのベルト幅で表現し、時刻の決定は作成者に任せる。最終的なダイヤはマンマシン方式によって作成者がベルト幅をゼロにすることで決定する。マンマシン方式の内容については提示されておらず、対話型システムとしての利便性はマンマシン方式の実装に依存すると考えられる。

#### ● 知識ベースシステム

ダイヤ作成問題では、局所問題の解決方法として比較的明確なノウハウが存在し、これにより従来から手作業による計画作成が実施されてきた。この点に着目し、ノウハウを取り込みやすい知識ベースを用いたシステムが多く提案されている [19, 24, 25]。すなわち、物理的制約などの深い知識と局所問題解決ノウハウである浅い知識をもとに、ダイヤを自動作成しようという概念に基づいたシステムを構築している。例えば、辻村らは東海道新幹線のパターンダイヤを対象に、専門家の知識をルールベース化し、ルール駆動型で自動作成させている [19]。これらの支援システムでは、計算機単独でのダイヤの自動作成が可能になったため、設定条件を調整しながら試行錯誤的にダイヤの品質を向上させることが容易になっており、現在のダイヤ作成支援システムの主流となっている。十分な知識を獲得できなければ実用的なシステムにならないことから、知識獲得方式が実用システムを構築する際の課題となる。また、ダイヤ作成者が自動作成結果を評価し、修正すべき内容を検討した上で設定条件にフィードバックさせる手順でダイヤの品質を向上させることになるため、設定条件修正に伴う反映結果が短時間で得られることが望ましい。

### 1.2.2 乗務員運用計画作成問題

ダイヤ作成問題のシステム化が進んだことにより、運転ダイヤを入力データとする乗務員運用計画作成問題のシステム化も検討され始めた [8, 9]。乗務員運用計画では、勤務時間を始めとするさまざまな属性値の計算と、労働条件などの制約充足性の確認が非常に煩雑である上に、何種類もの帳票類が必要となる。作図機能、チェック機能のみを実装した対話型システムでも、手作業よりも大幅な作業効率の向上を達成している [26, 27]。しかしながら、大規模かつ複雑なダイヤになるほど、本質的な計画作成の困難さが表面化し、一定レベル以上の効率化は難しくなるため、試行錯誤の代行機能や自動作成機能の実現が切望されている。

#### 計算モデル

乗務員運用計画作成問題は、スケジューリング問題と組み合わせ問題が混在しているダイヤ作成問題と異なり、対象物（列車ダイヤ）に対して乗務スケジュールを一对一に割り当てる組み合わせ問題であることが明確なため、計算モデルを主体とした議論は多くない。

横山らは、比較的単純な東海道新幹線を対象とし、計算機による運用作成方式を整理した [28] が、実現には至らなかった。柳らは、OMT(Object Modeling Technique) 法により乗務員運用計画作成問題を分析した上で、オブジェクト指向技術によりプロトタイプングアプローチ方式でシステムを構築した [29]。このシステムでは割当失敗時の組み合わせを学習するブラックリスト方式とバックトラックによって、ある程度の試行錯誤代行機能を実現している。奥村らは、オブジェクト指向によるダイヤ作成システムの開発結果をジョブ作成型問題にも生かし、ソフトウェアの共用化等の効率化を実現した路線バス乗務員作業作成システムを開発し、その延長で列車乗務員運用システムへの展開を検討している [22]。

#### 自動作成方式

これまで、数学的解法、遺伝的アルゴリズムに基づいた自動作成方式が提案されており、知識ベースを利用した支援システムのアプローチもある。乗務員割当計画問題では制約論理の適用例もある [30] が、乗務員運用計画に対してはまだ報告されていない。

#### ● 数学的解法

線形計画法を利用した乗務員運用計画の自動作成システム [31, 32, 33, 34, 35] が試作されており、追越しのない地下鉄型ダイヤに対する自動作成を実現している。線形計画法では計算処理時間の長さが問題となるが、文献 [35] のシステムでは比較的小規模なダイヤに対し、解空間を分割することで許容範囲 (15 時間程度) に押さえている。数学的解法では、設定した評価指標に対する最適解が作成可能である点が最大の特徴であるが、従来専門家の大局的な判断に任せてきた評価や制約条件の定式化が問題となる。また、従来の手作業による計画と大幅に異なる計画が作成される可能性が高く、計画が乗務員にとって心理的に受け入れがたい場合もあり得る。

#### ● 知識ベースシステム

大規模なダイヤに対する乗務員運用計画業務の支援を行なうために、知識ベースシステムが提案されている [36, 37, 38, 39]。このシステムは、探索の枝刈りを目的として部分的な制約を充足する可能性の高い候補を提示し、作成者が選択しながら作成することを特徴とする。作業中の見落としが軽減されるため、ある程度の作業量低減は可能であるが、提示された候補を単純に選択するだけでは制約充足解には到達しないため、作成の本質的な困難さは変わらない。柳らのシステム [29] では割当失敗時の組み合わせを学習するブラックリスト方式とバックトラックによって、ある程度の自動作成機能を実現しているが、自動割付率は 80% 程度にとどまっている。石田らは、知識ベース方式での課題となる知識構築方式について、目的戦略知識 (全体の目的を、より具体的な複数の下位目的に分割し、それぞれの目的を達成するための各戦略と対応づけて階層的に記述したもの) によって問題を階層化/具体化することにより、知識構築支援ツールを容易に構成できることを示した [40]。しかしながら、構成したツールで作成した知識によってどの程度の自動作成が可能になったかは述べられていない。

#### ● 遺伝的アルゴリズム

鉄道向けには適用例はまだ見られないが、類似問題ではバス仕業ダイヤ作成問題に遺伝的アルゴリズムを適用した例がある [41]。組み合わせ問題における他分野での適用の広がりを見ると、今後鉄道分野へも遺伝的アルゴリズムの適用が広がると予想される。但し、問題の性質をうまく利用して遺伝子を表現しないと探索能力が大きく劣る場合があること、遺伝的アルゴリズムによる探索はある程度の時間を要すること等の特徴を持つ。そのため、作成者の指示に対する高速な返答が要求され

る対話型システムへの適用には慎重を要する。

### 1.3 本研究の方針

前節で示したように、従来研究はチェック作業を代行することを目的とした計算モデルの構築と、計算機単独で可能解を探索することを目的とした自動作成方式の研究が多く見られる。支援システムの理想は、最小限の入力に基づいて最適な計画を自動作成するシステムであるが、運転計画作成問題は複雑な組み合わせ問題であるため、実際にそこまでのレベルに到達した実用システムはまだ存在しない。そこで、計画の品質向上を目的として試行錯誤過程の代行を可能とする方式を開発し、実問題に対して実用的なシステムを構築することが重要と考える。

本研究においてはダイヤ作成問題および乗務員運用計画作成問題を対象とし、図 1.3 に示すように、局所判断を自動化し、作成者の意図をフィードバックさせつつ高速に計画を作成することで、試行錯誤による対話的作成を支援する方式を提案する。

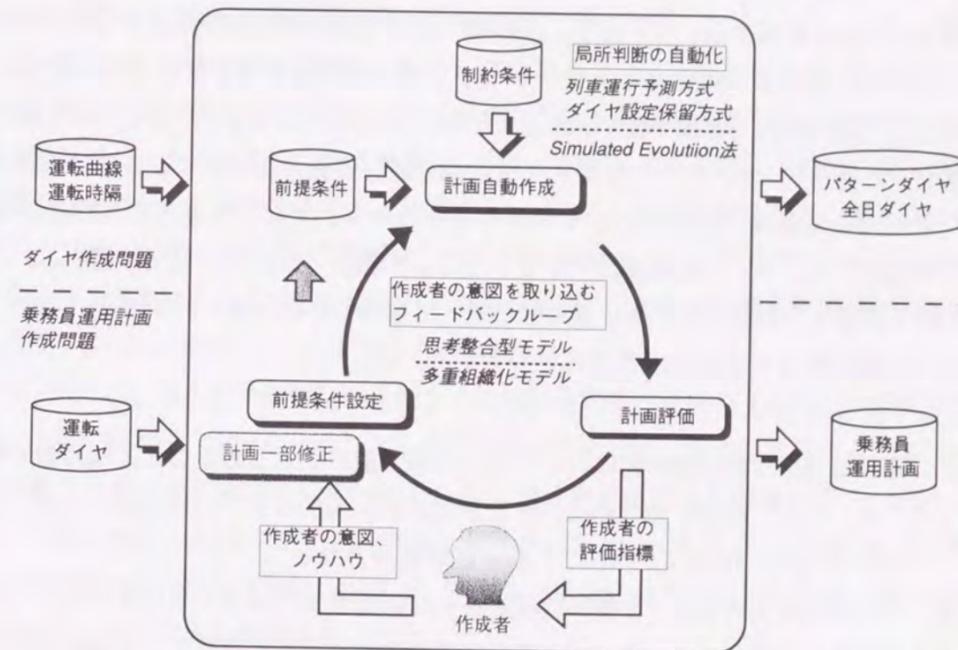


図 1.3: 対話型支援システム の概念

まず、ダイヤ作成問題を対象とした自動作成方式を検討する。既存システムでも設定条件にもとづいて制約充足解を自動作成することは可能であるが、作成されたダイヤの評価指標が定式化されていない。このため、作成者によるダイヤの評価を設定条件に反映させ、設定条件の修正による影響を把握するフィードバックループが必須となる。その際、作成者の意図として修正した結果を迅速にダイヤに反映することができなければ、作成者の思考が中断され、実用性の高い支援システムとならない。作成者による調整作業と計算機による自動作成とを統合化するためには、以下の3つの機能が必要と考えられる。

- (1) 計算機によるダイヤ作成過程を人間が理解しやすいものにする
- (2) 計算機主導の問題解決と人間主導の問題解決を容易に切り替えられる
- (3) 人間主導で問題解決を図る場合、計算機は高速な応答により人間の思考を妨げない

そこで、離散事象の問題解決モデルとして提案されている思考整合型モデルを拡張し、人間がダイヤを作成するときと同じようにシミュレーションとスケジューリングとを交互に行いつつ、列車走行順序の決定を局所的な問題として自動判断させることで、上記機能を実現する手法を提案する。本手法では、基本的には計算機が制約を満足するダイヤを自動的に作成し、専門家は作成過程を監視しながら種々の要求を満足するために調整の必要性を感じた場合のみ主導権を握り、設定条件やダイヤを手動で修正することが可能となる。本方式の適用により、設定条件やダイヤの部分的な修正と再作成による試行錯誤を対話的に繰り返して各種の要求に対して調整を図りながら、ダイヤを効率的に作成するシステムを実現する。また、実規模のダイヤを作成して提案方式の有効性を評価する。さらに、分岐・合流を含む路線や単線、複々線といった複雑な路線形態へ対応するための、列車走行の予測とダイヤ設定の保留方式を提案する。

次に、乗務員運用計画作成問題においては、探索空間が広大であること、制約条件が曖昧であること、さらに計画を効率的に作成するための汎用的なノウハウが存在せず、専門家ですら試行錯誤的に作成していることなどが問題点となっている。

まず、広大な探索空間や様々な種類の制約条件に起因する作成者の負担をできるだけ減少させる仕組みが必要となる。そこで、専門家の計画作成手順や考慮すべき制約条件を分析し、専門家モデルを定義するとともに、作成作業の進展度に応じて着目する組み合わせ単位の詳細度を変化させる枠組みである多重組織化モデルを考案する。この枠組みによ

り、考慮すべき組み合わせ数を減少させつつ、専門家の思考過程と整合の取れた手順で計画作成を進め、経験的知識も活用することができる対話的な計画作成支援システムを構築可能とする。

続いて、多少の制約逸脱を許容する大枠作成段階において、どの制約を緩めれば制約充足解に到達するかを事前に知ることはできない。しかし、設定した制約条件に対する制約充足解が短時間で探索できれば、作成者による制約充足解の評価を制約条件にフィードバックさせることで、大枠作成段階での計画作成を効率よく行えるものとする。そこで、環境に対する適合度を持った個体が複数個存在する問題に対し個体同士が生存競争を行うことにより全体の最適化を目指す手法である Simulated Evolution 手法 [42, 43] を用い、作成者が設定する制約条件を満足する解を短時間に探索する方式を考案する。また、考案方式に基づき乗務員運用計画作成支援システムを開発するとともに、実規模レベルの運転ダイヤに適用することにより提案方式の有効性を評価する。

## 1.4 本論文の構成

本論文では、第2章以降を以下のように構成する。

第2章では、ダイヤ作成問題について、問題構造ならびに既存システムの問題点について考察を加える。また、ダイヤに対する多様な要求を満足させるために、基本的なダイヤを自動作成し、ダイヤ作成に伴う複雑な作業を軽減するとともに、専門家の試行錯誤的な調整作業を対話的に支援する手法を検討する。そして、追越し設定を含む局所的問題であるダイヤ設定とデータ整合性確認のためのシミュレーションを専門家と同じような手順で進行させ、自動作成途中でも作成者が大局的な評価に応じて試行錯誤的な修正を可能とした支援システム DIAPLAN を実現する。

第3章では、第2章で提案した手法をより複雑な路線に対応させるための拡張方式を示す。単線や複々線、合流や分岐を含む路線に対応するため、後方からの列車に追い越される可能性、ならびに前方からの列車との行き違いを設定する可能性を調べ、その結果によって局所判断に基づくダイヤの設定を保留することができるように DIAPLAN を拡張し、DIAPLAN の特徴を保持したまま、多様な形態の路線でダイヤの自動作成を可能とする実用的なシステムを構築する。

第4章では、乗務員運用計画で考慮すべき制約条件ならびに作成手順を分析する。乗務員運用計画問題は、一人分のスケジュールである仕業に対する制約は比較的緩いが、運転ダイヤ上のすべての列車運行を仕業に洩れがないように割り当てることが困難である複雑

な組み合わせ問題であり、広大な探索空間を持つ。そこで、分析結果に基づき専門家モデルを定義するとともに、専門家の思考過程に基づいた階層的なデータ構造である多重組織化モデルを提案する。本モデルの導入により、考慮すべき組み合わせ数を減少させつつ、専門家の思考過程と整合の取れた手順で計画作成を進め、経験的知識も活用することができる対話的な計画作成支援システムを構築可能とする。

第5章では、第4章で提案した多重組織化モデルの上で動作する、乗務員運用計画の自動作成方式を検討する。各仕業作成のための探索過程で、すべての運転ダイヤに仕業を割り当てられるか判定することは困難であるため、試行錯誤的な探索が要求される。一方、制約も明確に規定されておらず、過去の慣例から目安程度に設定されているような曖昧なものも多く、運用計画の評価指標も定式化されていないことから、問題を完全に定式化することも不可能である。そこで、作成者が想定している制約を設定条件として与え、制約充足解の存在を Simulated Evolution 手法を適用して高速に探索することで、運用計画を短時間で自動作成する方式を提案する。また、実規模レベルの運転ダイヤに適用し、提案方式の有効性を確認する。

第6章では、まず本研究で得られた成果を要約し、ついで今後に残された課題について述べる。

## 第2章 思考整合型モデルに基づく対話型 ダイヤ作成支援システム

### 2.1 まえがき

列車ダイヤの作成は利用者側と運用者側から出される多様な要求と列車や保安設備などの制約が複雑に絡み合った問題で、専門家がそれらすべてを考慮した上で試行錯誤的に調整を図りながら作成している。具体的には、ダイヤの作成途中で、一部の列車の停車・走行時間や待避駅を変更するなどの修正を行って、それ以降のダイヤを部分的に再作成することを試行錯誤的に繰り返すことにより、要求間の調整を図っているのが現状である。このため、多様な要求をよりよく満足すること自体が非常に困難であるうえに、ダイヤの修正と再作成に長時間を要することから、試行錯誤的な調整作業がダイヤ作成上の問題点となっている。これに対して、現在すでに様々なダイヤ作成支援システム [10, 16, 17, 24] が提案されているが、作成途中で簡単に修正と再作成が行えるようにはなっておらず、自動作成と修正を統合化した支援システムはまだない。

そこで本章では、基本的なダイヤを自動作成し、ダイヤ作成に伴う複雑な作業を軽減すると共に、専門家の試行錯誤的な調整作業を対話的に支援するシステム DIAPLAN (Train Diagram Planning Support System) [44, 45, 46, 47, 48] を開発する。DIAPLAN は、離散事象のシミュレーションとスケジュール設定とが組み合わされた問題解決過程を表現するモデルである思考整合型モデル [49, 50, 51, 52] を拡張して構築する。思考整合型モデルは既に存在するスケジュールに基づく事象の処理を対象として構築されているため、列車の運行予測に基づいてスケジュールそのものを作成するダイヤ設定機能を追加する。さらに、試行錯誤的なダイヤの一部修正を容易にする後戻り指令や、スケジュール設定の時間進行を逆転させることでダイヤを終着駅側から逆向きに作成するダイヤ逆引き機能を実現する。

本章ではまずダイヤ作成問題における問題構造と既存システムの問題点について考察を加え、対話型支援システムの必要性を明らかにする。また思考整合型モデルを DIAPLAN

へ適用するための拡張内容について述べ、具体的な動作例を通してダイヤの作成過程を説明するとともに、実規模ダイヤの作成例を示し、DIAPLANの有効性を明らかにする。

## 2.2 ダイヤ作成問題

ダイヤ作成問題とは、以下に示すような制約条件 [53] をもとに、各駅での列車の着発可能な時刻 (実行可能時刻) を決定する問題である。

### (1) 列車の走行条件

- (a) 各停車駅における最小停車時間
- (b) 各駅間における最小走行時間

### (2) 各駅での運行条件

- (a) 各駅での運行条件
- (b) 各駅における列車の最小進入/進出時隔
- (c) 各駅間における最大走行列車数

### (3) 追越し条件

- (a) 同等列車及び優等列車の追越し禁止
- (b) 待避設備のない駅での追越し禁止
- (c) 各駅で同時に停車、通過できる最大列車数

(3)-(a) 以外の条件は車両性能や保安設備等によって決められる物理的な制約条件であり、すべての条件はダイヤの作成時にあらかじめ決定されている。列車ダイヤはこれらの制約をすべて満たす必要があるが、可能解は無数に存在するため、専門家はさらに次のような要求も考慮に入れることでダイヤを決定する。

### (1) 利用者側からみた要求

- (a) 旅行時間/待ち時間の短縮
- (b) 混雑度の緩和
- (c) 優等列車の停車駅の設定

### (2) 運用者側からみた要求

- (a) 需要と輸送能力とのバランス
- (b) 設備費の低減
- (c) 人件費の低減

手作業でダイヤを作成する場合、列車ダイヤ図 (横軸を時刻、縦軸を駅間の距離とし、各列車の駅間の走行曲線を直線 (スジ) で近似してグラフ化した図) 上で鉛筆と消しゴムを用いて制約や要求を考慮しながら列車のスジを1つ1つ作図し、運行状況を確認しながらダイヤを作成している。しかし、上記の要求は定量化できない、またはあいまいなものが多く、相反することもある。したがって、作成されたダイヤがこれらの要求を満たしているかどうかは全体をみて大局的に評価しなければならない難しい問題である [54]。

さて、ダイヤ作成問題は次に挙げるように対象領域の範囲によって大きく3種類に分類される問題から構成されていると考えることができる。

#### ● レベル1

1つの駅/駅間/列車だけを対象とする問題

(例: ある列車の1駅間の運行のシミュレーション)

#### ● レベル2

先行/後続列車、前後の駅の状態など、着目している駅もしくは列車の近傍の状態を考慮に入れる問題

(例: 待避駅の設定、停車/走行時間の設定)

#### ● レベル3

ダイヤ全体を考慮しなければならない問題

(例: ダイヤの評価と要求充足のための調整)

前述の制約は主としてレベル1もしくはレベル2の問題で、また要求はレベル3の問題で考慮される。そして、専門家は状況に応じて3つのレベルの問題を交互に反復して解きながらダイヤを作成していると見なすことができる。

一方、専門家の労力を軽減するために様々なダイヤ作成支援システムが提案されている。しかし、実用化の報告があるのはダイヤの作図を計算機の画面上で行えるようにしたいわゆるCAD的なシステム [10, 24] であり、制約条件に関する数値計算と作図機能の支援にとどまっているため、レベル1の問題解決のみを計算機で行なっているに過ぎない。

また、ダイヤ作成の自動化をめざしたシステム [16, 17] も提案されている。しかし、文献 [16] では、自動作成はできるが、作成途中で修正することができない。また、文献 [17] では列車ダイヤ作成に加えて車両運用や乗務員運用など、多数の専門家の協議による調整

を計算機上で模擬し、人間と計算機が協調しながらスケジューリングを行なうシステムを提案しているが、列車ダイヤ作成問題の中での試行錯誤的な調整作業の支援については言及されていない。これらのシステムでは、3つのレベルの問題を区別せずすべて計算機上で解決しようとしており、ダイヤの自動作成途中で人間が介入することができない。しかし、レベル3の問題では経営的、社会的要素を含む多様な要求を考慮しなければならず、これらをすべて計算機が判断することは事実上不可能なため、自動作成されたダイヤはほとんどの場合専門家の手による修正が必要となる。つまり、計算機により求められた問題の解は専門家により修正され、それに対して再度解くことになる。ところが、専門家もどのように修正すれば懸案となっている要求を満足できるか必ずしもわかっているわけではないため、修正は試行錯誤的にしか行なえず、ダイヤ作成が非常に困難な作業となっている。したがって、ダイヤ作成を効率よく支援するためには、計算機がダイヤを自動作成している途中でも、こうした試行錯誤的な修正が、専門家が必要と思った時点で反復して行なえ、しかも修正による影響とその波及範囲をすぐに知ることができなければならない。しかし、こうした機能を持つシステムはまだない。

このような点から、表2.1および表2.2に示すように、レベル1、レベル2は計算機が担当し、レベル3の問題解決は基本的に専門家が行うシステムを提案する。このシステムでは、専門家はレベル3の問題解決に専念し、必要があれば計算機により求められたレベル2の解の一部を修正し、計算機はその修正が影響する範囲のダイヤを再作成するためにレベル1・2の問題を再び解くものとする。これにより、計算機がダイヤを自動作成する過程で、専門家が必要に応じて介入し各要求間の調整を図ることで専門家の意見を取り入れながら、効率的にダイヤ作成を進めることのできるシステムとする。

表 2.1: 問題レベル

	[レベル1]	[レベル2]	[レベル3]
対象範囲	単一の駅、列車	複数の駅、列車	路線全体
問題例	シミュレーション	追越し設定	ダイヤの評価

次に、こうした支援システムを実現するためには次の3つの点が重要な課題となる。

- (1) まず、計算機によるダイヤ作成過程は人間が理解しやすいものでなければならない。これは、計算機がダイヤを自動作成している途中でも、人間が作成されたダイヤを見

表 2.2: 支援システムの担当範囲

	[レベル1]	[レベル2]	[レベル3]
CAD 的システム	計算機	専門家	専門家
自動化システム	計算機	計算機	計算機
提案システム	計算機	計算機	専門家(計算機の支援)

てすぐに修正する必要があるかどうかを判断するためには、計算機による作成過程を人間が理解し、把握できなければならないからである。

- (2) 次に、計算機主導の問題解決と人間主導の問題解決を容易に切り替えられなければならない。これは、必要と思った時点で、人間主導で修正や部分的作成ができなければならないからである。
- (3) 最後に、計算機は高速な応答性により人間の思考を妨げないことが必要である。修正による影響とその波及範囲をすぐに知ることができれば、修正の良否もすぐに判定できるため、専門家の思考を中断させることなく試行錯誤的に修正を繰り返すことが容易となる。

## 2.3 思考整合型モデル

2.2節では、ダイヤ作成問題の階層性と、ダイヤ作成過程における専門家の試行錯誤的な調整作業を対話的に支援するシステムの実現に必要な3つの課題を示した。この中で、特に、人間が計算機による処理過程を容易に理解できるようにするには、専門家の問題解決過程を模擬するモデルに基づいたアプローチが必要となる。このようなアプローチとして、一般にはレベル1には離散事象モデル、レベル2にはルールベースシステムを適用することが考えられる。しかし、これらを単純に組み合わせるだけでは十分でなく、一般に人間の思考過程と異なった順序で計算機がダイヤを作成するため、その過程を人間が理解することが困難となる。

これに対し、離散事象のシミュレーションとスケジュール設定とが組み合わされた問題解決過程を表現するモデルとして、図2.1に示す思考整合型モデルが提案されている[49, 51]。

思考整合型モデルは、列車運転整理支援システム ESTRAC-III (Expert System for Train Traffic Control) の開発[50]を通して開発され、交通・生産等の分野におけるスケジュール

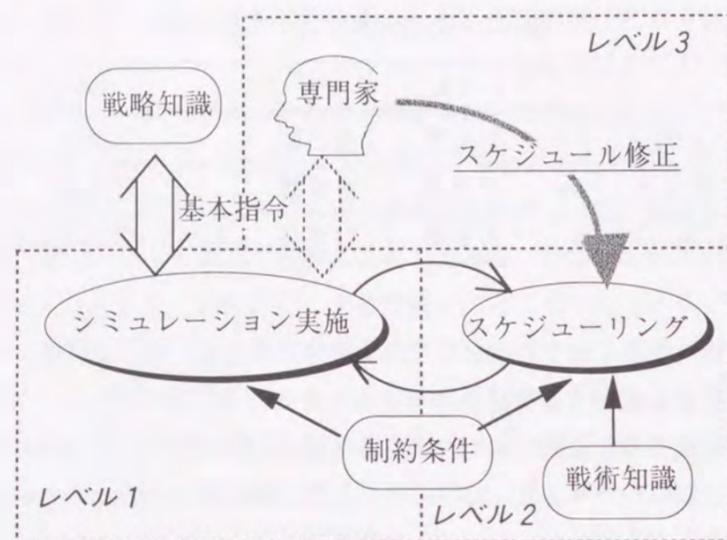


図 2.1: 思考整合型モデルの概要

管理された大規模・複雑システムの計画・運用問題を対象としている。このモデルでは、専門家が問題を解決する思考過程を模擬するためのヒューリスティックな手順を記述した戦略知識に基づき、システムの状態に応じて基本指令と呼ぶコマンドを実施することで、部分シミュレーションを単位として局所的なシミュレーションとスケジュール設定を交互に繰り返しながら全体のスケジュールが段階的に作成される。ここで部分シミュレーションとは、システム内部に生じる事象のうち相互に関連を持つ事象をまとめた処理単位である。また、スケジュール設定では専門家の持つ局所問題解決知識に相当する戦術知識が用いられる。そして、局所的なシミュレーションとスケジュール設定は、絶対時刻順にこだわらず注目する部分から選択的に進めることができるため、人間の思考過程と整合をとることができる。さらに、このモデルでは専門家はシミュレーションの進行状況を見ながら、必要と思えば計算機に代わって基本指令を送ることでシミュレーションの進行を制御し、スケジュールを修正したり実施済みのシミュレーションの一部を無効にすることが可能である。

## 2.4 思考整合型モデルの DIAPLAN への適用

DIAPLAN は複線区間を対象としたダイヤ作成支援システムで、図 2.2 に示すように、実行ダイヤ作成部と計画ダイヤ設定部から構成される。

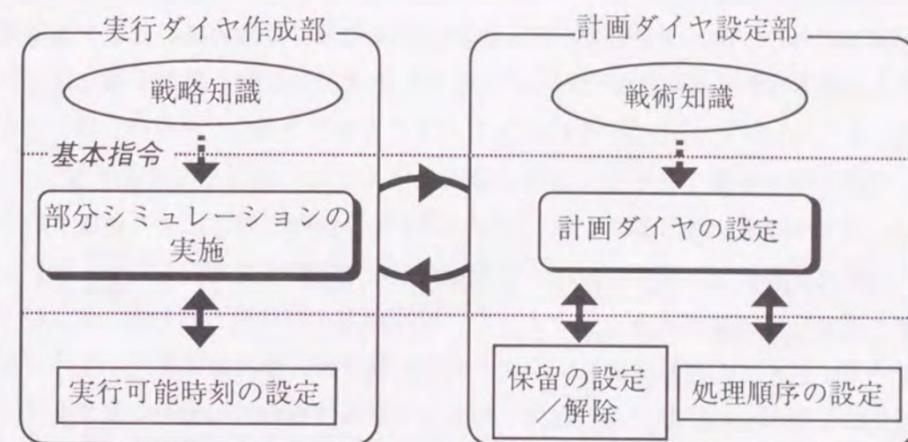


図 2.2: DIAPLAN の構成

DIAPLAN は思考整合型モデルを適用することで、実行ダイヤ作成部では前述のレベル 1 に相当する列車運行のシミュレーション、計画ダイヤ設定部ではレベル 2 に相当する追越しを含めた計画ダイヤ設定を、専門家と同じような手順で組み合わせてダイヤを自動作成する機能を実現している。シミュレーションを実施するためにはスケジュールが必要であるが、DIAPLAN ではスケジュールとして、計画ダイヤと呼ぶ列車の到着可能時刻および出発可能時刻(これらを合わせて処理可能時刻と呼ぶ)で示される、列車の運行予測に基づく仮のダイヤを設定する。この時、戦術知識を参照して追い越し設定が自動判断される。これに基づき部分シミュレーション実施時のイベントの処理順序が決まる。また、駅における計画ダイヤの設定状況に応じて、部分シミュレーションの実行保留が設定される。実行ダイヤ作成部では、作成状況に応じて部分シミュレーションの実施順序を戦略知識に基づいて判断し、適切な基本指令を駅に出す事で部分シミュレーションが実施される。その結果、実際にそのスケジュールで走行可能かどうかを検証し、走行可能ならばその結果を実際に着発可能な時刻(実行可能時刻)として決定する。対象列車全てに対する各駅での実行可能時刻の集合が、作成されたダイヤとなって最終的に出力される。他列車との設備競合等も考慮するため、実行可能時刻は処理可能時刻より遅くなる場合がある。

