輸送システムにおける計画と運用に関する研究

平成5年4月

安部恵介

①

輸送システムにおける計画と運用に関する研究

平成5年4月

安　部　惠　介

輸送システムにおける計画と運用に関する研究

目次

第1章　序論 1
1.1　研究の背景 1
1.2　本研究の目的 1
1.3　内容梗概 3

第2章　輸送システムにおける計画・運用問題 5
2.1　緒言 5
2.2　基礎的考察 5
2.2.1 基本問題 5
2.2.2 問題の分類 6
2.2.3 解法の概要 7
2.2.4 本研究の位置付け 8
2.3　鉄道における列車運行計画 9
2.3.1 問題の構成 9
2.3.2 問題の分析 11
2.4　道路輸送における車両運行計画 13
2.4.1 問題の構成 13
2.4.2 物流における輸送計画 14
2.5　結言 16
参考文献 16

第3章　列車順序最適化手法 19
3.1　緒言 19
3.2　問題の定式化 20
3.2.1 問題設定 20
3.2.2 定式化 21
3.3　分枝限定法による解法 22

3.3.1 解法の構成 22
3.3.2 下界値計算法 26
3.3.3 解法の実際 29
3.4 数値実験 30
3.5 ヒューリスティック手法 33
3.6 結言 34
参考文献 35

第4章 列車運行シミュレーション方式 36
4.1 緒言 36
4.2 列車運行条件のグラフ表現 37
4.2.1 列車運行モデル 37
4.2.2 列車運行の定式化 37
4.2.3 グラフ表現 40
4.3 シミュレーション方式 41
4.3.1 グラフ方式の導入 41
4.3.2 最長経路方式 43
4.3.3 パラメトリック方式 45
4.4 数値実験による検討 48
4.5 運転整理支援システム 51
4.6 結言 53
参考文献 54

第5章 車両運用計画手法 55
5.1 緒言 55
5.2 車両運用計画 56
5.3 車両割当問題の定式化 57
5.3.1 割当可能条件 57
5.3.2 最適割当アルゴリズムの適用 58
5.4 多期間車両割当アルゴリズム 60
5.4.1 多期間車両割当問題 60
5.4.2 解法の考え方 61

5.4.3 解法アルゴリズム 62
5.4.4 アルゴリズムの説明 64
5.5 適用例 67
5.6 結言 70
参考文献 70

第6章 幹線輸送計画手法 72
6.1 緒言 72
6.2 幹線輸送計画問題 73
6.2.1 車両運行計画の役割 73
6.2.2 問題の特徴 73
6.2.3 問題の構成 74
6.3 輸送ルート計画問題の定式化 75
6.3.1 輸送需要の分割 75
6.3.2 決定変数 76
6.3.3 制約条件 77
6.3.4 定式化 77
6.4 輸送ルート作成方式 78
6.4.1 輸送ルート候補の作成 78
6.4.2 輸送ルートの決定 80
6.5 車両運用計画 82
6.5.1 運用ルートの作成 82
6.5.2 車両割当 84
6.6 適用例 85
6.7 大規模問題に対するアルゴリズムの効率化 88
6.7.1 大規模問題 88
6.7.2 輸送ルート計画 88
6.7.3 車両運用計画 90
6.7.4 数値実験 91
6.8 幹線輸送計画支援システム 92
6.8.1 計画支援システム 92
6.8.2 利用効果 93

6.9 結言 94
参考文献 95

第7章 結論 96

謝辞 100
付録（筆者発表論文） 101

第1章 序論

1.1 研究の背景

社会・産業の種々の分野で情報化の急速な進展に伴い、今後ますます大規模・複雑化するシステムの管理、運用、制御への計算機技術の導入による高効率化、高機能化が重要な問題となっている。このような計算機技術の適用対象としては、監視、診断、解析、制御、設計、計画など多くの分野があるが、なかでも計画・運用問題は一般に大規模な組合せ問題となり、計算機化が困難な分野である。

輸送システムは、上記のような大規模・複雑システムの典型的な例であり、交通システムをはじめとして、生産、流通など種々のシステムにおける重要な構成要素である。特に近年、鉄道システムでは、輸送の効率や安全性の向上のために、計算機を中心とした列車運行管理システムが導入され、列車の運行監視・制御などに適用されている。しかし、列車ダイヤや車両運用を作成する列車運行計画は、大規模・複雑な組合せ問題であり、熟練した専門家の経験と勘に依存しているのが現状である。列車運行の高速、高密度化に伴い、運行計画もますます複雑になり、指令員の負担が増大するとともに、運行管理システムを中心とした情報化に伴い、列車運行計画における計算機による支援方式の必要性が高まっている。

また最近、道路輸送においても車両運行管理システムの導入が進んでおり、今後道路交通管制システムの整備などにより、ますます情報化が進展していく傾向にある。これに伴い、輸送コストの増大、道路渋滞、環境問題等に対処するために、道路輸送の効率化が重要な問題となっている。特に主要拠点間を結ぶ幹線輸送は、一般に輸送量の多い長距離輸送であり、運行計画による輸送効率化の必要性が高い。幹線輸送計画も大規模・複雑な組合せ問題であり、熟練担当者の経験に依存しているのが現状である。しかし、車両運行管理システムに基づき、大量の輸送需要に対する多数の車両の最適な運行計画を作成することは、熟練担当者にとっても容易なことではなく、計算機による有効な支援方式が望まれている。

1.2 本研究の目的

本研究は上記のような背景を踏まえて、輸送システムの計画・運用問題に対する実用上有効な手法を提案することを目的とする。輸送システムにおける計画問題には種々の問題があり、従来より多くの理論的研究や経験的ヒューリスティクスが構築されている。本研究では、まずこれらを分類、整理し、個々の問題や手法の性質について検討する。その結果を踏まえて、実用上重要な問題として、鉄道における列車運行計画と道路輸送における幹線輸送計画を対象とし、実用的観点から有効な手法を検討する。

鉄道や道路輸送では運行管理システムの導入により、システム全体の自動化、情報化が進

んでいる。計画・運用等の知的作業は専門家の領域として残されてきたが、今後システム全体の情報化に伴い、これらの領域においても大量の情報の定量的処理が必要となり、計算機による支援が不可欠となる。

このような専門家の経験と勘に依存していた領域では、問題自体のモデル化が不明確な場合が多い。したがって、まず人間と計算機の役割分担を明確にし、計算機が支援する部分を明確にモデル化する必要がある。また計算機が対象とする問題も、一般に大規模・複雑な組合せ問題となり、数理計画法等の最適化手法の適用が困難である。さらに一般には、システム開発の過程において段階的に問題構造が明確になっていくという特徴もある。そのため数学的モデルに基づく体系的な手法の構築が困難とされ、ヒューリスティックな手法に依存する傾向がある。

そのようなアプローチの典型的なものとして、専門家が問題解決に用いているヒューリスティクスを積極的に活用しようとするエキスパートシステムの考え方が提案され、多くの分野で適用が試みられている。しかしその結果、実用システムの構築において、有効なヒューリスティクスの獲得の困難性、計算時間の増大、ヒューリスティクスの有効性の検証等の問題点が指摘されている。これは、専門家の問題解決過程においては、複雑な対象に対する多様なモデルの認識と、定性的、直観的な高度な情報処理が行われており、これらをそのまま計算機で模倣するには限界があることに起因している。

したがって、上記の輸送計画問題に対する実用的手法を構成するうえでも、人間と計算機の情報処理の特性を踏まえたうえで、計算機による有効な支援方式を開発することが重要である。列車運行計画も幹線輸送計画も大規模・複雑な組合せ問題であり、単に数理計画法等の最適化手法のみを、あるいは専門家のヒューリスティクスのみを適用するアプローチでは、実用的手法の構築は困難である。

そこで本研究は、このような複雑な組合せ問題に対して、数理的モデルを基本とすることにより、問題構造に適した問題分割を行い、専門家の経験に基づくヒューリスティクスと数理計画法等の効率的なアルゴリズムを適切に用いることにより、最適に近い解を体系的かつ効率的に求めることのできる、実用上有効な手法を提案することを目的とする。

具体的には、列車運行計画における運転整理問題、車両運用計画問題、幹線輸送における車両運行計画問題を対象とし、これらの問題を分析し、数理的モデル化を行うことにより、個々の対象や状況に依存しない一般的な構造を明確にし、これに対して効率的な最適化手法を構成する。さらに実用的問題への適用によりその有効性を検証し、個々の問題に応じたヒューリスティクスと組合せることにより実システムへの適用可能な実用的手法を提案する。また、これらの手法の列車運行計画や幹線輸送計画全体における有用性を明確にするとともに、さらに一般的な観点から本研究の位置付けを検討することにより、輸送システムにおける計画・運用問題における幅広い有用性を図ることを目的とする。

1.3 内容梗概

本論文は、上記のような背景、目的のもとで、輸送システムにおける計画・運用に関して行ってきた研究をまとめたものであり、本章を含めて7章から構成される。第2章は本研究全体に関する説明であり、従来の研究の概要と本研究の位置付けについて述べる。第3章－第5章は鉄道における列車運行計画手法に関する研究であり、第6章は道路輸送における幹線輸送計画手法に関する研究である。以下各章ごとにその概要を述べる。

第2章では基礎的考察として、輸送計画問題に関する従来の研究の概要を整理し、本研究の位置付けを明確にする。この考察に基づき、本研究が対象とする鉄道における列車運行計画と道路交通における幹線輸送計画の実用上の重要性について論じる。なお、一般に鉄道網はネットワークを構成しており、列車の接続等も考慮する必要があるが、あまりにも問題が大規模になるため、本論文では一つの閉じた線区を対象とする。またこれらの問題を分析し、列車運行計画における主要な問題として、線路等の設備競合に関する列車順序決定問題、効率的な列車運行シミュレーション方式、列車ダイヤ等の運行スケジュールに実際の車両を割当てる車両運用問題を取り上げ、その意義について論じる。同様に道路輸送における主要な問題としての幹線輸送計画についても論じる。また、これらの問題に関する従来の研究の概要についても述べる。

第3章では、列車順序最適化問題について検討する。特急、急行、普通列車のように、多種別列車が運行する線区では、計画ダイヤの作成や、ダイヤ乱れ時に計画ダイヤの修正を行う運転整理において、列車順序決定は基本的な問題である。また小規模なダイヤ乱れに対する復旧手段としては、通常列車順序変更が主体である。特に緊急時の運転整理において計算機支援の必要性が高い。そこで、運転整理における列車順序最適化問題を対象とし、分枝限定法による実用的手法を提案する。従来、計算量が多大になるため、実用規模の問題の最適化は困難とされていた。これに対して、列車運行の将来予測など、運転整理問題に固有の構造を利用することにより解法を効率化し、実用規模の問題への適用を可能とした。また、運転指令員の経験的知識を利用したヒューリスティック手法についても概要を説明する。

第4章では、列車運行シミュレーションの高速化方式を提案する。計画ダイヤの作成や大規模なダイヤ乱れ時の運転整理案の作成では、単に列車順序のみでなく、列車の運行経路や、列車の設定・取り消し等のより上位レベルの決定も行われる。これは非常に大規模な組合わせ問題となり、数理計画法による最適化は困難であり、専門家の判断に依存せざるを得ない。このような計画作業の支援方式としては、列車ダイヤの作成・修正とシミュレーションを対話形式で試行錯誤的に繰り返す逐次改善方式が用いられる。このとき、シミュレーションの

高速化や効率的な修正方式が実用上重要であり、特に運転整理のような緊急時においては本質的な問題となる。さらに、専門家のヒューリスティクスを用いて運転整理案を作成するエキスパートシステムを構築するうえで、頻繁に行われるシミュレーションの高速化は重要である。そこで、列車運行を有向グラフでモデル化し、最長径路探索とその更新アルゴリズムによる効率的な列車運行シミュレーションとその修正方式を提案する。本方式は従来のイベントシミュレーション方式に比べ、大幅に計算時間を短縮させるとともに、事象間の因果関係のグラフ表現を用いることにより、従来困難であった部分的運行予測やデッドロック検出も容易に行うことができる。また運転指令員のヒューリスティクスを導入し、本シミュレータを利用した運転整理支援方式についても概要を説明する。

第5章では、列車ダイヤに実際の車両を割当てる車両運用計画手法を提案する。車両の保守・検査条件や工場の検査計画等の種々の条件を考慮して、長期にわたる車両の運用計画を作成する作業は複雑であり、計算機支援が望まれている。一般に車両運用計画では、基本計画の段階であらかじめ、同一車両で運行する一連の列車ダイヤを接続した運用ダイヤを作成しておく。したがって、日常の車両運用計画はこれらの運用ダイヤに実際の車両を割当てる形で行われる。従来の車両割当方式はいずれもヒューリスティック手法であり、解空間の探索が不完全なため、種々の条件を考慮した割当の望ましさや、割当を継続的に繰り返す場合の実行可能性が保証できない等の問題点がある。また割当を試行錯誤的に繰り返すため、計算時間が多大になる傾向がある。これらの問題点を解消するために、本論文では車両割当問題を多期間割当問題として定式化し、最適割当アルゴリズムによる効率的な解空間の探索を用いた手法を提案する。また割当不能状況が生じたとき、車両と運用ダイヤの割当関係を2部グラフのDM分解を用いて構造化することにより、バックトラックによる競合解消を効率化するアルゴリズムも提案する。

第6章では、道路輸送における主要な問題である幹線輸送計画を対象とし、車両の運行効率を最適化する車両運行計画手法を提案する。本問題も種々の制約条件を含む複雑な組合せ問題であり、個々の問題により条件も異なる。そこで、汎用的なモデル化として、集合分割問題を基本としたモデル化を行い、ヒューリスティクスと近似解法を用いた運行ダイヤ作成手法を提案する。また車両運用計画をネットワークでモデル化し、最小費用循環流アルゴリズムを適用する。本手法は大量の輸送需要に対し、効率的な運行ダイヤと車両運用計画を短時間で提示することにより、計画担当者を支援するものである。また、輸送需要計画等も含めた幹線輸送計画全体の支援方式についても論じる。

第7章では本研究の結論として、各章で得られた結果をまとめるとともに、今後の課題について述べる。

第2章　輸送システムにおける計画・運用問題

2.1 緒言

輸送システムにおける計画・運用問題は、一般に複雑な組合せ問題であり、個々の分野で経験に基づいて対処されている場合が多い。しかし情報化の進展に伴い、大規模・複雑な輸送システムに対しても計算機による管理・制御方式の導入が進み、計画・運用面でも計算機による支援の必要性が高まっている。

鉄道における列車運行計画と道路輸送における幹線輸送計画はその代表的なものである。特に鉄道では列車運行管理システムの導入により、列車運行計画に対する計算機支援の必要性が高まっている。また最近、道路輸送においても情報化が進み、車両運行管理システムに基づく効率的な車両運行計画の作成を支援するシステムが望まれている。

本論文の第3章ー第6章では、これらの問題に対するいくつかの計画手法を提案する。輸送計画問題に対しては従来より多くの研究がなされており、上記の問題に対する計画手法を構成するうえでも、これらの研究成果を踏まえておくことが重要である。そのために本章ではまず2.2節で基礎的考察として、従来研究されてきた輸送計画問題に関するモデル化と解法および問題の性質の概要について整理する[1)2)]。次にこれらを踏まえて、本研究が対象とする列車運行計画と幹線輸送計画の位置付けについて説明する。

また、2.3節で列車運行計画、2.4節で幹線輸送計画についてそれぞれ具体的に説明し、本論文が対象とする問題と従来研究の概要について述べる。

2.2 基礎的考察

輸送システムにおける計画問題は、従来より主として交通システムにおける重要な問題として研究され、多くの経験的手法も蓄積されてきた。一方、近年生産システム、流通システム等の種々の分野においても物流の重要性が認識され、効率的な輸送管理方式が望まれている。また輸送計画問題における基本的モデルは古くからORの代表的な研究対象の一つでもあり、最近ではより現実的な条件も含む複雑なモデルに対する実用性を重視した研究も行われてきている[3)-6)]。

以下では、まず輸送計画に関して従来より研究されてきた問題のうち、本研究に関連のあるいくつかの典型的な問題について説明し、次に代表的な輸送システムの特徴についてまとめる。最後にこれまでに提案されている輸送計画問題に対する種々の解法の概要を述べる。

2.2.1 基本問題

輸送計画問題としては従来より典型的な問題として以下のような問題が研究されている[1]。これらは、現実の多くの複雑な輸送計画問題のベースとなるものであり、その性質を考慮しておくことは、実システムに対する有効な手法を構築するうえで重要である。

（1）ビークルルーティング問題

配送拠点といくつかの需要地があり、配送拠点の物資を各需要地へコスト最小で輸送する車両ルートを求める問題である[3]。巡回（複数）セールスマン問題が基本であり、一般にＮＰ－完全な組合せ問題となる[7]。解法としては一般化割当手法を用いた方法[8]等の種々のヒューリスティック手法が提案されている[3)-6)9)]。また１つの需要地へ複数の車両による分割配送を許す場合に対し、分枝限定法を用いた解法[10]が提案されている。

（2）ビークルスケジューリング問題

出発地から到着地までの１つの車両運行をトリップとよぶ。トリップの集合が与えられたとき、すべてのトリップをまかなう車両群のコスト最小スケジュールを求める問題[3]。単一基地、単一車両タイプの場合、最小費用流問題として効率的に解くことができる[3]。しかし、複数基地、複数タイプ、走行距離制約、時間幅制約等の場合いずれもＮＰ－完全な問題になることが知られている[1)3)4)]。

（3）ジョブショップスケジューリング問題

車両の移動路に容量制約があり、車両間の競合が生じる場合には、ジョブショップスケジューリング問題になる。これは、一般にＮＰ－完全であり、ディスパッチングルール等によるヒューリスティック手法が主体である。

（4）割当問題

車両の運行スケジュールや輸送需要に実際に車両を割当てる問題。１期間、すなわち車両割当を一度行うことだけを考慮すればよい場合は、通常の（２次元）割当問題となる。これは２部グラフの最適マッチングアルゴリズムにより効率的に求めることができる。しかし、一般には多期間にわたる割当を考慮する必要があり、これは３次元割当問題となり、ＮＰ－完全問題になる。

2.2.2 問題の分類

現実の輸送システムにおける計画問題に対する解法を構成するためには、まず対象システムの性質を把握しておくことが重要である。主要な輸送システムを分類すると以下のようになる[1]。

（1）公共輸送システム

鉄道、バス、飛行機等の大量輸送システム。輸送需要は統計的に知られており、確定的に

扱うことができる。車両の保守や乗務員の勤務条件等により走行時間（距離）の制約が問題となる。また、軌道システム（鉄道等）の場合、設備（線路等）の容量制約による車両間の競合のため、ジョブ・ショップスケジューリング的要因を含む。

（2）個別輸送システム

タクシー、エレベータ等。需要が不確定で個別的に発生する点に特徴があり、リアルタイムスケジューリングとなる。予約等により需要が確定的な場合には時間幅付きビークルスケジューリング問題となる。

（3）生産システムにおける搬送システム

一般に軌道型が多く、鉄道と類似の性格を有する。生産計画等の他要因との関係が強く、生産管理システム全体の中の部分システムとして位置づけられる。

（4）配送システム

車両容量の制約が大きな要因となる。配送時刻に関する制約が緩い場合にはルーティング問題、制約が厳しい場合にはスケジューリング問題となる。また在庫管理システム等の他システムとの結合も重要である。

2.2.3 解法の概要

輸送計画問題に対し、これまでに提案されてきた理論的および実用的解法の概要をまとめると以下のようになる[2]。

（1）厳密解法

分枝限定法、切除平面法等の手法があるが、輸送計画問題の多くはＮＰ－完全な組合せ問題であり、実用規模の問題に対して厳密な最適解を求めることは一般に困難である。しかし基本タイプのビークルスケジューリング問題のようにネットワークフローアルゴリズムにより効率的に解くことのできる問題もある。そこで、問題分割や制約条件の緩和により、効率的な最適化手法を適用できる部分問題や修正問題を作成し、その解を有効に利用する方法が考えられる。

（2）ヒューリスティック手法

ａ）クラスタリング

最初に問題の構成要素を分類しておき、次に各グループごとにスケジュールを作成する方法と、最初に全体的なルート（一般には実行可能でない）を構成し、次に全体的なルートを、いくつかの実行可能な小ルートに分割する方法がある[3]。前者の例としては、複数基地、複数車両タイプの問題を各基地、各車両タイプ毎に分割する場合、後者の例としては、車両の保守制約（走行距離制約）等の条件を扱う場合[11]等がある。

b）逐次改善法

現在の解（実行可能でない場合もある）に対し、評価関数を減少させる、あるいは、より多くの制約条件を満たすように、解を改良する操作を逐次繰り返していき、最終的に許容な解に到達する方法。巡回セールスマン問題に対する枝交換ヒューリスティクスをはじめとして多くの手法で用いられている典型的アプローチである。

c）数理計画法アプローチ

数理計画法の定式化に基づく手法。例えば、ビークルルーティング問題を巡回セールスマン問題と一般化割当問題を結合した形で定式化し、巡回セールスマン問題の近似解を用いる方法[8]や、集合分割問題として定式化し、列生成にヒューリスティクスを用いる方法[9]等がある。また厳密解法のところで述べた最適化に基づく方法も含まれる。

d）対話型アプローチ

問題解決過程に人間との相互作用を取り入れた汎用的なアプローチ。経験を積んだエキスパートの知識と直感を最適化モデルにおけるパラメータの調整や主観的な評価に取り入れようとするものである。これによりモデルが最終的に実用化されやすくなる。

2.2.4 本研究の位置付け

（1）対象とする問題

本研究では、鉄道における列車運行計画と道路輸送における幹線輸送計画を対象とする。2.2.2 節で現実の輸送計画問題の分類を行ったが、これは輸送需要を既知として扱える場合と、不確定な場合に分けられる。タクシー、エレベータ等の個別輸送システムや、生産システムにおける搬送車の割り当て等は後者の例である。このような、不確定な輸送需要に対するリアルタイムスケジューリングでは、確率的要因を考慮する必要がある。これに対して、本研究では輸送需要を確定的に扱える問題を対象とする。列車運行計画と幹線輸送計画は、その典型的な問題といえる。

両者の特徴として、鉄道は軌道輸送システムであり車両の移動路に容量制約があるが、道路交通では渋滞等を除けば容量制約を考慮する必要はない。したがって、鉄道システムにおける計画・運用手法は、生産システムにおける軌道搬送システム等の類似の性格を有する問題に対しても有効である。また、都市内の配送計画では道路渋滞の影響を大きく受けるが、都市間の長距離輸送を対象とする幹線輸送計画は移動路の容量制約無しとして扱うことができる。これは、飛行機、船舶、長距離バス等の運行計画とも類似の問題となる。

（2）解法のアプローチ

2.2.2 節で輸送計画問題に対してこれまでに提案されている種々の手法の分類を行った。

本研究では、数理的モデルに基づく数理計画法アプローチを主体とする。しかし現実問題には、あらかじめ定式化しにくい部分や、厳密な最適化が困難な場合もある。したがって個々の問題の構造に応じて、問題分割や近似解法、ヒューリスティクスを導入する。

また最終的な判断は専門家にゆだねられる。したがって、全体的な問題解決は人間が主体であり、計算機はそれを有効に支援するという立場をとる。そのためにマンマシンインタフェースを介して人間の判断を導入できる対話型アプローチを基本とする。

2.3 鉄道における列車運行計画

列車運行管理は、運行監視、進路制御、運転整理、指令伝達等、鉄道システムにおいて中枢的な役割を果たしている。近年、列車運行管理の効率化、省力化のために、自動化技術の導入が進み、ＣＴＣをはじめ進路制御、運行監視、旅客情報案内等で計算機による自動化が実用化されている。一方、列車ダイヤや車両運用を作成する列車運行計画は、大規模・複雑な組合せ問題であり、熟練した専門家の経験と勘に依存しているのが現状である。

列車運行計画には、半年から１年ごとのダイヤ改正時などに行われる基本計画の作成と、基本計画に基づいて日常の運行計画を作成する実施計画、事故等による緊急時に行う計画修正などいくつかの段階がある。基本計画段階における、計画ダイヤや基本運用の作成は、多くの要因を総合的に判断する必要があり、熟練した専門家が長時間を要して行っている作業である。

一方、事故等によるダイヤ乱れ時に復旧ダイヤを作成する運転整理や、基本運用に基づき日々の列車ダイヤに実際の車両を割当てる車両運用計画は、限られた時間内で複雑な計画を作成する必要がある。そのため担当者の負担も大きく、計算機による支援が望まれている。そこで、本論文では上記の運転整理問題と車両運用計画問題を対象として、実用的手法を提案する。

以下では、まず列車運行計画の構成について説明し、従来研究の概要をのべる。次に列車運行計画問題をいくつかの主要な要因に分析し、本論文で対象とする問題の位置付けについて論じる。なお、一般に鉄道網はネットワークを構成しており、実際には異なる線区間の列車接続なども考慮する必要があるが、本論文では簡単のために一つの閉じた線区を対象としている。

2.3.1 問題の構成

列車運行計画は図2.1 に示すように大きく３つの段階で構成される。基本計画の段階では、輸送需要、営業方針等を考慮して計画ダイヤを作成し、これに基づき車両の検査条件等

