

スエズ運河に着目した コンテナ船の運航ルート選択モデル

柴崎 隆一¹・東 俊夫²・吉田 哲生³

¹正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 管理調整部 国際業務研究室長
(前国際臨海開発研究センター 国際港湾政策研究所 政策研究室長)
(〒239-0832 神奈川県横須賀市神明町1-12)
E-mail: shibasaki-r92y2@mlit.go.jp

²正会員 (一財) 国際臨海開発研究センター
(〒102-0083 東京都千代田区麹町1-6-2 アーバンネット麹町ビル4階)
E-mail: azuma@ocdi.or.jp

³正会員 (株) 日本港湾コンサルタント
(〒141-0031 東京都品川区西五反田8-3-6 TK五反田ビル)
E-mail: 'tetsuo_yoshida@jportc.co.jp'

スエズ運河は、パナマ運河と並び世界の海上輸送ネットワーク上における主要なチョークポイントであると同時に、船舶の発着地によっては、喜望峰経由やパナマ運河経由といった他の航路と競合関係にある。本研究は、船舶動静データ (MDSデータ) を用いて、コンテナ船に関するスエズ運河の通航シェア (選択確率) を発着地域別 (全世界23地域) に整理したうえで、そのシェアを輸送費用や時間、運河通航料金やダミー変数等により説明するロジックモデルを構築したものである。

結果として、発着地域別の年間通航隻数をよく再現するモデルが構築でき、時間移転性も良好なことが確認された。またパナマ運河拡張や燃料費下落などのシミュレーションも行った。

Key Words : *container shipping, route choice model, Suez Canal, Panama Canal, Cape for Good Hope*

1. はじめに

スエズ運河は、エジプト・アラブ共和国内に位置し地中海と紅海を接続する全長193kmの人工運河である。パナマ運河と異なり途中に閘門は存在せず、水路は全区間が海水面と同じレベルとなっている。スエズ運河の存在により、運河がなかった場合¹に比べ、アジアと欧州の間の海上輸送距離は大幅に短縮されており、国際貿易の観点からなくてはならない存在となっている。

2014年のスエズ運河の通航実績²をみれば、両方向合計で17,148隻、9億6275万トンとなっており、コンテナ、ドライバルク、タンカーなどの船種別にみれば、コンテナ船が6,129隻と全体の約36%を占め最も多く、どのような航路に就航するコンテナ船が運河を利用するのか (運河利用船舶の発着港・航路) については、運河を管理するスエズ運河庁 (エジプト国政府の一部門) の関心も高い。

一方で、各船舶を運航する船会社の観点からみると、

航路や航行ルートの設定 (スエズ運河を通航するか否か) においては、物理的に当該ルートを航行可能かどうか²や、各ルートの所要時間、(貨物1単位当たりの) 輸送費用に加え、海賊遭遇などのリスク要因等も踏まえつつ、獲得貨物や利潤を最大化することが目的となる。

そこで本稿では、コンテナ船を対象として、はじめに、世界の各地域間同士の海上輸送において、スエズ運河がどの程度利用されているか (スエズ運河利用シェア) を算出したうえで、これを再現するルート選択モデルを構築することを目的とする。また、構築したモデルを用いたシミュレーションの例として、パナマ運河の拡張工事完了に伴う通航船舶サイズの変更や、燃料単価の変化 (燃料費が安くなるほど迂回に伴う追加費用は安くなる) による、スエズ運河利用シェアの変化を試算する。このようなモデルを構築することにより、たとえば運河の管理者であるスエズ運河庁にとって通航隻数の予測が可能となるだけでなく、上記パナマ運河拡張や燃料費の変動が世界の海上輸送ネットワークに及ぼす影響について定

¹実際に、1967年~1975年の間をはじめとして、中東戦争などの期間に何度かスエズ運河が封鎖されており、この間、船舶は、アフリカ大陸南端の喜望峰を迂回する等せざるを得なかった。

²物理的サイズが同じ船舶であっても、積荷の量によって喫水が異なるため、物理的な航行可能性は異なる場合もある。

量的に議論することが可能になる。

2. スエズ運河通航シェアの算定

(1) 地域区分

スエズ運河通航シェアの算定にあたっては、図-1、図-2および表-1に示す通り、世界を23地域に区分して各地域間のシェアを算定することとする。この地域区分は、世界の国際海上コンテナ輸送航路の状況を踏まえつつ、スエズ運河通航船舶の実績が多い運河近傍は比較的細かくゾーニングするという方針に基づき設定したものである。

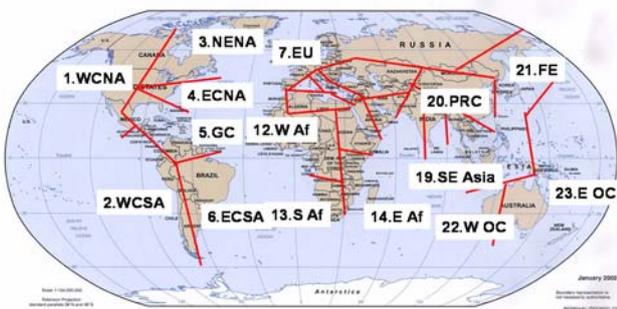


図-1 スエズ運河通航シェアの算定における地域区分（全世界）

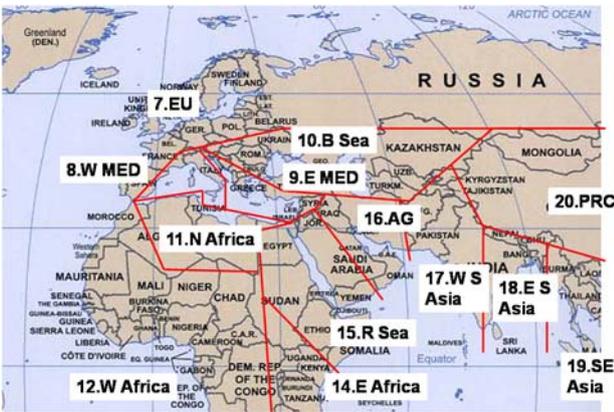


図-2 スエズ運河通航シェアの算定における地域区分（スエズ運河周辺詳細図）

表-1 スエズ運河通航シェアの算定における地域区分

No.	ゾーン名	摘要	No.	ゾーン名	摘要
1	WCNA	北米西岸	13	SAF	南部アフリカ
2	WCSA	南米西岸	14	EAF	東アフリカ
3	NENA	北米北東岸	15	R.Sea	紅海
4	ECNA	北米東岸	16	AG	アラビア海
5	GC	ガルフ	17	WS Asia	南アジア(西)
6	ECSA	南米東岸	18	ES Asia	南アジア(東)
7	EU	欧州（北部）	19	SE Asia	東南アジア
8	WMED	西地中海	20	PRC	中国香港
9	EMED	東地中海	21	NE Asia	北東アジア

					(中国を除く)
10	B Sea	黒海	22	WOC	西大洋州
11	NAF	北アフリカ	23	EOC	東大洋州
12	WAF	西アフリカ			

(2) 利用データとシェアの算定方法

コンテナ船のスエズ運河通航シェアの算定にあたっては、基本的にMDS transmodal社の提供するMDS Container-ship Databank（以下MDSデータ）を利用する。