レベル3の問題は専門家が必要に応じて進行を制御し、部分的にダイヤを修正することで解決するものとする。

DIAPLANでは基本指令は3種類用意される。第1指令は主に駅を出発した列車を次々と前に進める役割を果たす。第2指令は主に始発駅から列車を出発させる役割を持つ。この2つの基本指令を作成状況に基づいて適切な駅に出すことで、専門家がダイヤを作成する手順と同じように、例えば最初は列車aのダイヤを作り、後続列車のことを考える必要が生じたら列車bのダイヤを作るといったように、物理的な制約を満たす限りは時間的な前後関係にとらわれずに、ダイヤを作成していくことができる。

一方、後戻り指令は第1指令または第2指令による列車の進行を元に戻す役割を持つ。そのため、通常は戦略知識に基づく第1指令または第2指令の指示により作成されるダイヤを常に専門家が評価し、必要になれば基本指令の指示を停止させ、着目する駅に必要なだけ後戻り指令を専門家が送ることによって、駅に設定されたダイヤを部分的に取り消すことができる。ダイヤの修正は直ちにシステムに反映され、専門家は修正による影響を画面で逐次確認しながら対話的に試行錯誤を繰り返すことで効率的に種々の要求を満足させたダイヤを作成することができる。

ところで、思考整合型モデルは本来作成済みのスケジュールと実際の運行状況を比較し、その結果に基づき問題解決を行う枠組みであり、相互に関連を持つ事象の進行は必ず時間順に処理する。一方、ダイヤは必ずしも時間順に作成する必要はなく、路線形態によっては作成を容易にするために逆向きに作成することもある。そこで、思考整合型モデルの特徴を維持したままダイヤを逆向きに作成するための逆引き機能を追加する。

以下、思考整合型モデルを実現するためのDIAPLANの具体的な内容を示す。

#### 2.4.1 部分シミュレーション

DIAPLANでは図2.3に示すように、ある駅における列車の着イベントと発イベントを、また待避などがあれば待避列車の着イベント、通過列車の着イベント、発イベント、待避列車の発イベントを一括して処理し、列車運行を部分的に予測する事象、すなわち部分シミュレーションと定義する。部分シミュレーションは後述の計画ダイヤが設定された時に計画ダイヤに基づく着発順序により決まる。そして、基本指令を駅が受けた際に、駅間最大走行列車数などの制約条件から部分シミュレーションに属するすべてのイベントが処理できるかどうかチェックされ、すべて処理可能ならば、各イベントを時間順に処理する。

#### 2.4. 思考整合型モデルのDIAPLANへの適用

これを部分シミュレーションの実施と呼ぶ。1つでも処理できないイベントがあれば、部分シミュレーションは実施されない。なお、駅に部分シミュレーションが複数個存在する場合、実施対象となるのは時間的に最も早い部分シミュレーションただ1つである。また、部分シミュレーションは実施された時点で存在しなくなるものとする。そのため1つの列車を含む部分シミュレーションはたかだか1つしか存在しない。したがって図2.3のようなダイヤ作成においても実際には同時にA~Eの部分シミュレーションが存在することはなく、例えばAが実施され、設定された計画ダイヤに基づきDが決まった時点でAは存在しなくなる。

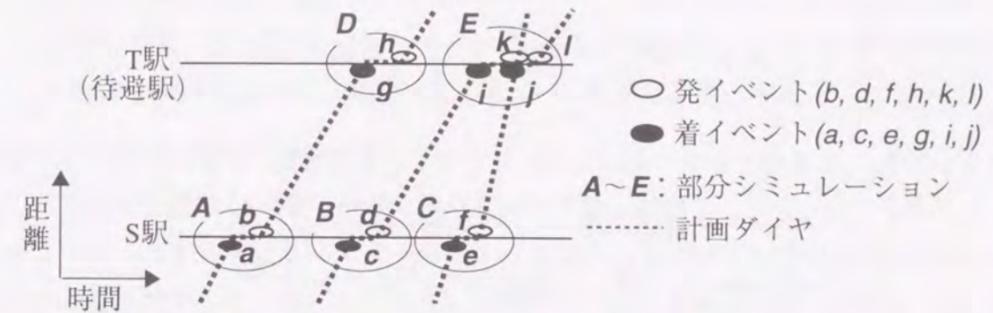


図 2.3: 部分シミュレーションの例

#### 2.4.2 列車運行の予測とダイヤ設定の保留

まず、以下では基本指令を受けた駅を基準駅、それにより部分シミュレーションが実施された駅を実施駅、列車運行の予測結果として計画ダイヤを設定する駅を計画駅と呼ぶ。

列車運行の予測は、図2.4に示すようにある部分シミュレーションの実施が完了した時点で、部分シミュレーションで対象となり実施駅を出発した列車に対して、駅間最小走行時間等の制約をもとに実施され、その結果として実施駅の次駅である計画駅での処理可能時刻が計画ダイヤとして設定される。これに基づき部分シミュレーション実施時のイベントの処理順序が決まる。また、追い越しの設定や始発列車の存在など、実施駅での列車の処理順序と計画駅での列車の処理順序が異なる可能性がある場合、計画ダイヤを設定した時点で生じる部分シミュレーションに対し、保留を設定する。

計画ダイヤに対し部分シミュレーションを実施することで、実際にそのスケジュールで

走行可能かどうかを検証する。専門家はその結果を見てダイヤの品質を評価し、修正すべきかどうかを判断する。

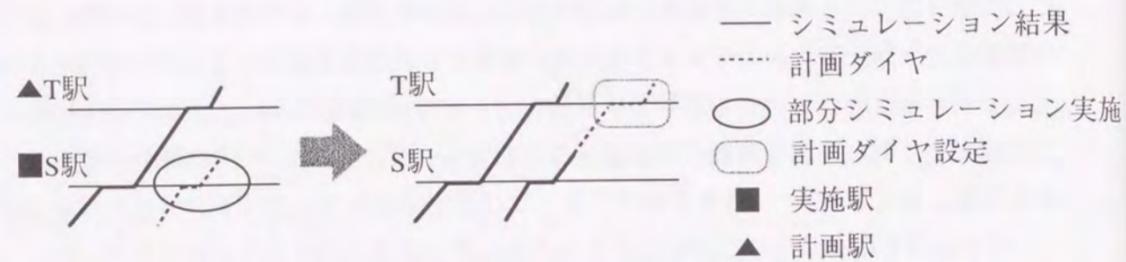


図 2.4: 部分シミュレーションと計画ダイヤ

図 2.5 では、 $z$  列車の  $S$  駅での部分シミュレーションを実施後、 $T$  駅に計画ダイヤを設定した状況を示している。この時、新たに部分シミュレーション  $C$  が発生するが、 $C$  よりも早い時刻に別の列車を対象とした部分シミュレーション  $B$  が存在する。このような場合、 $C$  に保留を設定し、 $B$  より先に  $C$  が実施されないようにする。 $B$  が実施された時点で  $C$  の保留は解除される。

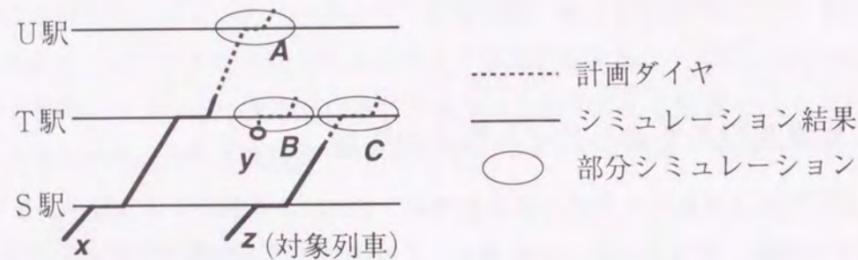


図 2.5: 保留の設定

### 2.4.3 基本指令

基本指令は部分シミュレーションを実施させるコマンドである。DIAPLANでは、システムが後述の戦略知識に基づいて、またはダイヤ作成者が自分の意図に基づいて、次の3つの基本指令を駅に対して送る。

#### ● 第1指令

第1指令は、実施駅を基準駅の次の駅として部分シミュレーションを実施させる指令である。図 2.6 に示すように、基準駅と実施駅の間を走行中の列車のうち、最も早く基準駅を出発した列車を対象列車とする。すなわち、第1指令は指令を送った次の駅に対象列車を到着・出発させようとする指令と考えることができる。

第1指令に対して実施完了、実施不能、条件付可能という結果がある。対象列車の着発イベントが実施駅で実施対象となる部分シミュレーションに含まれており、実際に部分シミュレーションが実施されれば、実施完了という結果を返す。また対象列車もしくは対象となる部分シミュレーションがない場合、実施不能という結果を返す。対象とする部分シミュレーションに保留が設定されていれば、対象部分シミュレーションは実施せず、条件付き可能という結果を返す。

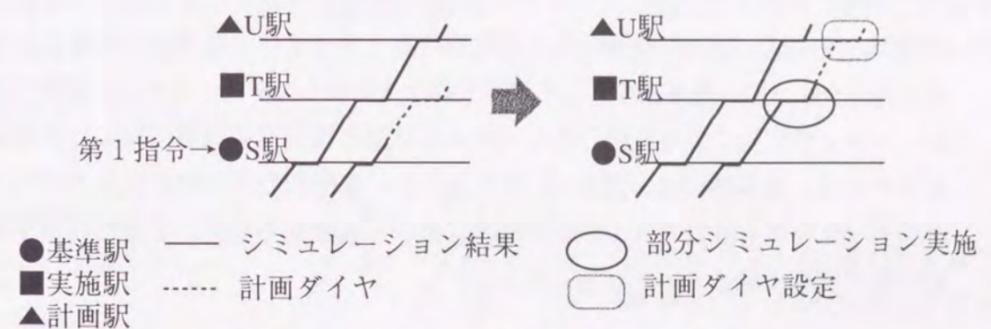


図 2.6: 第1指令による部分シミュレーション

#### ● 第2指令

第2指令は、基準駅を実施駅として部分シミュレーションを実施させる指令である。図 2.7 に示すように、指令を受けた時点で最も早く基準駅に到着する予定の列車もしくは基準駅から始発する予定の列車を対象列車とする。すなわち、第2指令は対象列車を基準駅から出発させようとする指令と考えることができる。

第2指令に対しては実施完了、実施不能という結果がある。第2指令を受けた結果として、実際に部分シミュレーションが実施されれば実施完了という結果を返す。また、対象列車もしくは対象となる部分シミュレーションがない場合、実施不能と

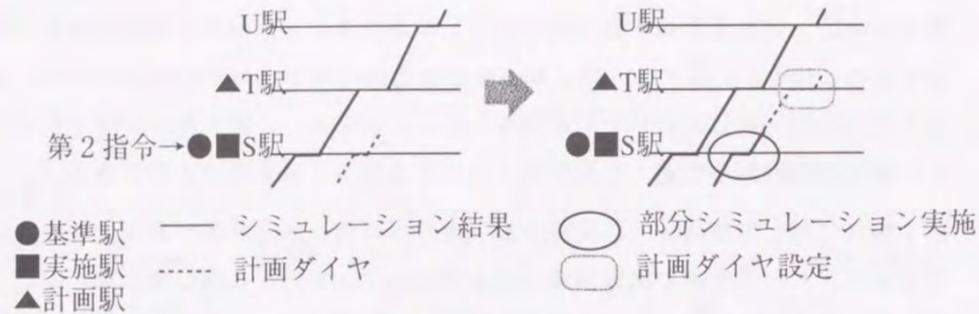


図 2.7: 第2指令による部分シミュレーション

いう結果を返す。

● 後戻り指令

DIAPLAN では、修正の影響が及ぶ可能性のあるダイヤだけを再作成することが簡単に行えるように、基本指令として後戻り指令を追加している。これは、部分シミュレーションの実施により変化したシステムの状態を実施前の状態に戻すための基本指令である。具体的には、図2.8に示すように、基準駅の次の駅に設定されている計画ダイヤを何も設定されていない状態に戻し、基準駅を出発していた列車を基準駅の前の駅を出発している状態に戻す。

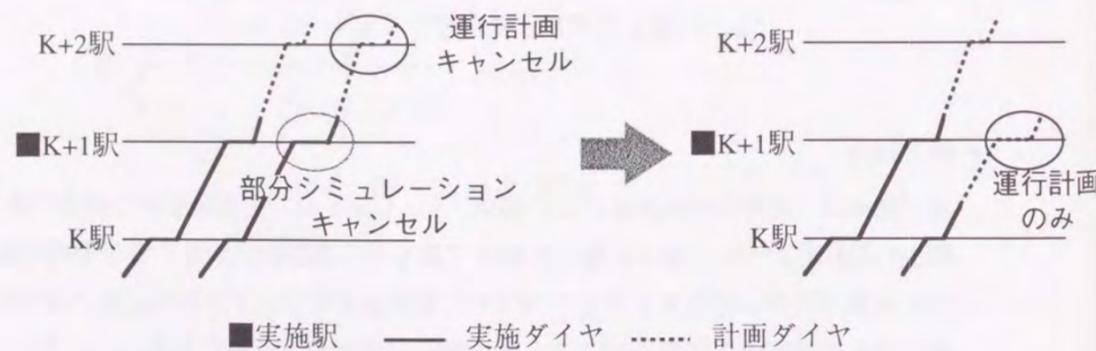


図 2.8: 後戻り指令による部分シミュレーションのキャンセル

後戻り指令に対しては実施完了、実施不能という結果がある。後戻り指令を受けた

結果として、実際にシステムの状態を部分シミュレーション実施前の状態に戻すことができれば実施完了、実施前の状態に戻すことができなければ実施不能を返す。

このように、部分シミュレーションを単位とし、基本指令によりシミュレーションの進行を司ることで、一般的な離散事象モデルでは時間の絶対的な順序関係にしたがい個々の事象が処理されるのに対し、思考整合型モデルでは物理的制約を満たす限り時間的な前後関係にはとらわれず部分シミュレーションを実施することができる。例えば、図2.9において離散事象モデルでは必ず  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow g \rightarrow d \rightarrow h \rightarrow e \rightarrow i \rightarrow f \rightarrow j \rightarrow k \rightarrow l$  の順で事象が処理される。これに対し、思考整合型モデルでは B と D、C と D は互いに異なる駅と列車を対象としているため、 $A \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow E$  (同じ列車に着目)、 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$  (同じ駅に着目)、 $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow E$  (時間順) のいずれの順でも部分シミュレーションを実施することができる。但し、同じ駅では先発の列車は先に処理しなければならないため、 $\{B, C\} \rightarrow A$ 、 $C \rightarrow B$ 、 $E \rightarrow D$  の順序では実施できない。人間は着目する対象をできるだけ変えない方が処理過程を理解しやすいため、同じ駅や列車に着目して処理できる思考整合型モデルの方が理解しやすい。実際にどの順で実施するかは基本指令の出し方に依存する。

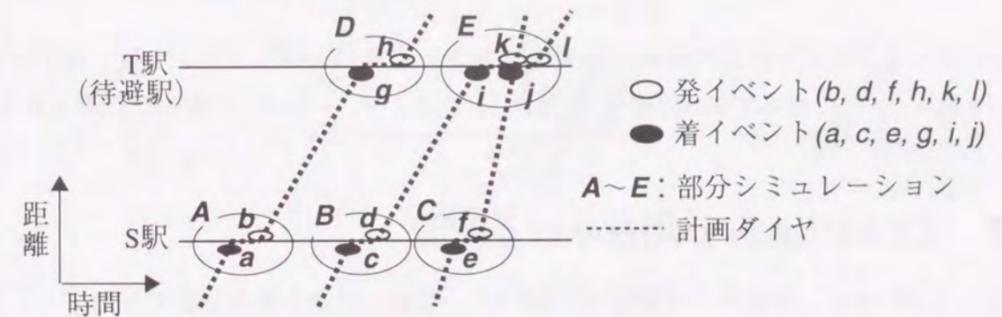


図 2.9: 部分シミュレーションの実施順序

2.4.4 ダイヤの逆引き

一般に、ある路線の端末駅は他の路線との乗り継ぎ、乗り換え駅であることが多く、乗客の利便性をよくするために互いに乗り換えがしやすいように同期の取れたダイヤを設定する必要がある。このためには、端末駅の着時刻を指定してダイヤを作成しなければな

らない。また、路線の中間から支線が分岐する場合、本線側のダイヤを作成してから支線側のダイヤを作成することがある。この場合も、支線側のダイヤは分岐駅の着時刻を指定して作成しなければならない。これらのように、注目する駅に希望する時刻に到着するようなダイヤを作成したい場合も多い。

DIAPLANでは、初期データとして運行させたい列車の始発駅や始発時刻等をあらかじめ設定し、始発駅から終着駅に向かってダイヤを作成する方式（順引き）を取っている。これだけでは、途中駅や終着駅に着目したダイヤを作成する場合、着目した駅へ所望の時刻に所望の列車を到着させるダイヤを作成するのは非常に困難である。

このため、初期データとして終着駅の着時刻などを与え、終着駅から始発駅に向けてダイヤを逆向きに作成する、逆引き機能を追加する[47]。シミュレーション実施時にデータを以下のように取り扱うことにより、逆引きの場合でも順引きの場合と同じ部分シミュレーション、基本指令、戦略知識が利用できる。

- (1) 列車があたかも逆向きに走っているように考える。
- (2) 実際の始発駅を終着駅、実際の終着駅を始発駅とみなす。
- (3) 走行時間、停車時間などの経過時間を負の値に置き換えて考え、時間を逆に進行させる。

逆引きによるダイヤ作成の様子を図2.10に示す。K駅におけるイベントは、順引きではa→b→c→dの順序で処理されるが、逆引きではd→c→b→aの順序で処理される。

## 2.5 DIAPLANで用意される知識

DIAPLANでは、計画ダイヤ設定部において、追越し設定を戦術知識で判断する。また、実行ダイヤ作成部において、ダイヤ作成の進行を戦略知識で管理する。以下、それぞれの知識の内容について説明する。

### 2.5.1 戦術知識

DIAPLANでは、戦術知識は計画ダイヤ設定の際に用いる専門家の判断知識を記述する。表2.3に言語的表現による追越し設定ルール的一般形式を示す。

専門家と同様に運行状況に応じた適切な判断を行えるように、駅ごと及び列車ごとに追越し設定ルールを記述できる。駅がもつルールは時間帯ごとの一般的な原則をあらわして

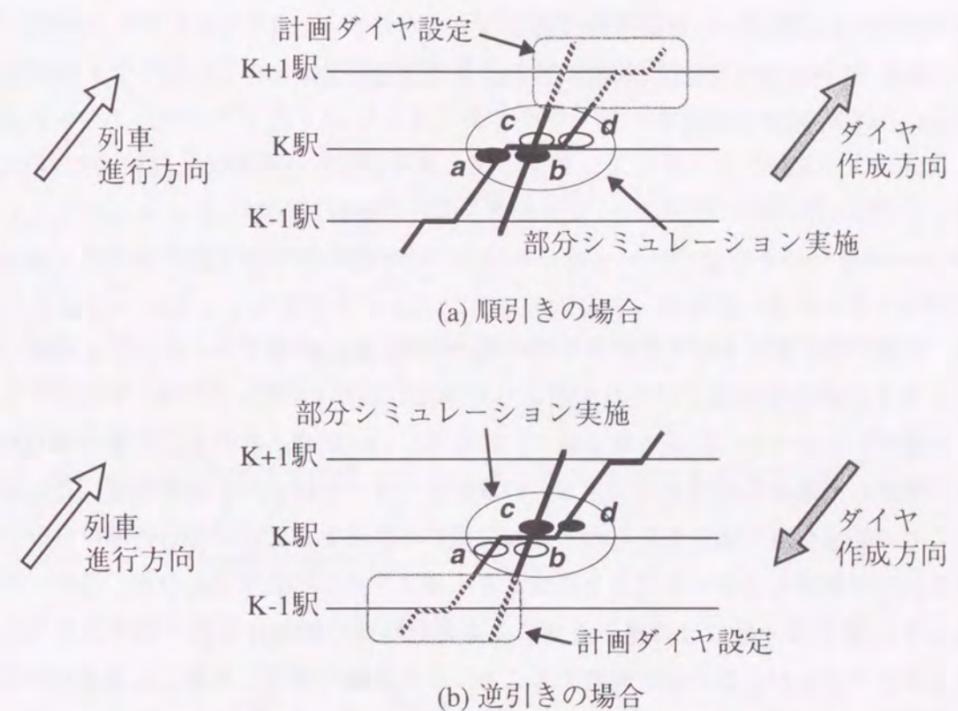


図 2.10: 逆引きによるダイヤ作成

表 2.3: 追越し設定ルールの例

<p>if 特急と普通の到着間隔が <math>T</math> 秒以内である</p> <p>then 特急は普通を追越す</p> <p style="text-align: center;">(a) 駅のルール</p>
<p>if 先行列車は普通もしくは急行である</p> <p>and 先行列車との到着間隔が <math>T</math> 秒以内である</p> <p>then 先行列車を追越す</p> <p style="text-align: center;">(b) 列車のルール</p>

おり、待避可能な駅において各列車種別の組み合わせごとに用意する。そして、追越しの対象となる2列車の種別および到着間隔から列車走行順序(追越しの可否)を決定する。一方、列車がもつルールは待避可能な駅ごとに用意し、自列車とその先行列車の種別および到着間隔から列車走行順序を決定する。列車がもつルールはそれぞれの列車ごとに記述できることから、列車の使命をあらわすために用いられる。したがって、列車がもつルールによる決定は駅がもつルールによる決定よりも優先するものとする。なお、各ルールにおけるしきい値  $T$  は一般には待避の有無による走行時間の増加分を最小化するように決定することができるが、この値を調整することにより路線の事情を考慮した追越しの設定ができる。

### 2.5.2 戦略知識

戦略知識は、システムが進行する手順を規定する知識である。DIAPLANでは、専門家がダイヤを作成するヒューリスティックな手順に基づいて、表2.4に示す知識を戦略知識として用いる。この戦略知識にしたがってダイヤの作成状況に応じて次に送るべき基本指令と駅が選択され、部分シミュレーションが実施され、実施完了の場合は、次に計画ダイヤが設定される。これを繰り返すことでシミュレーションと戦術知識による計画ダイヤ設

定が組み合わされ、後述する具体例で示されるように専門家と同じような手順でダイヤ作成が進行する。

また、実施駅が待避可能な場合は、部分シミュレーションで対象となっている列車(先行列車)は一般に後続列車に追越される可能性がある。そのため、後続列車の実施駅における処理可能時刻が設定されるまでは、まだ出発順序を決めることができず、後続列車を待避すべきか、それとも先行すべきかを判断することができない。

例えば、図2.11(a)において部分シミュレーション  $B$  の実施結果によっては先行列車  $x$  は後続列車  $y$  に追越される場合(図2.11(b))と追越されない場合(図2.11(c))がある。そこで、DIAPLANでは表2.5のルール( $K_6$ )を戦略知識に追加し、実施駅における後続列車の計画ダイヤが設定され、出発順序がきまるまでは部分シミュレーションを実施しないようにする。したがって、図2.11で  $S$  駅に第1指令を送った場合、(a)では列車  $x$  が列車  $y$  に、(b)では列車  $x$  が列車  $z$  に追越され、出発順序が変更される可能性があるため、部分シミュレーション  $A$  の実施は保留される。しかし、(c)の状態では列車  $x$  が列車  $y$  に追越されないことが判明したため、部分シミュレーション  $A$  は実施できる。また、(b)では部分シミュレーション  $C$  を実施することで列車  $x$  が列車  $z$  に追越されないことが判明すれば、部分シミュレーション  $A$  は実施できる。

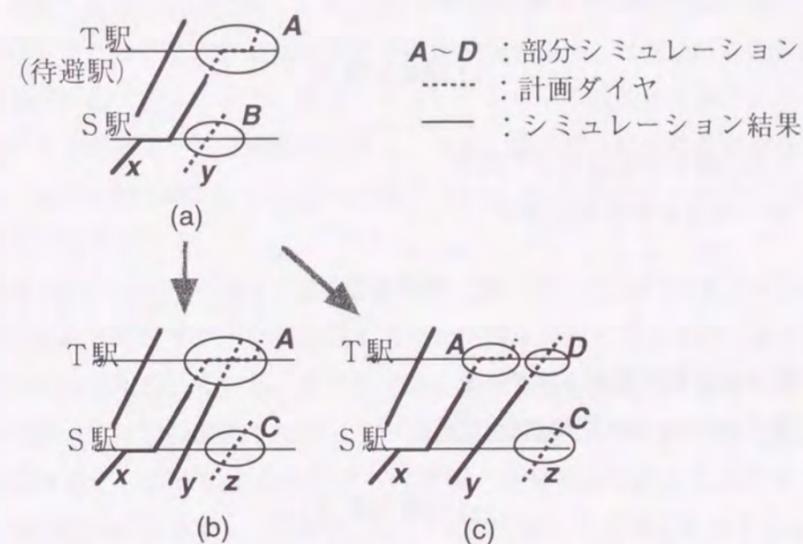


図 2.11: 追越しの設定と部分シミュレーションの実施

表 2.4: DIAPLAN における戦略知識

---

if 第1指令の結果が実施完了である	
then 第1指令を実施駅に送る	
	(a) 戦略知識 $K_1$
if 第1指令の結果が条件付可能である	
then 第2指令を実施駅に送る	
	(b) 戦略知識 $K_2$
if 第1指令の結果が実施不能である	
then 第1指令を基準駅の前駅に送る	
	(c) 戦略知識 $K_3$
if 第2指令の結果が実施完了である	
then 第1指令を基準駅に送る	
	(d) 戦略知識 $K_4$
if 第2指令の結果が実施不能である	
then 第1指令を基準駅の前駅に送る	
	(e) 戦略知識 $K_5$

---

表 2.5: 待避を考慮した戦略知識  $K_6$ 


---

if 実施駅が待避可能である	
and 対象列車が後続列車に追い越される可能性がある	
then 部分シミュレーションの実施を保留し、実施不能を返す	

---

## 2.6 DIAPLAN によるダイヤ作成手順と設定条件

### 2.6.1 DIAPLAN によるダイヤ作成の手順

DIAPLAN を用いてダイヤを作成する手順を図 2.12 に示す。まず、初期条件から各列車の始発駅の計画ダイヤを設定する。次に、専門家もしくは戦略知識によって選択された駅に対し、選択された基本指令を送る。基本指令を受けると、実施駅で制約条件及び計画ダイヤに基づいて部分シミュレーションが実施される。実施が完了した場合は、シミュレーション対象となった列車に対し、実施駅の次の駅において戦術知識を用いて新たな計画ダイヤが設定される。また、条件付可能や実施不能の場合、状況に応じて再び駅および基本指令を選択し直す。このように部分シミュレーションの実施と計画ダイヤの設定を交互に繰り返すことでダイヤの作成が進行する。なお、専門家は作成作業の全体を管理することができ、戦略知識を用いて自動的に作成させたり、自らの考えで任意の基本指令を任意の駅に出すことができる。