図2.1 列車運行計画の構成

を考慮して車両の基本運用計画を作成する。これは、計画ダイヤと基本運用の相互の影響を考慮して行う高度な経験を要する複雑な作業である。また通常、工場・検修場の検査能力等を考慮して車両の法定検査の基本計画も作成される。実施計画は通常２つの系統に分かれる。１つは本線上の運転計画の作成であり、計画ダイヤを基本として、輸送需要の変動等を考慮して実施ダイヤが作成される。もう１つは、車両基地側で作成する計画であり、実施ダイヤに対し検査条件等を考慮して車両を割当てる車両運用計画が作成され、これに基づき車両の入出庫、留置、検査等のための移動計画（基地内作業計画）が作成される。なお、通常は実施ダイヤ、車両運用、基地内作業の順にトップダウン的に考えることができるが、実際にはこれらの相互作用も考慮する必要がある。車両・設備の故障や事故等による異常時には運転整理と呼ばれるダイヤ変更が行われ、これに伴い基地側での運用計画や作業計画も修正される。この場合も各計画間の影響を十分考慮する必要があり、短時間で的確な判断を行うことは熟練を要する難しい作業である。

このように列車運行計画の作成は、階層的かつ分散的な部分問題に分割して扱われており、その多くは複雑な組合せ問題となり、熟練者の判断に依存しているのが現状である。一方、近年の計算機技術の進歩に伴い個々の部分問題に関しては、計算機による自動化、支援方式の研究がなされている。

基本計画については、列車ダイヤ作成に関してマンマシン方式による手法[12]や人工知能を応用した手法[13]等が提案されている。また基本運用計画に関しては実用的観点から種々の条件を考慮した手法[11]があり、またネットワークモデルを基本とした数理的手法の研究

([14]等）もなされている。検査計画に関しては、文献[15]等がある。

実施計画については車両運用計画に関する研究（[16]-[18]等）が主体であり、実システムへの適用[9]も見られる。また近年、基地内作業計画に関する検討（[19][20]等）も行われている。

異常時については、追い越しのない同一種別列車の線区に対し、列車遅延波及を抑制する列車群制御手法[21]が提案されている。しかし、一般の多種別線区における運転整理や計画修正は専門家の判断に依存しているのが現状である。

2.3.2 問題の分析

上記のように列車運行計画は階層的かつ分散的な種々の部分問題により構成されている。一方、実際の列車運行計画はこれらを総合して成り立つものであり、これらの相互関係も考慮したより統合的な手法の開発も望まれる。そこでまず、列車運行計画に関するより基本的なモデルについて考察する[22]。

列車運行において車両は常にどれかの線路上に存在する。線路には駅間の走行線路、駅の着発番線、基地内の留置線、各種の検査線等いろいろな種類がある。実際の線路は連続的なものであるが、これを機能、用途に応じて分割し、それぞれを１つの設備とみなすことにより、路線全体を設備の集合とみなすことができる。このとき、列車運行計画とは'各車両の設備上の移動計画'を作成することに他ならない。すなわち、列車運行計画は次の車両と設備のスケジュールを決定する問題となる。

車両のスケジュール：各車両が使用する設備系列とその使用時刻

設備のスケジュール：各設備を使用する車両系列とその使用時刻

輸送という作業をジョブとみなすと、これはジョブショップスケジューリング問題となり、非常に大規模な組合せ問題となる。

列車運行計画は輸送需要を満たす最適な列車運行を求めるものである。輸送需要の観点からは、これを満たす車両運行スケジュールである列車ダイヤの作成、輸送供給の立場では、列車ダイヤに対し、車両の保守・点検、乗務員の労働条件等を満たす車両運用の作成として構成される。

したがって、列車運行計画は次のような要因に分割される。

＜運行スケジュールの作成＞

１）各列車の輸送ルート（使用設備系列）の設定

２）各設備の使用列車順序の決定

3）各列車の設備使用時刻の決定

＜車両運用の作成＞

4）列車ダイヤに対する実車両の割当

1）は輸送需要に対して列車の種別、走行区間を設定する作業であり、計画ダイヤの作成や、大幅なダイヤ乱れ時の運休、増発等に対応している。これは社会的影響、経営方針等を含む総合的判断を要するため、専門家の判断に依存する。

2）は設定された各列車の輸送ルートに対し、設備使用の競合が生じる場合に、各設備の列車順序を決定する作業である。ジョブショップスケジューリングと同等な問題であり、計算機による最適化の対象となる。

3）は決定された輸送ルート、設備使用順序のもとで、列車の移動時刻を決定する作業であり、シミュレーションにより求められる。

4）は作成された列車ダイヤに、種々の検査条件等を考慮して実際の車両を割当てる作業である。通常は、まず基本運用計画として、列車ダイヤの中で同一車両により運行される一連の運行ルートを接続することにより、運用ダイヤを作成する。実施計画段階では、この運用ダイヤに実際の車両を割当てることになる。

上記のように、1）は種々の総合的判断が必要であり、専門家に依存せざるをえない。そこで本研究では、2）3）4）を対象として有効に支援する手法を検討する。

2）に対して、列車順序最適化手法を提案する[23)24)]。これは計画ダイヤ、運転整理、基地内作業ダイヤ等の作成における列車順序決定に有効なものである。特に、短時間で高度な判断を要求される運転整理において、計算機支援が強く望まれている。そこで本研究では、運転整理における列車順序最適化問題を対象とするが、基本的方式は計画ダイヤ等にも適用可能である。

3）に対しては、効率的な列車運行シミュレーション方式を提案する[25)]。計画ダイヤや運転整理案の作成過程では、スケジュールの作成・修正とシミュレーションが試行錯誤的に繰り返される。このとき、シミュレーションの高速化や部分的修正に対する効率的な再シミュレーションが重要となる。特に運転整理のような緊急時にはその有効性は大きい。

4）に対しては、実施計画時の車両運用に対する効率的な手法を提案する[26)]。基本計画時の基本運用計画の作成は、線区特有の種々の条件を考慮する必要があり、計画ダイヤ作成と同様に専門家の判断に依存する部分が大きい。そこで本研究では、基本運用に基づいて実際の車両運用を決定する車両割当問題を対象とする。

2.4 道路輸送における幹線輸送計画

鉄道は軌道上の運行をスケジュール制御されるシステムであり、早くから計算機技術が導入されてきた。これに対して道路輸送に関しては、信号制御、高速道路への入出流制御等の交通流制御が主体であり、個々の車両レベルでの情報化は遅れていた。しかし、近年人工衛星等を用いた車載情報システムや車両追跡システム等の開発が進み、また交通流計測や移動体通信による道路交通管制システムの整備が進められている。このように、道路輸送においても計算機技術を中心とした情報化が進展しており、これらの情報を活用した計画・運用システムの構築が必要となってきている。また最近では、輸送コストの増大、道路渋滞、環境問題等の面からも、道路輸送の効率化が望まれている。

鉄道は軌道輸送システムであり、移動路の容量制約による車両間の競合が大きな問題となった。これに対して、道路輸送では渋滞等の場合を除けば、車両は道路上を自由に移動できると仮定できる。このような相違はあるが、両者の計画・運用に関しては基本的に類似の部分も多い。

2.2 節で述べたように輸送計画問題に対しては、これまでに種々の研究がなされている。これらの多くは、主として道路輸送のように移動路の容量制約のない場合を対象としている。最も基本的な問題として、巡回セールスマン問題に対しては、すでに多くの研究がなされている。また、拠点から複数の需要地へ配送するビークルルーティング問題や、複数のトリップを満足する車両スケジュールを求めるビークルスケジューリング問題が基本的な問題として研究されている[1)-10)]。

しかし、すでに述べたようにこれらの問題のほとんどがＮＰ－完全な組合せ問題であり、実用規模の問題の厳密な最適化は困難である。また、現実の問題では、さらに複雑な種々の制約条件があり、これらの解法をそのまま適用することはできない。したがって、配車計画担当者の経験と勘に依存しているのが現状である。

2.4.1 問題の構成

道路輸送システムにおける輸送網は、一般に拠点間を結ぶ幹線輸送と、拠点を中心とした集配送により構成される。前者は、拠点間のトリップを満たすビークルスケジューリング問題、後者は各拠点を中心とした（時間幅制約付き）ビークルルーティング問題となる。近年、道路輸送の計画・運用に対しても種々の計算機支援方式が提案されている。しかしこれらの多くは、単に車両の空き状況、現在位置、属性、荷物の種類等の情報を提供することにより、配車担当者を支援するものである。一方、車両に荷物を割当てる積載計画に対しては知識工学的手法が提案されている[27)]。また、車両の運行計画としては、拠点を中心とした近郊へ

の配送スケジューリング問題に対し、ヒューリスティクスと時間幅付き巡回セールスマン問題の解法を適用した手法が提案されている[28]。この場合道路渋滞等の影響を受けるため、その対応が実用化のうえで重要である。

一方、拠点間を結ぶ幹線輸送は輸送量も大きく、効率化が強く望まれている。一般に幹線輸送では、拠点間の輸送需要が統計的に知られており、ほぼ確定的に扱える部分がある。このような区間に対しては、基本計画として列車ダイヤのようにあらかじめ定期便ダイヤを作成し、定期運行を行う。したがって、日々の輸送需要に対する配車計画は、輸送需要の定期便への割当てと、変動部分に対する車両手配という形で行う。定期便ダイヤの作成は、鉄道における計画ダイヤと同様に、車両等の資源と輸送需要を経営方針等を含む総合的な観点で判断して行うものであり、専門家に依存せざるを得ない。また日々の変動部分に対するスケジューリングは輸送需要の予測という確率的要因を含むため困難である。そのため、幹線輸送計画は専門家の経験と勘に依存しているのが現状である。

最近、輸送需要予測を含めたリアルタイムスケジューリングに対しては、確率計画法による手法が提案されている[29][30]。 そこで本研究では、輸送需要が確定的に扱える場合に対する幹線輸送計画手法について検討する[31][32]。これは、上記のような定期便ダイヤの作成に有効であるとともに、車両運行を効率化するための輸送需要計画の支援にも有効である。

2.4.2 物流における輸送計画

本研究では主として企業等の物流における幹線輸送計画を対象とする。そこで、以下では物流における輸送計画について簡単に説明する。なお、提案手法自体は一般の輸送業等における幹線輸送計画にも適用可能である。

物流における輸送計画では、まず基本計画として拠点配置計画、各拠点の車両配置計画を作成する。また定常的な輸送需要のある区間に対しては、定期運行ダイヤを作成する。これらの基本計画に基づいて、実際の輸送を行うための運用計画が作成される。これは、対象とすべき輸送需要を定める輸送需要計画と、輸送需要を満たす車両運行計画により構成される。図2.2 に物流における輸送計画の構成を示す。まず生産計画、在庫管理、販売予測等により輸送需要計画が作成され、これに基づき各拠点に出荷指示がだされる。出荷場所では、荷物の仕分け、梱包、荷積等の作業計画が立てられる。これらの作業については現在盛んに自動化が進んでいる。また荷物を車両に割当てる配車計画および効率的に積載するための積付計画を作成する。この積載計画に対しては前述のエキスパートシステム[27]をはじめとして種々の支援システムが開発されている。

一方従来は、生産・在庫計画、配送拠点の作業計画等の外的要因により決定された輸送需

図2.2 物流における輸送計画

要に対して、車両運行計画を作成していた。しかし最近の輸送コストの増大により、輸送需要そのものを計画化することにより、車両運行の効率化を図ろうという動きがでてきた。すなわち、出荷計画や作業計画の見直し、他社との共同配送等により車両の有効利用を図ることが重要となってきた。大量の輸送需要に対し、このような種々の条件を考慮して、真に効率的な輸送計画を作成することは、専門家にとっても負担が大きく、計算機による有効な支援が望まれている。

2.5 結言

本章では、輸送システムにおける計画・運用問題に対する基礎的考察を行い、第３章ー第６章における研究の位置付けを明確にした。まず輸送計画問題に関する従来研究の概要について整理し、これに基づき本研究で対象とする鉄道における列車運行計画問題、道路輸送における幹線輸送計画問題の特徴と実用上の重要性について論じた。またこれらの問題の構成と従来研究の概要についてまとめることにより、本研究の背景を明らかにした。

さらにこれらの問題を分析することにより、主要な構成要素として、第３章以降で対象とする列車順序最適化問題、列車運行シミュレーション方式、車両運用計画問題、幹線輸送における車両運行計画問題を取り上げ、列車運行計画、幹線輸送計画におけるこれらの問題の役割、重要性を明らかにした。

なお本章では、輸送システムにおける計画・運用問題に関する主要な部分問題として、上記の問題の位置付けについて論じたが、より広い観点からこれらの問題を統合、拡張していくことも重要であり、さらにそれらの研究成果を幅広い輸送システムに役立てていくことも今後の課題である。

参考文献

(1) 安部：輸送スケジューリング問題の階層的モデル化、昭和６３年度電気学会全国大会講演集、pp.1960-1961 (1988).

(2) 安部：輸送スケジューリング問題に対するネットワークモデル、第１４回システムシンポジウム論文集、pp.249-254 (1988).

(3) L. Bodin et al.：Routing and Scheduling of Vehicles and Crews：The State of the Art, Comp. and Opr. Res., Vol.10, No.2, pp.68-211 (1983).

(4) L. Bodin et al.：Classification in Vehicle Routing and Scheduling, Networks, Vol.11, No.2, pp.97-108 (1981).

(5) L. Golden et al.：Perspectives on Vehicle Routing：Exciting New Developments, Opr. Res., Vol.34, No.5, pp.803-810 (1986).

(6) T. L. Magnanti：Combinatorial Optimization and Vehicle Fleet Planning：Perspectives and Prospects, Networks, Vol.11, No.2, pp.179-213 (1981).

(7) J. Lenstra and Rinooy Kan：Complexity of Vehicle Routing and Scheduling Problems, Networks, Vol.11, No.2, pp.221-227 (1981).

(8) Fisher et al.：A Generalized Assignment Heuristic for Vehicle Routing, Networks, Vol.11, No.2, pp.109-124 (1981).

(9) F. H. Cullen et al.：Set Partitioning Based Heuristics for Interactive Routing, Networks, Vol.11, pp.125-143 (1981).

(10) 鈴木：分枝限定法と分割配送問題、オペレーションズ・リサーチ、Vol.33、No.1、pp.8-13 (1988).

(11) 飯田、他：車両運用計画作成の自動化、鉄道技術研究資料 36-8、pp.311-318、1979.

(12) 飯田、他：マンマシンによる列車ダイヤ作成システム、鉄道技術研究報告、No.951、1975.

(13) 福森、他：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).

(14) P. Carraresi et al.：Network Models for Vehicle and Crew Scheduling, European J. of Operations Research, Vol.16, pp.139-151 (1986).

(15) 中島、他：車両検修計画システム、近畿日本鉄道技術研究所技法、Vol.13、pp.146-152、1982.

(16) 丸岡、他：コムトラックにおける車両割当シミュレーション、第９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論文集、pp.230-236 (1972).

(17) 大山：ＳＭＩＳ（新幹線システム）における車両充当システム、第１１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論文集、pp.203-208 (1974).

(18) 中島、他：車両充当のアルゴリズム、第２１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論文集、pp.279-283 (1984).

(19) 新居、他：都営新宿線大島車両検修場車両検修システム、第２３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論文集、pp.425-429 (1986).

(20) 生駒、他：運転区所構内管理システムの開発、鉄道技術研究所速報、No.A-86-62、1986.

(21) 荒屋、他：都市形軌道輸送システムの列車群制御とシミュレーションによる特性解析、

電気学会論文誌、Vol.101-C、No.4、pp.97-104 (1981).
(22) 安部：列車運行計画におけるネットワークモデルの適用について、電気学会システム・制御研究会資料 SC-87-10、pp.91-100、1987.
(23) 安部、荒屋：分枝限定法を用いた列車順序最適化手法、計測自動制御学会論文誌、Vol. 21、No.5、pp.514-521 (1985).
(24) S. Araya, K.Abe et al.：An Optimal Rescheduling for Online Train Traffic Control in Disturbed Situations, The Proceedings of The 22nd IEEE Conference on Decision & Control, pp.489-494, 1983.
(25) 安部、荒屋：最長径路法を用いた列車運行シミュレーション、情報処理学会論文誌、Vol. 27、No.1、pp.103-111 (1986).
(26) 安部、駒谷：最適割当アルゴリズムを用いた車両運用計画手法、電気学会論文誌、Vol. 107-C、No.10、pp.939-946 (1987).
(27) 若杉、他：配車計画エキスパートシステム、日立評論、Vol.70、No.11、1988.
(28) 笹島：企業における最適資源配分問題と数理計画法、第３回ＲＡＭＰシンポジウム論文集、pp.95-102、1991.
(29) W. B. Powell：Real-Time Optimization for Truckload Motor Carriers, OR/MS Today, April, pp.28-33, 1990.
(30) L. Frantzeskakis et al.：A Successive Linear Approximation Procedure for Stochastic Dynamic Vehicle Allocation Problems, Transport. Sci., Vol.24, No.1, pp.40-57, 1990.
(31) 安部、桑山：ロジスティクスにおける輸送計画手法、計測自動制御学会論文誌、Vol.26、No.12、pp.1427-1434 (1990).
(32) K. Abe, M.Tsukiyama, T. Fukuda ：A Planning Method Combining Rule-bases and Optimization Algorithms for Transportation Network, Proceedings of International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation and Automation, pp.902-906, 1992.

第３章　列車順序最適化手法

3.1 緒言

近年、列車運行管理システムでは、列車群の正確かつ経済的な運行を目的として計算機制御が導入されてきた[1]。しかし、ダイヤ乱れ時にすみやかに復旧を図るための運転整理は、自動化が困難であり、運転指令員の経験と勘に依存するところが大きい。列車運行の高密度化、ダイヤパターンの多様化に伴ない、指令員の負担は増加し、輸送サービスの向上を図るために高度な判断機能を有する運転整理サポートシステムの開発が強く望まれている。

運転整理はあらかじめ作成された計画ダイヤを修正することによって実行され、順序変更、番線変更、運用変更、運休、増発等いろいろな手段が講じられる。これらは各種要因が複雑に絡み合った組合せ問題であり、解析的手法や最適化手法の適用による自動化が困難である。そのため、従来の支援システムは計算機シミュレーションにより列車運行の予測結果を指令員に提示するものが主体であり、判断そのものは人間が行なっていた。一方、最も頻繁に行なわれる列車順序変更に対しては計算機自体にある程度の自動判断を行なわせるシステムもあり、２列車間の局所的な待避関係にのみ着目する方式[2]があるが、線区全体から見た場合には必ずしも有効な判断を与えるものではない。これに対して、より最適に近い整理案を作成するために、ボトルネックとなる端末駅の列車着発順序を最初に決めて、それに合わせて中間駅の待避関係を決定してゆく方式[3]も提案されている。しかし、これらはすべてヒューリスティックな手法であるため、最適解を生成するという保証は全くなく、熟練指令員にとってはあまり魅力的なものではない。

そこで本章では、列車順序変更を対象とし、分枝限定法を用いた最適化手法[4][5]を提案する。ここでは、多様な評価指標を総合的に判断し、大まかな運転整理案を作成するのは指令員にまかせ、その枠内で列車順序だけを総遅延時間に関して最適化しようという考え方にたっている。

この列車順序最適化に分枝限定法を応用しようという試みは既になされているが[6]、計算時間、記憶容量の両面で、実用的規模の問題に対する適用は困難であると指摘されている。本研究では、列車間の順序変更に対応する整数変数を導入し、まず本問題の組合せ最適化問題としての定式化を示す。これは大規模な混合整数計画問題となり、一般的な整数計画法の解法では多大な計算時間が必要となるが、本問題の構造に適した解法を構成することにより、計算の効率化が図られる。ここで提案する最適化手法は、列挙法的アプローチによるものであり、従来方法に比べ木探索方法、限定操作における下界値を改良することにより、計算時間と記憶容量を大幅に減少させている。また、変数の列挙順序を、列車進行の因果関係に対

応させることにより、高精度の下界値が得られ、さらに下界値計算における線形計画問題の解を簡単な漸化式で効率的に求めることができる。

この様に運転整理問題に固有の性質を利用することにより、実際的規模の問題の最適解を実用的時間で算出することが可能となった。この最適化手法はリアルタイムで使用すべく開発されたものであるが、前述のような各種ヒューリスティック手法の性能評価、あるいは新しいヒューリスティクスの発見といったオフライン的利用にも有効なものである。

なお、我々は運転整理に対し、熟練指令員の持つ経験的知識を有効に活用しようという考え方から知識工学の応用[5)7)]も試みている。列車順序変更を対象として、分枝限定法による最適解との比較によりその有効性を検討した。

3.2節では、対象とする運転整理問題の範囲について述べた後、組合せ最適化問題として定式化する。3.3節では、木探索方法、下界値計算法など分枝限定法を用いた解法を説明する。3.4節では、いくつかの数値実験を通して、本解法の計算効率の評価を行い、その実用性を明らかにする。最後に3.5節でヒューリスティック手法について概要を説明する。

3.2 問題の定式化

3.2.1 問題設定

各停列車と急行列車の2種類の列車が混在している列車ダイヤを考える。初期遅延が与えられた時、以降の最適列車運行を求めたい。なお、運転整理では運転休止列車の選定、運用変更、番線変更などの手段も用いられるが、これらは指令員の判断にまかせ、ここでは従来方式[2)3)6)]と同様に、列車間の順序変更ならびに着発時刻変更のみを扱う。最適性の指標としてはいろいろ考えられるが、一般的なものとして、全対象列車の対象区間における、各駅での発時刻の遅延総和をとることにし[8)]、列車種別による重み付けを行う。この時、各列車は以下の列車運行上の制約条件を満たす必要がある。

①各駅間の走行時間は決められた最小走行時間以上でなければならない。

②各駅には、その最小停車時間以上停車しなければならない。

③各駅での進入・進出の際の先行列車との時隔は、最小進入・進出時隔以上でなければならない。

④駅間での追越しは物理的に不可能である。

⑤各駅で同時に停車、通過できる列車数は、その駅の使用可能な着発線数以内でなければならない。

⑥各駅間を走行できる列車数は、その駅間閉そく数で決まる駅間許容列車数以内でなければならない。

また次の事項は禁止されているものとする。

⑦ダイヤより早発、早着すること

⑧同種列車間の順序変更

⑨各停の急行追越し

なお、理解を容易にするため端末駅を含まない場合について論じるが、含む場合についてもほぼ同様に扱えることを3.4節で簡単にふれる。

3.2.2 定式化

前節で述べた制約条件は以下のように定式化される。駅数M、列車数Nとする。各列車はダイヤより早発、早着は出来ないから（条件⑦）

$$d_{ij} \geq D_{ij} \quad (i=1,\ldots,M-1;\ j=1,\ldots,N) \tag{1}$$

$$a_{ij} \geq A_{ij} \quad (i=2,\ldots,M;\ j=1,\ldots,N) \tag{2}$$

ただし、d_{ij}、a_{ij}はそれぞれ i 駅での j 列車の発時刻、着時刻であり、D_{ij}、A_{ij}はダイヤ上での発時刻、着時刻を表わす。また駅間走行時間に関する制約（条件①）として、

$$a_{i+1,j} - d_{ij} \geq R_{ij} \quad (i=1,..,M-1;\ j=1,..,N) \tag{3}$$

R_{ij}：j 列車の i 駅～ i +1駅間最小走行時間

停車時間に関する制約条件（条件②）として

$$d_{ij} - a_{ij} \geq S_{ij} \quad (i=1,..,M-1;\ j=1,..,N) \tag{4}$$

S_{ij}：j 列車の i 駅での最小停車時間

となる。残りの制約条件③④⑤⑥⑧⑨は、いずれも列車間の順序関係に依存するものである。本問題では急行が各停を追越す場合があるため列車間の順序は可変である。そのため、列車間の前後関係に対応する0－1変数を導入して混合0－1整数計画問題として定式化する方法が考えられるが、解法に多大な計算量を要するため実用的ではない。そこで、列車ダイヤという特性を十分利用できるように、列車順序に着目した組合せ最適化問題として定式化する。

i 駅をk番目に発車する列車の番号を n(i,k)とする。急行列車数をNeとし、n(i,k)を決定するために整数変数 x_{ie} (i=2,..,M-1; e=1,..,Ne) を導入する。ここで x_{ie} は急行列車 e が i 駅で追越す各停列車の本数を表わすことにする。また u(i,e) (i=1,..,M-1; e=1,..,Ne) により i 駅での急行 e の発順序を表わす。第1駅での順序 u(1,e) (e=1,..,Ne) が与えられた時、u(i,e) は次の漸化式により求められる。

$$u(i,e) = u(i-1,e) - x_{ie} \quad (i=2,..,M-1;\ e=1,..,Ne) \tag{5}$$

ここで、

$$u(i,1) \geq 1 \quad (i=1,..,M-1) \tag{6}$$

$$u(i,e+1) > u(i,e) \quad (i=1,..,M-1;\ e=1,..,Ne-1) \tag{7}$$

$$u(1,e) = const \quad (e=1,..,Ne) \tag{8}$$

$$x_{ie} \leqq b_i - 1 \tag{9}$$

b_i：i 駅着発線数

という制約条件を満たす必要がある。(7) 式は急行列車間の順序変更禁止を、(9) 式は着発線数による制約 (条件⑤)を表わしている。各駅での急行の発順序 u (i,e) (e=1,..,Ne)が決まれば、各駅での全列車の発順序 n (i,k) (k=1,..,N)は、同種列車間の順序が一定であることにより一意に決まり、容易に求められる。この関係は次の様に表わせる。

$$N = \Phi(U) \tag{10}$$

$$N = \{ n(i,k) \mid i=1,..,M-1;\ k=1,..,N \}$$

$$U = \{ u(i,e) \mid i=1,..,M-1;\ e=1,..,Ne \} \tag{11}$$

ここでΦ(・)は、各駅での急行発順序をもとにして全列車の発順序を求める手続きを表わしている。

この n (i,k)を用いて、列車順序に依存する制約条件は、次の様に定式化される。

$$d_{i,n(i,k+1)} - d_{i,n(i,k)} \geqq HD_i \quad (i=1,..,M-1;\ k=1,..,N-1) \tag{12}$$

$$a_{i+1,n(i,k+1)} - a_{i+1,n(i,k)} \geqq HA_{i+1} \quad (i=1,..,M-1;\ k=1,..,N-1) \tag{13}$$

$$d_{i,n(i,k+hi)} - a_{i+1,n(i,k)} \geqq 0 \quad (i=1,..,M-1;\ k=1,..,N-hi) \tag{14}$$

