

# パナマ運河拡張後のアジアー北米東岸における輸送ネットワークに関する研究

白 雲天

指導教員 黒川 久幸 教授

## 1. はじめに

### 1.1 研究背景

パナマ運河は、太平洋と大西洋を最短で結ぶ海上物流を可能とする国際貿易にとって大変重要な結節点である。同運河では全世界の海上貿易量の5%に相当する船舶の通航がある。しかしながら、船舶の大きさによる通航制限があると同時に、通過する船舶数が多いため慢性的な通航待ちが発生している。このため、パナマ運河の拡張工事が現在、進められている。

このパナマ運河の拡張は、通航待ち時間の減少やこれまでパナマ運河を通航できず南米周りで運航されていた大型船舶の通航が可能となる。これにより、アジアー北米東岸のコンテナ航路として、パナマ運河の更なる利用が期待されている。このような外部環境の変化は、船会社がアジアー北米東岸のコンテナ航路に対して配船する船舶の船型や隻数に影響することとなり、この結果として船会社の輸送ネットワークの見直しをもたらす。

### 1.2 研究目的

本研究では、パナマ運河を通航するアジアー北米東岸の輸送需要量を推計するとともに、パナマ運河拡張後の輸送需要量を予測する。そして、船会社の立場からアジアー北米東岸の輸送需要量を対象に輸送費用が最小となる輸送ネットワークを明らかにすることを目的とする。具体的には輸送ネットワークを形成する航路サービス、就航船舶の船型、その隻数を明らかにする。これにより、船会社の配船に関する経営支援に資することが期待できる。

## 2. 北米航路及びパナマ運河の概要

### 2.1 対象範囲

アジアー北米東岸のコンテナ輸送の主要経路は、①北米西岸で荷揚げされ鉄道で輸送される

Intermodal 輸送、②パナマ運河を経由して北米東岸に寄港するパナマ運河経由輸送及び、③スエズ運河を経由して北米東岸に寄港するスエズ運河経由輸送の3つである。しかし、北米西岸港湾の混雑や組合問題、内陸輸送を担う鉄道との接続が問題となり、Intermodal 輸送の利用比率は低下しており、All Water となるパナマ運河及びスエズ運河経由輸送が増加している。

そこで本研究では、現在拡張工事が進められているパナマ運河を用いる②パナマ運河経由輸送を対象に検討を行う。

### 2.2 北米航路におけるコンテナ荷動き量

近年の北米航路におけるコンテナ荷動き量の推移を表1に示す。また、北米西岸及び東岸における船積みの構成比率を表2に示す。なお、アジアから北米向け（東向）を「往路」、その逆（西向）を「復路」と表記している。

表1 北米航路におけるコンテナ荷動き量の推移

	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年
往路(TEU)	14,389,443	13,304,000	11,337,000	13,085,880	13,143,905	13,378,489	13,838,147
復路(TEU)	5,660,745	6,061,000	5,991,000	6,248,570	6,714,336	6,703,117	6,868,887

表2 北米西岸及び東岸における船積みの構成比率の推移

		2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年
往路	西岸揚げ(%)	73.6	71.3	70.5	70.8	70.2	69.9	69.3
	東岸揚げ(%)	24.8	27.0	27.8	27.6	28.0	28.0	28.5
	他(%)	1.6	1.7	1.7	1.6	1.8	2.1	2.8
復路	西岸積み(%)	69.6	70.0	65.8	67.1	66.5	65.3	65.3
	東岸積み(%)	28.6	28.1	31.1	30.7	31.1	32.0	32.1
	他(%)	1.8	1.9	3.1	2.2	2.4	2.7	2.6

### 2.3 パナマ運河

#### 2.3.1 通航可能な船舶サイズ

パナマ運河の現行及び拡張後に通航可能な船舶のサイズを表3に示す。パナマ運河拡張後は、約12,000TEUのコンテナ船が通航可能となっている。

表 3 パナマ運河における通航可能な船舶サイズ

	現行	拡張後
全長	294.1m	366.0m
船幅	32.3m	49.0m
喫水	12.0m	15.2m

2.3.2 運河通航料の値上げの動き

パナマ運河庁は、2002 年から 2003 年にかけて新しい通航料システムを導入し、2005 年以降、通航料の値上げを頻繁に実施している。1TEU 当たりの通航料は 2005 年に 42 ドルであったが、2011 年には 82 ドルとなった（図 1）。