次に、作成されたダイヤを修正する場合について述べる。DIAPLAN では、修正の影響が及ぶ可能性のあるダイヤだけを再作成することが簡単に行えるように、基本指令の1つである後戻り指令を用意している。ダイヤを修正する際には、後戻り指令によって修正したい列車を対象とする駅の前駅を出発している状態まで戻し、計画ダイヤを修正してダイヤ作成を再開すると、修正による他列車への影響も自動的に反映して列車ダイヤが再作成される。修正結果がおもわしくなければ再び列車を戻して再修正を加えることにより、要求をよりよく満足するダイヤが得られるまで試行錯誤を繰り返すことができる。

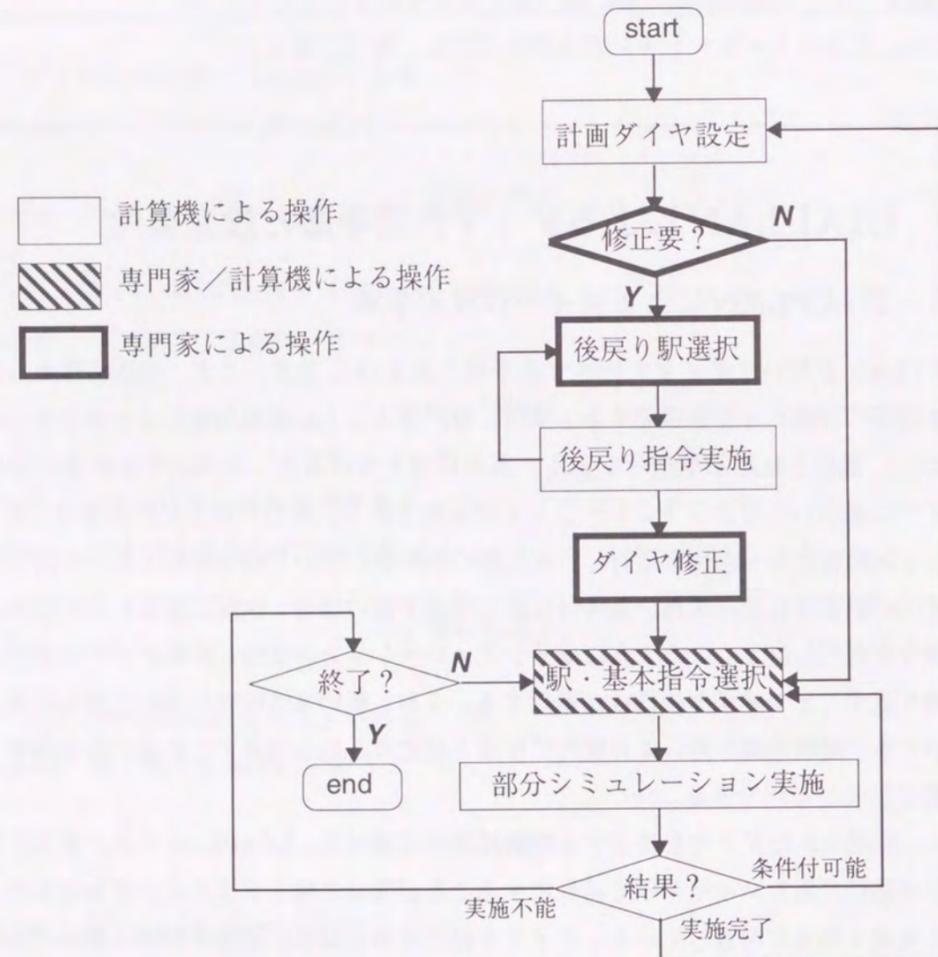


図 2.12: DIAPLAN によるダイヤ作成手順

## 2.6.2 設定可能な条件

DIAPLAN で作成者が設定できる条件等の項目を記す。

(\*印は、路線や車両に関する詳細なデータをもとに設定されるものを表す)

## 路線および駅の設定

- (1) 隣接駅情報  
各駅の隣接駅(分岐のない複線が対象となる)
- (2) 番線情報  
駅の番線数と各番線の運転方向(上り/下り)
- (3) 駅間の形態  
複線のみ

## 列車の走行条件

停車パターン、走行パターンは列車種別毎に設定可能である。

- (1) 標準駅間走行時分\*  
車両種別、利用番線、通過/停車等の条件により設定
- (2) 停車パターン  
各駅での最小停車時間と標準使用番線

## 駅での運行条件

- (1) 最小進入/進出時隔\*  
同方向を走行する先行/後続列車の車両種別、構内進路、通過/停車等の条件により設定
- (2) 最大駅間走行列車数\*
- (3) 最小折り返し時間  
折り返し可能駅にのみ設定

追い越し、行き違いの設定に関する条件

(1) 追い越し設定のための閾値

先行列車と後続列車の列車種別毎に駅毎にしきい値を設定。2列車の到着時間差がしきい値以下ならば追い越しを設定する。

ダイヤ作成の初期条件

(1) 初期設定値

運行する列車の列車種別と車両種別、始発駅、終着駅、始発時刻（逆引きの場合は終着時刻）

(2) 車両運用情報

前後の運用列車または出庫／入庫の設定（未設定でも可）

2.7 DIAPLANの動作例と評価

2.7.1 動作例

本節では、図2.13に示したDIAPLANの動作例を用いて、ダイヤが自動作成される手順を具体的に説明する。S～Uは駅、a～dは列車、(1)～(10)はダイヤ作成の進行にともない設定される計画ダイヤから決定される部分シミュレーションである。なお、列車b、dは優等列車とする。

初期条件として列車a～dの種別、始発駅、始発時刻、終着駅を入力すると、あらかじめ各列車の始発駅における計画ダイヤが設定され、同時に着発順序より部分シミュレーション(1)、(2)、(3)、(4)が設定される（図2.13(a)）。

戦略知識により、最初は始点駅（対象路線において進行方向に対して最も手前の駅）であるS駅に第2指令を出す。この場合、列車aはS駅からの始発であるから部分シミュレーション(1)は実施可能と判定される。そこで(1)が実施され、列車aが出発すると共にaのT駅における計画ダイヤが設定され、部分シミュレーション(5)が決まる（図2.13(b)）。

次に、第2指令に対する実施完了という結果から、表2.4の戦略知識(K<sub>4</sub>)にしたがいS駅に第1指令を出す。この場合(5)が実施され、列車aはT駅を出発し、(6)が決まった状態まで進む（図2.13(c)）。さらに、戦略知識(K<sub>1</sub>)からT駅に第1指令を出す。この例では、U駅が待避駅であるため、列車aは後続列車に追越される可能性があるため、戦

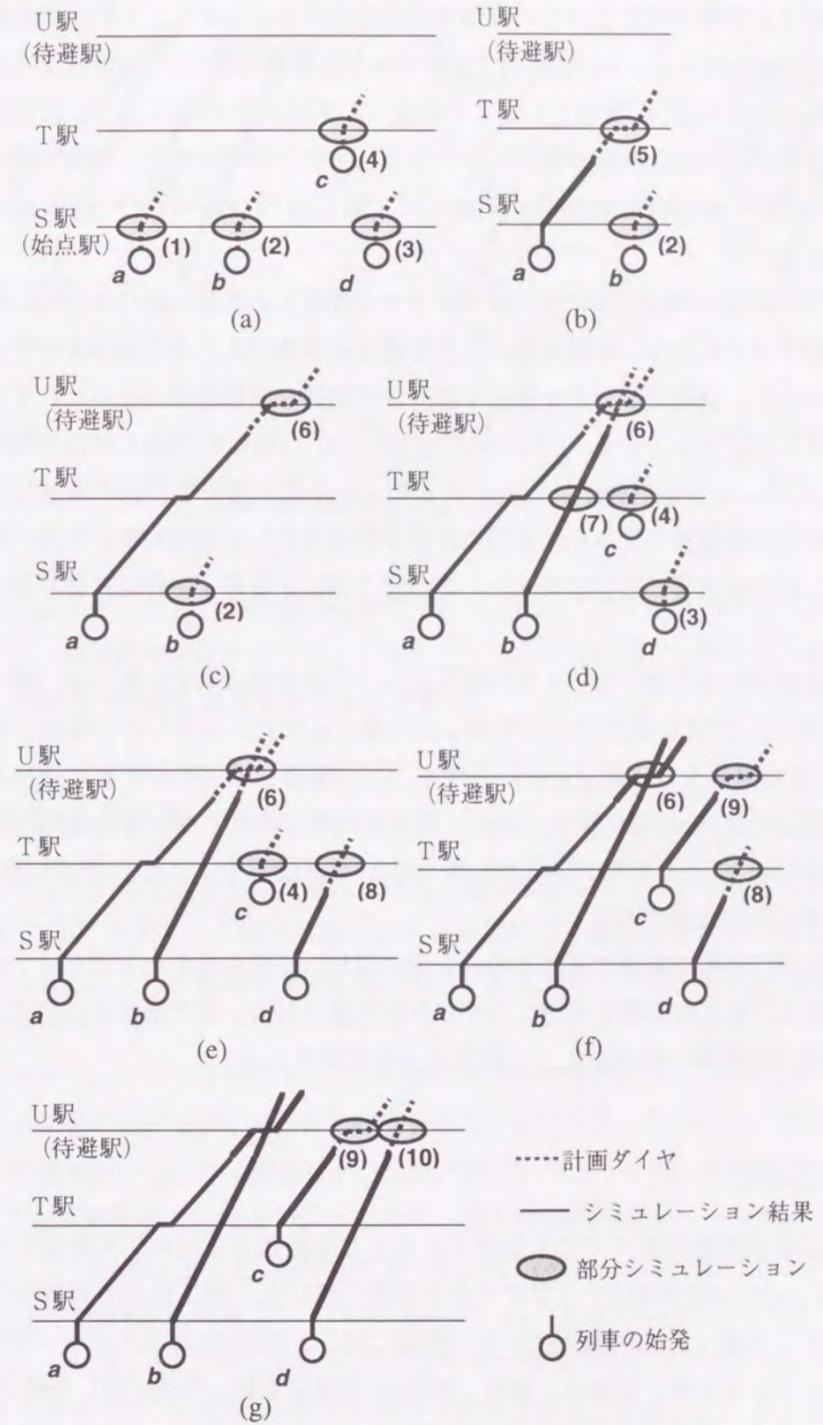


図 2.13: DIAPLANの動作例

略知識 ( $K_6$ ) より実施不能という結果が返される。そこで戦略知識 ( $K_3$ ) より  $S$  駅に第1指令を出すと、対象列車がないため実施不能が返される。しかし、 $S$  駅は始点駅であるから  $S$  駅に第2指令を出し、(2)が実施され列車  $b$  が  $S$  駅を出発し、(7)が決まる。以下、戦略知識 ( $K_4$ ) により (7)が実施され、この場合では列車  $a$  を追越すように計画ダイヤが設定され、それに従い (6)が決め直される (図 2.13(d))。以後同様に、部分シミュレーションは (3) → (4) → (6) → (8) の順序で実施され、図 2.13 の (e) → (f) → (g) の順序でダイヤが作成される。

このように、DIAPLAN では専門家がダイヤを作成する手順と同じように、例えば最初は列車  $a$  のダイヤを作り、後続列車のことを考える必要が生じたら列車  $b$  のダイヤを作るといったように、物理的な制約を満たす限りは時間的な前後関係にとらわれずに、ダイヤを作成していくことができる (上記の例では (3)、(4)、(6) は時間順とは逆の順序で実施される)。したがって、専門家は計算機によるダイヤ作成の過程を容易に理解できるとともに、どの時点で計算機の代わりに専門家が基本指令を出しても構わないため、作成状況を常に把握しながら必要に応じて介入し、専門家主導によるダイヤ作成に切り替えることができる。

次に、後戻り指令を用いたダイヤの修正について具体的に示す。例えば、図 2.14(a) (図 2.13(g) と同一) では  $U$  駅において列車  $c$  が列車  $d$  より先に出発しているが、 $U$  駅で列車  $d$  が列車  $c$  を追越すように修正したいとする。この場合、専門家が  $T$  駅に後戻り指令を出すことで図 2.13(f) の状態に戻す。次に、例えば列車  $d$  のダイヤをある時刻だけ前にずらし (図 2.14(b))、ダイヤを再び作成すれば、図 2.14(c) に示すように  $U$  駅で列車  $d$  が列車  $c$  を追越すダイヤが作成される。

このように、必要な範囲のダイヤのみを元に戻し、修正を加えた上でダイヤを再び自動作成させると、修正の影響を考慮したダイヤが作成される。専門家はその結果を見て必要ならば何度も後戻り指令を出し、修正することができる。

## 2.7.2 作成例

提案方式が実規模のダイヤでも有効であることを確認するため、実路線を対象として EWS (HP apollo 9000/425t) 上でダイヤを自動作成した。図 2.15 に 2 時間分の列車ダイヤ図を示す。18 駅 (うち待避駅 8) を持つ路線に対し、列車 49 本のラッシュ時の約 2 時間分の上りダイヤを作成した場合、追越しが約 40 回設定され、作成に要した時間は 10 秒以内である。また、専門家が行なう駅の選択やダイヤの修正といった対話的な操作はすべ

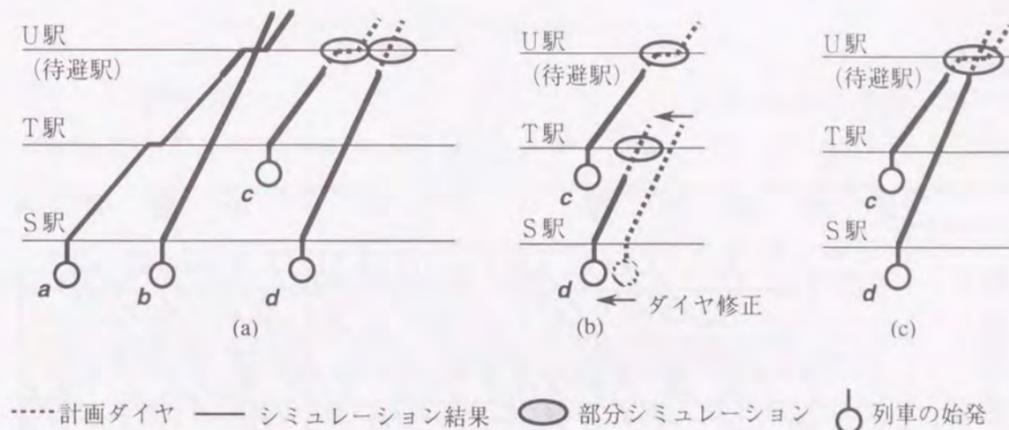


図 2.14: 後戻り指令によるダイヤの修正

てマウスを用いるが、各操作の応答性は良好であり、たかだか 1 秒以内で応答が返ってくる。そのため、修正結果を見て再び修正し直すといった試行錯誤を、専門家の思考を妨げることなく短時間で何度も繰り返すことができる。

## 2.7.3 有効性の評価

あるダイヤを作成している途中で修正を加える場合を考える。ここで作成されたダイヤのうち、図 2.16 に示すように修正箇所より前で修正に全く影響を受けない部分を  $A$ 、修正箇所を含み修正によって影響を受ける部分を  $B$ 、修正箇所より後であるが影響を受けない部分を  $C$  とする。

既存システムではダイヤを修正するたびに新しくダイヤを作成しなくてはならなかったため、修正の影響のない  $A$ 、 $C$  の部分も作成し直すこととなる。これに対し DIAPLAN では、修正の影響のない  $A$ 、 $C$  は変更せず、 $B$  だけ修正を行なうため、修正が終わってから最後に  $B$  と  $C$  を一度作成すればよい。すなわち、試行錯誤的な修正を  $n$  回繰り返す場合、既存システムでは  $((A + B + C)$  の作成時間 + 修正時間  $M$ )  $\times n$  だけ時間がかかるのに対し、DIAPLAN では (修正時間  $M + B$  の作成時間)  $\times n + ((A + C)$  の作成時間) だけで済むため、 $(n - 1) \times ((A + C)$  の作成時間) だけ短時間で修正することができる。DIAPLAN によるダイヤ作成では、一般に  $B$  や  $C$  の部分のダイヤを全て作成してしまう前に作成者

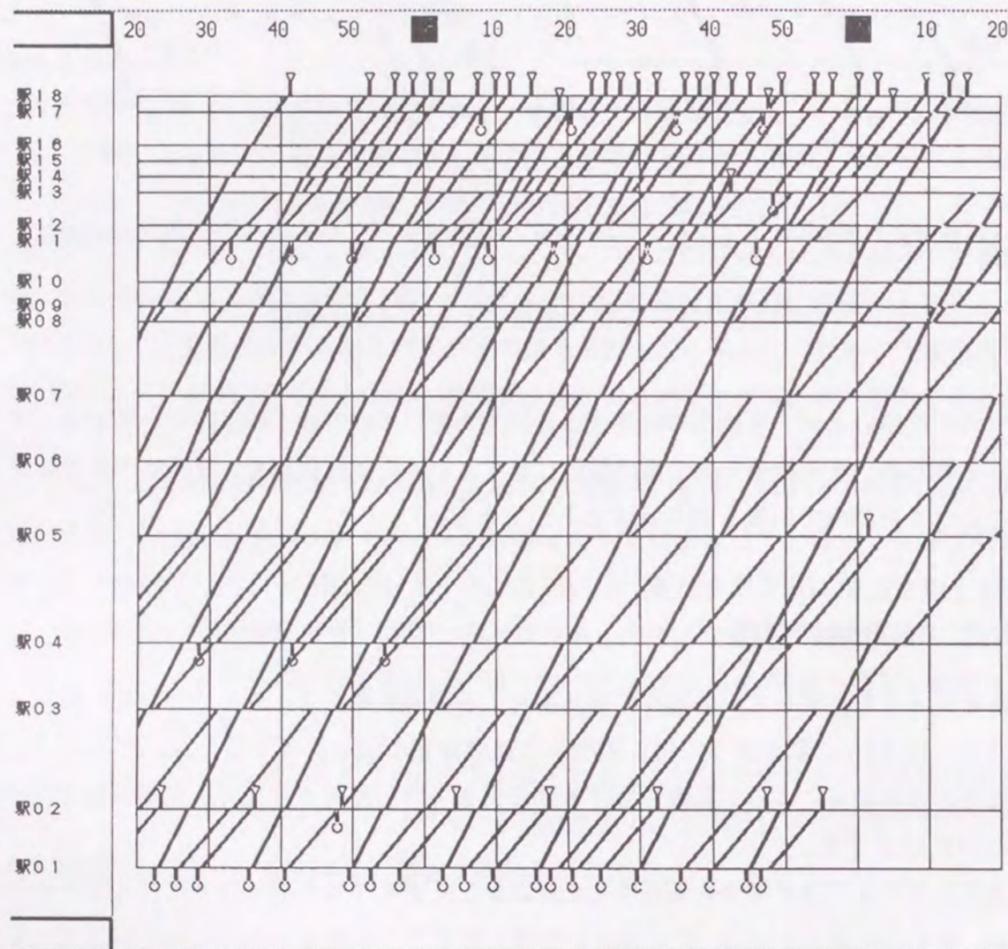


図 2.15: 実路線のダイヤ作成例

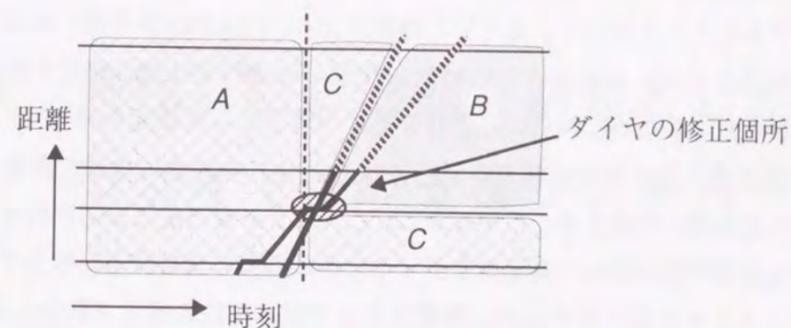


図 2.16: DIAPLANで修正の影響を受ける範囲

がダイヤを評価し、修正を施すことになる。そのため、Bの作成時間が占める割合は全体と比べてはるかに小さく、また思考時間を除いた修正時間  $M$  は作成例で示したように1秒以内ですむ。そのため、専門家の思考を妨げることなく試行錯誤を反復して行なうことができ、既存システムよりも効率よく種々の要求を満足するダイヤを作成することが可能である。

## 2.8 むすび

本論文ではダイヤ作成問題に考察を加え、これを3つのレベルの問題に分類し、専門家は試行錯誤的に各レベルの問題を交互に反復して解いていると見なすことができることを明らかにした。次に、思考整合型モデルに基づいて、最下層のレベルに相当する部分シミュレーションと中間層のレベルに相当する局所的スケジュール設定を交互に繰り返すことでダイヤを作成できるシステム DIAPLAN を開発した。そして、最上層のレベルに位置する人間による調整作業と計算機による自動作成とを統合化するために必要と考えられる3つの機能、すなわち

- (1) 計算機によるダイヤ作成過程を人間が理解しやすいものにする
- (2) 計算機主導の問題解決と人間主導の問題解決を容易に切り替えられること
- (3) 人間主導で問題解決を図る場合、計算機は高速な応答により人間の思考を妨げないこと

を DIAPLAN が全て満たすことを具体的な動作例を通じて確認し、実規模のダイヤにも適用可能であることを示した。こうした特徴により、DIAPLAN を用いれば、基本的には計算機が制約を満足するダイヤを自動的に作成し、専門家は作成過程を監視しながら種々の要求を満足するために調整の必要性を感じた場合のみ主導権を握り、ダイヤの部分的な修正と再作成による試行錯誤を対話的に繰り返して各要求に対して調整を図りながら、ダイヤを効率的に作成することができる。これにより専門家は繁雑な作業や無駄な計算による待ち時間が軽減され、高品質なダイヤにするための調整作業に専念できる。提案方式に基づくダイヤ作成システムは山陽電鉄および阪神電鉄に導入され [44, 55]、高密度かつ複雑なダイヤの作成業務に適用されている。

## 第3章 多様な路線形態を対象とした対話型ダイヤ作成支援システム

### 3.1 まえがき

第2章では、物理的な制約条件を満足するダイヤを短時間で自動作成するとともに、専門家の試行錯誤的な調整作業を対話的に支援する手法を提案し、ダイヤ作成支援システム DIAPLAN の構築を通してその有効性を示した。しかしながら、DIAPLAN が取り扱える対象は分岐を含まない複線のみで構成される路線(複線区間)に限られ、上り/下りのダイヤを合わせて作成できなかった。しかし、現実の鉄道路線には複線、複々線、単線、それらが混在した線、および分岐・合流を含む路線(分岐路線)があり、こうした路線を対象としたダイヤ作成が実用面で重要な問題となっている。

そこで、こうした多様な路線への対応が可能で、必要に応じて上り/下りのダイヤを別々にまたは合わせて作成できるシステム DIAPLAN-II を開発する [56, 57, 58]。DIAPLAN がもつ利点を全て継承した上で、機能を拡張する。具体的には、複線での追い越しの設定に加え、複々線や分岐路線において複数の線路から到着/出発する列車が相互に及ぼす影響や、単線での対向列車の影響を考慮した運行ダイヤの予測方式とダイヤ設定の保留方式を組み合わせることで、複々線や分岐路線での追い越しの設定、単線での行き違いや追い越しの設定を可能とする。

### 3.2 多様な路線形態におけるダイヤ作成

#### 3.2.1 複々線・分岐を含む路線

複々線および分岐を含む路線では、複数の線路からの列車の到着、あるいは複数の線路への列車の出発が可能で存在するという点で複線区間とは異なり、ダイヤ作成においても複線区間とは異なる取り扱いが必要になる。しかし、複線のみを対象とした DIAPLAN ではこの点を考慮していないため、複々線や分岐を含む路線は取り扱えない。以下では、

これらの路線を対象とした場合におこる、DIAPLANでは対処できない問題点について述べる。

なお、複々線のダイヤ作成では、複々線区間で各列車が走行する線路を決める必要があるが、本稿で述べるシステムでは、3.4.1節に記すように、列車の走行条件として作成者が指定する。

### 列車の着発順序

一般に、列車の駅での着発時刻はそれ以前の駅設備の使用履歴の影響を受けるため、実行可能時刻をシミュレーションにより求める場合は、同一駅で起こるイベントは時刻順に処理する必要がある。

ところで、複線区間の駅では列車は後方駅を出発した順に必ず到着する。一方、複々線区間では列車は他線を走行中の列車を追い越す可能性があり、後方駅を出発した順に当該駅に到着するとは限らないため、計画ダイヤに設定されている到着イベントを処理できない場合がある。例えば、図3.1では、複々線区間である駅間STで列車 $a^L$ とその後続列車 $b^L$ は異なる線を走行するので、 $b^L$ のS駅での出発時刻により、 $a^L$ が駅間で $b^L$ に追い越される場合[(b)]と追い越されない場合[(c)]とがある。駅間で追い越される場合は、T駅では $[b^L$ の到着]→ $[a^L$ の到着]の順でイベントを処理する必要があり、(a)の時点では $a^L$ のT駅への到着イベントは処理できない。しかし、DIAPLANでは駅間での追い越しを想定せずに決めた着発順序に基づきイベントを処理するため、(b)のような状況に対処できない場合があり、複々線区間での運行予測ができない。

また、分岐駅でも複数の線路から列車の到着が可能のため、同様の問題によりDIAPLANでは取り扱えない。

### 計画ダイヤとイベントの処理順序

部分シミュレーションの実施により、実行可能時刻が処理可能時刻より遅延すると判明する場合がある。複線区間では後続列車が先行列車を追い越せないため、列車の到着が計画ダイヤより遅延した場合でも、駅への到着順序は計画ダイヤ上の順序と変わらない。一方、複々線上の駅や分岐駅では、ある列車の到着が遅延しても、この列車と異なる線を走行する列車は計画ダイヤ通りの時刻に到着でき、到着順序が計画ダイヤ上の順序と異なる場合がある。例えば、図3.2-(a)の計画ダイヤに対して、部分シミュレーションの実施結果により、 $a^L$ が計画ダイヤ通りの順序でT駅に到着できる場合[(b)]と、到着順序が変わ

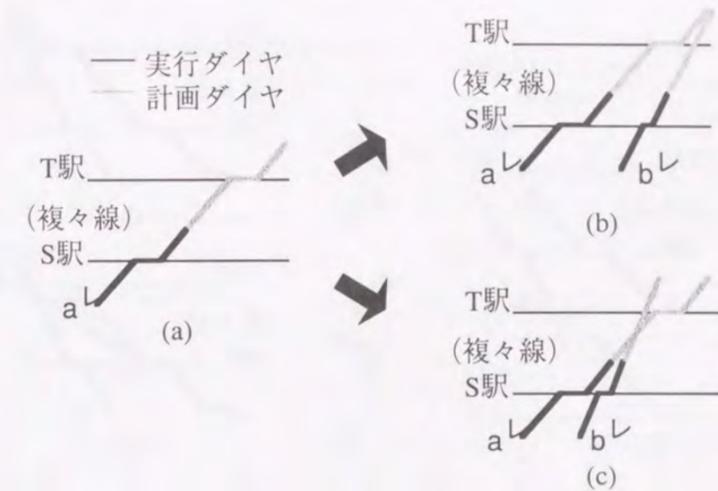


図 3.1: 複々線における列車の着発順序

る場合[(c)]がある。(c)の場合は、計画ダイヤで決められた着発順序ではなく、実行可能な順序に従いイベントを処理する必要があるが、DIAPLANではこのような状況を考慮していないため、部分シミュレーションの実施により処理順序が変わる状況に対処できない。

### 3.2.2 単線を含む路線

単線区間では、駅間の線路を上下列車が共用するため、対向列車の走行状況も考慮してダイヤを作成する必要がある。DIAPLANではこの点を考慮していないため、単線を含む路線を取り扱えない。

