

国際物流モデルを用いたパナマ運河拡張の影響シミュレーション*

A Simulation of Panama Canal Expansion by the International Logistics Model*

柴崎隆一**・渡部富博***

By Ryuichi SHIBASAKI**・Tomihiro WATANABE***

1. はじめに

北米パナマ共和国のパナマ地峡を開削して造られ太平洋と大西洋（カリブ海）を結ぶ全長約80kmのパナマ運河は、両側に3段の閘門を持つ形式となっているため、閘門のサイズ（最大全長294m, 最大型幅32.5m, 最大喫水12m）により通航可能な船舶のサイズが規定される¹⁾。コンテナ船でいえば、パナマ運河を通航可能であるかどうかにより、4000TEU前後のキャパシティを持つパナマックス (Panamax) 船とそれ以上のサイズのポスト・パナマックス (Post-Panamax) 船に分けられる。言い換えれば、規模の経済性が大きく船舶大型化のメリットの大きい²⁾世界の海上輸送（海上コンテナ輸送）においてはパナマ運河がボトルネックとなっている。そこでパナマ政府は2006年に、新閘門（最大全長385.6m, 最大型幅53.9m, 最大喫水15.2m）の建設を含むパナマ運河拡張計画を公表し、国民投票により2014年の完成を目指して建設することが決定された¹⁾。本研究は、筆者らがこれまで構築したマルチモード国際物流モデル^{3),4)}を全世界に拡張し、運河拡張によって世界的な国際貨物流動パターンがどのように変化するかシミュレートするものである。

2. 国際物流モデルの概要と全世界への拡張

(1) モデルの概要^{3),4)}

本モデルは、地域間貨物輸送需要（OD貨物量）や水深別バース数や利用料金などの各港湾のサービスレベル、さらには輸送ネットワークに関する情報（輸送費用・時間など）を所与として、海上および陸上のコンテナ貨物の輸送パターンを出力するものである。この出力を、港湾ごとに集計すれば、港湾別の取扱量やトランシップ貨物量が算出できる。

本モデルでは、国際海上コンテナ貨物輸送市場の主たる行動主体である「荷主」と「外航船社」の行動を考える。荷主は、個別の貨物ごとに、各外航船社グループが提示する航路別運賃や所要時間も参照しながら、費用や輸送時間にくわえ、モデル構築者が観測できない要因も含めた一般化費用が最小となるように、輸出入時の利用港湾や輸送経路、あるいは海上輸送における外航船社を選択する。

一方、外航船社は、港湾間の貨物輸送需要を所与として、アライアンス（外航船社グループ）ごとに利潤が最大となるよう行動する。自グループの利潤が最大となるように、他グループの運賃・配船パターンや荷主の行動を考慮しながら、海上輸送経路（寄港地やトランシップ港）や輸送船舶サイズ、航路別運賃等を決定するものとする。ここで、各外航船社は、荷主の行動を考慮して自グループの行動を決定するものの、その行動は近視眼的と仮定する。具体的には、外航船社は、短期的には各港湾における荷主の船社選択行動（他グループからの転換）まで考慮したうえで、自グループの利潤が最大となるよう行動するものの、利用港湾の選択（変更）といったより中長期的な荷主の行動までは、直接的には事前に予測できないものと仮定する。このとき、荷主と外航船社は拮抗する勢力であり、国際海上コンテナ輸送市場に対して互いに決定的な影響力は持たないものとみなせ、相手の行動原理に変化がない限りは自己の行動をこれ以上最適化することのできない、ナッシュ均衡解に達するものと考えられる。

