

船社の寄港地選択行動分析に基づく北極海航路実現可能性検討*

Feasibility of Northern Sea Liner Route based on Ocean Carriers' Port Choice Behavior Analysis*

石黒一彦**

By Kazuhiko ISHIGURO**

1. はじめに

ここ数年の北極海の海水量減少は著しく、今世紀前半、それもかなり早い時期に夏季の北極海では海水がなくなる可能性が高い。これはアジア欧州間の海上輸送において、北極海経由が選択肢として浮上することを意味する。現在、日本欧州間のコンテナ貨物の20%以上が日本以外のアジアの港湾で一度積み替えられている。これは日本が東アジアの中で最も欧州から遠いという地理的な要因が大きい。北極海経由の輸送が実現すれば、極東と北欧州の航路距離は約40%短くなり、日本は東アジアの中で最も欧州に近い国となる。その際には多くの大型コンテナ船がラストポートとして日本に寄港する可能性があり、ハブ港湾実現に向けた戦略的な港湾整備が必要となる。本研究では、筆者らが既に構築している規模の経済と多層ネットワークを考慮した物流費用最小化問題をアジア欧州航路に適用し、寄港地変更と航路変更の可能性を分析するとともに、北極海経由の定期コンテナ航路開設の可能性を検討することを目的とする。

2. 北極海航路開設の技術的可能性

(1) 海氷の減少

Stroeve et al. はIPCCで報告されている海氷予測の多数のモデルによる結果と長期観測トレンドとを比較している。観測結果はそれらモデルのうち、最も速く海氷が減少するモデルと同じような軌跡を描いており、多くの研究者の予想を上回る速さで海氷が減少していることを示している。現状を最も再現しているモデルによる予測では、2050年には北極海の海氷がほとんどなくなるとの結果が得られている。現状、予想を上回る速さで海氷が減少していることを考慮すると、夏季に限ればかなり早い時期に一般の商船の航行が可能となることが想定される。実際に、2008年9月にはロシア側、カナダ側の双方で陸と接する海水が消滅しており、太平洋から大西洋までの船舶の航行が可能となっ

ている。

(2) 造船技術

ロシア極東沿岸やバルト海等を航行する船舶の中には、既に高い耐氷性能を持つ商船や砕氷能力を持つ商船が登場している。それらは主にタンカーやLNGタンカーだが、RORO船やバルク船も登場しており、それら技術のコンテナ船や一般貨物船への応用も問題ないと考えられる。ただし、北極海航路が実現したとしても、単独での航行は想定されていないようである。費用面の問題等から、砕氷船団のエスコートを受けた耐氷性能を持つ商船による輸送が現実的とされている。北極海航路航行の費用には、このエスコート費用も加算する必要がある。

(3) 制度

北極海航路はロシアの領海あるいは排他的経済水域を航行することになるため、ロシア政府が定める制度に従う必要がある。現行では通行料が賦課されることや4ヶ月前までの通行申請が必要であるなど、船社にとっての利便性は高いとはいえない。これら制度は今後の展開全く読めないため、本研究においては考慮しない。

3. 海上コンテナ輸送ネットワークの想定

(1) 輸送ネットワークの多層性

a) 物流の結節点施設としての港湾

多数のトランシップ貨物を集める国際的なハブ港湾から末端の小規模港湾まで、港湾は機能別に分類できる。本研究では広域をカバーする国際ハブ港湾、それに準ずる規模の地域ハブ港湾、長距離基幹航路の寄港が少ないフィーダー港湾の3種類を想定する。

物流の発生集中場所は、各港湾の直背後地とする。発生集中地においては、最寄りの港湾を積み卸し港湾として利用し、港湾選択は行わないものとする。これらを輸送貨物の発生集中地点として発着ノードと定義する。

b) 海上輸送ネットワーク

港湾とそれらを結ぶリンクから構成される海上輸送ネットワークは、その機能により長距離基幹航路ネットワーク、地域基幹航路ネットワーク、フィーダーネットワークに分けられる。長距離基幹航路ネットワークは船

*キーワード：物流計画，ターミナル計画，港湾計画

**正員，博(学術)，神戸大学大学院海事科学研究科

(兵庫県神戸市東灘区深江南町5-1-1，

Tel: 078-431-6314, E-mail: ishiguro@maritime.kobe-u.ac.jp)