### 行き違いの設定

単線区間では対向する2列車の進路が競合する場合、一方の列車が駅間を通り抜けるまで他方の列車が行き違い可能駅で待避するよう、行き違いを設定する。これには、

- (1) 2列車の出発可能時刻、次駅への到着可能時刻等により待避する列車を決める
- (2) 一方の列車が優先的に競合区間を走行するよう、待避する列車を決める

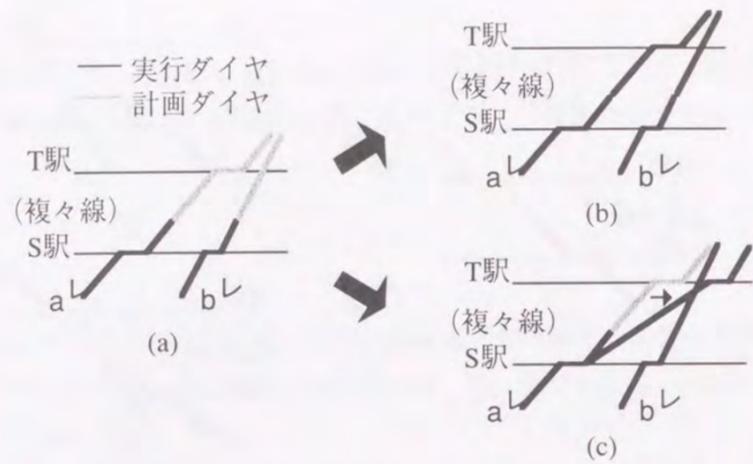


図 3.2: 複々線におけるイベントの処理順序

の2通りの設定方法がある。例えば、図 3.3-(a) では列車  $a^L$  とその対向列車  $b^L$  の駅間 ST (S 駅、T 駅は行き違い可能駅) での進路が競合する。これに対して、(1) を適用して出発 (または到着) 可能時刻の遅い  $b^L$  が T 駅で待避する場合 [(b)] と、(2) を適用して  $b^L$  が優先的に ST 間を走行するよう  $a^L$  が S 駅で待避する場合とがある [(c)]。いずれを適用するかは、輸送効率や乗客の利便性などを考慮した上で選択される。なお、本稿で述べるシステムでは、作成者が設定した各単線区間における各列車の優先度に基づき、2 列車の優先度が同等の場合は (1) により、出発可能時刻が遅い方の列車が待避し、優先度が異なる場合は (2) により行き違いを設定する。なお、上下列車の駅間走行時間が異なる場合、(1) の判定にどの時刻を用いるかにより、待避する列車が異なる場合がある。以下では、出発可能時刻により判断する場合について考察するが、到着可能時刻や両方を合わせて判断する場合も同様の考察が適用できる。

#### 単線区間の走行順序

単線区間への列車の出発時刻は、それ以前に当該駅間を走行した対向列車 (先行対向列車) の設備の使用履歴の影響も受ける。このため、単線区間の駅では、計画ダイヤに出発イベントが設定されていても、先行対向列車の当該駅での到着イベントが処理されていなければ処理できない。例えば、図 3.4 に示す例では、単線区間 ST (S 駅、T 駅は行き違い

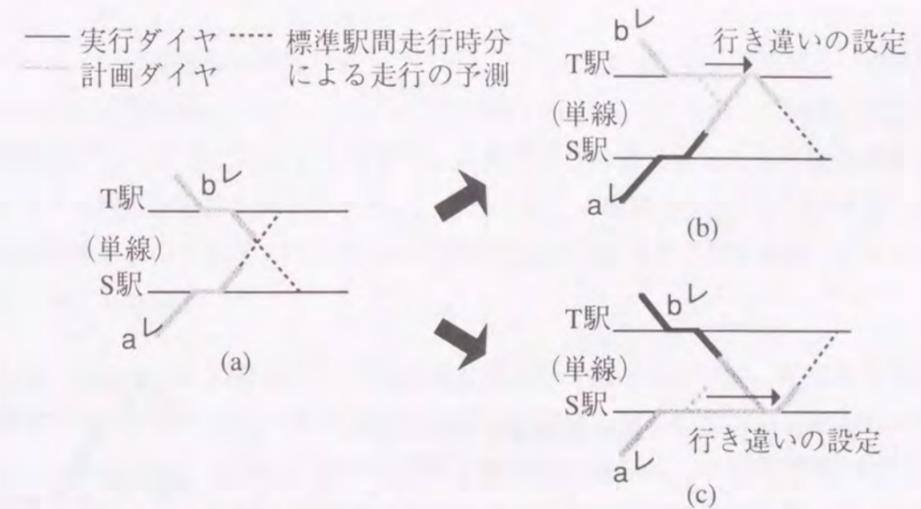


図 3.3: 行き違いの設定

可能駅) において列車  $a^L$  と列車  $b^L$  の進路が競合する。これに対して、2 列車が同等の場合は、 $a^L$  が S 駅で待避するため [(c)]、ST 間では  $b^L$  が  $a^L$  の先行対向列車となり、S 駅でのイベントの処理順序は [ $b^L$  の到着] → [ $a^L$  の出発] となる。このため、S 駅での  $b^L$  の到着イベントが未処理である (a) や (b) の時点では  $a^L$  の出発イベントを処理できない。一方、 $a^L$  が  $b^L$  より優先度が高い場合は、ST 間では  $a^L$  が  $b^L$  の先行対向列車となるため [(d)]、(a) または (b) の時点で  $a^L$  の出発イベントは処理できるが、(b) の時点では T 駅の  $b^L$  の出発イベントは処理できない。しかし、DIAPLAN では対向列車を考慮せずに決めたイベントの処理順序に基づき処理を進めるため、単線区間での運行予測ができない。

### 3.3 DIAPLAN-II における機能の拡張

DIAPLAN では、路線対象が複線のみで、かつ上下線を別々に作成する事を前提としていた。そのため、列車の走行順序が駅間で変わることは列車の始発・終着を除いてなく、駅における着発順序が変わるのは追越しの設定だけであった。一方、多様な路線を対象として考えると、複々線や路線の分岐・合流がある場合には、駅間で列車の処理順序が変わってしまう場合が生じる。また、上下線を同時に作成する場合や単線の場合、前方から列車が走行してきた時点で駅での着発順序も変わる可能性が生じる。そのため、これ

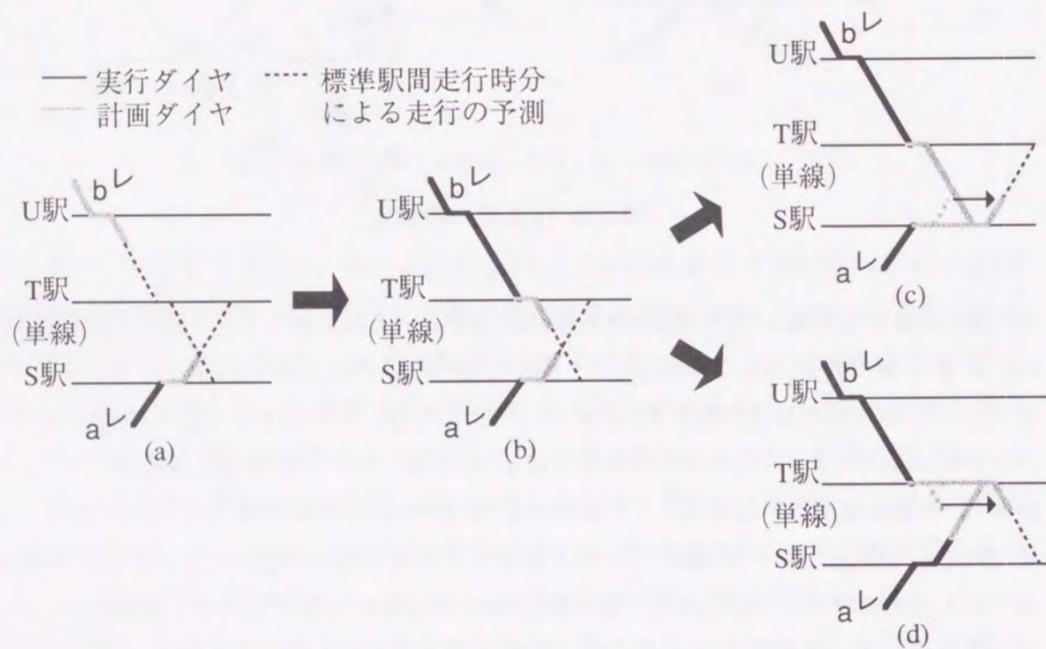


図 3.4: 単線区間における計画ダイヤ

らの事象を予測し、対処する必要があるが、DIAPLANではそのような仕組みを持っていなかった。

DIAPLANでは追越しの処理を部分シミュレーションでまとめて実施する一方、途中駅からの列車の始発は部分シミュレーションの保留設定によって対処している。そこで、同一方向および対向方向に走行する列車同士に着発順序に競合が生じる可能性がある場合を前もって各列車の走行時間から予測し、必要に応じて着発イベントに保留を設定するように保留機能を拡張すれば、DIAPLANの特徴を生かしたまま多様な路線への対応が可能になると考えられる。

そこで、DIAPLANの計画ダイヤ設定部を改良し、複々線や分岐、単線を含む路線を取り扱う上での問題に対処できるDIAPLAN-IIを開発した[56, 57, 58]。DIAPLAN-IIの計画ダイヤ設定部は、図3.5に示すように、駅間での追い越しや対向列車との行き違いを考慮した運行予測の保留と計画ダイヤの再設定を行なう機能を備えている。一方、実行ダイヤ作成部はDIAPLANと同一であることから、専門家による調整作業と計算機による自動作成を統合するというDIAPLANの特長をそのまま継承している。本節では、DIAPLAN-IIの機能を拡張した、ダイヤ設定保留方式と列車運行の再予測方式について述べる。

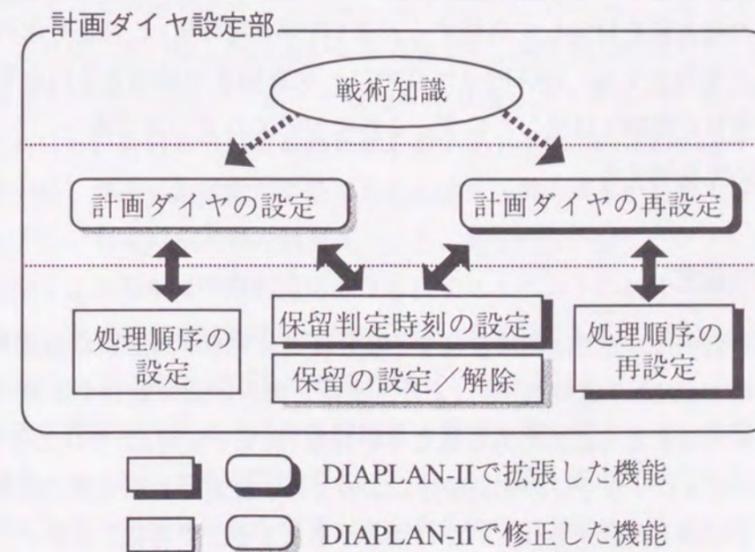


図 3.5: DIAPLAN-IIの計画ダイヤ設定部

### 3.3.1 運行予測ダイヤの設定保留方式

#### 保留の考え方

ダイヤ作成問題では、

- (1) 同一の列車に関する着発イベントは時刻順に処理する
- (2) 同一駅でおこる着発イベントは時刻順に処理する

の2つの制約条件を満たす必要があるが、全ての駅でおこる着発イベントを時刻順に処理する必要はない。この特徴を用いたDIAPLANでは、ある駅での処理を保留して、後続列車の着発イベントを先に処理することで、ダイヤ設定をやり直すことなく追い越しの設定を含むダイヤを自動作成できる。DIAPLAN-IIでは、この保留機能を拡張して、駅間での追い越しや対向列車との行き違いに対しても、ダイヤ設定をやり直すことなく、ダイヤを自動作成できるようにした。保留の設定は、

- (a) 当該駅から後方の端末駅までの間(後方区間)の状況に着目して判断する
- (b) 当該駅から進行方向にある端末駅までの間(前方区間)の状況に着目して判断する

の2つの場合に分けられる。(a)では後方区間にある全列車のうち最初に当該駅に到着する列車(次着列車)と着目する列車(判定対象列車)、(b)では前方区間にある全列車のうち最初に当該駅の前方駅を対向して出発する列車(対向次発列車)と判定対象列車との着発順序により保留を設定する。DIAPLAN-IIでは、次着列車や対向次発列車を効率良く求めるために保留判定時刻を設定したので、これについて以下の節で述べ、さらに、(a)(b)それぞれについて説明する。

#### 保留判定時刻の設定

保留すべきか否かは、後方区間に着目する場合は次着列車が当該駅に到着する可能性のある最も早い時刻(到着予定時刻)等により、また、前方区間に着目する場合は対向次発列車が前方駅を出発する可能性のある最も早い時刻(出発予定時刻)等により判断できる。しかし、部分シミュレーションの実施順序によっては、後方駅や前方駅に次発列車や対向列車の計画ダイヤがまだ設定されていない場合がある。そこで各駅に上り/下りごとに次発列車および次発列車の出発予定時刻を設定し、これらを用いて保留の設定/解除を判定する。次発列車の出発予定時刻は

- (1) 当該駅の計画ダイヤに設定された出発イベントの処理可能時刻のうち最も早い時刻
- (2) 後方駅の次発列車の出発予定時刻に駅間走行時分、当該駅での標準停車時分を加えた時刻

の早い方の時刻であり、各駅で最初に出発イベントがおこる可能性のある時刻を表す。(2)で加える駅間走行時分は後方駅の次発列車に応じた標準駅間走行時分とするが、駅間でこの列車が追い越される可能性がある場合は、当該駅間の最小駅間走行時分とする。また、駅や駅間での追い越しの可能性のために駅を最初に出発する列車を決められない場合は、その駅の次発列車は未定とする。この場合、最小の走行時分で駅間を走行するような列車が、出発予定時刻にこの駅を出発すると仮定して、次着列車の到着予定時刻や対向次発列車の出発予定時刻等を予測し、これを保留判定時刻として保留の設定/解除の判断をする。上記の手順により、各駅の次発列車とその出発予定時刻の計算は当該駅および後方駅の情報のみから計算できる。また、保留設定についても、当該駅と後方駅、または、当該駅と前方駅の情報のみから判断できる。

### 3.3.2 後方区間の状況による保留設定

複々線区間の駅や分岐駅、追い越し可能駅のように、同方向に走行する列車どうしの着発順序に競合が生じる可能性がある駅では、後方区間の状況により、着発イベントに保留を設定する。これは、追い越しや合流がある場合でも、同方向の列車どうしは駅での着発順序に基づき運行予測を行ない、ダイヤ設定をやり直すことがないようにするためである。当該駅に対して、判定対象列車が到着する前に後方区間の列車が到着する可能性がある場合、あるいは、判定対象列車が出発する前に後方区間の列車が出発する可能性がある場合は、それぞれ、判定対象列車の到着イベント、あるいは出発イベントに保留を設定する。保留を設定するか否かは保留判定時刻や着目するイベントの処理可能時刻等から判断する。この場合、次着列車の到着予定時刻が保留判定時刻である。DIAPLAN-IIではこの保留設定の判断を、駅の形態に応じた戦術知識として記述する。

以下に、後方区間の状況により保留を設定する戦術知識の例として、戦術知識  $K_{11}$  とその適用例を示す。表3.1に示す戦術知識  $K_{11}$  では、複々線区間の駅や分岐駅へ到着しようとしている列車を判定対象としたもので、保留判定時刻が判定対象列車の到着予定時刻より早ければ、判定対象列車に保留を設定する。また、保留の設定後に状況が変わり、必要がなくなれば保留を解除する。

表 3.1: 複々線・分岐駅での処理保留の戦術知識  $K_{t1}$

```

if 判定対象列車の到着可能時刻 > 次着列車の到着予定時刻
then 判定対象列車に到着保留を設定する
else 判定対象列車に保留が設定されていれば解除する
    
```

図 3.6-(a)~(c) に複々線 (駅間 TU) および分岐駅 (T 駅) を含む路線 [(a)] を対象としたダイヤの作成途中での計画/実行ダイヤを示す。(b) の時点では、U 駅、T 駅、V 駅に列車  $a^L$ 、 $b^L$ 、 $c^L$  の計画ダイヤが設定されており、複々線区間では  $a^L$  が他の 2 列車と異なる線を走行する。U 駅では  $a^L$  より先に  $c^L$  が、また T 駅では  $b^L$  より先に  $c^L$  が到着する可能性があり、 $a^L$  および  $b^L$  の到着時刻は決められない。このため、この時点では  $K_{t1}$  により  $a^L$  は U 駅で、 $b^L$  は T 駅で到着保留が設定されている。これに対して、 $c^L$  の T 駅での計画ダイヤの設定により T 駅での着発順序が決ると、 $b^L$  の保留は解除される [(c)]。同様に  $c^L$  の U 駅での計画ダイヤの設定により、 $a^L$  の保留は解除される [(d)]。

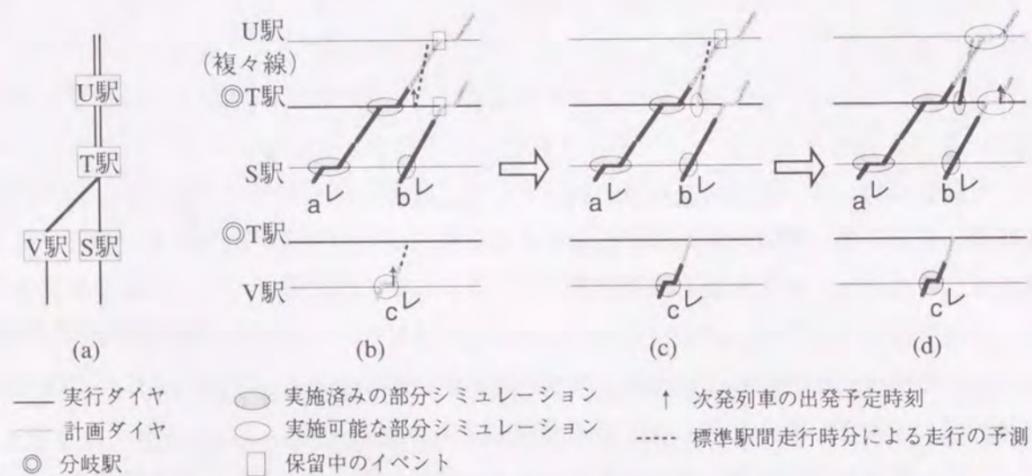


図 3.6: 戦術知識  $K_{t1}$  の適用例

3.3.3 前方区間の状況による保留設定

単線区間の駅、上下両方向に運行可能な番線がある駅、上下方向の列車が同一の転てつ器を走行することから競合を発生する駅のように、対向方向に走行する列車どうしの着発順序に競合が生じる可能性がある駅では、前方区間の状況により、着発イベントに保留を設定する。これは、上下両方向あわせた列車の着発順序に基づき運行予測を行ない、ダイヤ設定をやり直すことがないようにするためである。当該駅に対して、判定対象列車が出発する前に前方区間の対向列車が到着する可能性がある場合、あるいは、判定対象列車が到着する前に前方区間の対向列車が到着または出発する可能性がある場合に、それぞれ、判定対象列車の出発イベント、あるいは到着イベントに保留を設定する。保留を設定するか否かは、保留判定時刻や着目するイベントの処理可能時刻等から判断する。この場合、対向次発列車の出発予定時刻、または、対向次発列車の当該駅への到着予定時刻が保留判定時刻である。DIAPLAN-II では、この保留設定の判断を、駅の形態に応じた戦術知識として記述する。

以下に、前方区間の状況により保留を設定する戦術知識の例として、戦術知識  $K_{t2}$  とその適用例を示す。表 3.2 に示す戦術知識  $K_{t2}$  は、行き違い可能駅から単線区間へ出発しようとしている列車を判定対象としたものである。 $K_{t2}$  では、判定対象列車と対向次発列車の当該駅間の走行順序を予測し、対向次発列車が先に走行する可能性がある場合は、判定対象列車に保留を設定する。保留の設定後に状況が変わり、必要がなくなれば保留を解除する。なお、対向次発列車が未定の場合は、対向次発列車の優先度が最大であると想定して  $K_{t2}$  を適用する。

図 3.7 は単線 (S 駅 ~ U 駅の駅間が単線、各駅は行き違い可能駅とする) におけるダイヤの作成途中での計画/実行ダイヤを示す。(a) の時点では S 駅に列車  $a^L$  および  $c^L$ 、U 駅に列車  $b^L$  の計画ダイヤが設定されており、 $a^L$  は  $b^L$  より優先度が高く、 $b^L$  と  $c^L$  は同等とする。(a) の時点では、TU 間での走行順序を守るために、 $K_{t2.3}$  により  $b^L$  に出発保留を設定している。S 駅での部分シミュレーションの実施により、S 駅の次発列車は  $c^L$  となるが、ST 間での走行順序が決らないため、 $K_{t2.2}$  により  $c^L$  に出発保留を設定する [(b)]。これに対して、 $a^L$  の U 駅における計画ダイヤを設定した時点で行き違いを設定し、 $b^L$  の保留を解除する。また、行き違いの設定による  $b^L$  の出発可能時刻の遅延に伴い、T 駅の次発列車の出発予定時刻が更新される。これにより、ST 間の走行順序が決り、 $c^L$  の保留を解除する [(c)]。さらに、U 駅で部分シミュレーションを実施すると、 $b^L$  の T 駅における計画ダイヤが設定されるが、ST 間の走行順序を守るために、 $K_{t2.2}$  により  $b^L$  に出発保留

表 3.2: 行き違い可能駅での処理保留の戦術知識  $K_{t2}$ 

if 判定対象列車が対向次発列車より優先度が高い  
 and 判定対象列車の出発可能時刻 > 対向次発列車の当該駅への到着予定時刻  
 then 判定対象列車に出発保留を設定する  
 else 判定対象列車に保留が設定されていれば解除する

(a) 戦術知識  $K_{t2.1}$ 

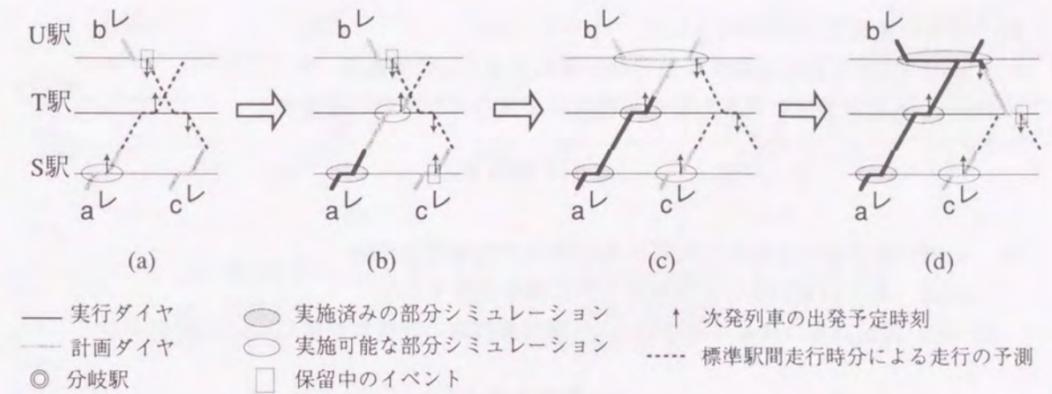
if 判定対象列車と対向次発列車は優先度が同じ  
 and 判定対象列車の出発可能時刻 > 対向次発列車の出発予定時刻  
 then 判定対象列車に出発保留を設定する  
 else 判定対象列車に保留が設定されていれば解除する

(b) 戦術知識  $K_{t2.2}$ 

if 対向次発列車が判定対象列車より優先度が高い  
 and 判定対象列車の前方駅への到着予定時刻 > 対向次発列車の出発予定時刻  
 then 判定対象列車に出発保留を設定する  
 else 判定対象列車に保留が設定されていれば解除する

(c) 戦術知識  $K_{t2.3}$ 

を設定する [(d)]。

図 3.7: 戦術知識  $K_{t2}$  の適用例

なお、行き違い不可能な駅もダイヤ作成の対象とする場合は、 $K_{t2}$  に対して以下の2点を変更すれば適用できる。

- 『前方駅』を『次の行き違い可能駅』と読み変える
- 行き違い不可能な駅では保留は設定しない

### 3.3.4 列車運行の再予測方式

複々線や分岐駅において、3.2節で述べたように、処理対象の列車(処理対象列車)が計画ダイヤの着発順序を守れない場合は、表 3.3-(a) に示すような、戦術知識  $K_{t3.1}$  により列車運行を予測しなおし、計画ダイヤを再設定する。これによりイベントの処理順序が変わる。また、処理対象列車の到着可能時刻を再設定した場合は、表 3.3-(b) に示す戦術知識  $K_{t3.2}$  により、この列車の後続列車の計画ダイヤを再設定する。これは、同じ線を走行する列車どうしの到着順序を変えないための処理である。なお表 3.3-(b) の  $\alpha$  は最小運転間隔をもとに決めた値である。

図 3.8-(a)~(e) に分岐路線(各駅間は複線)を対象としたダイヤの作成途中での計画/実行ダイヤを示す。例では S 駅から列車  $a^L$ 、U 駅から列車  $b^L$  が T 駅で合流する。(a) の時点で T 駅での部分シミュレーションを実施し、その結果、 $a^L$  の T 駅への到着時刻が  $b^L$  の

表 3.3: 計画ダイヤ再設定の戦術知識  $K_{t3}$ 

<p>if 実行可能時刻 &gt; 処理可能時刻  and 実行可能時刻以前に他列車が着発する可能性がある  then 処理対象イベントの処理可能時刻を実行可能時刻に設定する</p> <p>(a) 戦術知識 <math>K_{t3.1}</math></p>
<p>if 処理対象列車の到着可能時刻 &gt; 後続列車の到着可能時刻  and 処理対象列車と後続列車が同じ線を走行する  then 後続列車の到着可能時刻を (処理対象列車の到着可能時刻+<math>\alpha</math>) に設定する</p> <p>(b) 戦術知識 <math>K_{t3.2}</math></p>

到着可能時刻よりも遅いと判明した場合、 $K_{t3.1}$ により  $a^{\downarrow}$ の計画ダイヤを再設定すると、イベントの処理順序が変更される [(b)]。

次に、(c)に示すように  $a^{\downarrow}$ の後続列車  $c^{\downarrow}$ の計画ダイヤが既に T 駅に設定されている場合を想定する。 $c^{\downarrow}$ は  $a^{\downarrow}$ を駅間 ST で追い越せないが、 $a^{\downarrow}$ の計画ダイヤのみを再設定すると (d)に示すように 2 列車の到着順序が入れ替わることがある。そこで、 $K_{t3.2}$ により  $c^{\downarrow}$ の計画ダイヤも再設定し、到着順序に矛盾が生じないようにする [(e)]。

### 3.4 DIAPLAN-IIの適用範囲

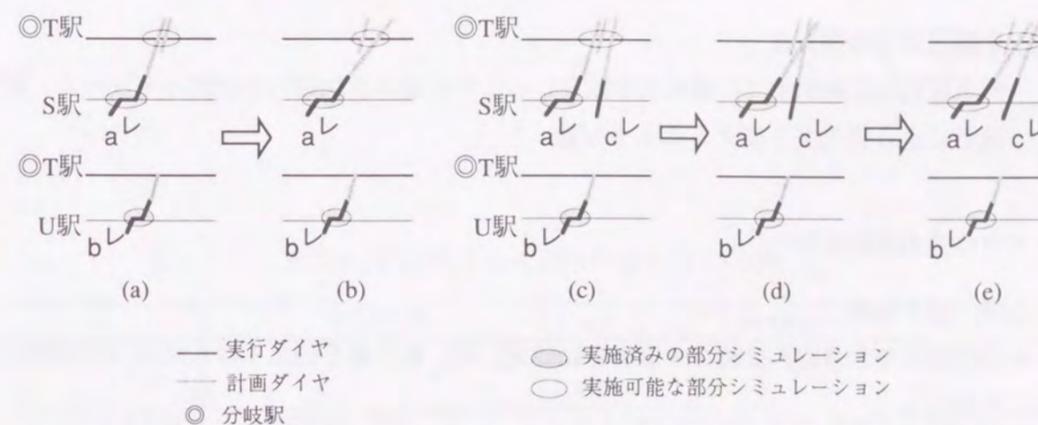
#### 3.4.1 設定可能な条件

DIAPLAN-IIで作成者が設定できる条件等を記す。下線は DIAPLAN から拡張された項目である。また、\*印は DIAPLAN では扱えなかった項目を表す。

#### 路線および駅の設定

##### (1) 隣接駅情報

各駅の隣接駅 (数に制限はない)

図 3.8: 戦術知識  $K_{t3}$  の適用例

##### (2) 番線情報

駅の番線数と各番線の運転方向 (上り / 下り / 上下共用)

