

鉄鋼物流における最適化およびシミュレーション技術の活用

Application of Optimization and Simulation Techniques to Logistics of Steel Products

藤井 聡 FUJII Satoshi JFE 技研 計測制御研究部 主任研究員(副部長)
田鍋 実 TANABE Minoru JFE 技研 計測制御研究部 主任研究員(課長)
吉成 有介 YOSHINARI Yusuke JFE 技研 計測制御研究部 主任研究員(課長)

要旨

鉄鋼製品の輸送は、さまざまな輸送条件を満たす効率的な配送や、需要家へのきめ細かな納入を考慮した多目的な運航計画が要求されている。著者らは、この要求に対し、多目的最適化手法を適用したシステムを開発し、短時間で高精度の計画立案を可能にした。本稿では、その例として物流計画最適化の事例を紹介する。鋼材の広域配送用配車計画の例では、メタヒューリスティクスの適用により、短時間で効率的な配送計画を策定できるようになった。特殊船運航計画の例では、ヒューリスティクスと最適化を組み合わせることにより、既存航路の航海数を維持したまま新航路の増便が可能であるという結果を得た。

Abstract:

An efficient transportation plan which satisfies various conditions and customer needs is required in the transportation of iron and steel products. Authors developed a new system in which a multipurpose optimization technique was applied to meet this requirement, and made it possible to generate the plan of high accuracy in a short time. This report shows an example of the optimization of a distribution plan. In an example of dispatching trucks for the in delivery large area, an efficient delivery plan was obtained in a short time by applying metaheuristics. For the navigation plan of specially designed steel coil carriers, it is possible to increase the voyage number of new routes by maintaining the number of voyage of existing routes applying combination of heuristics with optimization under the same carrier number.

1. はじめに

鉄鋼製品は、多種多様でしかも重量物を取り扱うために、物流の重要性が高い。このため、鉄鋼製品の輸送手段である陸上・海上輸送の輸送条件を満たす効率的な配送や需要家へのきめ細かな納入を考慮した多目的な運航計画が要求されている。

一方、昨今の計算機能力の飛躍的向上にともない、物流計画策定において最適化技術の適用が広く試みられてきている¹⁾。日々の配送計画では、効率的な物流計画を短時間で、精度の高い計画を自動生成することが必要であり、最適化技術への期待が大きい。また、物流ルートの新設や拡大にともなう物流能力や運航計画の検証には、シミュレーション技術が重要となる。

本稿では、鋼材の広域配送用の日程配車計画に最適化手法の一つであるメタヒューリスティクス²⁾を適用し、オ

ペレータよりも短時間で、より良い計画を策定した事例³⁾および、海上輸送航路の新設・拡大にともなう運航効率向上を目的とするシミュレーション事例を紹介する。

2. 最適化技術応用事例

2.1 鋼材の広域配送用配車計画

2.1.1 配送計画概要

建材、土木商品などの鋼材は、全国の顧客向けに工場からトラックで直送する配送形態をとっている。これらの商品の運搬先は全国各地の工事現場であり、配送ルートは日ごとに大きく異なるために過去の配車ルートを参考にすることができない。一方、工事現場によっては搬入時刻の指定、荷下ろし設備の有無や周辺道路事情により運搬車両が限定されるなど、多くの制約がある。熟練の配車担当者でもこれらすべてを考慮して最適な配車計画を立てることは困難である。

これらの課題に対して、反復局所探索法¹⁾を適用し、最適な車種構成、積み合わせ配送ルートを探索する自動配車計画システムを開発した。その際、配送先は日本全国であるため、これらの積み合わせを全国一括で探索することは、非効率である。このため、配送先を一定距離内になるようにクラスタリングし、そのなかでの積み合わせ探索を実施することで、処理時間を短縮した。

2.1.2 配車計画アルゴリズム

配車計画は、翌日1日分のオーダーに基づいて毎日作成し、必要な車両台数と車種を決定する。Table 1 に配送問題の概要を示す。

それぞれの車両ごとに配送オーダーの割り付けと配送ルートを決する。配車計画は、積み荷ロットの割り付けとTSP (traveling salesman problem) の組み合わせからなるVRP (vehicle routing problem) である。この問題に対して、繰り返し局所探索法を用いたアルゴリズム (Fig. 1) を適用した。