型の大きな船舶によってアジア欧州間の主に国際ハブ港湾間を結ぶネットワークである。地域基幹航路ネットワークは中型の船舶による輸送ネットワークを想定しているが、地域内に限らず、アジア欧州間の輸送も行うネットワークとして定義する。アジア欧州間においては、長距離基幹航路ネットワークと地域基幹航路ネットワークのいずれでも輸送が可能とする。フィーダーネットワークは地域内輸送に限定した輸送ネットワークとして定義される。輸送単価は長距離基幹航路ネットワークが最も安く、フィーダーネットワークが最も高い。多くの港湾間において、フィーダーネットワークにより国際ハブ港湾までフィーダー輸送を行い、長距離基幹航路ネットワークを利用するか、地域基幹航路ネットワークを利用して直接長距離輸送を行うかの選択肢が用意されることになる。

(2) 物流費用における規模の経済性

a) 物流に関する諸費用

物流費用は、大きく固定費と変動費に分類することができる。固定費には減価償却費や固定人件費などが含まれる。コンテナターミナル等の物流施設では固定費の中でも施設などの減価償却費が大きな割合を占めるなど、固定費は全物流費用の大部分を占める。

b) 物流費用における規模の経済

物流需要は季節変動、週間変動、日変動が大きい。顧客のニーズに対して的確に応えるためには、需要のピークに合わせた施設整備が必要であり、コンテナターミナルや船舶などの稼働率は低くなりがちである。従って、取扱量を増やし稼働率を上げるなど効率的な運用を行うことができれば、物流単価を大幅に低下させられる。

機能が同じターミナルが複数ある場合には、ターミナルを集約化することによってターミナルの管理コストや業務人員数の削減が可能である。さらに、地域によっては共同配船が可能であり、これによってターミナル集約化と同様な効果が期待でき、いずれの場合においても規模の経済が働きやすいと考えられる。

4. モデルの定式化

(1) 前提条件

a) 船社

現実には複数の船社が存在し、シェアも変動するものであるが、簡単化のために、単一の船社が、需要に対する全ての貨物を輸送することとする。これは、船社別に固定OD貨物量を与えているとの位置づけである。

b) 貨物特性

業種や品目別の貨物特性は考慮せず、コンテナの個数 (TEU) のみを考える。

c) 輸送単位費用

輸送にかかる単位距離あたりの輸送費を船型別に与えることで規模の経済を表現する。具体的には、長距離基幹航路ネットワーク、地域基幹航路ネットワーク、フィーダーネットワークのそれぞれについて、地域によらず一定の輸送単位費用を設定する。

d) 港湾

国際ハブ港湾および地域ハブ港湾は、各地域に1つずつ立地できるものとする。モデルの計算結果として、各地域において国際ハブ港湾および地域ハブ港湾の取扱量がそれぞれ求まることを想定する。結果としていずれの取扱量も0となった場合にはハブ機能は有さない港湾であると解釈する。同様に、地域ハブ港湾としての取扱量が存在するが、国際ハブ港湾としての取扱量が0となる港湾は、地域ハブ港湾であると解釈する。

e) 単位積替費用

港湾では取扱貨物量に応じて単位積替費用が変化すると考え、港湾での規模の経済を明示的に表現する。取扱量に応じた施設整備が迅速に行われることを想定し、混雑等による規模の不経済は考慮しない。

f) ネットワークの階層性

地域ハブ港湾で積替えを行った後に、地域基幹航路ネットワークを通じて国際ハブ港湾に輸送された貨物のみが、国際ハブ港湾での積替えを行えるものとする。

(2) 輸送ネットワークの構成

本研究では、東・東南アジアと北欧州・地中海を対象地域とする。本モデルでの輸送ネットワークの特徴は、①一般的な輸送ネットワークにおいては1つのノードとして表現される港湾を、入荷と出荷のための2つのノードと、その間の積替えを表すリンクで表現している点、②各地域に通過ノードを設定している点、③地域間輸送を行えるネットワークとして長距離基幹航路ネットワーク、地域基幹航路ネットワークの2階層構造を想定している点、④港湾での積替えをリンクで表現する点の4点が挙げられる。

全ての地域にはノードとして発ノード、着ノード、3種類 (長距離基幹航路、地域基幹航路、フィーダー航路) の通過ノード、国際ハブ港湾と地域ハブ港湾それぞれの入荷ノードと出荷ノードをすべて1つずつ設けてあり、それらが適宜リンクで結ばれている。

a) ノード

発ノードは貨物の発生ノード、着ノードは貨物の集中ノードであり、それぞれ貨物が通過しない端点である。ネットワークの各階層に対応した3種類の通過ノードは、隣接しない地域間で効率的な輸送が可能となるようにするための中継点である。貨物の積替えを行う港湾の入荷ノードと出荷ノードは、各ハブ港湾にそれぞれ設けられ

