

災害時における国際海上貨物輸送のネットワーク分析*

Network Analysis of International Maritime Transportation at the Time of Disaster*

安福浩介**・竹林幹雄***

By Kosuke YASUFUKU**・Mikio TAKEBAYASHI***

1. はじめに

地震や台風などの自然災害の多頻度化、またその規模の巨大化が地域を越えた問題となりつつある。災害が貨物輸送に与える影響は深刻化しており、特に貨物集配の拠点である港湾への被害は、その物流構造をも変化させる可能性があるという点で、地域経済全体に与える影響は甚大である。加えて、伝染病やテロなど、国際間の交易に被害を及ぼし得る外的要因は増加しつつある。

このような背景もあり、災害時における物流経路の確保は、災害発生の影響を最小限に抑えるためにも不可欠である。しかし海上輸送の分野では、その重要性とは逆に具体的な方法論は述べられていない。

以上のような問題意識の下、前稿では船社の航路決定行動のモデル化を行い、災害時を想定した貨物流動分析を行う手法を提案した。それによって、釜山港の被災を想定して、船社の緊急輸送経路の選択を推定するとともに、それがアジアの主要港湾における貨物取扱量に与える影響の分析を行った。そこで本稿では、主として日本国内の被災を想定したシナリオ分析を行うことによって、我が国に災害が発生した際の海上貨物輸送のパターンの変化と港湾間の相互依存関係についての評価を行う。具体的には、津軽海峡および東京湾における被災をシナリオとして仮定し、船社の寄港の変化および貨物流動の変化を推計する。また、船社の航路決定モデルに関しても改良を施し、更なる再現性の向上を図る。

2. 災害時における航路決定モデル（短期）

(1) モデルの概要

本研究では、災害時における船社の航路変更およびそ

れによる貨物流動の変化を分析することを目的として、船社の航路決定行動のモデル化を行った。

本モデルの航路決定問題では、組合せ最適化問題の解の代替案の数が膨大となることを避けるために、以下のように二つの問題に分けて定義した。まず、船社の保有する各航路において最適解の候補を作成する航路候補作成問題を解く。その次に、作成した航路の候補からその最適な組合せを決定する航路組合せ決定問題を解く。その際に、災害時を想定した問題を解くのであれば、被災港湾を利用していただ貨物の経路変更を行う貨物経路変更問題を併せて解き、最適解を得る。図-1に、本研究における航路決定モデルの流れを示す。

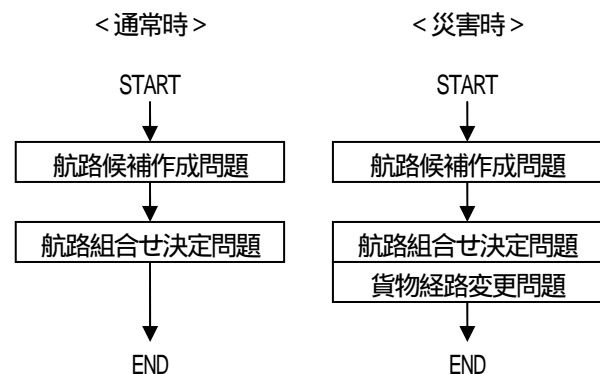


図-1 航路決定モデルの流れ

ここで、前述したとおり、本研究では災害発生後の短期間における輸送を取り扱うため、既に予定されていた経路貨物量は不変であると仮定する。ゆえに、船社の運賃収入についても与件であり、船社はコスト最小化を目的として航路決定を行う。既発表モデルであるので、モデルの詳細については本稿では省略する。

(2) モデルの再現性

モデルの現況再現性の確認として、2008年の航路データ¹⁾における航路数、航路パターン（周回航路・北米航路・欧州航路）、投入船型、港湾寄港数を用いて、本モデルで航路決定問題を実践した。対象船社およびアライアンスは、The New World, Grand, CKY, Maersk, Evergreenの5社とする。

*キーワード：防災計画、空港・港湾計画

**学生員，神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻

(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1，

E-mail:095t143t@stu.kobe-u.ac.jp)

***正員，工博，神戸大学大学院准教授，工学研究科

(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1，

E-mail:takebaya@kobe-u.ac.jp)

表-1, 表-2に, 寄港順序の実測値および推計値を示す. 以前のモデルではアジア域内で冗長な周り方をするループが存在したが, それを排除することによってより短い周回距離で周る解を出力することができた. ただし寄港順序の再現性については高いとはいえず, これについては単純に運航コストの最小化によって決定されるのではなく, ターミナルオペレータの存在や船社専用バス等の船社毎のプライオリティが存在すると考えられる.