以下に初期解作成、探索処理に関して述べる。

(1) 初期解作成

配送拠点に近い順にソートされた配送オーダーを、ランダムに選択した車両に制約条件を満たすように割り付ける。配送オーダーがなくなるまでこの割り付けを繰り返し、初期解を作成する。

Table 1 Outline of delivery

Restriction condition	Specification of type of vehicle Specification at delivery time Vehicle loading weight
Objective function	Delivery distance Loading ratio
Delivery scale	Number at delivery destination: 50-150 cities Amount of loading: 200-500 t/d Number of orders: 100-300 order/d Number of vehicles: 50-100 d ⁻¹ (4-15 shipping ton vehicles)

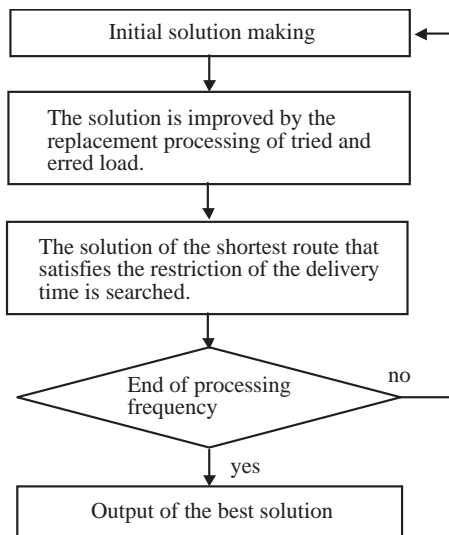


Fig. 1 Proposed algorithm

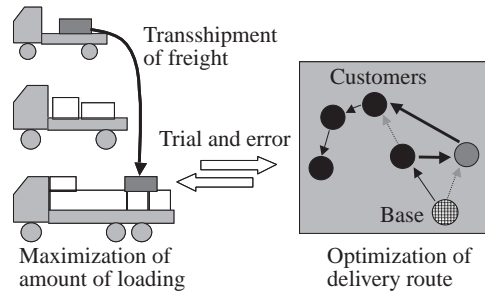


Fig.2 Search processing of proposed algorithm

(2) 探索処理

Fig. 2 に示すように、車両台数が少なくなるよう、積み荷の入れ替えを試行し、納入指定時刻制約下での最短ルートを探し、これ以上解の改善が起こらなくなるまで繰り返す。

Fig. 2 に示すように、この処理は、車両台数が少なくなるよう、試行錯誤的に積み荷を乗せ替えながら、納品時間制約下での最短ルートを探し、局所解が得られるまで解の改善を繰り返し、さらにこの局所解にランダムな変形を加え再度この処理を繰り返し、より良い解を探索する。

2.1.3 配送エリアの動的クラスタリング

ある工場の1日分の積み荷重量分布を Fig. 3 に示す。配送先は全国の工事現場であるため、首都圏を除きまばらに分布している。また、これらの分布は日ごとに大きく異なるといった特徴がある。

これらの積み合わせを全国一括で探索することは、非効率な試行となる。一方、固定的な配送エリア分割では、日毎に変化する配送先の最適な積み合わせを目的とした、エリアにまたがる配送ができない。このため、当日のオーダーごとに、配送先分布から配送先間距離が長いエリアを分割し、それぞれのエリアごと (Fig. 3 中○で囲んだ配送先) に配車計画を実施することで、非効率な組み合わせ試行が排除され、高速、高精度な解が得られる。

