

車両基地における整備作業ダイヤの自動作成手法

加藤 怜* 小久保 達也** 中東 太一**

Automatic Generation of Maintenance Worker Scheduling at Rolling Stock Depot

Satoshi KATO Tatsuya KOKUBO Taichi NAKAHIGASHI

This paper proposes an automated scheduling method for maintenance worker at rolling stock depots. Maintenance worker schedules at rolling stock depots are daily plans assigned to teams of maintenance worker for tasks such as cleaning rolling stock and performing inspection during turnaround operations of superior trains. The effectiveness of the proposed method is evaluated by comparing the schedules it generated with actual schedules, and those generated by a mathematical programming method, and a local search method. The results indicate that the proposed method generates maintenance worker schedules that satisfy high priority relaxable constraints within a practical computation time.

キーワード：整備作業ダイヤ，車両基地，車両運用，組合せ最適化問題，タブーサーチ

1. はじめに

新幹線や特急列車等の優等列車は，列車の終着後に折返し駅や車両基地で清掃や点検等の整備作業を実施する必要がある。整備作業は各列車に対し，数人から数十人のグループ（以下，「班」）単位で実施しているが，各日に各班が整備作業を実施する列車は，折返し駅や車両基地で作成する「整備作業ダイヤ」によってあらかじめ決められている。また，臨時列車等により日々列車ダイヤや車両運用が異なるため，整備作業ダイヤも各日分について作成する必要がある。

現在，整備作業ダイヤは熟練の計画担当者が手作業で作成している。しかし，整備作業間の移動時間を確保する，各班の作業本数などの公平性を確保する，など考慮すべき制約条件や評価指標が多岐にわたるため，1日分の計画作成に数時間を要している。加えて，各日分について作成する必要があるため，計画担当者にとって大きな業務負担となっている。そのため，情報技術を活用した整備作業ダイヤの自動作成により，計画作成業務の省力化や脱技能化が求められている。

車両基地における整備作業ダイヤの自動作成に類似する問題として，複数人かつ時間枠付きの巡回セールスマン問題^{1) 2)}が挙げられる。しかし，巡回セールスマン問題では評価指標がセールスマンの総移動距離であるのに対し，整備作業ダイヤでは班間の公平性を確保する，連続して作業した際の休憩時間を考慮するなど，特有の条件を考慮する必要がある。また，鉄道の乗務員スケジューリング問題³⁾も同種の問題と考えられるが，この問題では各乗務員の勤務時間が担当する列車に応じて決まり，その上限時間が既定されるのに対し，整備作業ダイヤでは各班の勤務時間は固定である。このように問題の前提条件が異なっている。一方で，筆者らは，メタヒューリスティクス⁴⁾の1つであるタブーサーチ^{5) 6)}を活用し，折返し駅を対象とした整備作業ダイヤの自動作成手法を提案している^{7) 8)}。しかし，折返し駅では各整備作業や休憩の時間帯は所与であるのに対し，車両基地ではこれらの時間帯は固定されておらず，必要時間のみ与えられている。よって，折返し駅と比べ決定事項が多く，より複雑な組合せ最適化問題⁴⁾となる。

本研究では，折返し駅での自動作成手法を応用し，車両基地を対象としたタブーサーチに基づく自動作

* 信号技術研究部 運転システム研究室

** 元 信号技術研究部 運転システム研究室

成手法を提案する⁹⁾。短時間での計算を可能とするため、各班が実施する整備作業と順序を決定する問題と、各班の作業時間や休憩時間を決定する問題に分解して効率的に求解する手法を構築する。さらに、実在の車両基地における複数日の列車ダイヤ、車両運用のデータを用いたケーススタディを実施し、提案手法の有効性を検証する。

2. 車両基地における整備作業ダイヤ

本章では、車両基地の整備作業ダイヤ作成について説明する。車両基地には複数の「庫」があり、各庫は複数の「番線」から構成されている。いずれかの番線で整備作業（以下、単に「作業」と表記）を実施するが、作業を実施する必要がある列車および番線は所与である。また、車両基地への入区時刻および出区時刻に基づき、作業可能な時間帯を意味する「作業可能時間枠」が所与であり、作業内容に応じて作業に必要な時間も決まっている。

