

コンテナ貨車の検修捕捉アルゴリズムの開発

○ [電] 加藤 怜 福村 直登 坂口 隆 (鉄道総合技術研究所)

山田 信彦 高澤 弘人 (日本貨物鉄道)

Development of an algorithm for catching freight container car for periodic inspection

○Satoshi Kato, Naoto Fukumura, Takashi Sakaguchi (Railway Technical Research Institute)

Nobuhiko Yamada, Hiroto Takazawa (Japan Freight Railway Company)

In this paper, we focus on a schedule of a freight container car with periodic inspection. Unlike locomotives or passenger cars, it is not determined in advance where freight container cars are inspected. However, there are many problems such as imbalance between depots. In order to present an appropriate inspection plan, we model the problem as mixed integer programming problem. Computational experiments are performed based on a real schedule of freight container car. The results suggest that it is possible to reduce imbalance between depots.

キーワード：貨物輸送，コンテナ貨車，システム，数理計画，最適化

Key Words：Freight transport, freight container car, system, mathematical programming, optimization

1. はじめに

現在、鉄道貨物輸送の多くの部分をコンテナ輸送が占めており、コンテナ輸送に必須となるコンテナ貨車の使用効率の向上が望まれている。コンテナ貨車（以下、単に「貨車」と表記する）はダイヤ改正時に運用計画を定めているものの、定期的に必要となる検査を運用上のどのタイミング（いつ、どの検修区所）で実施するかについては決めておらず、駅の判断により次回検査の期限が近い貨車を抜き取り、最寄りの検修区所で検査するようにしている。しかし、駅では検修区所の状況を把握できないため、結果として、検修区所や、日によって、業務量に差が生じている。

本稿では、貨車の運用および検修について、システム化による新たな業務フローを提案する。その中で、各貨車の適切な捕捉箇所を提案する問題を数理計画問題として定式化する。実験には実際の貨車運用計画データを使用し、検修区所の業務量平準化が可能であることを示す。

2. 貨車運用の現状業務

2.1 貨車の運用と検査の仕組み

貨車の多くは、全国共通運用という運用形態をとっている。よって、全国のどの路線でも必要に応じて走行ができるので、柔軟性が高い。しかし、貨車に対してもダイヤ改

正時に運用計画を作成しているものの、貨車は1車単位で動くため、使用車数が約 8,000 両に及ぶ全貨車について、その使用循環までは把握できていない。

一方、貨車も機関車や旅客用車両などと同様に、一定の周期ごとに検査を施行しなければならない。貨車の検査には数種類あり、それぞれ周期が定められている。この中で、交番検査およびそれより上位の検査については、貨車を列車から抜き取り（この検査抜きのことを「捕捉」と呼んでいる）、検修区所まで回送した上で実施する必要がある。貨車は全国共通運用であるため、一般に、機関車や旅客用車両と比べて運用周期（同じ列車の同じ連結位置に戻ってくるまでの期間）が長く、また、同じ列車でも連結位置によって運用が異なる。このような特徴から、他の車両運用計画のように、個々の車両の検査箇所を予め計画で1箇所に分けることができない。しかし、捕捉が可能な駅や作業間合いは限られているため、適切に捕捉をしないと列車運行中に期限切れを起こす可能性がある。

そこで、検査期限切れを防ぐために、責任交検と呼ばれる制度を導入している。これは駅に対し到着列車の組成貨車について、次回の検査期限まで何日以下ならば捕捉しなければならないかあらかじめ運用にもとづいて定めておき、駅ではその日数をもとに捕捉を行い、当該貨車と使用可能な予備車を差し替えるものである。この捕捉や駅入換

作業の効率化のため、駅に対し貨車使用に関する権限を与え、必要な範囲で運用計画からの変更を行ってもよいものとしている。よって、貨車は運用計画を定めてはいるものの、必ずしも計画通りには運用されていない。

2.2 顕在化している問題点

現状では、前節で述べたような仕組みで貨車が使用されているが、様々な問題が生じている。

(1) 検修区所の業務波動が大きい

貨車の捕捉は責任交換にもとづき駅で行われているが、検修区所の状況までは考慮されていないため、捕捉両数が日々変動し、その結果検修区所の日々の業務波動が大きくなっている。また、検修区所間の検査両数もばらつく傾向がある。