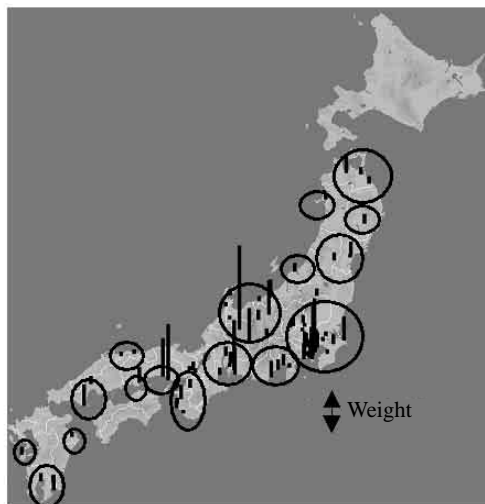


Fig.3 Distribution of delivery area and example of divided area

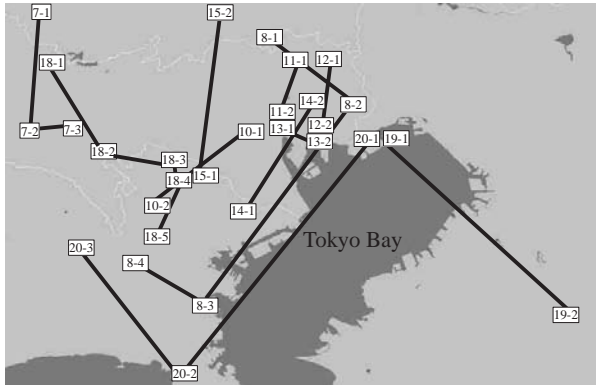


Fig.4 Example of planning results

Table 2 Planning results

	Amount of loading (t)	Number of orders	Number of vehicles		Number of vehicles
			Auto	Manual operation	
Average	360	208	61	63	2

2.2.3 適用結果

Fig. 4 は配車計画結果の一例（部分）を地図上にプロットしたもので、プロット脇の数字が車番と荷降ろし順である。配車担当者と自動配車計画システムによる実データを用いた比較結果を Table 2 に示す。車両台数を約3%削減し、効率的な配送が可能であることが分かった。また、配送エリアの動的クラスタリングを適用することで、従来オペレータが約半日かかっていた1日分の配車計画が、20分で作成可能となった。

2.2 特殊船運航計画

2.2.1 RoRo 船とその運航

ロールオン・ロールオフ船（以下、RoRo 船）はパレットに搭載した薄板コイルの運搬専用の特殊船であり、主に福山で積み込んだコイル材の国内向け海上輸送に用いられている。現在、瀬戸内海航路専用船1隻、関東／中京向け航路船5隻の計6隻のRoRo船が就航しており、65航海／月（約120千トン／月）の薄板コイルを運搬している。

RoRo 船では岸壁クレーンを用いず専用車が船内にパレットごと乗り込んで荷役を行う（ロールオン・ロールオフ）ため、効率的な荷役が可能である（Photo 1）。また、幌付きパレットを用いるため、雨天時にも荷役が可能である。

- 一方、従来のRoRo船運航には以下のような課題があった。
 - ・揚げ地からの戻荷がほとんどないため、復路航海が空パレット輸送となる。
 - ・揚げ地の非稼働時間（休日、夜間など）の制約から、積み地での荷役時間の制約が厳しい。
 - ・積み地では一度に一隻の積み込み作業しかできず、複数のRoRo船が到着すると待機時間が発生する。
- 従来から運航されている積み地は福山1ヶ所、揚げ地は



Photo 1 RoRo loading

東京地区2ヶ所（以下、東京1、東京2と表し、2ヶ所を総称して東京と表す）、中京地区2ヶ所（以下、中京1、中京2と表し、2ヶ所を総称して中京と表す）、大阪地区1ヶ所の計5ヶ所である。今回、これに加えて、東京1／東京2からの戻荷として、京浜から中京1／中京2へコイル輸送を行う場合（京浜寄港）の輸送能力を検討した。

2.2.2 運航計画

RoRo 船は一般船と比べて航行能力が高く、台風などの特殊な状況を除き安定した輸送が可能であるため、月次輸送計画を立て、これに従って運航される。その際に、揚げ地別の月間輸送量に基づき、航海間隔が均等になるよう人手で運航計画が作成されている。運航計画の例を Fig. 5 に示す。図中の各々の線が各船の運航計画を示している。積み地、揚げ地での水平線部分が各港での滞船時間を示している。滞船時間が二段の水平線となっているものが見られるが、このうち時間の早い部分が待機時間、後の部分が荷役時間である。待機時間を減らすことで、より効率的な運航が可能となる。

