

S2-2-7 MTT最適運用計画作成モデルへの重み付き制約充足アルゴリズムの適用

[土] ○ 川口 昭人 (鉄道総研) [土] 三和 雅史 (鉄道総研)

Application of Weighted Constraint Satisfaction Algorithm to the Optimal Operation Scheduling Model of Heavy Tamping Machine

Akihito KAWAGUCHI (RTRI), Masashi MIWA (RTRI)

To determine an effective track maintenance schedule with heavy tamping machine, we developed a mathematical programming model by applying OR technology. However, we can not obtain the optimal solution of the model in the case that several constraint conflict in the model. Therefore, we investigated applying the Weighted Constraint Satisfaction Problem (WCSP) technique to our model in order to obtain a tentative solution of every type of problem. Then we evaluated the quality of the solution in terms of possibility of execution.

キーワード: MTT, 運用計画, 最適化, 制約充足問題

Key Words: Heavy Tamping Machine, Operation Scheduling, Optimization Techniques, Constraint Satisfaction Problems

1 はじめに

筆者らはMTTの効率的な運用計画を策定するための手法としてオペレーションズ・リサーチ (以下、「OR」) 技術を応用した数理計画モデルを提案している¹⁾。これは、将来の軌道狂いを予測し、適切な時期に適切な箇所へ効率良くMTTによる保守を投入し、良好な軌道状態を維持しようとするものである。本モデルを適用することで、MTT運用上あるいは軌道保守上の様々な制約を満足する計画を作成できることが望ましいが、制約同士が競合した場合等には解が得られないケースがある。そのような場合の対処として制約条件を見直す必要があるが、解が得られない原因となっている制約を瞬時に判断することができないために、操作性が良いとは言えない面がある。一方、ORの分野ではこのような過制約の問題を扱うアプローチとして、重み付き制約充足問題 (Weighted Constraint Satisfaction Problem 以下、「WCSP」) に基づいて求解を試みる方法が研究されている²⁾。WCSPでは、各制約が違反された場合のコストを表す重みが定義され、違反する制約の重みの和を最小化する解が求められることから、制約式を全て満たす解が存在しない場合でもできるだけ制約を満たす解を得ることができる。

本研究では、筆者らが提案しているMTT最適運用計画作成モデル (以下、「計画モデル」¹⁾) において、制約同士が競合する等の理由により最適解が存在しない場合に、暫定解を算出することを目的として、WCSPの適用可能性について検討した結果を報告する。

2 MTT最適運用計画作成モデルの概要

モデルによる計画の作成手順を図1に示す。線区や保守

基地のレイアウト、軌道狂い推移データや保守実施上の制約条件等を入力データとし、「保守箇所選定モデル」と「保守計画作成モデル」の2つの数理計画モデルを用いて保守計画を作成する。本モデルでは計画対象線区をロットとブロックという計画・管理単位に分割して、軌道狂い推移の予測と保守時期の検討を行う。ロットは軌道狂い管理単位、予測単位で100m区間とする。ブロックは保守作業単位でN個の連続するロットの集合とする。このNの値については各線区の実態を考慮して、ブロック長がおおむね1回あたりのMTT作業延長とする。「保守箇所選定モデル」では、ロットからブロックを選定する。ブロックは軌道状態が悪いロットを多く含むように作成される。そして、「保守計画作成モデル」により選定されたブロックに対してスケジューリングを行い、MTTの各保守基地への配備時期と配備時に保守するブロックを期 (10日) 単位で出力する。「保守計画作成モデル」における集合、変数、主な制約および目的関数を以下に記す。

・集合

- | | |
|--------|------------------------------------|
| ① 期 | $K = \{1, 2, 3, \dots, K_{\max}\}$ |
| ② 基地 | $D = \{1, 2, 3, \dots, D_{\max}\}$ |
| ③ ブロック | $B = \{1, 2, 3, \dots, B_{\max}\}$ |
| ④ 線区 | $L = \{1, 2, 3, \dots, L_{\max}\}$ |

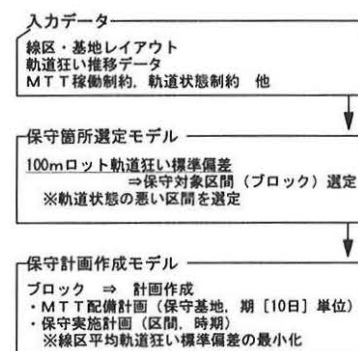


図1 計画作成の手順

- ① Z_{kd} 0-1 型 $k \in K_{\max}, d \in D_{\max}$
 $=1$ 期 k に基地 d に MTT を配備する
 $=0$ " しない
- ② w_{kb} 0-1 型 $k \in K_{\max}, b \in B_{\max}$
 $=1$ 期 k にブロック b を保守する
 $=0$ " しない
- ③ x_{kdl} 整数型 $k \in K_{\max}, d \in D_{\max}, l \in L^d$
 $L^d: \{\text{基地 } d \text{ の保守エリアに含まれる線区集合}\}$
 $=n$ 期 k に基地 d に MTT が配備されたとき、線区 l に保守日数を n 日割り当てる

