

鉄道における車両割り当てスケジューリング

土屋隆司 長田弘康

(財) 鉄道総合技術研究所

シミュレーティッドアニーリングは複雑な組合せ最適化問題に対する近似解法としてよく知られた手法であり、枠組の単純さと得られる解の質の高さから各方面への応用が行なわれている。

鉄道における典型的なスケジュール作成問題のひとつである車両割り当て問題は、比較的「良い」初期解を得るための方法が確立していること、また、その初期解からの逐次改善を行なうことによって良質の解が得られる可能性が高いことなどにより、シミュレーティッドアニーリングの適用に向けたタイプの問題であると予想した。

そこで、車両割り当て問題に対してシミュレーティッドアニーリングを適用し、評価してみたので報告する。

SOLVING TRAIN ASSIGNMENT PROBLEM BY
SIMULATED ANNEALINGRyuji Tsuchiya Hiroyasu Osada
Railway Technical Research Institute
2-8-38 Hikari-cho Kokubunji-shi Tokyo Japan

Simulated annealing(SA) is a well-known approach to the approximate solution of complicated combinatorial optimization problem. Because of the simplicity of the framework and the high quality of the solution obtained, application to a number of fields is ongoing.

We have applied SA to the train assignment problem whose goal is to find an optimal(or near-optimal) assignment of "physical trains" to a set of train usage patterns.

Since in train assignment, a method for obtaining a better-than-random initial solution is established and iterative improvement on the initial solution seems hopeful, we have made an assumption that the nature of the problem is well suited to the application of SA.

1 はじめに

本報告では、鉄道における典型的なスケジュール作成問題である車両割り当て問題をシミュレーティッドアーシング(以下、SA)を用いて解く方法を提案する。

車両割り当て問題は、

- 比較的良好初期解を得るための方法がすでに確立していること
- その初期解からの逐次改善を繰り返すことにより準最適解が得られる可能性が高いこと

などから、SAの適用に向けたタイプの問題であると我々は予想した。

車両割り当てとは、ひとこと言え、列車の運行パターンの集合から利用可能な車両¹の集合へのマッピングを定義することである。

列車の運行パターン(通常、基本運用と呼ばれる)はダイヤ改正ごとに作成されるものであり、車両割り当てを行なう際にはあらかじめ与えられたデータと考える。車両割り当ては、一定の期間(半月ないしは一月)の計画をあらかじめ、まとめて作成しておく事前準備的な一括スケジュールの側面と、日々のダイヤ変更に伴う車両の運用変更の微調整などを行なう状況適応型のスケジュールの側面を合わせ持っている。これは、数日程度の短期スパンの割り当て作成を繰り返す方式では車両運用の継続的な実行可能性を保証したり、中長期的な検査・修理作業などの計画との整合性を取るのが困難であるという理由に基づいている。後者の適応型スケジュールリングに対しては、たとえば、制約違反のペナルティを伝播させていくことによる再スケジュール法などが考えられる([10])。今回我々が対象にしたのは、前者の事前準備的、一括スケジュールとしての車両割り当て問題である。したがって多少時間がかかってもよいが、できるだけ良い解を得ることを第一に考えた。

車両割り当て問題の解法としては、これまでもさまざまな方法が考案されている(たとえば、[3]、[5]など)。

¹本報告では『車両』ということばを1両1両の車のことではなく1つの列車を構成する(1編成分の)車両の集まりの意味で使う。

これらの手法は、「空」の初期状態に対して、割り当てデータを漸時追加していくことにより最終的な解を求める、という構造的(constructive)な方法である。たとえば[3]には、制約条件の種類や強さに応じて車両に優先度を設定し、この優先度の順に割り当てを決定していく方法が述べられている。一方、[5]では、2部グラフの最大マッチングに基づく車両割り当てを繰り返すことにより多期間にわたる割り当て計画の系列を作成する方法が提案されている。