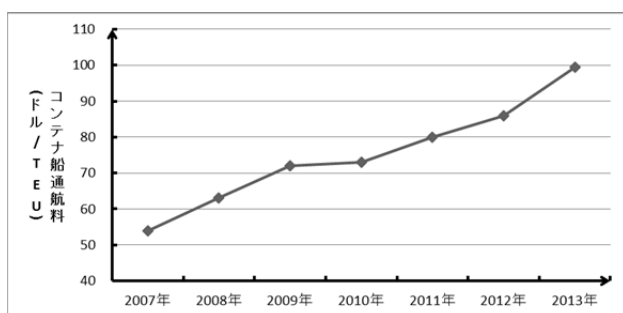


図 1 パナマ運河における 1TEU 当たりの通航料

3. 海上輸送ネットワークの定式化

3.1 輸送費用の構成

船会社のコンテナ輸送における輸送費用の構成を表 4 に示す。

表 4 輸送費用の構成

輸送費用	運航費	燃料費
		入出港費
		パナマ運河通航費(船体)
	船費	人件費
		修繕費
		減価償却費
		利息
	コンテナ関係費	原価償却費
		修繕費
		利息
パナマ運河通航費(コンテナ)		

3.2 定式化と制約条件

3.2.1 定式化

コンテナ輸送における輸送費用の定式を式 (1) に、そして個別の費用を式 (2) から (4) に示す。

$$\min. \text{CST} = \text{CST1} + \text{CST2} + \text{CST3} \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{CST1} = \sum_{r \in \text{SR}} (\text{CO1}_r + \text{CO2} \cdot \text{NUM}_r) \cdot y_r \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{CST2} = \sum_{(a,b) \in \text{SU}} \sum_{(r,i,j) \in \text{SL}} \text{CO3} \cdot \text{TIM}_{i,j} \cdot x_{r,i,j}^{a,b} \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{CST3} = \sum_{(a,b) \in \text{SU}} \sum_{pp \in \text{PNM}} \sum_{(r,i,j) \in \text{SL}; pp=j} \text{CO4} \cdot x_{r,i,j}^{a,b} \dots \dots \dots (4)$$

CST : 輸送費用 [ドル/年]

CST1 : 運航費と船費 [ドル/年]

CST2 : コンテナ関係費 [ドル/年] ※CST3 を除く。

CST3 : パナマ運河通航費 (コンテナ) [ドル/年]

CO1 : サービス別の運航費単価 [ドル/回]

CO2 : 船費単価 [ドル/(隻・年)]

NUM : サービス別の年間 1 航海あたり必要隻数 [隻/(回/年)]

y : サービス別の年間航海回数 [回/年]

CO3 : コンテナ関係費単価 [ドル/(TEU・年)]

※CO4 を除く。

TIM : リンクの通過時間 [年]

x : サービス別輸送需要別リンクの輸送量 [TEU/年]

CO4 : パナマ運河通航費 (コンテナ) 単価 [ドル/TEU]

式 (2) に運航費と船費を示す。運航費は、燃料費、入出港費、パナマ運河を通航する船舶に課せられる通航費から算出され、船費は、人件費、船舶の修繕費、減価償却費、利息から算出される。式 (3) は、コンテナ関係費の内のコンテナの減価償却費、修繕費、利息を表す。そして、式 (4) がパナマ運河を通航する際のコンテナに課せられる通航費である。

3.2.2 制約条件

制約条件には、コンテナの流動に関する制約とコンテナ船の積載に関する制約がある。式 (5) から (9) がコンテナの流動に関する制約で、式 (10) がコンテナ船の積載に関する制約である。

※コンテナの流動に関する制約

発港における流出量と流入量の制約

$$\sum_{(r,a,j) \in \text{SL}} x_{r,a,j}^{a,b} = \text{DEM}_{a,b} \quad (a,b) \in \text{SU} \dots \dots \dots (5)$$

$$\sum_{(r,i,a) \in \text{SL}} x_{r,i,a}^{a,b} = 0 \quad (a,b) \in \text{SU} \dots \dots \dots (6)$$

