

配船アルゴリズム

小林和博

Ship routing and scheduling algorithm

by

Kazuhiro KOBAYASHI

1. まえがき

内航海運は、トンキロ（輸送量×輸送距離）ベースで国内貨物輸送の約4割を担っている。自動車、鉄道、航空機といった他の輸送モードと比べて大量の貨物を安価に運べるため、産業基礎物資である鉄鋼、石油、セメント等についてはその約8割を輸送している。船舶の平均輸送距離は航空機に次いで大きい、これは内航海運が大量の貨物を長い距離間で輸送するために使われているからである。鉄鋼メーカーやセメント製造会社など、国内各地の工場で製品を生産し出荷している企業は、倉庫や工場間で様々な品目を船舶により輸送している。実際の輸送は輸送を事業として行っている企業に運賃を払って依頼することが多い。ここで、貨物輸送を依頼する企業を荷主とよび、荷主から依頼を受け、輸送を実施する企業をオペレーター（海運会社）とよぶ。荷主と海運会社には資本関係がある場合も多い。貨物輸送依頼のことをオーダーともいう。表1は、オーダーの例である。1つのオーダーは、積港、積日、揚港、揚日、品種、量で指定される。オペレーターは複数の船舶を管理・運用し、荷主から受けたオーダーを処理していく。

オペレーターが管理・運用する船の集合を船隊とよぶ。船隊には自社保有の船舶に加えて、船舶のオーナーから一定期間運用を任される定期用船が含

表1 オーダーの例

積港	揚港	積日	揚日	品種	量
響	田原	5	7	コールドタール	600
相生	田原	6	7	軽油	300
鹿島	新潟	8	11	クレオソート	1200

まれる。また、一時的な需要の増加に対応するため、1航海単位で船をレンタルすることがある。これをスポット用船とよぶ。オペレーターは、荷主からの注文状況と船隊全体の運航状況を併せて考えながら、受注したオーダーをどの船舶でどのようなスケジュールで輸送するかを計画する。同時に、必要であればスポット用船の計画も立てる。これを配船計画という。荷主からオペレーターへのオーダーは、ある時期に複数個まとめて出される。典型的な例では、毎月末に翌月1カ月分のオーダーがまとめて荷主からオペレーターに依頼される。本稿で紹介する事例では、1カ月分のオーダー数は126であり、これらのオーダーを7隻＋スポット用船数隻で処理する。あるオーダー集合を処理するための配船計画は多数存在するので、これらのスケジュールの中からできるだけ効率のよい計画を見つけ出すことが望ましい。

配船計画の効率化は、収益の確保、省エネルギーの双方から重要である。

オペレーターにとっては配船計画の効率性が

直接利益に影響する。オペレーターが受け取る運賃収入は、オーダーの量と輸送距離によって決まるため、あるオーダー集合を処理するにあたっては、船隊の運用コストを下げるほどオペレーターが確保できる利益が増す。船隊の運用コストには、船舶維持費、人件費、など種々の要素が含まれるが、本稿で扱う配船計画で効率化の対象とするのは、スポット用船費用、燃料費などの変動費用である。また、荷主にとっても、配船計画の効率化は望ましい。荷主とオペレーターに資本関係が存在する場合はオペレーターが確保する利益の多寡が自社の業績に影響し、資本関係がない場合でもオペレーターの運用コストが下がれば市場競争を通して支払う運賃の低減が期待できる。また、省エネルギーの実現のためにも配船計画の効率化は有効な対策となる。平成 18 年度に施行された改正省エネ法では、輸送事業者（オペレーターを含む）ならびに荷主に対して、省エネルギー目標および講じる措置の作成が義務づけられている。配船計画の効率化はこのような省エネ計画の一部として検討する価値が大きい。