MDSデータには、各コンテナ船の船舶名、IMO番号、運航船社、共同運航船社、スロットチャーター船社、MDS定義による航路区分、寄港地とその順序、年間寄港頻度、TEUキャパシティ、DWT、船速などの情報が含まれる。一方で、貨物の中身や消席率（ロードファクター）等に関する情報は存在しない。また、国内フィーダー輸送も基本的には含まれない。

この船舶ベースのデータを、以下の手順で同じルートに就航する定航サービスごとに集約し、船腹量ベースのODペア別スエズ運河通航シェアを算出する。

- ① データベースからフルコンテナ船のみを抽出。
- ② 同じ航路（サービス）名を有する船舶の情報を統合し、サービスベースのデータとする。また各サービスの平均船腹量（TEU）を算出する。
- ③ 各サービスの寄港地を(1)で示した地域区分と紐付ける。
- ④ スエズ運河を通航する可能性のあるODペア（分析対象OD）を含むサービスを抽出する。この際、「スエズ運河を通航する可能性のあるODペア」は、スエズ運河通航実績のあるペアよりも広めに対象とする。
- ⑤ 各サービスがスエズ運河を通航しているか否かを個別に判定する。寄港地リストから判断が難しい場合は、Seasearcherなどの船舶動静データベースで確認する。
- ⑥ 分析対象OD別に、各ルート（スエズ経由、パナマ経由、喜望峰経由）の年間船腹量ベースのシェアを算出する。年間船腹量は、平均船腹量と年間運航頻度の積で表される。

(3) スエズ運河通航シェアの算定結果

表-2に、以上の手順で算出したODペア別のスエズ運河通航シェア（2010年5月、2013年6月）を示す。また、年間通航隻数を表-3に、スエズ運河通航船舶の平均サイズを表-4に示す。なお、コンテナ船はひとつのサービスに多くの寄港地を含むため、同じサービスが複数のODペアに計上されていることに注意されたい。

はじめに表-2から読み取れることは、各表の右上に示される東航（スエズ運河においては、南航）と、左下に

表-2 ODペア別スエズ運河通航シェアの算定結果（上：2010年5月，下：2013年6月）

May, 2010

Destination \ Origin	America						Europe				Africa				Asia						Oceania		
	1 WC NA	2 WC SA	3 NE NA	4 EC NA	5 GC	6 EC SA	7 EU	8 W MED	9 E MED	10 B Sea	11 N AF	12 W AF	13 S AF	14 E AF	15 R Sea	16 AG	17 W S Asia	18 E S Asia	19 SE Asia	20 PRC	21 NE Asia	22 W OC	23 E OC
America 1	WCNA																						
America 2	WCNA																						
America 3	NENA																						
America 4	ECNA																						
America 5	GC																						
America 6	ECSA																						
Europe 7	EU																						
Europe 8	W MED																						
Europe 9	E MED																						
Europe 10	B Sea																						
Africa 11	N AF																						
Africa 12	W AF																						
Africa 13	S AF																						
Africa 14	E AF																						
Asia 15	R Sea																						
Asia 16	AG																						
Asia 17	W S Asia																						
Asia 18	E S Asia																						
Asia 19	SE Asia																						
Asia 20	PRC																						
Asia 21	NE Asia																						
Oceania 22	W OC																						
Oceania 23	E OC																						

No objective
 No Service Exists
 0% (No SC transit)
 0% < < 100% (Competing with other routes)
 100% (only SC transit)

June, 2013

Destination \ Origin	America						Europe				Africa				Asia						Oceania		
	1 WC NA	2 WC SA	3 NE NA	4 EC NA	5 GC	6 EC SA	7 EU	8 W MED	9 E MED	10 B Sea	11 N AF	12 W AF	13 S AF	14 E AF	15 R Sea	16 AG	17 W S Asia	18 E S Asia	19 SE Asia	20 PRC	21 NE Asia	22 W OC	23 E OC
America 1	WCNA																						
America 2	WCNA																						
America 3	NENA																						
America 4	ECNA																						
America 5	GC																						
America 6	ECSA																						
Europe 7	EU																						
Europe 8	W MED																						
Europe 9	E MED																						
Europe 10	B Sea																						
Africa 11	N AF																						
Africa 12	W AF																						
Africa 13	S AF																						
Africa 14	E AF																						
Asia 15	R Sea																						
Asia 16	AG																						
Asia 17	W S Asia																						
Asia 18	E S Asia																						
Asia 19	SE Asia																						
Asia 20	PRC																						
Asia 21	NE Asia																						
Oceania 22	W OC																						
Oceania 23	E OC																						

No objective
 No Service Exists
 0% (No SC transit)
 >0% < 100% (Competing with other routes)
 100% (only SC transit)

示される西航（同北航）を比べると、2013年時点では同じ地域の組み合わせであれば同じシェアであるのに対し、2010年時点では両方向でシェアが異なる場合があることである。すなわち、2010年時点では行きと帰りでルートが異なる航路（世界一周航路やアフリカ大陸一周航路）が一部存在するのに対し、2013年時点ではそういった航路は皆無である。これは、欧州航路をはじめとする船舶

の大型化とパナマ運河のサイズ制約により、以前より世界一周航路が減少していたものがついに消滅したという流れを示している。

次に、特に2013年時点においては、スエズ運河のシェアが100%あるいは90%以上、また0%あるいは10%以下といったODペアが多くを占め、全体的に見れば、経済的に一番有利なルートを選択する傾向が強い（強まってい

表-3 ODペア別スエズ運河年間通航隻数の算定結果（上：2010年5月，下：2013年6月）

May, 2010

Origin \ Destination	America						Europe				Africa				Asia						Oceania			
	1 WC NA	2 WC SA	3 NE NA	4 EC NA	5 GC	6 EC SA	7 EU	8 W MED	9 E MED	10 B Sea	11 N AF	12 W AF	13 S AF	14 E AF	15 R Sea	16 AG	17 W S Asia	18 E S Asia	19 SE Asia	20 PRC	21 NE Asia	22 W OC	23 E OC	
America	1 WCNA																							
	2 WCSA																							
	3 NENA													0	52	0	0	52	104	52	0	0	0	
	4 ECNA													0	312	364	156	260	312	208	52	0	0	
	5 GC													0	156	208	0	156	156	156	0	0	0	
	6 ECSA													0	0	0	0	0	0	0	0			
Europe	7 EU													0	52	818	908	388	364	1,442	1,390	714	104	104
	8 W MED													0	52	1,170	1,170	442	468	1,456	1,300	728	104	104
	9 E MED													15	15	275	156	156	156	780	780	416	0	0
	10 B Sea													0	0	52	0	52	208	208	104	0	0	
Africa	11 N AF													0	52	1,078	936	416	468	1,338	1,286	714	104	104
	12 W AF													0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13 S AF						0	52	15	0	0													
	14 E AF		0	0	0	0	52	52	15	0	52	0												
Asia	15 R Sea		52	312	156	0	818	1,170	275	52	1,078	0												
	16 AG		0	312	156	0	908	1,222	156	0	884	52												
	17 W S Asia		0	156	0	0	388	494	156	52	416	52												
	18 E S Asia		52	260	156	0	364	468	156	52	468	0												
	19 SE Asia		104	260	104	0	1,442	1,456	780	208	1,286	0												
	20 PRC		52	156	104	0	1,390	1,300	780	208	1,234	0												
	21 NE Asia		0	52	0	0	714	728	416	104	714	0												
Oceania	22 W OC		0	0	0	0	104	104	0	0	104	0												
	23 E OC		0	0	0	0	104	104	0	0	104	0												