表-1 航路データ

航路名	到着港								
PNW	高雄	香港	深セン	上海	釜山	京浜	北西岸	釜山	
PS1	L.Chabang	S.pore	深セン	香港	北西岸	京浜	高雄	深セン	
PSX	香港	深セン	北西岸	京浜	中京	阪神	深セン		
SAX	S.pore	北西岸	高雄	深セン					
NYX	上海	深セン	香港	高雄	北東岸	釜山			
ESX	上海	深セン	香港	北東岸	寧波				
APX	深セン	香港	高雄	釜山	阪神	京浜	北東岸	欧州	北東岸
JEX	阪神	中京	京浜	香港	深セン	S.pore	欧州	S.pore	香港
AEX	釜山	高雄	香港	S.pore	欧州	S.pore	香港	高雄	
CEX	上海	寧波	香港	深セン	S.pore	欧州	S.pore	香港	

表-2 航路推計結果

航路名	到着港								
PNW	上海	香港	上海	寧波	青島	釜山	北西岸	釜山	青島
PS1	寧波	深セン	上海	高雄	北西岸	京浜	高雄	釜山	
PSX	上海	深セン	北西岸	高雄	釜山	寧波			
SAX	青島	北西岸	高雄	深セン					
NYX	釜山	上海	深セン	香港	北西岸	深セン			
ESX	高雄	釜山	深セン	北西岸	釜山				
APX	青島	T.Pelepas	高雄	L.Chabang	S.pore	香港	深セン	欧州	北西岸
JEX	釜山	寧波	上海	深セン	L.Chabang	S.pore	欧州	S.pore	深セン
AEX	青島	釜山	深セン	S.pore	欧州	S.pore	L.Chabang		
CEX	深セン	青島	上海	釜山	S.pore	欧州	S.pore		

本来, 航路決定モデルの再現性はその寄港順序によって評価されなければならないが, 上記のように寄港順序の決定が単純なコスト最小化によって行われないという問題が存在するため, ここでは別の代理指標を用いた再現性の評価についても述べる. まず図-2, 図-3に, 投入隻数および周回距離の実測値・推計値の比較を示す. 両者とも決定係数0.6程度の精度で得られたが, それぞれ実測値よりも小さい値が推計された航路が多いことが確認できる. これについても, 実際の航路決定においてはコスト最小化以外の要素が関係していることが原因であると考えられる.

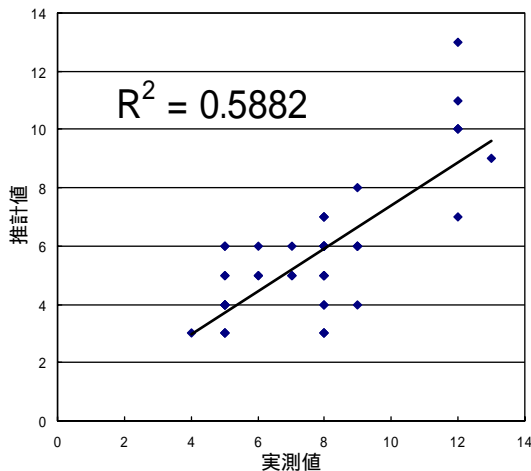


図-2 投入隻数再現性

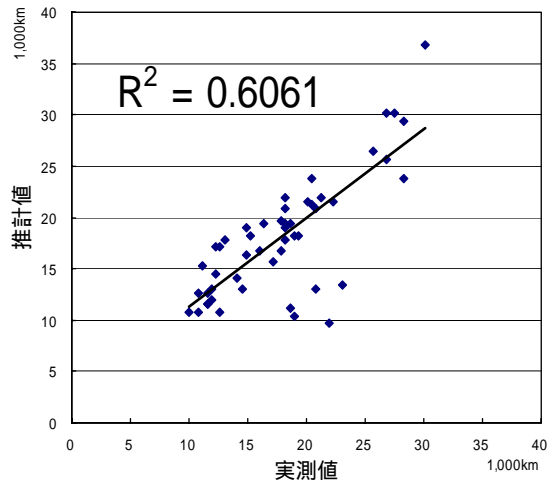


図-3 周回距離再現性

図-4に, 各港湾への寄港数の実測値・推計値の比較を示す. これより, 港湾料金が比較的低廉である釜山港および中国港湾については寄港数が実測値より多く, 港湾料金が比較的高額であるシンガポール港, 香港港, および日本港湾については寄港数が実測値より少なく推計された. ゆえに, 本モデルは港湾料金を過大に反映する傾向にあると考えられる. これらの特徴をふまえ, 本モデルを用いて分析を行うこととする.

