

海上ロジスティクス工学 —数理最適化技術による輸送の効率化—

海上技術安全研究所物流研究センター研究員 小林和博

1. 高効率海上物流システムの実現に必要な基盤技術

国内物流のモーダルシフトを一層推進し、日本と諸外国との間の物流の円滑化を図るための効率的な海上物流システムの構築が求められている。そのためには、国内外の物流需要動向および船舶動静の把握、高効率海上物流システムの設計技術が必要である。(独)海上技術安全研究所物流研究センターでは、このような技術を確立するために、以下の研究を行っている。

1. 東アジア貨物流動データベースの構築とその活用に関する研究
2. 環境対応型航海支援システムの開発
3. 物流動向を考慮した新船仕様決定手法の開発

1.1 東アジア貨物流動データベースの構築とその活用

国内外での貨物輸送状況を知るには、運航中の船舶動向・仕様、建造予定の船舶仕様、建造数、港湾での荷捌き量などの系統的なデータが必要である。ところが、現時点ではこのようなデータベースは整理された形で存在していない。そこで、各国の関係機関と連携し、貨物流動データベースの構築を行っている。将来的には、これらのデータを用いて、効率的な航路ネットワークの設計手法、物流需要に対応した船舶仕様の決定手法を確立することを目指している。

1.2 環境対応型航海支援システムの開発

船舶の運航による環境負荷を低減する技術として、ハードウェアの改善によるものがある。例として、船型の改良、機関の高効率化があげられる。一方で、現状のハードウェアを用いても、ソフト面(運用方法)を改善することにより環境負荷を低減することも可能である。この研究では運用方法の改善により、環境負荷の低減を実現する技術の開発を行っている。より具体的には、

- ・気象・海象を考慮した船速・航路計画手法の開発
- ・効率的な配船計画の自動作成手法

の開発を行っている。

1.3 物流動向を考慮した新船仕様決定手法の開発

海運各社では、将来の貨物量の変動を見越して、随時船隊の構成を見直す必要がある。新船を建造する場合、その性能が良くなるほど建造費用が大きくなり、また建造後の運用コストも大きくなる。したがって、貨物需要を過不足なく処理できるような仕様で建造する必要がある。この研究では、貨物需要の変化に応じて投入する新船の適切な仕様を定量的に決定するための手法の開発を行っている。

2. 物流と数理計画

物流はロジスティクスの一部であり、ロジスティクスとは物の流れの最適化に他ならない。数理計画は、最適化理論の一分野であり、数式モデルを経由したアプローチに特徴をもつ。数理計画の最近の進歩は目覚ましい。最近では、計算機の速度の向上をはるかに上回る速度で、市販の混合整数計画ソルバーの性能が向上しており、その実務への適用が期待される。

物流における数理計画の利用は多岐にわたる。古典的なWeber型施設配置モデルや経済発注量モデルは、数理計画の分野では非線形計画で求解でき、輸送手段の巡回順決定モデルやロジスティクス・ネットワーク設計モデルは、混合整数計画に帰着される。

数理計画は、うまく用いれば物流効率化のための非常に強力な武器になる。当センターでは、海上輸送の効率化のための手法として、数理計画の手法を取り入れつつある。以下では、環境適応型航海支援システムへの数理計画の適用例をのべる。

2.1 数理計画

数理計画とは、実際の問題を数式として書き下すことを経由して最適解（最もよいことが保証された解）、もしくはそれに近い解を得るための方法論である。通常、数式は一つの目的関数といくつかの制約式から構成される。数理計画モデルの種類には色々なものがあるが、最も基本的でかつ簡単なものとして、線形計画モデルがある。線形計画モデルとは、目的関数およびすべての制約式が線形式であるモデルを表す。このモデルは解きやすく、実際問題の最適解を極めて短時間で解くことができる。残念なことに、我々が実務で出会う問題が全て線形計画モデルとして定式化できるわけではない。求めたい変数が特定の整数であるという制限を付けたモデルは整数計画モデルとよばれ、工夫次第で様々な実際問題を表現することができる。また、一部の変数が整数に限定されている場合を、混合整数計画モデルとよぶ。整数計画や混合整数計画モデルでは、問題の規模の増加に伴い計算時間が急激に増加することが（おそらく）避けられないことが示されており、このような現象は一般に「組合せ爆発」とよばれる。数理計画パッケージに含まれるソルバーには組合せ爆発を回避するための種々の工夫が組み込まれている。大規模な問題は性能のよいソルバーを用い、その内部アルゴリズムで解きやすいようにモデルを定式化することにより解くことができる場合も少なくない。

