

数理モデルを活用した環境負荷低減と物流コスト削減のための輸送経路改善

Optimization of Transportation Channels Based on Mathematical Models for Reducing Environmental Burden and Distribution Costs

あらまし

京都議定書の発効などにより、近年、企業の環境問題への積極的対応は不可欠である。さらに、改正省エネ法の施行により、運輸部門においてもCO₂排出量の削減が必要となった。その対応策の一つとしては、輸送経路の改善が考えられるが、コストを無視することはできず、環境負荷低減と物流コストの双方の観点から輸送経路の改善を図る必要がある。

本稿では、住金物産株式会社様と共同で取り組んだアパレルグリーン物流プロジェクトである、海外（中国）拠点から国内の納品先店舗までの国際輸送経路の改善事例と、数理モデルを活用した効率的な国際輸送経路を算出できるシステムについて紹介する。

Abstract

In recent years, to implement the Kyoto Protocol it has become essential for companies to tackle environmental issues. Furthermore, enforcement of “The Revised Law Concerning the Rational Use of Energy” has made reductions in carbon dioxide emissions necessary in the transportation sector. The optimization of transportation channels is a conceivable measure for responding to this situation. However, companies cannot ignore costs, and therefore both environmental and financial issues must be considered when optimizing transportation channels. This paper presents an example of how the international transportation channels for apparel products from production bases in China to Japanese domestic retailers were optimized in the Apparel Green Distribution project that we established with Sumikin Bussan Corporation. Then, it introduces a system that can calculate the most effective international transport channels based on mathematical models.



太田 崇（おおた たかし）

（株）富士通総研 第一コンサルティング本部研究開発部 所属
現在、物流分野や環境問題において、数理モデルを活用したコンサルティングなどに従事。



山根審治（やまね しんじ）

（株）富士通総研 第一コンサルティング本部研究開発部 所属
現在、物流分野において環境対策を考慮した、システム企画や政策支援などのコンサルティングに従事。

ま え が き

近年、企業の環境問題への取組みは不可欠になりつつある。2005年2月16日に発効した京都議定書（気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書）では、先進国などに対して、2008～2012年の間に、温室効果ガス6種〔CO₂、メタン、亜酸化窒素、ハイドロフルオロカーボン類（HFCs）、パーフルオロカーボン類（PFCs）、六フッ化硫黄〕を1990年比で一定数値の削減を義務付けている。主要国の削減率は、日本6%、米国7%、EU8%、カナダ6%、ロシア0%などと定めており、全体では5.2%の削減を目指している。

また、2006年4月1日に施行された改正省エネ法（エネルギーの使用の合理化に関する法律）では、運輸分野において、自らの事業活動に伴って貨物輸送を委託している量（自ら輸送している量も含む）が、3000万トンキロ以上の荷主と基準以上の輸送能力を有する輸送事業者に対して、省エネ計画の作成とエネルギー使用量の定期報告が義務付けられた。これにより、運輸分野における環境問題への取組みも不可欠となった。

本稿では、住金物産株式会社様（以下、住金物産）の事例として、アパレル物流における環境負荷と物流コストの削減を目指した国際輸送経路改善、効率的な輸送経路を算出するシステム、数値実験による効果測定の結果を紹介する。

国際輸送経路の改善

住金物産の繊維部門において、環境負荷（CO₂排出量）と物流コストの双方を削減するという観点から、アパレル物流の海外（中国）拠点から国内の納品先店舗までの国際輸送経路の改善を行った。

一般的に、アパレル商品は季節変動や流行の影響を受けやすく需要予測が難しいため、メーカーは短納期での小口・分納を海外拠点に求める傾向にあり、多頻度少量輸送が増大している。また、製造原価削減のために、中国などでの海外生産への切替えが進み、国際輸送が増加している。そして、その輸入貨物の多くは、メーカー指定の店別配分拠点である物流倉庫へ一括納品となっており、そこから、全国各地の納品先店舗へ、トラックでの長距離輸送を行っている。

● 現状の輸送形態

住金物産におけるアパレル物流は、

- (1) 海外縫製工場から海外物流拠点への輸送
- (2) 海外物流拠点から港・空港への輸送
- (3) 海外の港・空港から国内の港・空港への国際輸送
- (4) 国内の港・空港から国内物流センターへの輸送
- (5) 国内物流センターから納品先店舗への配送

と、輸送が段階的に分かれており、それぞれを別々の担当者が管理している。また、国内の物流拠点は、店舗別配分を効果的に行うために、集約化を図っており、一つの物流拠点から全国の店舗に向けて配送を行っている。そのため、国内物流では、長距離輸送や横もち輸送^(注1)が頻繁に発生している。