2.2.3 運航計画モデル

RoRo 船による輸送は以下に示すように、積み準備に始まって復路（空荷）航海までの作業が繰り返し行われる。このような作業に必要な設備（機械、人、場所など）がすべて使用可能なタイミングで作業時間を指定していくのが輸送作業のスケジューリングモデルである（Fig. 6）。

たとえば、積み荷役作業では船（輸送機械）、積みバー

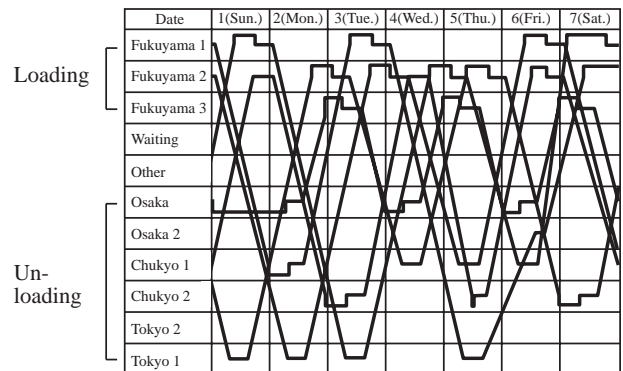


Fig.5 Example of ship schedule

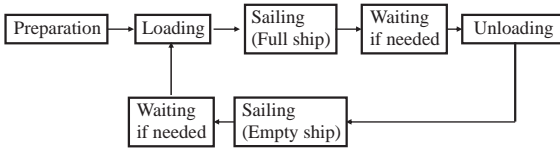


Fig. 6 Model of transportation by ship

ス(場所), 専用車(荷役機械)というような資源を作業時間軸で割り付けていく。なお, 輸送作業モデルでは積み荷役, 揚げ荷役作業を終えた船は直ちに出航して目的地へ向かい, 必要に応じてそこで待機するものとした。輸送作業量は月間輸送量から算出される揚げ地別の航海数により定義される。

2.2.4 京浜寄港シナリオと計画モデル

(1) 京浜寄港シナリオ

今回検討することにした京浜寄港航路(福山~東京1/東京2の戻荷として京浜~中京1/中京2のコイル輸送を実施)において, 京浜寄港の航海数は, 京浜発中京1/中京2向け輸送量に基づいて, 10航海/月に設定された。これを実施する方式として以下の2つのシナリオを検討した。

シナリオ1: 中京1/中京2向けの現行運用(A: 朝からの揚げ荷役, B: 午後からの揚げ荷役の2つの時間帯を選択)の延長で運航の最適化を実施する。

シナリオ2: 中京1の揚げ荷役を24時間稼働化し, RoRo船2隻を中京1/中京2航路専用船として福山との間を連続運航する。残りの船で不足分の航海を実施する。

京浜寄港を実施する場合, Fig. 7に示すように航海サイクルタイムは従来の72時間から92時間に延びる。このため, 後から福山を出発した中京1/中京2便が, 先発の福山~東京1~京浜~中京1/中京2便と, 揚げ地である中京1/中京2で干渉する可能性があり, これを回避する工夫が必要である。

(2) ヒューリスティック計画モデル

モデル構築に先立ち, 荷役作業が錯綜する福山での望ましい荷役時間を揚げ地別に整理した。Fig. 8で航路別の実線矢印は揚げ地での標準荷役時間(8:00など)から揚げ荷役を始めるためのクリティカルな福山荷役時間帯を示す。また, 三角印はRoRo船が揚げ地から