着港における流入量と流出量の制約

$$\sum_{(r,i,b) \in SL} x_{r,i,b}^{a,b} = DEM_{a,b} \quad (a,b) \in SU \dots\dots\dots(7)$$

$$\sum_{(r,b,j) \in SL} x_{r,b,j}^{a,b} = 0 \quad (a,b) \in SU \dots\dots\dots(8)$$

発港と着港以外の港における流入量と流出量の制約

$$\sum_{(r,i,h) \in SL} x_{r,i,h}^{a,b} - \sum_{(r,h,j) \in SL} x_{r,h,j}^{a,b} = 0 \dots\dots\dots(9)$$

(a, b) ∈ SU, r ∈ SR, h ∈ SP<sub>r</sub>; a ≠ h and b ≠ h

※コンテナ船の積載に関する制約

$$MAX \cdot y_r - \sum_{(a,b) \in SU} x_{r,i,j}^{a,b} \geq 0 \quad (r,i,j) \in SL(11) \dots\dots\dots(10)$$

※決定変数の制約

$$x_{r,i,j}^{a,b} \geq 0 \quad (a,b) \in SU, (r,i,j) \in SL \dots\dots\dots(11)$$

$$y_r \geq 0 \quad r \in SR \dots\dots\dots(12)$$

DEM : 輸送需要[TEU/年]

SR : サービスの集合

SU : 需要の集合

SL : サービス別のリンクの集合

PNM : パナマ運河を表すノードの集合

MAX : コンテナ船の最大積載量[TEU]

#### 4. 就航隻数の算出式

輸送需要量を輸送するために必要なコンテナ船の就航隻数を次のように算出する。

$$N = D / (f \times W) \dots\dots\dots(13)$$

$$f = Q / CT \dots\dots\dots(14)$$

N : 隻数

D : 往復路の輸送需要量の最大値 (TEU)

f : 寄港頻度

W : 輸送能力 (TEU/隻)

CT : 1 サイクル時間 (h)

Q : 計算の対象期間 (h)

なお、1 サイクル時間とは、一つのサービスにおいて寄港する港を一巡するのに係る時間で、航

海時間、荷役時間、入出港時間等の全ての時間の合計である。ここでは、荷役時間は船型に比例し、入出港時間は寄港回数に比例すると仮定し、既存のサービスを基に重回帰分析を行い、算出式を構築した。

### 5. 使用データ及び輸送需要量の推計

#### 5.1 北米航路における港のグループ化

港湾間の詳細な輸送需要は公表されていない。そこで、港湾を寄港頻度及び港湾間の航海距離を参考にグループ化し、グループ間の輸送需要量を推計することとする。

国際輸送ハンドブック 2011 年版より、アジア及び北米東岸における寄港頻度の高い港湾（アジア 15 港、北米東岸 10 港）を対象に、港湾間の航海距離からアジアの港を 4 つのグループ(A、B、C、D)、北米東岸の港を 2 つのグループ(E、F)に分けた(表 5)。

そして、既存の船会社の北米航路におけるサービスを参考に港グループに寄港するサービスを整理した(表 6)。

表 5 アジア・北米東岸における港のグループ化

A	Kobe	B	Xingang	C	Fuzhou
	Tokyo		Qingdao		Shenzhen
	Yokohama		Shanghai		Hong Kong
	Busan		Ningbo		Keelung
					Kauhsiung
D	Tanjung Pelepas	E	Boston	F	Wilmington
	Singapore		New York		Charleston
			Baltimore		Savannah
			Norfolk		Jacksonville
					Houston
					Miami

表 6 サービスの一覧

サービス	船舶の運航順番(A-Fは港のグループ、Pはパナマ運河)									
r1	C	B	A	P	F	E	P	A	C	
r2	C	B	P	E	F	P	C			
r3	B	C	D	P	F	P	B			
r4	D	C	B	D	P	E	F	E	P	D
r5	A	B	C	P	E	F	P	A		