June, 2013

Origin \ Destination	America						Europe				Africa				Asia						Oceania			
	1 WC NA	2 WC SA	3 NE NA	4 EC NA	5 GC	6 EC SA	7 EU	8 W MED	9 E MED	10 B Sea	11 N AF	12 W AF	13 S AF	14 E AF	15 R Sea	16 AG	17 W S Asia	18 E S Asia	19 SE Asia	20 PRC	21 NE Asia	22 W OC	23 E OC	
America	1 WCNA																							
	2 WCSA																							
	3 NENA													0	52	52	0	104	104	0	0	0	0	0
	4 ECNA													0	364	312	156	260	468	312	156	0	0	0
	5 GC													0	156	104	0	104	156	156	52	0	0	0
	6 ECSA													0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Europe	7 EU													0	416	567	312	312	1,177	1,177	662	52	52	
	8 W MED													0	52	780	936	468	364	969	813	511	104	104
	9 E MED													0	0	312	225	208	156	661	661	411	0	0
	10 B Sea													0	0	0	0	52	0	208	208	104	0	0
Africa	11 N AF													0	416	745	468	208	979	875	615	52	52	
	12 W AF													0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13 S AF						0	0	0	0	0													
	14 E AF		0	0	0	0	0	52	0	0	0	0												
Asia	15 R Sea		52	364	156	0	416	780	312	0	780	0												
	16 AG		52	312	104	0	567	936	225	0	745	0												
	17 W S Asia		0	156	0	0	312	468	208	52	468	0												
	18 E S Asia		104	260	104	0	312	364	156	0	208	0												
	19 SE Asia		104	468	156	0	1,177	969	661	208	979	0												
	20 PRC		52	156	104	0	1,177	813	661	208	875	0												
	21 NE Asia		0	52	0	0	662	511	411	104	615	0												
Oceania	22 W OC		0	0	0	0	52	104	0	0	52	0												
	23 E OC		0	0	0	0	52	104	0	0	52	0												

the number is decreased from 2010

ることが推察される。一方で、北米東岸（ECNA, GC）と東アジア（NE Asia, PRC, SE Asia）の間では、スエズ運河とパナマ運河の競合が見られ、東南アジアと北米東岸の間はスエズ運河経由を基本としつつもパナマ運河経由の航路もある一方で、北東アジア（NE AsiaおよびPRC）と北米東岸の間は、パナマ運河経由を基本としつつもスエズ運河経由の航路も存在する状況にある。また、これらのODペアにおけるスエズ運河通航シェアは増加傾向にある。なお、表-3に示す通航隻数で見れば少ないものの、欧州北西部（EU）と大洋州の間も両ルートとの競合関係が存在する。

ここで、表-3に示す年間通航隻数を見ると、上記の北米東岸～東アジア間輸送も含め、多くのODペアにおいて2010年から2013年の3年間で通航隻数が減少している（表中着色ペア）。このように、通航船腹量は増加傾向にあるのに対して隻数が減少していることから推察されるとおり、一隻あたりの輸送キャパシティ（船舶サイズ）はこの3年間で大きく増加している（表4）。特に欧州北西部（EU）～東アジア間は2013年には平均サイズが10,000TEUを超えている。

表-4 ODペア別スエズ運河通航船舶平均サイズの算定結果（上：2010年5月，下：2013年6月）

May, 2010

Origin	Destination	America					Europe					Africa				Asia					Oceania				
		1 WC NA	2 WC SA	3 NE NA	4 EC NA	5 GC	6 EC SA	7 EU	8 W MED	9 E MED	10 B Sea	11 N AF	12 W AF	13 S AF	14 E AF	15 R Sea	16 AG	17 W S Asia	18 E S Asia	19 SE Asia	20 PRC	21 NE Asia	22 W OC	23 E OC	
America	1 WCNA																								
America	2 WCSA																								
America	3 NENA														0	5,693	0	0	5,693	5,466	5,239	0	0	0	
America	4 ECNA														0	4,377	4,290	4,202	4,566	5,607	5,800	5,816	0	0	
America	5 GC														0	4,130	4,239	0	4,130	5,795	5,795	0	0	0	
America	6 ECSA														0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Europe	7 EU														0	3,001	5,251	6,081	4,488	4,867	7,181	7,870	7,083	2,887	2,887
Europe	8 W MED														0	3,001	5,117	5,555	4,456	4,030	6,270	7,003	6,511	2,887	2,887
Europe	9 E MED														1,797	1,797	6,095	5,628	3,747	4,431	4,828	4,828	5,224	0	0
Europe	10 B Sea														0	0	5,600	0	4,256	4,256	5,117	5,117	5,314	0	0
Africa	11 N AF														0	3,001	4,443	4,826	4,359	4,068	5,455	6,129	5,464	2,887	2,887
Africa	12 W AF														0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Africa	13 S AF														0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Africa	14 E AF														0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Asia	15 R Sea			5,693	4,377	4,130	0	5,251	5,117	6,095	5,600	4,443	0												
Asia	16 AG			0	4,244	4,130	0	6,081	5,426	5,628	0	4,842	2,507												
Asia	17 W S Asia			0	4,202	0	0	4,488	4,251	3,747	4,256	4,359	2,507												
Asia	18 E S Asia			5,693	4,566	4,130	0	4,867	4,030	4,431	4,256	4,068	0												
Asia	19 SE Asia			5,466	5,815	6,411	0	7,181	6,270	4,828	5,117	5,491	0												
Asia	20 PRC			5,239	6,213	6,411	0	7,870	7,003	4,828	5,117	6,195	0												
Asia	21 NE Asia			0	5,816	0	0	7,083	6,511	5,224	5,314	5,464	0												
Oceania	22 W OC			0	0	0	0	2,887	2,887	0	0	2,887	0												
Oceania	23 E OC			0	0	0	0	2,887	2,887	0	0	2,887	0												