また、ルールベースに基づいた車両割り当てのエキスパートシステムのアプローチも行なわれている([8])。

今回我々が提案する方法は、事前にアプリオリな方法を使って一定期間(我々が実際に試みた例では1カ月)にわたる割り当て計画の雛型を作成しておき、これを初期状態としてSAによる逐次改善を繰り返すことにより最終的な解を求めるというものである。

割り当ての雛型は、満足すべき制約条件のうち、割り当て作成の対象となる期間に依存せず常に満足されなければならない基本的な制約だけを充足したものである。通常、人間の専門家もこの割り当ての雛型を元にして、対象期間に固有の制約を含むすべての制約を充足した実施可能な割り当てを作っている。

SAでは、実行可能解(feasible solution)の集合の中だけで状態遷移を行なわせる場合と、制約に対する違反をペナルティ値としてエネルギー関数に反映させることによって非実行可能解(infeasible solution)の集合も含めた広い範囲で状態遷移を行なわせる場合とがある。今回我々は、車両割り当てへの適用に際しては後者を採用した。しかし、全くランダムな割り当てをすべて考慮するとすれば探索範囲が広くなりすぎ、実行性能の著しい低下を招くおそれがある。そこで、実行可能ではないが一定の条件を満足する割り当てだけを遷移可能な状態とすることにし、遷移可能な状態数を絞ることにした。

以下では、まず、車両割り当て問題の概要について述べる。次に、車両割り当て問題をSAを用いて解くための定式化の方法および試作した割り当て作成プログラムについて説明する。さらに中規模の線区における車両

割り当てに本手法を実際に適用した結果について述べる。

2 車両割り当て問題とその定式化

2.1 車両割り当て問題の概要

列車の運行計画の基本となるのは言うまでもなく列車ダイヤである。列車ダイヤが決まると車両の運行パターン(以下、基本運用という)の集合が作成される。おのおの基本運用は出発駅(多くの場合車両基地である)から終着駅(これも多くの場合車両基地である)に至る運行経路を定めたものであり、概ね、半日ないし1日単位の車両の動きを表現したのになっている。言うまでもなく、すべての基本運用によって列車ダイヤ上のすべての列車運行(営業列車だけでなく回送列車なども含む)がまかなわれなければならない。基本運用計画はダイヤ改正時に一括して作成される。

これに対して、列車の日々の運用計画(実施計画と呼ぶ)は上で述べた基本運用に対して個々の車両を割り当てることによって行なわれる。

各基本運用は丸1日にわたるのものもあれば、半日以下の短いものもある。したがって、ある特定の日に試してみると同一の車両が複数の基本運用に割り当てられることもある。

SAのような逐次改善型のアプローチを取る場合には対象となる問題において、局所最適解に陥る可能性がどの程度あるか、という点についてはおおまかに把握しておく必要がある。

局所最適解に捕らわれる可能性が小さい問題では、単純な(SAと異なり、評価関数の改善する方向へのみ遷移する)逐次改善アルゴリズムを繰り返し適用し、得られた解の中から最善のものを選択する方が実行時間の面で有利な場合が出てくる。一方、逆に単純な逐次改善がほとんど効果を持たないような問題に対してはSAのもたらす効果もあまり期待できないと考えられる。

我々が実際に、車両割り当て問題に対してこのような単純な逐次改善法を適用した結果、50回の試行のうち、実行可能解が得られたのは12回で、残りの38回では実行可能解に到達することができなかった。すなわ

ち5回に1回程度の成功率ということになり、単純な逐次改善でも一定の効果はあることが確認された。しかし、実行可能解が得られた場合の解の質に関してはばらつきが大きく、単純な逐次改善法では安定的に良質の解を求めるためにはかなりの数の試行が必要となることもわかった。

2.2 制約条件と評価尺度

車両割り当て問題において考慮すべき制約条件を以下に示す。

1. 基本運用の接続に関する物理的制約

車両 A_i が割り当てられている基本運用の連続した系列を $X_j (j = 1, 2, \dots, n)$ とすると、任意の $j (< n)$ に対して

- 到着駅 $(X_j) =$ 出発駅 (X_{j+1})
- 到着時刻 $(X_j) <$ 出発時刻 (X_{j+1})