##### (3) 駅間の形態

単線 / 複線 / 複々線 の別

##### (4) 構内進路\*

各番線から出発可能な駅間線路、各駅間線路から到着可能な番線、進路交差の有無

#### 列車の走行条件

停車パターン、走行パターンは列車種別毎に設定可能である。

##### (1) 走行パターン

複々線の各駅間で走行する線路

#### 駅での運行条件

##### (1) 最小進入 / 進出時隔\*

先行 / 後続 2 列車の車両種別、構内進路、通過 / 停車等の条件により設定。  
駅により、同方向の 2 列車の時隔と、異方向の 2 列車の時隔の設定が必要。

## 追い越し、行き違いの設定に関する条件

## (1) 単線区間での優先度

列車種別毎に各駅間での優先度を設定し、これに基づき駅間の走行順序を決める。時間帯により優先度を変えることも可能。

## ダイヤ作成の初期条件

## (1) 乗り継ぎ接続

分岐駅等で乗り継ぎ接続をする場合に設定。駅と乗り継ぐ列車、待ち時間の許容範囲を設定。

## 3.4.2 取り扱い可能な駅

DIAPLAN-IIが取り扱える駅の機能を記す。1つの駅が(1)~(7)の2つ以上の機能をもつこともある。

- (1) 折り返し可能駅
- (2) 分岐駅
- (3) 追い越し可能駅(追い越し線等が上下共用の場合も含む)
- (4) 行き違い可能駅(特に単線区間にあるものをさす)
- (5) 複々線にあり、急行線(主に優等列車が走行する)と緩行線(主に各駅停車列車が走行する)間の行き来可能な駅
- (6) 単線/複線/複々線の境界駅
- (7) 一般駅(路線形態に応じて以下のような駅を表す)
  - (a) 単線: 上下共用の番線が1本ある駅
  - (b) 複線: 上下各1本ずつ番線がある駅
  - (c) 複々線: 上下各2本ずつ番線があるが、急行線と緩行線との間の行き来はできない駅

また、DIAPLANとDIAPLAN-IIの相違点を表3.4にまとめて示す。

表 3.4: DIAPLAN と DIAPLAN-II の比較

	DIAPLAN	DIAPLAN-II
対象路線	複線	複線、複々線、分岐、単線、これらが混在する路線
ダイヤ作成手順	上り/下り別に作成	上り/下り合わせても可(単線では合わせて作成)
部分シミュレーションの定義	駅毎に他の駅とは独立して定義	左に同じ
シミュレーションの実施順序	戦略知識により決まり、時刻順、列車に着目した順等で実施可能(作成者が選択することも可能)	左に同じ
計画ダイヤ	始発イベントは作成開始時に設定 発イベント処理時に次駅の計画ダイヤを設定	計画ダイヤの設定方法は左に同じ シミュレーションの実施より再設定する場合がある
処理を保留する場合	追い越し可能駅で追い越される可能性のある列車は出発を保留	追い越し可能駅については左に同じ(保留判定ルールを変更) 複々線の駅間で追い越される可能性のある列車は到着を保留 分岐駅では他路線の列車の走行状況により到着を保留 単線では対向列車の走行状況により出発を保留 上下両方向に運行可能な番線がある駅、入出競合が発生する駅では、対向列車の走行状況により到着または出発を保留
追い越しの設定	後続列車の計画ダイヤ設定時に追い越しを設定	左に同じ
行き違いの設定	未対応	対向列車の計画ダイヤ設定時に行き違いを設定

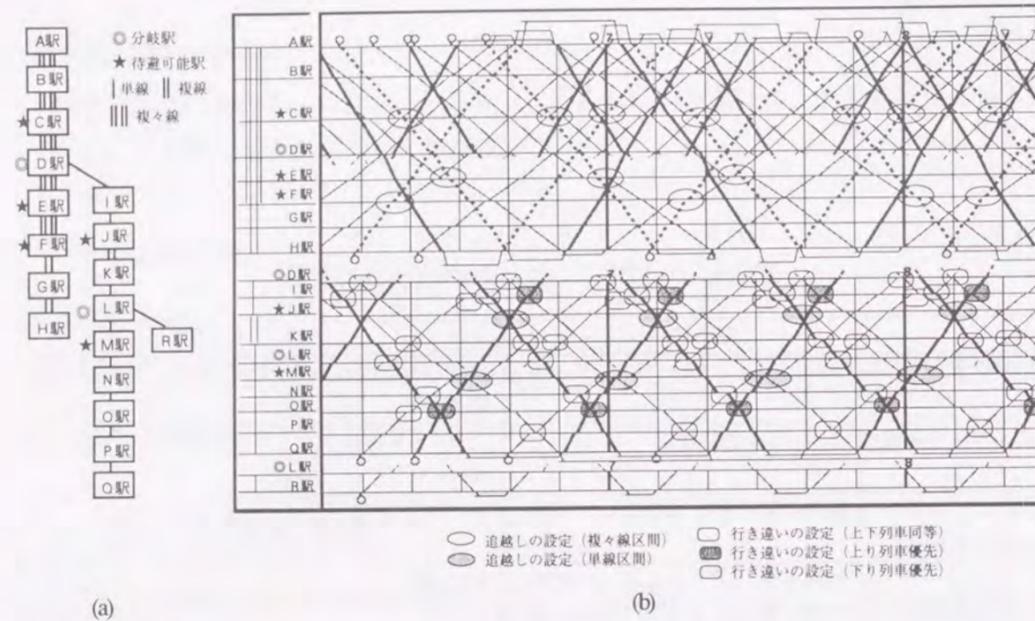


図 3.9: DIAPLAN-IIによるダイヤ作成例

### 3.5 ダイヤ作成例

提案方式の有効性を確認するために、複々線等を含む路線を想定し、EWS(ME/R7350: 処理速度 129MIPS) 上に構築した DIAPLAN-II でダイヤを自動作成した。図 3.9-(b) に示すダイヤ作成例は、同図 (a) に示す分岐駅、単線区間や複々線区間での追い越し可能駅を含む 23 駅からなる路線を対象としたものである。なお、単線区間内の駅は全て行き違い可能とする。また、列車種別は普通、準急、急行の 3 種類あり (図では、普通: 細線、準急: 太い点線、急行: 太い実線で表す)、複々線では、原則、急行は急行線、準急と普通は緩行線を走行するが、駅間 EF のみ、準急は急行線を走行する。つまり、E 駅には急行線と緩行線を行き来するための設備がある。したがって、A~E では駅間で急行が準急や普通を追い越せるが、駅間 EF では特急と準急が普通を追い越せる。さらに、単線区間では、上り (A 駅に向かう方向) 急行は全区間で、対向の普通に対して優先となるよう優先度を設定した。

図 3.9-(b) において、複々線区間では同方向に走行する列車のスジが交差しており、A~E 間では、急行が緩行線を走行する準急や普通を追い越し、EF 間では、急行線を走行す

る準急が緩行線を走行する普通を追い越すようなダイヤが提案できたことが確認できる。また、追い越し可能駅 (C 駅) では緩行線を走行する列車どうしの追い越しを提案できている。

一方、単線の駅間ではスジの交差がなく、行き違いの設定により単線に相応しいダイヤを提案できたことが判る。行き違いは、各列車の各単線区間における優先度および出発可能時刻に基づき設定され、IJ 間のように下り普通が優先度の高い上りの急行と着発順序が競合する場合は、常に普通が待避する。一方、普通どうしなど、同等列車との着発順序に競合がある場合は、競合区間への出発可能時刻が遅い方の列車が待避する。また、単線区間にある追い越し可能駅 (M 駅は番線が 3 本ある) でも追い越しが提案でき、行き違いと追い越しが同時におこるようなダイヤも提案できている。

さらに、分岐駅 (D 駅、L 駅) でも、他列車の影響を考慮にいて、ダイヤが提案できている。

この作成例は、約 70 本の列車を対象としたもので、追い越しを約 20 回、行き違いを約 50 回提案したが、作成に要した時間は約 2 秒であった。また、作成者がマウスで処理を進める駅や列車を選択し、部分的にダイヤ作成を進める場合も、操作に対する応答性は良好で、1 秒以内 (平均約 0.5 秒) で応答が返る。このように短時間でダイヤ作成ができるため、専門家が試行錯誤的にダイヤを調整する場合、思考を妨げられることなく調整の影響を確認できると考えられる。

### 3.6 むすび

本章では、ダイヤ作成における複線路線と複々線、単線、および分岐・合流を含む路線との違いに考察を加え、その結果をもとに開発した列車ダイヤ作成支援システム DIAPLAN-II について述べた。DIAPLAN-II は複線路線を対象として開発された DIAPLAN に、部分的な運行予測の設定保留機能を拡張・追加したもので、実用面で問題となる多様な路線のダイヤを自動作成できるようになった。DIAPLAN-II を用いて、複線区間、複々線区間、単線区間、分岐駅を含む路線のダイヤを自動作成した結果から、

- 分岐駅や複々線区間にある駅における他線を走行する後続列車、および、単線や端末駅等における対向列車を考慮した運行予測
- 追い越し可能駅での追い越しの提案 (複々線、単線でも可)
- 単線区間の行き違い可能駅での行き違いの提案

ができることを明らかにし、応答性も良好で実用性が高いことを確認できた。また、DIAPLAN-IIはDIAPLANをもとに開発したことから、DIAPLANで実現された専門家による試行錯誤的な調整作業と計算機による自動作成とを統合化したダイヤ作成環境をそのまま継承できる。これにより、実用面で問題となる多様な形態の路線に対しても、専門家は高品質なダイヤにするための調整作業に専念し、他の作業は計算機が受け持つ協調的なダイヤ作成支援システムが実現できた。提案システムは、複々線および単線区間を持つ京阪電鉄や神戸電鉄などの鉄道会社へも導入され、実用化されている [59][60]。

今後の課題としては、例外的な環境ではあるが、環状線タイプの路線や、24時間ダイヤへの対応を進めることで、ほぼすべての形態の路線のダイヤ作成が可能となる。また、現時点では作成したダイヤについての評価指標そのものが作成者によってまちまちであるが、ダイヤの定量的評価が可能となれば、より大局的な判断の自動化も可能となる。そのため、評価指標についての分析や、作成者が記述した評価指標に基づく最適ダイヤの作成方式の開発を目指す必要がある。

## 第4章 乗務員運用計画業務の分析と対話型作成支援モデル

### 4.1 まえがき

列車をはじめとする輸送機関の乗務スケジュールを決定する乗務員運用計画は、従来、労働協約などのさまざまな規則に基づいて少人数の専門家が手作業で長期間かけて作成してきた。しかし、近年の列車ダイヤの高密度化にともない乗務員運用計画も複雑化する一方、ダイヤ改正の頻度が増えることで作成期間の短縮が求められており、運用計画作成業務の効率化が重要な課題となっている。一方、職人芸として運用計画が作成されてきたこと、運用計画の評価指標が明確でないこと、列車ダイヤと異なり直接利用者（乗客）に評価されることがないといった理由から、長時間運転後の休憩の取り方や、各乗務スケジュールの勤務時間と休憩時間のばらつきといった、作成される運用計画の品質については従来それほど重視されてこなかった。しかし、経営の効率化の面から運用計画の品質を向上させたいという要望が増しており、そのためには、運用に必要な最小限の設備の把握や、現在設定しているさまざまな規則や条件の変更に伴いどのような運用計画を作成することが可能かを短時間で知ることが重要になる。しかしながら、乗務員運用計画問題に関しては理論的なモデル構築によるアプローチは少なく、実用化された自動作成システムは存在しない。

本章では、専門家による乗務員運用計画業務を分析・階層化し、その結果に基づき運用計画業務の専門家モデルを構築するとともに、対話型の支援システムの構築を容易とするためのデータモデルである多重組織化モデル [61, 62, 63, 64, 65] を開発する。

多重組織化モデルは階層的なデータ構造の導入により、人間が考慮しなければならない組み合わせを減らすとともに、制約条件のチェックや計画割当ての候補提示、典型的な運用パターン of 作成機能などにより、計画作成者を支援することを目的とする。また、今後の研究開発の進展に伴い、徐々に自動化レベルを高めることができるように、専門家モデルに準じた構成として、経験的知識による作成進行手順と各過程での思考単位を模擬する。

また、専門家の経験的知識を取り込みつつ、対話的に運用計画を作成するシステムを構築可能な構造とする。

## 4.2 乗務員運用計画作成問題

### 4.2.1 運用計画

乗務員運用計画問題は、労働協約などであらかじめ定められた制約条件を満たすように、一人一人の乗務員が一日に勤務するスケジュール（仕業と呼ぶ）を作成し、運転ダイヤ上のすべての列車運行に洩れがないように割り当てる問題である。運転士と車掌の運用計画を別々に作成する鉄道会社もあるが、その場合考慮する制約が異なるだけで、基本的な問題構造は変わらない。乗務員運用計画における情報の流れを図4.1に示す。

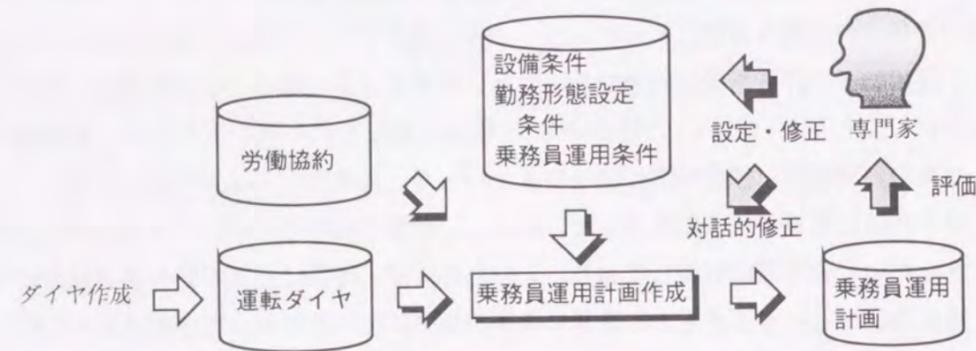


図 4.1: 乗務員運用計画の情報の流れ

与えられる固定データは

- 運転ダイヤ：営業外の列車運行も含んだ一日分の全列車の運行
- 労働協約：経営側と労働組合で合意した労働条件

などであり、これらをもとに以下のような設定条件から乗務員運用計画を決定する。

- 設備条件：交代や休憩可能な駅の設定

### 4.2. 乗務員運用計画作成問題

- 勤務形態設定条件：勤務形態（早朝勤務など）のパターン、パターンごとに作成する仕業数、乗務所に所属する乗務員数など
- 乗務員運用条件：乗務所に特有な制約、仕業作成ノウハウなど

乗務員は一日中連続して運転することはできないため、主として休憩を目的とした交代が数回必要となるが、休憩可能時間は幅を持っており、その間に乗り継ぎ可能な列車は数多いことから、大規模な組み合わせ問題となる。

例えば、図4.2(a)に示すようなダイヤに対し、U駅から乗務して最後にU駅に戻る仕業Aと、S駅から乗務して最後にS駅に戻る仕業Bを割り当てたいとする。図4.2(b)では仕業Aに $a^L$ と $b^L$ 、仕業Bに $b^L$ と $c^L$ をそれぞれ割り当てることができている。これに対し、図4.2(c)では仕業Aに $a^L$ と $c^L$ を割り当ててしまったため、T駅まで来た仕業BがS駅に戻る列車がなくなってしまい、このままでは仕業として成立しない。このように、仕業への列車の割り当て方が他の仕業に影響を及ぼすため、組み合わせの選択は慎重を要する。

各仕業は運転ダイヤの集合から乗り継ぎ可能な運転ダイヤを選択して作成することになり、制約を満たすように運転ダイヤを仕業の数だけグルーピングすると考えることもできる。割り当ての対象となる運転ダイヤは時間的に変化することがないことから、生産スケジューリング問題等とは異なり、時間の進行の概念は取り扱わず、運転ダイヤの乗り継ぎの時間的順序関係と乗り継ぎ時間が主として問題となる。列車の乗り継ぎ方を選択方法によって考慮すべき属性値が離散的に変化し、また多くの属性値が相互に影響しているため、複数の制約条件をすべて満足する制約充足解を作成することが困難である。

### 4.2.2 運用計画の基本単位

乗務員運用計画では、ある交替可能駅から次の交替可能駅までの列車の乗務、もしくは停車中の列車に対する乗務が乗務員を割り当てる基本単位として考えられる。そこで、乗務員運用計画を計算機で取り扱うために、運転ダイヤのスジ（一列車の始発駅から終着駅までの運行）を交替可能駅の着時刻および発時刻で切断したものを、図4.3のように計画作成で考慮する最小基本単位（サブユニットと呼ぶ）として定義する。すなわち、運転ダイヤは図4.4に示すようなサブユニットの集合として表現される。また、通常は列車が駅に到着する際に乗務を交替するため、図4.4のdとe、fとgのように停車を示すサブユニットと走行を示すサブユニットは常に対で考えることにする。この対をユニットと呼

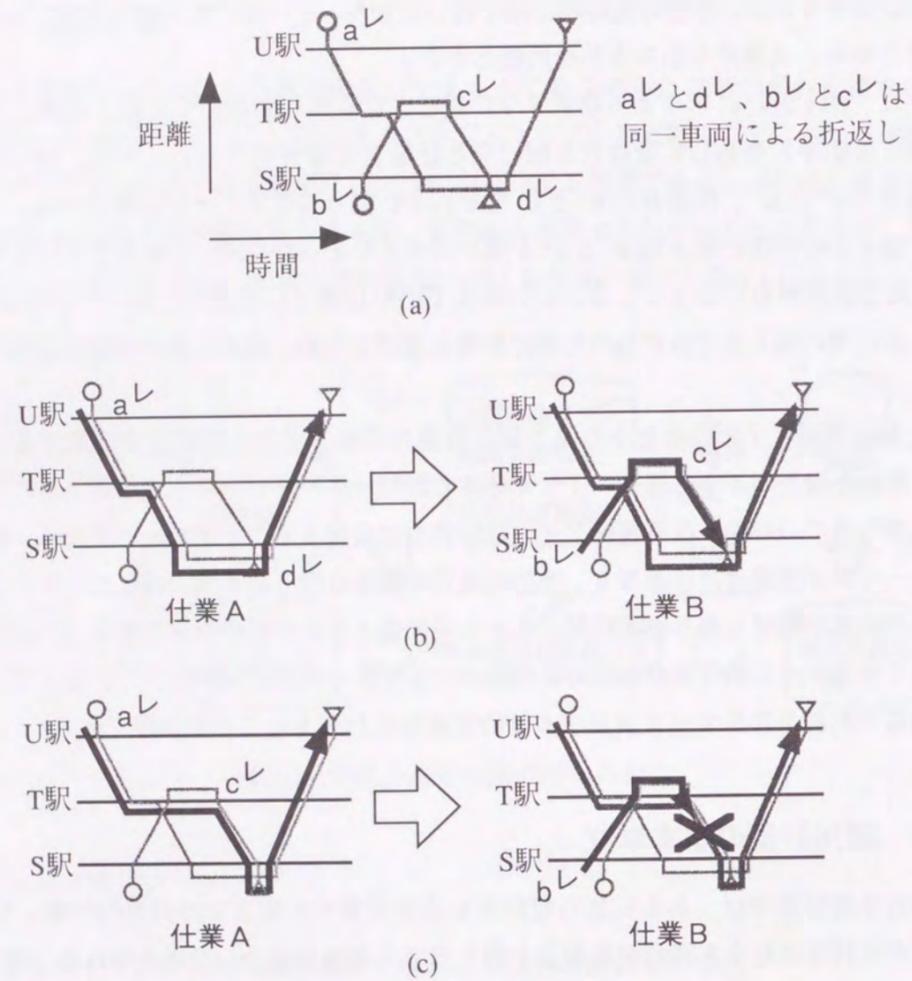


図 4.2: 乗務員の運用

び、計画作成の基本単位とする。鉄道会社や路線によっては発車直前に交替する場合もあり得るため、ユニットを構成するサブユニットの定義は変更可能とする。

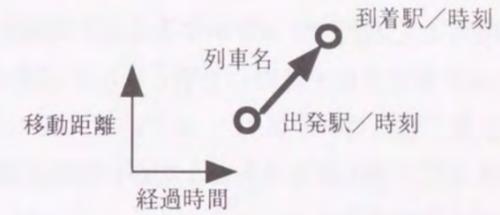


図 4.3: サブユニット

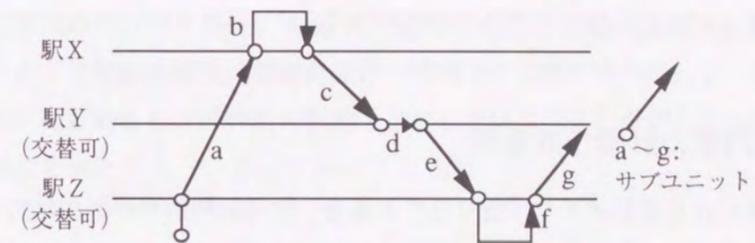


図 4.4: サブユニットの例

4.2.3 制約条件

乗務員運用計画作成問題において考慮すべき制約条件は大きく4種類に分類することができる。

(1) 物理的制約

主として設備などの関係から仕業が必ず満たさなければならない制約。1つの仕業の作成の途中段階で常にチェックする必要がある。

例：休憩設備を持たない駅で休憩することはできない。

(2) 局所的制約

1回の交代に関して満たさなければならない制約。1つの仕業の作成の途中段階で常にチェックする必要がある。

例：最大休憩時間は2時間である。

### (3) 仕業制約

1つの仕業に対して満たさなければならない制約。仕業の作成途中では判定できず、1つの仕業の作成が完了した段階でチェックする必要がある。

例：休憩時間は1つの仕業で合計1時間以上取らなければならない。

### (4) 大局的制約

全ての仕業のトータルとして満たさなければならない制約。全ての仕業の作成が完了しなければチェックする事はできない。

例：全仕業の平均拘束時間は8時間でなければならない。

これらの中には、労働協約などのように必ず満たさなければならない制約（強い制約）も、満たしていることが望ましいが例外も許される制約（弱い制約）もあり、また対象とする路線によって制約の強さが異なる場合がある。

## 4.2.4 専門家の計画作成手順

1つの仕業だけを運転ダイヤに割り当てる場合、物理的制約や局所的制約を満たす解は非常に多いのに対し、全ての仕業を運転ダイヤに割り当てようとすると、仕業同士の相互影響が非常に大きいため仕業制約を満たす解を求めるだけでも困難であり、さらに大局的制約を満たすような解を求めることは非常に困難である。このような問題に対し、専門家は試行錯誤を繰り返し、長時間かけながら手作業で運転計画を作成している。

専門家の作成手順を分析すると、次のように大きく3つの段階に分けることができる。

### (1) 大枠作成

計画の大枠を決める段階。乗務員運用では、仕業制約や大局的制約を一部無視し、まず物理的制約ならびに局所的制約を満たすように全ての運転ダイヤに各乗務員を割り当ててみる段階に相当する。言い換えれば、全ての列車に乗務員を割り当てなければならないという制約の充足を最大目標にして組み合わせの解を得るための段階である。

一般的な手順として、次に示すような手順で大枠作成を実施する事が多い。

- (a) 早朝における車庫からの列車の出庫を勤務開始とし、早朝から徐々に必要な数の早朝勤務を並行して作成する。

- (b) 同様に、深夜における車庫への入庫を勤務終了とし、深夜から徐々に必要な数の深夜勤務を並行的して作成する。作成する方向は早朝勤務と逆になる。
- (c) 早朝勤務や深夜勤務がある程度出そろった時点で、昼の勤務の作成も考慮しはじめる。食事時間を確保するために乗務員が足りなくなる時間帯から考慮しはじめることが多い。
- (d) 早朝および深夜からの作成が14～16時頃の時間帯で重なり始める。ダイヤの割り当て洩れや、勤務時間の不足などがないように、バランスよく全てのダイヤを仕業に割り当てる。
- (e) うまく割り当てが完了しなかった場合、一部の時間帯や一部の駅間、または一部の仕業の割り当てを全てやり直すなどして、試行錯誤的に計画を修正する。

### (2) 詳細作成

大枠作成で決めた計画を基に、無視した仕業制約を満たすように徐々に計画を修正する段階。まず比較的大規模に運用計画の一部同士を交換するなどして、それまでに充足した物理的制約ならびに局所的制約を違反しないようにしながら徐々に仕業制約や大局的制約を満たすように修正する。

### (3) 微調整

大局的制約の充足ならびに、運転時間や拘束時間の均等化といったさまざまな指標の最適化を目標に、計画の大枠は変更せずにさらに細かく運用計画の一部同士を交換するなどして微調整を行なう。

## 4.3 計画作成支援モデル

### 4.3.1 専門家モデル

前節の分析より、専門家は段階を踏んで問題解決を図ることで、大枠作成では一部の制約を緩和した上での大局的な制約充足解の探索、詳細作成では局所的な制約充足解の探索、微調整では局所的な最適解の探索と、作成状況に応じて問題解決の目標や問題解決手段を切り替えているものと考えられる。

計画作成の専門家モデルを図4.5に示す。専門家は状況に応じて大局的な探索を行ったり局所探索を行ったりするなど、作成段階に対応した問題解決手順を持ち、さらに各段階に対応した問題解決知識をヒューリスティクスとして保有している。問題解決手順の切

は、作成状況から段階選択知識に基づいて行う。この専門家モデルに基づいて支援システムを構築することで、専門家の思考過程と整合が取れ、対話的な計画作成が容易なシステムとなる。

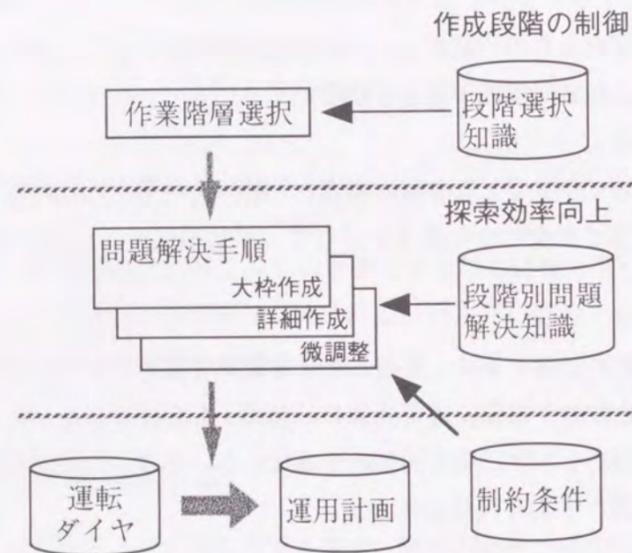


図 4.5: 専門家モデル

### 4.3.2 多重組織化モデル

取扱対象となるデータについても専門家の作成手順と整合をとり、支援効率を高めることを目的として、ユニットをさらに抽象化する多重組織化モデルと呼ぶデータモデルを定義する。

多重組織化モデルは、図 4.6 に示すように、リソースと呼ぶデータの階層的構造と、結合ネットワークと呼ぶ同一階層での制約関係表現によって構成される。個々の仕業を決める場合に物理的制約や局所的制約を前もって考慮に入れた計画単位を定義し、考慮すべき組み合わせ数を作成段階に応じて減らすとともに、運用作成過程で不変な属性値に関する制約についての無駄な計算の繰り返しをなくす。これにより、結合ネットワークに基づく割り当て候補をシステムが提示することで対話的な支援システムが容易に構築できるとともに、各階層に対応した探索アルゴリズムを用意することで、計画作成の段階的な自動化が

