

貨物列車を対象とした機関車・乗務員運用整理案の作成手法

輸送情報技術研究部 運転システム

研究室長 福村 直登

1. はじめに

事故，災害等の理由によって列車ダイヤに乱れが生じたとき，指令員によって輸送計画の変更が作成・指示される。今回，貨物列車用機関車，及び貨物列車乗務員の運用整理案を計算機で作成する手法を開発したので，その内容を報告する。なお，本稿では列車運転計画（列車ダイヤ）変更を「運転整理」，車両と乗務員の運用計画変更を「運用整理」と表すこととする。

2. 貨物列車の運用整理業務の概要

貨物列車は，旅客列車と比較して長距離を走行する列車が主体であるため，いったんダイヤ乱れが生じると，列車の遅延時間は旅客列車と比べて大きくなりがちである。また，運転整理業務を各旅客鉄道会社に委託しているため，運転整理と連動して行われる，貨物列車の運用整理を担当する指令員に多大な負荷がかかっている^[1]。

本研究では，列車ごとの遅延時分，または運休に関わる情報が与えられたとき，その状況に対応した機関車と乗務員の運用整理案をパソコン（PC）で作成するアルゴリズムを開発し，業務支援システムに組み込むことで，迅速な運用整理が行える環境を実現することを目的としている。以下，機関車，及び乗務員それぞれの運用整理案作成アルゴリズムについて，その概要と評価試験の結果を示す。

3. 共通基本アルゴリズム

今回，機関車運用整理，及び乗務員運用整理という異なる2業務に対するアルゴリズムを開発したが，両アルゴリズムで共通して用いている手法について述べる。

鉄道を含む交通機関の機材と乗務員のスケジューリングに関する研究は数多く行われており，この問題を，典型的な組み合わせ最適化問題である集合被覆問題，または集合分割問題として扱っている例が多い^[2]。また，これらの問題に対しては，数理計画法の一つである列生成法という手法を用いることが一般的であり，開発したアルゴリズムも列生成法をベースとしている。列生成法の概略フローを図1に示す。

① 列生成子問題

数理計画問題の新規変数とその係数列を生成する問題であり，今回対象としている運用整理案作成問題においては，個々の変更行路（仕業）候補を作成する問題となる。

② 線形緩和問題

①で生成した変数を連続変数と見なして線形計画問題を解くことで，①で生成した変数群で十分かどうか判断できる。不十分と判断された場合，①に戻って追加する変数を生成する。

③ 整数計画問題

①，②によって得られた変数群に 0-1 整数条件を付加して問題を解くことで，最適な運用整理案を作成する。

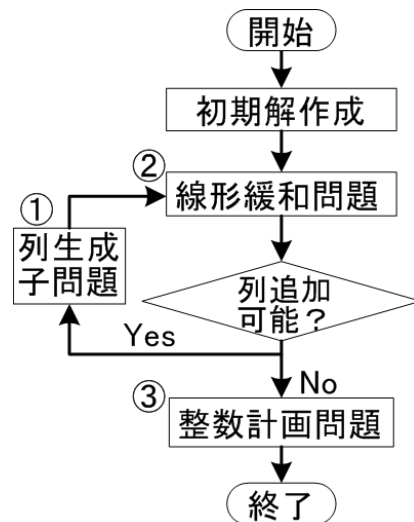


図1 列生成法の概略フロー

4. 貨物機関車運用整理案作成アルゴリズム

本章では、貨物列車用機関車の運用整理案作成アルゴリズムについて述べる。

4.1 機関車運用整理に関わる制約条件と目的関数

運転整理が実施されたあと、最初に機関車運用整理の実行可否が検討される。これは、乗務員よりも絶対数が少なく、融通も利きにくいことによる。なお、機関車が確保できないときは、運転整理からやり直すことになる。

機関車の運用整理実施にあたって考慮しなければならない、主な制約条件を示す。

- ① 各列車には、必ず機関車を1両だけ割り当てる。
- ② 各列車のけん引定数を満たす形式を割り当てる。
- ③ 所属機関区、形式ごとに決められている入線可能範囲を守る。
- ④ 機関車付け替え駅では、入出区等、折返しに必要な時間を確保する。
- ⑤ 各機関車の仕業検査周期を守る。
- ⑥ 各検査施行区所の施行能力、作業時間帯を守る。

