

旅客鉄道の車両運用計画アルゴリズム
—アントコロニー最適化法を用いたヒューリスティック解法—

○黒田 真弘 (九州大学大学院)
[機] 辻 康孝 (九州大学大学院) [機] 近藤 英二 (九州大学大学院)

Railway rolling stock planning
—Heuristic approach based on Ant Colony Optimization—

○Masahiro Kuroda, (Kyushu University)
Yasutaka Tsuji, (Kyushu University) Eiji Kondo, (Kyushu University)

A railway rolling stock planning is one of the important scheduling in railway transport, which assigns train units to a given time table services and decides a roster of the train units. This planning is usually designed with an expert's hand calculation. Therefore, an effective algorithm for the rolling stock planning is required. This paper proposes a new approach based on Ant Colony Optimization to solve the planning. The proposed method can minimize the number of train units and deadheads, but can consider a periodical inspection for the train units. The effectiveness of the proposed method is demonstrated through numerical experiments with instances made from the real railway lines in JR Kyushu.

キーワード：交通運行計画, スケジューリング, アントコロニー最適化

Key Words : Transportation planning, Scheduling, Ant Colony Optimization

1 はじめに

車両運用計画とは、利用者ニーズに基づいて作成された列車運行計画(ダイヤ)に、実際の鉄道車両を割り当てる計画のことをいう¹⁾。車両運用計画では、車両の運用や維持コストを削減するために、使用する車両の数や回送数をできるだけ少なくする計画の立案が求められる。また周期的な仕業検査計画も運用計画の中で同時に考慮する必要がある。現状では、担当者の経験に基づく手作業によって計画が作成されており、作成された運用計画の品質は、担当者に依存している。そのため安定した品質の車両運用計画の作成を効率的に支援するアルゴリズムの開発が行われている²⁾³⁾。文献²⁾³⁾では、車両運用計画問題を非対称の巡回セールスマン問題に帰着させ、欲張り法と確率的な局所探索法を用いて解く手法が提案されている。

そこで本研究では、車両運用計画を効率的に作成する手法として、アントコロニー最適化法(ACO)⁴⁾を用いた手法を提案する。蟻の捕食行動を模倣したメタ解法であるACOは、組合せ最適化問題の解の構成要素を一つずつ選択していく構成的な最適化手法であり、車両運用計画問題に対しても有力な手法として期待できる。提案手法では、様々な接続条件を考慮して列車の接続コストを定義し、使用車両数や回送コストを最小化するようにACOを用いて列車の接続を行う。それにより車両運用計画案を構築する。その中では周期的な仕業検査計画も同時に考慮する。提案手法を実際の列車ダイヤに適用し、その有用性を検証する。

2 車両運用計画の概要

2.1 車両運用計画

本論文では「列車」は時刻表上の一本の列車の運行計画のことを、「車両」は鉄道車両本体のことをいう。

さらに車両一台が一日に担当する列車を順番に並べたものを「行路」または「仕業」と呼ぶ。また作成されたダイヤを実行するために列車に車両を割り当てることを「車両運用計画」と呼ぶ。なお車両運用を含めた国内の鉄道システムおよび輸送計画に関しては、文献¹⁾などが詳しい。

2.2 制約条件

車両運用計画は法令規則や駅の設備などによる様々な制約条件を満足しなければならない。以下に考慮すべき制約条件を述べる。なお列車ダイヤは変更できないことを前提とする。

- ・始発駅での準備時間の確保：車両が列車の営業を終えた後、次の列車として出発する前には車内点検・行先変更作業などの準備時間を確保する必要がある。
- ・仕業検査の実施：鉄道車両には法令などにより様々な検査の実施が義務付けられている。その中でも仕業検査は数日に一度の短い周期で、検査施設を有する駅において、営業時間内に数時間かけて実施される。そ