June, 2013

Origin	Destination	America					Europe					Africa				Asia					Oceania				
		1 WC NA	2 WC SA	3 NE NA	4 EC NA	5 GC	6 EC SA	7 EU	8 W MED	9 E MED	10 B Sea	11 N AF	12 W AF	13 S AF	14 E AF	15 R Sea	16 AG	17 W S Asia	18 E S Asia	19 SE Asia	20 PRC	21 NE Asia	22 W OC	23 E OC	
America	1 WCNA																								
America	2 WCSA																								
America	3 NENA														0	5,930	5,987	0	5,958	5,958	0	0	0	0	0
America	4 ECNA														0	5,949	5,503	4,581	5,880	6,634	7,211	6,772	0	0	
America	5 GC														0	6,373	6,477	0	6,477	6,891	6,165	0	0	0	
America	6 ECSA														0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Europe	7 EU														0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Europe	8 W MED														0	4,438	6,652	7,572	5,533	5,260	8,980	9,667	9,650	4,354	4,354
Europe	9 E MED														0	7,926	7,038	3,952	7,193	7,439	7,439	8,076	0	0	
Europe	10 B Sea														0	0	0	4,250	0	5,905	5,905	5,867	0	0	
Africa	11 N AF														0	0	0	4,250	0	5,905	5,905	5,867	0	0	
Africa	12 W AF														0	0	0	4,250	0	5,905	5,905	5,867	0	0	
Africa	13 S AF														0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Africa	14 E AF														0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Asia	15 R Sea			5,930	5,949	6,373	0	9,055	6,652	7,926	0	6,166	0												
Asia	16 AG			5,987	5,503	6,477	0	8,715	7,572	7,038	0	7,013	0												
Asia	17 W S Asia			0	4,581	0	0	6,021	5,533	3,952	4,250	4,398	0												
Asia	18 E S Asia			5,958	5,880	6,477	0	8,146	5,260	7,193	0	5,172	0												
Asia	19 SE Asia			5,958	6,634	6,891	0	10,391	8,980	7,439	5,905	7,884	0												
Asia	20 PRC			0	7,211	6,891	0	10,563	9,667	7,439	5,905	8,212	0												
Asia	21 NE Asia			0	6,772	6,165	0	10,083	9,650	8,076	5,867	8,328	0												
Oceania	22 W OC			0	0	0	0	4,269	4,354	0	0	4,269	0												
Oceania	23 E OC			0	0	0	0	4,269	4,354	0	0	4,269	0												

average size in 2013 is larger more than 1.5 times as much as that in 2010
 average size in 2013 is larger more than 1.25 times as much as that in 2010

3. スエズ運河通航シェア算定モデル

ば, U_{ijh} は以下の式で表される。

$$U_{ijh} = V_{ijh} + \varepsilon_{ijh} \quad (1)$$

(1) 地域統合

前章のシェア分析では全世界を23ゾーンに分割したものの、前述のようにコンテナ船の場合はひとつの航路で多くの地域の港湾に寄港するため重複が多く、モデル構築にあたってできるだけこの影響を避けるため、表-5に示すとおり、地域区分を15地域に統合する。

ここで V_{ijh} : 確定項, ε_{ijh} : 誤差項である。確定項 V_{ijh} は単位キャパシティ (TEU) あたりとして次節で定義される。もし誤差項 ε_{ijh} が独立かつガンベル分布に従うと仮定すれば、ルート h が選択される確率 P_{ijh} は以下の式で表される。

(2) モデル

モデルは単純な集計ロジットモデルを適用する。すなわち、発地域 i ・着地域 j のODペアにおけるルート h (スエズ, パナマ, または喜望峯経由) の効用を U_{ijh} とすれ

$$P_{ijh} = \exp(\theta \cdot V_{ijh}) / \sum_{h \in H_{ij}} \exp(\theta \cdot V_{ijh}) \quad (2)$$

ここで θ : 分散パラメータ, H_{ij} : OD ペア ij におけるルートの選択肢集合。

表-5 モデル構築にあたって用いる地域区分 (統合15ゾーン)

統合15ゾーン			オリジナル23ゾーン		
No.	ゾーン名	摘要	No.	ゾーン名	摘要
1	WCNA	北米西岸	1	WCNA	北米西岸
2	WCSA	南米西岸	2	WCSA	南米西岸
3	ECNA	北米東岸	3	NENA	北米北東岸
			4	ECNA	北米東岸
			5	GC	ガルフ
4	ECSA	南米東岸	6	ECSA	南米東岸
5	EU	欧州 (北部)	7	EU	欧州 (北部)
6	WMED	西地中海	8	WMED	西地中海
7	EMED	東地中海・黒海・北アフリカ	9	EMED	東地中海
			10	BSea	黒海
			11	NAF	北アフリカ
8	WAF	西アフリカ	12	WAF	西アフリカ
9	SAF	南部アフリカ	13	SAF	南部アフリカ
10	EAf	東アフリカ	14	EAf	東アフリカ
11	RSAG	紅海・アラビア海	15	RSea	紅海
			16	AG	アラビア海
12	SAsia	南アジア	17	WSAsia	南アジア(西)
			18	ESAsia	南アジア(東)
13	SEAsia	東南アジア	19	SEAsia	東南アジア
14	NEAsia	北東アジア	20	PRC	中国香港
			21	NEAsia	北東アジア (中国を除く)
			22	WOC	西大洋州
15	OC	大洋州	23	EOC	東大洋州

(3) 確定項の算出

式(1)に含まれる単位キャパシティ (TEU) あたりの確定項は、以下のように定義する。

$$V_{ijh} = -C_{ijh} - \alpha \cdot \beta \cdot \gamma_{ij} \cdot l_{ij} \cdot up_{ij} \cdot T_{ijh} - \delta \cdot cape_dummy_{ijh} \quad (3)$$

ここで、 C_{ijh} : 単位キャパシティあたり輸送費 (US\$/TEU) , T_{ijh} : 輸送日数, up_{ij} : 貨物単価 (US\$/t トン) , l_{ij} : 船舶の消席率, γ_{ij} : トン=TEU 変換係数 (トン/TEU) , β : 利率率または在庫費用を想定した係数 (日) , α : 時間費用の重み係数, $cape_dummy_{ijh}$: 喜望峰ルートの時 1, それ以外の時 0, δ : ケープダミーに係る係数 (US\$/TEU) . ケープダミーは、基幹航路を迂回して喜望峰を経由することにより、地中海や航海沿岸の港湾で貨物を積み取れないリスクを考慮して導入した。

単位キャパシティあたり輸送費 C_{ijh} は以下の式で表される。

$$C_{ijh} = \left\{ (FC_{ijh} + CC_{ijh} + OC_{ijh}) \cdot T_{ijh} + CT_{ijh} \right\} / Vcap_{ijh} \quad (4)$$

ここで、 FC_{ijh} : 燃料費 (US\$/隻/日) , CC_{ijh} : 資本費 (船費, US\$/隻/日) , OC_{ijh} : 運航費 (US\$/隻/日) , CT_{ijh} : スエズおよびパナマ運河通航料 (US\$/隻) , $Vcap_{ijh}$: コンテナ船のサイズ (TEU/隻) . なお、コンテナ船のサイ

ズは、MDS データより入手可能である (スエズ運河通航船舶の平均サイズについては表4 に示したとおり) であるが、実績値のないルートについては、スエズおよび喜望峰ルートについては、他ルートのサイズを適用し (複数ある場合は大きい方) , またパナマ運河ルートについても同様の方針であるが、運河を通行可能なサイズの上限 (2013 年 : 4,713 TEU) を超えないという制約が追加される。さらに、どのルートも実績がない場合は、各ルートの世界平均サイズ (2013 年の場合、スエズ : 8,263 TEU, パナマ : 4,433 TEU, 喜望峰 : 4,686 TEU) で代替する。

