

海上交通システムの計画手法と実務への利用

平成15年12月18日 運輸政策研究機構 大会議室

1. 講師 大和裕幸 東京大学大学院新領域創成科学研究科教授

2. コメンテーター 富士原康一 国土交通省大臣官房技術審議官

3. 司会 伊東 誠 (財)運輸政策研究機構運輸政策研究所企画室長

講演の概要

1 はじめに

今後造船会社が他社や他国との競争に勝ち抜いていくためには、マーケットニーズにあった製品開発を行っていくことが極めて重要である。本報告では、数理工学と社会科学を活用した海上交通システムの計画手法を提示し、この手法によるシミュレーション結果を基に、ある航路にどのような船舶を建造・投入すべきかといった実務上の課題への利用について、その可能性、今後の改善方策等を論ずる。

2 コンテナ船の最適サイズ

「数理計画手法によるコンテナ船航路の設計手法について」-

近年、海上コンテナ貨物の激増に伴い、コンテナ船の大型化が進んでいる。これは既存の航路を前提としたものであり、それが次第に変更され成立しているものである。しかしながら、これが本当に合理的な変更であるのかは明確で

ない。つまり、船舶が大型化していくことが本当に得であるのかという疑問が存在する。そこで、航路変更の際して、航路のあるべき形態を導き出し、船舶に対する要求仕様を抽出する手法について研究を行った。

一般的に、航路形態(トポロジー)をPoint-to-Point型、Go-Around型、Hub-Spokes型の3つに分類することができ、このトポロジーは極めて数学的な構造を有している。そこで、海上コンテナ貨物輸送モデルをネットワーク問題として表現し、数理計画問題として求解することとする。

海上コンテナ貨物輸送モデル

ネットワーク問題として表現

- ・ リンク：コンテナ船による航路 $S^{(k)} = [s_{ij}^{(k)}]$ **船団行列**
- ・ ノード：港(既知データ)
- ・ フロー：コンテナ貨物の流れ $X^{(O,D)} = [x_{ij}^{(O,D)}]$ **OD貨物行列**

数理計画問題として求解

-制約条件と目的関数(全コストの最小化)の定義

このモデルにおける制約条件及び目的関数は以下のとおりである。

S, Xの満たすべき条件

- ・ S: 周回航路条件 閉路条件として表現
- ・ X: 經由港でのフローの増減はない、フローは正
- ・ SとX: 各リンクにおけるXの総和はSの総和を超えない。

数理計画問題における制約条件となる。

海上コンテナ貨物輸送にかかるコスト

$$\begin{aligned} \text{全コスト} = & \text{貨物時間コスト} \\ & + \text{船舶運航コスト} \\ & + \text{貨物積み換えコスト} \end{aligned}$$

数理計画問題における目的関数となる。

計算にあたっては、船団行列を整数変数で表現した場合、求解が非常に困難となるため、いくつかの条件を緩和し、求解可能な問題にモデル化する。その手法として段階的の設計手法を用いる。この方法は、各数理計画手法の求解能力・解の意味に着目し、3段階に分けて解を求めるものである。

設計手法の提案

- ・ 段階的の設計手法を提案する(3段階) 各数理計画手法の求解能力・解の意味に着目

- 第1段階：拠点港抽出と地域分け
LP利用
- 第2段階：基幹航路の設計
MILP利用
- 第3段階：地域航路の設計
MILP利用

この手法を用いて、アジア圏海上コンテナ貨物輸送ネットワークの設計を行い、あるべき航路形態を段階的に求め、基幹航路において、中型船(6,600TEU)、小型船(3,300TEU)と大型船を組み合わせる場合、どの規模の大型船を投入するとコストが最小とな