また、運用整理案の評価指標としては、以下のものが挙げられる。

- ① 計画からの変更数は少ないことが望ましい。
- ② 他区所所属機関車、他形式機関車への変更は少ないことが望ましい。
- ③ 予備機関車の使用数は少ないほうが望ましい。
- ④ 検査回数の増加は少ないほうが望ましい。

4.2 貨物機関車運用整理案作成アルゴリズム

貨物列車は長距離列車が多いため、機関車の運用整理は、一仕業内で元の計画に戻せる可能性は小さく、数日間にわたる変更計画となることが多い。従って、仕業単位ではなく、機関車単位の運用変更案を作成する必要がある。また、必ずしも元の運用に戻すことは要求されておらず、同じ交番内の別仕業と差し替えた結果となれば、許容されることもある。

これらの特徴と、4.1 節で述べた制約条件を勘案して、機関車運用整理案作成問題を追加制約付き集合分割問題としてモデル化し、3章で述べた列生成法によるアルゴリズムを開発した。目的関数は上記評価尺度の重み付き和としているため、ユーザが指定した重みの値に対応した整理案が作成できる。ただし、運用変更回数と、元の計画に戻る（復旧）までに要する時間とはトレードオフの関係であり、運用変更回数を重視すると、復旧が長期間にわたる可能性がある。そのため、復旧目標時間も制約条件に含め、その範囲内での整理案を作成することとしている。また、列生成子問題は、機関車ごとに検査施行条件を満たす変更仕業候補を作成する問題となるが、この問題を解くために、運転整理後の列車ダイヤと各機関車の仕業検査可能間合いをネットワークとしてモデル化し、最短路アルゴリズムを応用して変更仕業候補を作成するアルゴリズムを開発した。なお、線形緩和問題、整数計画問題については、汎用数理計画ソルバーを用いて最適解を求めている^[3]。

4.3 評価試験結果

開発したアルゴリズムに対し、実際の列車ダイヤと機関車運用、及び実際に発生したダイヤ乱れ事象データを用いた評価試験を行った。対象区間の路線長は約700km、1日の列車本数は上下計約250本、3区所4形式、計142両の機関車がある。また、機関車には検査周期72時間の形式と96時間の形式が存在する。

3つの試験事例に対する結果を表1に示す。各事例について、平均遅延時分、影響列車本数

を記載した。また、復旧目標時間を 36 時間から増加させ、その影響を調べた。

なお、試験用 PC は、CPU Core 2Quad 2.66GHz、メモリ 3.5GB の Windows マシン、数理計画ソルバーは ILOG CPLEX^[4]を利用している。

表 1 機関車運用整理案作成アルゴリズムの評価試験結果

ケース No.	ケース 1			ケース 2			ケース 3		
1 列車平均遅延	約 3.1 H			約 3.1 H			約 3.1 H		
遅延数/運休数	12 / 0			18 / 0			50 / 2		
復旧目標時間	36H	60H	72H	36H	60H	72H	36H	60H	72H
変更機関車数	6	6	6	解なし	16	17	解なし	44	45
計算時間 (秒)	1.4	3.7	6.2	7.6	22.0	55.2	0.9	29.6	68.8

復旧目標時間を延ばしても変更機関車数が減らないのは、仕業差し替えの戻しを行っているためである。また、表中の計算時間に加え、データ入出力処理に 15 秒程度の時間を要している。

5. 貨物乗務員運用整理案作成アルゴリズム

5.1 乗務員運用整理に関わる制約条件と目的関数

機関車の運用整理に引き続いて、乗務員の運用整理が行われる。乗務員運用整理では、超勤による列車遅延への対応、予備者・非番者の緊急呼び出しなど、機関車と比べて柔軟な対応が可能であるが、安全上、過大な労務負荷を課すことは避けなければならない。

乗務員運用整理の実施にあたり、考慮しなければならない主な制約条件を示す。

- ① 各列車には、必ず乗務員を割り当てる。2 人以上の乗務員が割り当たる場合、本務乗務員 (1 人) 以外は便乗となる。
- ② 乗務区ごとに決められている乗務可能範囲、乗務可能な機関車形式を守る。
- ③ 各行路は、乗務員の所属区所で終了する。
- ④ 乗務員の乗り継ぎは、乗継可能駅で行う。
- ⑤ 乗り継ぎ時には間合い時間を確保し、他駅へ移動する場合は便乗列車を指定する。
- ⑥ 退勤遅延 (超勤) 時間の上限を守る。

