日本発着の国際コンテナ輸送におけるネットワークと ハブ港の選定と評価法

学生員 滝沢 尚士*
正員 秋元 博路*

正員 武市 祥司**

Selection and evaluation of network and hub ports for international container transportation around Japan

by Hisashi Takizawa, *Student Member*
Hiromichi Akimoto, *Member*

Shoji Takechi, *Member*

Summary

The number of shipping services by very large container ships is decreasing in Japan because they are avoiding the inefficiency of picking cargos at distributed Japanese ports. On the other hand, China and Korea have concentrated their investment on a few large ports to create hub-spoke networks and to keep their influences on the physical distributions in East Asia region. This paper describes a container logistics simulation for designing of international container transportation networks. We discuss the economical benefit of concentrating international cargos in one or two major Japanese hub ports by evaluating the total shipping cost of shippers and shipping companies. The result shows the suitable selection of Japanese hub ports and its benefit to domestic and foreign shippers.

1. 緒 言

近年、ポストパナマックス船などの船舶の大型化によってハブ・スポーク輸送の集約化が進み、シンガポールや香港のようなグローバルハブ港が出現した¹⁾。コンテナ取扱量における港湾の地位が周辺国のアジア港が上位を占めるのに対し、1990年代前半にはコンテナ取扱個数の世界上位10位までに2港が入っていた日本は、1990年代後半から相対的に地位が低下している。例えば、2006年には日本の主要5港のコンテナ取扱個数の合計は韓国の釜山港の1港の取扱個数と同程度に過ぎない²⁾。さらに、日本の港開発は分散して投資が行われているため、国際的なハブ・スポーク輸送における輸送拠点となるハブ港が構築されえない。このため、日本に寄港する国際輸送では非効率性が解消されず、北米航路において日本の港に寄港しないサービスが増えている(Fig. 1)。

これらの問題に対する既存研究としては、二つのアプローチがある。一つは、数理的アルゴリズムの適用事例としてコ

Fig. 1 Capacity of container transportation from East Asia region to North America.³⁾

ンテナ輸送航路の航路最適化に関する研究であり、もう一つは輸送の集約による効率化の代表であるハブ・スポーク輸送の形態に特に着目した航路ネットワークに関する研究である。前者として、有木⁴⁾、松倉⁵⁾などの遺伝的アルゴリズムによるコンテナ輸送ネットワークの最適化の研究がある。これらの研究は負荷の平準化の観点から船舶の航路の最適化を行っている。確かに、船会社やフォワーダにとっては上記の観点のみでも十分かもしれないが、輸送のもう一方の当事

* 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

** 金沢工業大学基礎教育部

Fig. 2 Evaluation of hub ports by loss

者である荷主の観点からの最適化という視点に乏しい。すなわち、荷主は自己の有する貨物の価値の時間による下落を意識しているのに、この時間価値への考慮が十分でない。コンテナ貨物の時間価値も加味した研究として、佐藤⁶⁾、木村⁷⁾、佐藤⁸⁾は、寄港順や便数を考慮した日中間のネットワークを提案し、荒井¹¹⁾は様々な配船形態を表現したネットワークの最適化の検討をしたが、輸送の集約による効率化すなわちハブ港に関する考察は乏しい。後者のハブ・スポーク型輸送に関する既存研究として、黒川⁹⁾や黒田¹⁰⁾はハブ・スポーク型の輸送の効果及びハブ港としての要件などを示した。これらは、船舶輸送の特性を踏まえた実証的な研究ではあるが、現実の分析が主な目的であり、今後の輸送ネットワークの再構築の提案には至っていない。

本研究の目的は、陸上輸送を含めたコンテナ輸送ネットワークの構築によって、ハブ港の配置と評価を行い、日本のハブ港戦略を検討することである。

2. コンテナ物流ネットワークの評価

2.1 犠牲量

コンテナ輸送の海運ネットワーク上の効率性を含む荷主の利便性を評価する指標として総犠牲量を用いる。すなわち、総犠牲量の値によって、ハブ港配置の良否を定量的に判断する。そして、総犠牲量をネットワーク毎に算出することで、最適なハブ港配置を検討する(Fig. 2)。