が成り立つ。

2. 検査に関する制約

検査は、詳細検査と簡易検査に分けられる。詳細検査は走行キロ数や走行日数などに基づいて数カ月に1回、ほぼ1日かけて行なう本格的な検査であり、簡易検査は、3日に1度、約1時間程度かけて行なう簡単な検査である。この他、工場に一定期間入って修理、改造などを行なう場合もあり、当然のことながら、工場入場期間の当該車両を基本運用へ割り当てることはできない。

検査に関する制約条件の例を以下に示す。

任意の車両に対して

- 3日に一度は簡易検査が可能な基本運用に割り当てられる。
- 90日に一度は詳細検査が可能な基本運用に割り当てられる。

X月M日からY月N日の間に工場へ入場する予定が組まれている車両に対して、

- X月M日～Y月N日間は車両Aは使用できない。また、X月M日の前日にAが割り当てられる基本運用は工場への回送運用でなくてはならない。さらにY月N日の翌日にAが割り当てられる基本運用は工場から車両基地への回送運用となる。

3. 車種に関する制約

対象となる線区によっては特定の基本運用に充当できる車両に制限のあることも多い(例: 東海道新幹線)。今回の研究で対象とした線区では車種に関する制約がたまたま存在しなかったので任意の車両が任意の基本運用に充当できるということを前提にした。

一方、車両割り当ての評価尺度としては、次のようなものが一般的である。

- 検査の周期が規定の値を上回らない範囲でどれだけ規定の値に近い。
- 各車両の走行キロがどの程度平均化しているか。

前者は車両の運用効率や必要な作業量に直接影響するので特に重要である。

2.3 車両割り当て問題のSAによる定式化

2.3.1 解の表現

各車両とそれらに割り当てられる基本運用の系列を表した図1のような行列を使って車両割り当て問題の解を表現する。 A_1, A_2, \dots は車両を表し、行列の各要素は当該車両がある日に割り当てられている基本運用(のID)を表している。各基本運用は丸1日にわたるものもあれば、半日以下の短いものもある。したがって、ある特定の日についてみると同一の車両が複数の基本運用に割り当てられることもあるため、行列の各要素は基本運用の列となる。図の例では、車両 A_3 は、1日には第1運用に、2日には第5運用と第6運用に連続して割り当てられている。

また、状態遷移の可能な解の条件を

車両	1日	2日	3日	4日	5日
A_1	(2,3)	(8)	(4)	(1)	(5,6)
A_2	(4)	(1)	(5,3)	(8)	(4)
A_3	(1)	(5,6)	(1)	(7)	(2,3)
A_4	(8)	(4)	(9)	(5,6)	(9)
A_5	(7)	(2,3)	(8)	(4)	(1)
A_6	(5,6)	(9)	(7)	(2,3)	(8)
A_7	(9)	(7)	(2,6)	(9)	(7)

図1: 車両割り当ての行列表現

- 基本運用の接続に関する物理的制約を満足するもの

とした。これにより、あらゆる状態における解が物理的条件を充足していることは常に保証されることになる。

2.3.2 状態遷移の方法

解相互間の状態遷移は、与えられた車両群から任意に選んだ2つの車両が、ある共通の日付に関して割り当てられている基本運用を交換することによって行なう。ある一日についてみても一つの車両が複数の基本運用に割り当てられることがあるので、二つの車両間で基本運用の列をまるごと交換する方法の他に一部の基本運用のみ、部分的に交換するという方法もある。図2は二つの車両 A_1 と A_2 が、ある日において割り当てられている基本運用の一部を交換した例を示したものである。