配船計画の作成は、荷役条件や船舶仕様など複雑な制約を同時に考慮しなければならないため、非常に煩雑な作業となる。例えば、1 ヶ月の計画を作成するために、3 日から 4 日程度の作業が必要である。本来は、より多く利益が確保できるような効率的な計画を作成することが望ましいが、繁忙期には実行可能な計画をなんとか一つ作成するのが精一杯である。この煩雑な配船計画作成作業は、コンピューターによる計算で支援することができる。効率的な配船計画をコンピューターでの計算により作成するための計算手法を、配船アルゴリズムとよぶ。本稿では、配船アルゴリズムの標準的な手法である集合被覆アプローチについて述べる。

2. 配船計画

配船計画問題は、顧客の需要の発生場所、時期、量をみながら船舶の効率的なスケジュールを求める問題の総称であり、船舶スケジューリング問題ともよばれる。配船計画問題では、船舶の基本性能の他に、港での荷役能力や荷役可能時間帯の制限など様々な制約を満たす運航スケジュールの中で、船隊の運用コストを最小にするものを見つけ出すことが目的である。配船計画問題に対しては、荷種が何か、定期船か不定期船か、計画期間と船隊の規模はどの程度か、など、扱う事例の特徴に従って、多くの研究がなされてきた。これらの研究についてはサーベイ論文にまとめられている^{1), 2)}。

配船計画問題は、運航スケジュールに関する制約

条件を数式で記述することにより、数理計画問題に定式化できる。既存研究で標準的に用いられているのは、集合被覆アプローチに基づいた計算手法である。このアプローチは、運航上の様々な制約を柔軟に取り入れることができるため、主に国外で様々な事例に適用され、成功を収めている。

3. 集合被覆アプローチ

配船計画問題は、陸上輸送を意識した配送計画問題とよく似た構造を持つ。配送計画問題は、80 年代から数理計画の研究者が精力的に研究に取り組んできた問題である。これまで、効率的な計算を行うための様々な手法が提案されており、それらは配船計画問題に対しても有効なものが多く、集合被覆アプローチもそのひとつである³⁾。配送計画問題に対して開発された手法を配船計画問題に適用する場合には、海上輸送独特の制約を考慮する必要がある。その中で最も大きなものの一つとして、船舶ごとの仕様の違いが挙げられる。トラックや航空機が、仕様に基いて大量生産される“規格品”であるのに対して、船舶は受注ごとに一隻が建造される“オーダーメイド品”である。したがって、配船計画問題では常に非均質な船隊を扱うことになる。さらに、運搬する品目によって船種が明確に分かれている事が挙げられる。これにより、梱包された小包やコンテナをトラックや鉄道で運ぶときとは違った、複雑な制約が生じる。

集合被覆アプローチは、各船舶が実行可能なスケジュールを予め列挙しておき、その中から、全てのオーダーを処理し、かつ最もコストが小さくなるようなスケジュールを選択する手法であるが、スケジュールを選択する際に集合被覆問題とよばれる数理計画問題を用いる点に特徴がある。

図 1 は、オーダー数が 6、船舶数が 3 である場合の集合被覆アプローチを図解するものである。船舶 1 はスケジュール 1、2、3、4 で、船舶 2 は 5、6 で、船舶 3 は 7、8、9 で運航可能であるとする。第 j 番目のスケジュールを示す列の最上部には、 $x[j]$ が示されている。第 j 番目のスケジュールで運航した際に処理されるオーダーの行には、1 が示されている。例えば、船舶 1 がスケジュール 1 で運航した場合には、オーダー 1 とオーダー 2 が処理される。引き受けた 6 つのオーダーは全て処理される必要があるので、各オーダーはいずれかの船舶で処理されなければならない。いま、船舶 1 がスケジュール 2 で、船舶 2 がスケジュール 5 で、船舶 3 がスケジュール 7 で運航するとする。この