犠牲量とは、実際に必要な費用、および時間経過による貨物の価値下落を換算した金額の和である。本研究で、ネットワークの評価に用いる指標である総犠牲量 TotalLoss を式(1)に示す。

$$\text{TotalLoss} = \sum C_c + \sum C_{\text{ship}} \quad (1)$$

ここで C_c は荷主が負担する犠牲量、 C_{ship} は海運会社が負担する犠牲量である。本研究では、オペレータ（船社）の利益、及び陸上輸送の荷役などの固定費用は一定であるとみ

Fig. 3 Conceptual diagram of the simulator

なし、比較には影響しないため総犠牲量には算入しない。荷主が負担する犠牲量 C_c を式(2)に示す。

$$C_c = TV \times (t_{\text{arr}} - t_{\text{dep}}) + C_{\text{road}} \quad (2)$$

ここで、TV は貨物の時間価値、 t_{dep} と t_{arr} はそれぞれ貨物の発生、到着時刻を表す。 C_{road} は陸上輸送による費用を表し、二地点間の高速道路料金、所要時間、距離、人件費、燃料費より算出する。

海運会社による犠牲量 C_{ship} を次式で表す。

$$C_{\text{ship}} = C_{\text{tc}} + C_{\text{fs}} + C_{\text{pc}} + C_{\text{ch}} \quad (3)$$

ここで、 C_{tc} は傭船費用 (time charter)、 C_{fs} は燃料費用 (fuel cost of ship)、 C_{pc} は港湾費用 (port charge)、 C_{ch} はコンテナハンドリング費用 (cost of container handling) である。 C_{tc} は、建造コスト償却費(借入金の金利含む)、修繕維持費(含む入渠費用)、保険料、船員費、潤滑油費の全てを含む値として佐藤の近似式でモデル化した式⁶⁾を使用する。

$$C_{\text{tc}} = (\alpha_{\text{tc}} * N_{\text{loading}} + \beta_{\text{tc}}) * \text{Day} \quad (4)$$

α_{tc} 、 β_{tc} は近似式より求められた定数、Day は経過日数、 N_{loading} はコンテナ船の積載コンテナ数である。

2.2 物流シミュレーション

犠牲量評価のためには、輸送ネットワーク上のコンテナ貨物の詳細な物流経路と経過時間をとともに把握する必要がある。そのために、貨物を個々のコンテナに離散化し、時間軸に沿って物流量を定量的に把握するシミュレーションを実施する。個々のコンテナ貨物の移動、日本の港湾、船舶およびその寄港スケジュールをモデル化し、現実のコンテナフローを反映するコンテナ輸送ネットワークのシミュレータを構築して、計算機内のコンテナ物流のオペレーション結果が

ら、2.1 項で述べた犠牲量を計算する。

3. コンテナ輸送シミュレータ

3.1 シミュレータ

シミュレータは各種入力データに基づき、現実世界の港、船、都市、道路、貨物を計算機上に再現する。都市や港をノード、道路や航路をアークとする輸送ネットワークを作成する。そして、シミュレータ上では時間軸に沿って貨物が発生、輸送、消費され、各港のコンテナ取扱個数や各荷主と船会社の犠牲量が出力される(Fig. 3)。

3.2 コンテナフロー

シミュレータ上においてコンテナ貨物は、個々に時間軸に沿って発生、経路選択、輸送、消費される。具体的には、コンテナ貨物は以下の手順で処理される。

- 1) 各港で単位時間毎にコンテナ貨物を発生させる。
- 2) 荷主が各コンテナ貨物に対し、輸送可能である経路の犠牲量(式(2))を比較し、最小の犠牲量となる輸送経路、コンテナ船便を選択する。この輸送経路選択の際には、すでに満載となっているコンテナ船便は選ばれないものとする。
- 3) コンテナ貨物は発生地から出発港まで陸上輸送される。
- 4) 積載予定のコンテナ船が出発港へ到着したら、コンテナ貨物はその船に積載される。
- 5) 最小犠牲量の経路が出発港、目的港以外の港を経由する場合、その経由港でコンテナ貨物の乗り継ぎを行う。
- 6) 目的港に到着し、コンテナ船からコンテナ貨物が荷降される。
- 7) 目的地でコンテナ貨物が消費される。