燃料費 FC_{ijh} は以下の式で表される。

$$FC_{ijh} = FP \cdot FR_{ijh} \quad (5)$$

ここで、 FP : 燃料価格 (US\$/トン, 2013 年値 600.0) , FR_{ijh} : コンテナ船の燃費 (トン/日) である。船舶が航行時に海洋から受ける抵抗力は船速の二乗と断面積 (体積の 2/3 乗) の積に比例し、燃費はこの抵抗力と船速の積 (=単位時間当たり仕事量) に比例することから、以下のように表される。

$$FR_{ijh} = 6.49 \cdot 10^{-6} \cdot DWT_{ijh}^{\frac{2}{3}} \cdot v_{ijh}^3 \quad (6)$$

ここで、 DWT_{ijh} : 船舶の積載重量トン, v_{ijh} : 船速 (ノット) . 両者とも船舶のキャパシティ (TEU) に比例することが知られており、回帰分析により以下の式を得た。

$$v_{ijh} = 20.769 + 4 \cdot 10^{-5} \cdot Vcap_{ijh} \quad (7)$$

$$DWT_{ijh} = 11.89 \cdot Vcap_{ijh} + 4414 \quad (8)$$

ここで船速 v_{ijh} は設計速度であることに注意されたい。

船費 CC_{ijh} は、以下のように定義される。

$$CC_{ijh} = SP_{ijh} \cdot \frac{ir}{\{1 - (1 + ir)^{-PP}\}} \cdot \frac{1}{365 \cdot ODR} \quad (9)$$

ここで、 SP_{ijh} : コンテナ船の船価 (US\$/隻) , ir : 利率率 (ここでは $ir = 0.02$ と想定) , PP : 償却年数 (ここでは $PP = 15$ 年と想定) , ODR : 年間稼働率 (ここでは $ODR = 0.9$ と想定, すなわち、年間 $365 \cdot 0.9 = 329$ 日稼働と想定) である。 $ir/\{1 - (1 + ir)^{-PP}\}$ は複利計算下での年間支払率である。コンテナ船の船価 SP_{ijh} は Drewry Maritime Research (2011) に基づき以下の通り設定する。

$$SP_{ijh} = (0.0099 \cdot Vcap_{ijh} + 8.0) \cdot 10^6 \quad (10)$$

コンテナ船のその他運航コスト OC_a は、人件費、保険、開発・営業費などから構成され、Drewry に基づき以下の通り設定する。

$$OC_{ijh} = 0.7915 \cdot Vcap_{ijh} + 4276.0 \quad (11)$$

1 隻あたりの運河通航料 CT_{ijh} は以下の通り設定する。

表-6 スエズ運河純トンごとに定められる(12)式に含まれる係数の β_1, β_2 の値 (出典：スエズ運河庁)

$scrt_{ijh}$		β_1	β_2
from	to		
0	5000	7.65	0
5000	10000	5.00	38,250
10000	20000	4.00	63,250
20000	40000	2.80	103,250
40000	70000	2.60	159,250
70000	120000	2.05	237,250
120000		1.95	339,750

表-7 各地域の代表港とスエズ運河、パナマ運河、喜望峰までの距離 (出典：Netpas)

	地域	代表港	各チョークポイントまでの距離(カイリ)			
			スエズ運河	パナマ運河	喜望峰	
1	North America (West Coast)	WCNA	Los Angeles	12,647	2,906	9,705
2	Central & South America (West Coast)	WCNA	Callao	12,953	1,348	6,520
3	North America (East Coast)	ECNA	NY/NJ	5,170	2,019	6,785
4	South America (East Coast)	ECNA	Santos	6,363	4,450	3,419
5	North & West Europe	EU	Rotterdam	3,348	4,843	6,135
6	West Mediterranean	WMED	Valencia	1,751	4,764	5,451
7	East Mediterranean, Black Sea, & North Africa	EMED	Istanbul	879	6,171	7,932
8	West Africa	WAF	Lagos	5,060	5,072	2,565
9	Southern Africa	SAF	Durban	4,863	12,761	810
10	East Africa	EAf	Mombasa	4,841	13,799	2,512
11	Red Sea & Arabian Gulf	RSAG	Jebel Ali	2,853	13,940	5,518
12	South Asia	S Asia	Nhava Sheva	2,983	12,912	4,853
13	South East Asia	SE Asia	Singapore	4,995	10,485	5,637
14	North East Asia (including China)	NE Asia	Shanghai	7,236	8,552	7,699
15	Oceania	OC	Melbourne	7,944	7,917	5,607

表-8 各地域間を発着するコンテナ貨物の平均単価 (US\$/トン, 2013年の例) (出典：IHS社 WTS データより著者ら作成)

region	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Average
1	-	2062	832	2163	5176	2221	1290	2697	2217	2827	2787	1016	1926	1229	3162	1874
2	6086	1467	2220	2129	2725	2990	974	1426	3415	2422	1052	1406	2458	2164	2444	2226
3	3732	2340	2362	3117	3919	2982	2382	2434	5222	1719	4174	1447	2022	1787	4611	2463
4	3520	2230	2386	2911	2498	2251	1813	1426	1838	3452	1437	1621	1601	1848	3368	2156
5	8694	3965	6096	6197	-	-	4337	2835	8343	4178	7821	12171	6353	7630	9692	6632
6	5504	4771	4894	5523	-	-	3262	3287	5574	3390	5129	6930	7971	7518	7656	5237
7	5081	2663	3104	2578	3798	5482	1950	1463	6692	2250	3296	3664	2866	3879	4033	3204
8	1956	2350	4315	1655	2403	2292	3357	778	22366	9677	7641	2316	2575	3008	3974	2665
9	3113	5307	2883	2490	5757	3307	6872	2765	4328	2938	1925	6547	2957	14381	3018	5850
10	7426	8622	2463	1326	3499	1915	4117	1702	10855	2514	3587	1372	2307	3645	4984	3107
11	12115	1587	1753	1212	3085	1651	2242	1461	1283	924	1926	4014	1505	1473	1074	1995
12	8231	4996	5137	6013	7845	8395	4482	1867	2915	2646	4649	2214	2491	3667	5757	4701
13	7247	5192	6234	6411	6833	5777	3240	2394	4459	1360	4107	2359	3312	4320	4289	4400
14	7774	3996	6241	5615	7463	7429	4491	3074	4482	2218	3895	4350	4546	7013	4630	5946
15	5843	4789	3014	6704	4862	3273	2475	2834	3366	4538	2430	2395	2369	2474	3311	2849
average	6951	3151	4927	4610	5857	5320	3413	2467	4993	2348	4271	3914	3892	5102	4938	4678

$$CT_{ijh} = SDRrate \cdot (\beta_1 \cdot scrt_{ijh} + \beta_2) \quad (\text{スエズ運河}) \quad (12)$$

$$CT_{ijh} = 72.0 \cdot Vcap_{ijh} \quad (\text{パナマ運河}) \quad (13)$$

ここで、 $SDRrate$ ：スエズ運河通航料徴収において用いられる通貨単位 SDR への変換率（ここでは 2010 年の平均値として $SDRrate = 1.5 \text{ US\$}$ と設定）、 $scrt_{ijh}$ ：コンテナ船のスエズ運河純トン、 β_1, β_2 ：スエズ運河庁によって定められる係数（表-6 参照）である。パナマ運河の通航料はコンテナ単位（72.0 US\$/TEU）で定められているのに対し、スエズ運河の通航料は船舶単位で定められており、船舶サイズが大きくなるほど 1TEU あたりの通航料は小