図 1 には、2 つの検修区所の日々の検査両数の推移を示しているが、A 区所は休日（検査両数が 0 である日）を除いても、検査両数が日々ばらついていることがわかる。一方、B 区所は一見ばらつきは小さいように見えるが、これは捕捉両数に対して検査両数が追いつかず、検査待ちの貨車が溜まってしまっているためである。本来、B 区所で溜まっている検査貨車は A 区所の検査両数が少ない日に検査するのが望ましいが、捕捉両数のコントロールはできていない。その結果、日々の業務波動だけでなく、検修区所によっても業務量にばらつきが生じていることがわかる。

(2) 予備車両数が多いにもかかわらず欠車が発生

検査による捕捉やダイヤ乱れによる差し替えを柔軟に行うため、各駅に予備車を配置するが、所定の両数を確保できない欠車を防ぐため、予備車両数は多くなりがちであり、これが貨車の使用効率を下げる要因となっている。

また、予備車両数を多くしているにもかかわらず、欠車が完全には防ぎきれない。これは捕捉両数が平準化できていないことが大きく、一時的に特定の駅に捕捉貨車が集中することで、代わりに充当する予備車がなくなり、所定の両数を確保できなくなってしまう。欠車が発生すると、その列車にて輸送する予定だったコンテナが輸送できず、機会損失、および顧客満足度の低下につながる。

2.3 貨車検修捕捉業務のシステム化

このような問題が生じる原因としては様々なことが考え

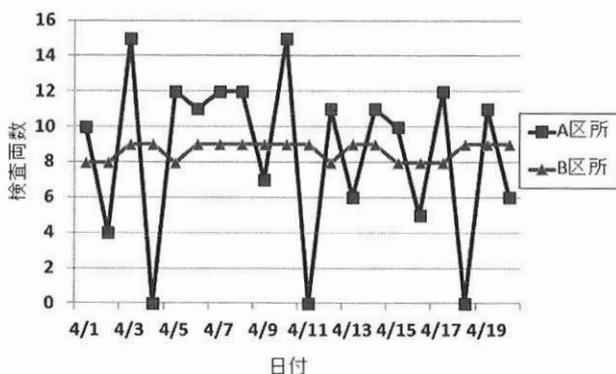


図 1 検修区所間の業務量の不均衡

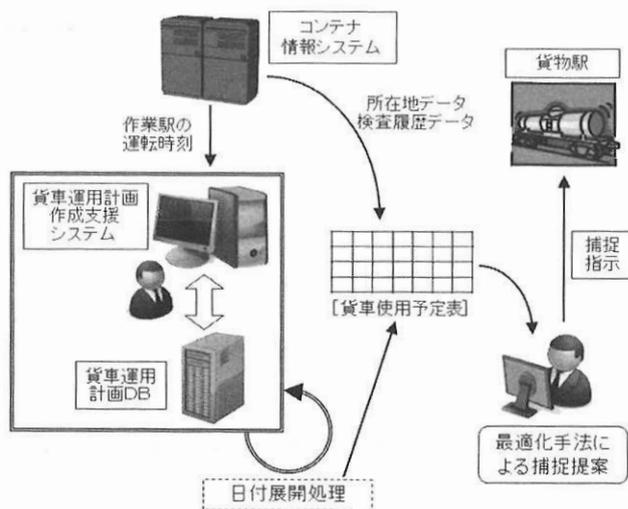


図 2 貨車捕捉業務のシステム化

られるが、本社等の管理部門で全貨車の検査計画を管理できていないことが大きい。現在、貨車運用計画は作成されているものの、手作業のため、詳細な運用計画は作成できていない。また、効率的な入換のために運用計画を必ずしも守れないため、そもそも詳細な計画を作成しても駅の入換に対応できない。このような理由から、現状では、貨車の検査計画を管理することは難しい。