コンテナ貨物一つに対する探索回数は、国内出発港が M 港、国内出発港を通る船が n 隻、目的地が O 港の場合、 $M \times n \times O$ 回となる。さらに、経由港で船の乗換え(トランシブ)をする場合、海外経由港を P 港、海外経由港を通る船が q 隻とすると、 $M \times n \times O \times P \times q$ 回となる。トランシブを二度以上する場合は、探索回数は更に $P \times q$ 回ずつ掛けていく。そのため計算処理時間がかかる場合は、探索回数に制限をかける。

3.3 入出力データ

コンテナ輸送ネットワークでの入出力データをTable 1及びTable 2に示す。入力、コンテナデータ、船舶データ、

Table 1 Input data

Container	Time value
Ship	Specification, Schedule, C-type oil
Port	Sorts of fee
City	Origin and destination, Amount of production number of cargo
Road	Highway charge, Fuel, Labor cost, Distance, Time interval

Table 2 Output data

Container	Container loss
Ship	Shipping firm's loss, Loading ratio
Port	Handling number of containers
Road	Road loss
Other	Total loss

港湾データ、都市貨物発生データ、国内陸上輸送費用データのデータベースを作成し、これらを入力データとして利用する。出力データは、荷主犠牲量、海運会社犠牲量、各船舶消費率及び港湾別のコンテナ取扱個数である。

4. 東アジア-北米間のコンテナ輸送シミュレーション

4.1 概要

構築したコンテナ輸送ネットワークを用いて、東アジアと北米間におけるコンテナ輸送をシミュレーションする。ここで東アジア-北米航路を選んだ理由は、輸送距離が長く、ハブ・スポーク輸送の効果が顕著となりうるからである。

日米貿易における日本からの輸出のみを限定して扱うこととする。これは本研究の最終目標が日本のハブ港配置の設計であり、日本の荷主に着目するためである。

4.2 シミュレーション条件

アジア-北米間のコンテナ輸送における各入力データ及びシミュレーション条件は以下である。

1) コンテナデータ

コンテナ貨物の時間価値は、佐藤⁵⁾と同様に、全てのコンテナ貨物について一律 7500(JPY/day)とする。なお、本シミュレーションで対象とするコンテナ貨物の総個数は約 60 万 TEU¹²⁾であり、荷主会社を区別せず、全てのコンテナは他のコンテナと独立して輸送される。

2) 船舶データ

Table 3 Ports of call in the simulation

Country	Port name
Japan	Sapporo、Aomori、Sendai、Akita、 Fukushima、Mito、Tokyo、Yokohama、 Nigata、Toyama、Kofu、Shizuoka、Nagoya、 Tsu、Kyoto、Osaka、Kobe、Okayama、 Hiroshima、Takamatsu、Fukuoka、 Nagasaki、Kumamoto
Korea	Busan、Incheon、Kwangyang
China	Dalian、Hong Kong、Lianyungang、Nansha、 Ningbo、Qingdao、Shanghai、Shenzhen、 Xiamen、Xingang
USA	USA

国際輸送ハンドブック 2008³⁾ を参考に、船舶データとして、運航スケジュール、船速、総トン数、最大コンテナ積載量を使用する。本シミュレーションで対象とするコンテナ船は 1683 隻であり、アライアンスや船会社の違いは考慮しない。

3) 港湾データ

日本、韓国、中国、米国の 4 カ国の港を対象とする。日本の港では、米国、中国、韓国との外航コンテナ船が寄港する港を選定する。ただし、1 都道府県において 2 つ以上の港がある場合は、最も規模の大きい港のみを選定した。韓国、中国の港では、米国との外航コンテナ船の寄港地であり、さらにコンテナ取扱量が多い港湾のみを選定した。米国については、簡単のため仮想的な西海岸の一港に集約した。以上によって、シミュレーションに用いる港湾は Table 3 に示す 37 港に限定される。港湾使用費（入港費）、コンテナハンドリング費用は単純化して、各国ごとに一定料金とする。

4) 都市データ

簡単のため、全てのコンテナ貨物移動の出発点は、日本国内の各都道府県庁の所在地とする。各都道府県の米国向けコンテナ発生個数は、国土交通省の港湾統計¹²⁾を基に算出した (Fig. 4)。都道府県庁間の距離、所要時間、高速道路料金は、インクリメント P 株式会社による検索サービス「MapFan」¹³⁾ から得られる値からデータベースを再構築して用いる。なお、港湾名も簡単のため、所在する都道府県の庁の名前と同じにした。