このとき、本モデルにおける船社グループごとの利潤最大化行動は、以下のように表される。

$$\begin{aligned} & \max_{p,x} \pi_g, \quad \forall g \in G \quad (1) \\ \text{s.t. } & \pi_g = \sum_{a \in A} p_{ag} \cdot q_{ag} (p_{a1}, \dots, p_{ag}, \dots, p_{aG}) \\ & \quad - \sum_{v \in V} x_{vg} \cdot t_{vg} (x_{11}, \dots, x_{vg}, \dots, x_{VG}) \quad (2) \\ & q_{ag} = \sum_{k \in K_{ag}} h_{akg} \quad (3), \quad x_{vg} = \sum_{a \in A} \sum_{k \in K_{ag}} \lambda_{akg}^v h_{akg} \quad (4) \end{aligned}$$

ここで、 p_{ag} : 航路 a (港湾の組み合わせ) において船社 g が提示する運賃 (円/TEU), q_{ag} : 航路 a 船社 g の輸送量, A : 航路の集合, G : 船社の集合, x_{vg} : 船社 g リンク v のコンテナフロー, $t_{vg} (x_{11}, \dots, x_{vg}, \dots, x_{VG})$: コンテナ 1 TEU あたりのリンクコスト, V : リンクの集合, h_{akg} : 航路 a 船社 g の輸送貨物のうち経路 (パス) k の貨物量, λ_{akg}^v : クロネッカーのデルタ (経路 k にリンク v が含まれるとき 1, 含まれないとき 0), K_{ag} : 航路 a 船社 g の OD の選択肢集合である。制約条件(2)式は、各船社 g の利潤 π_g が、総収入と総費用の差で表されることを意味する。また、貨物輸送需要 q_{ag} と輸送量 x_{vg} に関する制約条件(3), (4)式は、全貨物の輸送を保証する式である。

(1)式は、微分により直接解くことが困難であるため、

緩和的解法として、(2)式の第1項で表される総収入と、第2項で表される総費用について、他方を固定したうえで、収入最大化問題および費用最小化問題をそれぞれ別個に解き、均衡解を得る(詳細は略)。

一方、荷主モデルについては、海上・陸上双方を含むネットワーク上における貨物量の配分を考える。ここで海上輸送リンクは、実際の海上輸送経路や利用船社に関わらず、輸出港と輸入港を直接結ぶ仮想的なリンクと定義する。なお、本モデルも確率的配分モデルを適用するが、大規模な実ネットワークに適用することを想定し、輸送経路を予め列挙する必要のあるロジックモデルではなく、その必要のない(フロー非依存型の)確率的ネットワーク配分モデルを用いることとする。

荷主は、陸上および海上輸送の運賃や所要時間を所与として、期待輸送費用が最小となるルートを選択するものとする。すなわち、ODペア rs ($rs \in \Omega$, Ω はODペアの集合)の経路の選択肢集合を K_{rs} としたとき、誤差項がガンベル分布に従うと仮定すれば、本モデルにおける荷主の選択行動は、以下のように表される。

$$F_{rsk} = Q_{rs} \cdot \frac{\exp(-\theta \cdot G_{rsk})}{\sum_{k \in K_{rs}} \exp(-\theta \cdot G_{rsk})} \quad (5)$$

ここで、 G_{rsk} : ODペア rs の経路 k の輸送コスト(円/TEU)、 F_{rsk} : ODペア rs の経路 k における経路貨物量、 Q_{rs} : ODペア rs の貨物輸送需要(TEU)、 θ : 分散パラメータである。このうち G_{rsk} は、以下の式で表される。

$$G_{rsk} = \sum_{a \in k} A_a + \sum_{b \in k} GL_b + \sum_{i \in k} GP_i \quad (6)$$

ここで、 A_a は、経路 k に含まれる海上リンク a の期待最小コストであり、船社モデルに含まれる荷主の船社選択行動の結果を反映したログサム変数であり、また GL_b および GP_i は、経路 k に含まれる陸上リンク b および港湾 i 内リンクの一般化費用である(詳細は略)。港湾内リンクには、異なる船社グループ間の積替を行うリンクも含まれる。(なお、同一船社・グループ内の積替は船社の費用最小化モデルに含まれる。)