一方、実際に作業を実施する整備スタッフは班単位で各日の勤務が決まっている。勤務の詳細や考慮すべき事柄を以下に示す。

- ・ 各班は勤務時間に応じて、いずれかの「組群」に属する。組群は、早番、遅番などで分類される。
- ・ 各班の「始業時刻」および「終業時刻」、会議等の「所定外業務」の時間帯は所与であり、変更はできない。
- ・ 始業後および終業前には、既定の「始業準備時間」、「終業準備時間」を確保する必要がある。
- ・ 「休憩」は、班ごとに取得しなければならない回数、各回で取得の必要がある時間は所与であるが、時間帯については決まっていない。代わりに、「目標開始時刻」が与えられており、なるべくこの時刻に近い時刻に休憩を開始することが望ましい。
- ・ 所定外業務および休憩の前後には、既定の「中断準備時間」、「再開準備時間」を確保する必要がある。
- ・ 2つの作業間で作業番線が変更になる場合には、既定の「番線移動時間」を確保する必要がある。特に作業間で庫が異なる場合には「庫間移動」が必要となり、庫内の移動より大きな移動時間が必要となる。
- ・ 各班には所定の庫である「基本庫」が定められており、庫間移動は最小限とし基本庫の作業を実施するのが基本である。
- ・ 作業間で十分な間合い時間がない作業を一定回数繰り返した場合は「連続作業」とみなされ、連続作業後には既定の「加算時間」を確保する必要がある。
- ・ 施行日により一定時間「き電停止」が実施される場合があり、き電停止時間内に作業を開始できない。

図1、図2には整備作業ダイヤ作成の入力データの例として、それぞれ作業、班の情報を示している。この車両基地は2つの庫から構成され、それぞれ1, 2番線, 3, 4番線が配置されている。図1には各番線の使用状況として、作業の対象となる各列車の作業可能時間枠が示されており、また各列車の作業時間が括弧内に示されている。整備スタッフは、2つの組群に分かれ、それぞれ1, 2班, 3, 4班が配置されている。図2には各班の勤務時間として、出退勤時刻および前後の始業準備時間を示している。また、2, 3班にはそれぞれ所定外業務が入っており、この時間帯に作業をすることはできない。休憩については各班に対し目標開始時刻および必要時間が与えられている。

図3には、図1、図2の入力データから作成した整備作業ダイヤの例を示す。各班について、作業を実施する列車および時間帯が示されており、作業間には必要に応じて番線移動時間および加算時間が確保され

ている。また、休憩は各班で目標開始時刻に近い時刻から取得しており、休憩および所定外業務の前後には中断・再開準備時間が設けられている。このように、各班の勤務時間等の諸条件を考慮したうえで、対象となる全作業に対していずれかの班を割り当てるように、整備作業ダイヤは作成される。

庫	番線	7:00	10:00	13:00	16:00	19:00
1	1		2M(60)	5M(90)	10M(90)	14M(90)
	2		1M(90)	6M(60)	9M(60)	13M(60)
2	3		3M(60)	7M(60)	11M(90)	
	4		4M(90)	8M(60)	12M(60)	15M(90)

対象列車・作業可能時間枠
括弧内は作業時間

図1 入力データの例(作業)

組群	班	7:00	10:00	13:00	16:00	19:00
1	1	始		60	終	
	2	始		所	60	終
2	3		始		60	所
	4		始		60	終

出退勤時刻
休憩目標開始時刻
数値は必要時間
所 所定外業務
始 終 始業・終業準備時間

図2 入力データの例(班)

組群	班	7:00	10:00	13:00	16:00	19:00
1	1	始	1M	番	3M	中
	2	始	2M	番	4M	中
2	3		始	5M	番	7M
	4		始	6M	番	8M