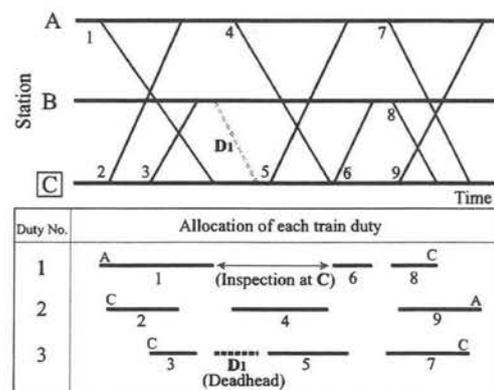


Fig. 1 Train diagram and duties of train units

のため仕業検査の計画も車両運用計画で同時に考慮する必要がある。

実際の車両運用計画には上記の制約条件以外にも駅の施設や番線数なども考慮しなければならないが、本研究ではそれらを省略する。

2.3 交番の作成

車両はその日割り当てられた行路によっては、最初に出発した駅に最後に戻ってくるとは限らない。そのため通常は「交番」と呼ばれる数日周期のローテーションを車両に割り当てて運用する。Fig. 1の例では、車両1には行路を1→2→3と割り当ててことで、各使用車両の走行距離が均等化も図れ、同時に3日に一度仕業検査を受けることも可能となる。なお、行路2→3への接続では行路2の終着駅と行路3の始発駅が異なるため、夜間回送が必要となる。

2.4 評価項目

本研究では使用車両数(行路数)、回送列車数・回送距離、車両の待機時間、走行距離の分散、定期的な仕業検査の実施を車両運用計画の評価項目として考える。

3 Ant Colony Optimization (ACO) による解法

3.1 ACOの概要

ACOは自然界の蟻の群れの群行動を模倣して考案された最適化手法であり、組合せ最適化問題の有効な手法として注目されている⁴⁾。ACOでは単純な情報を記憶できる人工的な蟻(以下、蟻)の集団を用いて対象問題の解を反復的に生成する。蟻は過去の探索結果を蓄積したフェロモン量と、問題固有のヒューリスティック情報(例えばTSPではノード*i, j*間の距離の逆数で定義される)に基づいた選択ルールに従い解を構築していく。

蟻がノード*i*からノード*j*に移動する確率を $p_{i,j}$ 、蟻がノード*i*から移動できるノード集合を N_i 、ノード(*i, j*)間に蓄積されたフェロモン量を $\tau_{i,j}(t)$ 、ノード(*i, j*)間のヒューリスティック値を $\eta_{i,j}$ とすると、蟻の選択の確率式は次式で与えられる。なお*t*は反復回数である。

$$p_{i,j} = \frac{[\tau_{i,j}(t)]^\alpha [\eta_{i,j}]^\beta}{\sum_{l \in N_i} [\tau_{i,l}(t)]^\alpha [\eta_{i,l}]^\beta} \quad (1)$$

ACOでは式(1)による確率的な選択により解を構築していく。蟻の集団が解を構築した後、解の評価値に応じて各ノード間のフェロモンを更新する。これに関しては後に述べる。

3.2 車両運用計画のモデル化

車両運用計画のモデル化は列車をグラフのノードに置き換えて考えることができる。上下*n*本の列車の集合をノード集合 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 、計画内で列車の始発・終着駅となっている駅の集合を S とおく。また

各列車ノード T_i は始発駅($S_{T_i}^d$)、始発時刻($t_{T_i}^d$)、終着駅($S_{T_i}^a$)、終着時刻($t_{T_i}^a$)の4つの属性を持つ。さらに駅集合 S の中で仕業検査を行う施設を持つ駅集合を S_{ins} とする。

3.3 解の構築

ACOによる解の構築は未選択の列車を式(1)により確率的に選択していくことで行う。車両運用計画問題におけるヒューリスティック値 $\eta_{i,j}$ を列車 T_i, T_j 間の接続コスト $\lambda_{i,j}$ に対応させ次式で定義する。なお添字“*i, j*”は“ T_i, T_j ”の略記を意味する。

$$\eta_{i,j} = \frac{1}{\lambda_{i,j}} \quad (2)$$

各列車間の接続コスト $\lambda_{i,j}$ は、待機時間、回送の有無、日又ぎ等の接続条件に応じて定義する必要があり、以下に詳しく述べる。

・回送を行わない場合：前の担当列車 T_i の終着駅と次の担当列車 T_j の始発駅が同じ場合、待機時間を接続コストとする。

$$\lambda_{i,j} = t_{T_j}^d - t_{T_i}^a \quad (3)$$

またノード(T_i, T_j)間で仕業検査が可能である場合は、式(3)で求めた接続コストから検査時間 t_{ins} を除いたものを接続コストとして与える。

$$\lambda_{i,j} = t_{T_j}^d - t_{T_i}^a - t_{ins} \quad (4)$$

・回送を行う場合：前の担当列車の終着駅と次の担当列車の始発駅が異なり、回送が必要な場合、待機時間と回送時間の和で与える。なお μ は重み係数である。

$$\lambda_{i,j} = t_{T_j}^d - t_{T_i}^a + \mu \frac{|S_{T_i}^a S_{T_j}^d|}{U_{dh}} \quad (5)$$

