日本オペレーションズ・リサーチ学会
2022年 春季研究発表会

鉄道車両運用における分割併合を考慮した交番作成手法

01111500　(公財) 鉄道総合技術研究所　*加藤　怜　KATO Satoshi
01012600　東洋大学　今泉　淳　IMAIZUMI Jun
(公財) 鉄道総合技術研究所　中東太一　NAKAHIGASHI Taichi

1.　はじめに

鉄道の列車運行のためには，各列車の時刻を定めた列車ダイヤのみならず，使用する車両を定める車両運用計画を作成する必要がある [1]．現在でも，車両運用計画は熟練者による手作業をベースに作成されているが，近年，自動作成のニーズが高まっている．

著者らは，文献 [2] にて，災害発生後の車両運用計画作成を対象に，1 日単位の計画を示す「仕業」の作成，仕業の循環計画を示す「交番」の作成の 2 段階に分ける手法を提案し，前段の仕業作成手法を示した．本稿では，後段の交番作成手法を紹介する．

2.　交番と問題定義

車両運用計画は，仕業と交番により構成される．複数の車両形式が運行する場合は，形式ごとに交番を作成する必要がある．交番作成にあたっては，法令に基づき数日おきに仕業検査を実施するようにしなければならない．また，路線によっては複数のユニットの切り離しや結合を意味する分割併合を実施しており，仕業間で発生する分割併合も考慮しなければならない．

車両運用計画の自動作成手法としては，仕業を求解しつつ交番も求解する同時解法と，まず仕業を求解し，その仕業を用いて交番を求解する 2 段階法がある．本研究では，短時間での求解を優先し，2 段階法を採用している [2]．

図 1 に交番の例を示す．左の番号は仕業の遂行順序を示している．ある仕業の終着駅と次の仕業の始発駅は一致している必要があり（最後の仕業の次は最初の仕業となる），異なる場合には回送が生じるが，回送距離は少ない方が望ましい．また，(F) や (B) は前や後といった編成内の位置を示す．6M の前では併合が，2M の後では分割が発生している．仕業 3 では仕業検査を実施しており，この交番では 6 日に 1 回仕業検査を実施することになる．

本稿で扱う交番作成問題は，各形式の仕業集合を所与とし（始発駅，終着駅や編成内の位置の情報を含む），仕業検査周期を考慮したうえで，仕業間の回送距離および分割併合回数が少なくなるような，各形式の交番を作成する問題である．

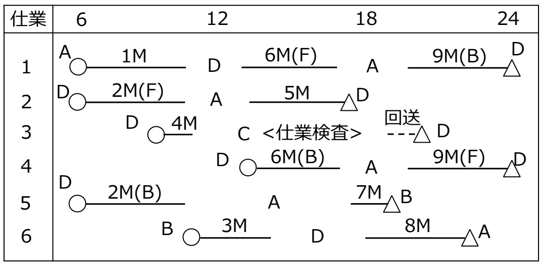

図 1: 交番の例

3.　分割併合を考慮した交番作成手法

3.1.　巡回セールスマン問題によるモデル化

仕業をノード，仕業間の接続をアークとしたネットワークで表現することで，巡回セールスマン問題 (TSP) として数理モデル化が可能である．ここで，アークのコストに回送距離を反映させることで，回送距離の最小化を指向することができる．

車両の分割併合の発生有無は，編成のユニット数や位置関係に依存するため，その把握は容易ではない．そこで本稿では，文献 [3] の考え方を取り入れる．ノードに対応する仕業の最初および最後の列車のユニット数および位置（地理的な位置を指し，たとえば西側から 1,2,... と定める）の情報を持たせ，接続前後でユニット数が異なるか位置が異なる場合には，アークに対し分割併合のコストを反映させる．接続前後でユニット数が同一かつ位置が同一の場合には，すべての位置で位置 1 と同列車か否かを論理制約で判断し，異なる場合には分割併合のコストを追加する．

3.2.　定式化

記号の定義および定式化を以下に示す．

集合と定数

V	ノード（仕業）の集合
W	位置 1 で終了（開始）する仕業のノード
E	アークの集合
N	先が検査を含む仕業のアークの集合
K	形式の集合
L_i	列車 i の位置の集合
c_{ij}	仕業 i から j への回送距離
d_{ij}	仕業 i から j への分割併合有無
u^k	形式 k の仕業検査周期
p_i^l	位置 1 のノード i と同列車の位置 l のノード