1M 整備作業
番 加 番線移動・加算時間
休 休憩
中 再 中断・再開準備時間

図3 図1, 図2の入力データから作成した整備作業ダイヤの例

3. 問題定義

本章では、本研究が想定する整備作業ダイヤ作成の問題定義として、制約条件および評価指標、また自動作成に対する実用上の要件を示す。

3.1 制約条件

本研究では、以下の制約条件を設定する。

- ① 作業割当制約
対象の全作業に、いずれか1班を割り当てる。
- ② 庫間移動回数制約
各班は、庫間移動を既定回数内とする必要がある。
- ③ 基本庫一致制約
各班は、基本庫の作業に割り当てる。
- ④ 作業本数上限制約
各班は、既定の作業本数上限を超えないようにする。
- ⑤ 全班作業本数差制約
ある班と別の班の作業本数差は、既定の上限を超えないようにする。
- ⑥ 組群間作業本数差制約

ある組群に属する班と別の組群に属する班の作業本数差は、既定の下限以上とする。たとえば、早番は遅番より必ず作業本数が多くなるようにする、などの条件として設定される。

⑦ き電停止時間制約

き電停止実施日では、き電停止時間内で作業を開始することはできない。また、き電停止時間内に作業を終了した場合は、き電停止時間終了後に、既定の確認時間を確保する必要がある。そのため、き電停止時間内に終業となる班は、き電停止時間開始前に全作業を終了する必要がある。

⑧ 休憩時間制約

各班は、既定の休憩時間を取得する必要がある。休憩は複数回にわたることがあり、その場合各班の取得回数および各回の取得時間は所与である。

⑨ 番線移動時間制約

2つの作業間では、既定の番線移動時間を確保する必要がある。なお、作業間で庫間移動となる場合は、庫内の移動と比べて多くの移動時間が必要となる。

⑩ 始業準備時間制約

各班の始業後には、既定の始業準備時間を確保する必要がある。

⑪ 終業準備時間制約

各班の終業前には、既定の終業準備時間を確保する必要がある。

⑫ 中断準備時間制約

各班の休憩、所定外業務の前には、既定の中断準備時間を確保する必要がある。

⑬ 再開準備時間制約

各班の休憩、所定外業務後には、既定の再開準備時間を確保する必要がある。

⑭ 連続作業時間制約

連続作業が発生した場合は、その後に既定の加算時間を確保する必要がある。

上記の制約条件には、なるべく充足しなければならない優先度が高い制約条件と、やむを得ない場合は違反が許容される優先度が低い制約条件がある。具体的には、条件①、②、④～⑨は優先度が高く、その他は優先度が低い。

3.2 評価指標

本研究で設定する評価指標は以下の4項目である。

- (1) 各班の作業本数差をなるべく少なくする（作業本数の分散を小さくする）
- (2) 番線移動時間をなるべく少なくする
- (3) 連続作業に伴う加算時間をなるべく少なくする
- (4) 休憩開始時刻の目標開始時刻からの差分（以下、「休憩乖離時間」）をなるべく少なくする

3.3 自動作成の要件

計画担当者にヒアリング調査を行い、以下に示す自動作成に対する要件を抽出した。

- ・ 安定して3分以内で計算できること
- ・ 同一の入力に対し同一の結果を出力できること（すなわち、乱数の使用は不可）
- ・ 制約条件の優先度を考慮できること

自動作成手法の構築にあたっては、制約条件や評価指標の考慮に加えて、上記の要件を満たすことが求められる。

4. 整備作業ダイヤの自動作成手法

4.1 自動作成手法の概要

車両基地の整備作業ダイヤの作成は、大規模な組合せ最適化問題とみなすことができる。組合せ最適化問題の解法としては、最適解を算出可能な整数計画法⁴⁾、短時間で良質な解を算出可能なメタヒューリスティクスなどがある。本研究では、3.3節で述べた実用上の要件を踏まえ、メタヒューリスティクスの一つであるタブーサーチを適用した手法を提案する。