基本運用の交換に際しては、物理的な制約条件の充足が前提となるので、この当然、

- X_1 の到着駅(X_2 出発駅) = Y_1 の到着駅(Y_2 出発駅)
- X_1 の到着時刻 < Y_2 の出発時刻
- X_2 の到着時刻 < Y_1 の出発時刻

でなければならない。さらにまた、これらの車両の翌日以降の割り当てとの整合性も同様に確保されていなければならない。

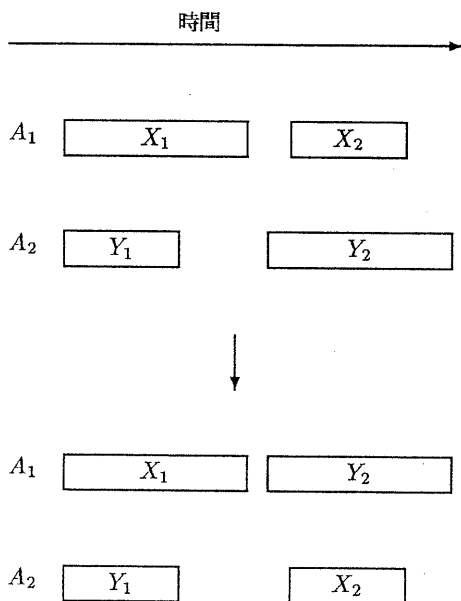


図 2: 基本運用の部分交換の例

我々は、各ステップごとに交換可能な基本運用の組合せを計算し、その中からランダムに選択することによって次の新しい解への状態遷移を行なうことにした。²

2.3.3 エネルギー関数の決め方

個々の割り当て状態に対するエネルギー値の計算に反映すべきものは、制約違反に対応したペナルティー値および与えられた評価尺度で図った割り当て計画の評価値である。

1. 車両 A_i ($i = 1, 2, \dots, m$) に関して、簡易検査が不可能な基本運用が連続して 3 日間割り当てられている箇所の個数を a_i とする (制約違反)。
2. 詳細検査の期限を過ぎても詳細検査が可能な基本運用に割り当てられていない車両の個数を b とす

²本来ならば、状態遷移の各ステップごとに交換可能な組合せを計算するのではなく、各状態遷移の結果変化のあった部分だけ修正していく方が効率が良いはずである。したがってこの部分は改善の余地が残っていると考える。

る (制約違反)。

3. 詳細検査が可能な基本運用に期限内に割り当てられている車両 A_{i_k} ($k = 1, 2, \dots, m - n_2$) に対して、規定の検査間隔の上限と実際の検査の間隔との間の差を c_k とする。

とし、エネルギー関数 E を

$$E = E_p + E_e$$

$$E_p = A \sum_{i=1}^m a_i + Bb$$

$$E_e = C \sum_{k=1}^{m-b} c_k$$

とした。

E_p は制約違反に対応するペナルティー値を、また E_e は詳細検査の周期に関する評価尺度に基づいた評価値をエネルギー値に換算したものである。A、B、C は荷重パラメータである。

なお、2.3.1で述べたように物理的制約については、SA によって遷移不可能な解もその充足が保証されているのでエネルギー関数に反映させる必要はない。

本来ならば、各車両の走行キロの平均化の程度 (走行キロの標準偏差) もエネルギー関数に反映させるべきであるが、今回はあえてそのようにはしなかった。

これは、

- 評価基準としては、検査の条件などのように作業の回数や車両の運用効率に直接的に影響するものではなく、優先度が相対的に低い。
- エネルギー関数への反映を行なわなくても、SA における探索のランダム性により走行キロの偏りがかなりの程度解消される可能性がある。

という判断をしたからである。実際に、このような方法でどの程度走行キロの平均化がされたかは、3.2で述べる。

2.3.4 初期解の決定方法

SA を適用するための初期解としては物理的制約と検査条件の一部を充足した割り当て問題の半実行可能解を用いた。

一般に、基本運用にはアブリアリに定められた順番があって、その順番にしたがって車両を割り当てることによって上のような半実行可能解が得られるようになっている(と言うより、そのような半実行可能解が簡単に得られるように基本運用とその適用順序を定めると言ったが正確である)。