ただし、HD_i、HA_i はそれぞれ i 駅での最小進出時隔、最小進入時隔を表わし、h_i は i ～ i +1駅間許容列車数を表わす。

前節の列車順序に依存する条件のうち、条件⑧,⑨は(5)～(11) 式により保証される。また条件③,④,⑥は(12)～(14)式で表わされている。最後に初期遅延状態を表わす制約式として、次式が必要である。

$$d_{i(j),j} - D_{i(j),j} = T_j \quad (j \in J) \tag{15}$$

ここで、J は初期遅延列車の集合、i (j) は j 列車の初期遅延駅、T_j は j 列車の初期遅延時間である。以上から本問題は次の組合せ最適化問題として定式化される。

$$P_0: \quad \min. \ \sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=1}^{N} w_j (d_{ij} - D_{ij})$$

s.t. (1)～(15)式

x_{ie}：非負整数

ここで、w_j は j 列車に対する重みであり、j 列車の種別により決まる。

3.3 分枝限定法による解法

3.3.1 解法の構成

理解を容易にするために、各急行は各駅で高々１本の各停しか追越すことができない（多重待避なし）ものとし、また初期遅延は第１駅で発生するものとして解法の基本的構成を説明する。これら二つの仮定を取り除いた場合については後述する。

多重待避なしとすると、x_{ie} は0-1変数となる。

$$x = (x_{21}, \ldots, x_{2,Ne}, \ldots, x_{M-1,1}, \ldots, x_{M-1,Ne})$$

とする。x の各要素の値を０または１に固定すると、(5)～(11) 式により列車順序は一意に決まり、(12)～(14)式の n (i,k) (i=1,..,M-1; k=1,..,N)の値が決まる。したがって、n (i,k)は x の関数とみなすことができ、$n_{ik}(x)$と表わすことにする。ここで x の値を固定した時、P_0が次の線形計画問題

$$P(x): \quad \min. \ \sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=1}^{N} w_j (d_{ij} - D_{ij})$$

s.t. (1)～(4), (15)

$$d_{i,n_{ik+1}(x)} - d_{i,n_{ik}(x)} \geqq HD_i \quad (i=1,..,M-1;\ k=1,..,N-1)$$

$$a_{i+1,n_{ik+1}(x)} - a_{i+1,n_{ik}(x)} \geqq HA_{i+1} \quad (i=1,..,M-1;\ k=1,..,N-1)$$

$$d_{i,n_{ik+hi}(x)} - a_{i+1,n_{ik}(x)} \geqq 0 \quad (i=1,..,M-1;\ k=1,..,N-hi)$$

となることに着目する。x をパラメータと考えて、その値を動かすことにより最適な x の値を求め、それに対応する d_{ij}、a_{ij}の値を求める。P(x)の最適解の値を F(x)とすると、原問題P_0は

P_1: min. F(x)

s.t. (5)～(9)式

$x_{ie} \in \{0,1\}$

と定式化し直すことができる。

P_1の制約式(5)～(9) 中の変数のうち u (i,e)は、x_{ie}により逐次求められる補助変数であり、P_1は実質的には混合0-1整数計画問題である。そこで、ここでは分枝限定法による解法を構成するが、基本的考え方は、0-1変数問題の解法である部分列挙法[9]にもとづくものである。

部分列挙法では、x の要素 x_{ie} (i=2,..,M-1; e=1,..,Ne) の値を適当な順序で次々と０または１に固定しながらすべての解を効率よく調べる。0－1変数の固定順序は、一般に計算効率を考慮して問題に応じて決められるが、本問題では、列車ダイヤという構造に基づき、１駅から順に列車発順序を決定することにし、それに対応した順序で x_{ie}を固定していく。すなわち x の第１要素から順に固定される。このような順序を採用することにより、次節で述べる様に効率的解法を構成することが可能になる。

上記の順序ですべての解を調べるために列挙木を導入し、分枝限定法による木探索を行な

う。

（1）列挙木

図3.1は駅数4、急行数2の場合の列挙木を表わしている。この図の例では、

$x=(x_{21}, x_{22}, x_{31}, x_{32})$であり、列挙木の深さをTとすると、T=(M-2)Ne=4である。(*)印の節点は、

$x_{21}=x_{22}=0,\quad x_{31}=1$

で、x_{32}はまだ固定されていない状態を表わしている。このように要素の一部のみ、0か1に固定されているxを部分解と呼び、(◎)印の節点のように、xのすべての要素が固定されているものを、完成解と呼ぶ。列挙木の最下端の節点が完成解を表わしており、このうち制約条件(5)～(9)式を満たすものが、P_1の実行可能解となる。

（2）限定操作

列挙木の探索過程において、それまでに求まっている最良の実行可能解を暫定解x*とする。また、列挙木のある節点に対応する部分解x_kがあり、x_kの完成解の中にx*より良い実行可能解が存在するかどうか調べることを測深と呼ぶ。

X_k：x_kの完成解のうち実行可能解の集合

とすると、測深の結果

$$F(x^*)<F(x)\quad (\forall x\in X_k) \tag{16}$$

であることが判明すれば、x_kの完成解の中にP_1の最適解は存在しないことになり、x_kに関しては探索を終端することができる。測深によりなるべく早い時点で探索を終端することが解法の効率化にとって重要であるが、(16)式による判定では、すべての$x\in X_k$についてP(x)を解きF(x)を求める必要がある。そこで何らかのより簡単な方法により、$F(x)(x\in X_k)$の下界値を求め、それを用いて測深を行なう。

$g(x_k)$：$F(x)\ (x\in X_k)$ の下界値

とすると、(16)式のかわりに、

$$F(x^*)<g(x_k)\quad (\leqq F(x)\quad (\forall x\in X_k)) \tag{17}$$

により判定することができる。(17)式により、暫定解の値と下界値を比較する手続きを限定操作という。効率的解法を構成するためには、良い下界値ならびに下界値計算法を用いることが重要であり、これについては次節で詳しく述べる。

（3）木探索方法

木探索方法としては、深さ優先探索、幅優先探索、選択すべき節点のうち評価量が最良となるものを選ぶ最良探索などがある[10]。探索すべき節点数が最も少なくて済むのは最良探索であるが、$O(2^T)$の記憶容量が必要となり、記憶容量の面で問題がある。また探索の後半

にならないと良い暫定解が得られないため、探索を途中で打ち切るとそれまでの計算が無駄に終わる可能性が高く、リアルタイムで使用するには適さない面がある。そこで本解法では、深さ優先探索を用いる。(17)式で暫定解の値F(x*)が、P_1の最適値に近い程限定操作は強化され、計算が効率化される。特に初期暫定解として良い解を得ることは効果が大きい。そこで初期暫定解が得られるまでと、それ以降との二段階に分けた探索方法を用いた。初期暫定解が得られるまでは、新たに分枝された節点のうち下界値最小のものを選択することにより、良い初期暫定解が得られるようにし、それ以降は二分木の0、1の節点のうち常に一方を優先的に探索する片側優先探索にすることにより計算の簡略化を図っている。前半の探索は、局所的判断により待避関係を決定する従来のヒューリスティック手法に対応するものと考えられ、後半の探索はより良い解の存在を調べ、それらを求める部分であると言える。この様な探索方法を採用することにより、木探索に必要な記憶容量はO(T)で済み、最良探索に比べ大幅に節約できるという長所がある。また数値実験の結果、本解法では初期暫定解の値として、比較的良い近似解が得られており、以降の探索における暫定解の改良の余地は少なく、最良探索に比べ探索される節点数の増加も少ない。さらに、このような0－1変数の列挙順序、木探索方法を用いることにより、次節で述べる効率的下界値計算法を得ることができる。

図3.1 列挙木
(M＝4，Ne＝2，T＝4)

（4）解法アルゴリズム

次に本解法のアルゴリズムを示す。

ステップ0：初期値設定

(1)計画ダイヤ、各種定数入力

(2)対象列車、対象駅区間入力

(3)初期遅延入力

(4)初期駅での順序 u(1,e) (e=1,..,Ne) 決定

(5)初期暫定解の設定

$Z=\infty,\quad S=\phi$

ステップ1：k=1

ステップ2：x_{k-1}のk番目の要素x_{ie}を0とする。

ステップ3：$u(i,e)=u(i-1,e)-x_{ie}$　とし、

$u(i,e)>0$,　$u(i,e)>u(i,e-1)$　でなければステップ7へ。

ステップ4：下界値計算により$g(x_k)$を求める。

$S=\phi$　かつ　$x_{ie}=0$,　$b_i\geqq 2$　ならば　$x_{ie}=1$　としてステップ3へ。

$S\neq\phi$　かつ　$Z<g(x_k)$　ならばステップ7へ。(限定操作)

ステップ5：$S=\phi$　ならば　x_{ie}の値(0または1)を下界値の小さい方に固定し部分解x_kを更新する。　$k<T$　ならば　$k=k+1$　としてステップ2へ。　(完成解の判定)

ステップ6：$S\leftarrow S(x_k)$,　$Z\leftarrow F(x_k)$　　(暫定解更新)

ステップ7：$x_{ie}=0$,　$b_i\geqq 2$　ならば　$x_{ie}=1$とし、ステップ3へ。　(この時、$S=\phi$ ならば　$g(x_k)=\infty$　とし、$S\neq\phi$　ならば部分解x_kを更新する。)

ステップ8：$k=1$　ならばステップ9へ。そうでなければ　$k=k-1$　とし、x_{ie}を自由変数にして部分解x_kとした後ステップ7へ。

ステップ9：計算終了。　$S(x^*)=S$,　$F(x^*)=Z$

ただし、自由変数とは値がまだ0とも1とも固定されていない変数であり、また、

x_k：k番目の要素まで値が固定されている部分解

T：0-1変数の数(xの要素数)

S：暫定解,　Z：暫定解の値,　x^*：P_1の最適解

S(x)：P(x)の最適解

とする。

3.3.2 下界値計算法

限定操作を行なう際に用いられる下界値$g(x_k)$を求めるための具体的方法について説明する。

部分解x_kにより1駅1番目発列車からI駅K番目発列車までの順序が固定されているとする。この時、部分解x_kに対して、P(x)は次のように書ける。

$$P(x_k):\quad \min.\ \sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=1}^{N} w_j\,(d_{ij}-D_{ij})$$

s.t.　(1)～(4), (15)

$$\left.\begin{array}{l} d_{i,\,n(i,k+1)} - d_{i,\,n(i,k)} \geqq HD_i \\ a_{i+1,\,n(i,k+1)} - a_{i+1,\,n(i,k)} \geqq HA_{i+1} \\ \quad (i=1,..,I-1;\ k=1,..,N-1\ :\ i=I;\ k=1,..,K-1) \end{array}\right\} \qquad (18)$$

$$\left.\begin{array}{l} d_{i,\,n(i,k+hi)} - a_{i+1,\,n(i,k)} \geqq 0 \\ \quad (i=1,..,I-1;\ k=1,..,N-h_i\ :\ i=I;\ k=1,..,K-h_i) \end{array}\right\}$$

$$\left.\begin{array}{l} d_{i,\,n_{ik+1}(x_k)} - d_{i,\,n_{ik}(x_k)} \geqq HD_i \\ a_{i+1,\,n_{ik+1}(x_k)} - a_{i+1,\,n_{ik}(x_k)} \geqq HA_{i+1} \\ \quad (i=I;\ k=K,..,N-1\ :\ i=I+1,..,M-1;\ k=1,..,N-1) \\ d_{i,\,n_{ik+hi}(x_k)} - a_{i+1,\,n_{ik}(x_k)} \geqq 0 \\ \quad (i=I;\ k=K-h+1,..,N-h_i\ :\ i=I+1,..,M-1;\ k=1,..,N-h_i) \end{array}\right\} \qquad (19)$$

ここで(18)式のn(i,k)は部分解x_kの固定変数により決まる定数であり、(19)式の$n_{ik}(x_k)$はx_kの自由変数に対応し、x_kの関数になる。

$P(x_k)$の最適解の値を$F(x_k)$とし、$F(x_k)$の値の下界値を求めたい。そのためにP(x)の制約式(19)を除いた問題、

$$\overline{P}(x_k):\quad \min.\ \sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=1}^{N} w_j\,(d_{ij}-D_{ij})$$

s.t.　(1)～(4), (15), (18)

を考える。$\overline{P}(x_k)$の最適解の値を$f(x_k)$とすると、$\overline{P}(x_k)$はP(x)の制約式の一部を取り除いた緩和問題であるから、

$$f(x_k)\leqq F(x_k) \qquad (20)$$

が成立する。したがって$f(x_k)$は$F(x_k)$の下界値を与える。またxが完成解の時には$\overline{P}(x_k)$とP(x)は一致し

$$f(x)=F(x)$$

となる。したがって下界値$g(x_k)$として、この$f(x_k)$を用いることができる。

$\overline{P}(x_k)$は線形計画問題であるから、$f(x_k)$は通常のシンプレックス法などにより容易に求められるが、本解法では、本問題の特殊性を利用して、より効率的な$\overline{P}(x_k)$の解法を提案する。

$\overline{P}(x_k)$の変数d_{ij}, a_{ij}のうち、x_kによる順序固定部分に対応する変数の添字(i,j)の集合をV、そうでないものを$\overline{V}$とする。また同様に、制約式(1)～(4)において順序固定部分に対応する制約式を(1)a～(4)aとし、その他の制約式を(1)b～(4)bとする。この時、$\overline{P}(x_k)$は次の二つの線形計画問題に分割される。

$$\overline{P}_1(x_k):\quad \min.\ \sum_{(i,j)\in V} w_j\,(d_{ij}-D_{ij})$$

$$\text{s.t.}\quad (1)a\sim(4)a,\ (15),\ (18)$$

$$\overline{P}_2(x_k):\quad \min.\ \sum_{(i,j)\in V} w_j(d_{ij}-D_{ij})$$

$$\text{s.t.}\quad (1)b\sim(4)b$$

$\overline{P}_1(x_k)$は、x_kにより列車順序が固定されている部分における総遅延時間最小の列車運行を求める問題であり、$\overline{P}_2(x_k)$は、列車順序未定部分における理想回復運転を求める問題になっている。ただし、理想回復運転とは、各列車が時隔などの相互の関係を無視して、個々に遅延最小化を図った場合の仮想的な列車運行である。

$\overline{P}_1(x_k)$の解は、初期状態をもとに次の漸化式により容易に求められる。

$$\left.\begin{aligned} d_{i,n(i,k)} &= \max\left(D_{i,n(i,k)},\ a_{i,n(i,k)}+S_{i,n(i,k)},\ d_{i,n(i,k-1)}+HD_i,\ a_{i+1,n(i,k-hi)}\right) \\ a_{i,n(i,k)} &= \max\left(A_{i,n(i,k)},\ d_{i-1,n(i,k)}+R_{i-1,n(i,k)},\ a_{i,n(i,k-1)}+HA_i\right) \end{aligned}\right\} \quad (21)$$

また、$\overline{P}_2(x_k)$の制約式(1)b～(4)b 中の、Vに属する添字(i,j)の付いた変数には$\overline{P}_1(x_k)$の最適解の値を代入し、それらを初期状態として、$\overline{P}_2(x_k)$も次の漸化式により解くことができる。

$$\left.\begin{aligned} d_{ij} &= \max\left(D_{ij},\ a_{ij}+S_{ij}\right) \\ a_{ij} &= \max\left(A_{ij},\ d_{i-1j}+R_{i-1j}\right) \end{aligned}\right\} \quad (22)$$

<命題>　$\overline{P}_1(x_k)$, $\overline{P}_2(x_k)$の最適解はそれぞれ(21)、(22)の漸化式により与えられる。

［証明］　$\overline{P}_1(x_k)$の場合について背理法により証明する。仮に(21)式により得られる解が最適解でないとすると、その時の最適解には(21)式が成立しない$d_{i,n(i,k)}$が存在することになる。そのような最初のｉ，n(i,k) に対して最適解を$\hat{d}_{i,n(i,k)}$、(21) 式により得られる値を$d_{i,n(i,k)}$とする。この時、$\hat{d}_{i,n(i,k)} \neq d_{i,n(i,k)}$であるが、$\hat{d}_{i,n(i,k)} < d_{i,n(i,k)}$　とすると、$\hat{d}_{i,n(i,k)}$は(21)式により、$\overline{P}_1(x_k)$の制約式(1)a,(4)a,(18)のうち少なくとも一つを満たさないことになる。したがって、$\hat{d}_{i,n(i,k)} > d_{i,n(i,k)}$　である。この時、(21)式と(1)a～(4)a,(18)式により、

$$\hat{a}_{i+1,n(i,k)} \geqq a_{i+1,n(i,k)}$$

$$\hat{d}_{i+1,n(i,k)} \geqq d_{i+1,n(i,k)}$$

となる。この関係が順次繰返されるから、以降最適解の発時刻の方が(21)式で得られる値よりも早くなることはなく、しかも少なくとも一つは、

$$\hat{d}_{i,n(i,k)} > d_{i,n(i,k)}$$

となるから、評価関数の値は最適解の方が(21)式により得られる解より大きくなり矛盾する。したがって(21)式により得られる解が最適解となる。//

また、$\overline{P}_2(x_k)$についても全く同様の議論が適用できる。

図３.２　初期状態の例

$\overline{P}_1(x_k)$, $\overline{P}_2(x_k)$ の最適解を $S_1(x_k)$, $S_2(x_k)$ とし、最適値を $f_1(x_k)$、$f_2(x_k)$とすると、(21)、(22)式による解法から、$P(x_k)$の最適解$S(x_k)$、最適値$f(x_k)$は、

$$S(x_k)=S_1(x_k)\cup S_2(x_k),\quad f(x_k)=f_1(x_k)+f_2(x_k) \qquad (23)$$

として得られる。

本解法では、列車順序が１駅１番目発列車から順に決まるように、部分解の列挙における0－1変数を固定している。このような0－1変数の固定順序を用いることにより、上記の様な簡便な下界値計算が可能となった。また、木探索において、部分解x_kの下界値計算として$\overline{P}(x_k)$を解く際には、一段前の探索で$\overline{P}(x_{k-1})$の解が得られており、実際に計算するのは、新たに列車順序が固定された部分についてだけでよい。$\overline{P}(x_k)$は、変数の数2(M-1)N、制約式数約4(M-1)N～7(M-1)N の線形計画問題である。たとえば、駅数10、列車数10の場合、変数180、制約式約360～630 程度の大きさになる。本解法では、これが高々数回(21)、(22)式の計算を繰返すだけで解けることになり、本問題固有の構造を利用することにより非常に効率化されている。

3.3.3 解法の実際

実際の問題では、遅延が生じた時、運転整理の対象とすべき列車、区間を指定し、制御開始の初期時刻を設定する。次に初期時刻における各列車の在線状況を最後に発車(到着)した駅における発(着)時刻により求め、初期状態とする。なお、１駅未発列車については、発車予定時刻を用いる。図３.２はこの初期状態を示したものであり、○印は初期在線状況、×印

は順序変更決定の対象となるべき部分を示している。解法としては、第１駅から順に発車順序を決定していく点は前節と同じであるが、途中駅で新たに順序決定対象列車が加わってくる点が異なっている。

また、前節までは、簡単のため多重待避なしと仮定したが、実際には待避不可能な駅や２本以上の列車待避可能な場合がある。したがって各駅での待避可能列車数が任意に指定できるように、0−1木のかわりに待避可能列車数だけの枝を持つ木を用いる。この場合、木の枝分かれの数がかわっただけであり、前節までと同様の解法が適用できる。

3.4 数値実験

数値実験により本解法の有効性を検討する。表３.１は問題の規模を変化させた場合について本解法を適用した例である。本問題は組合せ最適化問題であり、問題の規模に対して計算量は指数的に増大する性質があるが、表３.１に示されるように、本解法では計算量の増大は実用的範囲内に抑えられている。たとえば駅数12、列車数14の問題ｄが、10秒程度で解けており、十分実用的な計算時間であるといえる。なお本解法を適用した列車ダイヤにおける最適解の例を図３.３に示す。

本解法では精度の良い下界値を求めるために、$\overline{P}(x_k)$ を解いているが、これは列車順序固定部分の最適解にさらに未定部分の理想回復運転を考慮していることになる。これに対して単に列車順序固定部分のみで下界値を求めると、下界値の精度が悪くなりその結果計算量

表３.１　問題規模と計算効率の関係

問　題*1	a	b	c	d
駅　数	7	7	１０	１２
列車数	6	１０	１０	１４
計算効率　上段：探索節点数　下段：計算時間 (秒：cpu time)*2				
解法Ａ	3381 30.81	4003 *3 58.44	— —	— —
解法Ｂ	43 0.28	98 0.67	266 2.05	1462 17.22
提案解法	72 0.16	150 0.31	683 1.22	4938 9.85

*1　初期遅延　600秒
*2　使用計算機　VAX-11/780
*3　メモリーオーバーでストップした時点での値

図３.３　最適解の例
（１０駅、１０列車）

が増大する。従来、本問題に対して分枝限定法を適用した試みは、列車順序固定部分のみで下界値を求め、最良探索を用いた場合に相当している。この方法を解法Ａとする。表３.１で示されるように、従来方法に相当する解法Ａでは計算時間、記憶容量とも多大になり、実用的規模の問題に対する適用は困難である。

また本解法では、記憶容量の節約、途中で計算を打ち切った場合の解の有効性、計算の簡略化を考慮して、二段階の深さ優先探索法を用いた。これに対し最良探索による方法を解法Ｂとする。表３.１に示されるように、解法Ｂと比べて探索節点数は多くなるが、その割合は問題の規模に対してほぼ定常的であり、このような探索方法を採用することにより、最良探索に比べて計算時間が大きく増加することはない。

次に問題の規模を一定とし、初期遅延の大きさを変化させた場合を表３.２に示す。表２は駅数10、列車数10の問題であるが、初期遅延の大きさにより、計算時間はかなり変化している。この様に、乱れの大きさ、列車ダイヤのパターン等によっても計算時間はかなり変動す

表3.2　初期遅延と計算効率の関係

初期遅延（秒）	200	400	600	800	1000
探索節点数	193	194	683	350	4252
計算時間（秒）	0.38	0.39	1.23	0.69	8.03
最適値	2625	7435	15085	24510	38515
初期暫定値	2625	7440	15345	24700	39180

ると思われ、今後より多くの場合に適用し検討する必要があるが、本実験結果では、非常に短時間で最適解が得られており、本解法の有効性を示している。

また本解法では下界値計算の際に漸化式による簡便な線形計画問題の解法を用いており、その結果表3.1、3.2でわかるように探索1回当りの計算時間は10^{-3}秒程度のオーダーで済んでいる。これに対して、通常のシンプレックス法を適用した場合、計算量は大幅に増大するものと思われる。

図3.4　最適解の例（端末駅を含む場合）

なお、端末駅については、番線変更、運用変更などの手段が重要となるが、本論文で扱う順序変更レベルにおいては、番線競合の制約条件を追加するだけで本解法をそのまま適用することができる。端末駅を含む場合の最適解の例を図3.4に示す。図3.4は東海道新幹線のダイヤを用いた例であり求解時間は5.6秒であった。

3.5 ヒューリスティック手法

前節で提案手法の有効性を検証し、実用的規模の問題に対しても適用可能であることが示された。しかし、より大規模な問題や複雑な線区に対する最適化では、計算時間が多大となり困難が予想される。そこで、実用的時間でより幅広く適用可能な手段としてヒューリスティック手法について検討した[5)7)]。

人間は運転整理問題を列車ダイヤ図の上で試行錯誤的に解いている。この人間が行う判断過程を計算機で忠実に模擬すれば、この大規模組合せ問題の準最適解を効率的に生成する有力な解法になるはずである。

そこで、マンマシン型シミュレータにより、十分訓練を積んだ人間が列車ダイヤを書き変えていくときの判断処理過程を分析し、そこで用いられているヒューリスティクスを抽出した。それをルールの形で表現し、プロダクションシステムとして実現した。本システムの基本構成は、（1）知識ベース、（2）データベース、（3）作業メモリー、（4）インタプリタの4つからなり、ユーザインタフェースとして、キーボード、CD（キャラクタディスプレイ）、GD（グラフィクディスプレイ）およびハードコピーが接続されている。このようにプログラムを分割したのは、各部の修正が比較的独立に行えること、プログラムの可読性が高まることなどの理由による。特に、開発過程ではルールの追加、修正などのプログラム変更が多いので、このような構成はその変更作業を容易にする。

（1）知識ベース

知識ベースはルールを蓄えておくところである。ルールは知識を条件文IF～，THEN...の形で記述したものであり、IF～をpremise部、THEN...をaction部と呼ぶ。本システムは関数型言語ＬＩＳＰで書かれており、ルールの集合は個々のルールを要素とする次のようなルールで表現されている。

（（ルール1）（ルール2）．．（ルール1））

各ルールｉは、次の形式のリストになっている。

（ルール名(premise1)(premise2)..(premise m)
　　(action1)(action2)...(action n)）

（2）作業メモリーとデータベース

作業メモリーは、問題解決過程で一時的に必要な情報を記憶しておくところで、頻繁に参照、書き換えが行われる。次の五つの情報が記憶されている。

1）処理モード　　2）チェック列車集合　　3）不合理事象

4）処理事象　　5）修正ダイヤ

データベースには計画ダイヤ、運転条件などのシステム特性を表す固定的データが記憶されており、問題解決の途中で参照されることはあるが、書き換えられることはない。

（3）基本動作とインタプリタ

初期遅延情報を入力すると、インタプリタが起動し、運転整理案の作成が開始される。インタプリタは実行すべきルールの選択およびそのaction部の実行を繰り返しながら、作業メモリーの内容を修正する。このようにして、作業メモリー内の修正ダイヤを徐々に修正してゆき、停止した時点の修正ダイヤが準最適解となる。

（4）適用例

3.4節の数値実験で用いたのと同様な計画ダイヤに対して本システムを適用した。その結果、ほとんどのケースで分枝限定法による最適解と一致した。また計算時間も1秒以内で済んでおり、効率的である。ただし、知識ベースで考慮していないような特性をもつ列車ダイヤにはうまく作動しない。したがって、個々の問題に応じて適切なヒューリスティクスを抽出して知識ベースを構成することが重要である。

3.6 結言

従来、最適化手法の適用が困難であった運転整理における列車順序決定問題に対し、本章では組合せ最適化問題としての定式化を行ない、さらに分枝限定法による効率的解法を提案した。0−1変数の列挙順序、木探索方法、下界値計算、などに本問題固有の構造を利用することにより実用的解法を得ることができた。

本論文では運転整理における順序変更レベルのみ扱ったが、今後番線変更、運用変更、運転休止などより上位レベルの問題を研究していく必要がある。その場合、評価関数は単に総遅延時間だけではなく、多目的最適化問題になる。さらに、その評価の考え方自体もまだ関係者の間で合意に達していないのが現状のようである。これらのより複雑な問題に対処するためには、問題の特性を利用して本解法自体を一層効率化するとともに、3.5節で検討したような何らかのヒューリスティック手法とうまく組合せて行く方向が重要であろう。さらに実際の場において最終的判断を下す人間にとって使いやすい形のマン・マシンシステムとしての在り方も忘れてはならない大きな研究課題である。

参考文献

(1) 長谷川：鉄道における運行管理システム、情報処理、Vol.25、No.3、pp.222～231 (1984).