タブーサーチは、組合せ最適化問題を効率的に求解する手法として、1989年にFred Gloverによって提案された手法である^{5) 6)}。局所探索法(Local Search, 以下「LS」)にタブーリストを追加することにより、それまでの最良解より改悪でも移動することを可能にし、多峰性のある目的関数でも短時間で求解することができる。最適解を得られる保証はないが、一般的に大規模な問題に対し短時間に良質な解を得ることが可能であり、多くの分野で幅広く適用有効性が確認されている手法である⁶⁾。

文献7, 8では、折返し駅を対象とし、タブーサーチを適用した自動作成手法を提案しているが、折返し駅では各番線の停車時間が限られているため、各作業の実施時間帯は固定であり、各班が実施する作業を決めると実施順序が一意に定まった。また、休憩時間帯も所与であった。しかし、車両基地では長時間の留置もあり、作業可能時間枠が与えられるため、作業割りだけでは順序は定まらず、実施時間帯も決定対象となる。また、休憩時間帯も決める必要がある。そこで、各班の作業および順序を決める問題と、作業時間帯および休憩時間帯を決める問題に分解する手法を提案する⁹⁾。

以下、本研究が提案する自動作成手法の適用手順を示す。

Step 1: 「初期割り当て法」により、初期の各班に対する作業割り当て計画を生成する。

Step 2: 「時間調整法」により、Step 1で得た計画における、各班の各作業および休憩の実施時間帯を決定する。目的関数値を計算し、暫定解とする。探索回数 $I = 1$ とする。

Step 3: 暫定解をもとに、「近傍解候補生成法」により複数の近傍解を生成する。ただし、変更する作業がタブーリストに含まれる場合は、近傍解として生成しない。

Step 4: 時間調整法により、Step 3で得た各近傍解における各作業、休憩の実施時間帯を決定し、目的関数値を計算する。

Step 5: 近傍解の中で、目的関数値が最も低い解を選択し、暫定解とする。選択した近傍解によって変更された作業をタブーリストに入れる。

Step 6: I が事前に設定した反復回数上限 I_{\max} に達した、あるいは計算時間上限に達したならば、現在の暫定解を出力し処理を終了する。さもなければ、 $I = I + 1$ とし、Step 3に戻る。

以上のうち、初期割り当て法および近傍解候補生成法が各班の作業および順序を決める問題、時間調整法が作業時間帯および休憩時間帯を決める問題に対する解法に相当する。

目的関数値は、以下の式(1)で計算する。

$$\sum_{m=1}^4 \alpha_m t_m + \sum_{n=1}^{14} \beta_n p_n \quad (1)$$

式(1)の $t_m (m = 1, \dots, 4)$ は、3.3節で示した各評価指標(1)～(4)の値、 $\alpha_m (m = 1, \dots, 4)$ は各項に対する重み係数、 $p_n (n = 1, \dots, 14)$ は、3.2節で示した制約条件①～⑭の違反ペナルティ、 $\beta_n (n = 1, \dots, 14)$ は制約条件 n の違反ペナルティに対する重み係数である。ここで、違反ペナルティは基本的には違反量とするが、制約条件⑨～⑭の時間に関する項目については、違反量の2乗の値とする。

以下では、初期割り当て法、時間調整法、近傍解候補生成法のそれぞれの詳細を述べる。

4.2 初期割り当て法

初期割り当て法では、まず各班が実施する作業およびその順序を定める。基本的な考え方は、各班が次の作業を実施可能な最早時刻を示す「現在時刻」の情報を持たせ、現在時刻が早い順に、最も早く実施が可能な作業を割り当てていく、といったものである。ここで、割り当て可能な班が複数ある場合は、基本庫であること、作業終了時刻が早い、番線移動時間が小さい、現在時刻が早い、の優先順で決定する。これは、なるべく目的関数値が低くなる可能性が高い班を優先して割り当てることを意図している。なお、加算時間は後述する時間調整法で確保するため、本処理では考慮しない。