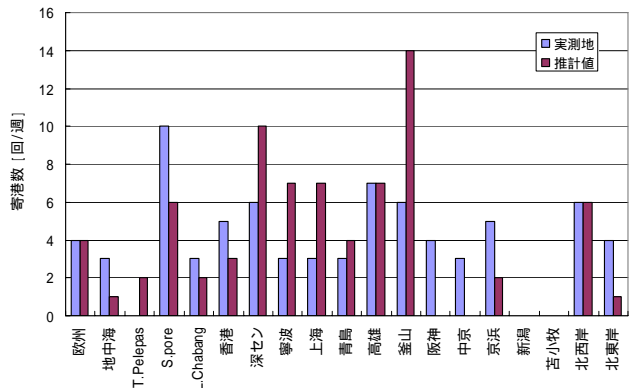


図-4 港湾寄港数再現性

(3) 分析の概要

構築した航路決定モデルを用いて, ここでは津軽海峡の被災が船社の航路決定行動に与える影響を分析する. 現在, 釜山港等の北東アジアの港湾は, 日本海を航行し津軽海峡を通過するルートが船社が選択することによって, アジア-北米航路における地理的優位性を確保している. ゆえに, 何らかの災害によって津軽海峡が通航不可能となった場合に, 船社の航路決定行動に深刻な影響を及ぼすと考えられることから, このようなシナリオを想定した.

分析手法としては, 釜山港等の北東アジアと北米を結

ぶリンク（ここでは、任意の航路における連続した二港湾間を指す）において、日本海ルートではなく、九州の西側を航行し太平洋に出る太平洋ルートを採用する。その際の港湾間距離を入力し航路決定問題を解くことによって、船社の航路決定行動に与える影響を分析する。

3. 日本港湾の被災を想定した貨物流動分析

(1) 港湾被災時のシナリオ設定

a) 韓国の場合

韓国において、釜山港は発展当初から国家戦略としての整備対象であり、それによって現在では東アジアにおける主要ハブ港湾の一つとなっている。それは同時に、国内港湾機能の釜山港への一極集中を進めることとなり、韓国において釜山港への依存度が顕著であるといえることができる。実際に、主要船社の東西基幹航路における韓国への本船寄港は釜山港への寄港がほとんどであり、韓国国内の他港湾への寄港実績は釜山の西140kmの光陽港にも見られるが、コンテナ取扱量は釜山港の1/10程度である²⁾。

本研究で行った、釜山港の被災をシナリオとして想定した貨物流動分析³⁾では、上記のような問題を考慮して、次のような仮定を設定した。釜山港を経由するのみのトランシップ貨物等は、本船寄港のある他国の主要港湾における代替を行った。しかし韓国国内、つまり釜山港の後背圏を生産地/消費地とする貨物については、釜山港以外の国内他港湾を荷出/荷卸港とし、フィーダー輸送によって本船寄港のある他国の港湾とを結び、そこで本船への積卸を行う、という設定の下に分析を行った。ここで、フィーダー港として利用する韓国国内の港湾に関しては、港湾の選択および指定は行っておらず、例えば韓国国内港湾（不特定）から阪神港へのフィーダー料金等を一律に設定し、そのコストを参照して最適な代替港湾の選択を行った。

b) 日本の場合

日本に関しては、南北に細長い日本列島に複数の経済圏が点在しているという国土上の特徴のために、各地域において港湾投資が行われてきた。ゆえに、国内の港湾機能は韓国等に比べて分散しているといえる。国内の港湾投資を集中させることを一つの目的として施行された「スーパー中核港湾政策」でさえも、選定された対象港湾は東京・大阪・伊勢の三大湾に位置する港湾群である。主要船社が東西基幹航路において寄港する国内港湾も航路および船社によって異なる。