(2) 佐藤、他：運転整理におけるローカル自動判断、第15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論文集、pp.246～250 (1978).

(3) 香西、他：東北・上越コムトラック運転整理システム、第19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論文集、pp.191～195 (1982).

(4) 安部、荒屋：分枝限定法を用いた列車順序最適化手法、計測自動制御学会論文誌、Vol. 21、No.5、pp.514-521 (1985).

(5) S. Araya, K. Abe et al.：An Optimal Rescheduling for Online Train Traffic Control in Disturbed Situations, Proceedings of the 22nd IEEE Conference on Decision & Control, pp.489-494, 1983.

(6) 大川、他：新幹線における最適待避変更アルゴリズム、第１８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論文集、pp.145～149 (1981).

(7) 荒屋、安部：ヒュ-リスティクスを利用した列車運転整理手法、電気学会論文誌、Vol. 103 -C、No.11、pp.249～256 (1983).

(8) 列車群管理プロジェクト研究室：新幹線列車群管理の研究、鉄道技術研究報告、Ｎｏ．1139、1980.

(9) 今野：整数計画法、講座・数理計画法６、産業図書、1981.

(10) 茨木：組合せ最適化−分枝限定法を中心として−、講座・数理計画法８、産業図書、1983.

第4章　列車運行シミュレーション方式

4.1 緒言

前章では比較的小規模なダイヤ乱れに対する運転整理手法として、列車順序決定問題について論じた。本章ではより大規模な乱れも含む一般の運転整理問題を対象とする。

運転整理における計算機支援は従来より指令員とのマンマシン方式がとられ、運行実績、遅延情報等の判断資料の提供、整理案の進路制御への反映等に利用されている[1]。しかし整理案作成自体は複雑な組合せ問題であり、最適性の評価指標も明確でないため、計算機による最適化は困難であり、第3章で述べたような順序変更レベルでの最適化の研究[2]がなされている程度である。そのため、整理案作成における計算機の最も有力な役割は予測シミュレーションにより指令員の判断を補助することであり、この方式はすでに実用化されてきた[3][4]。この場合、計算機の予測結果に対し指令員が修正を行なうという形で、シミュレーションが対話形式で繰り返される。また、順序変更、番線変更レベルでは自動判断を伴なったシミュレーション方式[3]もあるが、最適性の保証はなくやはり指令員の修正が必要である。運転整理においては、一度に全体的な最適案を作成することは困難であり、きめ細かい運転整理を行なうためには、シミュレーションが試行錯誤的に頻繁に繰り返せることが望ましい。また、筆者らが自動化の試みとして開発してきた運転整理エキスパートシステム[5][6]もシミュレーションをベースとしており、実用性の面からその効率化が強く要求されている。その様な理由から、筆者らは列車運行シミュレーションの高速化の研究を進めてきた[7]-[9]。

実際の列車運行は多くの要因から決定される連続的軌跡となるが、運転整理における予測シミュレーションでは、要求される精度と計算時間の点から駅単位の離散的方式がとられている[10]。従来方式[3][4]もオンライン使用という観点から効率化されたものであるが、基本的には処理イベントのイベントテーブルへの登録、時刻順の選択という一般的なイベントシミュレーション方式を踏襲したものであった。これに対して筆者らは列車運行がスケジュール制御されるシステムであることに着目して、スケジュールにより規定されるイベント間の位相的関係を表現した因果グラフを用いる方式[7]を開発した。この方式はイベント処理を因果順に行なうことにより、イベント選択、処理を効率化し、計算時間の短縮を図ったものである。さらに本論文では、運転条件等の時間的要素も枝の重みとして表すことにより、列車運行をグラフ表現する方法を示す。そして、このグラフ表現を用いてシミュレーションを最長径路アルゴリズムで行なうことにより、一層効率化を図った最長径路方式[8][9]を提案する。また運転整理では、部分的変更に対しシミュレーションが繰り返されるという特徴に着目し、グラフの部分的修正に対する、最長径路長の更新アルゴリズムを考案し、これを用いてさら

に効率化を図ったパラメトリック方式[8)9)]も提案する。これは最長径路方式を基にして、部分的変更に対しては、変更影響の波及部分のみを求める方式であり、計算量がシミュレーション対象範囲よりむしろ、変更影響の波及範囲に依存している。ゆえに局所的変更に対しシミュレーションが繰り返される場合効果的である。

なお、これらのグラフ方式は、運転整理において重要なデッドロック検出に関しても有効であり、デッドロック発生箇所のみならず、その原因も速やかに提示することができる。実際の線区データに基づき、数値実験によりこれらの方式の有効性を検討した結果、計算時間の大幅な短縮が見られ、今後の運転整理の円滑化、自動化への有効性が確認された。以下、4.2節で列車運行条件とそのグラフ表現について、4.3節でシミュレーション方式を説明し、4.4節で数値実験による検討を行なう。また最後に4.5節で本シミュレータを用いた運転整理支援システム[5)6)]の概要について説明する。

4.2 列車運行条件のグラフ表現

4.2.1 列車運行モデル

実際の列車運行は、車両性能、設備条件、旅客行動等多くの要因により決定されるが、これらを忠実に模擬するには膨大な計算時間が必要となるため、シミュレーションでは用途に応じたモデル化が行なわれる。整理案作成上の補助手段としての予測シミュレーションでは、連続型モデルによる詳細な運行軌跡は必要なく、駅単位または閉そく単位の離散的モデル化が行なわれ、通常計算時間の点から駅単位方式がとられる[10)]。

駅単位の離散的モデルでは、列車走行を列車の駅への到着、出発というイベントで表現し、駅間走行は直線で近似される。列車走行は運転条件とスケジュールにより規定され、スケジュールは列車ダイヤにより規定されている。また、運転条件は、車両性能、設備状態等を考慮してあらかじめ算出されたものであり、各駅毎に列車種別、編成両数、列車間の関係等に応じて定められている。

予測シミュレーションにおける列車走行は次の考え方に基づいて決められる。

(i)正常状態では常に列車ダイヤに従って運転する。

(ii)ダイヤ乱れにより列車が遅れているときは、制約条件（運転条件とスケジュール）を満たす範囲で極力遅延回復を図る。

4.2.2 列車運行の定式化

前節のモデルに基づき、列車運行を定式化する。本モデルでは列車運行は列車の各駅着発時刻により決定される。列車運行の制約条件は次のようになる。

＜個々の列車の走行条件＞

(1)駅間最小走行時間

(2)各駅最小停車時間

(3)各駅着発時刻、使用番線

＜列車間の運行条件＞

(4)各駅最小進入・進出時隔

(5)駅間許容列車数

(6)最小折返し時間

(7)各駅出発順序、番線使用順序

(8)車両運用

このうち、最小走行時間、最小停車時間は基本的に列車種別毎に定められており、

$a(i,j)$：i駅でのj列車の到着時刻

$d(i,j)$：i駅でのj列車の出発時刻

$A(i,j)$：列車ダイヤ上でのi駅j列車到着時刻

$D(i,j)$：列車ダイヤ上でのi駅j列車出発時刻

$R(i,l)$：i〜i+1駅間のl種列車の最小走行時間

$S(i,l)$：i駅でのl種列車の最小停車時間

$l(j)$：j列車の種別

とすると、個々の列車走行条件は

$$\begin{aligned} &a(i+1,j)-d(i,j)\geqq R(i,l(j)) \\ &d(i,j)-a(i,j)\geqq S(i,l(j)) \\ &d(i,j)\geqq D(i,j) \\ &a(i,j)\geqq A(i,j) \end{aligned} \qquad (1)$$

と表わされる。

また、駅進入・進出時の列車間の時隔は、実際には駅構内のポイント群の動きにより決まるが、一般には対象となる2列車の状態・関係によりいくつかのパターンを定め、そのパターン毎に各駅での最小時隔が決められる。時隔パターンは、駅構造、モデルの詳細度に応じていろいろ考えられるが、ここでは次のものを考える。

$h_a(l_1,l_2)$：種別l_1列車に続いて種別l_2列車が到着する場合の時隔パターン

$h_d(l_1,l_2)$：種別l_1列車に続いて種別l_2列車が出発する場合の時隔パターン

$h_b(l_1,l_2)$：種別l_1列車に続いて種別l_2列車が同一番線を使用する場合の時隔パターン

この時、

$H(i,h)$：i駅での時隔パターンhの時の最小時隔

$j_a(i,j)$：j列車の直前にi駅に到着する列車

$j_d(i,j)$：j列車の直前にi駅を発車する列車

$j_b(i,j)$：j列車の直前にj列車のi駅到着番線を使用した列車

とすると、時隔による制約条件は、

$$
\begin{aligned}
a(i,j) &\geq a(i,j_a(i,j)) + H(i,h_a(l(j_a(i,j)),l(j))) \\
a(i,j) &\geq d(i,j_b(i,j)) + H(i,h_b(l(j_b(i,j)),l(j))) \qquad (2) \\
d(i,j) &\geq d(i,j_d(i,j)) + H(i,h_d(l(j_d(i,j)),l(j)))
\end{aligned}
$$

と表わされる。

また実際の列車走行は駅間の閉そく区間による制約も受けるが、ここでは駅単位のモデル化のため、これにかわるものとして、駅間許容列車数を定める。

$k(i)$：i～i+1駅間許容列車数

$j_k(i,j,k)$：j列車のk本前にi駅を出発した列車

とすると、駅間許容列車数による制約は、

$$d(i,j) \geq a(i+1,j_k(i,j,k(i))) \qquad (3)$$

となる。

また、最小折返し時間も、駅構造、列車種別、編成両数等により異なり、次の様なパターンを考える。

$u(l_1,l_2,n_1,n_2)$: n_1両のl_1種別列車がn_2両l_2種別列車につながる時の折返しパターン

このとき、

$n(j)$：j列車の編成両数

$j_u(j)$：j列車の前運用列車

$U(i,u)$：i駅でのパターンuの最小折返し時間

とすると、

$$d(i,j) \geq a(i,j_u(j)) + U(i,u(l(j_u(j)),l(j),n(j_u(j)),n(j))) \qquad (4)$$

となる。

なお、出発順序、番線使用順序、車両運用は(2)、(4)式で表わされており、列車運行の制約条件は、(1)～(4)式で表現される。この時、列車運行は(1)～(4)式より次式で求められる着発時刻により表現される。

＜列車着発時刻＞

$$
\begin{aligned}
a(i,j)=\max\ (&A(i,j), \quad d(i-1,j)+R(i-1,l(j)), \\
&a(i,j_a(i,j)) + H(i,h_a(l(j_a(i,j)),l(j))), \\
&d(i,j_b(i,j)) + H(i,h_b(l(j_b(i,j)),l(j)))) \\
d(i,j)=\max\ (&D(i,j), \quad a(i,j)+S(i,l(j)), \qquad (5) \\
&d(i,j_d(i,j)) + H(i,h_d(l(j_d(i,j)),l(j))), \\
&a(i+1,j_k(i,j,k(i))), \\
&a(i,j_u(j)) + U(i,u(l(j_u(j)),l(j),n(j_u(j)),n(j))))
\end{aligned}
$$

ただし、(5)式は一般的な表現であり、先行列車が存在しない時、折返し駅でない時等はそれらに対応する項は除外される。なお、ここで述べた定式化はあくまで1例であり、より簡略化あるいは詳細化しても以下の議論は成立する。

4.2.3 グラフ表現

上記、列車運行モデルにおいて、列車の駅到着、出発という各イベントを点で表わし、制約条件により規定されるイベント間の関係を枝で表現することにより、列車運行を有向グラフで表現する。グラフの点を

$v_a(i,j)$：j列車がi駅に到着するというイベント

$v_d(i,j)$：j列車がi駅を出発するというイベント

とすると、制約条件は次の様に有向枝で表現することができる。

(1)式の走行時間、停車時間に関する条件は、列車ダイヤで規定される列車の走行ルートを表わす次の走行ルート枝で表現される。

枝（$v_d(i,j)$, $v_a(i+1,j)$）, 重み$R(i,l(j))$

枝（$v_a(i,j)$, $v_d(i,j)$）, 重み$S(i,l(j))$

また、ダイヤ上の着発時刻による制約は、ダミーの基準点v_0を設定することにより次の基準時刻枝

枝（v_0, $v_d(i,j)$）, 重み$D(i,j)$

枝（v_0, $v_a(i,j)$）, 重み$A(i,j)$

で表わされる。さらに(2)式の時隔による制約は出発（到着）順序枝

枝（$v_d(i,j_d(i,j))$, $v_d(i,j)$）, 重み$H(i,h_d(l(j_d(i,j)),l(j)))$

枝（$v_a(i,j_a(i,j))$, $v_a(i,j)$）, 重み$H(i,h_a(l(j_a(i,j)),l(j)))$

と番線使用順序枝

枝（$v_d(i,j_b(i,j))$, $v_a(i,j)$）, 重み$H(i,h_b(l(j_b(i,j)),l(j)))$

で表わされる。また、(3)式の駅間許容列車数による制約は次の駅間列車数枝

枝（$v_a(i+1,j_k(i,j,k(i)))$, $v_d(i,j)$）, 重み0

で表わされ、(4)式の折返し時間に関する制約は、次の車両運用枝

◎：基準点　　●：着イベント　　○：発イベント

e_1：基準時刻枝　　e_2：走行ルート枝

e_3：出発（到着）順序枝　　e_4：番線使用順序枝

e_5：駅間列車数枝

図4.1 列車運行のグラフ表現

枝（va(i, ju(j)), vd(i,j)),　重みU(i, u(l(ju(j)), l(j), n(ju(j)), n(j)))

で表わされる。

この様にして、図4.1の様なグラフが作成される。図4.1は一般的な形であり、折返し駅では車両運用枝が付加される等、状況に応じて接続関係は若干異なる。なお、ここで述べたグラフ表現は、次章で提案する最長径路方式、パラメトリック方式で用いるものであり、因果グラフ方式では、イベント間の位相的関係のみを対象としていたため、上記グラフから枝の重みと基準時刻枝を取り除いたグラフが用いられていた。

4.3 シミュレーション方式

4.3.1 グラフ方式の導入

運転整理における予測シミュレーションには以下のような特徴がある。

1) スケジュール制御されるシステムを対象とする。

2) 離散的な近似モデルに基づくイベントシミュレーションである。

3) 緊急時でのオンライン処理としての時間的制約を受ける。

4) 対話形式で、部分的条件変更に対し繰り返し用いられる。

5) ダイヤ変更に対するデッドロック検出機能が重要である。

上記特徴3) 4)により、運転整理の円滑化、質的向上、さらには自動化のためにシミュレーションの高速化が強く望まれている。従来の列車運行シミュレーション方式[3) 4)]も、特徴3)の観点から駅単位の近似モデルによる効率化を図ったものであるが、処理方式自体は一般的なイベントシミュレーションの考え方に基づいている。すなわち、システム状態（列車群の位置）を離散的なイベント（列車が駅に到着、出発するという事象）の発生により変化させていく方式である。具体的にはイベント処理（イベントの発生およびそれに伴うシステムの状態変化）が可能となったイベントをその処理可能時刻とともにイベントテーブルに登録しておき、処理可能時刻の早い順に処理イベントを選択し、イベント処理を行っていく。このときイベントテーブル内のイベントの時刻順のサーチまたはソーティングが必要となる。またイベント間の因果関係が明確でないため、イベントテーブルへ登録する時点では、他イベントとの因果関係のチェックはなされていない。そのため、時刻順に選択されたイベントが、イベント処理の際に処理不能であることが判明し、再度処理可能時刻の計算、処理イベントの選択のやり直しが必要となる場合が多い。

これに対して筆者らは、上記特徴1) に着目して、スケジュールにより規定されるイベント間の因果関係をあらかじめグラフ表現しておく因果グラフ方式[7)]を開発した。この方式では、因果グラフを用いて処理イベントの選択を因果順に行うことが可能となる。これにより従来方式における処理イベント選択のための時刻順のサーチや、イベント選択と因果関係チェックとの間の冗長な処理が不要となり、計算が効率化される。

また本論文では、さらに時間的要素も含めてすべての条件をグラフ表現し、シミュレーションにおける処理をすべてグラフ上の処理として行うことにより効率化を図った最長径路方式[8) 9)]を提案する。さらに、最長径路方式を基に、特徴4)に着目して実用的観点からいっそう効率化を図ったパラメトリック方式[8) 9)]を提案する。

図4.2にこれらの3種類のグラフ方式の処理概要を示す。まず、列車ダイヤ、運転条件、設備条件等のデータから、グラフを作成する。この部分はオフライン処理可能である。運転整理においては対話形式で処理が進められる。まず、列車遅延等の乱れ情報入力、予測シミュレーション、結果表示が行なわれる。それに対し、指令員によるダイヤ変更、予測シミュレーションが、最終的に満足のいく整理案が得られるまで繰り返される。ダイヤ変更の矛盾によるデッドロック発生は、シミュレーションの際に検出され、発生箇所、原因等の情報を表示し、指令員による矛盾箇所の修正が行なわれる。

図4.2 シミュレーション処理概要

これらのグラフ方式は以下の様な特長を有する。

<グラフ方式の特長>

i) グラフ表現を用いたシミュレーションの効率化。

ii) グラフ作成後の条件変更に対しては、変更部分に関してのみグラフを修正すればよい。

iii) デッドロック発生箇所のみならず、その原因も明確に提示できる。

特長 i) は因果グラフ方式、最長径路方式、パラメトリック方式の順により顕著となるものであり、特長 ii)、iii)は上記3方式に共通である。特長 ii) は特徴 4)の観点から大きな時間節約となる。また特長 iii) は特徴 5)の観点から重要である。

4.3.2 最長径路方式

本モデルでは、列車運行はスケジュールと運転条件により決定され、これらの制約条件は枝の重みとして時間的要素も与えることにより、前章で示した様に有向グラフで表現される。すなわち、運転整理における近似モデルでは、列車運行に対し、日程計画、生産計画等多くのスケジューリング問題と同様な、グラフ表現が適用できる。シミュレーションは各列車の各駅での着発時刻を求めることであり、これは、グラフの点で表わされるイベントの発生する時刻（イベント時刻）として与えられる。各列車が極力、計画ダイヤへの復帰を図るという列車走行の考え方は、PERTにおける最早開始時刻に対応しており、(5)式で与えられる各点のイベント時刻は、基準点から各点までの最長径路長として求められる。この様なシミュレーション方式を最長径路方式と呼ぶことにする。

シミュレーションは次の二段階より成る。

i) 制約条件(変更データ)からグラフを作成(修正)する。

ii) 基準点から各点までの最長径路長を求める。

グラフにおけるサイクルは、列車運行におけるデッドロック現象に対応する[11]。したがってスケジュールに整合性があれば、アサイクリックグラフとなる。グラフは一度作成すれば、以降は変更箇所のみの修正で済む。最長径路を求める際にはまずグラフのトポロジカルソート[12]が行なわれる。これは、アサイクリックグラフ G＝（V,E)に対し、すべての枝(u,v) ((u,v)∈E)において　num(u)<num(v) となるように、点 v (v∈V)に番号 num(v) を割り当てることによる順序付けであり、num(v) は点 v のトポロジカルオーダーと呼ばれる。

グラフにサイクルが存在する場合は、トポロジカルソートの際に検出され、サイクルを構成する枝により、デッドロックの原因であるダイヤ上の矛盾箇所も検出される。この時一旦処理を中止し、まず矛盾箇所を修正し、その結果アサイクリックグラフとなり、トポロジカルソートが終了したならば、次に各点の最長径路長を求める。これはトポロジカルオーダーを用いることにより容易に求められる[12]。

ここで、基準点 v_0から点 v までの最長径路の長さを length (v) とすると、

$$\mathrm{length}(v) = \max_{u \in P(v)} [\,\mathrm{length}(u) + (uv)\,] \qquad \text{for all } v \in V - \{v_0\} \qquad (6)$$

(uv)：枝 (u,v)の重み

P (v)：点 v の先行隣接点

となる。最長径路を求める計算量は、トポロジカルソートも含めて、O(｜V｜+｜E｜)である[12]。最長径路方式の基本的処理部分は、図4.3のようなループとなる。

図4.3 最長径路方式の基本処理ループ

4.3.3 パラメトリック方式

運転整理では、一度に全体的な最良案を作成することは難しく、対話形式でシミュレーションを繰り返しながら徐々に改善されていく。特に、きめ細かい運転整理を行なうためには、細かい修正に対するシミュレーションが頻繁に繰り返されることが望ましい。このような部分的修正に対するシミュレーションでは、全体の処理をやり直すよりは、前回の結果を基にして、変更される部分のみを求めた方が効率的である場合が多い。そこで、グラフの一部分が修正された場合に、その影響波及探索により、最長径路長の値が変化する部分のみを求めるアルゴリズム、ならびにそれを用いてシミュレーションを行なうパラメトリック方式を提案する。

グラフの修正には次の３種類がある。

(i) 枝の重み修正

(ii) 枝の付加・除去

(iii) 点(および枝)の付加・除去

列車運延、臨時速度制限等の乱れ情報は (i) に、ダイヤ変更のうち、順序変更、運用変更、番線変更等は (ii) 、運休、増発等は (iii) に対応している。

$\overline{E}$：重み修正枝の集合

$E^{+}(E^{-})$：付加(除去)枝の集合

$V^{+}(V^{-})$：付加(除去)点の集合

とし、元のグラフを$G=(V,E)$、修正グラフを$G'=(V',E')$とする。

まず、最長径路方式と同様に、乱れ情報、ダイヤ変更等の変更入力に対しグラフを修正する。処理の流れは、最長径路方式とほぼ同様であるが、トポロジカルオーダー、最長径路長の値を、変更される部分に関してのみ修正するという点が異なっている。図４.４にパラメトリック方式の基本的な処理の流れを示す。

図４.４ パラメトリック方式の基本処理ループ

$P'(v)$ $(L'(v))$：修正グラフG'における点vの先行 (後続) 隣接点

とした時、修正グラフG'において、

$$\mathrm{num}(v) > \max_{u \in P'(v)} [\,\mathrm{num}(u)\,] \qquad (7)$$

が成立している点 v をトポロジカルオーダーに関する整合点、成立しない点を矛盾点と呼び、

$$\mathrm{length}(v) = \max_{u \in P'(v)} [\,\mathrm{length}(u) + (uv)\,] \qquad (8)$$

が成立している点 v を最長径路長に関する整合点、成立しない点を矛盾点と呼ぶことにする。グラフを修正する際に修正部分に関して矛盾点を検出し、それを初期矛盾点として設定しておく。ここで