回送を行う場合でも、検査可能駅からの回送あるいは検査可能駅に回送後に、検査を行う時間が確保できる場合には検査可能とみなす。この場合の接続コストは回送を行わない場合と同様の処理をする。

$$\lambda_{i,j} = t_{T_j}^d - t_{T_i}^a + \mu \frac{|S_{T_i}^a S_{T_j}^d|}{U_{dh}} - t_{ins} \quad (6)$$

・翌日の列車を選択する場合：未選択で出発時刻がすでに過ぎている列車は、翌日の接続列車とみなす。翌日の選択する度に1日に使用する車両数(行路数)が増加する。翌日の列車を選択する場合には待機時間に定数 μ' をかけたものを接続コストとする。なお列車 T_i を翌日の列車とするときの始発時刻を $i_{T_i}^d$ とする。これは $t_{T_i}^d$ に1日分の時間を加算した値である。

$$\lambda_{i,j} = \mu' (i_{T_j}^d - t_{T_i}^a) \quad (7)$$

・夜間回送を行い翌日の列車を選択する場合：翌日の列車を選択する場合、1日の最終担当列車の終着駅と

翌日の列車の始発駅が異なるときには夜間回送となる。
この場合の接続コストは次式で与える。

$$\lambda_{i,j} = \mu' \left\{ \left(t_{T_j}^d - t_{T_i}^a \right) + \mu \frac{|S_{T_i}^a S_{T_j}^d|}{U_{dh}} \right\} \quad (8)$$

・仕業検査を定期的に受けるためのコスト設定：仕業検査は周期的に受けなければならない。式(4)、(6)のように検査時間分を除くことでコストを小さく見積もり、検査可能な接続箇所が選択されやすくしている。しかしこれだけでは周期的に仕業検査を行うことが困難であると考えられる。そこで検査を行うことができる接続のコストを周期的に小さくし、周期的に検査が行われやすくする。

3.4 評価関数の算出

全ての蟻が構築したそれぞれの解に対して2.4節で述べた評価項目により評価関数 R を算出する。使用車両数(行路数)を A 、車両の待機時間の総和を W 、回送回数を D 、回送時間の総和を H 、夜間回送回数を D' 、夜間回送時間の総和を H' 、各行路の走行時間の分散を V とし、 R を次式で与える。

$$R = z_1 A + z_2 W + z_3 D + z_4 H + z_5 D' + z_6 H' + z_7 V \quad (9)$$

3.5 フェロモン更新

全ての蟻が解を構築した後に構築グラフ上のフェロモンを更新する。グラフ上の全ノードにおいてフェロモンは一定割合 ρ だけ蒸発する。また、過去の探索解で R を最小化した最良解のみを用いて、最良解を得た蟻が通過したノード間のみ新たに $\Delta\tau_{i,j}$ の量のフェロモンを付加する。この更新則は次式で表現される。

$$\tau_{i,j}(t+1) = (1-\rho)\tau_{i,j}(t) + \Delta\tau_{i,j} + \Delta\tau_{i,j}^{cor} \quad (10)$$

なお、フェロモン散布量 $\Delta\tau_{i,j}$ は最良解の評価関数を R^{bs} として次式で与える。

$$\Delta\tau_{i,j}^{cor} = \begin{cases} 1/R^{bs} & (T_i, T_j) \text{ が最良解に} \\ & \text{含まれるとき} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases} \quad (11)$$

また、1日に担当列車が一つしかない車両が存在した場合、その列車は前日の列車あるいは翌日の列車の接続が強くなりすぎ、使用車両数(行路数)減少の妨げとなる。これを回避するためにフェロモン量 $\Delta\tau_{i,j}^{cor}$ を付加して補正する。

$$\Delta\tau_{i,j}^{cor} = \begin{cases} 1/R^{bs} & (T_i, T_j) \text{ が孤立行路に} \\ & \text{含まれるとき} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases} \quad (12)$$

4 数値実験

4.1 対象問題と実験条件

提案アルゴリズムを実際の列車ダイヤに適用し、その有用性を評価する。使用するダイヤはJR九州管内の日南線および久大本線の平日ダイヤである。例題で

Table 1 ACO parameters

Parameter	Nichinan	Kyudai
Number of iterations	500	1500
Number of ants : m	30	50
Pheromone evaporate rate : ρ	0.05	0.05
Initial pheromone value : $\tau_{i,j}(0)$	0.1	0.1
Parameters in Eq.(1) : (α, β)	(1.0, 2.0)	(1.0, 5.0)
Weighting coefficients of λ : (μ, μ')	(10, 10 ⁴)	(1, 10)