(2) モデルの拡張

従来のモデルでは、アジアを中心としたネットワーク構成であったが、本研究ではこれを全世界に拡張する(同時に、計算対象年次を従来の2003年から2008年へ移行し、貨物輸送需要等の入力データを更新した)。具体的には、海上輸送ネットワークについては、コンテナ取扱量や地理的分布を考慮して抽出した図1に示す143港を最大限の対象港とする。ここで本研究では、計

算時間の短縮のため、北米を中心とした95港に絞る(図1参照)。また、考慮するコンテナ船とバースのサイズは表1に示す通りとし(この船舶サイズカテゴリ別にネットワークが設定され、各港湾の水深別バース数が設定される)、このうちカテゴリ4以上の船舶は拡張前のパナマ運河を通航できないものと設定する(拡張後は全カテゴリ通航可能となる)。なお各港湾等の設定パラメータは、紙面の都合上掲載を割愛する。

陸上輸送ネットワークについては、議論の見通しをよくするため、最初の分析では考慮しない(ただし、前節に示した荷主モデルは含まれるので、各港湾における船社間積替は考慮される)。その後の分析においては、北米(米国・カナダ)の陸上輸送ネットワーク(道路・鉄道)のみ考慮し、他地域の陸上輸送は考慮しない。なおこの際、筆者らの用いた陸上ネットワークが海上輸送ネットワークに比べて極めて密であったことから、IIS特性に起因して生じる問題を回避するため、事前に両国の港湾と発生集中点(州ごとに設定)間の最短経路探索を行い、両国に含まれるすべての港湾と発生集中点の組み合わせについて陸送費用を算出したうえで荷主モデルのネットワークに組み込むものとした。

表1 本研究で設定した船舶サイズとバース水深カテゴリ

Oコンテナ船				Oバース	
w	サイズ(TEU)	平均サイズ cap _w (TEU)	入港可能な バースカテゴリ	u	水深(m)
1	- 1000	500	1-5すべて	1	11.0以下
2	1000 - 2500	1750	2,3,4,5	2	11.0 - 13.0
3	2500 - 4000	3250	3,4,5	3	13.0 - 14.0
4*	4000 - 6000	5000	4,5	4	14.0 - 15.0
5*	6000 -	7000	5	5	15.0以上

*拡張前のパナマ運河を通航不能(拡張後は可能)