$S_0(T_0)$：最長径路長 (トポロジカルオーダー) の初期矛盾点の集合

とする。初期矛盾点の設定に要する計算量はグラフの修正部分も含めて$O(|\overline{E}|+|E^{+}|+|E^{-}|+|V^{+}|+|V^{-}|)$である。ただし、計算量は$|P'(v)|$に依存するが、４.２節で定義したグラフにおいて$|P'(v)| \leqq 4$であり、定数とみなせる。なお、以降の計算量の評価についても同様である。

次に初期修正の影響波及を探索し、修正グラフの最長径路長、トポロジカルオーダーを修正する。以下にトポロジカルオーダーの修正アルゴリズムを示す[8]。

＜トポロジカルオーダーの修正アルゴリズム＞

1° $i \leftarrow \min_{v \in T_0} [\,\mathrm{num}(v)\,] - 1;$

$T \leftarrow T_0;$

$(u,v) \in E^{+}, v \in T_0$である点 v に対して

$F(v) \leftarrow \{v\}$ とする。

2° $T = \phi$ ならば終了。

3° $i \leftarrow i+1$。

4° $\mathrm{num}(u) = i$ である矛盾点$u\,(u \in T)$があれば、

$\mathrm{num}(u) \leftarrow \max_{z \in P'(u)} [\,\mathrm{num}(z)\,] + 1;$

$T \leftarrow T - \{u\}$

として、点 u を整合点にする。そうでなければ、2° へ。

5° 点 u の後続隣接点$w\,(w \in L'(u))$に対して、

$w \in F(u)$

であれば、枝(u,w)を含むサイクルが存在し、終了する。そうでなければ、

$F(w) \leftarrow F(w) \cup F(u)$

とする。

6° 4° の結果、これまで整合点であった、点uの後続隣接点w ($w \in L'(u)$, $w \notin T$)において、

$num(w) \leqq num(u)$

となれば、

$T \leftarrow T + \{w\}$

として点wを矛盾点とする。4° へ戻る。

T：トポロジカルオーダーの矛盾点の集合

F(v)：点vの先祖(点v自身も含むものとする)のうち、付加枝の終点かつ初期矛盾点である点の集合

上記アルゴリズムは、修正グラフG'に対するトポロジカルオーダーの修正と、サイクルの検出を同時に行なうものであり、次の性質[8]が基本となっている。

[性質1] $num(v) < \min_{u \in T0} [num(u)]$ である点 $v (\in V')$ は

修正の影響を受けない（整合点である）。

[性質2] 修正グラフG'にサイクルが存在するならば、そのサイクルには、終点が初期矛盾点であるような付加枝 (u,v) $((u,v) \in E^+, v \in T0)$ が少なくとも一つ含まれる。

性質1より、

$num(v) \geqq \min_{u \in T0} [num(u)]$ である点 $v (\in V')$

に対して、トポロジカルオーダーの値の小さい順に、順次矛盾点の修正(4°)、後続隣接点への修正影響の探索(6°)を繰り返すことにより、トポロジカルオーダーの修正処理が進められる[8]。その結果、矛盾点がなくなれば($T = \phi$)、すべての点のトポロジカルオーダーが正しく求められ、処理は終了する(2°)。

また、グラフG'におけるサイクル検出は、性質2より、トポロジカルオーダーの修正過程において、点v ($(u,v) \in E^+$, $v \in T0$) を含むサイクルが構成されるかどうかを調べることにより行なわれる(5°)。

トポロジカルオーダーの修正の結果、修正グラフG'にサイクルが存在しなければ、次に最長径路長の修正を行なう。なお、サイクルが存在する場合は、最長径路方式と同様に、デッドロック情報を提示し、修正入力を行なう。最長径路長の修正においても、サイクル検出処理が不要という点以外は、トポロジカルオーダーの修正の場合と同様の議論が成り立つ。以下に最長径路長の修正アルゴリズムを示す[8]。

＜最長径路長の修正アルゴリズム＞

1° $i \leftarrow \min_{v \in S0} [num(v)] - 1;$

$S \leftarrow S0;$

2° $S = \phi$ ならば終了。

3° $i \leftarrow i + 1$。

4° $num(u) = i$ である矛盾点 $u (u \in S)$ があれば、

$length(u) \leftarrow \max_{z \in P'(u)} [length(z) + (zu)];$

$S \leftarrow S - \{u\}$

として、点uを整合点にする。そうでなければ、2° へ。

5° 4° の結果、これまで整合点であった、点uの後続隣接点w ($w \in L'(u)$, $w \notin S$)において、

$length(w) \neq \max_{z \in P'(w)} [length(z) + (zw)]$ となれば、

$S \leftarrow S + \{w\}$

として点wを矛盾点とする。4° へ戻る。

S：最長径路長の矛盾点の集合

なお、トポロジカルオーダ、最長径路長とも、修正に要する計算量は、修正過程において生じた矛盾点の集合をUとすると $O(|U|)$ である。

4.4 数値実験による検討

実際の線区データを用いて、数値実験により上記方式の有効性を検討した。表4.1にシミュレーション対象規模と、グラフ作成、修正に要する時間を示す。対象規模はグラフの点数と枝数（最長径路方式およびパラメトリック方式のグラフ）であり、グラフ作成時間はほぼこれらに比例している。因果グラフ方式に比べてグラフで表現される情報量が多いため、グ

表4.1 対象規模とグラフ処理時間

シミュレーション対象範囲	3時間	4時間	5時間
列車数（駅数：14）	121	160	196
点　数	2619	3645	4275
枝　数	9665	12851	15903
グラフ作成時間（秒）*1	2.6(0.8)	3.5(1.1)	4.5(1.3)
グラフ修正時間（秒）*2	0.1	0.1	0.1

*1：( ) 内は因果グラフ作成時間（使用計算機：VAX-11/780）
*2：平均値（0.02〜0.3秒に分布）

ラフ作成時間が大きくなるが、この部分はオフラインで行なえる処理であり仮にオンラインで行なっても実用上問題ない程度の時間である。運転整理で行なうのは、変更部分に対するグラフの修正である。これに要する時間は変更の種類によるが、0.02〜0.3秒程度、平均で約0.1秒で済んでおり、またこれは対象規模に依存しない。

次に、上記3方式のシミュレーション時間について検討する。図4.5にグラフ作成(修正)後の各方式のシミュレーションに要する計算時間を示す。これは初期遅延に対する運行予測を行なった場合である。因果グラフ方式、最長径路方式の計算時間は対象規模に応じて一定であり、従来方式を改良した因果グラフ方式に対し、最長径路方式ではさらに効率化され、約1/5の計算時間で済んでいる。パラメトリック方式では変更影響の大きさにより計算時間が異なる。図4.5の例では、初期遅延20分位までは、パラメトリック方式の計算時間は対象規模によらない。これは乱れの影響が3時間の範囲内に収束しているからであり、さらに乱れが大きくなると、対象規模により波及範囲が異なってくる。図4.5の例では、対象規模3時間の場合で、初期遅延12.5分、5時間の場合で初期遅延17.5分までは、パラメトリック方式の方が効率的であり、以降は最長径路方式の方が良いことが分かる。これはパラメトリック方式の方が1点の処理に要する計算量が多いためである。また、パラメトリック方式でもある程度乱れが大きくなると、計算時間は一定に収束し、この時の両方式の計算時間の比が、ほぼ1点当りの計算量の比に相当している。

パラメトリック方式の計算時間は、変更影響波及探索における、探索点数ならびに変更点数による。図4.6はパラメトリック方式における、初期遅延と計算量の関係を示したものであり、図4.5の計算時間の変化はこれらの計算量の変化を反映したものである。

図4.5 各方式の計算時間の比較

図4.5で示した様に、パラメトリック方式の計算時間は変更影響の大きさにより変動し、最長径路方式との一般的な比較は難しい。ここでは運転整理における実用的観点から両方式の計算効率を比較する。図4.7に一連の運転整理における両方式の計算時間を示す。ダイヤ変更としては、順序変更と運用変更を行なった。最長径路方式では、初期遅延、ダイヤ変更の種類によらず、対象範囲の大きさにより計算時間は一定（初期遅延に対してはトポロジカルオーダーの計算が不要なので計算時間が約半分で済む）であるが、パラメトリック方式では初期遅延の大きさ、ダイヤ変更の種類により計算時間が大きく変動する。初期遅延10分の場合は7個のダイヤ変更を行なったが、対象範囲3時間と5時間で計算時間は一致している。これは変更の影響が3時間の範囲内に収束しているためである。これに対し初期遅延20分の場合には計算時間が増加し、対象範囲により相違も見られる。しかし、いずれにしても、パラメトリック方式の方が最長径路方式よりも計算時間が少なく、一連のダイヤ変更の合計で7～40%で済んでいる。また、いくつかのダイヤ変更をまとめて行なう場合には、計算時間が若干増加し、最長径路方式とのトータルとしての計算時間の差もあまり大きくない。しかし、実際には少しづつ試行錯誤的にダイヤ変更を行なう場合が多く、その様な場合には大きな時間節約となり、実用上パラメトリック方式の有効性は高い。

4.5 運転整理支援システム

3.5節で述べたように、熟練指令員の有する経験的知識を積極的に活用するために、知識工学に基づく運転整理支援システムを試作した[13]。しかし、そこでは列車種別の少ない比較的すなおなダイヤを対象としていたこと、列車順序変更という下位レベルの問題だけに限定されていたことなど、まだ多くの問題が残されていた。

そこでこれまでの研究を発展させ、列車種別の多い複雑な列車ダイヤを持つ実線区を対象として、本章で提案した列車運行シミュレータを用いた本格的な運転整理支援システム[5)6)]を試作したので概要を説明する。

図4.8に本システムの構成を示す。運転整理における判断、処理では、数値処理を主体とした各種プログラムが大きな割合を占める。これらは、人間が直観的、図式的に行っていた判断、処理を定量化するものであり、人間よりも処理速度、精度の点で優れる。すなわち、本システムは単に人間をまねるだけでなく、補強、支援するものである。

列車運行シミュレータは本章で説明したものであり、ある運転整理案を実行したときの列車運行状態を定量的に予測し、その結果を基に整理案に改良が加えられる。計算時間の短縮が不可欠であり、本章の提案手法が活用されている。

評価量計算プログラム[14]は、列車運行シミュレーションから得られる結果だけでは不十

図4.6 パラメトリック方式における初期遅延と計算量の関係

図4.7 パラメトリック方式の計算効率

図4.8 運転整理支援システムの構成

分なとき、乗客フローの推定計算を行い、乗客の立場に立った各種評価量を算出する。

合理性検証プログラムは、ある整理案が実行可能かどうかをチェックし、不都合な点を指摘するものであり、本章で提案したデッドロック検出アルゴリズムを用いている。

最適計算プログラムは、列車順序変更、番線変更など、比較的下位レベルの組合せ問題の最適化を図るものであり、第3章で提案した分枝限定法による最適化手法を用いている。

なお、本システムの適用例については、4.4節の数値実験で示した。

4.6 結言

最長径路法を用いた列車運行シミュレーション方式を提案し、数値実験により、従来方式に比べて計算時間が大きく短縮されることを示した。本論文では、駅単位のモデル化について述べたが、もっと細かく閉そく単位でも適用可能であり、さらに、列車、線路、番線という概念を一般化して、複数の移動体が決められたスケジュールのもとに複数の設備を使用して行くようなシステム全般に対して適用可能といえる。

また、対象システムが一旦グラフ表現されたならば、シミュレーションはグラフ上の処理として、対象の特性に依存しない一般的な形で行なわれるため、プログラムも簡潔であり、汎用性を有するという利点もある。

今後、あらかじめグラフ表現しておくことができない要因をも扱える形への拡張、運転整理の自動化、最適化への応用へと研究を進めていきたい。

参考文献

(1) 長谷川：鉄道における運行管理システム、情報処理、Vol.25、No.3、pp.222-231 (1984).

(2) 安部、荒屋：分枝限定法を用いた列車順序最適化手法,計測自動制御学会論文誌、Vol. 21、No.5、pp.514-521 (1985).

(3) 辻野、他：東海道・山陽コムトラックにおける運転整理機能について、第21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論文集、pp.154-158 (1984).

(4) 大川、他：SIMTRACSのソフトウェア、第4回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス論文集、pp.165-168 (1984).

(5) 荒屋、安部、福森：運転整理エキスパートシステムの開発、昭和59年電気学会全国大会 (1984).

(6) S.Araya et al.：ESTRAC-II：An Expert System for Train Traffic Control in Disturbed Situations, Proceedings of the 6th European Conference on Artificial Intelligence, 1984.

(7) 安部、小西、荒屋：因果グラフを用いた汎用列車運行イベントシミュレータ、昭和59年電気学会全国大会 (1984).

(8) 安部、荒屋：スケジューリンググラフを用いたパラメトリックイベントシミュレーション技法、第10回システムシンポジウム、pp.101-106 (1984).

(9) 安部、荒屋：最長径路法を用いた列車運行シミュレーション、情報処理学会論文誌、Vol. 27、No.1、pp.103-111 (1986).

(10) 列車群管理プロジェクト研究室：列車トラフィック・シミュレーション・システムの研究、鉄道技術研究報告、No.1140、1980.

(11) 佐藤、他：移動体の流れのデッドロック検出法と列車群制御への応用、第19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論文集、pp.236-240 (1982).

(12) 伊理、他：演習グラフ理論ー基礎と応用ー、コロナ社、1983.

(13) 荒屋、安部：ヒューリスティクスを利用した列車運転整理手法、電気学会論文誌、Vol. 103-C、No.11、pp.249-256 (1983).

(14) 安部、小西、荒屋：時間帯別乗降人数データにもとづく運転整理評価モデル、昭和59年電気学会全国大会 (1984).

第5章　車両運用計画手法

5.1 緒言

鉄道、バス、飛行機等の運行計画では、運行スケジュール（ダイヤ）の作成と、車両・乗務員の運用計画が基本となる。近年、鉄道システムにおいては、列車ダイヤ作成、異常時のダイヤ修正を行う運転整理等に対し、計算機技術の導入が図られてきた[1)-3)]。これに伴い、車両運用計画も計算機化することにより、総合的な列車運行計画システムの開発が望まれている。

車両運用計画に関しては、個々の線区の特徴に応じていろいろな手法が検討されている[4)-6)]。一般に車両運用計画では、まずダイヤ改正時などに、車両の標準的な運行パターンを定めた基本運用（運行系統）が作成される。そして、毎日の車両運用計画はこの基本運用に実際の車両を割当てる形で行われる。基本運用を作成するための計算機支援方式の研究[4) 7)]もなされているが、線区特有の種々の条件を考慮する必要があり、熟練者の経験に依存しているのが現状である。

本章では、基本運用に基づいて実際の車両運用を決定する車両割当問題について論じる[8)]。従来の車両割当手法[5) 6)]は、車種、検査条件等を考慮して車両の優先順位を定め、この順序で割当処理を行うという考え方を基本としている。しかし、各車両毎に割当可能な運用を探索しているため、車両間の競合関係を考慮した割当処理を行うことが難しい。そのため人間の考慮している割当の望ましさや、割当を継続的に繰り返す場合の実行可能性を保証できない等の問題点がある。

そこで本章では、一般的な割当問題の解法を車両割当問題に適用し、さらに継続的な割当を行う多期間割当の解法アルゴリズムを提案する[8)]。一般に割当問題に対しては、2部グラフの最小重み最大マッチングを求めるアルゴリズムによる効率的な解法が知られている。この最適割当アルゴリズムを車両割当問題に適用することにより、以下のような利点が得られる。

(1) 枝の重み付けにより、人間が考慮している割当の望ましさを反映させることができる。
また、2部グラフ作成部分と、最小重み最大マッチング構成部分という形で、対象線区に応じた条件設定と割当処理を分離することにより、

(2) 割当処理部分をグラフに対する効率的なアルゴリズムにより一般的な形で行うことができる。

(3) 割当の指定、削除等の特殊な条件を組み入れた処理を、グラフの枝の付加・除去・重み付け等の簡単な操作で実行することができる。

一方、実際の車両運用は継続的に行われるものであり、車両割当においても何日か先の状況まで考慮する必要がある。この意味で、実際の車両割当は多期間にわたる割当問題となる。そこで最適割当アルゴリズムを用いた多期間割当問題の解法を構成する。これは、各期の可能な割当を１つの節点で表わし、各期毎の割当の仕方により分枝する多期間割当木の探索を基本とする。探索は、各期のすべての実行可能な割当の中から最適なものを選択する横型探索と、多期間にわたる割当の系列を求める縦型探索により構成される。横型探索には最適割当アルゴリズムを適用している。また割当不能な期が生じた場合には、前の期に戻って割当を修正するバックトラックを行う。このとき、２部グラフのＤＭ分解を用いて、割当不能な状況を解消する可能性のある部分のみを効率的に探索できるようにしている。

また、割当２部グラフをグラフィック上に表示して、対話形式で車両割当の作成・修正を行えるシステムも開発した。これにより、バックトラックによっても割当不能な状況が解消されない場合に、人間による介入が可能となる。また例外的な条件・状況への対処や、よりきめ細かい判断に基づく割当等が可能となり、実用上有効である。

以下では、まず車両運用計画の概要について述べ、車両割当問題の２部グラフによる定式化を示す。そして多期間割当問題の解法アルゴリズムを説明し、最後に実際の路線データを用いた適用例により、本解法の有効性を検討するとともに、対話型システムの機能概要についても述べる。

5.2 車両運用計画

列車運行計画は通常 図5.1 のように階層的に構成される[9]。まず、ダイヤ改正時等に基本的な列車運行計画が作成される。この基本計画の段階では、計画ダイヤとそれに基づく車両の基本運用計画が作成される。また別途、車両工場の使用計画も作成され、これに応じた車両の検査計画等も立てられる。

基本計画に基づいて毎日の実際の列車運行計画を立てる実施計画では、当日の運転計画として実施ダイヤが作成される。また、実施ダイヤに対し、車両基地側で検査条件等を考慮して実際の車両を割当てる車両運用計画を作成する。またこれに伴う基地内の作業計画等も作成する必要がある。

事故・故障等による異常時には運転整理と呼ばれるダイヤ変更が行われ、これに伴い基地側での運用計画や作業計画も修正する必要がある。

上記のように、列車運行計画は主として、列車の運行スケジュールであるダイヤの作成・修正と、これに対する車両の運用計画により構成される。車両運用計画としては、基本計画時の基本運用の作成、実施計画時の車両割当および異常時の計画修正がある。

図5.1 列車運行計画の構成

列車ダイヤは各列車の運行スケジュールを定めたものであり、始発駅から終着駅へ至るルートと各駅の着発時刻を定めている。始発駅から終着駅へ至る１つの列車運行をトリップと呼ぶことにする。一般には複数のトリップが同一車両により運行される。同一車両により運行される一連のトリップの集合を運用（運行系統）とよぶ。基本運用計画とは、車両の検査条件、設備条件等を考慮して、列車ダイヤを構成するすべてのトリップをまかなうような、上記の運用の集合を作成するものである。実施計画時の車両割当は、検査・清掃等の種々の条件を考慮して実際の車両を運用に割当てるものである。また運転整理によりダイヤ変更が行われた場合には、それに伴い車両の運用も変更する必要がある。

このように車両運用計画は運用の作成とそれに対する実際の車両の割当という２つの要素から構成されており、両者は相互に関連している。以下では、車両割当問題の解法について論じる。なお、効率的・体系的な車両割当を可能とすることは、基本運用計画、運転整理等で運用の作成・修正を行う際にも、実際の車両の割当可能性を検証する上で有効である。

5.3 車両割当問題の定式化

5.3.1 割当可能条件

一般に車両には各種の法定検査による走行距離や走行時間の制限が定められている。臨時検査や各種清掃等の指定もある。車両の割当に際しては、これらの検査・清掃条件および運用の開始・終了地点、運用に使用可能な車種等の条件を考慮する必要がある。これらの制約は対象線区に応じて様々であるが、一般的な形として以下のような変数で表現される。

（1）走行距離に関する制約

$D(j)$：車両 j の走行可能距離の上限（検査に対する法定走行距離等で決る。）

（2）場所に関する制約

$Ps(j)$：車両 j の許容な初期位置の集合（通常は、車両の初期状態の位置であるが、回送による移動も含めた場合に一般化しておく。）

$Pe(j)$：車両 j の許容な最終位置の集合（検査を行う場合等に制限を受ける。）

（3）時間に関する制約

$T(p, j)$：車両 j の最終位置が場所 p である場合に、場所 p への到着時刻の上限

（4）車種の制約

$Type(i)$：運用 i に使用可能な車種（編成両数等も含む）の集合

ここで、

$Dv(j)$：車両 j の初期状態における走行距離

$Pv(j)$：車両 j の初期状態における位置

$Nt(j)$：車両 j の車種

$Du(i)$：運用 i の走行距離

$Pus(i)$［$Pue(i)$］：運用 i の開始［終了］位置

$Tus(i)$［$Tue(i)$］：運用 i の開始［終了］時刻

とすると、車両 j が運用 i に割当可能であるための条件は次のように定式化される。

$$
\begin{aligned}
&Dv(j)+Du(i) \leqq D(j) \\
&Pus(i) \in Ps(j) \\
&Pue(i) \in Pe(j) \qquad (1) \\
&Tue(i) \leqq T(Pue(i), j) \\
&Nt(j) \in Type(i)
\end{aligned}
$$

5.3.2 最適割当アルゴリズムの適用

（1）割当問題

一般に n 個の資源を m 個の用途に割当てる問題は次の２部グラフ G により表現される。

$G=(S, T; E)$

$S=\{s_1, s_2, .., s_n\}$：点の集合、（s_iは資源 i に対応）

$T=\{t_1, t_2, .., t_m\}$：点の集合、（t_iは用途 i に対応）

$E=\{e(s_i, t_j) \mid$ 資源 i は用途 j に割当て可能$\}$

実行可能な割当は２部グラフ G におけるマッチングに対応し、割当問題の解は最大マッチングにより与えられる。また、割当コストを考える場合、最小重み最大マッチング問題（最適割当問題）となる。

$c(i, j)$：資源 i を用途 j に割当てるときのコスト

とすると、問題は次のように定式化される。

$$\min \sum_{e(s_i, t_j) \in Mmax} w(s_i, t_j)$$

ここで、

Mmax：G の最大マッチングの集合

$w(s_i, t_j)$：枝 $e(s_i, t_j)$ の重み

$(w(s_i, t_j)=c(i, j))$

である。最適割当問題は $V=S \cup T$ とすると $O(|V|^3)$ の計算量で解くことができる[10]。

（2）２部グラフの Dulmage-Mendelsohn 分解

２部グラフのマッチングにおける諸性質を検討するには、DM（Dulmage-Mendelsohn）分解[10]を用いると便利である。２部グラフ G の既約成分への分解とその上の半順序構造を G の DM 分解と呼ぶ。また、２部グラフ G の最大マッチングに含ませることができるような枝を有効辺とよび、どの最大マッチングにも含まれない枝を無効辺とよぶ。このとき次の定理[11]が成り立つ。

［定理］ $G_i=G(S_i, T_i)$ が２部グラフ $G=G(S, T; E)$ の既約成分であるとき、有効辺の全体の集合は $\cup(E \cap (S_i \times T_i))$ であり、無効辺の全体の集合は $\bigcup_{i \neq j}\{E \cap (S_i \times T_j)\}$ である。

定理より、２部グラフの最大マッチングを構成する有効辺は、各既約成分中の枝の集合の中にのみ存在するから、異なる既約成分間にまたがる枝（無効辺）は割当の対象から除外して考えることができる。これは割当処理を各既約成分毎に分割して行うことができることを意味する。また２部グラフの DM 分解は、資源割当問題においては、各資源と用途を割当に関して競合関係にあるグループへ分割することに対応している。

図 5.2 に２部グラフの DM 分解の例を示す。図で $G(+)[G(-)]$ は半順序構造における最大元［最小元］である。また無効辺の集合は $\{(s_2, t_4), (s_2, t_5), (s_3, t_7), (s_5, t_7)\}$ である。

（3）車両割当問題の２部グラフ表現

上記の最適割当アルゴリズムを適用するためには、車両割当問題を表現する２部グラフを作成する必要がある。２部グラフの点は割当てるべき車両と運用に対応しており、割当可能

な場合のみ両者は枝で結ばれる。

なお、以下では車両がどの運用にも割当てられない状態すなわち予備状態も一つの運用とみなし、車両数と運用数を等しくする。これにより、2部グラフの左右の点の数は等しくなり、すべての車両が割当可能な場合には完全マッチングが得られる。

このときn個の車両をm個の運用（n≧m：すべての運用をまかなうだけの車両があることを前提とする）に割当てる車両割当問題に対し、前述の割当可能条件により次の2部グラフG＝(S,T;E)が作成される。

図5.2　2部グラフのDM分解

$S=\{s_1, s_2, .., s_n\}$：点の集合、(s_iは車両iに対応)

$T=\{t_1, t_2, .., t_m\}$：点の集合、(t_iは運用iに対応；$m<i\leqq n$は予備に対応)

$E=\{e(s_i, t_j) \mid i, j$ は(1)式を満たす$\}$

（4）枝の重み付け

車両割当の評価指標は対象線区の特徴に応じてさまざまであるが、それらのうちの多くは枝の重み付けにより表現することができる。一般的な評価指標として次のようなものがある。

1) 車両の有効利用を図るために、検査までの走行距離、走行時間を検査条件の上限になるべく近づける。

2) 全車両の走行距離の均等化を図る。

また上記の点を考慮して、あらかじめ各車両の走行距離の予定が立てられている場合には、

3) 各車両の実走行距離を予定になるべく近づける

ことになる。

5.4 多期間車両割当アルゴリズム

5.4.1 多期間車両割当問題

列車運行は1日だけでなく、半永久的に続くものであるから、車両割当においても当日のみでなく、翌日以降の状況についても考慮する必要がある。一般には、何日分（例えば1ケ月分）かの車両割当計画を作成することにより、継続的な運用の実行可能性を保証し、さらに検査予定の作成等に利用する方法がとられる。