Table 2 Details of Nichinan-line and Kyuadi-line

Description	Nichinan	Kyudai
Number of trains : n	39	128
Number of stations : $ S $	6	13
Station with inspection facility : S_{ins}	Minami	Oita
Preparation time : t_{pre} [min]	-Miyazaki	
Inspection time : t_{ins} [min]	3	3
Interval of inspection [day]	120	120
Interval of inspection [day]	3	3
Deadhead velocity : U_{dh} [km/h]	50	50

は一般車両を使用する普通列車のみを対象とした。実験に使用したパラメータをTable1に、両路線の詳細をTable2に示す。式(9)の重み係数はそれぞれ $z_1 = 10$ 、 $z_2 = 1.0 \times 10^{-3}$ (日南線)、 $z_2 = 0.5 \times 10^{-3}$ (久大本線)、 $z_3 = 1$ 、 $z_4 = 1.0 \times 10^{-2}$ 、 $z_5 = 0.1$ 、 $z_6 = 5.0 \times 10^{-3}$ 、 $z_7 = 1.0 \times 10^{-5}$ とした。なお計算には Intel Core 2 Duo 2.66GHz、2.0GB RAM の計算機を使用した。

4.2 実験結果

4.2.1 日南線 (宮崎～志布志)

日南線のダイヤグラムと提案手法によって得られた最良解の行路表をFig.2に示す。Fig.2のダイヤグラムより、このダイヤを実行するためには最低7両の車両が必要であることがわかる。提案手法により使用車両数の最小化が達成できている。宮崎駅では始発列車が多く、南宮崎駅では終着列車が多いため、宮崎-南宮崎間の回送を設定する必要がある。Fig.2を見ると、回送列車を宮崎-南宮崎間のみ7本設定されており、不要な回送は設定されていないことがわかる。このときの総回送時間は24分であった。また夜間回送本数は2本、夜間回送時間は43分となり、夜間回送も低く抑えられている。以上のことから妥当な計画案が作成されたと言える。

仕業検査は南宮崎でのみ行うと設定したが、南宮崎駅は終着列車は多いものの始発列車が少ないため、車両が南宮崎駅に長く停車する機会が少ない。そのため宮崎駅に回送する前に南宮崎駅で仕業検査を行うような設定になっている。

4.2.2 久大本線 (鳥栖～大分)

5回の試行を行い、各試行で得られた最良解の評価値をTable3に示す。表中の a は検査が可能な行路の数である。重要な評価項目である使用車両数、待機時間は各試行において最小化されている。回送は7~9本設定され、一本あたりの回送時間はおおよそ35分であり、