容易となる。

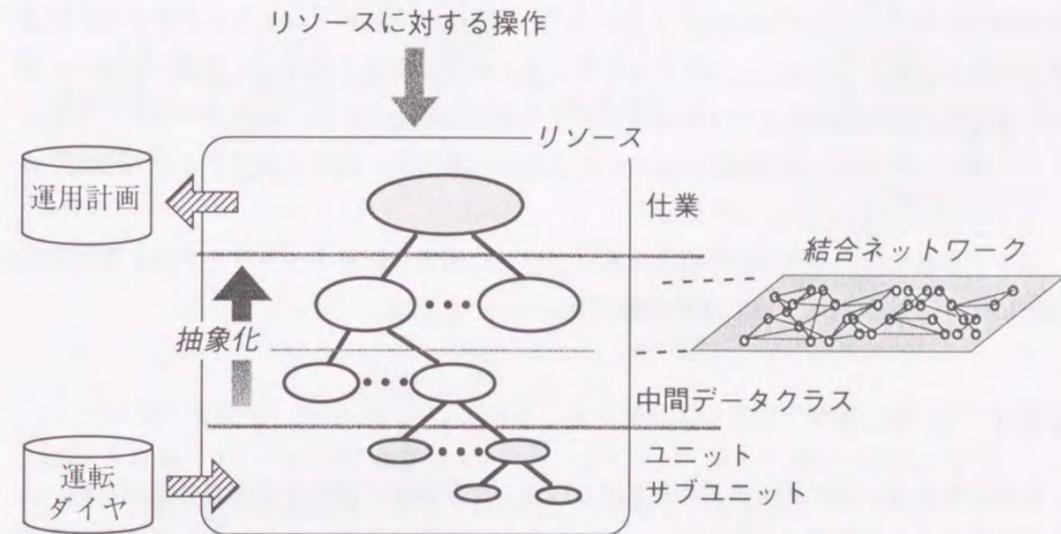


図 4.6: 多重組織化モデル

乗務員運用計画では、作成の進行に伴い制約の取り扱いが変化するとともに、データを取り扱う思考単位の粒度も変化する。そこで、大枠作成の段階では物理的制約および局所的制約のみを考慮したかなり荒い粒度でおおざっぱに計画し、詳細作成では粒度を細かくして仕業制約を満たすような最適化を考え、最後に最も細かくデータを取り扱うことで微調整を行なう。このことから、システムが取り扱うデータを抽象的な単位であるリソースで考え、作成段階に応じてリソースの抽象度を段階的に変化させればよいと考える。すなわち、大枠作成の段階では粒度の荒い単位でおおまかな割当てを迅速に行ない、最終的には粒度の細かい単位で細かい修正を行なう。

次に、どの段階においても、一回の休憩についての制約に相当する物理的制約および局所的制約は考慮しなければならない。しかしながら、これらの制約に関連する属性値は作成段階にかかわらず不変であり、仕業としての体裁が整わなくても考慮することが可能である。そこで、リソース間の乗り継ぎの可能性を結合ネットワークと呼ぶネットワーク構造で表現し、結合ネットワークで結合されたリソースは物理的制約および局所的制約を常に満たしていると考えられることで、同じ種類の制約に関して何度も計算する無駄を排除する。

多重組織化モデルにおいては、運転ダイヤをリソースの集合として捉え、結合ネットワークで結ばれた関係の深いリソース同士を結合、分離、交換と呼ぶ3種類の基本操作で仕業制約を満たすように再帰的にまとめ上げ、最上位の階層のリソースを各乗務員が勤務する仕業と見なす。すると、各階層別にリソースをまとめ上げるための機構を用意し、計画の進行度に応じて対象とする階層を選択する機能を持たせれば、専門家の手順と整合が取り、専門家の思考過程を模擬しやすくなるため、専門家に対する支援システムとしてふさわしいと考える。

以下、多重組織化モデルの特徴であるリソースの構成、結合ネットワークおよび作成の進行に伴う階層選択について説明する。

### 4.3.3 リソース

物理的制約ならびに局所的制約を考慮しつつ、営業路線の構成や乗務員の運用形態、また専門家による計画作成手法に従い、ユニットを階層的に運用パターンとしてまとめることで、関連性の深い複数のユニットやパターンを1つの上位パターンとして取り扱うことができるようにする。その結果、運用計画問題はユニットを徐々にまとめ上げて仕業とする問題と置き換えられる。そのためにデータに階層的な概念を導入し、仕業とユニットとの間に運用パターンを表現するための新しいデータクラスを定義する。この中間データクラスは複数あってもよい。これらのデータ（サブユニット、ユニット、中間データクラス、仕業）を、総称してリソースと呼ぶ。リソースは運転ダイヤを抽象化した割り当て単位であり、仕業は最も抽象度が高い単位、逆にサブユニットは抽象度が最も低い単位となる。あるリソースが所属している上位のリソースを親リソースと呼び、逆にあるリソースを構成している下位のリソースを子リソースと呼ぶ。

運転時間や休憩時間など、親リソースが持つ属性値のうち子リソースの構成に影響を受ける値は、子リソースの構成に応じて自動的に計算する。また、仕業が属する乗務所や勤務形態など、親リソースだけに設定される属性値を子リソースは親子関係を通して参照できる。

図4.7にリソースの階層構造の一例を示す。この例では中間データクラスとしてグループ、サブグループと呼ぶ2段階の階層を導入している。サブグループは路線の主要駅（休憩設備がある駅）間を休憩せずに乗務する運用パターン、グループはある特定の主要駅（勤務を主に開始/終了する駅である乗務所）から出発して同じ駅に戻って来るような運用パターンを示す。仕業はグループの集合として表現する。

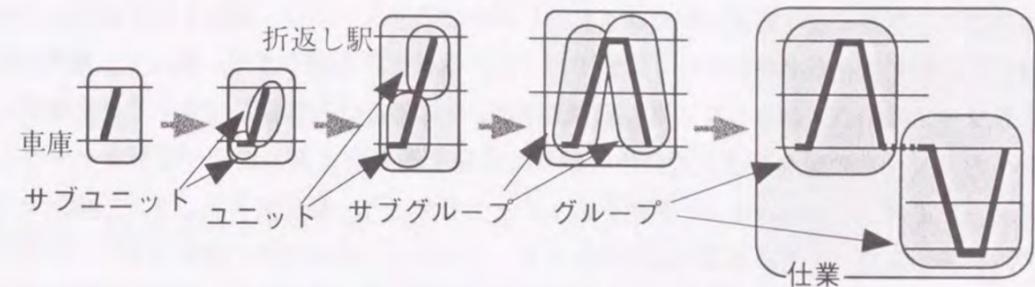


図 4.7: リソースの階層構造

このような抽象化したリソースは、対象となる路線での規則や慣例、専門家の経験的知識などに基づき、一般的な乗務のパターンとしてユニットから自動的に作成する。これにより、計画作成の初期段階である大枠作成でまず着目する上位リソースでは、ユニットを単位として考えるよりも大幅に数が少なくなるため、考慮すべき組み合わせも少なくなる。

図4.8に階層構造を導入し、上位リソースを自動作成した場合に組み合わせ単位の数が減少する様子を示す。下位レベルのリソースを徐々に典型的な乗務パターンとしてグルーピングすることで、上位レベルのリソース数が減少し、考慮すべき組み合わせ数も減少することがわかる。

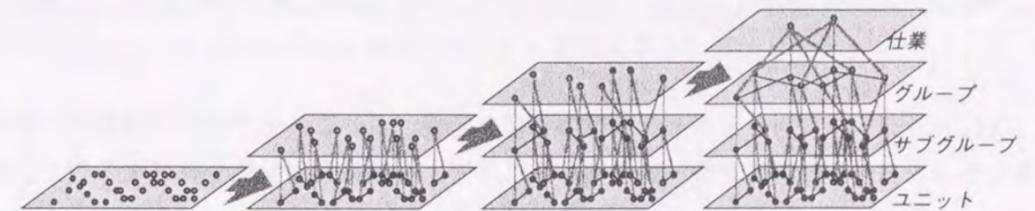


図 4.8: 階層構造と組み合わせ数

リソースの階層に応じて、着目する駅も異なる。例えば、ユニットは交替可能駅間を結びリソースだが、仕業は一般に乗務員が所属する乗務所から出発して最終的に同じ乗務所にもどり、それ以外の駅が始点/終点になることはほとんどない。また、仕業作成の都合上、ある駅から別の駅に運転せずに移動する「便乗」と呼ぶ形態が主に休憩駅で休憩を

取るために発生する場合がある。便乗可能な駅の範囲はあらかじめ規定されているため、休憩駅から便乗可能な範囲の駅で終了したり開始するリソースは、便乗を付けることを考慮してすべて休憩駅で終了したり開始するものとみなすことができる。そこで、各階層毎にリソースの始点/終点となり得る駅の範囲と、その中心となる駅を定義し、その範囲の駅へのリソースの着発を仮想的に中心駅への着発を置き換える。この中心駅をノードと呼ぶ。すると、リソースはノード間を結ぶアークであると一般化できる。また、同一ノードに到着するリソース、および出発するリソースに関し、それぞれの着発時間でソートしたリストを作成し、各ノードが保持しておく。これにより、あるリソースの次に乗り継ぐリソースの探索が容易となる。仕業の作成は時間の進行順だけではなく、深夜から明け方に向かって逆向きに作成する場合もあるが、その場合でも着発リストを逆向きに見ればよい。

各階層におけるリソースとノードの関係、当該リソースを親リソースにまとめる一般的な基準を表4.1に示す。

表 4.1: リソースとノードの関係

リソース	ノード	親リソースにまとめる基準
グループ	乗務所	仕業
サブグループ	主に休憩する駅	一般的な交代(主に休憩)がある駅以外は連続して乗務
ユニット	交代可能な駅	例外的な交代が考えられる駅以外は連続して乗務

次に、リソースに対して次の3種類の操作を定義する。これらの操作を対話的に繰り返してリソースを仕業にグルーピングすることで、乗務員運用計画を作成することができる。

#### (1) 結合操作

まず対象とするリソースを選び、さらに対象リソースから乗り継ぐリソースを選ぶ。それらを結合することで両リソースが同一の親リソースを持つことになる。まとめる相手となったリソースの親リソースは消滅する。

#### (2) 分離操作

対象とするリソースを選ぶとその子リソースのうち最初もしくは最後のリソースが

分離される。分離されたリソースには新たに親リソースが作成される。

#### (3) 交換操作

対象とするリソースが持っている子リソースで変更したいものを選ぶ。同階層で交換可能な子リソースを選ぶと、それらが交換される。

### 4.3.4 結合ネットワーク

リソースに対する結合操作や交換操作を実施しようとする際、リソースの構成によって属性値が変化するため、仕業制約を満足し、結合や交換が可能かどうかは基本的に毎回チェックする必要がある。しかし、物理的制約や局所的制約に関してはリソースの構成には影響を受けない。そこで、物理的制約および局所的制約を基に、任意の二つのリソースの乗り継ぎ可能性を前もって調べ、可能性がある場合はリソース間にリンクを張る。仕業を作成する際は、結合ネットワークで接続されているリソースのみをたどって仕業制約をチェックすればよい。すなわち、リソースの末端にあたる子リソースが持つ結合ネットワークの接続先を調べ、そのなかから仕業制約を満たしうるリソースだけを乗り継ぎの候補として考えればよくなる。

図4.9において、*T* 駅が交代可能駅であり、*D1*、*D2*、*D3*、*D4*の各列車運行が*T* 駅で分断されたリソース (*D1a*, *D1b*, *D2*, *D3a*, *D3b*, *D4a*, *D4b*) があるとする。また、リソース間は時間的順序関係を守る限り乗り継ぎ可能とする。すると、*D1a*、*D2*、*D3a*、*D4a*は必ず異なる仕業が担当しなければならないが、*D1a*は *D1b*、*D3b*、*D4b*に、*D2*および *D3a*は *D3b*、*D4b*に、*D4a*は *D4b*に乗り継ぐことができる。この場合、*D4b*は *D1a*、*D2*、*D3a*、*D4a*の各リソースを担当する仕業のいずれからも乗り継ぎが可能となる。

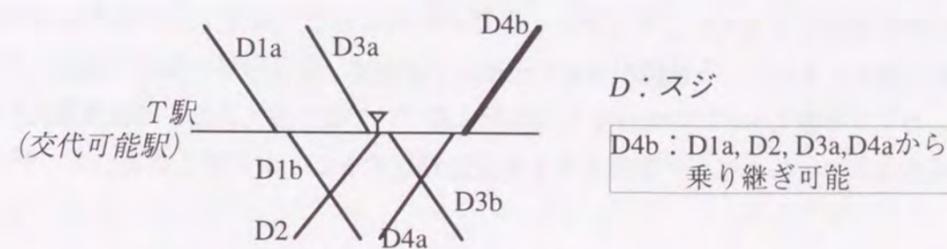


図 4.9: 仕業割当の競合

図4.9のリソースに対する結合ネットワークを図4.10に示す。

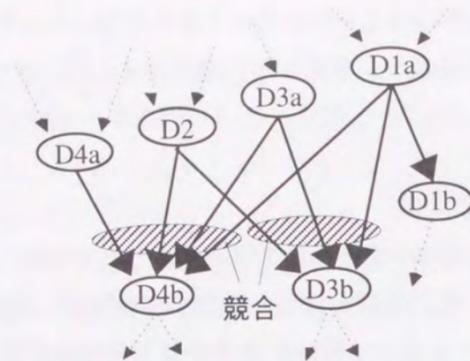


図 4.10: 結合ネットワーク

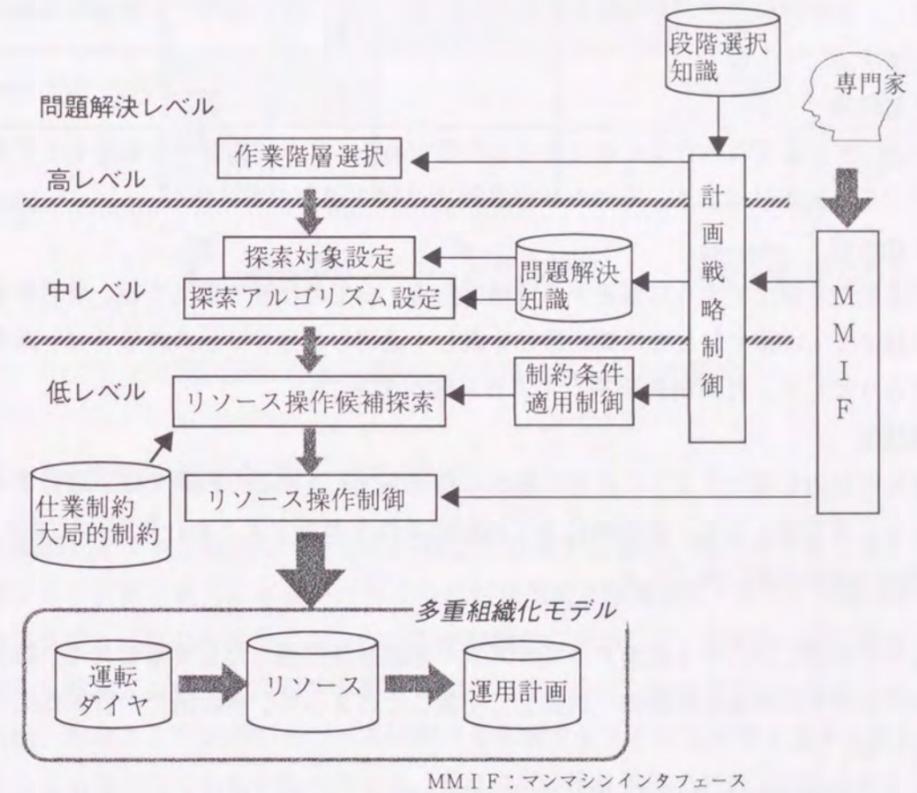
### 4.4 対話型計画作成支援システム

#### 4.4.1 支援システムの構成

専門家モデルならびに多重組織化モデルに基づく支援システムの構成例を図4.11に示す。問題解決知識は作成段階別に用意され、それぞれの目的に応じた探索アルゴリズムによる探索の効率化を図る。また、制約条件適用制御部では作成段階に応じて考慮すべき制約を選択する。計画戦略制御部は専門家の指示に従って4.4.2節で示すような作成手順に対応するリソースの着目階層を選択するとともに、問題解決知識や制約条件適用制御部の切替を指示する。仕業作成の支援機能を有するシステムを構築する場合、結合/交換/分離操作を自動化するために、それぞれの段階の目的に応じた探索アルゴリズムを用意することになる。さらに、各操作の自動化が進んだ段階で、着目階層ならびに探索アルゴリズム、および考慮すべき制約条件を作成状況に基づいて切り替えるための段階選択知識を組み込むことで、作成進行の制御もある程度自動化することが可能となる。

#### 4.4.2 運用計画作成の手順と作業階層

多重組織化モデルに基づく支援システムでは、運用計画を作成する手順として、大枠作成、詳細作成、微調整に加え、大枠作成の前段階としてパターン作成を加えた4段階の手



MMIF: マンマシンインタフェース

図 4.11: 対話型支援システムの構成

順を考慮することになる。

#### (1) パターン作成

グループ階層以下のリソースを作成する段階である。まず運転ダイヤからユニットを作成し、次に、各階層において典型的な運用パターンを作成するために、あらかじめ設定している基準にしたがい関連のあるリソース同士を結合することによって親リソースを作成する。全てのリソースがまとめられれば、徐々に着目する階層を上位に移し、最終的にサブグループをグループにまとめる。この段階では物理的制約のみを考慮する。

#### (2) 大枠作成

グループを必要数の仕業に割り当てる段階である。この段階では可能解をまず求めることを目的としており、そのため仕業制約は緩く適用する。

#### (3) 詳細作成

仕業制約を満たすように修正する段階である。全ての仕業の割当て後、着目する階層を徐々に下に移すとともに制約条件を厳しく適用し、各リソースの子リソースを交換するなどして、仕業制約を満たすように修正する。

#### (4) 微調整

大局的制約も満たすようにさらに細かく修正を加える。この段階では、着目する階層は主に最下層となる。最終的に全ての制約条件を満たすような仕業が作成できれば、運用計画の作成は終了する。

これらの手順に対応する探索アルゴリズムや問題解決知識を用意すると共に、取り扱うべき制約条件も計画戦略制御部で制御してやることによって、各段階での計画作成支援が実現される。

図4.12は計画作成の進行度に伴い、着目する階層と制約がどのように変化するかを示したものである。パターン作成と大枠作成はリソースの結合操作を繰り返すことによってより上位のリソースにまとめあげる作業、詳細作成と微調整は仕業の下位リソースの一部と他の仕業が持つ下位リソースに対して交換操作を実施する作業として考えられる。一般には左から右に段階が進行するが、状況に応じて前の段階に戻る場合もある。

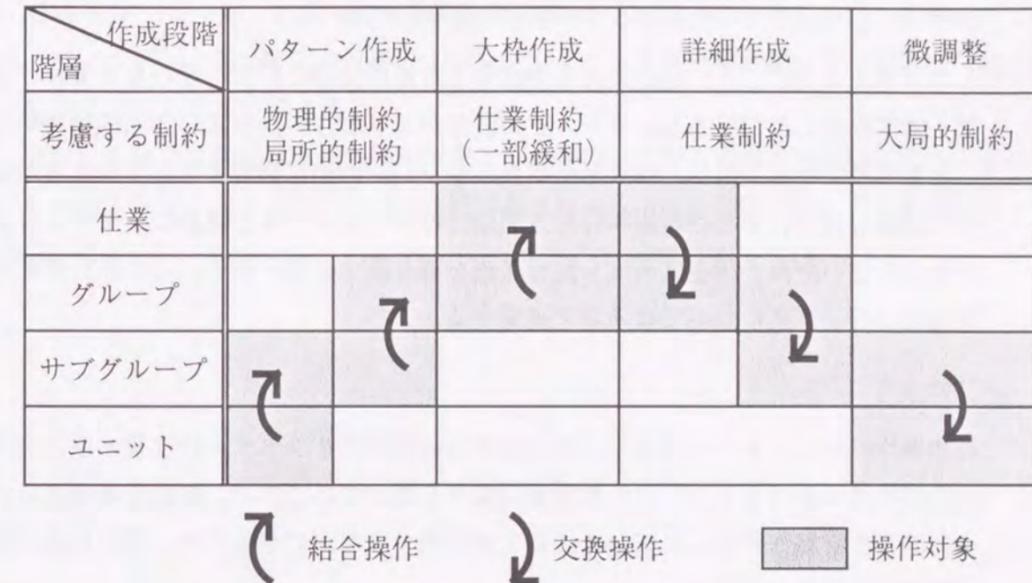


図 4.12: 作成の進行にともなう着目階層の変化

#### 4.4.3 対話型支援の対象となる操作

多重組織化モデルを採用して対話的に計画を作成する場合、複雑な作業となるのが候補探索、また計画の良否に直接かかわるのが対象選択と候補選択である。対象選択では、計画の進展度と現在の状態などから作成者が経験的に決めるが、経験的知識に基づき、作成状況から対象リソースを提示する事も可能である。また、候補選択では選択したリソースに対し、対象とした以外のリソースに対する影響を考えながら候補を選ぶ必要がある。選び方によって作成効率もかなり異なり、また選択基準は鉄道会社の方針にもかかわる問題となる。

次にリソースに対する基本操作の対話的な支援内容を示す。マウス等を利用したマンマシンユーザインタフェースを多用することで、計画作成作業が効率化される。

##### ● 結合操作

結合操作に対し、まず候補探索をシステムが支援する。すなわち、作成者が一つのリソースと評価基準を対象に選ぶと、制約条件に基づく探索により結合の対象となる候補を複数提示し、作成者が候補から一つ選択する事で二つのリソースが結合さ

れる。適用する制約は作成段階に応じてシステムが選択する。また、サブグループレベルの運用パターン作成はシステムが自動的にこなす。

このような支援により、制約条件を考慮するための複雑な計算作業なしに素早く候補を選び出すことができる。また、どの候補がふさわしいかを試行錯誤的に決めることも容易になる。但し、作成者が複数のリソースの相互影響を考慮することが非常に困難であり、またどの組み合わせ方で全てのスケジュールを組むことができるかわからないため、現在は何度も試行錯誤を繰り返す必要がある。この試行錯誤を自動的にこなす方式については次章で提案する。

#### ● 交換操作

交換操作に対しても一つのリソースに対する候補探索をシステムが支援する。交換前と交換後におけるリソースの属性値の変化を提示することで、制約を考慮するための複雑な計算作業なしに素早く候補を選び出すことができるため、試行錯誤的な交換が容易になっている。

但し、作成者はどのリソースを対象にすればどれほど改善されるかわかっているわけではない。また交換することにより他の評価基準が改悪される場合もある。そこで今後の支援対象操作として、改善したい評価基準と修正したいリソースの範囲を選べば、対象とするリソースを自動的に選択し、改善度合の高い組み合わせと、それを選んだ場合の他の評価基準の影響度合を提示する機能を追加する予定である。

#### ● 分離操作

分離操作は、基本的に割り当てのやり直しのための操作であり、分離後のリソースの属性値の変化を提示することで、試行錯誤的な作成作業を容易としている。

## 4.5 むすび

本章では、専門家による乗務員運用計画業務の分析結果に基づき専門家モデルを定義するとともに、段階的な自動化を考慮した対話型支援システム構築を容易とする多重組織化モデルを提案した。モデルを利用することによって専門家の作成手順を模擬することが容易になり、その結果、専門家の思考過程と整合の取れた形で運用計画の作成を進めることができるために、スムーズにシステムの導入が図れるとともに、専門家の知識を各階層毎に徐々に計算機上で模擬することで自動化レベルのステップアップを図ることが可能で

ある。本モデルの基本構成は実際の乗務員運用計画作成支援システムに導入され、利用されている [37, 38, 39]。現在は狭い範囲の探索機能を持ったCAD的な支援システムにとどまっているが、今後の研究の進展によってソフトウェア構造を変更せずに容易に自動化機能を向上させることができる。

なお、本章では乗務員運用計画を対象として検討したが、考慮すべき制約条件の違いなどを考慮すれば、同じジョブ作成型問題である車両運用計画問題に対しても適用可能と考えている。

## 第5章 Simulated Evolution法を用いた乗務員運用計画の自動作成方式

### 5.1 まえがき

乗務員運用計画問題に対し、従来の紙上の作業をディスプレイ上で行うような、CAD的な作成支援システム [36, 37, 38, 39] は既に実用化されている。この種のシステムは運用計画を画面上で作成することができ、制約条件のチェックや各種帳票類の印刷が可能であり、作成業務の効率化に寄与している。しかし品質を評価する機能を持たず、計画のための経験的知識も盛り込まれていないため、専門家でしか運用計画を作成できない。さらに、設備内容などの制約条件が変わってしまった場合、専門家でも試行錯誤を余儀なくされ、業務の効率は作成者の力量に大きく依存する。

業務の効率化を目的として、自動作成システムもいくつか提案されている [35, 32, 31]。これらのシステムは数理計画法を適用しており、あらかじめすべての制約条件および評価関数を定義すると、制約条件をすべて満たし、かつ評価値を最適とする解として運用計画を作成する。しかし、最適解の探索に非常に時間がかかるため、比較的単純な路線しか対象にできない。そのため、制約充足解を短時間で得たい場合や、いろいろな条件でさまざまな答えが欲しい場合には実用的でない。また、暗黙の労働協約といった定式化しにくい制約条件もすべて定式化しなければ、条件を解に反映させることはできない。さらに、現状は「最適」の定義自体が非常にあいまいであり、作成者によって異なるが、この種のシステムではどう最適化したいかという作成者の「意図」を計画作成過程で盛り込むことができない。そのため、制約条件および評価関数をうまく定式化しなければ、作成される解は従来の人間が作成した計画と大きく異なり、その計画が乗務員にとって心理的に耐え難いものである場合も考えられる。

そこで、第4章で提案した多重組織化モデルを用い、生物の進化を模擬した最適化手法の一つである Simulated Evolution 法 [42, 66, 43] (以下 SE 法とする) を用いて作成者の試行錯誤を代行する乗務員運用計画作成手法を提案する [65, 67, 68, 69, 70]。提案手法は、

専門家の運用計画作成手順と類似した手順でリソースの結合操作を自動化し、SE法に基づいてリソースの分離操作を自動化する。これにより、試行錯誤的に制約充足解を作成する。また、作成手順を作成者が調整できる枠組みによって、手作業による計画に近いものを自動作成する機能を提案する。これによって、従来手法と比較して非常に短時間に制約条件を満足する運用計画を作成することで、作成内容を作成者が評価して一部修正し、再作成させる事によって作成者の意図を計画に反映させる対話型の作成支援システムを実現する。

本章では、列車乗務員運用計画作成問題を対象とし、問題構造について考察を加え、問題構造に適した手法を提案する。また、具体的な適用例を通して提案手法の有効性を明らかにする。

## 5.2 乗務員運用計画作成問題

### 5.2.1 運用計画の指標

乗務員運用計画問題を解く上で考慮すべき指標について述べる。

#### 決定すべきパラメータ

乗務員運用計画問題で決定すべきパラメータとして、仕事を構成するリソース群に加えて、仕事の勤務形態、および乗務員の運用所属が複数の乗務所（乗務員が所属する駅）に分けられている場合には、仕事を担当する乗務所を決定することが必要である。仕事の勤務形態は一般に明け（夜勤のうちの早朝勤務）、日勤（通常勤務）、泊り（夜勤のうちの深夜勤務）があり、さらに残業相当の形態が設定されている場合がある。

#### 仕事に関する属性値

仕事の評価に用いられる属性値は、主として会社ごとに規定された計算式に基づく定量値（勤務に拘束される拘束時間、実際に列車を運転している実乗時間及び実乗キロ、駅の休憩設備などで休憩している休憩時間など）がある。しかし、運転列車種別や走行地形、連続運転時間などに基づく疲労度といった、定式化されていない主観的な属性も考慮される場合がある。

#### 仕事制約

仕事制約（一つの仕事に関する制約条件）は、各属性値の最大および最小値、乗務開始可能駅、乗務終了可能駅、乗務交代可能な駅の制限および乗務可能な路線の制限、休憩の回数などがある。これらの中には、労働協約などのように必ず満たさなければならない制約（強い制約）も、満たしていることが望ましいが例外も許される制約（弱い制約）もあり、また対象とする路線によって制約の強さが異なる場合がある。

#### 仕事の評価

仕事の評価指標として、労働時間、一回の休憩時間、休憩場所、食事時間、休憩時間の合計、拘束時間、運転列車種別、連続運転時間と休憩時間のバランス、乗務開始駅、乗務終了駅などが考慮される。

#### 運用計画に関する属性値

運用計画の評価に用いられる属性値は、仕事の属性値の平均やばらつき、乗務所が複数ある場合には乗務所ごとの仕事の属性値の平均やばらつきなどがある。

#### 大局的制約

大局的制約（運用計画に関する制約条件）は、すべてのリソースに仕事を割り当てていること、仕事属性値の平均が一定範囲に収まっていることなどがある。また、多くの場合前もって作成すべき仕事の数が与えられており、過不足なく作成する必要がある。

#### 運用計画に関する評価

運用計画の評価指標として、仕事の属性値のばらつきや仕事の数、睡眠時間の確保の程度などが考慮される。乗務所が複数存在する場合、各乗務所に所属する仕事の属性値の平均のばらつきが考慮される場合もある。

### 5.2.2 問題点

#### 制約条件

個々の仕業を作成する場合、仕業に関する制約条件が比較的緩いため、非常に多くの組み合わせが考えられるのに対し、運用計画に関する制約条件が厳しいことから、ある仕業の内容が他の仕業に与える影響が大きく、しかもその影響の範囲及び程度が予測しづらいために、制約充足解を求めることは非常に困難である。