3. パナマ運河拡張前後の貨物流動シミュレーション

(1) 陸上輸送を考慮しないモデルによる結果

パナマ運河拡張前のネットワークに基づくモデル計算による、世界各港のトランシップ貨物量の推計値と実績値(2008年、実入り)の比較を図2に示す。なお本モデ

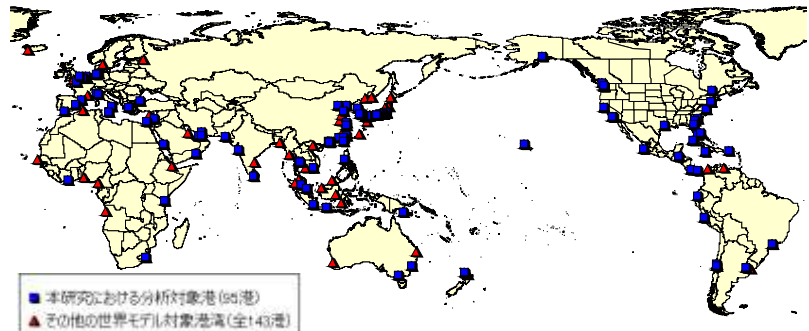


図1 世界モデルおよび本研究における分析の対象港

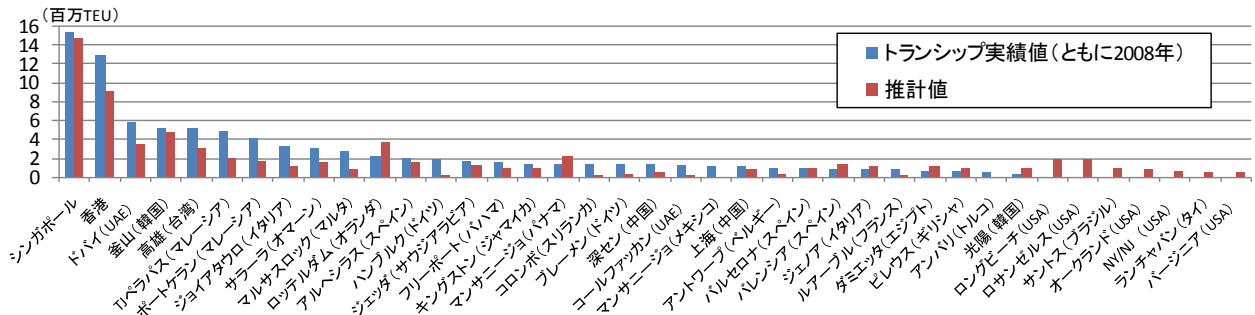


図2 世界各港湾におけるトランシップ貨物量(実入り)の実績値と推計値
(実績値または推計値が50万TEU以上の港湾について実績値の大きい順に掲載)

ルでは陸上輸送が考慮されていないため、各港のトランシップ貨物量を除く輸出入貨物量は所与である。ここで図に示される「実績値」は、Drewryによる推計値⁵⁾に基づき筆者が推定したものであることを前提に、実績値と推計値を比較すれば、主要トランシップ港(上位20港程度)についてみると、ロッテルダム、マンサニージョ(パナマ)港で推計値の方が実績値より大きく、シンガポール、釜山、アルヘシラス(スペイン)などで同程度となっている以外は、推計値が実績値よりも小さい港が比較的多い。この原因としては、モデルにおいてトランシップのコストが実際よりも大きめに設定されている可能性についても否定できないが、一方で、対象港を限定するために周囲のフィーダー港を省略し、対象港へ取扱貨物を統合するという入力データの整理手法にも起因する(フィーダー港の省略により単にトランシップ推計値が減少するだけでなく、トランシップ実績値が総取扱量に対する比率で定義されるため実績値を過大に見積もることとなる)ものと考えられる。全世界の実入りトランシップ貨物量の総和は約7,497万TEU(実績値:約9,007万TEU)と推計された。これは、世界の総実入り輸出入コンテナ貨物量9,715万TEUの約77%に匹敵する。また、パナマ運河の拡張後は、表2に示すように、各港で概ねトランシップ貨物量が減少した。これは、運河拡張により大型船のボトルネックが除かれたことで、一部の貨物で積み替えの必要性がなくなったためと考えられる。ただし、パナマ運河に近いマンサニージョ港やロサンゼルス港では他港より減少率が大きいものの、ロングビーチ港では増加するなどその影響は一様ではない。

また、港湾入出港コンテナフローのサイズ別内訳の実績および運河拡張前後の推計値を図3に示す。図より、世界の海上コンテナ流動における輸送船舶サイズ構成についてもモデルで概ね再現できていると判断される(ただし、むしろ運河拡張後の推計結果の方が実績値に近い結果となっている)。また、運河の拡張により、カテゴリ4以上の船舶のシェアが増加することがわかる。

表2 運河拡張に伴う主要港のトランシップ貨物量の変化

港湾	トランシップ貨物量 推計値(万TEU)		増減率
	拡張前	拡張後	
シンガポール	1,477	1,399	-5.3%
香港	917	912	-0.5%
釜山(韓国)	466	432	-7.4%
ロッテルダム(オランダ)	359	336	-6.4%
ドバイ(UAE)	350	343	-2.0%
高雄(台湾)	312	315	0.9%
マンサニージョ(パナマ)	209	171	-17.9%
TJペラパス(マレーシア)	196	188	-4.4%
ロングビーチ(USA)	186	195	4.7%
ロサンゼルス(USA)	185	160	-13.1%
全世界計	7,497	7,273	-3.0%