また、評価指標としては以下のものが挙げられる。

- ① 計画からの変更数は少ないことが望ましい。
- ② 他区所担当列車への変更 (区所間持ち替え) は少ないことが望ましい。
- ③ 超勤時間は少ないことが望ましい。
- ④ 予備者に乗務させることは少ないほうが望ましい。
- ⑤ 長時間の連続乗務は少ないことが望ましい。

5.2 貨物乗務員運用整理案作成アルゴリズムの概要

乗務員運用の行路は一勤務に対応するため、所属区所に戻って退勤した時点で行路変更は終了となる。また、次勤務は所定通りであることが原則であるため、乗務員の運用整理は一行路内で収束させる必要があり、これが機関車との大きな違いである。

これらの特徴と、5.1 節で述べた制約条件とを勘案して、乗務員運用整理案作成問題については、追加制約付き集合被覆問題としてモデル化し、列生成法によるアルゴリズムを構成した。機関車運用整理と同じく、目的関数は評価尺度の重み付き和としたが、超勤を課せる時間には限度があるため、上限時間をユーザが指定し、その条件を満たした変更行路案を作成するよう

にしている。また、列生成子問題は、乗務員ごとに、所属区所に戻るまでの変更行路候補を作成する問題となり、運転整理後の列車ダイヤをネットワークとしてモデル化し、最短路アルゴリズムにより、変更行路候補を作成するアルゴリズムを開発した^[5]。

5.3 評価試験結果

開発したアルゴリズムに対し、実際に発生したダイヤ乱れ事例データによる評価試験を行った。対象区間の路線長は約 400km, 1 日の列車本数は上下計約 200 本であり、路線内の区所数 4, 総行路数は 102 行路である。なお、PC 環境は機関車のとときと同一である。

評価指標の重みは、他機関区列車との持ち替え回数が少なく、退勤遅延時間も小さくなるように設定し、予備乗務員はいないものとした。

3 つの試験事例に対する結果を表 2 に示す。それぞれの事例について、運行支障時間と影響列車本数を記載した。また、運用整理案作成結果として、変更行路数と、そのうち他区所との間で列車持ち替えをした行路数、超勤が発生した行路数と超勤時間の総計を示す。計算時間は条件データの読み込みから運用整理案作成処理、整理結果データの出力までの実測時間である。

表 2 乗務員運用整理案作成アルゴリズムの評価試験結果

ケース No.	ケース 1	ケース 2	ケース 3
運行支障時間	約 2.0 H	約 4.0 H	約 4.5 H
遅延数 / 運休数	11 / 0	25 / 7	29 / 1
行路変更数(区所間持替数)	8 (0)	12 (0)	12 (2)
超勤発生行路数(総超勤時間)	13 (32.1 H)	10 (13.8 H)	7 (14.2 H)
計算時間(入出力時間含む: 秒)	13.0	15.7	12.3

表 2 の通り、いずれの事例でも概ね 20 秒以内と短時間で運用整理案が作成できている。また整理案の内容も、列車遅延があっても次乗務列車に間に合うときは行路変更をせず、他区所との列車持ち替えも抑えられているなど、妥当なものであることを確認した。

6. おわりに

今回開発したアルゴリズムにより、実用的に問題ない計算時間内で、妥当な運用整理案を作成できることを確認した。今後も評価試験を重ねて運用整理案の精度向上を図るとともに、全体システムの完成度を上げることで、早期の実用化に結びつけたい。最後に、本研究開発の実施にあたり、ご協力いただいた JR 貨物運輸部運用指導グループの方々に深く謝意を表す。

参考文献

- [1] 佐藤, 平井, 福村:「列車ダイヤ乱れ時の乗務員運用整理業務支援システムのプロトタイプ開発」, 第 9 回鉄道貨物振興奨励賞受賞論文集, JR 貨物リサーチセンター(2008) .
- [2] 今泉:「鉄道の運用計画問題に対する整数計画法によるアプローチ」, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 53, No. 8(2008) .
- [3] 佐藤, 福村:「輸送障害時の車両スケジュール変更問題」, 2008 年日本オペレーションズ・リサーチ学会秋期研究発表会アブストラクト集(2008) .
- [4] ILOG CPLEX. : <http://www.ilog.co.jp/products/cplex/> .
- [5] 佐藤, 福村, 重田, 川上, 森田, 渡辺:「貨物列車運用整理案自動作成システムの研究ー乗務員運用整理機能の開発ー」, 第 44 回鉄道サイバネティクス・シンポジウム予稿集(2007) .