● 国際輸送経路の改善

CO₂排出量削減の観点から考えると、国内物流で頻繁に発生している長距離輸送や横もち輸送を減らすことで、トラックでの総輸送距離を削減することが重要なポイントとなる。そのためには、物流拠点の集約化を解除し、納品先店舗の位置を考慮して、最寄りの港、または空港に荷揚げを行う必要があり、国際輸送経路全体を改善することが必須となる。具体的には、東京港や横浜港などへの一極集中を是正し、下関港、大阪港といった各地方の納品先店舗に近い港への荷揚げも行うことによって、国内のトラックでの総輸送距離を削減する。

これを物流コストの観点から考えてみる。長距離輸送や横もち輸送の削減によって、国内の輸送コストは削減できると考えられるが、それぞれの港に荷揚げを行うと、通関などにかかるコストの増加を避けることはできない。よって、物流コストとしては、輸送コストなどの削減と通関コストなどの増加のバランスを考えて、効率的な輸送計画を立てることが必要となる。

上記改善案を実施するためには、業務の変更や国際輸送経路算出システムの活用が不可欠である。

まず、業務としては、海外物流センターで商品を集約し、納品先店舗別の配分作業、検品作業、値札取付けなどの流通加工作業の実施、住金物産の社内部門間や関連する企業間での情報連携、国内物流のクロスドック化、多段階輸送の一括管理などが必要

(注1) 拠点間や店舗間における荷物の移送業務。

となる。最後の多段階輸送の一括管理であるが、これを実現することにより、各区間の待機時間などのムダも一括で管理できるため、輸送全体のリードタイムの短縮が期待できる。その結果として、コストが高くCO₂排出量が多い飛行機便から、船便へのモーダルシフトが実現され、飛行機便での輸送が削減できると予想される。

つぎに、国際輸送経路算出システムであるが、荷揚げ港の増加などにより、情報量が増加し、輸送経路の選択肢が増え過ぎる上に、海外拠点から納品先店舗までの輸送を一括で管理しなくてはならないため、人手で効率的な輸送経路を算出することは困難であり、優れた国際輸送経路算出システムが必要となる。

国際輸送経路算出システム

効率的な国際輸送経路を算出するために、時空間ネットワークという数理モデルを活用した。その解法について紹介する。

本システムでは、評価値を

$$\alpha \times \text{物流コスト} + (1 - \alpha) \times \beta \times \text{CO}_2 \text{排出量}$$

とした ($0 \leq \alpha \leq 1$)。基本的には、CO₂排出量と物流コストを足した値であるが、それぞれのバランスを調整できるように、 α と β を係数として持たせている。この値が小さい方がより良い解ということになる。この式で、 α 値を“1”とすれば、CO₂排出量を無視し物流コストを最小化することになり、逆に α 値を“0”とすれば、物流コストを無視しCO₂排出量を最小化することになる。また、 α 値を“0.5”とすれば、CO₂排出量と物流コストを同等に評価することになる。また、 β 値は、CO₂排出量と物流コストの重み（桁数や単位）の違いを補正するものである。例えば、CO₂排出量が取引きされている単価などを設定することが考えられる。

● 問題定義とその難しさ

今回の問題は、出発地点は同一であるが、到着地点が異なる複数の荷物を出発地点から到着地点に輸送する場合に、評価値（CO₂排出量や物流コスト）を、最小にするような輸送経路を決定するものである。

この問題の最大の特徴は、船や飛行機には運行スケジュールが存在し、その便に乗り遅れると翌日ま

たは数日後まで次の便がないということが発生するという点と、11時の便は4時間で到着するが、14時の便は5時間かかるというように、条件が時刻に依存して変化するという点にある。ある地点からほかのある地点へ行くときに、所要時間（コストなどでも可）を最小にするには、どの経路を通って行けばよいかを決定する問題を最短経路問題と呼び、今回の問題において、運行スケジュールなどの時刻に依存する要素がないのであれば、単純な最短経路問題となり、今日までに多くの研究が進められていた^{(1),(2)}

また、荷物の数は約10 000個と言われており、それらの荷物の積合せをうまく行うことによって、コンテナやトラックの数を削減し、輸送全体の効率化を図る必要がある。そのほか、納品先店舗、運行スケジュール、輸送経路に応じたコストパターンなど、それぞれの情報量が膨大なため、非常に大規模な組合せ最適化問題^{(2),(3)}となる。ちなみに、今回取り組んだ問題は、組合せ数が、10の10 000乗以上となり、近年のコンピュータが、いかに高性能になったとはいえ、すべてを計算することは時間的に不可能である。