講師：大和裕幸



コメンテーター：富士原康一

- ・積み換えコストの考慮
-大型船11000TEUの時の最小値となった。

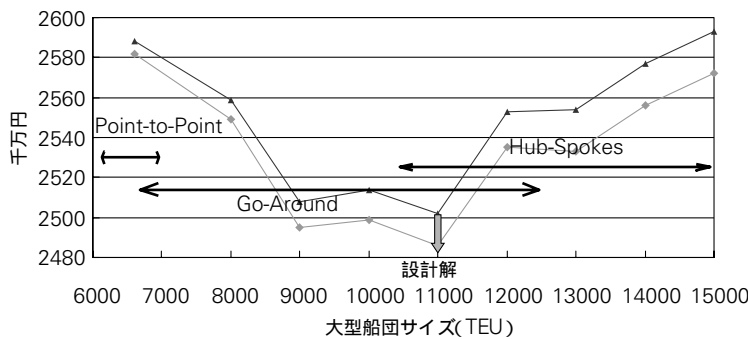


図 1 大中小3船団による解

るかを計算した。その結果, 11,000TEU 積みの大型船を投入する場合にコストが最小となるとの解を得た(図 1)。

現段階で, この手法をそのまま実務に利用することは難しいものと考えられるが, それなりの見通しを立てることはできるのではないかと考えている。

3 インドネシアの海上輸送システム

現在, インドネシアにおいて, 海運システムのマスタープラン作りが進められている。その詳細な検討に役立てるべく, 数理計画法によるインドネシアの海上輸送システムの設計について研究を行った。

まず, 数理工学手法の検討を行い, 以下の前提・条件の下に目的関数を最小化する解を求めることとした。

数理工学手法の検討

- ・未知数の決定 - ある2港間の往復運航回数, 実コンテナ輸送量, 空コンテナ輸送量
- ・与えられているデータの確定 - OD
- ・目的関数 - コスト(総コスト= 運航コスト+ 船舶コスト+ コンテナコスト)
- ・制約条件 - フロー(ノードで降ろす量と運び出す量の和), キャパシティ(リンクを通る貨物量は船舶の積載量を超えない), 港の水深

次に, インドネシアにおける戦略的に重要な25港湾を抽出し(図 2), この25港湾での貨物のOD表を作成し, 船の大きさを10通り設定した。そこで, 貨物

の流動状況から, Hub-Spokes型のトポロジーの分析を行い, 6つの港湾及びこれを中心とする地域を設定した。

計算結果の一例は, 以下のとおり(図 3)であり, 図のように基幹航路を400TEU積みの船舶で輸送し, 各地域内の支線を50TEU積みの船舶で輸送する形態が一つの解として求められる。この形が合理的であるかは断言し難いが, 現在のインドネシアにおける4つの海運支局の配置と似たものとなっている。



図 2 Map of selected ports

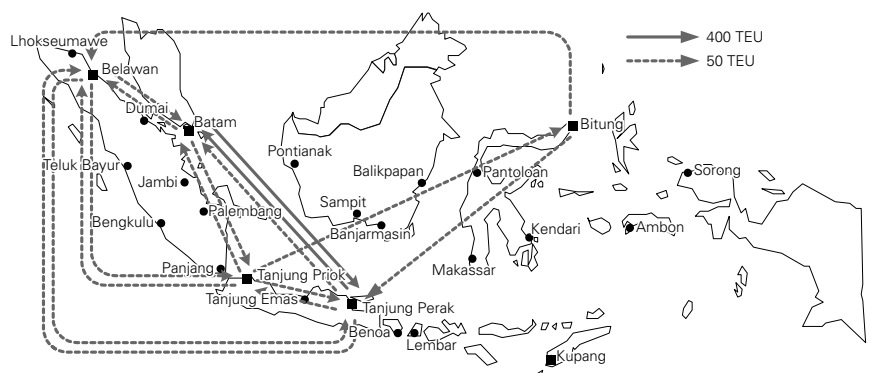


図 3 Voyage map of the main lines voyage for case 8

この手法は, 船舶のコストも考慮することができるため, かなり合理的に推定することができるものと考えている。ただし, 今回の計算に当たり, 貨物のODデータが十分でなかったため, 実際の貨物流動が現れない結果となった部分もあるため, やはり, より良い結果を得るためには, より詳細で正確なデータを得ることが重要である。