#### 5.2 輸送需要量

港グループ間の輸送需要量を推計するために、下記の 2 つのデータを用いた。

- (1) Containerisation International Yearbook
- (2) 国際輸送ハンドブック

まず、(2)に記載されているアジアと北米間の荷動き量と先の表 2 に示す北米東岸における船積み比率からアジアの 4 つのグループ (A から D) と北米東岸の 2 つのグループ (E, F) の間の輸送需要量を推計した。そして、この値を(1)に記載されている港湾のコンテナ取扱量に比例するとして各グループ間に按分し、グループ間の輸送需要量を推計した。

以上の推計方法により、2010 年から 2013 年までの輸送需要量を推計し、この推計結果を基に需要の増加率を算出し、これを用いて 2016 年の輸送需要量を算出した。算出結果を表 7 に示す。

表 7 2016 年港グループ間の輸送需要量 (TEU)

着発	A	B	C	D	E	F
A					285164	292198
B					865260	886604
C					571437	585533
D					381572	390984
E	166581	505448	333809	222898		
F	170690	517916	342044	228396		

### 5.3 パナマ運河の通航料

パナマ駐日大使館が公表している 2007 年から 2009 年の通航料から空荷の場合の通航料を船体に関する通航料とし、実績と空荷の差額をコンテナ貨物に関する通航料として通航料を算出する。

表 8 パナマ運河の通航料

	2007年	2008年	2009年	2016年
実績値 TEU当たり(ドル・/TEU)	54.0	63.0	72.0	123.5
空荷のフルコンテナ船 (ドル・/TEU)	43.2	50.4	57.6	91.9
差額(ドル・/TEU)	10.8	12.6	14.4	31.6

## 6. パナマ運河拡張後の輸送ネットワーク

### 6.1 大型コンテナ船の就航効果

既存の表 6 に示すサービスは変わらないとして、船型を 12000TEU とした場合の計算結果を表 9 に示す。まず、輸送費用は 63.44 億ドルと、既存の 5000TEU を用いた場合の 71.31 億ドルよりも 7.87 億ドル、大型化により削減されることが分かった。

また、年間航海回数は合計 355 回で、就航隻数は 109 隻となっており、北米航路において大型のコンテナ船を確保するために新造船の建造や欧州

航路からの転配が必要となることが分かった。

表 9 サービス毎の航海回数と就航隻数

輸送費用	6,344,483,463 ドル		
サービス	年間航海回数	就航隻数	船型
r1	48.1	17	12000TEU
r2	146.0	40	12000TEU
r3	32.6	10	12000TEU
r4	31.8	13	12000TEU
r5	96.4	29	12000TEU
合計	354.9	109	

### 6.2 船型と輸送費用の関係

ここでは、望ましい船型について検討を行う。図 2 にコンテナ船の船型と輸送費用の関係を示す。図から船型の大型化により、輸送費用が低減していることが分かる。したがって、大型化は有効な輸送費用の削減策であることが分かった。

しかし、大型化にともなう荷役時間の増加は、就航隻数の増加に影響するため、船隊を保有するための資金も増大する。これは船会社にとっては大きな負担であり、サービスの寄港回数を減らすなどの対応が必要であることが分かった。

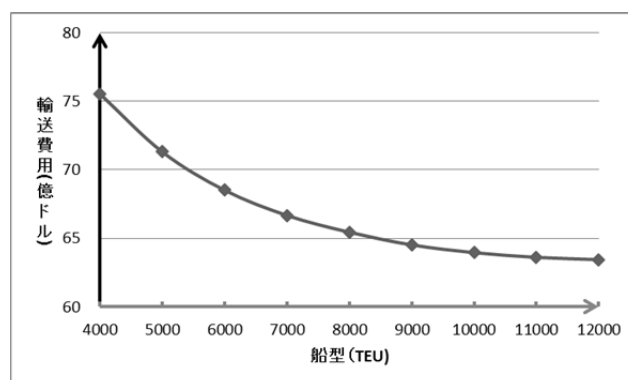


図 2 船型と輸送費用の関係

## 7. おわりに

本研究では、パナマ運河拡張後の輸送需要量を予測するとともに、輸送費用が最小となる輸送ネットワークについて検討を行った。

その結果、パナマ運河拡張に伴う就航船舶の大型化は有効な輸送費用の削減策であることが分かった。

### 参考文献

(1) 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」『日本航海学会論文集』, {第 101 号}, 1999, pp. 259-269.