まず、各作業に対し、以下の時刻を設定する。

- ・ 最早開始時刻：作業可能時間枠の開始時刻
- ・ 最遅開始時刻：作業可能時間枠の終了時刻から当該の作業時間を引いた時刻

初期割り当て法の処理手順を以下に示す。

Step 1-1：すべての班に対し、始業時刻に始業準備時間を加えた時刻を現在時刻と設定する。

Step 1-2：全ての作業から、未割当かつ最も最早開始時刻の早い作業を選択する。

Step 1-3：全ての班の中から、Step 1-2 で選択した作業を実施可能な班を抽出する。ここで、実施可能な班とは、現在時刻が、Step 1-2 で抽出した作業の最遅開始時刻より早い時刻または等しい時刻で、現在時刻に作業時間を加えた時刻が終業時刻を超えない班である。抽出した班が1班のみの場合、Step 1-8へ。抽出した班が2班以上の場合は、Step 1-4へ。

Step 1-4：Step 1-3 で抽出した班の中から、Step 1-2 で選択した作業の庫を基本庫とする班を抽出する。抽出した班が1班のみの場合、Step 1-8へ。さもなければStep 1-5へ。

Step 1-5：Step 1-4 で抽出した班の中から、Step 1-2 で選択した作業へ割り当てた場合、最も作業が早く終わる班を抽出する。抽出した班が1班のみの場合、Step 1-8へ。さもなければStep 1-6へ。

Step 1-6：Step 1-5 で抽出した班の中から、Step 1-2 で選択した作業へ割り当てた場合、最も番線移動時間が小さい班を抽出する。抽出した班が1班のみの場合、Step 1-8へ。さもなければStep 1-7へ。

Step 1-7：Step 1-6 で抽出した班の中から、現在時刻が最も早い班を抽出する。抽出した班が1班のみの場合、Step 1-8へ。さもなければ最も早く抽出した班（ソートした場合に1番目に来る班）を1班だけ抽出し、Step 1-8へ。

Step 1-8：抽出した班に、Step 1-2 で選択した作業を割り当てる。作業の開始時刻と終了時刻は、作業可能時間枠内で前詰めに設定するが、前の作業または所定外業務と重複する場合は、前の作業または所定外業務の終了時刻を開始時刻とする。開始時刻に作業時間を加えた時刻をこの班の現在時刻として更新する。未割当の作業が存在する場合はStep 1-2へ。さもなければ処理を終了する。

4.3 時間調整法

時間調整法は、先述の初期割り当て法または後述する近傍解候補生成法に続けて適用するもので、各班の各作業時間帯および休憩時間帯を定め、それにより当該の計画の目的関数値を計算できるようにする。基本的な考え方は、初期割り当て法または近傍解候補生成法により決定した各班が実施する作業および順序の情報に基づき、最初の2つの作業間に休憩時間を挿入し、各作業は作業可能時間枠内でなるべく前詰めとすることで時刻を定め、時間調整候補解とする。この作業を作業間の数だけ繰り返し、最も目的関数値が低い時間調整候補解を暫定解とする、というものである。ここで、番線移動時間、中断準備時間、再開

準備時間、加算時間は、作業時間や休憩時間が確保できない場合は、必要に応じて緩和する。

時間調整法の手順を以下に示す。

Step 2-1 : $j = 1, k = 1$ とする。

Step 2-2 : j 班の全ての作業を作業可能時間枠内で前詰めで設定する。

Step 2-3 : j 班の k 番目の作業後に休憩を取得するものとし、 k 番目の作業終了時刻を休憩開始時刻として設定する。取得すべき休憩時間を確保した上で、 $k + 1$ 番目以降の作業の開始時刻を遅らせる。このとき、 $k + 1$ 番目以降の作業が作業可能時間枠の終了時刻より遅い場合は、休憩時間を確保できる時間分だけ設定し、Step 2-8 へ。さもなければ、Step 2-4 へ。