4 シミュレーションによるコンテナターミナルの運用設計

我が国のコンテナターミナルについて, より少ない面積でより効率的なオペレーションを行い, コストを下げることはできるのではないかと問題意識の下, シミュレーションによるコンテナターミナルの設計手法について研究を行った。この問題は, 船の問題ではなく, 交通結節点問題であり, 機械の配置及びそのオペレーションを扱うものである。

従来は, 1年間の取扱量から平均蔵

置日数を求め、必要蔵置量、積み段数、アクセシビリティ係数から必要なコンテナヤードの面積を求めるといふ渡辺氏の考案した手法が用いられてきたが、今回は大井埠頭を例に、ARENAというソフトウェアを使用して、シミュレーションによる設計を行った。

例)大井埠頭:

1バース当たり 193,659TEU/年
ピーク時 5,170TEU/週

まず、渡辺氏の手法による計算を行ったところ、図 4が求められた。また、貨物の取扱については、水曜日が最も多く、土日は取り扱われてない。

次に、シミュレーションでの設計に当たっての仕様を以下のように設定した。

- ・全ての船舶は、1日で荷役を終え、出航する。
- ・ターミナルに外からのトラックが滞在する平均時間は25分以下である。

ARENAによるシミュレーション結果を基に、月曜日から土曜日の待ちトラックの台数を表すと、図 5のとおりであり、水曜日の待ちトラックの台数が課題である。これを改善するため、

- ・輸入ヤードにおけるヤードトラックと外からのトラックの数を増やさない。
- ・輸出ヤードから輸入ヤードへ1台トランスファークレーンを移動する。
- ・到着したコンテナを一時輸出ヤードに置く。

といった変更を加えて、シミュレーションを行うと、図 6のとおり、水曜日の待ちトラック台数を減らすことができることとなった。さらに、輸入ヤードの積み段数を増やすと、面積を3/4にしても同様の処理ができることが分かった(図 7)。

今回は、シミュレーションの一例を示したが、この手法を用いることにより、船舶の大型化に伴うコンテナターミナルの設計変更の評価を行うことができると考えられる。

Design in static with Watanabe's method

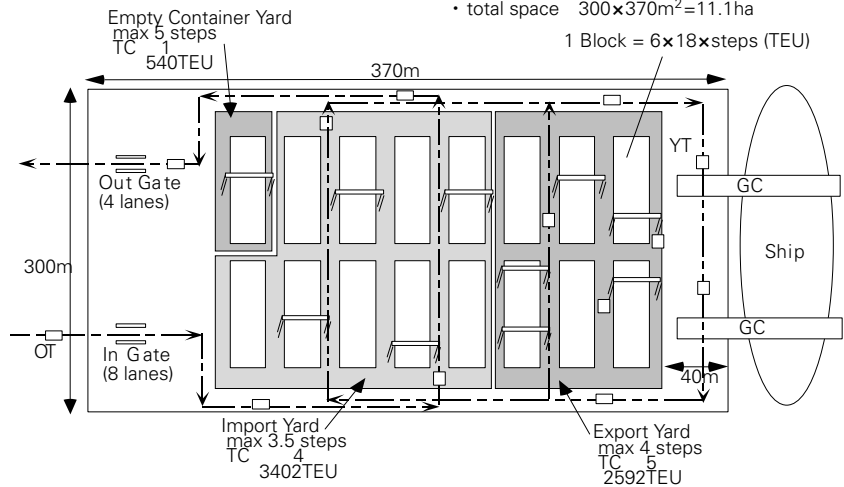


図 4 Baseline Design(1)