・主な制約条件

- ① ブロック別保守回数上限制約
各ブロックへの保守は計画期間中に最大1回とする。
- ② 期別選定可能保守基地制約
MTTは期単位で保守基地のいずれかに配備可能とする。
- ③ 期別MTT移動論理制約
各ブロックは、そのブロックを保守可能な保守基地にMTTが配備された期にのみ保守が可能とする。
- ④ 期間MTT移動可能範囲制約
連続する期におけるMTTの移動可能範囲を基地別に設定し、長距離のMTT回送を生じさせない。
- ⑤ 保守時期上限制約
計画期間中に、いずれのロットも整備目標値を超過させない。
- ⑥ MTT配備時期指定制約
特定の期あるいは期間にMTTを配備する保守基地や保守基地群を指定する場合に考慮する。
- ⑦ 期別保守可能日数上限制約
各期の保守可能日数の上限を設定する。

- ・ 目的関数

Minimize 対象線区全体の計画期間中における平均軌道状態： q

3 重み付き制約充足アルゴリズムの適用と評価

3.1 WCSP の適用

WCSP では、実行可能解の存在しない数理計画問題を、制約違反最小化問題として扱う。すなわち、目的関数を制約違反度を表すペナルティ関数に置き換え、これを最小化する。このとき、制約間の重要度の違いを考慮するため、各制約はペナルティ重みを持つものとし、この値の大小により違反のしやすさを制御することが可能である。また、WCSP においては原問題の目的関数も制約の 1 つとして扱われ、その目的関数値が、ある目標値にできるだけ近い値であることが求められる。ここで、計画モデルを用いて計画作成を試みる際、制約同士の競合により解が算出できないケースの多くは「保守計画作成モデル」を解く場合である。このことから、本モデルに WCSP を適用すると以

下のように表される。

・ 目的関数

$$\text{Minimize} \quad p = \sum_c a_c p_c(z, w, x) \quad \cdot \cdot \cdot \cdot (1)$$

a_c : 制約条件 c に対する重み $a_c > 0$

 $p_c(z, w, x)$: 制約条件 c の違反量

・制約条件

- ① 2章で示した制約
- ② $q \leq q^*$ (目標値)

WCSP を適用したモデルの処理フローを図 2 に示す。

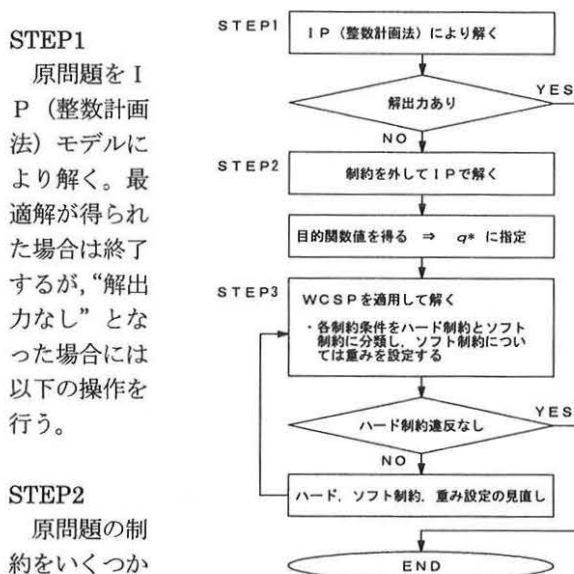


図2 WCSP 適用モデルの
処理フロー

目的関数値を WCSP における目標値 q^* とする。

STEP3

各制約条件をハード制約とソフト制約に分類し、ソフト制約については重みを設定する。ハード制約とは違反不可の基本的な制約条件であり、ソフト制約とは設定する重みの小さい順に違反が許可される制約条件である。WCSPを適用して解き、ハード制約違反が0の場合には計算を終了し、そうでない場合はハード、ソフト制約の設定あるいは重みの設定を見直しハード制約が0になるまで計算を繰り返す。