そこで本研究では、業務全体のシステム化を提案する。システム化により詳細な運用計画を作成し、管理部門で貨車の使用循環を把握することを考える。これが可能になれば、使用貨車と使用循環を突き合わせることで、差し替えによる不確実性は残るものの、貨車の使用予定が把握できるようになる。システム化の全体構想を図 2 に示す。現在はほぼ手作業で行われている貨車運用計画作成をコンピュータ上で実現し、作成した計画はデータベースで一括管理する。作成した計画を日付展開し、さらに各貨車の所在地データを取得することにより、各貨車が将来どのように使われるのか予測できる。これに加えて、各貨車の検査履歴データを取得すれば、各貨車がいつどこで捕捉可能かが予測できるようになり（システムでは、これら情報のサマリとして「貨車使用予定表」を出力する）、管理部門側で捕捉指示を駅に対し出すことが可能になる。さらに、最適化手法を適用することにより、検修区所の業務量平準化を考慮した、適切な捕捉箇所の提案を行う。システム化および貨車運用計画作成支援システムの詳細については文献¹⁾を参照されたい。

3. 貨車捕捉箇所提案アルゴリズム

3.1 関連する従来の研究

従来から、鉄道における車両や乗務員といったリソースを効率的に使用するため、最適化手法を活用する研究が数多く行われている。しかし、本研究が対象としているような、運用計画が所与で検査計画を対象とする本研究はほとんど見受けられない。

その中で、本研究と同様の問題を扱っている研究として、濱口ら²⁾が挙げられる。ここでは、全貨車について常に一定日数で捕捉するといった、新たな捕捉方針が提案されており、シミュレーションによりその有効性を示している。しかし、多くの場合運用上で捕捉が可能なタイミングは数日に1回しかないため、常に同じ日数で捕捉するのは実際の運用を考えると容易ではない。よって、分析例としては有益であるが、実用性は乏しいと考えられる。

3.2 平準化のための方策

検修区所の業務量を平準化させるためには、貨車を常に検査期限間際まで使用し、責任交検にもとづいて捕捉する(このような責任交検による捕捉のことを、「所定の捕捉」と呼ぶ)のではなく、必要に応じて捕捉日を前倒しすることが有効である。しかし、捕捉を前倒しすると検査回数が増加するため、両者のトレードオフを考慮した上で適切な捕捉日を提案することが望ましい。

本研究では、必要最低限の前倒しを許容することで、検修区所の平準化および検査日の平準化を行うことを目的とする。平準化には、区所間の平準化、日別の平準化の2つが考えられるが、両者を対象とする。なお、前倒しして捕捉すると、一般的には所定の捕捉とは異なる駅で捕捉することになる。よって、前倒しを行うことで、区所間の平準化が難しくなる可能性がある。

適切な前倒しを提案するためには、各貨車が将来いつどこにいて、どの時点で捕捉可能か予測できなければならない。そこで、2.3節で述べた貨車使用予定表を活用する。

3.3 問題の前提条件

前提条件として、①各貨車の使用予定、②各貨車の捕捉可能日、③各貨車の検査期限日、④各駅の日別の捕捉数上限、のデータが取得可能であるものとする。このうち、①～③については、貨車使用予定表を活用する。④は、管理部門の担当者が各検修区所の検査施行能力を考慮した上で、適切な値を設定するものとする。駅によっては捕捉した後、最寄りの検修区所まで回送する必要があるが、回送のための列車は必ずしも毎日設定されているわけではない。このような点も考慮した上で、各駅の日別の能力が設定される。

3.4 問題の定式化

以上をもとに、問題を定式化する。Iを対象とする貨車iの集合(対象期間内に検査期限がくる貨車)、Tを対象期間の最大値、Kを捕捉可能な駅kの集合とし、貨車の捕捉箇所を表す0-1変数xを導入する。

$$x_{it}^k := \begin{cases} 1: & \text{貨車}i\text{を}t\text{日に駅}k\text{で捕捉する} \\ 0: & \text{捕捉しない} \end{cases}$$

なお、捕捉が可能な駅および日は限られているので、捕捉が不可能な場合には変数を0に固定する。

制約条件としては、まず検査期限の遵守が挙げられる。貨車iの次の検査期限日をs_iとすると、以下の式(1)で表現できる。

$$\sum_{k \in K} \sum_{t=1}^{s_i} x_{it}^k = 1, \quad \forall i \in I \quad (1)$$