整数計画問題の整数変数を連続変数とみなしたものが線形計画緩和問題である。線形計画緩和問題の情報を用いて整数計画問題を解く方法はよく用いられる。目的関数およびすべての制約式が線形式とは限らない場合は非線形計画モデルとよばれる。制約式をみたすベクトルの集合を実行可能領域といい、その領域内のベクトルを実行可能解という。いま、実行可能領域が凸集合の場合を考える。目的関数が凸関数であれば、その最小化問題の最適解は勾配を0とおいた方程式を解くことによって得られる。一方、目的関数が凹関数の場合、その最小化問題の最適解は実行可能領域の端点となることはわかっているものの、通常その端点が非常に多いため、最適解を得ることは容易ではない。非線形関数を線形関数の集まりとして近似する方法として区分的線形関数を用いた方法がある。区分的線形関数を用いて近似した問題は線形計画モデルに帰着できるため、大規模な問題でも短時間で解くことができる。

数理計画は諸刃の剣である。うまくはまると現実問題を鮮やかに解決してくれる。その一方、使い方を間違えると現実問題の解決とはほど遠い解を算出する。対象とする物流の実際問題のほとんどは、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。したがって、万能の解法は存在せず、問題ごとに工夫されたアプローチが不可欠である。例えば、双対ギャップが小さくなるような強い定式化、解の対称性を避ける定式化、カットを生成するための工夫、列生成法やLagrange緩和などの問題の構造を利用した解法などが代表例であるが、これらの適用は数理計画の専門的な知識が必要になる。

航海支援システムの開発において有用な数理計画の手法として、船速・航路計画の最短路問題としての定式化と、その動的計画法による解法、および、配送計画問題の集合被覆問題としての定式化と、その列生成による解法が挙げられる。

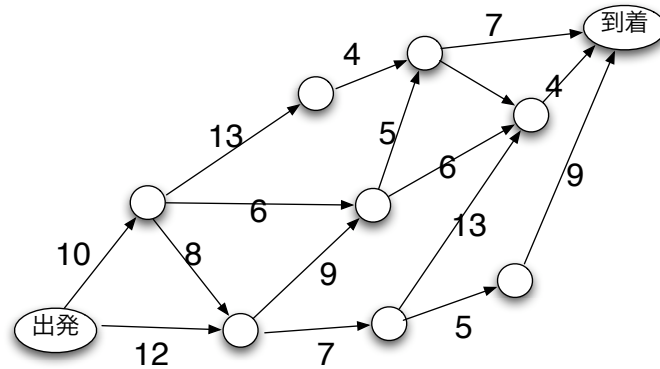


図1. 最短路問題

2.2 最短路問題

出発港から到着港まで、燃量消費量を最小にするような船速・航路計画を求めることを考える。このために、まず、船舶の運航を最短路問題として定式化する。このために、出発港から到着港の間の海域に、格子点を設定する。通過する格子点を順に並べることにより、船舶の航路と船速を表すとする。船舶はこの格子点を順にたどることにより到着港まで運航する。ある格子点Aから別の格子点Bに移動できるときにAからBに有向枝を張り、移動コスト（この場合はAからBへの移動にかかる燃量消費量）を付けておく（図1）。こうして定義したネットワーク上で、燃量の和が最小になるような出発港から到着港までの航路を求める問題は、最短路問題とよばれる。最短路問題は解きやすい数理計画問題の代表例であり、現在の計算機では数千万点程度の問題が数秒で解ける。ところが、実際問題を定式化するには単純過ぎる場合も多い。そこで、実際問題をうまく扱うために、様々な拡張が研究されている。それらの中で、船速・航路計画に有用なものに、次のものがある。

- ・時刻依存の移動時間をもつ最短路
- ・不確実な移動時間をもつ最短路
- ・多目的を有する最短路

2.2.1 時刻依存の移動時間をもつ最短路

船舶の運航には気象・海象が影響を及ぼす。そのため、あるA点からB点への移動であっても、A点から出発する時刻が異なると、B点までの移動時間が異なる。これは、時刻依存の移動時間をもつ最短路として定式化できる。この問題は、時空間ネットワーク上の最短路問題として定式化できる。時空間ネットワークのサイズが大きくなる可能性はあるが、充分高速に解くことができる。