The base design satisfied requirements.
The number of waiting trucks at the import yard

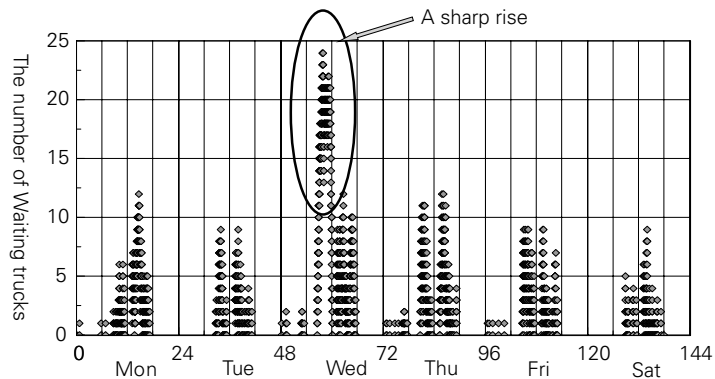


図 5 Results of Design by Simulation

Case 2

The number of waiting trucks at the import yard (revised design 1)
Reduce the number of queues.

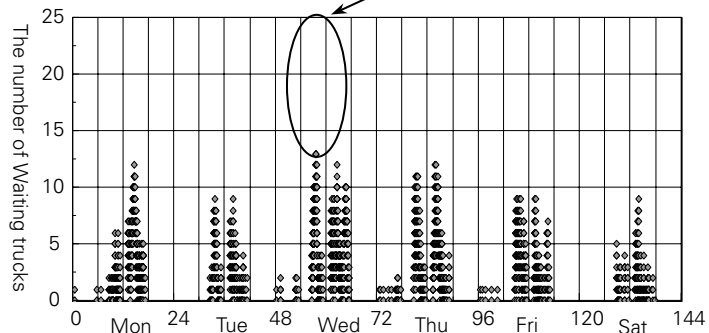


図 6 Revision 1(2)

The number of tiers in the import yard is increased.

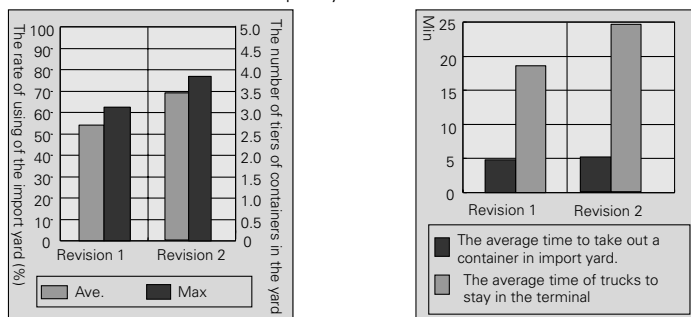


図 7 Revision 2(1)

5 シミュレーションによる高速フェリーの評価

島国である日本の地理的特性, 高いエネルギー効率, 技術革新による高速輸送船の出現を踏まえ, トラック輸送から海運へのモーダルシフトを進めていくことが重要であり, このため, 海上幹線輸送へのシフトのための条件の定量的な分析が必要となる。従来の研究では, スケジュール, 貨物特性といった物流現象の表現が不十分であること, 輸送機関仕様に関する考察が欠如している等により実用的なサービスの検討には不十分であった。そこで, 今回は, 首都圏 - 北海道間幹線輸送を対象に, 陸海輸送モード間の競合評価, 輸送機関設計の組み込み, スケジュール, 貨物特性等の物流現象の表現をも含むシステムを構築し, シミュレーションによる高速フェリーの評価を行った。

本手法は, まず, 輸送コストと船舶基本設計の定式化, 対象幹線輸送区間の設定, コスト均衡等による物流量配分(トラック, 鉄道, 船舶)の概算を行う。その後, これらを基にシミュレーションを行い, 最適輸送システムの選択及び適合船舶仕様の決定を行うものである。シミュレーションを行うことにより, スケジュール, 貨物特性といった, 統計量の処理では表現できない部分についても取り扱うことができるようになるものであり, 最初に静的な設計を行い, 次に動的に確認するというものである(図 8)。