また、本システムは、日々の運用で用いることを想定しているため、実務に耐えることのできる時間内で、実務に耐えることのできる精度の解を算出することが必要である。

そのため、時刻依存に対応した時空間ネットワークと近似アルゴリズムであるメタヒューリスティクス^{(2),(3)}を用いて問題の解決を図った。

● 時空間ネットワーク

通常の最短経路問題は、いくつかの点とそれらの2点間を結ぶ辺とによるネットワークで表現することができる。それに、時刻という軸を加えたものが時空間ネットワーク⁽⁴⁾である。これは、時間を離散値として扱うことで問題の緩和を行ったものである。住金物産における多段階輸送をネットワークで表現すると図-1のようになる。地点（縫製工場、物流拠点、港・空港、物流センター、店舗）を表す点と、それぞれの地点をつなぐ辺によって表現される。このときの辺は、移動可能である地点と地点をつなぐことになる。そして、辺に地点間の所要時間とコストの情報を持たせる。これに時刻という軸を加えたネットワークが図-2である。図-2は、横軸に図-1で示した地点をとり、縦軸に時刻をとったもので、そ

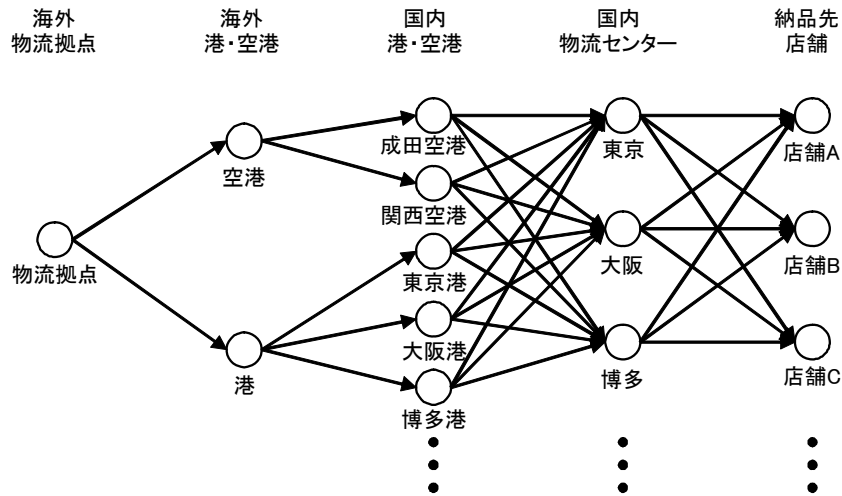


図-1 多段階輸送のネットワーク
Fig.1-Multistage transportation network.

それぞれの地点を示す点を時刻ごとに用意したものである。この点に対して、辺を用意するのだが、ここで、運行スケジュールと移動時間を反映させる。例えば、海外物流拠点から海外空港への移動時間が1時間であれば、海外物流拠点の点と1時間後の海外空港の点を辺でつなぐ。また、海外空港から成田空港への運行スケジュールが11時と14時であれば、海外空港の11時と14時の点からのみ、成田空港への到着時間の点と辺でつなぐ。在庫や待機を表す場合には、同一地点の時刻を進ませた点に辺（下向きの辺）をつなげばよい。そして、辺にはコストの情報を持たせる。

この時空間ネットワークにより、運行スケジュール情報や時刻に依存して刻々と変化する移動時間と移動コスト、拠点などにおける受入れ時間や店舗における納入可能時間の表現が可能であり、本問題を解くためには、最も適したモデルと言える。

この時空間ネットワークは、閉路を含まないという特徴を持っている。例えば、同一地点を巡回するような場合でも、その地点を訪れる時刻は毎回異なるので、時空間ネットワーク上では、異なる点を訪れることになるからである。この特徴より、時空間ネットワーク上の最短路問題は、動的計画法^{②,④}を用いて高速に解くことができる。ここでは、この動的計画法を用いた解法の詳細な説明は割愛する。

● 国際輸送経路全体の解法

先に述べた、メタヒューリスティクスは、初期解

を構築し、それを改善していくという手法である。今回は、初期解を「貪欲法」によって求め、「局所探索法」で解を改善していく。

その際、荷物一つ一つに対する経路は時空間ネットワーク上で高速に解くことができることを利用する。具体的には、すでにいくつかの荷物の輸送経路が決定していて、そこに新たな荷物を一つ加える場合に、どの経路を通ればよいかを決定するために利用する。例えば、すでにいくつかの荷物がコンテナに積載されていたとする。つぎに新たな荷物を加えようとしたとき、そのコンテナの隙間に新たな荷物が入るのであれば、そのコンテナに相乗りさせれば、新たなコンテナコストは発生しない。よって、その経路のコストは0円となる。