さくなることに注意が必要である。スエズ運河純トン $scrt_{ijh}$ は以下の式で定義される。

$$scrt_{ijh} = 10.92 \cdot Vcap_{ijh} - 1137.0 \quad (14)$$

さらに、(3)式等に含まれる輸送時間 T_{ijh} は、以下のよう

$$T_{ijh} = (l_{ijh} / v_{ijh}) / 24 \quad (15)$$

ここで、 l_{ijh} ：ODペア ij 間の海上距離（カイリ）であり、各地域ごとに最もコンテナ取扱量の多い港湾を代表港として定め、各代表港から各チョークポイント（スエズ運河、パナマ運河、喜望峰）までの距離を Netpas 等のソフ

トウェアから求め、これを組み合わせることによって得る。各地域の代表港およびチョークポイントまでの距離を表-7に示す。

最後に、(3)式に含まれる各地域間の貨物単価 up_{ij} は、HISの提供する世界貿易サービス (WTS) データにより2国間コンテナ貨物輸送量 (トン) および輸送額 (US\$) が入手できるので、これを15地域に集計して金額データを物量データで除することによって得る。2013年値を表-6に示す。なお2013年の世界平均の単価は4,678 US\$/トンであった。

(3)式に含まれる他のパラメータ、すなわち消席率 f_{ij} 、トン=TEU変換係数 γ_{ij} 、利子率または在庫費用を想定した係数 β 、時間費用の重み係数 α 、およびケーブダミーに係る係数 δ は、現状値が入手不可能であるため、モデルが現状を最もよく再現する値を推定するものとする。このため、消席率 f_{ij} およびトン=TEU変換係数 γ_{ij} が地域よ

らず同一であるとの想定のもとに、(3)式の $\alpha\beta\gamma_{ij}f_{ij}$ をひとつのパラメータ (輸送単価に係るパラメータ) η で置き換える (すなわち、 $\eta=\alpha\beta\gamma_{ij}f_{ij}$) こととする。

(4) パラメータの推計とモデル再現性

上述の未知パラメータ η および δ 、および(2)式に含まれる分散パラメータ θ は、モデルで推計された各ルートへのシェア \hat{P}_{ijh} が、表-2に示した現状のシェア (選択確率) P_{ijh} を最もよく再現するように最尤法により推計する。すなわち、尤度

$$L = \prod_{i,j \in \Omega} \prod_{h \in H_{ij}} (q_{ij} \cdot \hat{P}_{ijh})^{q_{ij} \cdot P_{ijh}} \quad (16)$$

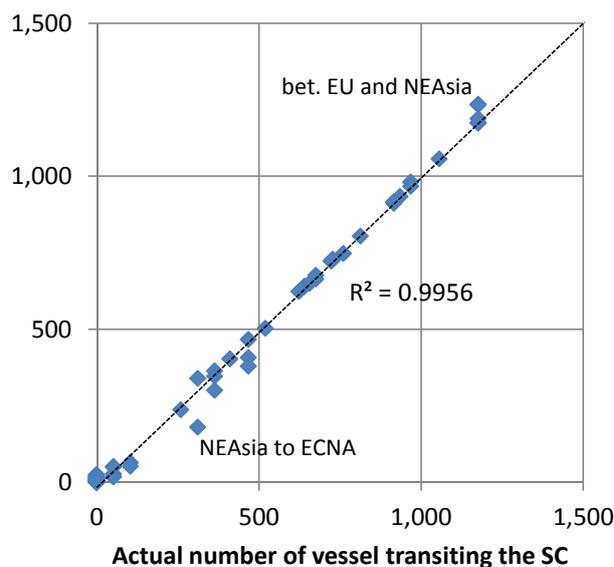
を最大にする未知パラメータを求める。ここで、 q_{ij} : 地域 ij 間の年間輸送キャパシティ (TEU/年) である。

表-9 各モデルにおける未知パラメータの推計結果とモデルアウトプットに関する指標

モデル		未知パラメータの推計結果			アウトプット指標		
		分散パラメータ θ	ケーブダミー変数 δ (US\$/TEU)	輸送単価に係る係数 η (ton/日/TEU)	的中率	スエズ通航シェアに関する相関係数	スエズ通航隻数に関する相関係数
集計ロジット	基本モデル	0.01755	0	0.00343	96.6% (57/59)	0.8852	0.9956
	輸送時間を考慮しないモデル	0.03846	0*	0*	88.1% (52/59)	0.8295	0.9934
最短経路探索モデル		-	0*	0.00343*	96.6% (57/59)	0.8983	0.9829

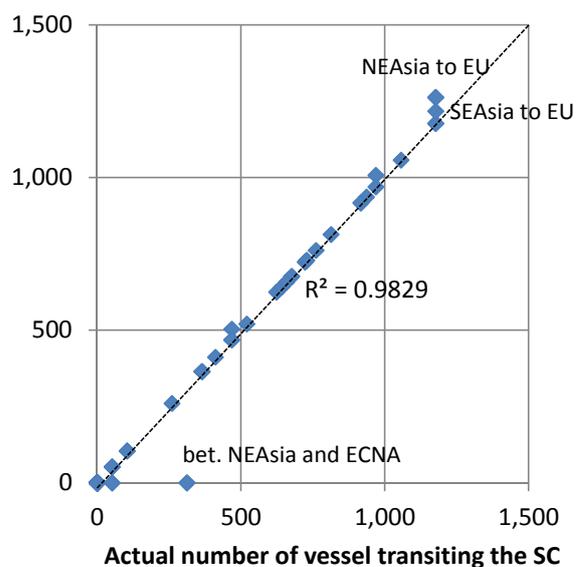
*所与

Estimated number of vessel transiting the SC



(基本モデル)

Estimated number of vessel transiting the SC



(最短経路探索モデル)

図-3 地域 OD ペア別のスエズ運河通航隻数に関するモデル再現性

2013年データに基づくパラメータの推計結果を表-9に示す。表-9には、前節で示した基本モデルだけでなく、輸送時間を考慮しない（すなわち $\eta = 0$ に固定した）モデル、および選択確率（誤差項）を考慮しない最短経路探索（All or Nothing 配分）モデルの推計結果も示す。表に示す通り、基本モデルにおいては、ケープダミー変数は0と推計された。すなわち、基幹航路を外れることによる集荷機会損失リスクは、特に存在しないとの推計結果を得た。これは、現状においても、一部のアジア＝欧州航路は紅海・地中海の諸港にまったく寄港していないことを踏まえると、妥当な推計結果と言える。

また、貨物単価に係る係数 η は、基本モデルにおいては0.00343と推計された。ここで消席率 f_{ij} を0.8（80%）、トン＝TEU 変換係数 γ_j を10（トン/TEU）、および利率を年間10%（すなわち、1日あたり利率 $\beta = 0.00026$ ）と想定すると、時間費用の重み係数 α は1.65となり、コンテナ船のモデルにおいては、時間費用の金銭費用に対する重みが1以上となることが示唆される。

