

# パナマ運河拡張後のアジア-北米東岸における輸送ネットワークに関する研究

東京海洋大学大学院 海洋科学技術研究科

海運ロジスティクス専攻

指導教員 黒川久幸 教授

発表者 白 雲天

1

## 発表の流れ

1. はじめに：研究背景と目的
2. 北米航路及びパナマ運河の概要
3. 海上輸送ネットワークの定式化
4. 就航隻数の算出式
5. 輸送ネットワークで用いるデータ
6. パナマ運河拡張後の輸送ネットワーク
7. おわりに

2

## 研究背景：パナマ運河

- ▶ 太平洋と大西洋を結びダイレクトな海上物流を可能とする
- ▶ 国際貿易にとって大変重要な**物流拠点**
- ▶ **全世界の海上貿易量の5%**が通航している

3

## 研究背景：パナマ運河の拡張

2015年末完工予定

- 最大の影響：**アジア-南米・北米東海岸コンテナ航路の競争力が強化されること**  
大型コンテナ船を利用することにより **1TEUあたりのコストが大幅に低下**
- 船会社に与える影響
  - ・配船
  - ・輸送コスト

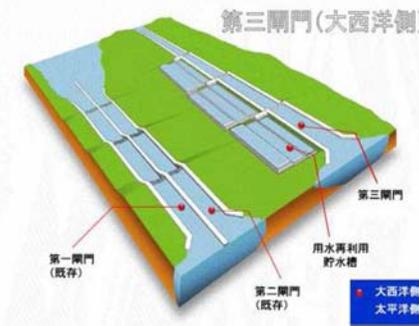


図1 拡張計画：第三閘門の建設：太平洋側と大西洋側に1か所ずつ建設

(出典：「パナマ運河拡張後の国際物流に関する調査」)

4

## 既存研究

パナマ運河拡張後のアジア-北米東岸における輸送ネットワークに関する研究

コンテナ輸送

パナマ運河

輸送ネットワーク

- 浦野真樹, 安部智久(国土技術政策総合研)「世界のコンテナ船動静及びコンテナ貨物流動分析(2013)」『国土技術政策総合研究所資料』
  - 赤倉康寛, 渡部富博「国際海上コンテナ貨物の輸送経路分析による港湾統計データの考察」『国土技術政策総合研究所資料』
  - 竹村慎治, 赤倉康寛「東アジア-北米航路コンテナ船の日本周辺での通航海域に関する分析」『国土技術政策総合研究所資料』
- ⇒コンテナ船とコンテナ貨物流動の現状分析について定性的な議論

- 松田琢磨, 久保麻紀子「パナマ運河拡張後の国際物流動向について(アジア発北米東岸着コンテナ輸送を中心に)」, 『海運』
- 赤倉康寛, 松田琢磨「アジア-北米東岸コンテナ輸送におけるパナマ・スエズ運河経路選択の分析」
- 赤倉康寛「パナマ運河拡張後の米国-東アジア貨物流動に関する考察」『土木学会論文集』

⇒パナマ運河経由の輸送経路の現状紹介に関する研究や貨物流動に注目した研究が多いが、具体的にパナマ運河拡張後の輸送経路を明らかにする検討は至っていない。

- 張畢, 黒川久幸, 鶴田三郎「パナマ運河拡張後の船隊構成及び空コンテナ回想に関する研究」, 『日本航海学会論文集』
- 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』
- 秋田直也「対中国コンテナ貨物の国際海上輸送経路の選択行動に関する研究」『日本航海学会誌』

⇒アジア-北米東岸において輸送ネットワークに関する研究を行うには至っていない

5

## 研究目的

目的：輸送費の最小化

対象：船会社

検討項目

- パナマ運河拡張後の輸送需要量を推計
- 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、隻数

6

## 発表の流れ

- はじめに：研究背景と目的
- 北米航路及びパナマ運河の概要
- 海上輸送ネットワークの定式化
- 就航隻数の算出式
- 輸送ネットワークで用いるデータ
- パナマ運河拡張後の輸送ネットワーク
- おわりに