ている。

b) リンク

貨物の発生地点から同地域の地域ハブ港湾入荷ノードの間と、地域ハブ港湾出荷ノードと同地域内にある貨物の集中ノードとの間を結ぶリンクを域内輸送リンクとする。フィーダーリンクは各ハブ港湾以外の地域間輸送を表現したリンクである。

費用関数などの設定を容易にするために、規模の違う船舶間の積替えを、距離を持たない積替リンクとして表現している。このリンクでは規模の経済が働く。

(3) 費用関数の定式化

a) 港湾費用

物流費用 (C) は取扱量に依存しない固定費と、取扱量に依存する変動費の和として表される (式(1))。これを取扱量で除することにより平均費用 (式(2)) が得られる。取扱量が増えるほど、単位あたりの費用が逓減する。固定費の占める割合が大きければ大きいほど、規模の経済が強く働くことになる。

$$C = CF + CV \times q \quad (1)$$

$$\frac{C}{q} = \frac{CF}{q} + CV \quad (2)$$

CF: 固定費, CV: 単位変動費, q: 取扱量

① 定費

港湾の固定費の中には、管理施設や情報基盤など、初期投資額が規模にあまり依存しない施設があるため、全体としては規模の経済が働く。これを式(3)、式(4)のように定式化する。施設規模が大きくなるほど、固定費の平均費用は小さくなる。ただしいくら規模が小さくても最低限ある一定の施設が必要であるため、港湾を運営する上で最低限必要な費用を基準固定費として与え、ある最低取扱量までは固定費は一定であると考えられる。

$$CF(x) = \int \delta_1^{x-q_1} \cdot CF_1 dx \quad (x > q_1) \quad (3)$$

$$= \frac{CF_1}{\delta_1^{q_1} \cdot \log \delta_1} \cdot (\delta_1^x - 1) \quad (x > q_1) \quad (4)$$

$$CF(x) = CF_1 \quad (x < q_1) \quad (5)$$

CF(x): 固定費, CF₁: 基準固定費

x: 施設規模, q₁: 最低取扱量

δ₁ (< 1): 単位費用逓減に関するパラメータ

② 変動費

変動費では人件費が大きな割合を占めるが、取扱量が多ければ作業の効率化や共同化により人員を削減できるため、やはり規模の経済が働く。固定費の場合と同様に、施設規模が大きくなるほど、単位変動費も小さくなる。ただし、単位変動費がゼロになることはなく、ある

最低値に漸近するように定式化する。固定費と同様、ある一定の取扱量までは単位変動費は一定とする。

$$CV(x) = \delta_2^{x-q_1} \cdot CV_a + CV_b \quad (x > q_1) \quad (6)$$

$$CV(x) = CV_1 (= CV_a + CV_b) \quad (x < q_1) \quad (7)$$

CV(x): 単位変動費, CV₁: 基準単位変動費

CV_a: 単位変動費 (逓減項), CV_b: 最低単位変動費

δ₂ (< 1): 単位費用逓減に関するパラメータ

③ 平均港湾費用

取扱量に対して常に適切な設備投資が行われる (x=q) と仮定すると、式(3)、式(4)、式(5)、式(6)、式(7)より費用関数は次のように表される。

$$C = CF(q) + CV(q) \cdot q \quad (q > q_1) \quad (8)$$

$$C = CF_1 + CV_1 \cdot q \quad (q < q_1) \quad (9)$$

これは、様々な施設規模に対応する費用曲線の包絡線を結んだものである。この費用関数 (式(8)、式(9)) を取扱量で除することにより、平均費用関数 (式(10)、式(11)、式(12)) が得られる。

$$\frac{C}{q} = \frac{CF(q)}{q} + CV(q) \quad (q > q_1) \quad (10)$$

$$= \frac{CF_1 (\delta_1^q - 1)}{\delta_1^{q_1} \cdot q \cdot \log \delta_1} + \delta_2^{q-q_1} \cdot CV_a + CV_b \quad (q > q_1) \quad (11)$$