このことが港湾の被災を考えるにあたって意味するところは、国内のある一つの港湾が被災し機能停止した場合に、国内の他港湾によって補完できる可能性が潜在す

るということである。図-5および図-6に、東京湾の被災を想定した場合における貨物の経路変更の例を示す。生産地から東京港へ陸送して本船積みしていた貨物は、図-5では阪神港へ陸送して本船積みする経路に変更されている。一方図-6では、地方港から釜山港へフィーダー輸送を行い、そこから本船積みする経路に変更されている。このような代替輸送パターンの選択においては、国内の荷出/荷卸港としてどの港湾を利用するかが重要であり、その際には陸上輸送コスト等を参照することも含めて代替経路選択が行われる。ゆえに、国内に複数の主要港湾が存在する日本において、港湾の被災を考えるにあたっては、国内の陸上輸送も含めた分析が必要であると考えられる。

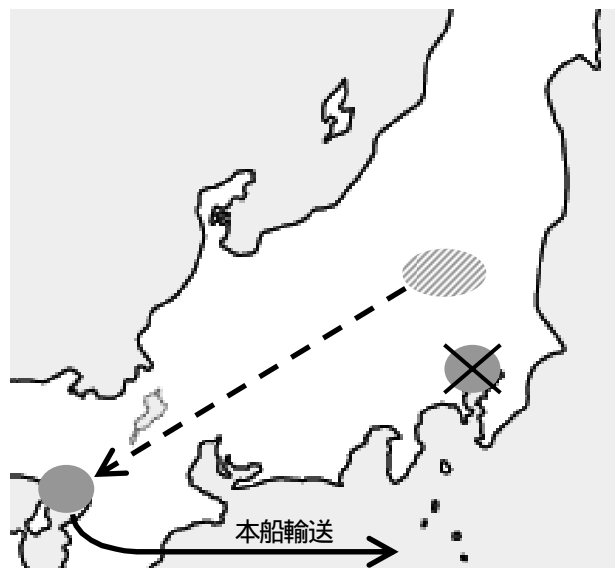


図-5 貨物の経路変更例（国内補完）

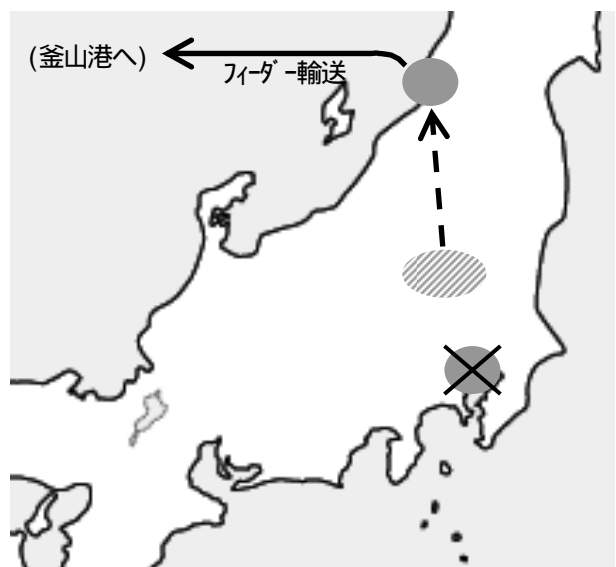


図-6 貨物の経路変更例（国外で代替）

ここで、本研究は災害発生後から数週間程度の短期間を対象としているため、貨物は全て災害発生前にブックイングされたものと仮定している。そのため、経路変更にかかるコストは、陸上輸送費も含めて船社が負担するものとする。

(2) 陸上輸送を考慮したモデルの定式化

ここでは日本港湾の被災を想定して分析を行うため、2. で定義した航路決定問題に加えて、被災港湾を含む貨物の経路をコスト最小化によって変更する貨物経路変更問題を解く。その際に、前述したように陸上輸送も含めた分析を行うことを念頭に定式化を行った。貨物経路の変更を考慮した船社のコスト関数を以下に示す。

$$C^n = \sum_j \sum_{i_1, i_2} C_j^n \cdot S_j^n + \sum_{k_1, k_2} c_{k_1 k_2}^{land} \cdot x_{k_1 k_2} + \sum_{k_1, k_2} c_{k_1 k_2}^{feeder} \cdot x_{k_1 k_2} \quad (1)$$