3.2 実問題への適用と評価

3.2.1 適用対象

検討対象とする保線区のネットワークを図3に示す。保守延長は約180kmであり、保線区と駐在で管理している。また、MTT基地は9基地（エリア）を設定する。この保

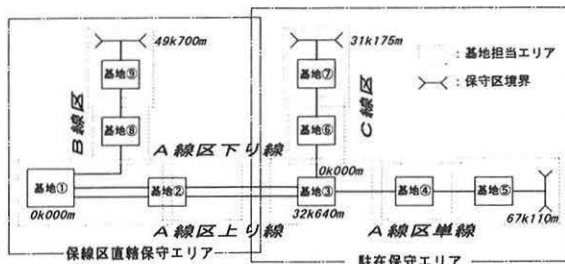


図3 保線区保守エリア

線区では、直轄・駐在へのMTT配備計画を年初に計画することから、表1に示すように保線区直轄管内と駐在管内に、指定時期にMTTを駐留させるというMTT配備時期指定制約が存在する。

以下に、本問題に対してWCSPを適用した結果を示す。なお、計算にはCPU:1.70GHz、メモリ:512MBのPCと、(株)数理システム社製の数理計画ソフトウェア「NUOPT」を用いる。

表1 MTT配備期指定

期				期			
月	1	2	3	月	1	2	3
4	直轄			10	直轄		
5		駐在		11		駐在	
6				12			
7				1			
8				2			
9	直轄			3	駐在		

□: 保守制限期

3.2.2 計算結果

まず、この問題を通常のIPモデルで解いたところ最適解は得られなかった(STEP1)。調査の結果、MTT配備時期指定制約と保守時期上限制約とが競合していることが分かった。そこで、WCSP適用において使用する目的関数の目標値 q^* を得るために、これらの制約条件を以下の通り緩和・解除し、それらの組み合わせである3通りの条件のもとで計算する(STEP2)。

- ① 保守時期上限制約
⇒ 保守時期上限を36期に指定し、計画期間内に必ず当該ブロックを保守するという制約に緩和
- ② MTT配備時期指定制約 ⇒ 解除

表2 制約条件緩和計算結果

Case	①	②	目的関数値	算出解	Time(s)
I	◎	●	1060	暫定解	2000
II	●	◎	—	解出力なし	—
III	◎	◎	—	—	2000

◎: 緩和・解除 ●: 現行

結果は表2に示す通りであり、いずれのケースにおいても最適解には到達しないが、Case Iによって暫定解が得られ、このときの目的関数値 q は1060である。よってこの値を q^* に設定することとする。

次に、WCSPを適用する(STEP3)。最初に、各制約条件をハード制約とソフト制約に分類し、ソフト制約につい

ては重み付けを行いその優先度を指定する。ここでは、ハード制約として以下の4制約を指定する。

- ① ブロック別保守回数上限制約
- ② 期別選定可能保守基地制約
- ③ 期別MTT稼働論理制約
- ④ 期間MTT移動可能範囲制約

一方、Case Iで保守時期上限制約を緩和して暫定解が得られたことから、この制約についてはソフト制約とする。また、MTT配備時期指定制約をソフト制約とする他、期別保守可能日数については通常余裕日を考慮していることから、その日数の増加についても許容することが可能であると考へ、期別保守可能日数上限制約もソフト制約とする。以上から、これらのソフト制約については表3に示す4ケースを設定した。表中の数字は各制約に対する重み係数を、 ∞ はハード制約に指定したことを表している。なお、期別保守可能日数上限制約をソフト制約に指定する場合は、各期の保守可能日数に1日加算した日数をハード制約として追加することにより上限を設けた。また、目的関数 q に関する制約については、設定した目標値 q^* との差をペナルティとして加算する。

表3 計算パターン

制約条件	Case1	Case2	Case3	Case4
MTT配備時期指定	10	∞	10	∞
期別保守可能日数上限	10	∞	∞	10
保守時期上限	1000	1000	1000	1000
目的関数: q	100	100	100	100

※計算は300(s)打切り

計算結果を図4に示す。図中のIP_modelは表2のCase Iのモデルである。期別保守可能日数上限制約を緩和することで、制約条件を緩和したIPモデルと同等の保守計画を得ることができる。本制約をハード制約とすると、 q の値は q^* 比で89~94%に低下する。保守時期上限制約については、制約違反ブロック数がいずれのケースでもIPモデルと比較して大幅に減少する計画となっており、重みを最も大きくしたことの効果が現れていることがわかる。一方、MTT配備時期指定制約を緩和した場合、当初計画(表