Step 2-4 : 1 番目の作業から順に、番線移動時間を設定する。番線移動の終了時刻が、次の作業開始時刻より遅い場合は、次の作業以降の作業時間および休憩時間を番線移動時間が確保できる分だけ遅らせる。このとき、作業終了時刻が作業可能時間枠の終了時刻を過ぎる場合、き電停止時間制約を充足できない場合は、番線移動時間は確保できる時間分 (0 以上) だけ設定する。なお、休憩時間前後で庫間移動が発生している場合は、同様の処理を行う。

Step 2-5 : 休憩時間前に中断準備時間を設定する。中断準備時間終了時刻が、休憩開始時刻より遅い場合は、休憩時間と次の作業以降の作業時間および番線移動時間を中断準備時間が確保できる分だけ遅らせる。このとき、作業終了時刻が作業可能時間枠の終了時刻を過ぎる場合、き電停止時間制約を充足できない場合は、中断準備時間は確保できる時間分 (0 以上) だけ設定する。

Step 2-6 : 休憩時間後に再開準備時間を設定する。再開準備時間終了時刻が、次の作業開始時刻より遅い場合は、次の作業以降の作業時間および番線移動時間を再開準備時間が確保できる分だけ遅らせる。このとき、作業終了時刻が作業可能時間枠の終了時刻を過ぎる場合、き電停止時間制約を充足できない場合は、再開準備時間は確保できる時間分 (0 以上) だけ設定する。

Step 2-7 : 連続作業が発生する場合は、番線移動時間後に加算時間を設定する。加算時間終了時刻が、次の作業開始時刻より遅い場合は、次の作業以降の作業時間、番線移動時間、中断準備時間、休憩時間、再開準備時間を加算時間が確保できる分だけ遅らせる。このとき、作業終了時刻が作業可能時間枠の終了時刻を過ぎる場合、き電停止時間制約を充足できない場合は、加算時間は確保できる時間分 (0 以上) だけ設定する。

Step 2-8 : 決定した j 班の各作業時間および休憩時間の開始時刻、終了時刻をもとに、目的関数値を算出し、時間調整候補解とする。 k が j 班の最後の作業であれば、時間調整候補解のうち、最も目的関数値が低い解を選択する。さもなければ、 $k = k + 1$ とし、Step 2-3 へ。

Step 2-9 : j が最後の班であれば、処理を終了する。さもなければ、 $j = j + 1$ とし、Step 2-2 へ。

4.4 近傍解候補生成法

本研究では、X-Y 交換と X-0 挿入の大きく 2 つの近傍解候補生成法を提案する。X-Y 交換は、ある班の連続する X 個の作業と、他の班の交換可能な連続する Y 個の作業を入れ替える。X-0 挿入は、ある班の連続する X 個の作業を、他の班の同時間帯の始業後、終業前、2 つの作業間のいずれかに挿入する。

近傍解候補生成法の例として、暫定解の例を図 4 に示す。図 4 は、A 班、B 班の 2 つの班に割り当てられた作業とその順序を示す。図 4 の暫定解に対し、X-Y 交換の一例である 2-2 交換によって生成された近傍解候補の例を図 5 に示す。A 班の連続する 2 つの作業 (6M と 10M)、B 班の連続する 2 つの作業 (8M と 14M) を入れ替えている。同様に、X-0 挿入の一例である 1-0 挿入によって生成された近傍解候補の例を図 6 に示す。B 班の 1 つの作業 (8M) を、A 班の 2 つの作業間 (6M と 10M) に挿入している。

本研究では、近傍として、1-1 交換、2-1 交換、1-0 挿入、3-2 交換、2-2 交換、3-3 交換、2-0 挿入の 7 種類を適用する。X-Y 交換において、 $X = Y$ である場合には、作業本数は変化しないため、目的関数において評価指標 (2) ~ (4) および違反ペナルティ②, ③, ⑦~⑭の改善に寄与する可能性がある。また、 $X \neq Y$ である場合と X-0 挿入は、すべての評価指標と違反ペナルティ②~⑭の改善に寄与する可能性がある。