#### 評価値と解空間

乗務員運用計画問題では、すべてのリソースに仕業を割り当てるのが至上命題であり、このことから未割り当てのリソースが残っている計画作成途中での計画全体の品質評価は従来あまり重要視されていなかった。仕業の評価に用いられる属性値は主に仕業を構成するリソースの走行距離や走行時間に依存するため、離散的な値をとるものが多い。そのため、仕業および運用計画の評価値も一般に離散的な値をとる。このことから、解空間は凹凸が激しく、局所解の山が極めて多いと推測され、局所的な探索手法では最適解を得られることが非常に難しいと考えられる。

#### 問題の規模

乗務員運用計画問題は、決定すべきパラメータがもともと非常に多い上に、対象となる路線の規模、列車の本数および密度、交代可能駅の数、乗務所の数などの要素によって問題の複雑度が大きく異なり、それぞれの値が問題の規模に指数関数的に影響する。また、労働協約に代表されるさまざまな制約によっても複雑度が異なる。小規模な大都市近郊路線でも問題の規模が非常に大きくなるため、従来の枝刈りを特徴とする分枝限定法およびルールベースシステムのアプローチでは実用的な時間で解を得る見込みがない。

### 5.2.3 専門家の運用計画作成手順

このような複雑な問題に対して、専門家は試行錯誤を重ねながら制約充足解をうまく探し出している。その手順は第4.2.4節に示したが、そのうちの大枠作成をさらに詳細に分析すると、図5.1に示す以下のようなものであると推測される。

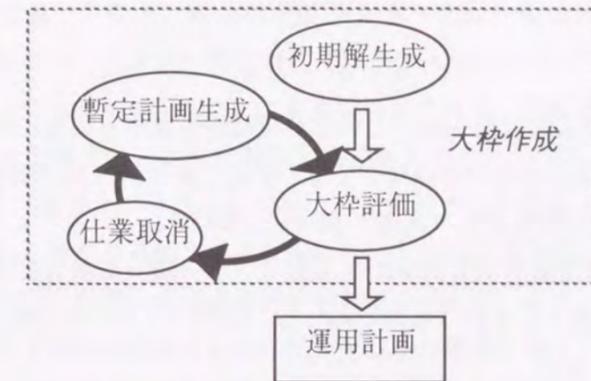


図 5.1: 専門家の作成手順

#### (1) 初期解作成

初期解として、できるだけ多くの仕業を作成し、暫定計画とする。この時、仕業作成の順序や乗務するリソースの選択は、作成状況をもとに専門家の経験的知識に従って判断する。また、弱い制約は考えない場合もある。

#### (2) 大枠評価

暫定計画および作成された仕業を評価する。この時、すべてのリソースが割り当てられていれば、微調整段階の厳密評価に移る。さもなければ、なぜ計画作成が行き詰まったか検討する。

#### (3) 仕業取消

大枠評価に応じて試行錯誤的に一部の仕業を取り消す。複数の仕業を指定してすべて取り消す場合や、一部の時間帯を指定してその中に含まれるリソースの割当をすべて取り消す場合などがある。

#### (4) 暫定計画作成

再び仕業を作成し、暫定計画とする。この時、作成順序や選択基準をそれまでとは試行錯誤的に変えることで、同じリソースで構成される仕業が作成されないようにする。未割り当てのリソースをなくすという目標をまず達成するために、一部制約を未充足のまま作成する場合もある。

## 5.3 SE法による計画作成手法

### 5.3.1 SE法

SE法は環境に対する適合度を持った個体が複数個存在する問題に対し、個体同士が生存競争を行うことにより全体の最適化を目指す手法であり、VLSIの回路設計問題[43]、発電所の補修計画問題[71]などへの適用が試みられている。

SE法では、ある解を競合的な関係がある個体（部分解）の集合と考え、解の評価関数が個体の評価値を変数として持つものとみなし、以下のフェーズに従って生存競争を行わせ、解の改善を図る[43]。

#### (1) 初期解作成

個体をランダムに作成する。

#### (2) 終了条件の評価

終了条件が満たされれば最適化を終了する。

#### (3) 適応度計算

個体の属性値から各個体の適応度を計算する。

#### (4) 淘汰

個体の適応度に応じて次の世代に生き残る個体を選択する。

#### (5) 解の再作成

[淘汰]で死滅した個体の集合をもとに新たな個体を作成する。

以下、終了条件が満たされるまで適応度計算→淘汰→解の再作成を繰り返す。

### 5.3.2 乗務員運用計画問題への適用

SE法を乗務員運用計画問題に対比すると、 $M$ 個の要素集合から乗務可能な要素を選択して、 $N$ 個の個体を作成する問題とみなすことができ、要素、個体はそれぞれリソース、仕業に対応し、個体の集合である解が運用計画となる。ところが、あるリソースに対して複数の仕業が競合することが多く、それぞれの可能性を慎重に検討しなければ仕業の作成に支障が生じる。すなわち、仕業間には競合的な関係がある。また、休憩の度合いや運転時間の長さなどから仕業の良さが評価できるが、評価の高い仕業だけを作成していてもすべてのリソースがうまく割り当てられる可能性は非常に少なく、専門家は多くの場合そこそこの仕業を平均的に作成する事でうまく運用計画を作成している。これは、運用計画

### 5.3. SE法による計画作成手法

の評価関数を1つ1つの仕業の適応度のばらつき、すなわち各仕業の属性値の関数として考えているとみなせる。さらに、SE法の適応度計算→淘汰→解の再作成のサイクルは大枠作成段階の大枠評価→仕業取消→暫定計画作成のサイクルと同一である。これらの点から、運用計画問題の大枠作成段階はSE法を適用可能であり、作成者のノウハウを利用して仕業の作成手順を制御することも比較的容易であると考えられる。

一方、SE法は遺伝的アルゴリズムと同様に、局所解からの脱出を図りながら最適化が進行するが、得られた解が最適解である保証はないという性質を持っている。しかし、乗務員運用計画問題では「最適」の定義自体が明確でないため、必ずしも最適解を得る必要はなく、少なくとも大枠作成段階において制約充足解を高速に得ることができれば十分であると考えている。そこでSE法を本問題における大枠作成の段階に適用し、個体の作成については仕業を効率よく作成する独自の仕業作成アルゴリズムを採用し、短時間で制約を満足する暫定計画を自動作成する可能性を検討する。

図5.2に提案方式の構成を示す。以下、それぞれの内容について説明する。

### 5.3.3 制約条件の取り扱い

乗務員運用計画問題にSE法を適用するにあたり、制約条件を以下のように取り扱う。

#### 制約の対象

仕業にのみ関わる制約（局所的制約）は仕業の作成および評価に関与し、運用計画全体に関わる制約（大局的制約）は運用計画の評価時に関与するものとして取り扱う。

なお、設備に関わる制約や、一度の休憩の長さに関係する制約は、結合ネットワーク作成の時点で考慮されている。

#### 制約の強さ

乗務員運用計画問題では、強い制約をすべて満足する解を求めることが大枠作成の目的であり、大枠作成の途中では多くの強い制約が満足されない解しか見つからないことが多い。また、すべての弱い制約を例外なしに満たす解の作成は不可能に近い。そこで、強い制約と弱い制約の両方を総合的に勘案した評価関数を設定し、強い制約を満たすほどよい評価値が得られるようにし、すべての強い制約が満足した解が得られた時点で計画作成を終了することにする。

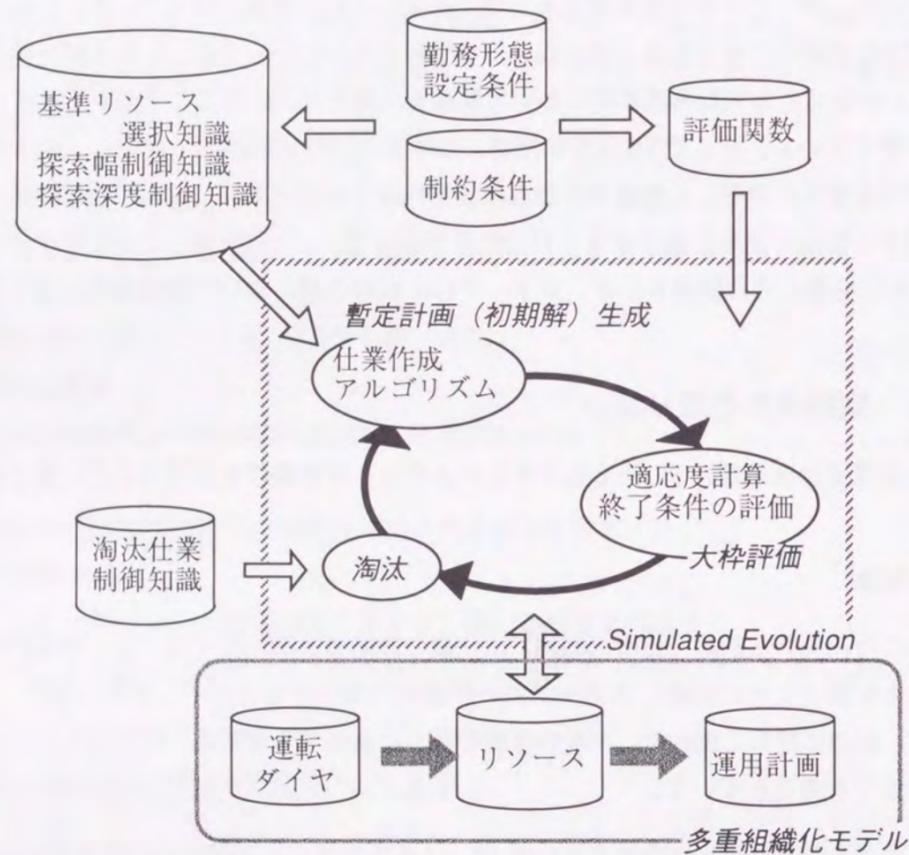


図 5.2: 提案方式の構成

勤務形態設定条件

鉄道会社や路線毎に異なる勤務形態を、専門家が想定する暗黙の強い制約を記述する形で勤務形態設定条件として用意する。勤務形態設定条件には、勤務形態毎に必要な数、さまざまな属性値の上限、下限、理想値等を記述し、これらの条件に合致するリソースの集合を仕業とみなし、SE法における個体として取り扱う。また、仕業および運用計画の評価でも参照するとともに、後述の探索幅制御知識から参照されて仕業作成の効率化にも利用される。

現在、勤務形態設定条件として設定可能な属性値を以下に示す。

- (1) 仕業作成数  
仕業数の上限値を指定する。
- (2) 勤務開始時間帯  
運転前の準備時間を考慮し、勤務開始可能な時間帯を指定する。
- (3) 実運転時間  
実際に列車を運転する時間の合計の上限値、下限値、理想値を記述する。
- (4) 休憩時間  
運転の合間に入る休憩時間の合計の上限値、下限値、理想値を記述する。
- (5) 勤務拘束時間  
運転開始前後の準備時間を含め、勤務として拘束される時間の合計の上限値、下限値、理想値を記述する。
- (6) 勤務終了時間帯  
運転後の整理時間を考慮し、勤務終了可能な時間帯を指定する。
- (7) 食事時間帯  
食事時間として扱うことができる休憩時間の開始時刻の時間帯を指定する。
- (8) 最短食事時間時間  
食事時間として扱うことができる休憩時間の下限を値指定する。

5.3.4 仕業の作成

一つの仕業の作成アルゴリズムには深さ優先探索を用い、リソースの集合が勤務形態設定条件を充足した時点で探索を打ち切る。しかし、運用計画作成問題は非常に探索空間が大きいので、通常的手法では解の探索に非常に時間がかかる。一方、乗り継ぐリソースを

選択する時には、乗り継ぎ可能な時間帯に駅を出発するリソースから選択することになるため、高密度なダイヤほど候補リソースは多くなる一方、発生する休憩時間の違いは比較的少なくなることになる。このため、候補が多いほどどのリソースを選んでも属性値の差異は発生しにくくなると言える。一般的な制約条件下では、制約充足解は探索空間の一個所に集中しているのではなく、かなり分散して存在しているものと考えている。このような点から、探索初期から厳密に探索するのではなく、探索初期には探索空間の削減を重視し、探索空間が狭まってから探索範囲を広げることで探索効率を向上させる方式を採用する。

具体的には、作成者自身が探索手順を調整することを可能にするとともに、専門家の経験的知識の利用をねらい、様々な制御知識を用意して探索を制御する。

一人分の仕業は、以下のような手順で作成される。これを作成対象仕業数である  $Nn$  回繰り返す。

- (1) 基準リソース探索知識に基づき、割り当て対象リソース集合  $Rn$  からマークが付いていないリソースを1つ選択する。
- (2) 選択したリソースを仕業の始点もしくは終点とし、 $Rn$  から結合ネットワークをたどりながら局所的制約条件を満足するリソースを探索する。その際、後述の探索幅制御知識に基づいて評価の高いリソースだけを優先的に調べる。
- (3) 最初に見つかったリソース群を仕業として登録し、 $Rn$  から削除する。
- (4) 組み合わせが見つからなかった場合、最初を選択していたリソースにマークを付ける。
- (5) 以下、マークが付いていない  $Rn$  がなくなるまで、(1)-(4)を繰り返す。

仕業作成における制御知識の位置づけを図5.3に示す。

次に、それぞれの制御知識について説明する。

#### (1) 基準リソース選択知識

専門家の作成過程に基づき、仕業の始めまたは終わりとなるリソースを選択するための知識である。例えば、早朝および深夜側から徐々に仕業を作成するといったように、うまく設定すれば探索空間を急速に削減することが可能になる。

#### (2) 探索幅制御知識

基準リソースと組み合わせで仕業として成立するリソース群を探索する際、結合ネットワーク上の各候補に対し、結合コストを算出し、コストに応じた順序で探索を再帰的に繰り返す。

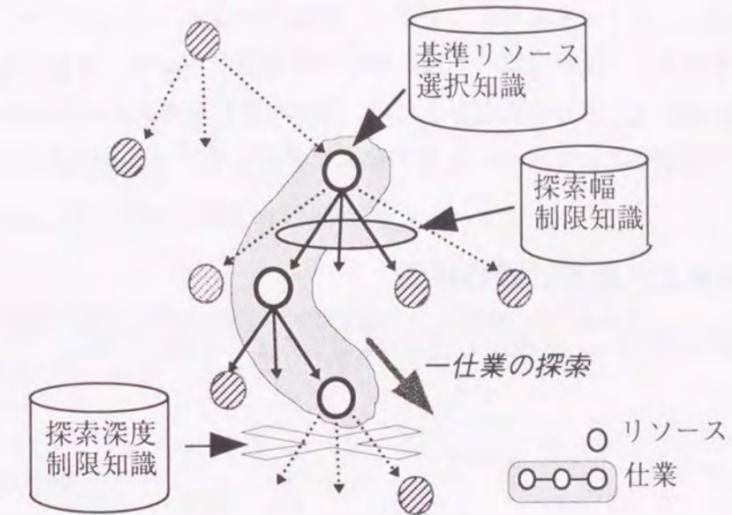


図 5.3: 仕業作成における制御知識

作成中の仕業  $x_i$  に対するリソース  $R$  の結合コストは、例えば以下のような評価指標  $F_c(x_i, R)$  で算出される。

$$F_c(x_i, R) = \begin{cases} 0 & \text{連続乗務} \\ |Rest(x_i, R) - Trest| & \text{休憩をする場合} \end{cases}$$

$Rest(x_i, R)$  :  $x_i$  から  $R$  に乗り継ぐ場合の休憩時間

$Trest$  : 一回の休憩時間の理想値

この時、必ずすべての候補を探索するのではなく、探索の進行過程に応じて結合コストの低い候補のみを探索することで、探索空間を削減する。この制御知識を探索幅制御知識と呼ぶ。探索開始時は探索の幅を狭めて解空間を急速に削減し、探索の終盤になれば、すべての候補を選択することで探索の漏れをなくす。また、同じリソースを持つ仕業が繰り返し作成されないようにして幅広い競合状態を作り出すためにも探索幅制御知識が利用される。

#### (3) 探索深度制御知識

リソース群が仕業として成立するための制約条件は一般に緩いため、仕業として成立

するリソース群が見つかった場合でも、更に複数のリソースを当該群に追加しても制約条件を満たしたままであることが多い。問題の性質上、より多くのリソースを一つの作業とする事が、探索空間の削減に寄与するが多いが、融通の仕方によってより多くの作業が成立する場面もあるため、作業の適応度および探索状況を考慮した探索深度制御知識によって一つの作業の探索を終了するタイミングを制御する。

### 5.3.5 作業および運用計画の評価

一般に、 $i$  番目の作業  $x_i$  の適応度  $f(x_i)$  は以下のように設定する。

$$f(x_i) = \sum_j (Ta_j - Tr_{ij})^2 \rightarrow \min$$

$Ta_j$  : 属性  $j$  の理想値

$Tr_{ij}$  : 作業  $x_i$  の属性  $j$  の属性値

次に、運用計画の評価は、強い制約条件がすべて満たされた段階では、前述のように作業の均等化の程度で判断されるが、まだ一部の制約が満たされていない段階では、制約の充足度を評価に追加する必要がある。

通常充足度を考慮すべき制約は、未割り当てのリソースの存在の有無である。そこで、未割り当てのリソースをそれぞれ適応度が非常に低い1つの作業とみなすことで、制約充足度を作業の適応度の関数として表現できる。また、余分に作成されてしまった作業はその分の適応度をペナルティとして追加するものと考え、例えば 適応度  $f(x_i)$  に以下のような項  $g(x_i)$  を追加する。

$$f(x_i) = \sum_j (Ta_j - Tr_{ij})^2 + \alpha g(x_i) \rightarrow \min$$

$Ta_j$  : 属性  $j$  の理想値

$Tr_{ij}$  : 作業  $x_i$  の属性  $j$  の属性値

$g(x_i)$  :  $x_i$  が未割り当てリソースに相当する作業の場合 1  
それ以外は 0

$\alpha$  : 係数

運用計画  $\bar{x}$  の評価関数  $F(\bar{x})$  は以下のように表される。

$$F(\bar{x}) = \sum_i f(x_i) \rightarrow \min$$

$\bar{x}$  : 運用計画  $\{x_i\}$  の集合

$f(x_i)$  : 作成された作業  $x_i$  の適応度

この結果、運用計画の評価関数が個体の適応度の関数に分解可能という特徴を持つため、SE 法を適用することができる。

### 5.3.6 作業の淘汰

前節で定義した作業の適応度に基づき、作成された作業それぞれの適応度を求める。あらかじめ定めた終了条件（通常、全リソースが割り当てられたこと）が満たされていない場合は、作業同士の生存競争を行わせ、作業の淘汰を図る。

運用計画の評価関数における制約条件充足度は、未割り当てのリソースの分布状況に大きく影響を受けるため、純粋に作業の適応度だけで淘汰を図っても最適化の効率は良くない。そこで、未割り当てのリソースの分布状況に応じた淘汰作業の選択指標を淘汰作業選択知識として複数用意し、作成者が自動作成実施時に指定できるようにしている。

一般に、SE 法では一度に一つの解だけが次世代に引き継がれるが、乗務員運用計画のような凹凸の激しい問題空間では、局所解に陥った場合に局所解からの脱出が困難であることが予想される。そこで、同時に複数の暫定計画を保持することを許す。これにより、最適解に近づいている可能性の高い暫定計画を重点的に選んで次世代に引き継ぐことで最適化を図る一方、解の探索点を複数持つことで局所解から脱出する可能性を増している。

具体的には、次世代の暫定計画を作成するために、現在保持しているすべての暫定計画を親として計画を再作成する。その後、暫定計画の評価値に応じ、親も含めた全ての暫定計画から設定した数だけの暫定計画が生き残るように淘汰する。

### 5.4 適用例

#### 5.4.1 仮想路線による作成効率の確認

まず、提案手法の作成効率を確認するため、図5.4に示す仮想路線における図5.5の運転ダイヤ（72列車、仕業数8、A駅で交代可能）に対し、EWS (ME/R7350, 124 Mips / 146.8 SPECmark89) 上で全数探索を行った結果と提案手法による結果を比較した。



図 5.4: 仮想路線

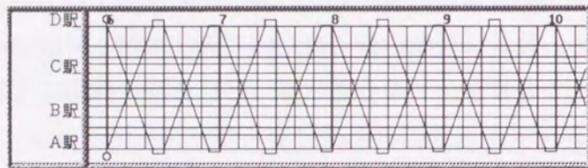


図 5.5: 対象とした運転ダイヤ(1) (一部)

全数探索では、1時間52分1秒かけて延べ約460万個の運用計画を作成し、そのうち51個の制約充足解を発見した（最初の制約充足解は30957個目に46秒で発見）。一方、提案手法では表5.1に示すように、平均119個目（14秒）の暫定計画作成で制約充足解を発見することができた。全数探索による解（一部）と提案手法による同一解の探索時間の比較を図5.6に示す。これにより提案手法が高速に制約充足解を発見できることが確認できた。

表 5.1: SE 法による作成結果(1)(仮想路線)

解 No.	所用時間(秒)	暫定計画作成数	仕業作成数	全数探索の同一解 No.
1	7	66	1695	18
2	10	81	1899	2
3	4	33	1290	1
4	14	105	3266	1
5	10	81	3066	2
6	24	219	3760	18
7	21	105	3266	2
8	24	249	5171	13
9	10	99	3121	9
10	16	156	3072	1
平均	14	119	2961	

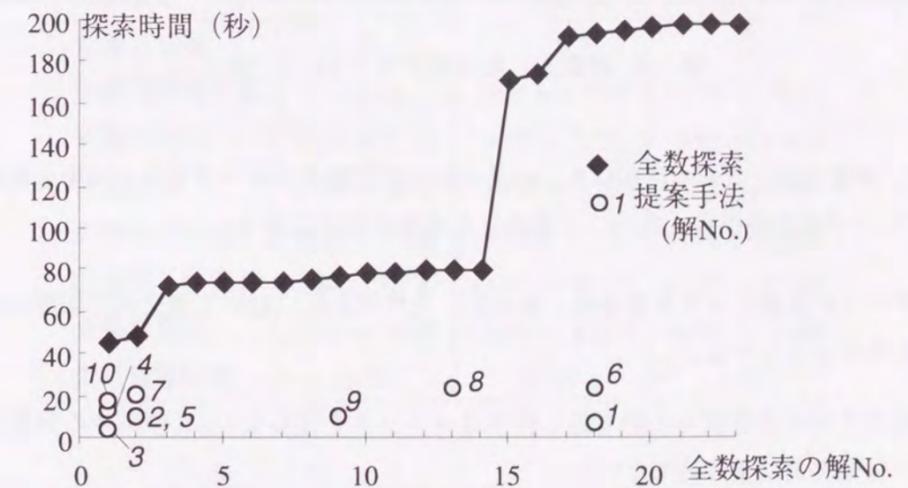


図 5.6: 解と探索時間の関係

## 5.4.2 実路線への適用

次に提案手法の実用性を確認するため、実路線における運転ダイヤを対象に、提案手法を適用し、大枠作成レベルの自動提案を試みた。路線図を図5.7に、運転ダイヤを図5.8に示す。

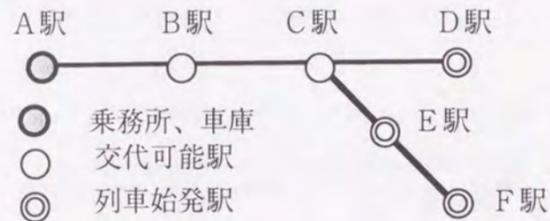


図 5.7: 適用路線

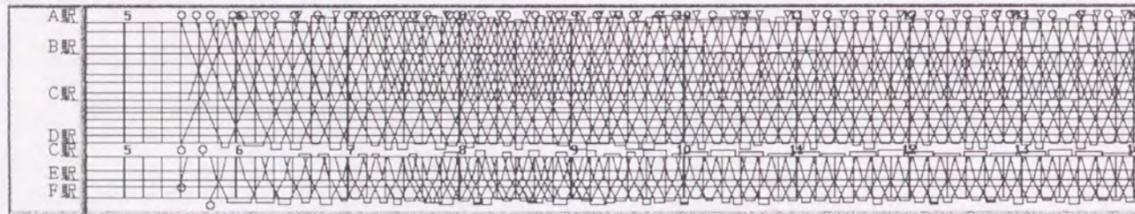


図 5.8: 対象とした運転ダイヤ(2) (一部)

まず、多重組織化モデルに基づき、パターン作成段階でグループリソースを自動作成した。グループの自動作成にあたって考慮した条件を以下に記す。

- すべての計画ダイヤを乗務所、始発駅、交代可能駅において着交代で切断したものをユニットとする。
- 始発または終着駅での折り返し停車はユニットを作らない。(停車中の列車に対しては乗務員は割り当てない)
- 交代可能駅、列車の折返し駅をノードとしてサブグループを構成する。
- 乗務所をノードとしてグループを構成する。

## 5.4. 適用例

- 休憩は A 駅のみとし、交代可能駅で交代した場合、便乗で A 駅に移動する。

上記条件に基づき、パターン作成を自動的に行った結果、作成されたサブユニットは 3,870、ユニットは 1,578、サブグループは 792、グループは 306 となった。グループレベルの結合ネットワークのリンクの総数は 13,004 となった。これは、ユニットレベルで作成した場合のリンクの総数の 36,295 の約 1/3 に相当し、単位リソースの数の減少 (1,578 → 306) と合わせ、考慮すべき組み合わせ数が相当量減少していることが分かる。

実際に、グループレベルで結合操作を繰り返し、専門家が実際に作成した運用計画を入力しようと試みたところ、1 時間以下で問題なく計画を作成することができた。これによって、対話的な支援システムの構築に多重組織化モデルを導入することで、効率よく運用計画を作成することが可能であることが分かる。

続いて、大枠作成段階の探索アルゴリズムとして本章の提案手法を適用し、306 のグループを設定した仕業数 (明け/日勤/泊り各 21 仕業) に割り当てる。制約条件、評価関数および勤務形態設定条件は実際の運用計画に基づいて想定した。勤務形態設定条件を表 5.2 に示す。なお、適用例では設定した仕業数より少ない運用計画となっても良いとする。

表 5.2: 勤務形態設定条件

勤務形態	明け	日勤	泊り
仕業作成数	21	21	21
勤務開始時間帯	~ 6:45	7:00 ~ 11:40	11:00 ~ 17:00
実運転時間	1:30 ~ 3:10	3:00 ~ 5:40	3:00 ~ 6:00
休憩時間	0:30 ~ 2:10	1:45 ~ 4:20	2:10 ~ 5:30
勤務拘束時間	4:00 ~ 6:00	7:30 ~ 9:40	7:30 ~ 12:30
勤務終了時間帯	9:30 ~ 12:30	14:00 ~ 20:20	21:30 ~ 25:00
食事時間帯	7:00 ~ 10:00	11:00 ~ 14:00	16:00 ~ 19:00
最短食事時間	0:35	0:40	0:40

10 回作成させた結果の所要時間 S、評価関数値 F、および設定仕業数より少ない仕業が作成された場合の内容を表 5.3 に、4 番目に得られた運用計画のうち、明けの仕業を図 5.9 に、日勤の仕業を図 5.10 に、泊りの仕業を図 5.11 にそれぞれ示す。

表 5.3: SE 法による作成結果 (2)(実路線)

解 No.	所用時間 S(秒)	評価値 F	設定より少ない仕業
1	94	1881	泊り 1
2	378	1684	日勤 1
3	249	1719	日勤 1
4	98	1572	
5	65	2055	日勤 1
6	132	2018	明け 1
7	252	2077	
8	246	2196	日勤 1
9	193	2007	日勤 1
10	362	1608	日勤 1
平均	207	1882	
実際の運用計画		1900	

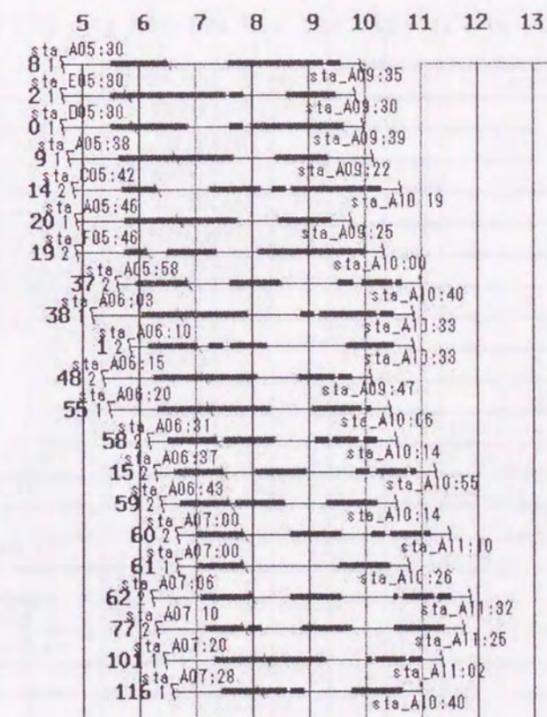


図 5.9: 作成された運用計画の例 (明け)