7

## 研究の対象範囲



アジア-北米東岸のコンテナ輸送の主要経路

- パナマ運河を経由して北米東岸の港に寄港するルート。
- スエズ運河から地中海・大西洋を経由するルート。
- 北米西岸の港で荷揚げし、コンテナを鉄道やトラックに積み替えて東岸まで輸送するルート。

本研究ではAll Waterの中の①パナマ運河経由を研究対象として(港でのコンテナ積替えを除く)検討する。

8

## 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図2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。

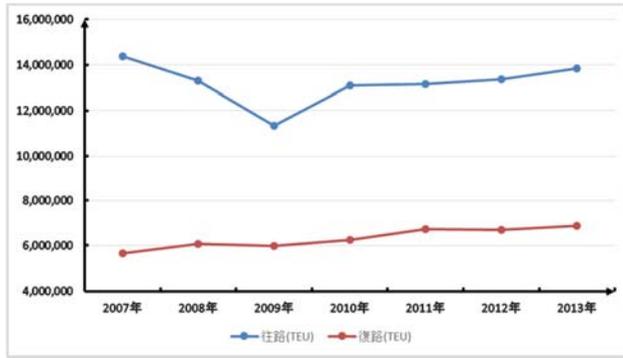


図2 北米航路におけるコンテナ荷動き量の推移

(出典：「国際輸送ハンドブック2009年～2014年」)

9

## 北米航路におけるコンテナ荷動き量

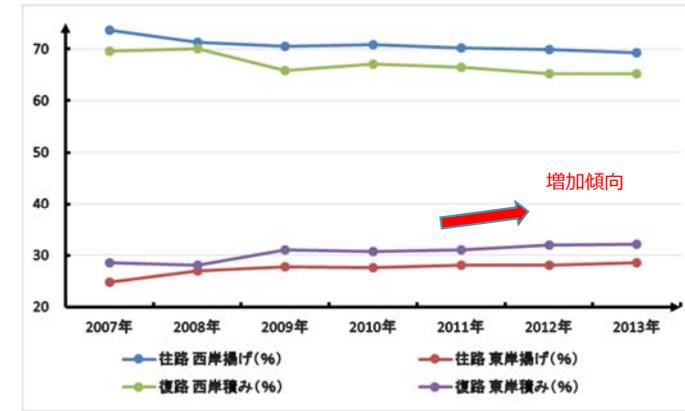


図3 北米西岸及び東岸における船積みの構成比率の推移

(出典：「国際輸送ハンドブック2009年～2014年」)

10

## パナマ運河の現状：通航可能な船舶サイズ

- ▶ 拡張後、年間の最大容量は2倍増加する
- ▶ コンテナ船では約**12,000TEU**のコンテナ船が通航可能となっている。

### ■ 現行の最大船型 (パナマックス)

全幅: 32.2m  
全長: 294.1m  
深さ: 12.0m



およそ5000TEU

### ■ 第3レーン整備後の最大船型 (計画)

全幅: 49m  
全長: 366m  
深さ: 15m



12,000TEU級の大型コンテナ船も通過可能とする

11

## パナマ運河の現状：運河通航料の値上げの動き

- ▶ 新しい通航料システムを導入 (2002年-2003年)
- ▶ 2005年以降、通航料の**値上げを頻繁に実施**している。
- ▶ 2005年: 42 USD/TEU → 2011年: 82 USD/TEU

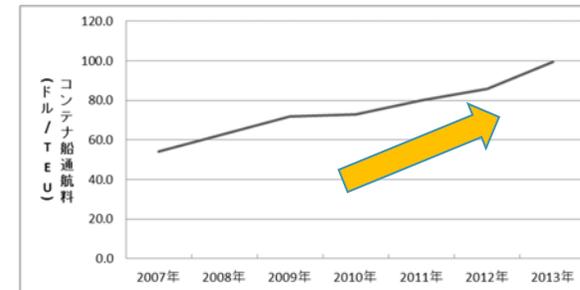


図4 パナマ運河における1TEU当たりの通航料

(出典：Embassy of Panama in Japanより作成)

12

## 発表の流れ

1. はじめに：研究背景と目的
2. 北米航路及びパナマ運河の概要
3. 海上輸送ネットワークの定式化
4. 就航隻数の算出式
5. 輸送ネットワークの設計で用いるデータ
6. パナマ運河拡張後の輸送ネットワーク
7. おわりに