まず, 輸送コストについては, 直接コスト(資本費, 維持費, 乗員費, 燃料費)と間接コスト(宣伝広告費, 営業費等)の和とし, 船舶の基本仕様については, 大きさを変える度に設計を行うこととした。コスト均衡による物流量の配分につ

いては, 犠牲量モデルを用いて配分した。これらの作業により, シミュレーションに用いることが現実的と考えられる船舶を選択した。

シミュレーションを行うに当たり, 以下のように設定した。

問題の設定

- ・東京 - 札幌の各荷物配送センター間を想定
- ・ルートは, トラック・鉄道・長距離フェリーの代表3本(図 9)
- ・速度: 20, 22.5, 25, 27.5, 30, 32.5, 35(kt)
- ・スケジュール(一日2便想定):(0:00, 6:00)(0:00, 12:00)(0:00, 18:00)(0:00, 0:00)発
- ・物流データ: 宅配便, 生野菜を対数正規分布で発生(推定値)
- ・船舶初期設定: 長距離フェリー“パシフィックエクスプレス”(図 10)

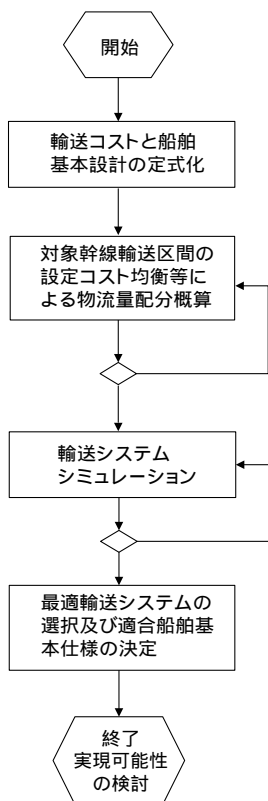


図 8 本手法の概要

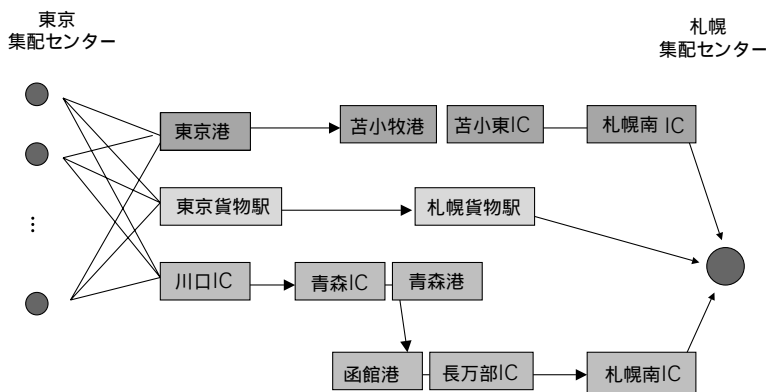


図 9 各交通機関ルート設定

長距離フェリー“パシフィックエクスプレス”

全長	170.0[m]	車両搭載数	トラック12	100台
垂線間長	158.0[m]		乗用車	90台
幅	25.0[m]	船客定員		660人
深さ(D甲板)	10.0[m]	主機		46200馬力
計画満載喫水	6.5[m]	載貨重量		5100t
総トン数	約11400t	航海速度		26.2knt

船型は標準船型
Cb=0.6とした



図 10 船舶初期設定

シミュレーション(図 11)は、ある時刻に荷物が発生した場合に、どの輸送機関を用いれば犠牲量が最も小さくなるかを選択するものであり、その結果、最適速度、最適スケジュール、適合船舶の基本仕様が求められた(図 12, 13, 14)。さらに、これを一つのプロジェクトとして、DCF(Discounted Cash Flow)法による利益分析を行うと、割引率13%において、NPV = 176.2(億円) > 0と投資適合であることが分かった。