初期解を求める「貪欲法」は、このように、逐次的に荷物を追加していくことによって、貪欲的に初期解を構築する。この場合、荷物を追加する順番が、非常に重要になる。追加順序としては、「納期が早く輸送経路の選択に余裕がない」、「荷物が大きく後からではコンテナやトラックの隙間に積み合わせられる可能性が少ない」、などの現象を考慮して、条件の厳しい順が効果的であると考えられる。これに関しては、数値実験を繰り返し、最終的に、以下の順序で追加すればより効率的な解を算出できると分かった。

- (1) 体積が大きい順
- (2) 納期が早い順

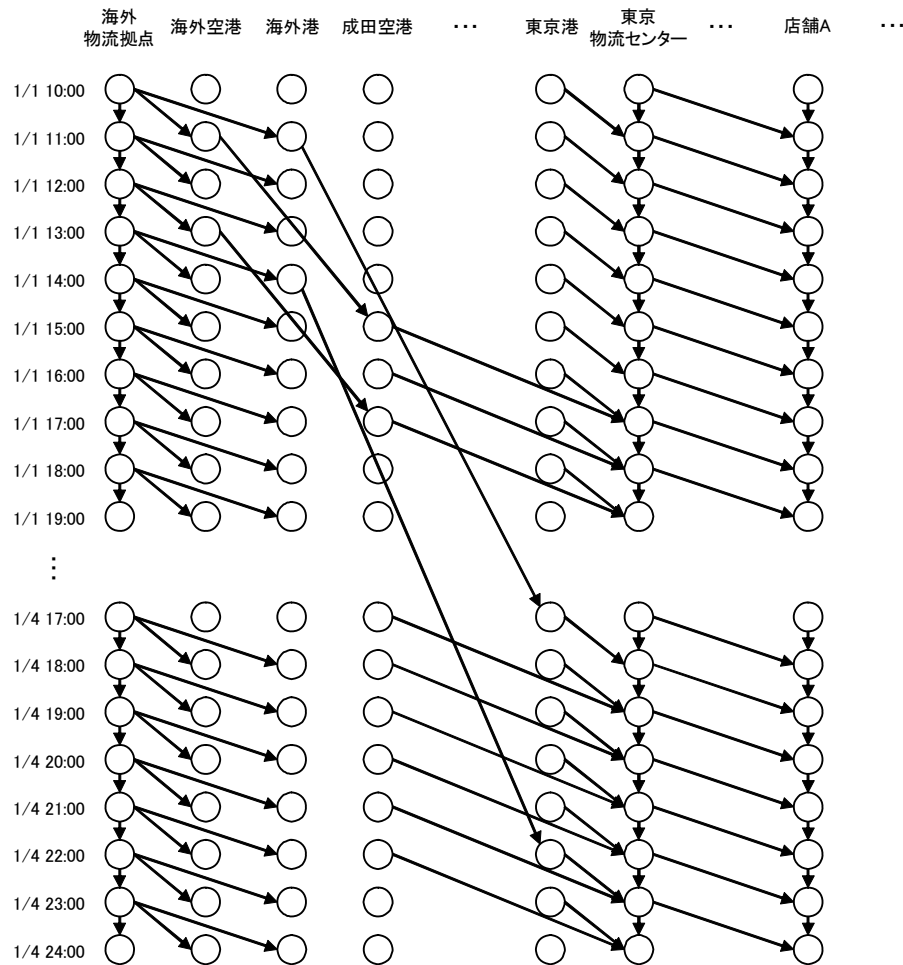


図-2 時空間ネットワーク
Fig.2-Time-space network.

(3) 出荷可能時刻から納期までの時間が短い順
つぎに、「局所探索法」による初期解の改善は、現在の解から任意に荷物を取り出し、再度時空間ネットワーク上で最短経路を求めることを繰り返す。とくに最初の方に追加された荷物は、後からどのような荷物が追加されるのか分からないまま、とりあえずその状態で一番良い経路を通っているが、すべての荷物が追加された状態で、再度最短経路を求めることによって、より良い経路が求められることが期待できる。また、良い経路がなかった場合は、結局、同じ経路に戻ってくることになるので、解が悪くなることはない。このように、解を逐次的に改善していくことによって、より良い解を算出することができる。