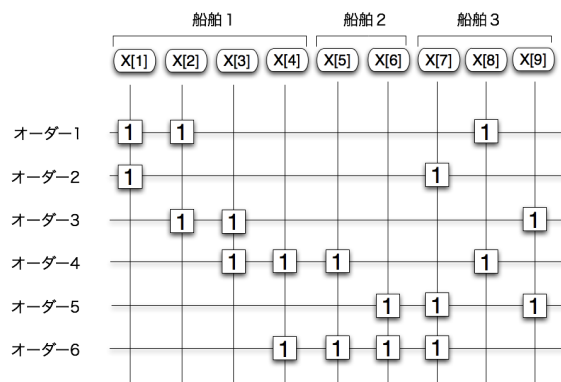


図1 集合被覆アプローチの図解

場合、全てのオーダーがいずれかの船で少なくとも一度は処理されるため、実行可能なスケジュールとなる。他に、船舶1がスケジュール1で、船舶2がスケジュール5で、船舶3がスケジュール9で運航する場合も実行可能なスケジュールとなる。このような複数の実行可能なスケジュールの中から最も運航コストが安くなるものを選択するために、集合被覆問題を用いる。

第 j 番目の候補スケジュールに対応して、変数 $x[j]$ を定義する。この変数は、第 j 番目のスケジュールを採用するときに1を、採用しないときに0をとる変数である。これらを成分とするベクトル $\mathbf{x}$ を用いると、各オーダーがいずれかの船舶の運航スケジュールによって処理される条件は

$$\mathbf{Ax} \geq \mathbf{1}$$

という線形不等式によって記述することができる。ここで、行列 $\mathbf{A}$ の (i, j) 成分は、第 j 番目の候補スケジュールがオーダー i を処理するときに1、それ以外のときには0と設定する、右辺 $\mathbf{1}$ は要素がすべて1であるベクトルである。また、第 j 番目の候補スケジュールに関して、そのスケジュールで運航した場合のコストを定め、 $c[j]$ と表す。この $c[j]$ を成分とするベクトル $\mathbf{c}$ を用いて、目的関数を $\mathbf{c}^T \mathbf{x}$ と定義する。これによって、集合被覆問題が定義できる。

(集合被覆問題)

$$\begin{aligned} & \text{最小化 } \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ & \text{制約条件 } \mathbf{Ax} \geq \mathbf{1}, x[j] \in \{0, 1\} \end{aligned}$$

集合被覆問題は、整数計画問題³⁾とよばれる数理計画問題の特殊形である。整数計画問題の制約式と目的関数を定める行列 $\mathbf{A}$ 、ベクトル $\mathbf{b}$ および $\mathbf{c}$ を決められた形式で入力すると、その解を計算するソフトウェアが複数開発されている。これらは、データがどのような実際問題を表現しているかに

関わらず答えを計算する、という意味で汎用的である。そこで、汎用ソルバーとよばれる。整数計画問題は、NP-困難とよばれる計算量的に難しい問題のクラスに属する³⁾。一般に、同じ「入力サイズ」をもつ問題例を解く「最悪時のステップ数」が入力サイズの多項式で評価できるアルゴリズムを多項式時間アルゴリズムとよぶ。多項式時間アルゴリズムが存在する問題は易しい問題、多項式時間アルゴリズムが見つからない（おそらく存在しない）問題は難しい問題とされる。NP-困難な問題には多項式時間アルゴリズムはおそらく存在せず、指数時間以上の計算時間がかかると多くの研究者が信じている。指数時間以上の計算時間がかかるとは、言い換えると、規模の増加に伴い計算時間が急激に増加する“組合せ爆発”を引き起こすということである。ところが、汎用ソルバーには組合せ爆発を回避するための様々な工夫が組み込まれており、問題に応じて適切な定式化を行うことによって大規模な問題でも高速に解くことができる場合が少なくない。配船計画問題は効率的な定式化に向けた構造を持っており、高速な汎用ソルバーを用いれば、1か月、10隻、数百オーダー程度の配船計画問題であれば、集合被覆アプローチによって（よほど問題の性質が悪くない限り）十分高速に解くことができる。