一般に、車両の運用の形態は様々であり、一日を通して運行される運用や、午前、午後に

図5.3　多期間割当木

図5.4　1期間割当木

分れる運用、場合によっては複数日にまたがる運用等もある。そのため車両割当も一日単位で行われるとは限らない。そこで、ここでは車両割当の処理単位を一日と固定せずに一つの期として扱う。具体的には2つの運用が同一車両により続けて運行可能なとき、これらが別々の期に属するように運用の集合を分割する。これにより、各車両は各期において、高々一度だけ運用に割当てられることになる。したがって、実際の車両割当は各車両の各期における割当を多期間にわたって行う多期間割当問題となる。

多期間割当問題は一種の3次元割当問題となり、通常の（2次元）割当問題のような効率的な解法は望めない。各期の割当可能性（枝の重み）がそれ以前の割当の履歴に依存しない場合には、多期間にわたるネットワークを作成することにより、多品種流問題として定式化する方法[12]がある。しかし車両割当の場合、各期における割当に応じて車両の状態（走行距離、走行時間等）が変化するため、このような方法も適用できない。したがって、いずれにしても何らかのヒューリスティックな方法を用いざるをえない。

5.4.2 解法の考え方

（1）割当探索木

多期間割当問題に対し、図5.3のような探索木が構成される。図で各節点は各期における1つの実行可能な割当に対応している。

また、各期における割当も同様な割当木で表わすことができる。次の整数変数x_i

x_i：車両iを割当てる運用番号($1\leqq x_i\leqq n$)

を導入することにより、図5.4のような1期分の割当に対する探索木が構成される。すでに述べたように1期分の割当に対しては、最適割当アルゴリズムを適用することにより、効率

的に最適解を求めることができる。

（2）解法アルゴリズムの構成

解法は基本的には、多期間割当木に対する縦型探索により構成される。縦型探索における前向き探索では、最適割当アルゴリズムを適用することにより、各期の節点（実行可能な割当）のうち重み最小のものを選択する。この前向き探索により最終期まで到達すれば、全期間に対する割当の１つの許容解が得られたことになり、解法は終了する。一方、ある期間において、割当不能（実行可能な割当が存在しない）になった場合には、前の期間に戻る後ろ向き探索（バックトラック）を行う。このバックトラックでは、前期において未選択の節点に対する選択が行われるが、これは前期１期分に対する図５.４のような割当木に対する探索により行う。なぜならば、割当不能な状態が生じた場合、前期における重み付けによる選択が不適当であったことを意味するから、以降の再選択は重み順に行うよりも、割当不能な状態を修正するような選択を行う必要があるからである。

5.4.3 解法アルゴリズム

以上の方針に基づき、以下のようなアルゴリズムを構成した。

＜多期間車両割当アルゴリズム＞

T：期間数

n(t)：t期の割当車両数

G(t)：t期における割当２部グラフ

$v_j(t)$：G(t)における車両jに対応する点

$u_i(t)$：G(t)における運用iに対応する点

Ee(t)：G(t)における有効辺の集合

$G^+(t)$：G(t)のDM分解における最大元

$G^-(t)$：G(t)のDM分解における最小元

とする。

0° t＝0;　車両初期状態設定。

1° t＝Tならば終了。

2° t＝t＋1;

２部グラフ$G(t)=(V(t),U(t);E(t))$を作成する。

3° G(t)に対して、最適割当アルゴリズムを適用する。割当可能ならば4°へ、割当不能ならば5°へ行く。

4° 車両状態を更新して1°へ行く。

5° ［バックトラック処理］を行い、2°へ行く。

［バックトラック処理］：

B0° G(t), G(t-1)のDM分解を行う。

$V\min(t)=G^-(t)\cap V(t)$ とする。

B1° $Ucr \leftarrow \phi$とし、$v_j(t)\in V\min(t)$に対し、以下の処理を行う。G(t-1)で

枝$(v_j(t-1), u_i(t-1))$（$\in Ee(t-1)$）　に対応する割当を行ったときG(t)で

枝$(v_j(t), u_k(t))$（$u_k(t)\in U(t)-G^-(t)$）に対応する割当が可能になるならば、

$Ucr \leftarrow Ucr\cup u_i(t-1)$　とする。

B2° G(t-1)において、$v_j(t-1)\in V(t-1)$　に対し、

$Ecr(j)=\{$枝$(v_j(t-1), u_i(t-1))\mid u_i(t-1)\in Ucr\}$　とし、

車両j　(j=1,..,n(t-1))を$|Ecr(j)|$の小さい順にソーティングする。以下、

j(i)：ソーティングによるi番目の車両

とする。

B3° B2°のソーティングに基づいて、t－1期に対する割当探索木Tree(t-1)を作成する。

B4° ［縦型探索］を行う。

［縦型探索］：

$X_k=(x_{j(1)},\ldots,x_{j(k)})$：$x_{j(1)},\ldots,x_{j(k)}$の値を固定した部分解 $(1\leq k\leq n(t-1))$

G(t：X)：t-1期の解がXの場合にt期で作成される割当２部グラフ

$\tilde{G}(t-1：X_k)$：部分解$X_k=(x_{j(1)},\ldots,x_{j(k)})$に対応するt-1期の割当２部グラフ（G(t-1)において、無効辺を消去した後、車両j(1),..,j(k)に接続する枝から、$x_{j(1)},\ldots,x_{j(k)}$の割当に対応する枝以外の枝を消去したもの）

とする。

D0° G(t-1)に対する最適割当アルゴリズムの解を初期解X_0とし、

k＝n(t-1)；　X＝X_0　とする。

D1° k＝k-1；

k＝0　ならば探索終了。そうでなければ、解$X=(x_{j(1)},\ldots,x_{j(n(t-1))})$に対し、

$x_{j(1)},\ldots,x_{j(k)}$　の値を固定した部分解をX_kとする。

D2° 部分解X_kに対し［判定］を行う。その結果、部分解X_kが終端すればD1°へ行く。

D3° 部分解X_kに対応する２部グラフ$\tilde{G}(t-1：X_k)$に対し、割当$x_{j(k+1)}$に対応する枝を除去した上で、最適割当アルゴリズムを適用する。その結果、実行可能解が存在しなければ部分解X_kを終端し、D1°へ行く。そうでなければ最適解を新たな解Xとする。

D4° G(t：X)に完全マッチングが存在する（割当可能）ならば、Xをt-1期における割当の解として、［バックトラック処理］を終了する。そうでなければD5°へ。

D5° 解Xの$x_{j(1)},\ldots,x_{j(k+1)}$の値を固定した部分解$X_{k+1}$に対し［判定］を行う。その結果$X_{k+1}$が終端すればD3°へ行く。そうでなければ、k＝n(t-1)とし、D1°へ。

［判定］：

$\overline{X}_k$：部分解X_kから生成される完成解の集合

とする。

t-1期における部分解X_kに対し、

$\overline{G}(t:X_k)=(V(t),U(t);\overline{E}(t:X_k))$

とする。ただし、

$G(t:X)=(V(t),U(t);E(t:X))$

$\overline{E}(t:X_k)=\bigcup_{X\in\overline{X}_k}E(t:X)$　である。

$\overline{G}(t:X_k)$において完全マッチングが存在しないならば、部分解X_kからt期における割当を可能とする解は生成されないことが判明したので、X_kに対する探索は終端する。

5.4.4 アルゴリズムの説明

（1）前向き探索

2°～4°は最適割当アルゴリズムによる前向き探索の部分である。この前向き探索のみで最終T期までの割当ができれば、多期間割当問題に対する1つの実行可能解が得られたことになり解法は終了する。一方t期で割当不能になった場合t-1期に戻るバックトラック処理を行う必要がある。

（2）バックトラック処理

B0°でまず、t-1期、t期の割当2部グラフG(t-1)、G(t)のDM分解を行う。図5.5、図5.6にそれぞれG(t-1)、G(t)のDM分解の例を示す。図で太線はマッチングの枝（割当）を示す。割当不能となったt期の2部グラフG(t)のDM分解における最小元$G^-(t)$では車両数の方が運用数よりも多く、最大元$G^+(t)$ではその逆になっている。

したがって、t期で割当可能となるためには、t-1期の割当修正により、$G^-(t)$から$G^+(t)$へ至るパスを生成させる必要がある。B1°ではt-1期において、そのようなパスを生成させる可能性のある運用をクリティカルな運用と考え、その集合をUcrとしている。図5.5では、○印の運用（{3T,5T,9T,13T}）がクリティカルな運用である。

B2°で、クリティカルな運用に接続する枝の数の順に車両をソーティングし、その結果

図5.5　t－1期の割当2部グラフ

図5.6　t期の割当2部グラフ

は表5.1のようになる。表5.1には、車両のソーティング結果j(i)、t-1期において車両j(i)が割当てられた運用とその運用番号$x_{j(i)}$、|Ecr|の値が示されている。このとき、B3°で作成される割当探索木Tree(t-1)では、木の根に近い車両ほどt期における割当不能を解消する可能性が少なくなる。したがって、B4°の縦型探索では、Tree(t-1)の比較的下の部分だけの探索で済む可能性が高くなり、探索の効率化が図られる。

（3）縦型探索

D0°ではまず、G(t-1)に対する最適割当アルゴリズムの解を初期解とする。なおここでいう'解'とは、1期分の割当に対する実行可能解を意味する。また、t-1期の解に対し、t期で割当可能（実行可能解が存在する）ならば、このt-1期の解は'有効'であると呼ぶことにする。

D1°,D2°では［判定］により、有効となる可能性のない部分解の枝刈りを行っている。この結果k＝0となれば、t-1期には有効な解が存在しないことになるので探索を終了する。なおこのとき、本アルゴリズムではさらに以前（t-2期以前）の割当の修正は行わず、この時点で解法は終了する（それ以上の修正は人間にまかせる）。

有効となる可能性を有する部分解X_kが得られたならば、D3°で$\widetilde{G}(t-1:X_k)$から$x_{j(k+1)}$

表5.1 車両のソーティング

i	j (i)	$x_{j(i)}$	運用	$\lvert E_{\alpha} \rvert$
1	3	13	25T	0
2	4	10	19T	0
3	7	8	15T	0
4	8	11	21T	0
5	10	12	23T	0
6	14	4	7T	0
7	18	14	27T	0
8	15	3	5T	3
9	1	1	1T	4
10	2	15	予備	4
11	9	6	11T	4
12	12	9	17T	4
13	13	16	予備	4
14	16	17	予備	4
15	17	18	予備	4
16	5	2	3T	5
17	6	5	9T	5
18	11	7	13T	5

図5.7 部分解に対応する2部グラフ

に対応する枝を除去した2部グラフを作成する。例えば図5.7は部分解X_{13}に対応する2部グラフである。

$X_{13} = (x_{j(1)}, x_{j(2)}, \ldots, x_{j(13)})$

$= (x_3, x_4, \ldots, x_{13})$

$= (13,10,\ldots,16)$ （＝（25T,19T,..,予備））

に対応する割当が固定されている。また、

$x_{j(14)} = x_{16} = 17$（＝予備）

に対応する枝が除去されているが、これは部分解

$X_{14} = (X_{13}, x_{j(14)})$ がすでに終端しているからである。この2部グラフに最適割当アルゴリズムを適用することにより、部分解X_kを含み、すでに終端した部分解を含まない1つの完成解を求める。そのような完成解が存在しなければX_kは終端し、再びD1゜、D2゜の処理が繰り返される。

完成解が存在すれば、これを新たな解Xとし、D4゜で有効性を判定する。有効であれば、Xをt-1期における新たな割当とすることにより、［バックトラック処理］は終了する。一方有効でない場合には、D1゜へ戻り新たな解Xに対し同様な処理が繰り返される。

（4）判定

探索における部分解の有効性を効率的に判定するために、分枝限定法における緩和問題の考え方に類似した方法を用いる。すなわち、部分解X_kの自由変数に対し割当の制約条件を除き、すべての割当を同時に可能として緩和問題$\overline{G}(t : X_k)$を作成し、これに対して割当可能性を判定している。

5.5 適用例

実際の地下鉄路線のデータを用いて、本割当手法の有効性を検討した。あらかじめ作成された運用ダイヤ（基本運用計画）に基づき車両の割当を行った。運用ダイヤは平日用と休日用があり、また、終日運行する運用と、午前のみ、午後のみの運用がある。したがって1日分の車両割当においては、まず使用可能な全車両を対象として、終日運用と午前運用（これらをAM運用と呼ぶことにする）への割当を行い、次に午前運用に割当てられた車両と予備車を午後運用（PM運用と呼ぶ）に割当てる。

検査条件ならびに重み付けは以下の通りである。

＜検査条件＞

・列車検査：

検査間の走行時間48時間以内,走行距離1600km以内

検査車両数10本／日以内

列車検査は運用に対応しており、開始・終了時刻が定められている。

・月検査、重要部検査、全般検査：

検査予定表により検査日を指定。指定車両は使用不可。

＜重み付け＞

・列車検査時の走行距離・走行時間を検査条件の上限に近づける。

・午前・午後に分割された運用にはなるべく同一車両を割り当てる。

・車両の走行距離の均等化を図る。

以上の条件のもとで、1月（30日）分の車両割当を行った。表5.2に対象規模と処理時間を示す。これは、1日分のAM運用とPM運用に対し、30日間の平均をとったものである。重みをパラメータとして調節することにより最適割当アルゴリズムによる前向き探索のみで30日分の割当を行うことが可能であった。このとき所要時間も全部で30秒程度であり、十分実用的なものといえる。

しかし、重みが不適当な場合、あるいはより制約が厳しく割当が困難な対象に適用した場合には、前向き探索のみでは、割当不能な状況が発生する場合もある。そこで、バックトラ

ックによる修正機能を検証するために、重み付けによる最適割当アルゴリズムを用いないで、単に最大マッチングを求めることにより、ランダムに割当を行うことを試みた。

このとき、割当不能となる期が数回あったが、いずれも前期にバックトラックして修正することにより、修復された。バックトラックの際の、D1°～D5°のアルゴリズムによる1期間割当木の探索において、探索された節点数（部分解の数）は数個～数十個程度で済んでおり、実用的にもほぼ問題ないと思われる。なお、アルゴリズムの動作の詳細は前節の説明例として記述した通りである。

表5.2 対象規模と処理時間

	AM運用	PM運用
車両数	18	8
点　数	36	16
枝　数	125	65
既約成分数	6	1
無効辺数	20	0
2部グラフ作成時間	0.2秒	0.1秒
最適割当	0.2秒	0.1秒
最大マッチング	0.06秒	0.04秒

使用計算機：VAX-11/780

また、割当2部グラフをグラフィック表示し、マンマシンによる修正機能を持たすことにより、人間による割当の作成・修正を可能とするシステムを作成した。図5.8にグラフィックの画面表示の例を示す。このシステムでは2日分の割当を1画面に表示しているが、これは通常人間が判断する場合に必要な情報をほぼまかなうものである。またメニューコマンドおよびグラフの点・枝をカーソルでピックすることにより、画面操作（先送り、後戻り）、割当の指定、削除、およびそれらの解除等を行うことができる。また別途CRTディスプレイに車両状態・検査履歴等の人間が判断する上で参考となる情報を表示することもできる。

このように対話機能を付加することにより、人間のよりきめ細かい判断を反映させることができるとともに、特殊な条件や状況に対処することもできる。また、本アルゴリズムでは割当不能となった場合、前期1期分のみの修正を行うが、それでも割当不能な場合には、人間による介入が可能である。

なお、マンマシンによる修正を行う場合にも、解法全体としては多期間割当木の探索として制御されている。すなわち、人間による修正は多期間割当問題の解の部分解を指定するものであり、この部分解を含む解をアルゴリズムにより探索することにより、人間の修正に基づく多期間割当を自動的に作成することが可能である。

図5.8 画面の表示例

5.6 結言

最適割当アルゴリズムを用いた車両運用計画手法を提案した。本手法は各期の割当を２部グラフ表現し、最適割当の多段階適用を基本としており、ＤＭ分解によりバックトラック処理の効率化を図っている。一方実際の運用計画では、必ずしも本手法のように各期毎に全車両の割当を繰り返すわけではなく、ボトルネックとなる車両に対しては多期間の割当を先に行ってしまうような処理もなされる。これは部分的な横型探索と縦型探索を組合せたものといえる。今後はこのようなより柔軟な解探索法についての研究も重要であろう。

また、車両運用は列車ダイヤ、基地内作業計画等とも密接に関連しており、特にダイヤ乱れ時に運転整理を行う場合には、車両の運用変更も重要な問題となり、両者を統合的に扱える手法が望まれる。これらの点を考慮して今後より総合的な列車運行計画システムへと発展させていきたい。

参考文献

(1) 飯田、他：マンマシンによる列車ダイヤ作成システム、鉄道技研究報告、No.951、1975.

(2) 福森、他：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).

(3) 駒谷、匹田、安部：知識工学的アプローチによる列車運転整理支援システムの開発、電気学会論文誌、Vol.107-C、No.2、pp.173-180 (1987).

(4) 飯田、他：車両運用計画作成の自動化、鉄道技術研究資料、36-8、pp.311-318、1979.

(5) 大山：SMIS(新幹線システム)における車両充当システム、第11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論文集、pp.203-208 (1974).

(6) 中島、他：車両充当のアルゴリズム、第21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論文集、pp.279-283 (1984).

(7) P.Carraresi, et al.：Network Models for Vehicle and Crew Scheduling, European J. of Operational Research, Vol.16, pp.139-151 (1986).

(8) 安部、駒谷：最適割当アルゴリズムを用いた車両運用計画手法、電気学会論文誌、Vol. 107-C、No.10、pp.939-946 (1987).

(9) 安部、駒谷：列車運行計画におけるネットワークモデルの適用について、電気学会システム・制御研資 SC-87-10、pp.91-100 (1987).

(10) 伊理、他：グラフ・ネットワーク・マトロイド、産業図書、1986.

(11) 伊理、他：線形代数、教育出版、1977.

(12) J.Aronson：The multiperiod assignment problem：A multicommodity network flow model and specialized branch and bound algorithm, European J. of Operational Research, Vol.23, No.3, pp.367-381 (1986).

第６章　幹線輸送計画手法

６.１　緒言

社会の多様化・個性化に伴い、産業分野でも生産における多品種少量化のみならず物流・販売等の流通分野における多品種少量高頻度化が要求されてきている。多様な消費者ニーズにジャストインタイムで対応できる生産・物流・販売の一貫したシステム化が必要であり、ロジスティクスの重要性が認識されてきている。これに伴い、物流において大きな役割を担う道路輸送の効率化が重要な問題となっている。そこで、本章では道路輸送における幹線輸送計画問題を対象とする。

主要拠点間の幹線輸送は多数の拠点間で大量の荷物を運ぶ長距離輸送であり、ロジスティクスの重要な役割りをになっている。ここで重要になるのは、車両の稼働率の高い輸送スケジュールを作成することである。多様な輸送需要に迅速に対応していくためには、効率的な輸送計画手段が必要であるが、多数の地点で発生する多くの輸送要求に対する車両の運行ルートの組み合せは膨大であり、それらの中から最も効率的なものを求めることは困難な問題である。さらに、状況によって変動する制約条件や、車両故障や道路の渋滞・不通、特別に急を要する需要の発生等の予期し難い制約条件は困難さを増大させている。

輸送計画問題に対するアプローチとしては、従来数理計画モデルに基づく方法[1]が提案されている。しかし、現実問題に対しては制約条件の複雑さや問題の大規模性のために、そのままでは適用できない。一方最近、計画問題に対する数理計画法と知識工学を融合したアプローチの有効性が指摘され、また適用例も報告されている[2)3)]。これらは、基本的には次のような考え方に基づいている。

i) 知識ベースにより条件変更に対する柔軟性を高める。

ii) 知識ベースを用いて問題を縮小し、縮小した問題を数理計画法で解く。

しかし、このようなアプローチはあくまでも１つの考え方であり、一般的な手法や方法論として確立されたものではない。したがって、実際の問題に適用する場合には、対象とする問題の構造に適した、問題分割、最適化アルゴリズム等を構成する必要がある。

本章では、幹線輸送計画問題に適した知識ベースと最適化アルゴリズムの融合方式を提案する[4)5)]。本方式は、種々の制約条件を考慮して実行可能な解（ルート）候補を作成する処理と、列挙された解候補の集合の中から最適なスケジュールを求める処理の２段階で構成される。前半の解候補集合の作成処理はルールで記述し、後半の解空間の探索部分は最適化問題として定式化することにより効率的なアルゴリズムを構成する。これにより、実用的規模の問題に対しても短時間で最適に近い解を得ることが可能となった。

本方式では解法過程を知識処理部分と最適化アルゴリズムに分離しており、人間による計画作業は知識処理部分における解候補の作成もしくは指定として容易に組入れることができる。また、制約条件の変化に対しても知識ベースの修正で対応することができる。

さらに大量の輸送需要を扱う大規模問題に対するアルゴリズムの効率化を行った[6]。また、上記の輸送計画手法に基づく車両運行計画システムを輸送シミュレータとして用いることにより、幹線輸送計画の全体を支援するシステムを開発し有効性を検討した[7]。

6.2 幹線輸送計画問題

6.2.1 車両運行計画の役割

物流システムにおける輸送計画問題は次のように構成される。

基本計画：

拠点配置計画、車両配置計画、定期運行計画

運用計画：

輸送需要計画、車両運行計画（幹線輸送・配送計画）

基本計画には、物流拠点の配置を決定する拠点配置計画、各拠点の保有車両数・車両種類を決定する車両配置計画、定常的な輸送需要に対して定期運行ダイヤを作成する定期運行計画がある。運用計画には、輸送需要を決定する輸送需要計画と、輸送需要を満たす輸送スケジュールを作成する車両運行計画がある。

拠点配置、車両配置等はシステムを構成する上位レベルの基本計画であり、これらの基本計画により作成されたシステム構成に基づいて、日々の輸送需要に対する車両運行計画が作成される。本章で扱うのは、拠点間の長距離輸送を行なう幹線輸送を対象とした車両運行計画の作成手法である。効率的な車両運行計画の作成は、拠点配置計画、車両配置計画等の上位レベルの計画にとっても重要である。

車両運行計画において今後ますます重要になるのは、変動的で多様な輸送需要に迅速に対応できる柔軟性である。この点を考慮すると、車両運行計画作成手法は任意に与えられた輸送需要に対して計画立案できることが要求仕様となる。これは、固定的輸送需要に対する定期便ダイヤの作成、また日々発生する輸送需要の変動部分に対しても適用可能であることを意味する。

6.2.2 問題の特徴

幹線輸送は都市間の長距離輸送であり、1回の輸送量が多く輸送コストも大きい。その運行形態は一般に図6.1のような形になる。すなわち、発側地区の複数の拠点の荷物を積載し、

図6.1 幹線輸送における車両運行

着側地区の複数の拠点へ輸送する。着側へ輸送した車両が空荷で発側へ戻ると車両稼働率が低下する。幹線輸送において重要なことは、往便に対してうまく復荷を割当て、復便を作成することにより車両稼働（積載）率を向上させることである。

多数の地点で発生する多くの輸送要求に対する車両の輸送ルートの組み合せは膨大である。さらに、各地点で使用可能な車両の数、車種、積載容量の制約、運転手の労働条件やそれに伴う車両の走行距離・時間の制約等もある。また配送時刻の指定や、発送・受け入れ場所での作業可能時間帯等の制約もある。これらの制約条件を考慮して車両全体としての効率的な運用を考えなければならない。しかも制約条件は必ずしも固定的ではなく、状況によって変動するものもある。また最終的には人間による総合的な判断が必要であるから、スケジュール作成作業にインタラクティブに人間が介入できることが重要である。

6.2.3 問題の構成

車両運行計画問題は次のように定義できる。

＜車両運行計画問題＞

輸送需要を満たすコスト最小の輸送スケジュールを求める。

輸送需要、輸送スケジュール、輸送コストは具体的には以下の要因で定義される。

輸送需要：発地点、着地点、発送・到着時刻の指定時刻(上限および下限)、属性(体積,重量,荷物の種類)

図6.2 車両運行計画の構成

輸送スケジュール：車両の運行ルート(移動場所系列)、運行時刻(移動時刻系列)、車両の輸送需要の積載量

輸送コスト：

・実コスト：車両の使用コスト(手配費、購入費等)、車両の運行コスト(燃料費、人件費等)

・評価コスト：輸送需要の評価コスト(希望時刻との偏差等)、車両運行の評価コスト(稼働率,乗務員負荷等)

＜問題の分割＞

上記で定義した車両運行計画の作成は、図 6.2 に示すように、輸送ルート（ダイヤ）を作成する輸送ルート計画と輸送ルートに対する車両の割当を行なう車両運用計画の２段階に分割することができる。輸送ルートとは車両が基地を出て基地に戻るまでの運行計画であり、往便ルートと復便ルートにより構成される。輸送ルートの集合に対して、１つの車両で運行する一連の輸送ルートを運用ルートとよぶ。車両運用計画ではまず運用ルートを作成しこれに実際の車両を割当てる。