表-9には、いくつかのモデル再現性に関する指標（的

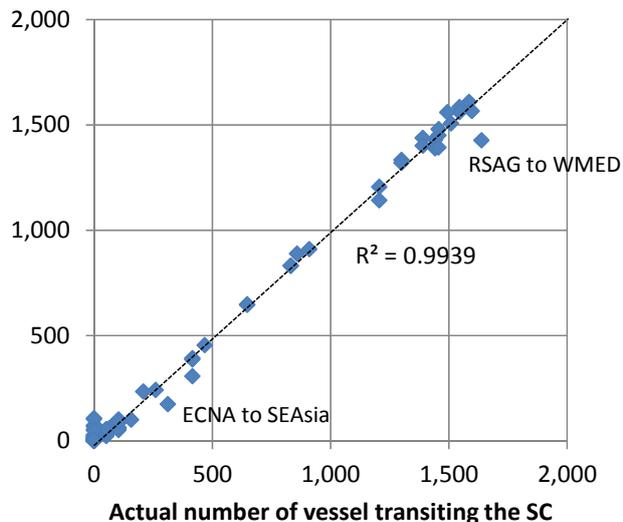
中率、スエズ通航シェアおよびスエズ通航隻数に関する相関係数）も示している。また図-3に、基本モデルと最短経路探索モデルにおけるODペア別のスエズ運河通航隻数の再現結果（実績値と推計値の比較）も示す。表-9に示した各指標をみると両者のモデルは同程度の再現性を有しているようにもみえるものの、最短経路探索モデルでは各ルートのシェアが0%または100%の状況しか再現できず、図-3に示したように、たとえば北東アジア＝北米東岸間のスエズ運河通航隻数はゼロと推計され、現状と大きく異なることがわかる。

つづいてモデル移転性を確認するため、2010年データについても同様のモデルを構築した。パラメータの推計結果および再現性指標を表-10に示す。なお、2010年モデルと2010年データで異なるのは、①各ODペアにおける各ルートのシェア（表-2参照）、②各ODペアにおける平均船舶サイズ（表-4参照）、③各ODペア間の貨物単価、④スエズ運河およびパナマ運河の通航料、⑤船速（2013年モデルにおいては(7)式に示した設計速度を用いているが、2010年モデルにおいては、当時の経

表-10 モデルの時間移転性に関する比較（パラメータ推計結果およびアウトプット指標）

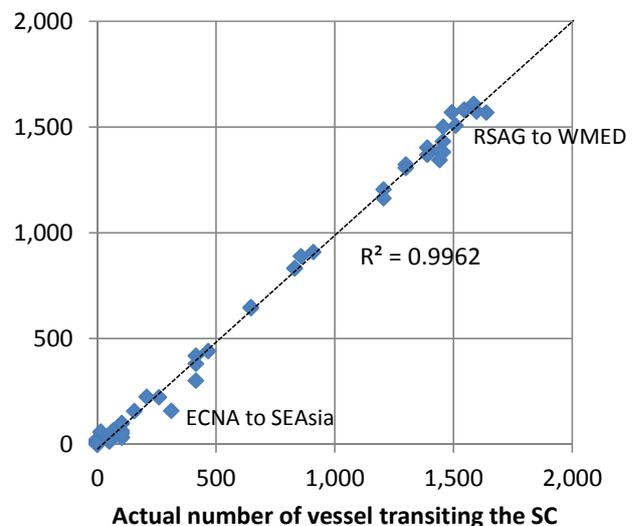
年	未知パラメータの推計結果			アウトプット指標		
	分散パラメータ θ	ケープダミー変数 δ (US\$/TEU)	輸送単価に係る係数 η (ton/日/TEU)	的中率	スエズ通航シェアに関する相関係数	スエズ通航隻数に関する相関係数
2013年モデル	0.01755	0	0.00343	96.6% (57/59)	0.8852	0.9956
2010年モデル	0.00310	0	0.02942	89.7% (61/68)	0.7345	0.9939
2010年データ入力の2013年モデル再現結果	0.01755*	0*	0.00343*	85.3% (58/68)	0.7031	0.9962

Estimated number of vessel transiting the SC



(2010年モデル)

Estimated number of vessel transiting the SC



(2010年データ入力の2013年モデル)

図-4 地域ODペア別のスエズ運河通航隻数に関するモデル再現性比較（2010年データ入力）

済状況を反映し減速航行が広まっていたことを踏まえ、スエズ運河北航船は 21 ノット、南航船は 15 ノットに固定)、⑥経済情勢(海運市場の状況)を反映した係数(2013 年モデルにおいては、前項で求めた輸送費用のうち船費と運航費用について、費用の実績値と合うように 2 倍するのに対し 2010 年モデルではそのままとする)、⑦燃料費(2013 年:600 ドル/トン、2010 年:587 ドル/トン)、の 7 点となっている。表より、2010 年モデルにおいては、2013 年モデルと同様にケープダミーに関する係数はゼロと推計されたものの、分散パラメータと貨物単価に係る係数の推計値は大きく異なる結果となった。

また表-10 には、2013 年モデル(2013 年データに基づくパラメータ推計値)に 2010 年データを入力した場合の計算結果(モデル再現性)も示す。これを 2010 年モデルの再現結果と比較すると、各再現性指標のうち、的中率とスエズ通航シェアに関する相関係数は 2010 年モデルのほうが良いものの、スエズ運河通航隻数に関する相関係数は 2010 年データを入力した 2013 年モデルのほうが良い結果となっている。これは図-4 に両モデルのスエズ運河通航隻数に関する実績値と推計値の比較を示した通り、通航隻数の多いアラビア湾・紅海(RSAG)＝西地中海(WMED)や北米東岸＝東南アジアなどのペアにおいて、2010 年データを入力した 2013 年モデルのほうが再現性が高いことに起因すると考えられる。全般的に言えば、2013 年モデルの 2010 年データを入力した際の再現性(モデルの時間移転性)は、2010 年モデルと同程度に十分確保できていると判断される。

4. モデルを用いたシミュレーション

以下に示すシミュレーションには 2013 年基本モデルを用いる。

(1) パナマ運河拡張

本シミュレーションでは、2016 年に予定されるパナマ運河拡張工事完了後に、パナマ運河通航時のサイズ制約が取り除かれると想定したシミュレーションが行う。具体的には、各地域 OD ペアごとの平均船舶サイズ $V_{cap_{opt}}$ が、パナマ運河通航時においてもスエズ運河通航時と同じになると想定して計算を行う。

図-5 に、パナマ運河拡張前後の地域 OD ペアごとのスエズ運河通航隻数を示す。なお、ここで横軸方向に示されるパナマ運河拡張前の通航隻数は、前章で示した 2013 年基本モデルによる再現値である。拡張後に引き続きスエズ運河を通航すると推計されたコンテナ船の年間通航総隻数は 5,917 で、拡張前の再現値 6,013 隻に比べ

ると 1.6%の減少となっている。図に示されるように、そのほとんどは北米東岸＝北東アジアおよび東南アジア間航路のパナマ運河へのシフトとなっている。スエズ運河通航隻数は、北米東岸発北東アジア着は年間 340 隻から 172 隻、北東アジア発北米東岸着は年間 180 隻から 75 隻へ、年間 100～150 隻の減少となった。これはウィークリーサービス 2～3 航路に相当し、2010 年から 2013 年の 3 年間でパナマ運河経由からスエズ運河経由にシフトした航路とちょうど同数程度の航路が、再びパナマ運河経由に戻る予測結果となっていることを意味する。