2.2.2 不確実な移動時間をもつ最短路問題

気象シミュレーションの高度化により、海域上の2点間の移動時間の予測の高精度化が可能になりつつある。ただし、予測なのである程度は外れることは免れない（不確実性をもつ）。すなわち、ネットワーク上の2点間の移動費用が定数として正確にわかるわけではなく、ある幅でしか評価できないという状況である。このようなネットワーク上で最短路を求める手法として、ロバスト最適化手法が存在する。ロバスト最適化を用いると、移動時間がある範囲内で変化しても到着予定時刻が大きく変わることがない、いわゆる頑強な（ロバストな）最短路を求めることができる。ロバスト最適化では、その不確実性を、とり得る値の幅で指定すればよく、確率分布を仮定する必要がない。海上での気象現象は、そもそも実績値を計測することが非常に困難である。したがって、予測値の誤差評価や、その現象がしたがう確率分布の推定も非常

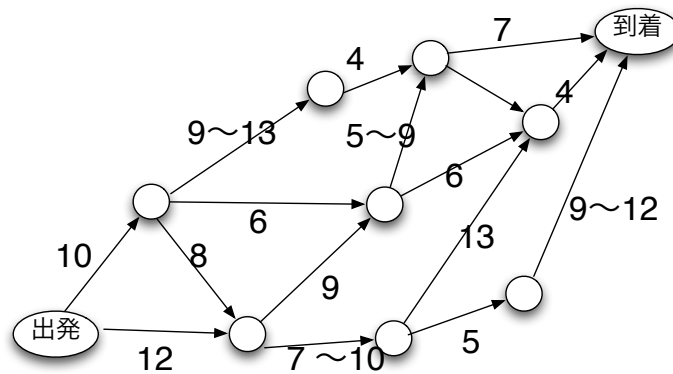


図2. 不確実な移動時間をもつ最短路問題

に困難である。そこで、確率分布を仮定する必要のないロバスト最適化の手法は、海上での不確実性を扱う上で望ましいものである。

2.2.3 多目的を有する最短路問題

船舶は、常に燃量を最小化する航路で常に運航できるわけではない。現実の航海では燃量の最小化だけではなく、種々の目的のバランスを要求する。最もよく課されるのは、到着時刻を守ることである。この場合、「指定された到着時刻以前に到着する航路・船速計画の中で、最も燃量消費量の和が小さくなるものを求める」必要がある。この場合、ネットワークの枝には、燃量消費量の外に移動時間を付加する。このネットワーク上で、「指定された到着時刻以前に到着する航路・船速計画の中で、最も燃量消費量の和が小さくなるものを求める」問題は、二目的最短路と呼ばれ、ラベリングアルゴリズムにより効率的に解を求めることができる。このアルゴリズムは、基本的な最短路の場合と異なり多項式時間のアルゴリズムではないが、航路・船速計画で用いる数百点程度の問題であれば、充分高速に解くことができる。

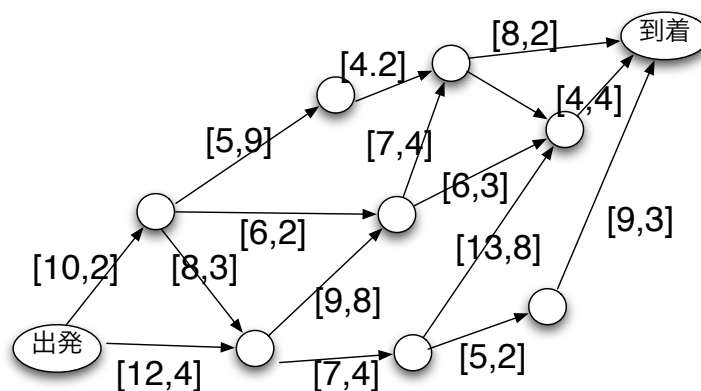


図3. 二目的最短路問題

2.3 配船計画問題

配船計画問題は、オペレーターが、荷主の輸送需要の発生場所、時期、量をみながら船舶の効率的なルートを求める問題の総称である。配船計画問題では、船隊を構成する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を考慮しつつ、船隊の運用コストを最小化することを目的とする。荷主とオペレーターにとって、配船計画の効率化は、収益、省エネルギーの2点から重要である。ある一定数のオーダーを運搬する場合、運賃はあらかじめ決まっているため船隊の運用コストを下げるほど収益が増すが、その運用コストは配船計画の効率の善し悪しに直接影響される。したがって、配船計画の善し悪しが直接収益に影響する。また、平成18年度に施行された改正省エネ法では、輸送事業者ならびに荷主に対してエネルギー使用合理化に対して講じるべき措置が定められている。配船計画の効率化はこのような措置の一部として検討する価値が大きい。