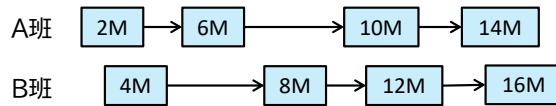


図4 暫定解の例

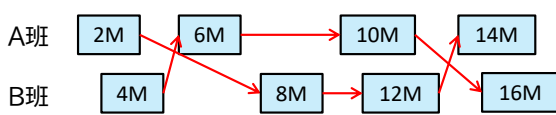


図5 2-2 交換の例

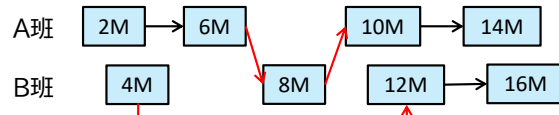


図6 1-0 挿入の例

5. 実データを用いたケーススタディ

5.1 検証方法

提案手法の有効性を検証するため、実際のデータを用いたケーススタディを行う。ここでは、実在する車両基地を対象に、実際の列車ダイヤ、車両運用を用いた異なる 10 日分のデータを用いる。表 1 にはき電停止ありの 5 日分のデータの班数、作業本数を示す。同様に、表 2 にはき電停止なしの 5 日分のデータの班数、作業本数を示す。また、目的関数の重み係数を表 3 に示す。これらの重み係数は、実運用の整備作業ダイヤの目的関数値を複数分析した結果や、制約条件の優先度を考慮し設定しているが、基本的には優先度が高い制約条件の充足を最も重視した設定としている。

検証方法としては、提案手法によって生成した整備作業ダイヤと、実運用の整備作業ダイヤ、混合整数計画法 (Mixed Integer Programming, 以下「MIP」) により生成された整備作業ダイヤ¹⁰⁾、LS により生成された整備作業ダイヤについて、評価指標や優先度が高い制約条件の違反量を比較する。ここで、LS は 4 章で述べた初期割り当て法、時間調整法、近傍解候補生成法を適用し、探索過程において全ての近傍解の目的関数値が暫定解より同等あるいは悪化した場合、探索を終了する手法とした。

実用上の要件として、3 分以内での自動作成が求められているため、すべての自動作成の計算において、3 分で打ち切りとした。計算には、CPU が Core i7-8700 (3.20GHz)、メモリ 16GB の PC を用い、MIP の求解には、数理最適化ソルバー Gurobi Optimizer 10.0.0¹¹⁾ を使用した。

表 1 検証用データ (き電停止あり)

No.	班数	作業本数
1	5	30
2	5	30
3	5	34
4	5	37
5	5	38

表 2 検証用データ (き電停止なし)

No.	班数	作業本数
6	5	38
7	5	39
8	5	39
9	5	45
10	5	48

表 3 重み係数の設定

重み係数	α_1	α_2	α_3	α_4	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}	β_{11}	β_{12}	β_{13}	β_{14}
設定値	0.85	0.025	0.1	0.025	100,000	1,000	1	1,000	100,000	10,000	10,000	1,000	1,000	1,000	1	1	1	1

5.2 結果と考察

10 日分の入力データにおいて、実運用、MIP、LS、提案手法の各手法の中で、評価指標が最もよい値を得られた日数（最良値取得日数）、優先度が高い制約条件を違反した日数を、表 4 に示す。

評価指標 (1) は各班の労働負荷の平準化、(2) ~ (4) は労働負荷の低減に関する項目であり、いずれも最良値取得日数は 10 日に近いほど望ましい。しかし、実運用、MIP、LS はいずれの指標も 10 とはなっておらず、(2) や (3) は小さい。特に MIP は最大でも (4) の 3 日となっており、他より劣っている。詳細を確認したところ、明らかに 3 分の計算時間では不足していることが判明した。MIP は厳密解を得られる保証があるものの、短時間での求解には適しておらず、本問題でもその特徴が表れている。一方で、提案手法ではいずれの評価指標も最良値取得日数が大きく、特に (3) は 10 となっている。よって、提案手法では実運用、MIP、LS と比較し、労働負荷の平準化、低減の観点で望ましい整備作業ダイヤを得られていることが確認できる。