$$\frac{C}{q} = \frac{CF_1}{q} + CV_1 \quad (q < q_1) \quad (12)$$

b) リンクごとの費用関数

① 積替リンクコスト

積替リンクコスト (LC_k) は、単位重量あたりの費用とし、港湾種類毎に固定費 (式(3)、式(4)) と変動費 (式(10)) の和で表すことができる。国際ハブ港湾と地域ハブ港湾では一つの港湾に対する規模あたりの従業者数も異なるため、規模の経済の働き方に違いがあると考えられる。国際ハブ港湾は建設費などの固定費は大きい、取り扱う貨物の量が多いことで、規模の経済性が高いと考えられる。一方、地域ハブ港湾は変動費の水準が高く規模の経済性は低いと考えられる。両港湾において費用関数の式体系は同じとするが、異なるパラメータを用いて積替リンクコストを式(13)で表現する。

$$LC_{k_m} = \frac{CF_{m1} (\delta_{m1}^{q_m} - 1)}{\delta_{m1}^{q_{m1}} \cdot q_m^{k_m} \cdot \log \delta_{m1}} + \delta_{m2}^{q_m - q_{m1}} \cdot CV_{ma} + CV_{mb} \quad (13)$$

k_m: 国際ハブ港湾 (m = 1), 地域ハブ港湾 (m = 2)

② 輸送リンクコスト

単位輸送コストにあたる輸送リンクコスト (LC_j) は輸

送単位費用と(β_h)と距離(d_{ij})の積で表される(式(14)).

$$LC_{ij} = \beta_h \times d_{ij} \quad (14)$$

h : リンク種別(1: 上位, 2: 下位, 3: 直行, 4: 域内)

ij : ノード

5. モデルの適用

(1) データセットとパラメータ推定

Global Insightおよび全国輸出入コンテナ貨物流動調査からODデータを作成する。これを基に、現状再現性が最も高くなるようなパラメータの組み合わせを探索する。北極海航路の航路距離はシップアンドオーシャン財団が報告書で用いている距離とする。

(2) 解法

本研究では、ネットワーク交通量配分で広く用いられている分割配分法により輸送費用最小化に基づく港湾取扱量を求める。通常の方法では、各回の配分の貨物量が少ないため、規模の経済を享受するだけの貨物量がハブ港湾に集まらず、明らかに高コストな解となる。そこで、港湾での費用の中で大きな割合を占める固定費を初期配分時には著しく低く設定し、一定の割合で固定費を高く更新しながら繰り返し計算を行う方法を提案する。この際、一度配分が終了した段階で、各港湾で取扱われた貨物量を次回更新された固定費を与えた費用関数に代入し、初期積替単位費用として次回の分割配分で与え、前回の貨物量より多く取扱われるまで一定であるとする。

6. 結果と結論

結果は講演時に示す。

参考文献

- 1) Stroeve, J., M. M. Holland, W. Meier, T. Scambos, and M. Serreze: Arctic sea ice decline: Faster than forecast, *Geophysical Research Letters*, 34, L09501, 2007.
- 2) Maslanik J. A., C. Fowler, J. Stroeve, S. Drobot, J. Zwally, D. Yi, W. Emery: A younger, thinner Arctic ice cover: Increased potential for rapid, extensive sea-ice loss, *Geophysical Research Letters*, 34, L24501, 2007
- 3) 宮下國夫: 日本物流業のグローバル競争, 千倉書房, 2002.
- 4) Cooper, L.: Location-allocation problem, *Operations Research*, 11, pp.331-343, 1963.
- 5) 家田仁・佐野可寸志・小林信司: 詰合わせトラック物流における都市内集配活動のモデル化とその推定, *土木計画学研究・論文集*, No.11, pp.215-222, 1993.
- 6) 徳永幸之・岡田龍二・須田熙: 宅配輸送におけるセンター配置及び輸送経路決定モデル, *土木計画学研究・論文集*, No.12, pp.519-525, 1995.
- 7) 家田仁・柴崎隆一・内藤智樹: 日本の国内輸送も組み込んだアジア圏国際コンテナ貨物流動モデル, *土木計画学研究・論文集*, No.16, pp.731-741, 1999.
- 8) 石黒一彦・桜田崇治・稲村肇: 規模の経済を考慮した輸送費用最小化に基づく広域物流拠点配置モデルの開発, *土木計画学研究・論文集*, Vol.17, pp.693-700, 2000.
- 9) 西垣雅弘・石黒一彦・秋田直也・小谷通泰: 規模の経済と多層ネットワークを考慮した広域物流拠点配置モデルの開発, *土木計画学研究・講演集*, Vol.38, 2008.