各駅・各日の捕捉数は、あらかじめ定める上限を上回らないようにする必要がある。駅kのt日の捕捉数上限をd_t^kとすると、この制約は以下の式(2)で表現できる。

$$\sum_{i \in I} x_{it}^k \leq d_t^k + y_t^k, \quad t = 1, \dots, T, \quad \forall k \in K \quad (2)$$

必ずしも上限を満たす解が存在するとは限らないので、上限の緩和を示す変数y_t^k(≥0)を加えている(目的関数側なるべく緩和はしないようにする)。

評価指標としては、①各捕捉駅の日別の捕捉両数(平準化)、②全国的な捕捉両数(平準化)、③前倒し貨車数(最小化)、④総前倒し日数(最小化)の4つを考える。捕捉両数を平準化するためには、各駅、各日の捕捉両数をなるべく等しくするのが望ましいと思われるが、駅により捕捉可能数の上限が異なるため、上限に対する割合を平準化する。すなわち、実際の捕捉数/捕捉可能数上限を示す、「捕捉率(%)」を定義し、捕捉率の平準化を図る。

平準化を数理計画問題でモデル化するには、min-maxモデル、あるいはmax-minモデル³⁾として定式化するのが自然であるが、本研究では両者を考慮した定式化を行う。まず、駅kの捕捉率の最大値を表す変数をα^k、最小値を表す変数をβ^k、t日の捕捉率の最大値を表す変数をγ_t、最小値を表す変数をδ_tとおき、以下の制約式を追加する。

$$\sum_{i \in I} x_{it}^k \leq d_t^k \alpha^k, \quad t = 1, \dots, T, \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} x_{it}^k \geq d_t^k \beta^k, \quad t = 1, \dots, T, \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} x_{it}^k \leq d_t^k \gamma_t, \quad t = 1, \dots, T, \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} x_{it}^k \geq d_t^k \delta_t, \quad t = 1, \dots, T, \quad \forall k \in K \quad (6)$$

そして、目的関数側でα^k、γ_tは最小化、β^k、δ_tは最大化することで、平準化を図る。

以上の(1)～(6)式を制約条件として、以下に示す目的関数を最小化する。

$$p_1 \sum_{k \in K} \alpha^k - p_2 \sum_{k \in K} \beta^k + p_3 \sum_{t=1}^T \gamma_t - p_4 \sum_{t=1}^T \delta_t + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{t=1}^T c_{it}^k x_{it}^k + p_5 \sum_{k \in K} \sum_{t=1}^T y_t^k$$

第1, 2項で各駅の捕捉率の平準化、第3, 4項で各日の捕捉率の平準化を示す。第5項は捕捉日の前倒しの抑制を意味するが、前倒しのコストc_{it}^kは以下のように設定する。

$$c_{it}^k = p_6 m_i + p_7 n_{it}$$

ここで、m_iは貨車iの検査日を前倒しするならば1、さもなければ0を表し、n_{it}は前倒しの日数を表す。当然ながら、

表 1 最適化による平準化の効果

対象日数	対象貨車数	重みパラメータ	違反貨車数	捕捉率(%)の標準偏差	前倒し貨車数	前倒し総日数	計算時間(秒)
30	2150	①	164 → 19	32.1 → 22.4	406	2968	600
		②	164 → 19	32.1 → 27.1	176	1265	10.1
50	3813	①	374 → 26	33.7 → 19.4	629	7151	600
		②	374 → 26	33.7 → 25.3	363	2773	600

前倒しがされないのであれば、 $m_i = 0$, $n_{it} = 0$ となるので、 $c_{it}^k = 0$ となる。さらに、第6項は捕捉数上限制約を満たせない貨車数の最小化を示す。各項には各評価指標の重みを表す $p_1 \sim p_7 (\geq 0)$ を付加しており、状況に応じた重みを設定することで、望ましい貨車捕捉案を求解する。もちろん、この重みを変えて計算を繰り返すことで、特徴の異なる複数の捕捉計画案を提示することも期待できる。

4. 計算機実験

4.1 使用するデータ

最適化による効果を検証するため、実際の貨車運用データを用いて計算実験を行う。全貨車数は約 6800 両、駅数は 44 駅であり、日数は 30 日展開の場合と 50 日展開の場合を考える。重みパラメータについては、①平準化を重視する場合、②前倒しを少なくする場合の 2 つの結果を比較する。実験には、CPU Core i7 3.20GHz、メモリ 3.0GB の PC を使用し、数理計画問題の求解には数理計画ソルバー Gurobi Optimizer 4.5 を用いる。計算時間は 600 秒とし、計算が終了しない場合はその時点での最良解を提示する。