実際には休日、平日の並び方に応じて微調整が必要になるので休平日のパターンごと基本運用の遷移パターンの表(以下、「運用遷移表」と言う)を作っている。このような「運用遷移表」は、基本運用自体の作成の際に合わせて作成される。

一般に、初期解の質がSAの挙動に大きく影響する可能性があると言われている。初期解としてランダムに作成された解よりも質の良い解(Better-Than-Random Starting Solutions)を使用することによって、得られる解の質の向上と実行時間の削減ができる可能性が指摘されている(たとえば、[6])。ただし、これは、「良い」初期解の持つ性質に大きく依存しており、いわゆる「良い」初期解がランダムな初期解に対して十分な優位性を発揮できない場合もあることも合わせて指摘されている。

車両割り当ての場合、人間の専門家も「運用遷移表」をベースにして月単位の割り当て計画を作成しており、実際に2.3.2で述べたような基本運用の交換を繰り返すことによって最終的な実施可能な割り当てを作成している。そして、このようにして得られた最終的な実施可能割り当ては最初の解の骨格をかなり残したものになっている。

したがって、「運用遷移表」に基づいた初期解の部分改良の繰り返しによって良い解が発見できることが十分期待できると考えた。

2.3.5 温度スケジューリングの方法

Annealingのアルゴリズムは良く知られたMetropolisの方法[1]に基づいている。すなわち、現在の状態Sからランダムに選ばれた次の状態の候補をS'、おのこの状態に対応したエネルギー値をそれぞれE(S)、E(S')とした場合のS'の受理確率Pは、 $\delta = E(S') - E(S)$ とすれば、

$$1. \delta < 0 \text{ ならば } P = 1$$

$$2. \delta > 0 \text{ ならば } p = e^{-\delta/T}$$

となる(Tは温度パラメータ)。

一方、温度スケジューリングの方法についてはさまざまな方法が考えられる([7])。

今回、温度パラメータの変更方法として、以下の2つの方法を試みた。

- 温度の更新回数に反比例して下げる。

$$T = T_0/i$$

T_0 : 初期温度

i : 温度の更新回数

- 一定比率(1/2)で下げる。

$$T' = T/2$$

また、各温度における投動の回数については温度に依らない定数とした。

3 実験結果とその評価

3.1 適用した事例

対象とした問題は、

- 車両(編成)数:31
- 基本運用数が、平日の場合:48、休日の場合:46

であり、一度に1カ月分の割り当てを一括して作成するものとした。車両割り当て問題としては、中規模程度の問題と言える。また、車種によって割り当てられる基本運用が制限されることはないものとした。また、どの基本運用も割り当てられず、車両基地で予備車両として待機している車両が毎日数車両あるが、便宜上、これらの車両は「予備*i*」($i=1,2,\dots$)という基本運用に割り当てられているものとみなして処理した。

3.2 結果

ランダムに作成された例題を、SAを用いて解いた結果を示す。なお、プログラムの実装はSunSparcStation2上のKCLを用いて行なった。

温度を一定比率(1/2)で下げる方法では、4～5時間程度の実行では、実行可能解すら求まらないことが多く、より多くの計算時間を費やしたにもかかわらず、単純な逐次改善法と同程度の結果しか得られなかった。

温度の更新回数に反比例して下げる方法では比較的稳定して、かなり良質の解が得られた。表1に試行結果の一部を示す。いずれの場合も3時間程度の実行で充足されるべき制約はすべて充足されており($E_p = 0$)、 E_e も十分低い値まで低下しており、実用に耐え得る結果が得られた。また、16時間以上の実行では、まったく申し分のない結果になった。

一般的に、実行時間が長過ぎるきらいはあるが、これは実装したプログラム自体、実行効率に対する配慮が十分されたものではないこと、また各種パラメータの設定に関してもチューニングが不十分であることなどによると思われ、改善の余地は十分残されていると考える。