以下では、輸送ルート計画問題と車両運用計画問題の定式化および解法を示す。

6.3 輸送ルート計画問題の定式化

6.3.1 輸送需要の分割

１つの輸送需要を複数の車両に分割して輸送する場合には輸送需要を車両単位に分割する必要がある。１つの車両で輸送される輸送需要をトリップとよぶ。なお複数通りの分割方法が可能な場合には、図6.3に示すように各分割候補に共通な最小単位の分割によりトリップを作成する。このとき、実際には同一輸送需要の複数トリップが１台の車両に積載される場合もある。

図6.3 トリップの作成

6.3.2 決定変数

まず、以下のように記号を定義する。

D_{dem}：輸送需要の集合

$T_r(d)$：輸送需要 d を分割したトリップの集合

T_r：全トリップの集合

$R_t(T_r)$：トリップ集合T_rのべき集合 (T_rのすべての部分集合の集合)

Q_r：輸送ルートの属性 (使用車両の積載容量、種類) の集合

$P_e(r_t)$: r_t ($\in R_t(T_r)$) の要素のすべての順列の集合

E：選択しうる運行方法 (運行形態、勤務形態) の集合

とする。輸送ルートの作成においては以下の要因を決定する必要がある。

＜0-1決定変数＞

$x(r_t)=1 \quad (r_t \in R_t(T_r))$

⇒トリップ集合 r_tを同一輸送ルートで輸送する

$y(r_t, q_r)=1 \quad (r_t \in R_t(T_r), q_r \in Q_r)$

⇒トリップ集合 r_tに対応する輸送ルートの属性を q_rとする

$h_o(r_t, p_e)=1 \ (r_t \in R_t(T_r), p_e \in P_e(r_t))$

⇒ r_tに属するトリップの荷積順を p_eとする

$h_d(r_t, p_e)=1 \ (r_t \in R_t(T_r), p_e \in P_e(r_t))$

⇒ r_tに属するトリップの荷卸順を p_eとする

$g(r_t, e)=1 \quad (r_t \in R_t(T_r), e \in E)$

⇒トリップ集合 r_tに対応する輸送ルートの運行方法を e とする

6.3.3 制約条件

<輸送ルートに関する制約条件>

・車両が時間的に運行可能である。すなわち、指定されたルートを指定された時刻の範囲内に運行できる。

・トリップの輸送量が車両の積載容量以下である。

・荷物の種類が使用車両に積載可能なものである。

・荷積・荷卸順に関する制約(先積後卸等)を満足する。

・発送・受け入れ作業の可能な時間帯の制約を満たす。

・勤務形態に応じて定められた運転手の労働条件（運転時間・休憩時間等）の制約を満たす。

6.3.4 定式化

$r(r_t, p_{e1}, p_{e2}, q_r, e)$：決定変数の値　$r_t = p_{e1} = p_{e2} = q_r = e = 1$ に対応する輸送ルート

$c_r(r)$：輸送ルート r のコスト

R_f：輸送ルートに関する制約条件を満足する実行可能な輸送ルートの集合

とする。このとき、輸送ルート作成問題は次のように定式化できる。

<輸送ルート作成問題 $P_f(T_f)$>

$$\min. \sum_{r_t \in R_t(T_f)} \sum_{p_{e1}, p_{e2} \in p_e(r_t)} \sum_{q_r \in Q_r} \sum_{e \in E} x(r_t) \cdot h_o(r_t, p_{e1}) \cdot h_d(r_t, p_{e2}) \cdot y(r_t, q_r) \cdot g(r_t, e) \cdot c_r(r(r_t, p_{e1}, p_{e2}, q_r, e))$$

$$\text{s.t.} \sum_{r_t \in R_t(T_f)} x(r_t) \cdot r_t = T_f \qquad (1)$$

$$x(r_t) \cdot x(r'_t) = 0 \quad (r_t \cap r'_t \neq \phi;\ r_t, r'_t \in R_t(T_f)) \qquad (2)$$

$$\sum_{p_{e1} \in p_e(r_t)} h_o(r_t, p_{e1}) = 1 \quad (r_t \in R_t(T_f)) \qquad (3)$$

$$\sum_{p_{e2} \in p_e(r_t)} h_d(r_t, p_{e2}) = 1 \quad (r_t \in R_t(T_f)) \qquad (4)$$

$$\sum_{q_r \in Q_r} y(r_t, q_r) = 1 \quad (r_t \in R_t(T_f)) \qquad (5)$$

$$\sum_{e \in E} g(r_t, e) = 1 \quad (r_t \in R_t(T_f)) \qquad (6)$$

$$x(r_t) \cdot h_o(r_t, p_{e1}) \cdot h_d(r_t, p_{e2}) \cdot y(r_t, q_r) \cdot g(r_t, e) = 0 \qquad (7)$$

$$(r(r_t, p_{e1}, p_{e2}, q_r, e) \notin R_f)$$

(1)(2)式はすべての輸送需要を満足するための制約条件である。(7)式は輸送ルートの実行可能性の条件である。なお、変数はすべて0-1変数であり、以降の定式化でも同様である。

6.4 輸送ルート作成方式

前節で定式化した輸送ルート計画問題は大規模かつ複雑な組合せ問題であり、制約条件の中には数式で定式化しにくいものや、状況により変動するものもある。そこで解法としては、経験的知識と最適化手法を融合した方式が有効である。制約条件のチェック、解候補の生成部分を知識ベースで行ない、解空間の探索を最適化アルゴリズムで行なう２段階の方式を構成する。

輸送ルート計画の解法の構成を図６.４に示す。

6.4.1 輸送ルート候補の作成

図６.５に輸送ルート候補の作成方式を示す。

<データベース>

輸送ルートに関する制約条件およびシミュレーション、コスト計算に必要なデータにより構成される。

制約条件データ：

・道路情報、距離データ、走行速度データ(簡易モデル では所要時間データでおきかえる)

・労働条件データ(勤務形態別)、作業時間データ(荷積荷卸等に要する時間)、作業条件データ

・車両データ

コストデータ：

燃料費、人件費等の実コストの算出に必要なデータ

図６.４　輸送ルート計画の解法構成

図6.5　輸送ルート候補の作成方式

＜知識ベース＞

知識ベースは以下の処理を行なう"if .. then .."形式のルール群で構成される。

（a）積載計画ルール

まず、輸送需要を分割してトリップを作成する。輸送需要の分割候補は、使用可能車両の積載効率・コストを概算し上位から何通りかを選択する。次に同一輸送ルートで輸送するトリップ集合の候補を作成する。これはトリップの発着場所、発着時刻指定、輸送量に基づき、車両の積載効率・コストを評価して行なう。

（b）ルート計画ルール

1) 配送順の決定

幹線輸送では、発側・着側区内の拠点数は少なく(1箇所だけの場合も多い)、積載(荷卸)順序は通常一意に定められる。なお、特に順序を考慮する必要がある場合には、数通り以内に限定する。

2) 車両属性の決定

トリップ構成が決まれば、使用車両の属性（積載容量、車種等）は一意に定まる場合も多いが、現実的な代替案がある場合にはそれらも列挙する。

3) 運行方法の決定

可能な運行方法(運行経路、勤務形態)の中からトリップの時刻指定の制約、コストを概算することにより、いくつかの代替案を作成する。

（c）コスト評価ルール

後述する車両運行シミュレーションにより得られた実行可能な輸送ルートに対してコストを計算する。コストは実コストと評価コストの和であり、評価コストの算出には経験的知識を用いる。

知識ベースにより、有効な解を構成する可能性の少ない決定変数が除外され、決定空間が縮小される。すなわち、決定変数の数が以下のように削減される。

$x(r_t)$　　$(r_t \in R_c(T_r))$

$h_o(r_t, p_e)=1$　　$(p_e = hf_o(r_t);\ r_t \in R_c(T_r))$

$h_d(r_t, p_e)=1$　　$(p_e = hf_d(r_t);\ r_t \in R_c(T_r))$

$y(r_t, q_r)$　　$(r_t \in R_c(T_r),\ q_r \in Q_c(r_t))$

$g(r_t, e)$　　$(r_t \in R_c(T_r),\ e \in E_c(r_t))$

ただし、

$R_c(T_r)$：同一輸送ルートで輸送するトリップ集合の候補の集合

$hf_o(r_t)$：r_tに属するトリップの積載順

$hf_d(r_t)$：r_tに属するトリップの荷卸順

$Q_c(r_t)$：トリップ集合r_tを積載する車両属性の候補の集合

$E_c(r_t)$：トリップ集合r_tに対応する輸送ルートの運行方法の候補の集合

である。

＜シミュレータ＞

知識ベースにより決定変数の値を定めたときに、シミュレータは輸送ルート $r(r_t, p_{e1}, p_{e2}, q_r, e)$の移動ルート、各場所への着発時刻、輸送需要の積載量を求める。このときすでに述べたような種々の制約条件を考慮しなければならない。このような条件をチェックしたうえで実行可能な輸送ルート候補の集合を作成する。

6.4.2 輸送ルートの決定

知識ベースにより、決定変数の値が固定または限定され、さらにシミュレータにより実行可能な輸送ルート候補のみが生成される。これらの輸送ルート候補の中から最適な輸送ルート集合を決定する問題は以下のように定式化できる。

＜輸送ルート決定問題$P_r(T_r)$＞

$$\min.\ \sum_{r_t \in R_c(T_r)} \sum_{q_r \in Q_c(r_t)} \sum_{e \in E_c(r_t)} x(r_t) \cdot y(r_t, q_r) \cdot g(r_t, e) \cdot c_r(r(r_t, hf_o(r_t), hf_d(r_t), q_r, e))$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{r_t \in R_c(T_r)} x(r_t) \cdot r_t = T_r$$

$$x(r_t) \cdot x(r'_t) = 0 \quad (r_t \cap r'_t \neq \phi; \quad r_t, r'_t \in R_c(T_r))$$

$$\sum_{q_r \in Q_c(r_t)} y(r_t, q_r) = 1 \quad (r_t \in R_c(T_r))$$

$$\sum_{e \in E_c(r_t)} g(r_t, e) = 1 \quad (r_t \in R_c(T_r))$$

輸送ルート決定問題$P_r(T_r)$は0-1整数計画問題であり、小規模な問題であれば分枝限定法等により最適解が得られる。しかし大規模な問題に対しては計算時間が多大となり実用的でない。そこで、以下に示す問題に変換することにより求解可能にする。

（1）集合分割問題

輸送ルート決定問題$P_r(T_r)$において、主要な決定変数は $x(r_t)$ $(r_t \in R_c(T_r))$ である。y, gを固定して決定変数をxのみにすると、$P_r(T_r)$は次のようになる。

$$\text{min.} \quad \sum_{r_t \in R_c(T_r)} x(r_t) \cdot c_r(r(r_t))$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{r_t \in R_c(T_r)} x(r_t) \cdot r_t = T_r$$

$$x(r_t) \cdot x(r'_t) = 0 \quad (r_t \cap r'_t \neq \phi; \quad r_t, r'_t \in R_c(T_r))$$

これは集合T_rを部分集合r_tに分割する問題であり、集合分割問題[8]となる。したがって、知識ベースにより決定変数y, gの値を固定した場合には、集合分割問題の解法を適用することができる。集合分割問題はNP-完全な組合せ問題であり、分枝限定法等の最適化手法は大規模問題には適用困難である。現実には厳密な最適解が得られなくても、良い近似解が短時間で得られれば十分有効である。文献[9]で提案されている近似解法アルゴリズムにより解が得られる。なお決定変数y, gの値が固定されていない場合に対しても、文献[9]のアルゴリズムを修正して適用することができる。

（2）マッチングモデル

知識ベースにより輸送ルートのうち片側ルート(往便または復便ルート)が作成されている場合には、往便に復便を割当てることにより輸送ルートが決定される。これは1つの輸送ルートに含まれるトリップ数が2個以内の場合に対応する（往便と復便をそれぞれトリップに対応させる）。これはかなり特殊な場合に見えるが実際の輸送計画では頻繁に生じる重要な問題である。

このとき、輸送ルート決定問題$P_r(T_r)$をマッチングモデルで定式化することができる。片側ルートを点、輸送ルートを枝に対応させることによりグラフを作成する。(帰りが空荷の輸送ルートは、グラフにおいてセルフループとして表現される)。このとき、輸送ルートのコストを枝の重みとして与えると、輸送ルート決定問題の最適解はグラフにおける最小重み最大マッチング[10]として求めることが可能となる。

6.5 車両運用計画

輸送ルート計画で作成された輸送ルートに、実際の車両を割当てる車両運用計画は次のように構成できる。

（1）運用ルートの作成　　（2）車両割当

6.5.1 運用ルートの作成

（1）定式化

＜運用ルートに関する制約条件＞

・車両が時間的に運行可能である。

・輸送ルートの属性が同一車両に割当て可能である。

・車両の保守・点検等の条件を満足する。

R：輸送ルート計画で作成された輸送ルートの集合

$S_r(R)$：Rのべき集合

$s(s_r)$：$s_r(\in S_r(R))$ に属する輸送ルートにより構成される運用ルート

$c_s(s)$：運用ルートsのコスト

Sr：運用ルートに関する制約条件を満足する実行可能な運用ルートの集合

とする。また次の0-1決定変数を定義する。

$f(s_r) = 1 \quad (s_r \in S_r(R))$

⇒ s_rに属する輸送ルートにより同一の運用ルートを構成する

このとき、運用ルート作成問題は次のように定式化することができる。

＜運用ルート作成問題$P_s(R)$＞

$$\text{min.} \quad \sum_{s_r \in S_r(R)} f(s_r) \cdot c_s(s(s_r))$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{s_r \in S_r(R)} f(s_r) \cdot s_r = R \qquad (8)$$

$$f(s_r)\cdot f(s'_r)=0 \qquad (s_r\cap s'_r\neq\phi;\ s_r, s'_r\in S_r(R)) \qquad (9)$$

$$f(s_r)=0 \qquad (s(s_r)\in S_f) \qquad (10)$$

(8)(9)式はすべての輸送ルートを満足するための制約条件、(10)式は運用ルートの実行可能性の条件である。

（2）運用ルート作成方式

運用ルートは同一車両が運行する輸送ルートの系列である。したがって、輸送ルートを接続することにより運用ルートが作成される。知識ベースにより輸送ルートの接続可能性をチェックし、輸送ルートを接続することにより、実行可能な運用ルートの候補を作成する。これにより、決定変数が

$f(s_r)$ $(s_r\in S_c(R))$

$S_c(R)$：実行可能な運用ルート候補の集合

に限定できる。また各運用ルートのコストも求める。このとき、運用ルート決定問題は以下のようになる。

<運用ルート決定問題$P_s(R)$>

$$\min.\ \sum_{s_r\in S_c(R)} f(s_r)\cdot c_s(s(s_r))$$

$$\text{s.t.}\ \sum_{s_r\in S_c(R)} f(s_r)\cdot s_r=R$$

$$f(s_r)\cdot f(s'_r)=0 \qquad (s_r\cap s'_r\neq\phi;\ s_r, s'_r\in S_c(R))$$

（a）集合分割問題

運用ルート決定問題$P_s(R)$も、集合Rを部分集合s_rに分割する問題であり、輸送ルート決定問題と同様に集合分割問題の解法を適用することができる。

（b）ネットワークフローモデル

運用ルートは輸送ルートを接続することにより作成される。輸送ルートの接続の制約条件として2つのルート間の関係のみを考えればよい場合には、運用ルート決定問題$P_s(R)$はビークルルーティング問題[1]と等価になり、ネットワークフローモデルで定式化することができる。

輸送ルートの開始・終了をそれぞれ点で表現し、輸送ルートを開始点から終了点にいたる有向枝で表現する。接続可能な2つの輸送ルートに対し、一方の終了点から他方の開始点への有向枝を作成する。さらに、運用ルートの開始と終了に対応する点を加え、コストを枝の重みとして与えることにより、ネットワークが作成される。このようにして、運用ルート決定問題$P_s(R)$の最適解はネットワーク上の最小費用循環流[10]として効率的に求めることができる。

6.5.2 車両割当

（1）定式化

<車両割当に関する制約条件>

・車両の属性が運用ルートに割当可能なものである。

・車両の保守・点検等の条件を満足する。

S：運用ルート作成問題で得られた運用ルートの集合

$c(v,s)$：車両vを運用ルートsに割当てたコスト

$S_f(v)$：車両vを割当可能な運用ルートの集合

とする。

また次の0-1決定変数を定義する。

$z(v,s)=1 \quad (v\in V;\ s\in S)$

⇒車両vを運用ルートsに割当てる

このとき車両割当問題は次のように定式化できる。

<車両割当問題$P_v(S)$>

$$\min.\ \sum_{v\in V}\sum_{s\in S} c(v,s)\cdot z(v,s)$$

$$\text{s.t.}\ \sum_{v\in V} z(v,s)=1 \quad (s\in S)$$

$$\sum_{s\in S} z(v,s)\leq 1 \quad (v\in V)$$

$$z(v,s)=0 \quad (s\notin S_f(v);\ v\in V)$$

（2）車両割当方式

知識ベースにより車両の運用ルートへの割当可能性を判定し、決定変数を

$z(v,s)$ $(s\in S(v);\ v\in V)$

$S(v)$：車両vを割当可能な運用ルートの集合

に限定する。さらに割当コストを求める。このとき車両割当問題は以下のようになる。

$$\min.\ \sum_{v\in V}\sum_{s\in S(v)} c(v,s)\cdot z(v,s)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{v \in V(s)} z(v,s) = 1 \quad (s \in S)$$

$$\sum_{s \in S(v)} z(v,s) \leq 1 \quad (v \in V)$$

V(s)：運用ルートｓに割当可能な車両の集合

これは一般の割当問題[10]であり、最適割当アルゴリズムにより効率的に最適解を求めることができる。

6.6 適用例

実際の輸送需要データに対して輸送計画を作成することにより本方式の有効性を検討する。輸送計画としては、(1)輸送ルートの作成(2)運用ルートの作成、を行なう。なお、運用ルートに対する実際の車両の割当には、車両の保守・検査状況等を含む車両の実データが必要であり、また実際には他の業者の車両を使用する場合もある。そこで、ここでは使用可能車両を仮定し、運用ルートの作成までを行なうことにする。なお、車両割当問題に対する最適割当アルゴリズムの有効性については、すでに第５章で示しているのでここでは述べない。

対象とした輸送網は北海道から九州まで日本全国におよぶ広域な幹線輸送システムである。表６.１に問題規模を示す。輸送計画の作成は以下の手順で行なった。

１）輸送ルート候補の作成　２）輸送ルートの決定　３）運用ルートの作成

（１）輸送ルート候補の作成

輸送需要の車両への配分（トリップの作成）は実際の実績データに基づいて行なった。したがって、輸送ルート候補の作成はこれらのトリップを結合することにより行なう。なお車両運行の詳細なシミュレーションは行なわず、あらかじめ計算した拠点間の所要時間データを用いた。

知識ベースにより、同一輸送ルートで輸送するトリップ集合の候補を生成し、積載順序を決定した。さらに制約条件のチェックを行なうことにより、実行可能な輸送ルート候補を作成した。表６.２に作成された輸送ルート候補数および処理に要した計算時間を示す。なお、使用計算機はＥＷＳ(1MIPS程度)である。

表６.１　問題の規模

拠点数	25
輸送需要数	383
計画期間	４日間
使用可能車両数	400
車両タイプ数	5

表６.２　輸送ルート候補の作成

輸送需要数	383
トリップ数	796
ルート候補数	6558
計算時間	3.4分

表６.３　輸送ルートの選択

初期コスト	1010649
輸送ルート数	583
解コスト	659043
計算時間	2.75分

（２）輸送ルートの決定

作成された輸送ルート候補に対して、集合分割アルゴリズムを適用することにより、すべての輸送需要を満足し、総輸送コストが最小となる輸送ルート集合を決定する。輸送コストは実コストと評価コストの和であるが、ここでは簡単のために評価コストのみを考え、車両積載率の最大化を目的とする。すなわち、各輸送ルートのコストを、以下のように定義する。

輸送コスト＝非稼働時間（空走時間、待ち時間）＋稼働時間×（１－積載率）

さらに各輸送ルートのコストをその属性（使用車両の種類）に応じて重み付けし、総輸送コストを求める。

表６.３に計画結果を示す。ここで、初期コストとは集合分割問題の近似アルゴリズムで用いた初期実行可能解のコストである。この初期実行可能解は自明な解であり、各トリップをそれぞれ１つの輸送ルートに対応させることにより作成した。

6558個の輸送ルート候補の中から最終的に583個の輸送ルートを選択している。計算時間も短時間であり、実用規模の問題に対しても十分有効であることが分かつた。図６.６に輸送ルートの積載率の分布を示す。なお、非稼働時間は積載率０の状態とし、各輸送ルートの開始から終了までの積載率の平均を示している。

図６.６で分かるように、知識ベースにより作成された輸送ルート候補のうち、積載率の高い(80%以上)輸送ルートが優先的に選択されている。なお、積載率の低い(50-65%)輸送ルートもかなり含まれているが、すべての輸送需要をまかなうためにはこれらの輸送ルートも必要であることを意味する。実際の配車計画では、これらの積載率の低い輸送ルートに含まれる輸送需要は、他の輸送業者に依頼することにより相互の積載率の向上を図る場合が多い。

決定された輸送ルートは輸送コストの最小化を図ったものであるが、集合分割問題の解法は近似アルゴリズムであり最適解ではない。そこで、近似解の精度を評価するために、マッチングアルゴリズムにより最適解が得られる場合について比較しよう。

まずトリップの結合により片側のみの輸送ルート（往便または復便）を作成しておく。こ

図6.6 積載率の分布

のとき、往便と復便を結合することにより輸送ルートが作成される。すでに述べたように、この問題はマッチングアルゴリズムにより最適解が得られる。これに対して、集合分割問題の近似アルゴリズムとマッチングによる最適解法を適用した結果を表6.4に示す。

近似解の誤差は数%程度であり、計算時間は大幅に短縮されていることが分かる。一般の場合に対して最適解を求めることは困難であるため、比較することはできないが、近似アルゴリズムの一般性を考慮すると、十分よい精度であると思われる。

（3）運用ルートの作成

ネットワークフローモデルを用いて運用ルートの作成を行なった。まず、知識ベースにより輸送ルートの接続可能性をチェックしネットワークを作成した。次にネットワーク上の最小費用循環流を求めることにより総コスト最小の運用ルートを作成した。各運用ルートのコストは車両の使用コストとし、車両属性に応じて重み付けする。表6.5に計画結果を示す。

最小費用循環流アルゴリズムを用いることにより、短時間で最適解が得られた。また、運用ルート数をコストとして最小化することにより、すべての輸送ルートを含む最小数の運用ルート集合を得ることもできる。この例では、作成された運用ルート数380が最小であることも確かめられた。

表6.4 解の精度と計算時間

解法	コスト	計算時間
近似解法	689781	2.7分
マッチングアルゴリズム	666809	67.7分

表6.5 運用ルートの作成

輸送ルート数	583
運用ルート数	380
コスト	398
計算時間	27秒

6.7 大規模問題に対するアルゴリズムの効率化

6.7.1 大規模問題

本手法は物流拠点間の長距離輸送を行なう幹線輸送を対象としている。物流拠点には、担当エリアの荷物が集約されるため、一般に拠点間の輸送量は多大となり、一度に車両が数台から数十台分以上にもおよぶ場合もある。

このように輸送需要の量が大量で、使用車両数が多大となる大規模輸送スケジューリング問題では、可能な輸送ルートの組合せ、車両の割当方法の数は膨大になり、スケジューリングに要する計算時間、使用メモリーが多大となる。そこで以下では、大量の輸送需要を扱う大規模問題に対するスケジューリング方式の効率化を検討する[6]。

車両運行計画ではまず、輸送需要を車両単位に分割することによりトリップを作成する。車両運行スケジュールは各車両にこれらのトリップを割当てることにより作成される。すなわち、トリップを接続することにより輸送ルートを作成する輸送ルート計画と、輸送ルートに実際の車両を割当てる車両運用計画の2段階で構成される。

個々の輸送需要の量が大量な場合、車両単位に分割されたトリップ数は多大となり、問題が大規模となる。そこで、上記のようなトリップにもとづくスケジューリング方式のかわりに、輸送需要そのものをベースとしたスケジューリング方式を構成することにより、問題規模を縮小し、計算の効率化を図る。

6.7.2 輸送ルート計画

輸送ルート計画では、まず実行可能な輸送ルート候補を作成し、次にこれらのルート候補集合の中からすべての輸送需要を満足するコスト最小な輸送ルート集合を選択することにより輸送ルートを決定する。

（1）輸送ルート候補の作成

D_{dem}：輸送需要の集合

T_r：トリップの集合

とする。従来方式（6.4節の方式）では、トリップを結合することにより輸送ルート候補を作成したが、大規模問題ではルート候補数が膨大となる。そこで、輸送需要そのものを結合することにより輸送ルートを作成する方式にする。このとき1つの輸送ルートが複数

の車両に対応することになる。すなわち、

ルート $r(i,j)$：輸送需要 i と j を輸送する輸送ルート

$n_d(i)$：輸送需要 i から生成されるトリップ数

$n_r(r)$：ルート r に対応する車両数

とすると、

$$n_r(r(i,j)) = \min(n_d(i), n_d(j))$$

となる。

輸送ルート候補数は、2つのトリップ（輸送需要）を結合して1つのルートを作成する場合で、従来方式では $O(|T_r|^3)$ であるのに対し、本方式では $O(|D_{dem}|^3)$ に減少する。