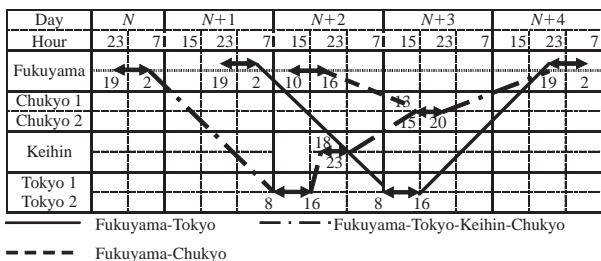


Fig. 7 Cycle time of Fukuyama-Tokyo-Keihin-Nagoya trip

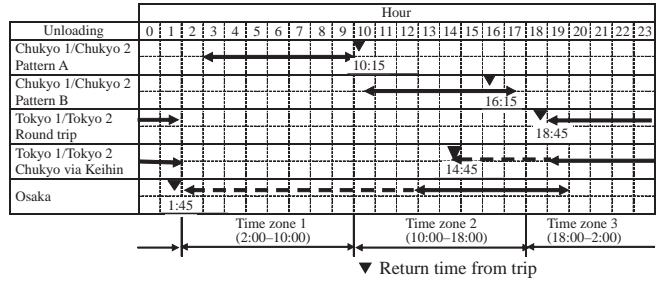


Fig. 8 Loading time zone at Fukuyama

再び福山へ戻る時刻を示す。

Fig. 8から, 福山での荷役作業時間帯は揚げ地別に, 時間帯1(2:00~10:00), 時間帯2(10:00~18:00), 時間帯3(18:00~2:00)の3つに分けられることが分かり, 待機時間の少ない運航パターンの接続は以下のように整理できる。ここで, ◎は最も待ち時間の少ない運航パターン, ○は次に待ち時間の少ない運航パターンを表す。

- ◎中京1/中京2 時間帯1 → 中京1/中京2 時間帯2
- ◎中京1/中京2 時間帯2 → 東京1/東京2 (往復, または京浜寄港) 時間帯3
- ◎東京1/東京2 (往復, または京浜寄港) 時間帯の連続
- 中京1/中京2 時間帯2 → 中京1/中京2 時間帯1
- 東京1/東京2 (往復, または京浜寄港) 時間帯3 → 中京1/中京2 時間帯1

このような事前検討結果に基づき, Fig. 9に示すヒューリスティクスによりシミュレーションを行った。これは, 上記の待ち時間の少ない運航パターンをルールベースで組み合わせる第一段階と, 荷役と航海を連携させるスケジューリング問題を「資源制約型プロジェクトスケジューリング問題(RCPSP)」⁴⁾として定式化し, 最適化問題をタブーサーチ法によって解く第二段階との, 2段階からなるヒューリスティックアルゴリズムである。

2.2.5 京浜寄港シミュレーション

シナリオ1のシミュレーション結果の航海数を現状と比較してTable 3に示す。また, 運航スケジュールをFig. 10に示す。Fig. 10では, 実線がRoRo船の運行を表し, 各港に描かれた長方形が積み地揚げ地の組み合わせを表している。シミュレーション結果より, 現行の福山発の航海数を減らすことなく, 10航海/月の京浜寄港が可能であることが分かった。また, Fig. 10に示すように, 格揚げ地別荷役も時間的に偏ることなく割り付けられている。

従来の航海数を維持したままで目標とする10航海の京浜寄港が可能であるという結果が得られたことは, 定性的には以下のように解釈できる。

- (1) 2.2.4項に示した待ち時間の少ない運航パターンの接続の最大化が図られている。

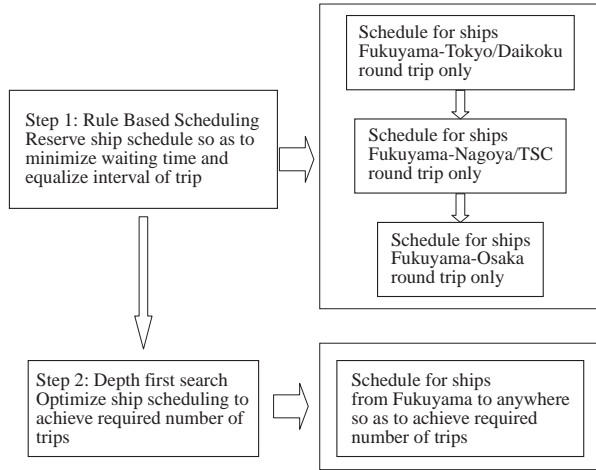


Fig. 9 Heuristic algorithm for RoRo ship scheduling

Table 3 Simulation result of Case 1 (Number of trips)