決定変数

x_{ij} 仕業 i, j が連続する場合 1，さもなければ 0

y_{ij}^k 形式 k における仕業 i から j への接続の巡回路上での順序

z_{ij} 巡回路上での経過日数

r_i 仕業 i の後に分割するのであれば 0，さもなければ 1

s_i 仕業 i の前に併合するのであれば 0，さもなければ 1

$$\text{min.} \sum_{(i,j)\in E} c_{ij}x_{ij} + \alpha\left\{\sum_{(i,j)\in E} d_{ij}x_{ij} + \sum_{i\in W}(r_i + s_i)\right\} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i\in V} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in V \quad (2)$$

$$\sum_{j\in V} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in V \quad (3)$$

$$\sum_{j\in V} y_{ij}^k = \sum_{h\in V} y_{hi}^k + 1, \quad \forall i \in V \setminus \{0\},\ \forall k \in K \quad (4)$$

$$y_{ij}^k \leq |V|x_{ij}, \quad \forall (i,j) \in E,\ \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j\in V} y_{0j}^k = 1, \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{j:(i,j)\in E} z_{ij} = \sum_{h:(h,i)\in E\setminus N} (x_{hi} + z_{hi}) + \sum_{h:(h,i)\in N} z_{hi}, \quad \forall i \in V \quad (7)$$

$$u^k x_{ij} \geq z_{ij}, \quad \forall (i,j) \in E,\ \forall k \in K \quad (8)$$

$$(|L_i| - 1)x_{ij} - \sum_{l\in L_i\setminus\{1\}} x_{p_i^l p_j^l} \leq Mr_i,\ \forall i,j \in W \quad (9)$$

$$(|L_i| - 1)x_{ji} - \sum_{l\in L_i\setminus\{1\}} x_{p_j^l p_i^l} \leq Ms_i,\ \forall i,j \in W \quad (10)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall (i,j) \in E \quad (11)$$

$$y_{ij} \in Z^+, \quad \forall (i,j) \in E \quad (12)$$

$$z_{ij} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in E \quad (13)$$

$$r_i \in \{0,1\}, \quad \forall i \in V \quad (14)$$

$$s_i \in \{0,1\}, \quad \forall i \in V \quad (15)$$

目的関数 (1) 式の第 1 項は回送コスト，第 2 項は分割併合コストのうちアークで把握するコスト，第 3 項は論理条件で把握するコストを示し，回送と分割併合のコストは重み α で調整するものとしている．(2)，(3) 式は各ノードを 1 度ずつ訪問する制約，(4)〜(6) 式は形式ごとの部分巡回路除去制約，(7)，(8) 式は仕業検査周期制約，(9)，(10) 式は分割および併合のカウントのための論理制約を意味する．(11)〜(15) 式は変数の取りうる値を示す．

4. 数値実験

上記で述べたアルゴリズムの性能を検証するため，実在路線を基にしたデータを用いて数値実験を行う．対象データは $|V| = 50$，$|K| = 5$ である．その他，問題規模を表 1 に示す．実験には，Windows 10 Pro, Core i7-8700K, 64GB メモリの PC および Gurobi Optimizer 9.5.0 を用いる．

表 1: 問題規模

アーク数	0-1 変数	整数変数	制約本数
586	686	6,546	1,797

表 2: 実験結果

α	回送距離 (km)	分割併合	計算時間 (秒)
0.001	0.0	13	0.24
1	0.0	13	0.42
1000	82.0	11	296.4

重み α による計算時間の違いを検証するため，$\alpha = 0.001$，1，1000 の 3 通りで実験する．表 2 に，各重みでの適用結果を示す．結果をみると，いずれの重みでも短時間で最適解を求められていることがわかる．追加の論理制約を含む TSP とはいえ，巡回路は形式ごとであり，完全グラフではないため，ノード数やアーク数を踏まえても問題規模はそこまで大きくないためと思われる．また，重みによる違いを見ると，$\alpha = 0.001$，1 では変化はなかったが，$\alpha = 1000$ とすると分割併合回数が減少しており，意図した結果を得られている．

5. まとめ

本稿では，鉄道の車両運用計画作成に着目し，仕業を所与とした場合の交番作成手法を提案した．仕業検査周期制約，分割併合の論理制約といった追加制約を含む巡回セールスマン問題としてモデル化したところ，短時間で回送距離や分割併合回数を低減した実用的な交番を作成できることを確認した．

今後は，提案手法を様々な路線に適用し，仕業作成を含めた車両運用計画作成手法の検証を進めていき，実用化につなげたい．

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, エヌ・ティー・エス (2005)

[2] 加藤ら: 災害発生後の車両運用計画作成に対する多品種ネットワークフローモデル, 第 28 回鉄道技術連合シンポジウム, SS5-2-3 (2021)

[3] Kato et al.: A mixed integer linear programming approach to a rolling stock rostering problem with splitting and combining, In: *Proceedings of RailNorrköping2019* (2019)