5) シミュレータ

シミュレーション期間は 1 年間、時間刻みは 4 時間とする。また、コンテナの積み替え回数の上限を 1 回とする。積み替えの回数に制限を設けずに実施した予備計算では、2 回以上の積み替えを行った貨物は全体の 1% 未満であるので、探索の計算コストを減らすために回数を 1 回までに

Fig. 4 Number of containers originates from 47 prefectural capital cities in Japan¹³⁾

Fig. 5 Difference between the real number and the results of simulator of handling containers in ports

制限する。

4. 3 結果

4.2 で述べた条件での各犠牲性を Table 4 に、実際の各港湾のコンテナ取扱個数とシミュレータ上のコンテナ取扱個数の比較を Fig. 5 に示す。

小規模の港の誤差は少ないものの、大規模な港では、実際の取扱個数とシミュレータ上取扱個数が 3, 4 割程度異なっ

Table 4 Total loss of the simulator [Billion JPY]

Shipper's loss	Time value loss	47.0
	Road loss	2.5
	Total	49.5
Shipping firm's loss	Chartering cost	152.0
	Fuel cost	1.0
	Port cost	53.0
	Handling cost	35.0
	Total	241.0
Total loss		290.5

Fig. 6 Number of containers handling of top 20 ports

ている。これは、実際の陸上輸送費用が過小評価されていること、シミュレーションでは発生毎に最適な出発港を決めているのに対し、現実実績に基づき出発港を固定している事原因であると考えられる。実際に陸上輸送費を1.5倍で計算したところ、実際の各港のコンテナ取扱個数とシミュレータ上のコンテナ取扱個数の差が25%縮小した。なお、本シミュレーションでは、ハブ港の検討が目的であるため、港の変更とは直接関係のない陸上輸送に関しては現状を維持し、陸上輸送費は変化させないこととした。

海外の港を含めた各港のシミュレータ上の取扱個数が上位の港を Fig. 6 に示す。

釜山港の取扱個数が多いことから、日本発のコンテナ貨物でも、釜山港で多くの貨物がトランシップされている。これは、釜山港に北米航路の船が多く寄港するため、釜山経由のほうが荷主の犠牲量が少ないケースがあるためである。さらに、釜山港を経由した貨物の出発港別のコンテナ個数比率を Fig. 8 に示す。釜山港を利用した貨物の出発港は名古屋港や大阪港や津港などの西日本側に多く、荷主は釜山港経由によって犠牲量を低く抑えられている。

5. ハブ港位置の検討

5.1 概要

4.3 の結果を比較基準として、日本国内のハブ港を利用した新たな外航コンテナ輸送ネットワークを評価するために、犠牲量の変化を算出する。具体的には、ハブ港となる国内港を選定し、外航コンテナ船が寄港できる国内の港はそのハブ港に限定されとする。このようにして、犠牲量を指標に、候補港から適切なハブ港を選定する。

ここで、ハブ港の候補港としては、荷主の利便性を確保するために、以下の4つの条件で満足するものとする。

条件1. コンテナ取扱個数の大きな港

条件2. 陸上輸送による犠牲量が少ない港

条件3. 釜山港への航海日数が少ない港

Fig. 8 Shares of Japanese ports used in the transport of containers from Japan to USA via Busan

Fig. 7 Difference of total loss (1 hub port case)

条件4. USA 港への航海日数が少ない港

以上の4つの条件を満たすハブ候補港として、東京、横浜、静岡、名古屋、新潟、京都、神戸、広島、福岡の9港が選択

Fig. 9 Difference of losses (1 hub port case)

布図をFig. 13に示す。なお、Fig. 11からFig. 13において、全組合せの犠牲量を表示しているが、港名は参考となる組合せのみ表示した。

5.3 考察

日本国内にネットワークとしてのハブ港を設計するために、運航スケジュールを変更すると、海外荷主の犠牲量は大幅に減少するため、総犠牲量は減少する。そこで、国内荷主犠牲量及び海運会社犠牲量に注目した散布図Fig. 10 及びFig. 13より、ハブ港として有望な港を検討することができる。