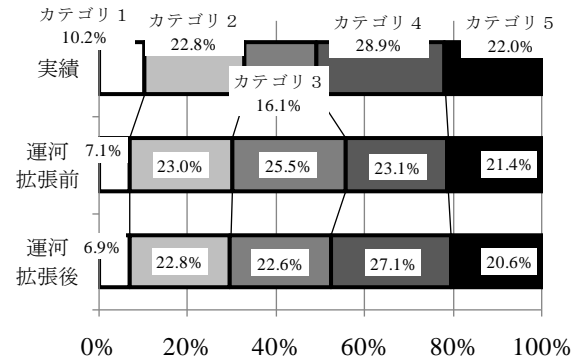


図3 港湾入出港コンテナフローのサイズ別内訳の実績およびモデル推計値(全港湾合計)

表3 国・地域別の貨物輸送費変化(海上輸送のみモデル)

国・地域	貨物量 (万TEU)	輸送費(億円/年)			増減率
		拡張前	拡張後	増減	
米国	3,094	302,955	301,738	-1,217	-0.40%
カナダ	158	16,377	16,419	43	0.26%
日本	1,180	88,459	88,295	-163	-0.18%
中国	3,961	321,579	320,689	-889	-0.28%
韓・台	1,637	116,464	116,190	-273	-0.23%
アセアン	2,141	160,296	160,251	-45	-0.03%
南アジア	385	35,780	35,751	-29	-0.08%
中南米	1,550	165,402	164,714	-687	-0.42%
中近東	1,879	172,118	172,212	94	0.05%
欧州	2,584	254,518	254,404	-114	-0.04%
アフリカ	552	66,709	66,693	-16	-0.02%
豪州	238	23,940	23,959	19	0.08%
全世界計	9,650	858,693	856,963	-1,731	-0.20%

(注) 各国・地域の数値は輸出入合計。全世界計は輸出または輸入ベースの合計値。また、異常値となったポートモレスビー(豪州)は表から除いた。

次に、港湾別に発着貨物の輸送コスト（荷主の貨物時間価値で換算した時間費用も含む）について、運河拡張前後の変化を算出した（表3）。表に示されるように、運河拡張によるコンテナ貨物の輸送費用削減額は全世界合計で年間約1,730億円（輸送費全体の0.2%に相当）と試算された。国・地域別に見れば、米国や中南米などパナマ運河の近接地域で最も影響が大きく、次いで削減率が大きいのは日本・中国を含む東アジアであり、その他の地域の貨物への影響はわずかである。パナマ運河からの距離が同程度である欧州等より東アジア地域への影響が大きいのは、東アジア—北米東岸間の貨物流動が相対的に多いためと考えられる。また、カナダについて輸送費用が増加するのは、運河拡張により基幹航路がやや南方へシフトし、バンクーバー港の相対的地位が若干低下するためと思われる。なお、ここに示される効果は、大型コンテナ船がパナマ運河を通航可能となることのみに着目したものであり、運河の混雑緩和による時間短縮や、コンテナ船以外への影響については全く考慮していないことに注意が必要である。

(2) 北米地域の陸上輸送を考慮したモデルによる結果
 図4に、各州からの背後の陸上輸送を考慮した北米各港湾における、輸出入コンテナ貨物量（トランシップは含まない）の実績値と推計値（運河拡張前）の比較を示す。図より、全体的な傾向は再現できているといえるものの、バンクーバーとシアトル、オークランドとロングビーチなど、同一州内または隣接地域の分担に関する再現性が一部で低い。また、西海岸（アンカレッジ～ロングビーチ）と東海岸（ヒューストン～モントリオール）を比較すると、実績に比べ東海岸の推計値が多く（東海岸のシェアが実績で44%に対し推計値で52%）なっている。北米大陸の貨物が比較的東側に偏っていることを考えると、陸送費用が実際よりもやや高めに設定されている可能性が指摘できる。また、同一または隣接地域の分担状況の再現性については、ゾーンをできるだけ細かくすると同時に、特に鉄道の運賃や頻度といったサービスレベルを細かく設定することで改善されるものと思われる。