このシミュレーション手法は、造船会社、海運会社のみならず、荷主やプロジェクトの評価を行う銀行においても活用され得るものであると考えている。船舶の設計、コスト計算の詳細化等シミュレーションモデルのより現実的なモデルへの改善が今後の課題である。

法で静的な分析を行い路線を決定する、シミュレーションによって動的な分析を行いサービスを設定するというように、数理計画法とシミュレーションの2つの手法を組み合わせることでより精緻な分析・設計を行うことができる。今後、これを実務に応用できるよう改善していくため、貨物特性等のデータの集積、現場のノウハウの蓄積・注入を進めたい。

6 全体まとめ

これまで示してきたように、数理計画



図 11 シミュレーション実行画面

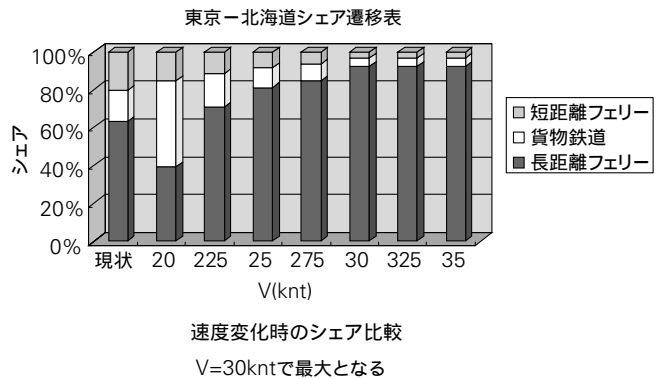


図 12 シミュレーション結果1

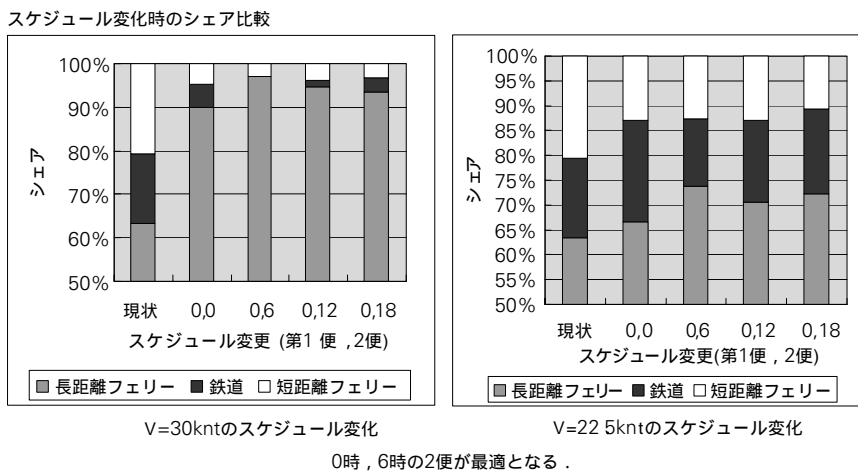


図 13 シミュレーション結果2

- 船速は30ktが最適
- スケジュールは一日2便であれば0時と6時発が最適

適合船基本仕様

全長	215.0[m]	車両搭載数	トラック12M	268台
垂線間長	200.0[m]		乗用車	150台
幅	34.0[m]	主機		
深さ(D甲板)	10.0[m]	航海速度		
計画満載喫水	6.5[m]	30.0kt		
総トン数	約27660t			

図 14 東京 北海道フェリー結論

コメントの概要(富士原康一氏)