(1)式の右辺第二項は、被災港湾を含む貨物経路 k_1 を別の経路 k_2 に付け替える際に発生する国内陸上輸送コストを示す。右辺第三項は、同様に被災経路を付け替える際に発生するフィーダー輸送コストを示す。定期航路運航の定常コストに加え、これらの経路変更に必要なコストも含めた最小化問題を解くことによって、最適な航路および代替港湾の選択を行う。

次に、貨物経路変更問題を考慮した場合における制約式を示す。

$$\sum_{k_2} x_{k_1 k_2} = x_{k_1} \quad \text{for } \forall k_1 \in K_{dis} \quad (2)$$

$$x_0^i + \sum_{k_1} \sum_{k_2} x_{k_1 k_2} \cdot \delta_{n, k_2}^i \leq Cap_i^n \quad \text{for } \forall i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{k_2} x_{k_2 0} \cdot \delta_{n, k_2}^{i_1 i_2} + \sum_{k_1} \sum_{k_2} x_{k_1 k_2} \cdot \delta_{n, k_2}^{i_1 i_2} \leq \sum_j V_j^n \cdot \delta_{n, j}^{i_1 i_2} + \sum_j \tilde{V}_n^{i_1 i_2} \cdot \delta_{n, j}^{i_1 i_2} \quad \text{for } \forall i_1 i_2 \in I^{Asia} \quad (4)$$

$$\sum_{k_2} x_{k_2 0} \cdot \delta_{n, k_2}^{i_1 i_2} + \sum_{k_1} \sum_{k_2} x_{k_1 k_2} \cdot \delta_{n, k_2}^{i_1 i_2} \leq \sum_j V_j^n \cdot \delta_{n, j}^{i_1 i_2} \quad \text{for } \forall i_1 i_2 \in I^{out} \quad (5)$$

(2)式は被災港湾を含む経路 k_1 がすべて別の経路に変更されることを示す。(3)式は国内の代替港湾における処理容量制約である。国内の主要港湾の被災を想定する場合、国内の代替港湾、特に地方港におけるコンテナ貨物処理容量が大きなボトルネックとなる問題が想定できる。(4)式、(5)式は変更後の経路におけるリンクの容量制約式である。(4)式はアジア域内におけるリンクの容量制約式を示したものである。左辺第一項は経路変更前

の経路 k_2 の貨物量であり、それに付け替える貨物量を加えたものがリンクの総貨物量となる。右辺第一項は定期航路の本船による供給スペース数を示し、第二項は本船の容量で輸送できない場合のフィーダー輸送による供給スペース数を示し、それらの和がアジア域内のリンクにおける容量となる。(5)式はアジア域外における容量制約式を示したものである。これは(4)式からフィーダー輸送による供給スペース数の項を省いた形となっており、北米-アジア間および欧州-アジア間といったアジア域外のリンクでは貨物は必ず本船の供給容量内で輸送されることを示す。

(3) 分析の概要

本稿では東京湾(東京港、横浜港、木更津諸港を含む)の被災をシナリオとして想定し、貨物流動の変化を分析する。陸上輸送も含めた分析を行うために、全国輸出入コンテナ貨物流動調査⁴⁾のデータにより東京湾諸港を利用する貨物の国内生産地あるいは消費地を特定し、その陸上輸送コスト等の算定を可能にする。

4. おわりに

本稿では、災害時における船社の航路決定モデルを改良し、実際の国際コンテナ貨物輸送市場に適用し、その再現制度および課題についての整理を行った。また、日本国内における災害をシナリオとして想定し分析を行うために、陸上輸送費を明示的に組み込んだモデルを構築した。そのモデルを用いて、我が国の主要港湾を対象とした災害が、アジア諸港湾の貨物輸送に与える影響を分析した。なお、紙面の都合により、分析結果は発表時に示すこととする。

参考文献

- 1) (株)オーシャンコマース: 国際輸送ハンドブック, 2008
- 2) Informa UK Ltd. : Containerization International Yearbook 1972-2007, 1972-2007
- 3) 安福皓介, 竹林幹雄: 航路の変更を考慮した災害時国際貨物輸送に関する一考察, 土木計画学研究・論文集, Vol. 39, 2009
- 4) 国土交通省港湾局: 全国輸出入コンテナ貨物流動調査, 2009