また、優先度が高い制約条件の違反日数は 0 日に近いほど望ましいが、実運用、MIP、LS はいくつかの制約条件で違反が発生している。一方で、提案手法ではすべてで 0 となっており、優先度が高い制約条件を違反していないことを確認できる。優先度が高い制約条件の違反量の観点でも、提案手法は他の手法より優れているといえる。

以上より、提案手法は、3 分以内で、実用面で重要な優先度が高い制約条件を充足し、かつ整備スタッフの労働負荷を平準化および低減した結果を出力可能であることを確認した。したがって、提案手法は本問題に対して有効であるといえる。

表 4 各手法の「評価指標の最良値取得日数」と「優先度が高い制約条件の違反日数」の比較

手法	評価指標				優先度が高い制約条件								
	(1)	(2)	(3)	(4)	①	②	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	
実運用	9	0	1	5	0	0	3	7	0	0	0	1	
MIP	1	0	0	3	0	0	0	0	2	0	1	1	
LS	9	2	1	6	0	0	1	0	1	0	0	0	
提案手法	9	9	10	6	0	0	0	0	0	0	0	0	

6. まとめ

本稿では、車両基地の整備作業ダイヤに焦点を当てて、計画担当者の省力化や脱技能化を目的とした自動作成手法を提案した。車両基地の整備作業ダイヤでは、折返し駅と比較し、作業順序、作業時間帯、および休憩時間帯を決める必要があり、決定事項が多くより複雑な組合せ最適化問題となる。そこで、折返し駅での自動作成手法と同様のタブーサーチを採用しながらも、短時間での作成を可能とするため、各班の作業と順序の決定と作業時間帯および休憩時間帯の決定の 2 つに分解した手法を提案した。実在する車両基地を対象に、実際の 10 日分のデータによりケーススタディを実施したところ、3 分間の計算時間で、実運用や MIP、LS と比べ、評価指標がよく優先度が高い制約条件の違反がない、実用的な整備作業ダイヤを作成できることを確認した。

今後は、事前の計画作成だけではなく、施行日当日のダイヤ乱れに伴う整備作業ダイヤの再作成に焦点を当てた研究開発も進める予定である。

文 献

- 1) Stieber, A., Fügenschuh, A., “Dealing with time in the multiple traveling salespersons problem with moving targets,” Central European Journal of Operations Research, Vol.30, pp.991–1017, 2020.
- 2) Zhang, R., Zhang, C., Cao, Z., Song, W., Tan, P.S., Zhang, J., Wen, B., Dauwels, J., “Learning to solve multiple-TSP with time window and rejections via deep reinforcement learning,” IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.24, pp.1325–1336, 2022.
- 3) 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，エヌ・ティー・エス，2005
- 4) 梅谷俊治：しっかり学ぶ数理最適化ーモデルからアルゴリズムまでー，講談社，2020
- 5) F. Glover, “Tabu search: Part I,” ORSA Journal on Computing, Vol.1, No.3, 1989.
- 6) F. Glover, “Tabu search: Part II,” ORSA Journal on Computing, Vol.2, No.1, 1990.
- 7) 小久保達也，加藤怜，中東太一：タブーサーチを用いた整備作業ダイヤの自動作成手法の開発，鉄道総研報告，Vol.37，No.12，pp.27-33，2023
- 8) 小久保達也，加藤怜，中東太一，福山良和：タブーサーチによる鉄道主要駅の整備作業ダイヤ自動作成手法の提案，電気学会論文誌 D，Vol.144，No.10，pp.721-731，2024
- 9) 小久保達也，加藤怜，中東太一，福山良和：タブーサーチを用いた車両基地の整備作業ダイヤ自動作成手法の提案，電気学会論文誌 D，Vol.145，No.3，pp.159-172，2025
- 10) 加藤怜，小久保達也，中東太一：車両基地向け整備作業ダイヤ作成に対する混合整数計画法の適用，電気学会研究会資料，ITS-23-032/TER-23-099，2023
- 11) Gurobi Optimizer：https://www.gurobi.com/jp/products/gurobi/（参照日：2025年9月24日）