集合被覆アプローチでは、各船舶が実行可能なスケジュールを見つけ出し、行列 $\mathbf{A}$ の列に加えることが必要である。問題のサイズ（隻数、オーダー数）が小さいか、スケジュールの制約条件が厳しければ、全ての可能なスケジュールを列挙すればよい。ところが、この方法だとオーダーの内容によっては非常に長い計算時間がかかる場合がある。そこで、有望なスケジュールのみを候補とし、行列 $\mathbf{A}$ の列に取り入れる手法を採用する。有望なスケジュールを見つけ出すには、船舶ごとに「最

表 2 配船アルゴリズム適用結果

	用船処理オーダー数	総航行距離（海里）	計算時間（秒）	距離減少率
実績	10	38973	—	—
ケース 1	9	38708	547	0.7%
ケース 2	10	36105	558	7.9%
ケース 3	11	35846	539	8%

短路問題」とよばれる問題を定義する。この問題を解いて得られるスケジュールを行列 **A** の列として加える。この方法は「列生成法」とよばれ、最短路問題が高速に解ける場合には効率的な計算が行えることが分かっている³⁾。

船舶ごとの最短路問題は、運航上の制約を適切に定式化できるように定義する必要がある。幸い、最短路問題には様々なバリエーションが提案されているので、扱う業務にあったバリエーションを選択することにより、制約条件を忠実に反映したモデル化が可能である。次章で紹介するケミカルタンカー船隊に対する事例では、「時刻依存最短路問題」とよばれるバリエーションを用いた。

4. 実務への適用例

前章で述べた集合被覆アプローチに基づくアルゴリズムをケミカルタンカー船隊の実務データに適用し、その有効性を検証した。このデータでは、自社船隊 7 隻、寄港地 25 港、計画期間 36 日、オーダー数 128、品種 17 種である。どのような配船計画を望ましいとみなすかは状況によって異なる。海技研で開発したアルゴリズムでは、スポット用船で処理するオーダー数の最小化、総航行距離の最小化、のどちらを目的として設定するかを実行時にユーザーが選択できるようにした。目的としてこれら以外のものを定義することも可能である。

使用した計算機は、演算装置が Intel Core 2 Duo E6700 2.67GHz、メモリが 2GB RAM、OS が WindowsXP のパソコンである。時刻依存最短路問題、整数計画問題、線形計画問題のモデリング言語として Dash Optimization 社の Xpress Mosel Version 1.6.3 を、線形計画問題および整数計画問題の汎用ソルバーとして Xpress Optimizer Version 17.10.04 を用いた。

表 2 に数値実験結果を示した。実績ではスポット用船で処理するオーダー数が 10、総航行距離が 38973 であった。ケース 1 は、スポット用船で処理するオーダー数を最小にする配船計画を計算した結果であり、実績より 1 減らすことに成功して

いる。ケース 2 では、スポット用船で処理するオーダー数を実績（10）以下にするという条件のもとで、総航行距離を最小化する計画を計算した結果であり、10 分未満の計算時間で 7.9 パーセント距離を減少させることに成功している。ケース 3 は、スポット用船で処理するオーダー数を実績より 1 多い 11 にしたときに、総航行距離を最小化する計画を計算した結果である。

5. まとめ

本稿では、効率的な配船計画をコンピュータで作成するための手法である集合被覆アプローチについて述べた。さらに、このアプローチに基づき海技研で開発したアルゴリズムを、国内船社の実務データに適用した結果について述べた。

謝辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）先導研究開発「内航船の環境調和型運航計画支援システムの研究開発」の一部として行った。

参考文献

- 1) M.Christiansen, K.Fagerholt, and D.Ronen, “Ship routing and scheduling: Status and perspectives”, Transportation Science, Vol.38, pp.1-18, 2004
- 2) D.Ronen, “Cargo ships and routing and scheduling: Survey of models and problems”, European Journal of Operational Research, Vol.12, pp.119-126, 1983
- 3) 久保幹雄, 田村明久, 松井知己編集:「応用数理計画ハンドブック」朝倉書店, 第 1 版, 2002