表 1: SA を一定時間実行した後のエネルギー値

試行	経過時間	E_e	E_p	詳細検査の周期の平均
1	3h	30	0	87.2
2	3h	25	0	87.7
3	3h	25	0	87.7
4	3h	21	0	88.1
5	3h	29	0	87.4
6	10h	21	0	88.0
7	16h	16	0	88.5
8	18h	17	0	88.5

3.3 専門家および他の方法との比較

車両割り当ての専門家が実際に行なったのと同じ問題を本手法を使って解いてみた結果(約3時間の実行)を図3.3に示す。

なお、参考のため、制約の優先順位に基づいて初期解の修正を行なうプログラム³を独立に実装し、あわせ

³より優先順位の高い制約から順に充足していき、矛盾の解消が不可能になった時点でバックトラックを行なう方法。

表 2: SA 法による解と専門家による解の比較

	SA	専門家	優先順位割当
詳細検査周期平均	88.0	87.6	87.3
走行キロ標準偏差	1066	1520	1970

て比較してみた(なおこのプログラムはCESPを用いて実装した)。

これを見ると、SAによる解も優先順位割り当てによる解も詳細検査周期という評価基準ではほぼ同等の質であると言える。走行キロの平均化については、SAによるものが他の2者に比べてかなり良い点が注目される。これは、SAによる探索のランダム性に基づく副産物であると考えられる。優先順位割り当ての場合、走行キロの平均化のためのノウハウが考慮されていないため、かなり悪い結果になってしまっている。

4 まとめ

本報告では、SAを用いて車両割り当て問題を解く方法を示した。車両割り当て問題は、ある程度の「良い」初期解を得るための方法が確立していること、また、その初期解からの逐次改善を行なうことによって良質の解が得られる可能性が高いことなどにより、SAの適用に向けたタイプの問題であると考えた。

我々は実際にSAに基づいた車両割り当て作成プログラムを実装し、中規模の例題に対して適用してみた。実験の結果、温度スケジューリングの方法やパラメータの調整に多少難渋したもの、最終的には、専門家と比べても遜色ない結果が得られた。

また、SAによる探索のランダム性により、車両の走行キロの平均化が(評価項目としてSAのエネルギー関数に反映させなかったにもかかわらず)容易に達成されるという副次的効果も確認された。

また本稿で述べた「良い」初期解がSAの挙動に対して与える効果については(ランダムな初期状態との比較を含め)十分な評価が今回はできなかった。今後の課題としたい。

参考文献

- [1] Metropolis 他、"Equation of State Calculations by Fast Computing Machines", Chem. Phys. 21,1953
- [2] Kirkpatrick,S 他、"Optimization by Simulated Annealing",Science, Vol.220,1983
- [3] 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、昭和59年
- [4] Huang,M.D. 他、"An Efficient General Cooling Schedule for Simulated Annealing", Proc. IEEE Int. Conf. on CAD (ICCAD 86)
- [5] 安部、他、「最適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 107 巻10号、昭和62年
- [6] David S. Johnson 他、"Optimization by Simulated Annealing: An Experimental Evaluation; PART1, Graph Partitioning",Operations Research Vol.37,No.6,1989
- [7] 喜多一、「Hopfield 型ニューラルネットワークとシミュレーテッドアニーリング」、人工知能学会誌、Vol.7 No.6、1992年
- [8] 青柳他、「車両運用計画エキスパートシステムの開発」、第44回情報処理学会全国大会講演論文集、1992年
- [9] 土屋、他、「計画のプロトタイプの修正に基づく車両割り当て作成方式」、第46回情報処理学会全国大会講演論文集、1993年
- [10] 西岡他、「制約伝播を利用した再スケジューリング手法」、1992年度人工知能学会全国大会(第6回)論文集
- [11] Peter J. M. Van Laarhoven,他、"Job Shop Scheduling by Simulated Annealing, Operations Research Vol.40,No.1,1992