配船計画問題は、配送計画問題とよばれる数理計画問題と同様の数理的構造をもつ。配送計画問題とは、主にサプライ・チェーンの最下流で発生し、複数の需要地点に輸送手段（トラックや船、運搬車ともいう）を用いて、巡回しながら物を運ぶ問題である。配送計画問題の基本形は以下の仮定をもつ。

1. デポとよばれる特定の地点を出発した運搬車が、顧客を經由し再びデポに戻る。このとき運搬車による顧客の通過順をルートとよぶ。
2. デポに待機している運搬車の種類および最大積載重量は既知である。
3. 顧客（需要地点）の位置は既知であり、各顧客の需要量も事前に与えられている。
4. 地点間の移動時間、移動距離、移動費用は既知である。
5. 1つのルートに含まれる顧客の需要量の合計は運搬車の最大積載重量を超えない。
6. 運搬車の台数は決められた上限を超えない。
7. 運搬車の稼働時間が与えられた上限を超えない（超過時間を残業費用として考える場合もある）。

通常は、さらに需要地点への到着時間枠など様々な条件が付加される。これらの付加条件をすべて取り去った問題は、巡回セールスマン問題とよばれる古典的な組合せ最適化問題になる。巡回セールスマン問題に対しては、最大で24,978個の地点を巡回する最適解が数理計画ベースの（とは言っても問題の特性をフルに活かした）解法で求められているが、配送計画問題に対しては、このようなアプローチは推奨されない。数理計画ベースの解法としては、輸送手段に対して可能な巡回路を部分的に列挙し、必要に応じて巡回路を追加する列生成法とよばれ解法がしばしば有効である。

船舶による貨物輸送の目的は、必要なものを必要な場所に必要な時に届けることである。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支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（鉄鋼メーカーやセメント製造会社）を荷主といい、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と呼ぶ。荷主は「10月1日にA港にある鉄鉱石200トン」を、10月3日までにB港に届けてください」という注文をオペレーターに対して行う。オペレーターは、自社で管理運用している複数の船舶を用いて、荷主から引き受けた輸送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舶を、まとめて船隊と呼ぶ。船隊は通常複数の船舶からなっている。各船舶がいつ何をどこからどこに運ぶかは、オペレーターの担当部門が決定し、それを各船長に指示する。各船舶は指示されたスケジュールに従い、輸送オーダーを処理していく。

引き受けた輸送オーダーを処理するための各船舶のスケジュールは多数存在する。そして、それらのうちのどのスケジュールにより運航したときの、航行距離（環境負荷評価値）は互いに異なる。つまり、全く同じ輸送オーダーを処理するにも、どの船で、どの輸送オーダーを、どの順序で輸送するかにより、環境に与える負荷が異なるのである。そこで、オペレーターは、指定通りに貨物を届けるという条件の中で、できるだけ航行距離（環境負荷評価値）が小さくするようなスケジュールを選択することにより、環境に与える負荷を低減することができる。

現在は、オペレーターの計画作成担当者が、荷主からの輸送オーダーを一覧にした台帳を見ながら、経験に基づいて様々なケースを試行錯誤することによって計画を作成している。経験のある担当者であれば、荷役時間、荷役可能時間帯、船速、気象など様々な条件を考え併せた上で、全ての輸送オーダーを処理するスケジュールを作成することができる。ところが、運航可能なスケジュールを作成すること自体が手間のかかる作業であるため、スケジュールが環境に与える影響までを考えた計画を作成することはできないのが現状である。この計画作成作業は、集合被覆問題として定式化することにより、コンピュータによる計算で効率的に行うことができる。

2.3.1 配船計画に対する集合被覆アプローチ

当センターでは、配船計画問題に対し、その数理的構造を最大限に活かした計算手法を開発している。ここではその中から、集合被覆アプローチと呼ばれる計算手法について紹介する。集合被覆アプローチは、各船舶が運航可能なスケジュールを予め列挙しておき、その中から、全ての輸送オーダーを処理し、かつ最も航行距離(環境負荷評価値)を小さくするような運航スケジュールを選び出す方法である。多数のスケジュール候補の中から航行距離(環境負荷評価値)の最も小さなものを選び出す際に「集合被覆問題」と呼ばれる数理計画問題を用いる点に特徴がある。

表1. 運搬オーダーの例

積港	揚港	積日	揚日	品種	量
徳山	新潟	2	5	CBO	800
鹿島	新潟	8	11	RT	1506
鹿島	和歌山	4	6	RT	501
鹿島	坂出	4	7	RT	1005