まずは、コンテナ船の船型について話をしたい。コンテナ船の船型は、経済合理性よりも地形条件や港湾の条件等により外形的に決まってしまう場合が多い。現在は、コンテナ船の大型化が進んでおり、かつては、5,000個積み最大のものと言われてきたが、それが6,000個になり、7,000個になり、いまや10,000個になろうとしている。どこまで大型化するのかということが、世界の造船会社の大きな関心事であるが、今回提示された、11,000個というのは一つの目安ではないかと思う。

今回提示された数理計画手法、シミュレーションをどのようにして実務に利用していくのかということについて、インドネシアで海運システムのマスタープランを作るという話は非常に分かりやすく、全体的な合理性を考える場合は、このような手法を用いることが適切であると言えると思う。しかし、得られた解を現に存在するマーケットにどの程度、どのようなステップで導入していくのかということについては、特に個々の企業のレベルで考えた場合に課題があると思う。

次に、高速フェリーについて話をしたい。これまでも海運へのモーダルシフトを政府としても推進してきたつもりであるが、必ずしも成功しているとはいえない。海運の強みはなんと言っても重量物の大量輸送であるが、一般貨物については、極めて高いハードルを超えていかなければならない。実際に一般貨物のモーダルシフトを実現するためには、船舶の高速化と周辺サービスの高度化を進めていかなければならない。

船舶の高速化を進めようとする場合、燃費悪化による燃料費増大、投資額増大による投資リスクの増大、トラック等との競合による運賃の限界等の様々な不安定要因が存在する。そこで、何をしなければならぬか。まずは、市場調

査やコスト分析といった詳細な投資適格性調査である。ここに先ほど大和先生のおっしゃった手法の活用が入ってくるのではないかと思う。そして、リスクマネジメントである。私自身の経験から重要であると思うのは、「ダメになったときにどうするか」という撤退処理スキームであり、また、リスクマネジメントの観点を入れた汎用船型である。最も合理的と思われた船型が、リスクマネジメントの観点から適合しないということもあり得るからである。残念ながら現在の制度金融はこういったリスクマネジメントに対応できていない。さらには、耐航性、メンテナンスといった技術的課題等への対応も必要となってくる。現在の各種船型の比較を行ってみると、速力30ktが一つの基準であり、この速力を有する船舶には市場性があるものと考えられる。

我々は、TSLの実用化を推進しており、まずは小笠原 - 東京航路に就航させることを考えている。これに当たり、先ほどのリスクマネジメントの観点から、TSLの建造・保有管理を行う会社を官民共同出資で設立し、その会社が海運事業者用に用船するという形態として、海運事業者のリスクを低減することとした。あわせて、保有管理会社は、技術的な課題をサポートするため、運航支援、最適保有管理支援を行うトータルサポートシステムの開発を進めている。

日中間の貨物輸送方法についての検討結果を紹介したい。近年、航空の利用が急激に伸びている。運賃で見れば、海運の5倍から10倍であると考えられるが、それでも航空が伸びている。そこで、海運が航空との競争に勝つためにはどうすればいいのかを検討した。例えば、上海から関東まで貨物を輸送しようとする、海運では6~8日かかる、航空では3,4日で済む、この差が値段の違いになっている。ここで、例えば北九州に高速船を導入すると、か

なり航空に近い状況を作ることができると分かった。もちろん、デイリーサービスを行わなければならないが、ビジネスとして成り立ち得るのではないかと考えられる。今申し上げたサービスに取り組もうとされている事業者も既にいるが、我々も将来的にも日中間の海上貨物輸送は宝の山ではないかと考えているところであり、行政として、アカデミズムと事業との接点として積極的に取り組んでいきたいと考えている。

質疑応答

コメントに対する回答

サービスの話とリスクマネジメントの話があったが、非常に重要な問題である。サービスについては、非常にいい船であっても1年に7日間止まるだけで、誰も乗らなくなるということがあり得るのであり、そこで我々が今考えているのは、設計の際にそのルート上の気象、海象条件を見て、フリーボードを決めるとか、重量重心を決めるとか、そういうことをやらないといけないということである。リスクマネジメントについては、非常に興味深い話で、このルートがダメだったら次はどのルートにといったようなことを今後考えていかなければならないと思う。