表4に、北米大陸の陸上輸送を考慮したモデルにおける、運河拡張前後の輸送費用の変化を示す。本表の輸送費用は北米大陸の陸上輸送も含むため、表3に示されるものより全般的に大きくなっていることに注意されたい。表より、陸上輸送を考慮した場合は、陸上から海上への転換があるため費用の削減額が大きくなり、また輸出入港湾の選択肢が増加することからカナダ、欧州などにも影響が広がることがわかる。なお、北米西岸と東岸の輸出入貨物量についてみると、より生産消費地に近い東海岸の港湾の取扱量が多少（約1.7%）増加した。

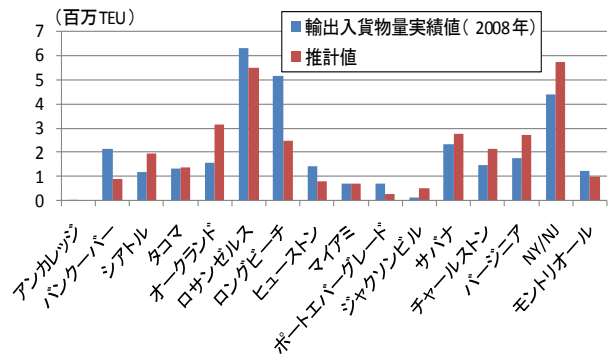


図4 北米各港湾における輸出入貨物量の実績値と推計値

表4 国・地域別の貨物輸送費変化（陸上輸送考慮モデル）

国・地域	貨物量 (万TEU)	輸送費(億円/年)			増減率
		拡張前	拡張後	増減	
米国	2,852	469,281	467,567	-1,713	-0.37%
カナダ	341	58,045	57,932	-113	-0.20%
日本	1,180	186,941	186,765	-176	-0.09%
中国	3,961	737,725	736,894	-832	-0.11%
韓・台	1,637	254,031	253,886	-145	-0.06%
アセアン	2,141	375,543	375,490	-54	-0.01%
南アジア	385	74,296	74,298	2	0.003%
中南米	1,550	305,664	304,410	-1,255	-0.41%
中近東	1,879	349,385	349,332	-53	-0.02%
欧州	2,584	470,321	469,896	-424	-0.09%
アフリカ	552	130,363	130,360	-4	-0.003%
豪州	238	42,394	42,399	5	0.01%
全世界計	9,650	1,726,995	1,724,614	-2,381	-0.14%

(注) 各国・地域の数値は輸出入合計。全世界計は輸出または輸入ベースの合計値。
 また、異常値となったポートモレスビー(豪州)は表から除いた。

4. おわりに

本研究は、筆者らがこれまで構築したマルチモード国際物流モデルを全世界に拡張したうえで、パナマ運河拡張によって世界的な国際貨物流動パターンや港湾取扱貨物量、輸送費用への影響をみた。今後は、より大型の船舶を考慮したシミュレーションや、将来貨物輸送需要を入力したシミュレーションについても行っていきたい。

参考文献

- 1) 柴崎：欧米における国際海上コンテナの背後輸送に関する一考察とわが国の輸送環境への示唆，海運経済研究，No. 40，pp. 167-176，2006.
- 2) 柴崎：岐路に立つ東アジアの港湾～インフラ開発競争後のパラダイム～，運輸と経済，第70巻3号，pp. 12-22，2010.3.
- 3) 柴崎・渡部：東アジア圏を中心とした国際海上コンテナ貨物流動シミュレーションモデルの構築，国土技術政策総合研究所研究報告第37号，2008.
- 4) 柴崎・渡部：船社・荷主の行動を考慮した東アジア国際海上コンテナ輸送市場の大規模ネットワークモデル，土木学会論文集（投稿中）
- 5) Drewry Publishing: Container Market Review and Forecast, Annual Report 2009/10