数値実験による効果測定

国際輸送経路改善の効果を、経路を改善する前と

後で、CO₂排出量と物流コストを測定することによって検証した。本検証は、国際輸送経路算出システムを用いて行った。また、データは住金物産の一定期間の実データを用いた。実験は、CO₂排出量の削減を優先する改善と、物流コストの削減を優先する改善の2通り行った。前者では、CO₂排出量が32%削減できるだけでなく、物流コストも3%の削減ができ、後者では、物流コストが8%削減、CO₂排出量も8%削減できるという結果を得ることができた。

この結果より、国際輸送経路を効果的に改善することにより、CO₂排出量と物流コストの両方を削減できることが分かった。

プロジェクト推進のポイント

国際輸送経路改善案作成に当たっては、まず、最初に現状のアパレル物流業務の実態を調査した。中

国の物流センターにおける物流業務については、現地を訪問し、ヒアリング調査を行った。また、輸出・輸入通関業務と国際輸送業務については、関連する通関事業者様達と定期的に打合せを行い、意見交換を通して、実業務の把握に努めた。

つぎに、現状業務の実態を踏まえた上で、新事業モデルのポイントとなる最適港揚げを実施した場合に想定される課題の抽出を行った。課題の抽出に当たっては、関連する通関事業者様達との打合せを繰り返した。

さらに、国際輸送経路算出システムの計算結果をもとに中国物流センターからの出荷時点で貨物を分割し、実際に貨物を最適港揚げとなるように輸送し、実務上の問題点や課題の検証を行った。

今回は、海外拠点から国内の納品先店舗までの輸送経路ということで、関係者が多数存在したが、現地訪問によるヒアリングや打合せを通して、関係者間の情報の共有や取りまとめを積極的に行った。また、国際輸送経路算出システムでは、様々なデータが必要であり、十分なプロジェクト体制が整えられない場合は、そのデータの取得が困難となるが、上記活動により、それらのデータ取得も円滑に行うことができた。

一般的な課題

本稿で紹介した国際輸送経路の改善は、個々の企業単体での取組みではなくメーカー、商社、物流事業者、小売業者といった業界各社が協力して、サプライチェーン全体での最適化を行うことが不可欠である。しかし、それを実現するためには、取引条件や情報の公開範囲、情報共有の方法などにおいて各社の利害が一致しないといった課題が挙げられる。

また、複数港へ荷揚げを行うことによって、B/L^(注2)の分割が発生し、銀行での買取り手続きや貨物の引取り手続きが増加することや、L/C^(注3)で揚地や分割船積み禁止の指定がされている場合は、決済の際に問題となることなども考えられる。その

ほか、暫八鑑定書類^(注4)や加工貿易手帳^(注5)（中国）など、輸出入における通関に必要な書類は、契約単位で存在しているが、今回のように、同一契約の荷物を別々の港や空港に、同時期に荷揚げを行おうとした場合には、それらの書類がそれぞれの港や空港での通関に必要となり、輸出入許可までの遅延を生む可能性もある。

一般的には、このような課題が発生するため、事前に、当事者間でこれらの課題を解決しておく必要がある。

む す び

本稿では、住金物産様の事例として、国際輸送経路の改善、数理モデルを活用した効率的な国際輸送経路の算出方法、さらに、その結果を数値的に検証した結果を紹介した。

富士通総研は、そのほかにも、環境負荷低減のための施策として考えられる、国内の長距離輸送計画、地場のトラック配送計画、拠点の統廃合計画などの問題を解決することができる。今後も、数理モデルを活用して、人間では算出不可能な複雑な問題を解決することによって、環境問題に貢献していきたい。

最後に、本稿の執筆に当たって懇意にアドバイスをいただいた、住金物産株式会社 繊維カンパニー SCM事業開発部 部長 山内秀樹様、同部 山口賢史様に感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 伊理正夫ほか：ネットワーク理論．日科技連出版，1976．
- (2) 久保幹雄ほか：応用数理計画ハンドブック．朝倉書店，2002．
- (3) 柳浦睦憲ほか：組合せ最適化—メタ戦略を中心として—．朝倉書店，2002．
- (4) 久保幹雄：ロジスティクスの数理．共立出版，2007．

(注2) Bill of Ladingの略で船荷証券のこと。船会社が発効する証書で、荷主に対する輸送引受書であり、本証書と引き換えに貨物の引渡しを確約する。

(注3) Letter of Creditの略で信用状のこと。貿易取引における基本的な決済手段となっている。

(注4) 暫八とは関税暫定措置法第八条（加工又は組立てのため輸出された貨物を原材料とした製品の減税）のことであり、暫八鑑定書類はそのための書類。これにより、製品にかかわる関税のうち原材料の関税相当部分が軽減される。

(注5) 日本における暫八書類同様に中国において輸入される原材料とその輸出製品との管理をするための対税関用書類のこと。