東京港や横浜港など東日本側の港をハブ港に選定した場合、海運会社の犠牲量の増加は低く抑えられるが、国内荷主の犠牲量の増加量は大きい。一方、福岡港や広島港など西日本側の港をハブ港に選定した場合、国内荷主の犠牲量を減少させることができるが、海運会社の犠牲量が大きく増加することがわかる。さらに、上記の各犠牲量の差異は、ハブ港が一港の場合よりも二港の場合のほうが顕著に表れている。

日本の産業の成長のために、顧客である荷主の利便性を優先するという観点に立つと、本シミュレーションの結果からは、福岡港をハブ港として選定することが最も良いと考えられる。なお、詳細なシミュレーションを実施して国内荷主もしくは海運会社のどちらかを優位を持たせるようなハブ港配置を行い、増加する犠牲量については、海外荷主からの運賃による収入で犠牲量を減少させることの検討などが今後の課題である。

6. 結論

本研究では、コンテナ輸送ネットワークをシミュレータによって再現し、日本のハブ港配置の設計と評価を行った。

・荷主と海運会社の利便性の指標である犠牲量を用いて、ハブ港の配置を検討する方法を提案し、犠牲量を算定するためのシミュレータを構築した。

・開発したシミュレータを用いて、犠牲量を算定し、ハブ港配置の検討を実施した。

・ハブ港選定の基準を、日本の荷主の犠牲量の減少にするか、海運会社の犠牲量の増加を抑えることをするかにより、選定されるハブ港は異なるという知見が得られた。特にハブ港の選定基準が前者の場合、荷主は釜山港経由の経路を選ぶ傾向にあることがわかった。また、荷主の犠牲量の削減を戦略の基準とする場合は、西日本へのハブ港配置が効果的であることがわかった。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金 基盤研究(B) 20360387 および基盤研究(B)19360391 の補助を受けて行われました。深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング, “アジアのハブ港湾をめぐる覇権争いの意義”, 1996, No2
- 2) “Containerisation International Yearbook”, Lloyd’s MIU, 1994, 2002, 2006
- 3) “国際輸送ハンドブック 2008”, ocean commerce Ltd
- 4) 有木敏博, 鈴木克幸, “GLS 法による日中海上物流の最適化”, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 2E 号, pp. 19-20, 2006
- 5) 松倉洋史, 勝原光治郎, 大和裕幸, “遺伝的アルゴリズムを用いた不定期船の配船計画作成に関する研究”, 日本船舶海洋工学会論文集, 2, pp. 85-92 20051200
- 6) 佐藤陽平, 宮田秀明, “日中間海上物流の離散型シミュレータの開発” 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 2E 号, pp 17-18, 2006
- 7) 木村哲也, 秋元博路, 宮田秀明, “マルチエージェントシミュレーションを基にした日中間コンテナ輸送ネットワークの設計法”, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第 6 号, pp439-442, 5 2008
- 8) 佐藤俊輔, 秋元博路, 宮田秀明, 佐藤陽平, “日中コンテナ物流における海陸複合輸送の経路選択システム” 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 4 号, pp 487-490, 5 2007
- 9) 黒川久幸, 鶴田三郎, 嶋邦彦, “海上コンテナ輸送ネットワークの設計に関する研究-東・東南アジアを中心として-”, 海上物流フォーラム第一回講演会テキスト, 海上物流フォーラム, pp37-47, 2005 年 1 月 21 日発行
- 10) 黒田勝彦, 竹林幹雄, 武藤雅浩, 大久保岳史, 辻俊昭, “外航定期コンテナ流動予測モデルの構築とアジア期間航路への適用”, 土木学会論文集, No. 653/IV-48, pp 117-131
- 11) 荒井誠, 梶井 良哉, “GA を用いた海上コンテナ輸送ネットワーク最適化手法の研究”, 日本船舶海洋工学会論文集, 4, pp. 55-61 20061200
- 12) 国土交通省-港湾統計(流動表), “都道府県・仕向国相互間輸出コンテナ個数表”, 2006
- 13) MapFanWeb, <http://www.mapfan.com/>, インクリメント P 株式会社