海上技術安全研究所に設立される物流研究センターでも日中間の貨物輸送の問題に取り組むということを知っているが、そこでもやはり統計の取り方が問題になるのではないかと思う。

会場からの質問

- Q 荷物の発生時間に基づいてシミュレーションをされているが、実際の業務では、到着時間さえ守られれば、トラックでも海運でもよいということを荷主に言われることが多い。着時間ベースでのシミュレーションは可能なのか。
- A スピードを要求されない貨物であれば、もっと船が選択されているので

はないかと思うが、この研究の場合は、市場が閉まる前或いは市場が開く直前につかなければならないという深刻な制約がある。本日報告したシミュレーションの中には入っていないが、秋に発行された運輸政策研究に掲載された私の論文の中では、着時間を選べるように船を選ぶこととしたものもある。むしろ何時着いてもいいという方がやっかいである。

Q コンテナ船の最適サイズの設計において計算された解と現実との違いの分析はされているか。されている場合、その差異の原因は何か。

A 今回の計算は全ての貨物を1社で運送するモデルで計算していること、現実よりも大型の船舶を入れていること、データが全て取れていないということがあって、ルート選択がずれているところがある。その他にルート選択がずれる原因として、それぞれの会社がそれぞれの取引先を持っているということもある。

Q コンテナターミナルのシミュレーションについて、ヤードプランナーの話聞いたところ、向け地の同じところのコンテナを同じ場所に集めるといことをしているということであったが、今回の研究の中で、そういったことについて考慮されているのか。

A 積み方や積み段数については、平

均時間を中心にやっていて、詳細な条件は入れていない。向け地の同じものを集めるということについては、今回のシミュレーションの中では、余ったクレーンでコンテナを1箇所を集めていくということはやっている。

Q 一般化費用で計算して、おおよその最適解と現実との間は何割くらいのところを動いているものなのか。

A およそ1割のところではないかと思う。現実が割にいい答えになっているということが言えるのではないか。

C 実際に実用化されるかどうかについては、使われる方のノウハウが大事である。海運会社の方からの意見を伺うといいと思う。小笠原は飛行場ができないのでパイロットプロジェクトとして面白いと思う。上海は貨物量の伸びが非常に期待できる。ただ、先ほど話のあった在来のフェリーを転用するというスケジュールでは、まだ航空との勝負にはならないと思う。リスクがないわけではないが、有望なマーケットであると思われるので新しい船でチャレンジをする価値はあると思う。

C 実務者としてみると、シミュレーションとしてこういう船を設計する際の参考になると思うが、我々の前提をそこに代入して、ベストの解が出てくる期待はできないと思う。先生のおっしゃ

るように、海運会社の場合は、まず、荷物をどこに持っているかということから始まるわけであり、また、11,000TEUのコンテナを運用するノウハウができていないわけではない。4,000TEU、5,000TEUの船とは自ら運用方法が異なるであろうし、ターミナルで2,3日のうちに5,000TEUを超えるコンテナを捌くことができるか、そのノウハウを一斉に持つことができるか、といった問題があり、すぐに実現することは難しいのではないかと感触を持っている。ただ、そういったものを作る際には、このシステムを使用させていただいて、検証させていただきたいと思う。

A 我々が知りたいところは、まさにそういったノウハウのところであり、そういうものを入れていかないと実務に利用できるようにはならないと思う。ただし、外国の例を見ても、新しいことをやろうとする際に、過去の経験は役に立たないならばシミュレーションを行って、頭の整理をしてから、プロジェクトを実行していかなければならないということが言えると思う。現在はまだ頭の整理の段階ではあると思うが、今後これを更に精緻化していきたい。

(とりまとめ：運輸政策研究所 田中賢二)