一方、その他のほとんどの地域 OD ペアについては、もともとパナマ運河との競合は見られないことから、拡張前後で変化はほとんど見られない結果となっている。

Simulated number of vessel transiting the SC

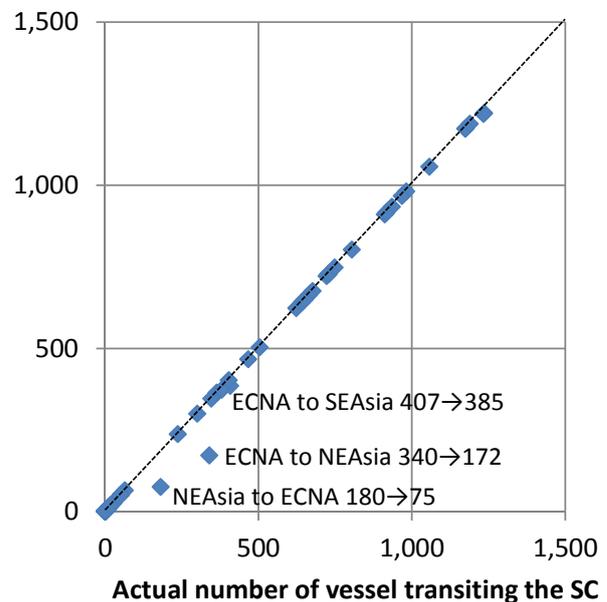
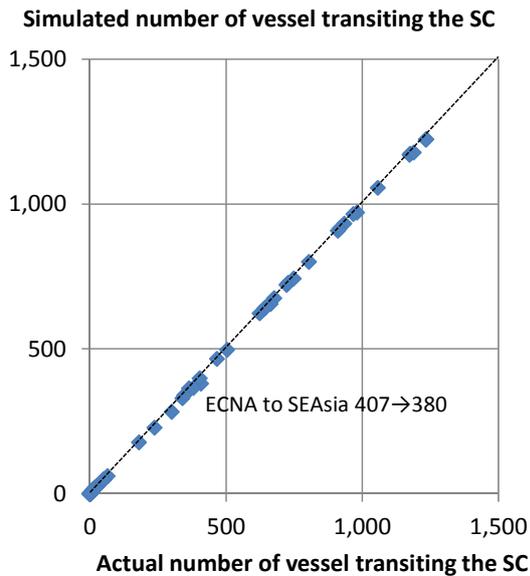


図-5 パナマ運河拡張前後の地域 OD ペア別のスエズ運河通航隻数の変化(2013 年モデルによる)

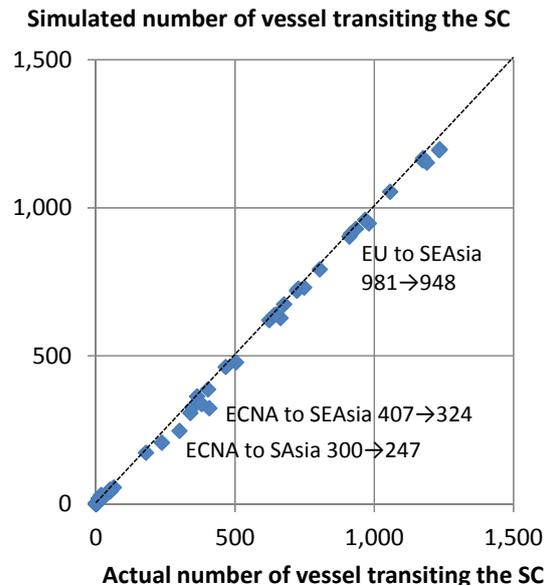
(2) 燃料費の下落

ここ 1 年ほど世界的に原油および燃料費の価格が大きく下落しており、輸送距離が延びた場合でも追加的に発生する燃料費が少なく済むことから、特にタンカーなどではスエズ運河を回避して喜望峰回りを迂回する動きがみられる。そこで本シミュレーションでは、燃料費の水準について、2013 年モデルの 600 ドル/トンから、① 2014 年秋頃の水準である 470 ドル/トンに下落した場合、また②最近の最低価格である 2009 年第 1 四半期頃の水準 250 ドル/トンに下落した場合の計算を行った。

その結果、スエズ運河の年間通航隻数は、それぞれ 5,990 隻および 5,929 隻と、2013 年水準に比べ 0.4%および 1.4%の減少となった。また、図-6 に示すように、① 2013 年秋水準では大きな変化は見られないものの、②最近の



①2014年秋水準(470 US\$/ton)



②最近の最低水準(250 US\$/ton)

図-6 燃料費低下による地域 OD ペア別のスエズ運河通航隻数の変化 (2013年モデルによる)

最低水準では、北米東岸から東南アジア、南アジア方面、および欧州北西部から東南アジアへの通航隻数の年間50~80隻程度の減少が予測されている。これは、週1便程度の定航サービスがスエズ運河経由から喜望峰経由へシフトすることを意味している。

5. 結論

本稿では、コンテナ船を対象として、はじめに、世界の各地域間同士の海上輸送において、スエズ運河がどの程度利用されているか(スエズ運河利用シェア)を算出したうえで、これを再現するルート選択モデルを構築した。また、構築したモデルを用いたシミュレーションの例として、パナマ運河の拡張工事完了に伴う通航船舶サイズの変更や、燃料単価の変化による、スエズ運河利用シェアの変化を試算した。構築したモデルの再現性はおおむね良好であり、また2010年データを用いて時間移転性もおおむね良好であることを確認した。

今後は、引き続きモデル再現性(特に北米東岸=東アジア間航路など競合のあるODペア)の改善を検討するとともに、コンテナ以外の船種(バルクキャリア、タン

カー、自動車航走船など)に対しても同様のモデルを構築したいと考えている。

参考文献

- 1) Suez Canal Authority, Annual Report 2014
- 2) Drewry Maritime Research, 2011, Ship Operating Costs Annual Review and Forecast 2011/12. London, UK.
- 3) Notteboom, T. E., 2012, Towards a new intermediate hub region in container shipping? Relay and interlining via the Cape route vs. the Suez route. Journal of Transport Geography, 22, 164-178.
- 4) Fu, X., Ng, A. K., and Lau, Y. Y., 2010, The impacts of maritime piracy on global economic development: the case of Somalia. Maritime Policy and Management, 37(7), 677-697.
- 5) Ducruet, C., 2015 (online available), The polarization of global container flows by interoceanic canals: geographic coverage and network vulnerability. Maritime Policy and Management
- 6) 柴崎, エジプト・スエズ運河の現状と展望(海外通信), 運輸政策研究, 15(3), pp.64-67, 2012.10
- 7) 赤倉・松田, アジア-北米東岸コンテナ輸送におけるパナマ・スエズ運河経由選択の分析, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 70, 4, pp.259-269, 2015.

(2015.4.24 受付)

ROUTE CHOICE ANALYSIS AND MODEL DEVELOPMENT OF CONTAINERSHIP FOCUSING ON THE SUEZ CANAL TRANSIT

Ryuichi SHIBASAKI, Toshio AZUMA, and Tetsuo YOSHIDA