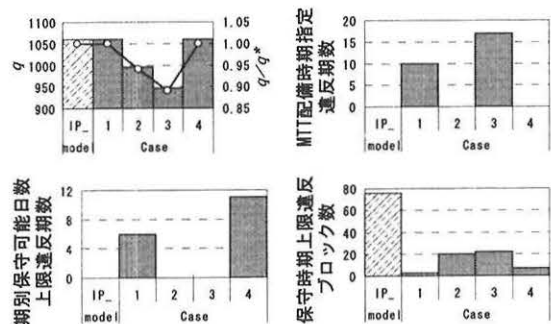


図4 計算結果

1) に対して大きく違反する計画となる(表4)ため、本制約条件については重みを大きくするかハード制約に指定するのが望ましい。

表4 MTT配備計画

(a) Case 1				(b) Case 3			
月	1	2	3	月	1	2	3
4	◎			10			
5				11	◎		
6		◎		12			
7				1		◎	
8				2		◎	
9	◎			3		◎	

◎: 制約充足期 ▨: 制約違反期

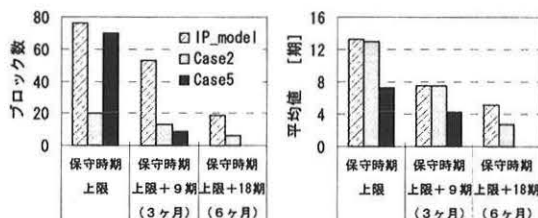
3.2.3 重みの与え方に関する検討

以上の検討から、制約が競合する問題に対して WCSP を適用することにより、若干の制約違反を許容した暫定解が得られることが分かった。しかしながら、保守時期上限制約で指定されたブロックについては、多少保守時期が遅れてでも計画期間中に保守を実施するべきであるが、表3のような重みを与えたソフト制約ではこのことを考慮できない。よって、重みの与え方を工夫することによりできるだけ計画期間中に保守が計画されるようなモデルについて検討した。具体的には、表5に示すように保守時期上限制約を、上限期、上限期+3ヶ月、+6ヶ月および36期の4段階設定する。そして、それぞれの重みの大きさは、制約違反期間が長くなるほど違反度を大きくするように設定した。

表5 計算条件 (Case 5)

制約条件	重み
保守時期上限	10
保守時期上限+9期(3ヶ月)	100
保守時期上限+18期(6ヶ月)	1000
保守時期上限(36期)	∞
MTT配備時期指定	∞
期別保守可能日数上限	∞
目的関数	100

計算結果を図5に示す。図には比較のため、制約条件を緩和したIPモデルと前掲のCase2の結果を表示している。



(a) 超過ブロック数 (b) 超過平均期数
図5 計算結果

同図(a)から、保守時期上限超過ブロック数に着目すると、Case2が最も良好な計画であるが、本モデル(Case5)では保守上限期+18期以内に全ての目標値超過ブロックを保守する計画が作成された。また、超過するブロックの超過平均期数に関しては本モデルが最も良好な結果であり、できるだけ上限期を大きく超えない計画となっていることが分かる(同図(b))。また、作成された計画の q の値は、 q^* 比でおおよそ96%であることから、保守計画として十分な品質を有していると言える(図6)。

以上のことから、重みの与え方を工夫することにより、制約条件を段階的に緩和した計画を作成できることは、WCSPを適用する上で有用な特徴であると考えられる。

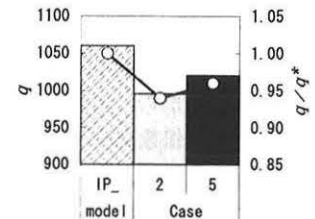


図6 目的関数の比較

4 まとめ

今回の検討により得られた結果は以下の通りである。

- (1) 整数計画問題で解けないモデルに対して WCSP を適用することにより、高速に暫定解を得ることができる。
- (2) WCSP を適用して得られる暫定解は、制約条件の緩和方法によっては十分な品質を有している。
- (3) 制約条件に対する重みの与え方を工夫することにより、計画の品質を向上できる可能性がある。

5 おわりに

今回の検討により、MTT最適運用計画作成モデルでは実行可能解が存在しない問題に対して WCSP を適用することで、短時間で暫定的な計画を得ることができたことから、本手法は従来のモデルに対するバックアップ手法として活用できる可能性がある。今後、制約に対する重みの設定方法等に関して検討を行い、本手法の実用化に向けて取り組んでいく。

最後に、本研究では(株)数理システム数理計画室の皆様には多大なご支援、ご協力を頂いた。厚く御礼を申し上げます。

【参考文献】

- 1) 例えば、三和、石川、大山：軌道状態推移予測モデルの構築と最適軌道保守計画作成のための全整数型数理計画モデル分析、土木学会論文集、No.681/IV-52, 51-65, 2001.7
- 2) 例えば、K.Nonobe and T.Ibaraki, "An improved tabu search method for the weighted constraint satisfaction problem" INFOR, 39, pp.131-151, 2001.