4.2 実験結果と考察

表 1 に、各データ、パラメータについての計算結果を示す。対象貨車数は、対象期間の中で捕捉をしなければならない貨車数である。違反貨車数は、所定の捕捉をしたときと、捕捉を前倒ししたときの、駅の捕捉数の上限を超えた貨車数であり、本アルゴリズムにより違反貨車数を 0 にはできていないものの、大幅に減らすことができていくことがわかる。また、平準化の効果を見るため、すべて(全駅・全日)の捕捉率の標準偏差について、上と同様の比較を示すとともに、これとトレードオフの関係にある、前倒しを行った貨車数と総日数を示す。

重みパラメータの違いについて見ると、①は標準偏差が

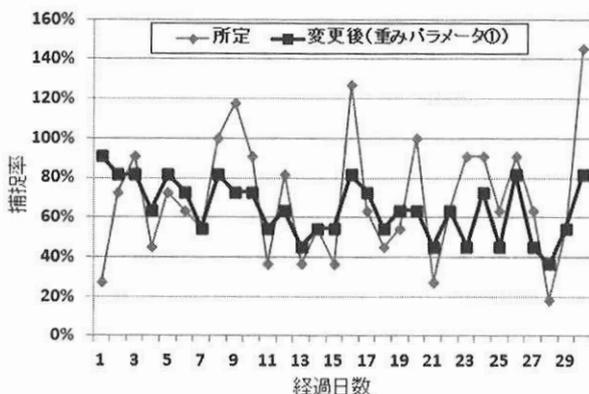


図 3 検修区所の捕捉率の推移

大幅に減少しているものの、前倒し両数・日数ともに多くなっている。一方、②はその逆に標準偏差はそこまで減少していないものの、前倒し両数は少ないことがわかる。このように、重みを変えることで特徴の異なる案を求解することが出来るので、状況に応じた望ましい案を提示することが期待できる。なお、計算時間については、①はどちらも 600 秒では計算が終了しなかった。一方、②は対象日数が短い場合には短時間で最適解を得ていることから、平準化を重視する方が計算の負荷が大きいことがわかる。

図 3 には、対象日数 30 日、重みパラメータ①の結果について、ある検修区所の捕捉率の推移を示している。ここで、検修区所の捕捉両数は、その区所が受け持っている駅の捕捉両数の合計としている。図を見るとわかるように、前倒しをしない所定の場合は日々の捕捉率が大きくばらついていて、前倒しを行うことでばらつきが抑えられていて、この区所については、所定では 100%を超える日があるものの、前倒しによりすべて 100%以下にできている。よって、捕捉日の前倒しにより検修区所の業務量平準化を図ることは非常に有効であるといえる。

5. まとめ

本稿では、貨車運用および検査について、現状業務の問題点を述べ、システム化による新たな業務フローを提案し、最適化手法による捕捉計画の提案アルゴリズムに関して述べた。ここでは、適切な捕捉の前倒し箇所を求める問題を数理計画問題として定式化することで、前倒しを抑えつつ捕捉を平準化する案を提案できることを示した。

貨車捕捉業務の最適化により、貨車検修区所の業務量平準化が可能になると思われ、それだけではなく、貨車保有両数の削減など、様々な効果が期待できる。今後は、引き続き実務の要望を通しての高度化・高速化に取り組み、早期の実用化に結びつけたい。

参考文献

- 1) 加藤伶ら：コンテナ貨車検修捕捉業務のシステム化－コンテナ貨車運用計画作成支援システムの開発－，第 48 回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集，2011。
- 2) 濱口和也ら：車両検査スケジュール改善のためのアルゴリズムとその評価，情報処理学会第 71 回全国大会講演論文集，pp.387-388，2009。
- 3) 加藤伶ら：数理計画によるコンテナ貨車検査スケジュールの最適化，スケジュールリング・シンポジウム 2011 講演論文集，pp.25-30，2011。