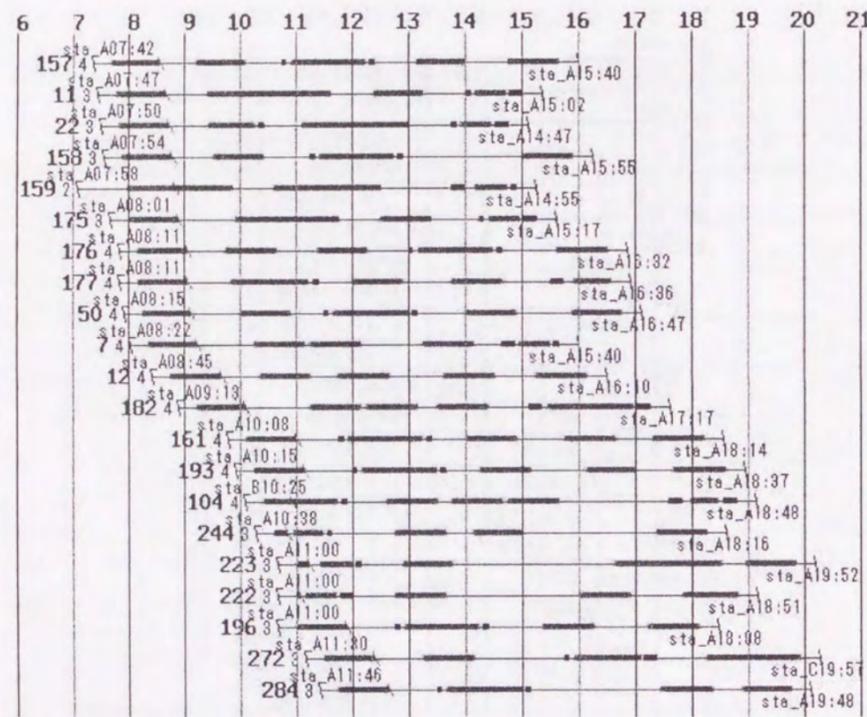


図 5.10: 作成された運用計画の例 (日勤)

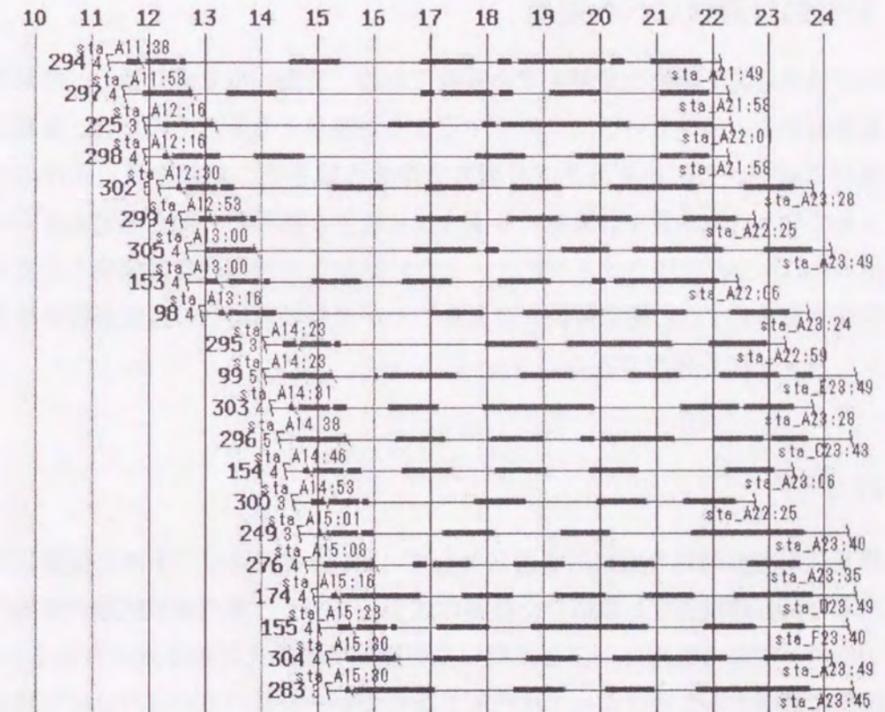


図 5.11: 作成された運用計画の例 (泊り)

この結果では、平均3分27秒で制約充足解を得られた。作成時間が数時間以上かかる文献[35, 31]の手法と比較すると、対象路線および運転ダイヤの規模はおおむね同程度でありながら、非常に短時間で制約充足解を求めることができている。また、8回は実運用で設定されている作業数よりも少ない作業数で運用計画を作成したことから、設定した条件のもとでは実運用より効率の良い運用計画を設定することが可能であることが明らかとなった。

### 5.4.3 対話的計画作成への適用

提案手法では短時間で制約充足解を求められるため、自動作成を繰り返し、結果の評価に応じて勤務形態設定条件を対話的に修正することが容易となる。そのため、最初は勤務形態設定条件に緩やかな制約を与えて計画の大枠を作成させ、結果を設定条件にフィードバックさせて徐々に高品質な計画を得るようにしたり、結果の一部を固定あるいは修正し、残った部分のみを再作成させるなどといった対話的な計画作成支援環境として利用することが可能である。また、逆に制約を変えることが運用計画にどの程度影響を与えるかのシミュレーションにも利用できる。

## 5.5 むすび

列車乗務員運用計画問題の実用的な解法として、SE法を適用した手法を提案した。本手法は専門家の試行錯誤過程と類似した計画作成手法であり、専門家の経験的知識を組み込みやすいため、従来の数理計画法と比較して短時間で制約充足解を求められる。また、大枠作成段階に適用することによって専門家でなくても一定レベルの運用計画を作成することが可能となる。さらに、ユーザが作成手順を制御できる枠組みを提供しており、問題に応じた作成の効率化や洗練化を可能としている。本手法は最適解を得られる保証はないものの、中規模の実路線データを対象に、実際に数分で制約充足解が求められることを確認しており、小～中規模路線を対象に試行錯誤を行う実際の計画の支援に適した手法であるといえる。

一方、より大規模な路線に対する適用への期待が大きいですが、ある非常に複雑な路線を対象にしたところ、現時点では制約充足解を探索できるまでには至っていない。この理由として、対象路線では非常に運用条件が厳しく、実際の運用では局所的な制約や強い作業制約の一部までも例外的に一部緩和した計画しか立案できていないことから、本来、制約充

足解が存在し得ない問題である可能性が上げられる。しかしながら、これを証明することは非常に困難である。専門家へのインタビューを繰り返してノウハウを分析し、制御知識を洗練化するなどして作業作成アルゴリズムを洗練化することで、残ってしまう未割り当てのリソースを減らそうと試みているが、どの程度の規模にまで実用可能かはさらに多くの路線を対象に検討を重ねる必要がある。

## 第6章 結論

本研究においては、列車運転計画問題のうちのダイヤ作成問題および乗務員運用計画作成問題を対象とし、局所判断を自動化し、作成者の意図をフィードバックさせつつ高速に計画を作成することで、試行錯誤による対話的作成を支援する方式を提案した。

本論文では、これらの成果を以下の5章に分けて述べた。

第1章の序論では、運転計画の部分問題の問題構造を分析し、基本データ作成型、ダイヤ作成型、ジョブ作成型、資源割当型の4種類に分類されることを示した。そのなかで、システム化が遅れているダイヤ作成型問題およびジョブ作成型問題に着目し、これまでのシステム化技術、ならびに解決すべき課題について述べ、本論文の目的と位置づけを明らかにした。

第2章では、運転計画の基本となるダイヤ作成型問題について、問題構造ならびに既存システムの問題点について考察を加えた。これまで提案されてきた支援システムは単純作業のみを計算機化したCAD的システムや、実用化までには課題の多い自動化システムが多数を占めていた。これに対し、より実際的なアプローチとして、追越し設定を含む局所的問題であるダイヤ設定を自動化し、ダイヤ作成に伴う複雑な作業を軽減するとともに、実現が困難な大局的判断は作成者に委ねる方法を考案した。また、考案手法に基づき、計算機主導の問題解決が作成者に理解しやすく、作成者主導の問題解決との相互切り替えが容易な対話型の作成支援システムを開発し、自動作成途中でも作成者が大局的な評価に応じた試行錯誤的な修正が可能なシステムを実現した。

第3章では、第2章で提案した手法をより複雑な路線に対応させるための拡張方式を示した。2章の方式では着目した駅の一つ前方ならびに一つ後方の駅の状態を参照して局所的な問題解決を行っていたが、これを影響がありうるすべての駅の状態まで参照しつつ、効率的に計画ダイヤ設定を実施するための列車運行予測方式ならびにダイヤ設定保留方式を考案し、複雑な路線への対応を実現した。この方式に基づき、第2章で開発したシステムの特長はすべて保持しつつ、単線や複々線、合流や分岐を含む、多様な形態の路線でダイヤの自動提案を可能とする実用的なシステムを開発した。

第4章では、乗務員運用計画で考慮すべき制約条件ならびに作成手順を分析した。また、

分析結果に基づき専門家モデルを定義するとともに、専門家の思考過程に基づいた階層的なデータ構造である多重組織化モデルを提案した。本モデルの導入により、考慮すべき組み合わせ数を減少させつつ、専門家の思考過程と整合の取れた手順で計画作成を進め、経験的知識も活用することができる対話的な計画作成支援システムを構築可能とした。

第5章では、第4章で提案した多重組織化モデルにおける大枠作成段階において、乗務員運用計画の自動提案方式を考案した。考慮すべき制約、運用計画の評価指標ともに明確でないこと、運用計画の評価は作成途中段階では不可能なことから、運用計画の作成は試行錯誤の繰り返しが必要となる。この過程を自動化するために、専門家の知識を利用して探索を効率化するとともに、Simulated Evolution手法を適用し、考慮させる制約を入力すると制約を充足した運用計画を短時間で自動提案する方式を提案した。また、実規模レベルのダイヤに適用し、提案方式の有効性を確認した。

次に、今後の研究課題についてまとめる。

ダイヤ作成問題に関しては、本論文で提案した方式によって複雑な形態をもつ路線に対しても作成支援システムを構築可能となっており、実際に多くの路線に対して適用され、計画作成の効率化が実現されている。しかしながら、例外的な環境ではあるが、環状線タイプの路線や、24時間ダイヤについてはまだ対応できていない。また、現在は作成したダイヤを専門家が評価した結果に基づき、初期条件を修正したりダイヤそのものを修正することで高品質のダイヤを作成しているが、この修正作業の自動化も今後必要であると考えられる。実現にあたっては、作成したダイヤについての定量的評価が必要になるが、評価指標そのものが作成者によってまちまちである。そのため、評価指標についての分析や、作成者が記述した評価指標に基づく最適ダイヤの作成方式の開発を目指す必要がある。

乗務員運用計画作成問題においては、現在は中規模のダイヤにおいて大枠作成段階での自動提案がある程度実現可能になったというレベルであり、今後はまず大規模ダイヤでの実用性を確認する必要がある。そのためには、現在は比較的単純な実装に過ぎない探索手法の効率化[72, 73]がまず必要と考えられる。また、詳細作成段階における制約充足解の探索手法も今後検討する必要がある。

また、自動化が進んだ次の段階では、ダイヤの作成と資源運用計画を統合的に取り扱うシステム、すなわち部分問題として意識せずにシームレスに調整可能なシステムへの要望が高まると予測される。そのようなシステムの実現には、上流の作成結果を下流の問題の入力としてリアルタイムに取り扱える枠組みの構築が必要となる。ダイヤ乱れ時に、追越し順序を変更したり列車を運休させることで迅速に通常ダイヤへ復旧させる運転整理問題では、ダイヤの修正と資源の再配置を同時に行なう必要があるが、現状では資源の

再配置まで考慮した支援システムは実用化されていない。上記の枠組みが構築できれば、このような支援システムの開発も可能となる。

## 謝辞

本研究の全過程を通じて、終始懇切なるご指導とご鞭撻と格別のご配慮を賜りました、大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻 薦田 憲久 教授に謹んで深謝の意を捧げます。

本研究をまとめるにあたり、貴重なお時間を割いていただき、丁寧なるご教示を賜った大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻 西尾 章治郎 教授に謹んで深謝の意を捧げます。

大学院博士後期課程において、情報システム工学全般に関して懇切なるご指導とご助言を賜りました大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻 村上 孝三 教授、白川 功 教授、藤岡 弘 教授、下條 真司 教授に謹んで深謝の意を捧げます。

本研究を遂行するにあたり、格別のご指導を頂き、有益なるご助言をいただいた大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻 大川 剛直 助教授、一階 良知 助手に心から御礼申し上げます。

著者が大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻博士後期課程に在学する上で、終始暖かいご指導とご鞭撻を賜った、三菱電機（株）産業システム研究所所長 中堀 一郎 博士、ビル・交通システム開発部部长 山本 哲 博士に心から御礼申し上げます。

また、本研究を遂行する上でのさまざまなご支援、ご教授、ご討論、ご協力をいただいた三菱電機（株）産業システム研究所の坂口 敏明 博士（現 Mitsubishi Electric ITA）、福田 豊生 博士（現関西学院大学総合政策学部）、駒谷 喜代俊 博士、石岡 卓也 博士、匹田 志朗氏（現稲沢製作所）、明日香 昌氏、岩田 雅史氏、前田 卓志氏、高橋 理氏に心から御礼申し上げます。

また、第3章の研究半ばで惜しくも逝去された三菱電機（株）産業システム研究所の北川 英裕美氏にはここに心から哀悼の意を捧げます。

本研究のソフトウェア開発全般にわたってご支援をいただいた三菱電機（株）系統変電・交通システム事業所電鉄システム部の森原 健司氏、館 精作氏、平野 文弥氏、福田 司朗氏、山口 文敏氏、棟田 恭弘氏、開発部の石原 正彦氏、角野 敏子氏を始めとする多

くの方々には深く感謝申し上げます。

筆者の所属している薦田研究室の池内 智哉氏（現三菱電機（株）産業システム研究所）ならびに竹田 真也氏には、乗務員運用計画の自動作成方式の研究にあたり、共同研究者としてご協力をいただきました。また、同研究室の諸兄には本研究の遂行にあたりさまざまな面でご協力をいただきました。ここに記して深く御礼申し上げます。

最後に、終始暖かい励ましと協力をくれた妻と家族に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 長谷川豊：トラフィック制御システムにおける分散管理，計測と制御，Vol. 26, No. 1, pp. 57-61 (1987).
- [2] 片岡健司，駒谷喜代俊，角野敏子，徳丸真：運転計画システムの開発，電気学会交通・電気鉄道研究会，pp. 29-38 (1993).
- [3] 野末尚次：鉄道における計画支援システムの現状と課題，電気学会論文誌C分冊，Vol. 115-C, No. 5, pp. 628-633 (1995).
- [4] 曾根悟：鉄道における情報・システム技術の課題，電気学会論文誌C分冊，Vol. 115-C, No. 5, pp. 616-621 (1995).
- [5] 稲田伸一，飯田善久：電子計算機による列車ダイヤ作成，情報処理学会論文誌，Vol. 10, No. 4, pp. 199-207 (1969).
- [6] 福森孝司：列車運行の計画・運用・制御とコンピュータ，第29回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム，pp. 115-119 (1992).
- [7] 飯田善久：マンマシンによる意志決定手法の列車計画への応用，鉄道総研報告，No. 1257 (1984).
- [8] 辻村和人，宮島弘志：輸送計画システム（トラップス），*JREA*，Vol. 29, No. 11, pp. 41-44 (1986).
- [9] 小樽宏明，飯塚まこと，番野武，小早川清：日本国有鉄道納入輸送計画システム，東芝レビュー，Vol. 42, No. 7, pp. 533-536 (1987).
- [10] 大川水澄：列車ダイヤ作成システム (DIAPS)，鉄道総研報告，Vol. 2, No. 1, pp. 2-10 (1988).

- [11] 石井信邦, 酒匂信尋: 列車ダイヤ・仕業表システム, 第25回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp. 138-142 (1988).
- [12] 矢尾弘, 林高, 柚原薫, 佐野弘, 福森孝司, 今里英之, 三重野雄資: 近鉄ダイヤ作成システム, 第29回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp. 130-134 (1992).
- [13] 佐久間勇, 石川修, 池田圭吾, 梶川博司: 京成電鉄ダイヤ作成システム, 第31回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp. 139-142 (1994).
- [14] 中村達也, 寺村誠之: JR西日本ダイヤ作成支援システム, *JREA*, Vol. 37, No. 8, pp. 24-27 (1994).
- [15] 山下修, 大川水澄, 岡田和宏: 列車ダイヤ計画支援システム (DIAPS), 第32回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp. 117-120 (1995).
- [16] 福森孝司, 佐野弘, 長谷川利治, 坂井利之: 人工知能の手法を導入した列車ダイヤ作成のための基本アルゴリズム, 電子通信学会論文誌, Vol. J69-D, No. 4, pp. 569-579 (1986).
- [17] 鶴田節夫, 鬼塚武郎: 協調推論型知識情報処理の位置方式—列車スケジューリングを具体例とした提案と評価—, 情報処理学会論文誌, Vol. 30, No. 4, pp. 427-437 (1989).
- [18] 漆崎博, 柳井繁伸, 鶴田節夫, 左藤友良, 小野関勝巳: 札幌市交通局納め列車ダイヤグラム作成支援システム, 日立評論, Vol. 71, No. 8, pp. 41-46 (1989).
- [19] 辻村和人, 長瀬純, 藤原裕二, 高橋浩樹, 池田克己, 田中秀己, 小島昌一: 東海道新幹線ダイヤ作成システム, 第28回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp. 131-135 (1991).
- [20] 富井規雄, 坂口隆: 列車ダイヤシステムのためのフレームワーク, 鉄道総研報告, Vol. 11, No. 8, pp. 19-24 (1997).
- [21] 石田真也, 奥村滋樹: オブジェクト指向技術を用いたダイヤ作成支援システム, *Computer Today*, Vol. 52, pp. 12-17 (1992).
- [22] 奥村滋樹, 石田真也: ダイヤ関連システムの開発事例, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J79-D-I, No. 10, pp. 616-620 (1996).

- [23] Hooghiemstra, J. S.: Design of regular interval timetables for strategic and tactical railway planning, in *Proc. of COMPRAIL'94*, Vol. 1, pp. 393-402 (1994).
- [24] 中川喜博, 関孝義: 阪急電鉄におけるコンピュータによるダイヤ自動作成システムについて, 第26回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp. 319-323 (1990).
- [25] 岡孝生, 鶴田節夫: 鉄道業界におけるエキスパートシステム—列車ダイヤ作成支援エキスパートシステム—, 日立評論, Vol. 75, No. 2, pp. 177-180 (1993).
- [26] Sousa, J. F.: A computer based interactive approach to crew scheduling, *European Journal of Operation Research*, Vol. 55, No. 3, pp. 382-393 (1991).
- [27] 岩崎栄一, 浜崎恭行: 乗務員運用作成システムの開発, 第30回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp. 23-27 (1993).
- [28] 横山勇, 木村幸男, 古賀澄夫: 新幹線乗務員運用作成, 第17回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp. 147-151 (1980).
- [29] 柳信治, 岡崎敏郎, 矢野純一, 山本勝則, 梶井金徳, 笠間誠一: 西日本鉄道株式会社における乗務員ダイヤ作成システム, 日立評論, Vol. 77, No. 12, pp. 47-50 (1995).
- [30] 坂口隆, 野末尚次: 制約論理による乗務員交番表作成, 鉄道総研報告, Vol. 10, No. 4, pp. 29-34 (1996).
- [31] Wren, A., Kwan, R. S. and Parker, M. E.: Scheduling of rail driver duties, in *Proc. of COMPRAIL'94*, Vol. 2, pp. 81-89 (1994).
- [32] Kwan, A. S. K., Kwan, R. S. K., Parker, M. E. and Wren, A.: Producing train driver shifts by computer, in *Proc. of COMPRAIL'96*, pp. 422-423 (1996).
- [33] Morgado, E. M. and Margins, J. O.: Managing change in scheduling data, in *Proc. of COMPRAIL'96*, pp. 479-489 (1996).
- [34] Brooke, D. F.: Trainplanners' toolkit - an integrated approach to trainplanning, rostering and simulation, in *Proc. of COMPRAIL'96*, pp. 437-446 (1996).
- [35] 香西恵介, 高柳寿子: 乗務員運用自動作成システムの開発, 第31回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp. 195-198 (1994).

- [36] 角野敏子, 西崎圭一, 平野文弥, 片岡健司: 乗務員運用計画支援システムの開発, 第30回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp. 256-259 (1993).
- [37] 坂本憲治, 角野敏子, 西崎圭一, 平野文弥: 列車乗務員運用計画支援システム—知識処理技術の導入—, 平成5年電気学会全国大会論文集, 第6巻, pp. 192-193 (1993).
- [38] 岡村定男, 小川周一郎, 角野敏子, 岸本秀明, 中桐慶之, 福田司朗: 乗務員運用計画支援システムの開発, 第33回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp. 183-185 (1996).
- [39] 小川周一郎: 乗務員行路作成システム, 運転協会誌, pp. 39-41 (1997).
- [40] 石田秀昭, 西島英児, 鶴田節夫, 本間正喜, 中野明男: 目的戦略志向協調推論向け知識構築支援方式とその評価, 情報処理学会論文誌, Vol. 37, No. 10, pp. 1773-1780 (1996).
- [41] 仙石浩明, 吉原郁夫: GAによるヒューリスティクス探索の最適化, 情報処理学会論文誌, Vol. 37, No. 10, pp. 1811-1820 (1996).
- [42] King, R. M. and Banerjee, P.: ESP: Placement by simulated evolution, *IEEE Trans. Computer-Aided Design*, Vol. 8, No. 3, pp. 245-256 (1989).
- [43] 小坏成一, 平田廣則: 組み合わせ最適化問題における生物学的方法, 電気学会論文誌C分冊, Vol. 112-C, No. 10, pp. 585-590 (1992).
- [44] 棟田恭弘, 府川達也, 駒谷喜代俊, 熊野昌義, 森原健司: 思考整合型モデルによるダイヤ作成支援システムの開発, 第26回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp. 304-308 (1990).
- [45] 片岡健司, 駒谷喜代俊: 思考整合型モデルを用いた列車ダイヤ作成支援システム, 第41回情報処理学会全国大会論文集, 第2巻, pp. 79-80 (1990).
- [46] 片岡健司, 駒谷喜代俊: 思考整合型モデルによるダイヤ作成支援システムの開発, 第27回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp. 290-294 (1990).
- [47] 片岡健司, 駒谷喜代俊: 列車ダイヤ作成支援システムにおけるダイヤの逆引き, 平成3年電気学会全国大会論文集, 第6巻, pp. 177-178 (1991).
- [48] 片岡健司, 駒谷喜代俊: 対話型ダイヤ作成支援システム DIAPLAN, 電気学会論文誌D分冊, Vol. 112-D, No. 2, pp. 153-162 (1992).

- [49] 駒谷喜代俊: 列車運行における部分シミュレーション方式の提案, 電気学会論文誌C分冊, Vol. 107-C, No. 10, pp. 923-930 (1987).
- [50] 駒谷喜代俊, 福田豊生: 列車運転整理支援のエキスパートシステム, 人工知能学会誌, Vol. 3, No. 1, pp. 26-31 (1988).
- [51] 駒谷喜代俊, 府川達也, 棟田恭弘: 列車運行に対する思考整合型モデルとその応用, 第26回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp. 209-303 (1990).
- [52] Komaya, K. and Fukuda, T.: A Knowledge-Based Approach for Railway Scheduling, in *Proc. of the 7th IEEE Conference on Artificial Intelligence Applications*, pp. 404-411 (1991).
- [53] 荒屋真二: 人工知能の交通システムへの応用, システムと制御, Vol. 27, No. 7, pp. 440-447 (1983).
- [54] 曾根悟: 新しい鉄道システム, オーム社 (1987).
- [55] 森本茂之, 山口文敏: 阪神電鉄ダイヤ作成システム, 第30回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp. 163-167 (1993).
- [56] 北川英裕美, 片岡健司, 駒谷喜代俊, 棟田恭弘: 複々線および分岐路線を対象とした列車ダイヤ作成システム, 平成7年電気学会全国大会, 第4巻, pp. 376-377 (1995).
- [57] 北川英裕美, 片岡健司, 駒谷喜代俊: 単線を含む路線を対象とした列車ダイヤ作成システム, 平成7年電気学会産業応用部門全国大会, 第I巻, pp. 95-98 (1995).
- [58] 北川英裕美, 片岡健司, 駒谷喜代俊: 多様な路線形態を対象とした列車ダイヤ作成支援システム-DIAPLAN-II-, 電気学会論文誌D分冊, Vol. 116-D, No. 8, pp. 874-882 (1996).
- [59] 浅井俊雄, 柳谷秀美, 山口文敏, 北川英裕美, 棟田恭弘: 京阪電気鉄道(株)納め列車ダイヤ作成支援システム『ASK』, 三菱電機技報, Vol. 69, No. 12, pp. 55-59 (1995).
- [60] 浅井俊雄, 柳谷秀美, 山口文敏, 北川英裕美, 棟田恭弘: 京阪列車ダイヤ作成システム『ASK』, 第32回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp. 101-104 (1995).

- [61] Kataoka, K. and Komaya, K.: A Model for Railway Crew Allocation Support System, in *Proc. of IEEE Systems, Man and Cybernetics*, pp. 1436-1441 (1992).
- [62] 片岡健司, 駒谷喜代俊: 乗務員運用計画作成支援システムにおける基本モデル, 情報処理学会第45回全国大会, 第1巻, pp. 419-420 (1992).
- [63] 片岡健司, 駒谷喜代俊, 角野敏子, 平野文弥: 乗務員運用計画作成支援システムの開発, 第29回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp. 202-206 (1992).
- [64] Kataoka, K. and Komaya, K.: Computer-aided railway scheduling systems for high-density train operations, in *Proc. of COMPRAIL '94*, Vol. 2, pp. 44-50 (1994).
- [65] 片岡健司, 駒谷喜代俊, 角野敏子, 平野文弥: 乗務員運用計画システムの自動提案機能, 第31回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム, pp. 219-222 (1994).
- [66] Lin, Y. L., Hsu, Y. C. and Tsai, F. S.: SILK: A Simulated Evolution Router, *IEEE Trans. Computer-Aided Design*, Vol. 8, No. 10, pp. 1108-1114 (1989).
- [67] 片岡健司, 駒谷喜代俊: 乗務員運用計画システムの自動提案アルゴリズム, 情報処理学会第49回全国大会, 第1巻, pp. 401-402 (1994).
- [68] 片岡健司, 駒谷喜代俊: Simulated Evolution法を用いた乗務員運用計画作成手法, 平成8年電気学会産業応用部門全国大会, 第I巻, pp. 449-454 (1996).
- [69] 片岡健司, 駒谷喜代俊: Simulated Evolution法を用いた乗務員運用計画作成手法, 電気学会論文誌D分冊, Vol. 117-D, No. 7, pp. 808-814 (1997).
- [70] Kataoka, K. and Komaya, K.: Crew operation scheduling based on simulated evolution technique, in *Proc. of COMPRAIL '98*, pp. 277-285 (1998).
- [71] 須藤剛志, 鈴木浩: Simulated Evolution法を用いた大規模補修計画手法の開発, 電気学会論文誌B分冊, Vol. 114-B, No. 4, pp. 367-372 (1994).
- [72] Ikkai, Y., Ikeuchi, T., Kataoka, K. and Komoda, N.: Crew Operation Scheduling Using State Selection Method, in *Proc. of IEEE Int. Symp. on Industrial Electronics 1998*, pp. 726-731 (1998).
- [73] 竹田真也, 一階良知, 片岡健司: 状態選択法と条件緩和探索法による乗務員運用計画方式, 平成10年電気関係学会関西支部連合大会論文集, 第G14-36巻, p. G333 (1998).