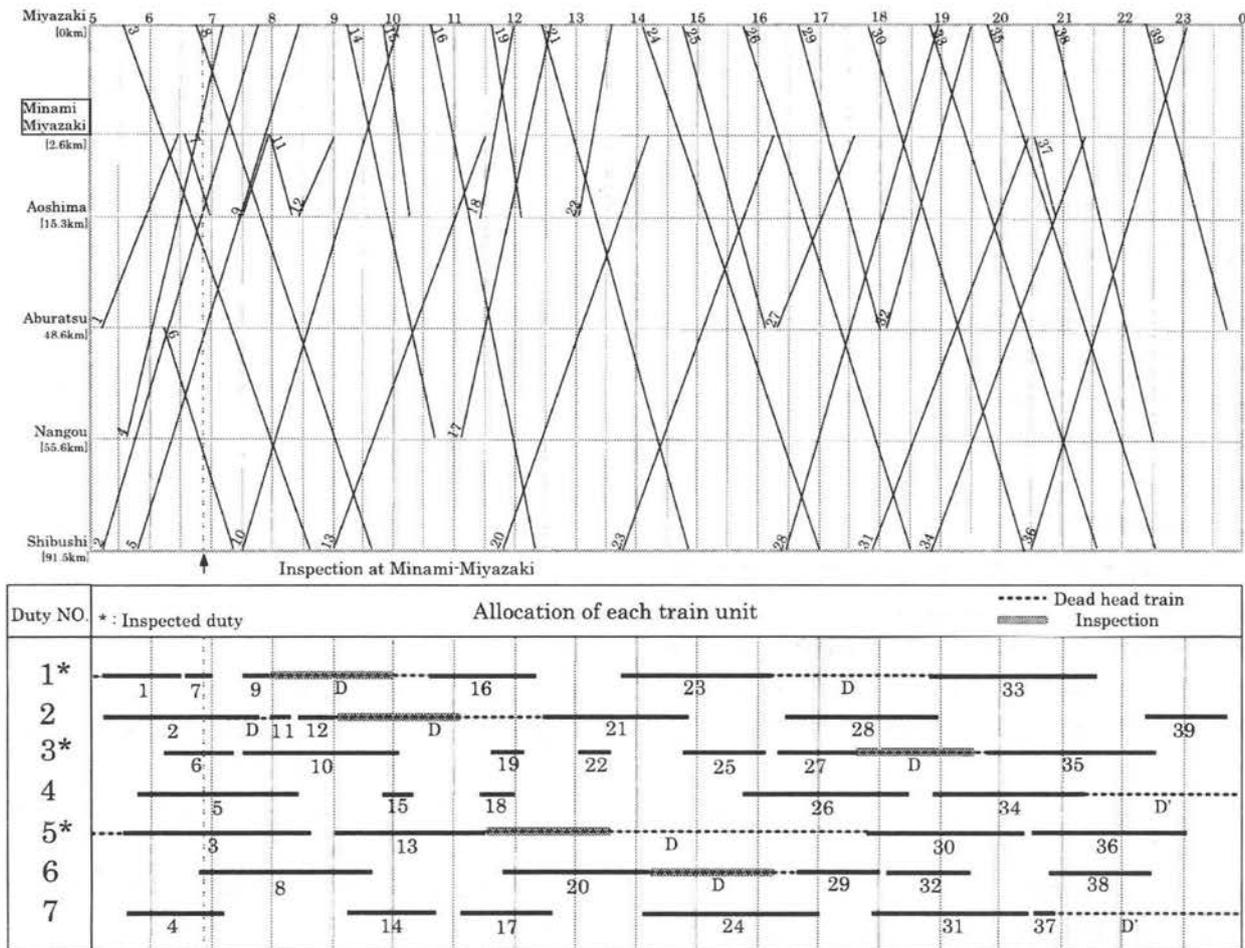


Fig. 2 Train diagram of Nichinan-line and allocation of each train unit obtained by proposed method

Table 3 Results of Kyudai-line

A(a)	W	D(H)	D'(H')	V
14(9)	2.5×10^4	7(237)	4(324)	1.2×10^4
14(9)	2.5×10^4	8(268)	5(354)	0.6×10^4
14(9)	2.5×10^4	8(275)	4(473)	1.6×10^4
14(9)	2.5×10^4	8(268)	6(456)	0.6×10^4
14(9)	2.5×10^4	9(295)	5(380)	1.6×10^4

路線規模からすると妥当な計画といえる。総夜間回送時間が比較的大きくなったが、夜間回送数は4~6本と低く抑えられている。また3.3節に示したような周期的なコスト補正を行うことにより、仕業検査を3日に一度必ず受けられる交番が作成された。解によっては仕業検査が可能な行路が多く含まれていたが、これは久大本線では検査可能駅である大分を発着する列車が多いためである。

5 おわりに

本論文ではアントコロニー最適化法(ACO)を用いた車両運用計画の自動作成アルゴリズムを提案した。提案手法では車両数の最小化だけでなく、回送コストの最小化および待機時間削減による車両運用の効率化も考慮している。また提案手法では日又ぎ、すなわち翌日の列車との接続も考慮しており、行路と同時に夜間回送を最小化し、同時に仕業検査計画も考慮した交

番計画の作成が可能である。提案アルゴリズムを実際のダイヤに適用し、その有用性を検証した。その結果、提案アルゴリズムにより妥当な車両運用計画が作成可能であることを示した。

今後は大規模路線及び複雑な運用形態への提案アルゴリズムの拡張を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は、中村治四郎育英会・第33回中村奨励金の支援を受けて遂行されました。

参 考 文 献

- 1) (財) 鉄道総合技術研究所運転システム研究室：鉄道のスケジューリングアルゴリズム，株式会社エヌ・ティー・エス，2005.
- 2) 趙鵬，富井規雄，福村直登，坂口隆：確率的局所探索に基づく鉄道車両運用計画アルゴリズム，電気学会交通・電気鉄道研究会，2001.
- 3) 福村直登，中村達也，西森進矢，坂口隆：車両運用計画自動生成アルゴリズム，鉄道総研報告，Vol.22，No.6，pp.5-10，2008.
- 4) M.Dorigo, T.Stützle：Ant Colony Optimization, MIT Press, 2004.