（2）輸送ルートの決定

輸送ルート候補集合の中から、最適な輸送ルート集合を選択する問題は、6.4節で集合分割問題として定式化した。上記のモデルに対応して、集合分割モデルを以下のように拡張する。

<集合分割モデルの拡張>

$$\min. \quad \sum_{j \in R} c_j x_j$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in R} a_{ij} x_j = n_d(i) \qquad (i \in D_{dem})$$

$$0 \leqq x_j \leqq n_r(j) \qquad (j \in R)$$

$$x_j \in Z \qquad (j \in R)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{(輸送需要 i がルート j に含まれる)} \\ 0 & \text{(その他)} \end{cases}$$

R：ルート候補集合、　Z：整数の集合

c_j：ルート j のコスト

x_j：ルート j を運行する車両数

上記問題を解くことにより、総コスト最小な輸送ルート集合が得られる。集合分割問題は、$n_d(i) = n_r(j) = 1$ の場合に対応している。集合分割問題の解法として、近似解法アルゴリズム[9]を適用したが、本問題に対してもこのアルゴリズムを修正して適用することができる。従来方式では集合分割問題の規模は $O(|T_r|^3)$ であるが、本問題の規模は $O(|D_{dem}|^3)$ に縮小される。$n = |T_r| / |D_{dem}|$ は、1つの輸送需要に要する平均車両数を意味する。したがって、本方式では従来方式に比べて問題規模が $O(1/n^3)$ に減少したことになる。

図6.7 ネットワークフローモデル

6.7.3 車両運用計画

車両運用計画は、個々の車両が運行する一連の輸送ルート集合である運用ルートの作成と、この運用ルートに実際の車両を割当てる車両割当計画により構成される。

（1）運用ルート作成

輸送ルートの結合による運用ルートの作成を図6.7のようなネットワークフローモデルとして定式化した。図6.7で、点 u_i、v_i はそれぞれ輸送ルート i の開始、終了に対応しており、点 s、t は車両の使用開始、終了に対応している。

<ネットワークフローモデルの拡張>

$l[m](u_i, v_j)$：枝 (u_i, v_j) の容量の下[上]限

とすると、従来方式では輸送ルートは1台の車両に対応しており、

$$l(u_i, v_j) = m(u_i, v_j) = 1$$

であった。しかし本方式では、輸送ルート i は $x(i)$ 台の車両に対応しているため、

$$l(u_i, v_j) = m(u_i, v_j) = x(i)$$

となる。

このとき、従来方式と同様に最小費用循環流問題を解くことにより、コスト最小な運用ルート集合が得られる。ただし、従来方式では、各運用ルートは1台の車両に対応していたが、本方式では複数台の車両に対応する場合もある。なおネットワークの規模は、各輸送ルートに対応する車両数の平均を x とすると、1／x に減少する。

図6.8 計算時間の比較

（2）車両割当計画

各運用ルートに実際の車両を割当てる車両割当問題は、通常の最適割当問題として定式化された。最適割当アルゴリズムは効率的なアルゴリズムであり、本方式においてもそのまま適用することができる。

6.7.4 数値実験

大規模問題に対し本方式と従来方式の計算時間の比較を行った。その結果を図6.8に示す。図の例は、輸送需要の数を同じにして、個々の輸送需要の輸送量を増大させたものである。輸送量が増大するにつれて、トリップ（輸送需要を車両単位に分割したもの）数が増加する。従来方式ではトリップ数の増加にしたがい、計算時間も急激に増大する。図6.8の例ではトリップ数約4000の場合で、計算時間を1時間近く要している（計算機性能：1MIPS程度）。これに対し、提案方式は、輸送需要に基づくアルゴリズムであるので、トリップ数が増加しても、計算時間はほとんど増大しない。

このように、個々の輸送需要の輸送量が大量で、トリップ数が多数となるような大規模問題に対し、提案方式の有効性が示された。

6.8 幹線輸送計画支援システム

前節までに、知識ベースと最適化アルゴリズムの融合方式による幹線輸送計画手法および、大量の輸送需要を扱う大規模問題に対するアルゴリズムの効率化について示した。ここでは、上記の輸送計画手法に基づく車両運行計画システムを輸送シミュレータとして用いることにより、幹線輸送計画全体を支援するシステムについて述べる[7]。

幹線輸送計画は既に述べたように次のように構成される。

基本計画：

拠点配置計画、車両配置計画、定期運行計画

運用計画：

輸送需要計画、車両運行計画、作業計画

拠点配置、車両配置等は上位レベルの基本計画であり、これらのシステム構成に基づいて、日々の輸送需要に対する運用計画を作成する。輸送需要には制約の厳しいものや、自由度の大きいものがある。また実際には共同配送、他業者への委託等も行われる。そこでまず、対象とする輸送需要を設定し、いつ、どれだけ輸送するかを定める輸送需要計画を作成する。決定された輸送需要計画に基づき、使用可能車両、所要時間、作業可能時間帯等を考慮して車両運行計画を作成する。なお、輸送需要の固定的な部分に対しては、基本計画として定期運行計画を作成する。

6.8.1 計画支援システム

幹線輸送計画は、上記のように拠点配置、設備構成、車両配置、輸送需要、作業計画、車両運行等の多くの要因で構成され、これら全体を最適化することは非常に困難な問題である。そこで、上位レベルの基本計画（拠点配置、設備構成）や輸送需要、作業計画を外的な制約条件として効率的な車両運行計画を作成するシステムを構築し、これを核として幹線輸送計画全体を支援する方式が有効である。

生産計画、在庫計画等に応じて発生する輸送需要に対し、積載率最大の輸送ダイヤ、車両数最小の車両運用を作成する車両運行計画システムを開発した。車両運行計画システムを輸送シミュレータとして用い、種々の輸送需要や制約条件を設定することにより、効率的な輸送計画の作成を支援するプロトシステムを開発した。図6.9に計画支援システムの処理概要を示す。

本システムを対話型で用いることにより、幹線輸送における次のような計画支援に有効である。

図6.9 幹線輸送計画支援システム

1）輸送需要計画：輸送の平準化、新規需要の開拓..... 輸送需要データの修正
2）作業計画：作業負荷軽減、輸送効率の向上 ..... 作業時間帯データの修正
3）定期便ダイヤの作成：車両の有効利用 ..... 高稼働率ルートの選択
4）システム評価：物量評価、設備評価 ..... システム構成データの修正

6.8.2 利用効果

実際の輸送需要データを用いて本システムの有効性を検討した。対象とした輸送網は日本全国におよぶ広域な幹線輸送システムである。輸送効率化のために、本システムの利用効果について検討した。その結果、以下の点で本システムの有効性が示された。

（1）輸送実態の定量的把握とビジュアル化
（2）スケジューリングによる積載率向上
（3）輸送需要の平準化
（4）定期便ダイヤの作成

輸送需要の定量的分析、全体状況の視覚的把握が可能となる。またシミュレーション結果により、高積載率運行の可能な区間、スケジューリングによる積載率向上をほとんど期待できない区間等の定量的解析を行うことができる。このような解析により輸送需要の原データの中からスケジューリングによる効率化の対象データを抽出した。表6.6に原データと対象データのスケジューリング結果を示す。

シミュレーションの結果、輸送需要の平準化により車両積載効率向上の可能性が示された。そこで平準化の方法、効果について検討した。個々の場所の輸送量を平準化しても、全体の車両運行が平準化されるとは限らず、車両全体の積載効率を最大化するような輸送需要の平準化方法を求めることは容易ではない。そこで、次のような3段階の平準化を行った。

表6.6 シミュレーション結果

	輸送需要数	運行数（積載率）	車両数（積載率）
原データ	1055	871 (40%)	393 (24%)
対象データ	275	181 (66%)	93 (31%)
輸送需要の平均化	275	177 (66%)	79 (36%)
輸送ダイヤの平準化	275	165 (68%)	75 (37%)
車両運用の平準化	275	165 (68%)	59 (48%)

1）各場所での輸送需要の平均化　2）輸送ダイヤの平準化　3）車両運用の平準化

表6.6にシミュレーション結果を示す。シミュレータを用いて輸送需要を平準化することにより、通常運行では車両数９３台（平均積載率３１％）であったのが、車両数５９台（平均積載率４８％）となり、車両数を３６％減少させることができた。

輸送需要の平準化の結果、最終的に得られた車両運行スケジュールを見ると、定型的なパターン化されている部分がかなりあることがわかる。これらの定型的な運行パターンは定期便ダイヤの候補になり、高積載率の定期便ダイヤを作成するうえで有効である。

6.9 結言

知識ベースと最適化アルゴリズムを融合した輸送計画手法を提案した。本手法を実際の輸送需要データに対して適用した結果、実用規模の問題に対して短時間で最適に近い解が得られることが確かめられた。さらに大量の輸送需要を扱う大規模問題に対するアルゴリズムの効率化を行った。今後は、より現実的制約条件を取り込んで知識ベースを拡充することにより実用性の向上を図ることが重要である。

また、上記の輸送計画手法に基づく車両運行計画システムを輸送シミュレータとして用いることにより、幹線輸送計画支援システムを開発した。データベースの修正に対する効率的なスケジュール修正方式、シミュレーション結果の評価、比較を容易にするためのインタフェースの改良等が今後の課題である。

参考文献

(1) L. Bodin et al.：Routing and Scheduling of Vehicles and Crews：The State of the Art, Comp. and Opr. Res., Vol.10, No.2, pp.68-211 (1983).

(2) 黒田：物流最適化のためのモデリング・アプローチ、オペレーションズ・リサーチ、Vol. 35、No.5、pp.268-272 (1990).

(3) 栗原、他：線形計画法の支援によるルールベース型作業スケジュール方式、情報処理学会論文誌、Vol.30、No.8、pp.976-989 (1989).

(4) 安部、桀山：ロジスティクスにおける輸送計画手法、計測自動制御学会論文誌、Vol.26、No.12、pp.1427-1434 (1990).

(5) K. Abe, M. Tsukiyama, T. Fukuda：A Planning Method Combining Rule-bases and Optimization Algorithms for Transportation Network, Proceedings of International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation and Automation, pp.902-906, 1992.

(6) 安部、桀山：大規模輸送スケジューリングにおけるアルゴリズムの効率化、電気学会全国大会、1991.

(7) 安部、桀山：幹線輸送計画支援システムの開発、日本ＯＲ学会秋季研究発表会、1992.

(8) 今野、鈴木：整数計画法と組合せ最適化、日科技連、1982.

(9) F. H. Cullen et al.：Set Partitioning Based Heuristics for Interactive Routing, Networks, Vol. 11, pp.125-143 (1981).

(10) 伊理、他：グラフ・ネットワーク・マトロイド、産業図書、1986.

第７章　結論

本論文は輸送システムにおける計画と運用に関して、これまで行ってきた研究をまとめたものである。得られた研究成果の要点を各章ごとにまとめると以下のようになる。

＜第２章＞

本研究全体の説明として、輸送計画問題に対する基礎的考察を行い、従来研究の概要を整理し、本研究の位置付けを明確にした。

（１）輸送システムにおける計画・運用問題とその解法の特徴を明らかにし、実用的観点から問題設定と、解法の基本方針を提示した。

（２）列車運行計画手法と幹線輸送計画手法が工学上果たす役割とその実用的価値を明らかにし、第３章以降の研究の動機付けを行った。

＜第３章＞

運転整理や列車ダイヤ作成における基本的問題である列車順序最適化問題に対し、分枝限定法の適用による実用的手法を提案した。

（１）多種別列車ダイヤの運転整理における列車順序最適化に対し、組合せ最適化問題としての定式化を示し、問題固有の構造を利用することにより、分枝限定法による効率的な最適化手法を構成した。

（２）実データに基づく数値実験により、提案した列車順序最適化手法の有効性を検証し、列車順序変更のみで対処しうるような小規模運転整理においては、実用規模の問題に対し適用可能であることが確かめられた。

（３）本提案手法は実際の運転整理にリアルタイムで使用すべく開発されたものであるが、オフラインで最適解を作成することにより、運転整理に対する種々のヒューリスティック手法の有効性を検証するうえでも有用である。

（４）運転指令員の経験的知識を用いたヒューリスティック手法を構成し、最適化手法の解との比較により有効性を検証した。

＜第４章＞

大規模な乱れも含む一般の運転整理を支援するために、列車運行シミュレーションの高速化方式を提案した。

（1）列車運行の有向グラフによるモデル化を示し、グラフ上の最長径路探索による効率的な列車運行シミュレーション方式を提案した。

（2）部分的条件修正に対し、最長径路の更新アルゴリズムにより、修正影響の波及部分のみを効率的に求めることが可能な部分的シミュレーション方式を提案した。

（3）スケジュールの矛盾によるデッドロックの発生を、有向グラフにおけるサイクルの検出により効率的に提示する方式を示した。

（4）実データに基づく数値実験により、提案したシミュレーション方式の有効性を検証し、実システムにおける複雑な運転整理案を短時間で作成可能であることが確かめられた。

＜第５章＞

運用ダイヤに実車両を割当てる車両運用計画問題に対し、最適割当アルゴリズムの多段階適用を基本とした、効率的な多期間割当手法を提案した。

（1）車両の保守・検査条件等を満たす車両割当問題に対し、２部グラフによるモデル化を基本とする多期間割当問題としての定式化を行い、各期の割当に対する最適割当アルゴリズムによる横型探索と、多期間にわたる縦型探索を用いた効率的な解空間の探索手法を構成した。

（2）提案手法では、車両と運用ダイヤの割当関係を２部グラフでモデル化することにより、割当の望ましさを枝の重みとして容易に反映させることができる。また各期の割当に関して解空間全体の効率的探索が可能であり、割当不能状況等を明確に判定することができる。

（2）車両と運用ダイヤの割当関係を、２部グラフのＤＭ分解を用いて構造化することにより、割当不能状況が発生した際の前期へのバックトラックによる競合解消を効率化するアルゴリズムを構成した。

（3）実データを用いた数値実験により提案手法の有効性を検討した結果、割当コストを適切に設定することにより、ほとんどの場合最適割当の多段階適用のみで多期間にわたる車両割当の作成が可能であることが確かめられた。また割当不能状況が生じた場合でも、通常はバックトラックによる前期の割当修正により修復可能であることが示され、現実問題に対する有効性が確かめられた。

＜第６章＞

道路輸送における幹線輸送計画問題に対し、最適化アルゴリズムとヒューリスティクスを組合せた実用的手法を提案した。

（1）幹線輸送計画における輸送ダイヤ作成に対し、集合分割モデルに基づく定式化を示し、ヒューリスティクスによる解候補生成と、集合分割問題に対する近似解法による効率的な手法を構成した。

（2）マッチング問題として定式化できる場合において、最適解と比較することにより、近似解の精度、計算時間の短縮効果を検証した。

（3）車両運用計画をネットワークフローでモデル化し、最小費用循環流アルゴリズムによる効率的な最適化手法を構成した。

（4）実データを用いた数値実験により、提案した車両運行計画手法の有効性を検討し、実用規模の問題に対して短時間で準最適解を得ることが可能であることが確かめられた。

（5）大量の輸送需要を扱う大規模問題に対し、アルゴリズムの効率化を行い、実用性を向上させた。

（6）輸送需要計画なども含む幹線輸送計画全体を支援する方式を検討し、輸送需要の平準化を例としてその有効性を示した。

今後に残された課題の主要なものとして、以下の項目があげられる。

（1）列車順序最適化手法に関しては、より大規模、複雑な問題に適用可能とするために、さらに問題固有の構造を利用して探索効率の向上を図るとともに、ヒューリスティックな判断に基づく問題分割と組合せることにより探索空間を縮小させる方式を検討することも必要である。

また、指令員の経験的知識や局所的判断ロジックによる各種のヒューリスティック手法の評価というオフライン的利用も有用である。

さらにパターンダイヤの作成など、列車ダイヤ作成への適用を図ることも重要である。

（2）列車運行シミュレーション方式に関しては、シミュレーション処理自体にヒューリスティックな判断を組み入れることにより、計画作成作業をさらに効率化するとともに、提案手法における事象間の因果構造に基づく部分的予測機能を活用して、より高性能なヒューリスティクスを構成することも重要である。

（3）車両運用計画手法に関しては、ボトルネックとなる車両への多期間割当を優先的に処理するような、より柔軟な解空間の探索方式を開発することにより、汎用性を向上させるとともに、運転整理における列車ダイヤ変更と車両運用変更を統合的に扱える手法を検討することにより、総合的な列車運行計画システムへと発展させていきたい。

（4）幹線輸送計画手法に関しては、実システムにおける種々の複雑な制約条件に対応できるように知識ベースを拡充することにより実用性を向上させるとともに、輸送需要計画等を含む幹線輸送計画全体を支援するためのアルゴリズムの開発も重要である。

（5）なお、上記の提案手法を実用化するうえでは、実際に使う人間にとっての使い易さも重要となる。そのためには、運行管理システムにおける他システムとの結合により、データの入出力を自動化するとともに、操作性を向上させるなどマンマシンインタフェースの改良も重要な課題である。

謝　辞

本研究は、筆者が三菱電機（株）中央研究所および産業システム研究所で行ったものを、東京大学工学部伏見正則教授の御懇篤な御指導のもとにまとめたものである。

また筆者が所属していた、中央研究所システム研究部元部長上村勝彦博士、同部前部長田中千代治博士、同部部長武田捷一博士、現在筆者が所属する産業システム研究所社会システム開発グループのグループマネージャ坂口敏明博士、同グループ第３グループマネージャ福田豊生博士には、本研究を行う機会を与えていただくとともに、有益な御教示と深い御配慮を賜った。

この研究は、三菱電機（株）の諸先輩、同僚の御支持と多大なる御協力のたまものである。本社交通技術部ならびに物流部の関係各位および顧客各位には多大な御援助と御協力をいただいた。また福岡工業大学情報工学科荒屋真二教授には、同社御在職中に交通システムの研究に導びいていただくとともに、本研究の過程において多大な御指導をいただいた。また産業システム研究所社会システム開発グループ築山誠博士、駒谷喜代俊博士には、本研究遂行において有益な御助言と御協力をいただいた。さらに中央研究所システム研究部および産業システム研究所社会システム開発グループの諸氏には、暖かい御援助と御協力をいただいた。

以上の方々に対し心より感謝いたします。

付録（筆者発表論文）

＜列車順序最適化に関する論文＞

(1) 安部、荒屋：分枝限定法による多種別列車ダイヤ運転整理手法、昭和58年電気学会全国大会論文集、pp.1882-1883 (1983).

(2) 荒屋、安部、曾根：運転整理用エキスパートシステムＥＳＴＲＡＣ、昭和58年電気学会全国大会論文集 (1983).

(3) 安部、荒屋：多種別列車ダイヤ運転整理における最適列車順序決定法、第９回システムシンポジウム講演論文集、pp.245-250 (1983).

(4) 荒屋、安部：ヒューリスティクスを利用した列車運転整理手法、電気学会論文誌、Vol. 103-C、No.11、pp.249-256 (1983)

(5) S. Araya, K. Abe, K. Fukumori：An Optimal Rescheduling for Online Train Traffic Control in Disturbed Situations, The Proceedings of The 22nd IEEE Conference on Decision & Control, pp.489-494, 1983.

(6) 安部、荒屋：分枝限定法を用いた列車順序最適化手法、計測自動制御学会論文誌、Vol. 21、No.5、pp.514-521 (1985).

＜列車運行シミュレーション方式に関する論文＞

(7) 安部、小西、荒屋：因果グラフを用いた汎用列車運行イベントシミュレータ、昭和59年電気学会全国大会論文集、p.1739 (1984).

(8) 安部、荒屋：スケジューリンググラフを用いたパラメトリックイベントシミュレーション技法、第10回システムシンポジウム講演論文集、pp.101-106 (1984).

(9) 安部、小西、荒屋：パラメトリックイベントシミュレーション技法の鉄道システムへの応用、第21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論文集、pp.134-138 (1984).

(10) 安部、荒屋：グラフ的手法による列車運行シミュレーションの高速化、昭和60年電気学会全国大会、pp.1982-1983 (1985).

(11) 安部、荒屋：列車運行知識のネットワーク表現と最長径路探索による高速シミュレーション、第５回シミュレーションテクノロジーコンファレンス論文集、pp.223-226 (1985).

(12) 安部、荒屋：最長径路法を用いた列車運行シミュレーション、情報処理学会論文誌、Vol.27、No.1、pp.103-111 (1986).

＜その他の運転整理に関する論文＞

(13) 荒屋、安部、福森：運転整理エキスパートシステムの開発、昭和59年電気学会全国大会 (1984).

(14) 安部、小西、荒屋：時間帯別乗降人数データにもとづく運転整理評価モデル、昭和59年電気学会全国大会論文集、p.1740 (1984).

(15) 安部、駒谷：運転整理用列車運行シミュレータにおける自動判断、第22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論文集、pp.589-593 (1985).

(16) 駒谷、匹田、安部：知識工学的アプローチによる列車運転整理支援システムの開発、電気学会論文誌、Vol.107-C、No.2、pp.173-180 (1987).

＜車両運用計画に関する論文＞

(17) 安部：多期間割当問題の一解法、第26回計測自動制御学会学術講演会論文集、pp.17-18 (1987).

(18) 安部、駒谷：最適割当アルゴリズムを用いた車両運用計画手法、第24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論文集、pp.337-341 (1988).

(19) 安部、駒谷：最適割当アルゴリズムを用いた車両運用計画手法、電気学会論文誌、Vol. 107-C、No.10、pp.939-946 (1987).

＜その他の列車運行計画に関する論文＞

(20) 安部、駒谷：列車運行計画におけるネットワークモデルの適用について、電気学会システム・制御研究会資料 SC-87-10、pp.91-100、1987.

＜幹線輸送計画に関する論文＞

(21) 安部、築山：集合分割モデルに基づく輸送スケジューリング手法、平成元年電気学会全国大会講演集、pp.1275-1276 (1989).

(22) 安部、築山：物流システムにおける輸送スケジューリング手法、第15回システムシンポジウム講演論文集、pp.377-382 (1989).

(23) 安部、築山：路線輸送スケジューリングシステムの開発、日本ＯＲ学会秋季研究発表会アブストラクト集、pp.190-191 (1990).

(24) 安部、築山：ロジスティクスにおける輸送計画手法、計測自動制御学会論文誌、Vol.26、No.12、pp.1427-1434 (1990).

(25) 安部、築山：大規模輸送スケジューリングにおけるアルゴリズムの効率化、平成３年電

気学会全国大会論文集、1991.
(26) 安部、築山：路線輸送スケジューリングシステムの開発、ＯＲ事例集1991、p.149、日科技連 (1991).
(27) K. Abe, M. Tsukiyama：Transportation Scheduling Method for Logistics, International Abstracts in Operations Research, 1991.
(28) 安部、築山：輸送ネットワークスケジューリング方式、第17回システムシンポジウム講演論文集、pp.353-356 (1991).
(29) 安部、築山：幹線輸送計画支援システムの開発、日本ＯＲ学会秋季研究発表会アブストラクト集、pp.210-211 (1992).
(30) K. Abe, M. Tsukiyama, T. Fukuda：A Planning Method Combining Rule-bases and Optimization Algorithms for Transportation Network, Proceedings of International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation and Automation, pp.902-906, 1992.

＜その他の輸送スケジューリングに関する論文＞

(31) 安部：輸送スケジューリング問題の階層的モデル化、昭和63年電気学会全国大会講演集、pp.1960-1961 (1988).
(32) 安部：搬送車群スケジューリングに対するネットワークフローモデルの適用、第27回計測自動制御学会学術講演会論文集、pp.223-224 (1988).
(33) 安部：輸送スケジューリング問題に対するネットワークモデル、第14回システムシンポジウム論文集、pp.249-254 (1988).
(34) 安部、築山：ネットワークフローモデルをベースとした輸送スケジューリング方式、第29回計測自動制御学会学術講演会論文集、pp.103-104 (1990).
(35) 安部、築山：知識ベースと最適化アルゴリズムを融合した輸送スケジューリング方式、第16回システムシンポジウム講演論文集、pp.155-160 (1990).

＜その他の論文＞

(36) 安部：離散型シミュレーションにおける最長径路法の適用について、第11回システムシンポジウム講演論文集、pp.291-296 (1985).
(37) 安部：シミュレーションモデルによる離散的決定過程の一表現、第25回計測自動制御学会学術講演会論文集、pp.277-278 (1986).
(38) K. Abe：A Heuristic Search Approach Based on a Flexible Simulation Method to Planning for Discrete Event Systems, Proceedings of JSST International Conference, pp.29-34, 1986.

(39) 安部：離散型システムの計画問題に対するシミュレーションアプローチ、第12回システムシンポジウム講演論文集、pp.217-222 (1986).
(40) 安部：分散モデルに基づく計画手法におけるヒューリスティクスの構成、第13回システムシンポジウム講演論文集、pp.115-120 (1987).
(41) 安部：分散型シミュレーションによるスケジューリングモデル、日本ＯＲ学会秋季研究発表会アブストラクト集、pp.112-113 (1987).
(42) 安部：計画問題の基本タスクに対する分散型アプローチ、第7回知識工学シンポジウム講演論文集、pp.19-24 (1988).
(43) K. Abe：The Distributed Discrete-Event Simulation in the Planning Expert Systems, Proceedings of 12th IMACS World Congress on Scientific Computation, pp.758-760, 1988.
(44) K. Abe, M. Tsukiyama, T. Fukuda：The Integration of Knowledge-Based Systems and Mathematical Programming through Planning-Domain Oriented Structured Model, Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp.125-126, 1989.