Loading	Fukuyama				Tokyo	Keihin	Total
	Osaka	Chukyo 1 Chukyo 2	Tokyo 1 Tokyo 2	Sub total			
Un loading						Chukyo 1 Chukyo 2	
Operation result	13	31	21	65	3	-	68
Simura-tion result	13	31	21	62	-	10	72

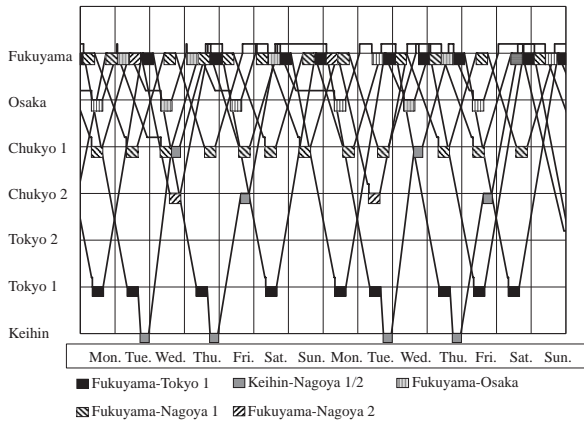


Fig. 10 Simulation result of Case 1 (Ship and loading schedule)

(2) 東京 1 / 東京 2 航路専用船の 2 隻が、各々 1 週間周期で航海頻度の平準化を実現しつつ京浜積み荷役非稼働日を回避できている。

また、シナリオ 2 のシミュレーション結果を **Table 4** に示す。シナリオ 2 ではシナリオ 1 より航海数が減少してしまうことが分かった。この原因は、Fig. 8 に見られるように、中京 1 / 中京 2 航路専用船の福山での荷役時間が他港向けの荷役時間と重複することにより生じたものである。

このような知見を踏まえ、京浜寄港はシナリオ 1 により実施されることになった。RoRo 船京浜寄港は 2005 年 2 月から運用を開始し、9 航海 / 月の京浜寄港を行っている。

今後は、主に倉敷からの海上輸送に用いられているもう

Table 4 Simulation result of Case 2 (Number of trips)

Loading	Fukuyama				Tokyo	Keihin	Total
	Osaka	Nagoya 1 Nagoya 2	Tokyo 1 Tokyo 2	Sub total			
Un loading						Nagoya 1 Nagoya 2	
Operation result	13	31	21	65	3	-	68
Simura-tion result	13	31	21	62	-	10	72

一つの型の特殊船（ニューウェーブ船）と RoRo 船の一体運用によるさらなる新航路の検討を行う予定である。

3. おわりに

計算機能力の進歩とともに最適化手法も進化してきており、計画問題に合わせた最適化手法の選定と解き方を工夫することによって、短時間で高精度の計画を自動生成することが可能となってきている。本稿では、その例として、物流計画の最適化の事例を紹介した。

鋼材の広域配送用配車計画の例では、メタヒューリスティクスの適用により、オペレータより短時間で効率的な計画を策定できるようになった。

特殊船運航計画の例では、ヒューリスティクスと最適化を組み合わせることにより、既存航路の航海数を維持したまま京浜寄港の増便が可能という結果が得られた。

このように、最適化技術、シミュレーション技術を適用することで、従来に増して効率的な物流計画を短時間で策定することが可能になる。本稿がこの技術分野の関連各位の参考になれば幸いである。

今後も、これらの技術の開発に鋭意努める所存である。

参考文献

- 1) 木村亮介. 鉄鋼物流における最適化およびシミュレーション技術の活用. オペレーションズ・リサーチ. vol. 51, no. 3, 2006, p. 9-14.
- 2) 柳浦睦憲, 茨木俊秀. 組み合わせ最適化. 朝倉書店, 2001.
- 3) 藤井聡, 大川登志男, 石戸谷直樹. 鋼材の広域配送用自動配車システムの開発. CAMP-ISIJ. vol. 17, 2004, p. 957.
- 4) Nonobe, K.; Ibaraki, T. Formulation and tabu search algorithm for the resource constrained project scheduling problem. Essays and Surveys in Metaheuristics. edited by Ribeiro, C.C.; Hansen, P. Kluwer Academic Publishers, 2002, p. 557-588.



藤井 聡



田鍋 実



吉成 有介