ここでは、白油タンカーを管理運用する国内オペレーターの配船計画作成業務を例にし、集合被覆アプローチに取り入れる各種運用条件と、計算手法による効率化の結果について述べる。各港間を移動する所要時間は与えられているとする。本事例では、オペレーターは7隻からなる船隊を運用している。船の性能として、空船船速、満船船速、ハッチ容量が与えられている。船舶の仕様の相違によって、ある輸送オーダーを処理できる船舶とできない船舶が生じる。この場合、オーダーを処理できる船速とハッチ容量を持つ船舶であれば、どの船舶が輸送してもよいとする。各輸送オーダーは複数の船舶に分けて輸送することはできないが、1つの輸送オーダーを一隻の船の複数のハッチに分けて積み、輸送することはできるとする。ハッチへの貨物の積載については次のような条件がある。

貨物積み込みに関する条件

1. ハッチを分ければ同時に異なる輸送オーダーの貨物を一隻で同時に運ぶことができる。
2. ハッチによって積める貨物の種類に制限はない(どのハッチにどの貨物を積んでもよい)。
3. 1つのハッチには1つの輸送オーダーの貨物しか積めない。

荷主からの輸送オーダーは、月末に翌一ヶ月分がまとめてオペレーターに伝えられる。オペレーターはこれらの輸送オーダーを処理するために、翌一ヶ月分の船隊のスケジュールを作成する。荷主からは各輸送オーダーの積み港と揚げ港が指定される。港での荷役についてはさまざまな制約条件が課せられている。本事例で扱う制約条件は次のとおりである。

荷役時間に関する条件

1. 1つの港には同時に何隻でも着棧、荷役できる。

2. 午前8時から午後3時の間に着棧した場合は、着棧後すぐに荷役を開始できる。
3. 午後3時を過ぎて着棧した場合、翌日の午前8時に荷役を開始できる。
4. 荷役の終了時刻に制限はない。
5. 荷役が終わり次第出港できる。
6. 積み荷役は、積み指定日の午前8時以降に開始できる。
7. 揚げ荷役は、揚げ指定日以前の午前8時から午後3時であればいつでも荷役を開始できる。

なお、同一の港で複数の貨物の荷役を連続して行う場合は、特別な扱いをする。

同じ港で同日に2つの貨物の積み(揚げ)荷役を行う場合の荷役条件

1. 最初の積み(揚げ)荷役が終わり次第、次の積み(揚げ)荷役を開始できる
2. 最初の積み(揚げ)荷役が午前8時から午後3時の間に開始できれば、次の積み(揚げ)荷役は午後3時以降であっても開始できる。

また、港での荷役にかかる時間は、貨物の量を荷役能力で割ることで求める。ここで荷役能力とは、1時間あたりに積むことができる貨物の量(KL/時間)である。荷役能力は、港ごと、積み揚げ別に指定することができる。

2.3.2 計算結果

このような条件で、実際にオペレーターから提供を受けたある月の輸送オーダー(前後数日分を入れて36日間)について、集合被覆アプローチに基づく計算手法により配船計画を作成する数値実験を行った。船隊を構成する船舶は7隻であり、36日間に輸送する必要のある輸送オーダーは126であった。これらの貨物を国内25港の間で輸送する。

表2. 集合被覆アプローチの計算結果

	総航行距離	計算時間	航行距離減少率
実績	38973	-	-
計算結果	36105	558秒	7.9パーセント

計算により得られた結果が表2である。この36日間に実際に船舶が航行した実績距離は、38973海里である。これに対して、集合被覆アプローチによって計算した配船計画では、36105海里であり、7.9パーセントの航行距離の減少が実現できている。この計算手法は、通常のデスクトップパソコンで数分で動作するものであり、日常業務で容易に使用することができる演算時間となっている。

このように適切に設計された配船計画作成アルゴリズムは、実用的な計算時間で効率のよい計画を計算することができる。

なお、この事例研究の一部は、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ものであり関係各位に感謝申し上げます。

3. おわりに

海上輸送の効率化のためには、データ整備、シミュレーション技術、最適化技術などの連携が重要である。本稿では、特に数理最適化による航海支援システムの効率化の手法についてのべた。近年の計算機科学の発展により、従来は実用的ではないと言われていた計算手法が実用レベルになりつつある。これらの技術を積極的に取り入れることにより、海上輸送の効率化を実現する手法の確立が重要である。

参考文献

M.Christiansen, K.Fagerhold, D.Ronen, "Ship routing and scheduling: Status and Perspectives", *Transportation Science*, Vol.38, pp.1--18, 2004.

D.Ronen, "Cargo ships and routing and scheduling: Survey of models and problems", *European Journal of Operational Research*, Vo.12, pp.119-126.

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, 2002.