13

## 海上輸送ネットワークの定式化：輸送費用の構成

船会社のコンテナ輸送における一回のサービスを回る輸送費用の構成が表4で示す。

表1 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)

14

## 海上輸送ネットワークの定式化：

### 定式化

コンテナ船輸送費用最小する為、運航費、船費とコンテナ関係費にそれぞれの定式を行い、総合することに計算する。

$$\min. \text{CST} = \sum_{r \in \text{SR}} (CO1_r + CO2 \cdot \text{NUM}_r) \cdot y_r + \sum_{(a,b) \in \text{SU}} \sum_{(r,i,j) \in \text{SL}} CO3 \cdot \text{TIM}_{i,j} \cdot x_{r,i,j}^{a,b} + \sum_{(a,b) \in \text{SU}} \sum_{pp \in \text{PNM}} \sum_{(r,i,j) \in \text{SL}, pp=j} CO4 \cdot x_{r,i,j}^{a,b}$$

**運航費**はサービス毎の燃料費、入出港費、コンテナ船体のパナマ運河通航費と航路毎の年間航海回数から算出する。

**船費**は1隻あたりの船費に就航隻数を乗じて算出する。

**コンテナ関係費**はコンテナ貨物を輸送する通過時間とコンテナ輸送量から輸送経路上の総コンテナ数を算出し費用を求める。

**パナマ運河の貨物通航費**はTEU当たりの通航費単価とコンテナ輸送量から算出する。

**CST**：輸送費用[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)]

**CO3**：コンテナ関係費単価[ドル/(TEU・年)] ※CO4を除く。  
**CO4**：パナマ運河通航費(コンテナ)単価[ドル/TEU]  
**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]  
**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]

15

## 海上輸送ネットワークの定式化：制約条件

### ※コンテナ流動の制約

発港における流出量と流入量の制約

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

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

着港における流入量と流出量の制約

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

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

着港における流入量と流出量の制約

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

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

### ※コンテナ船積載の制約

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

### ※決定変数の制約

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

$$y_r \geq 0r \in \text{SR}$$

**SR**：航路の集合

**SU**：需要の集合

**SL**：航路を含めたリンクの集合

**DEM**：輸送需要[TEU/年]

**PNM**：パナマ運河の港

**MAX**：経路の最大積載量[TEU]

流入量 ≧ 流出量 (発港・着港以外の港)

サービスの年間輸送能力 ≧ 総輸送需要量

16

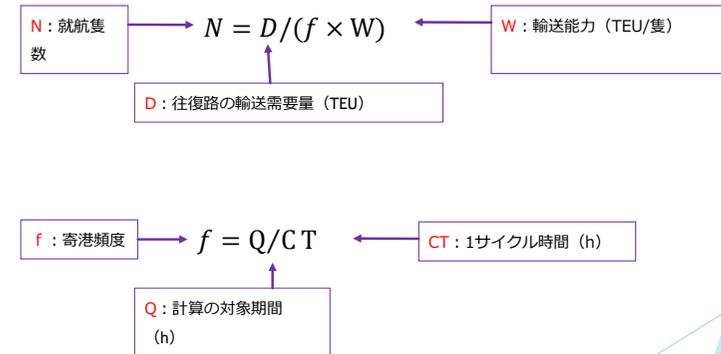
## 発表の流れ

1. はじめに：研究背景と目的
2. 北米航路及びパナマ運河の概要
3. 海上輸送ネットワークの定式化
4. 就航隻数の算出式
5. 輸送ネットワークで用いるデータ
6. パナマ運河拡張後の輸送ネットワーク
7. おわりに

17

## 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。



18

## 発表の流れ

1. はじめに：研究背景と目的
2. 北米航路及びパナマ運河の概要
3. 海上輸送ネットワークの定式化
4. 就航隻数の算出式
5. 輸送ネットワークの設計で用いるデータ
6. パナマ運河拡張後の輸送ネットワーク
7. おわりに

19

## 輸送ネットワークの設計で用いるデータ： アジアー北米東岸における港のグループ化

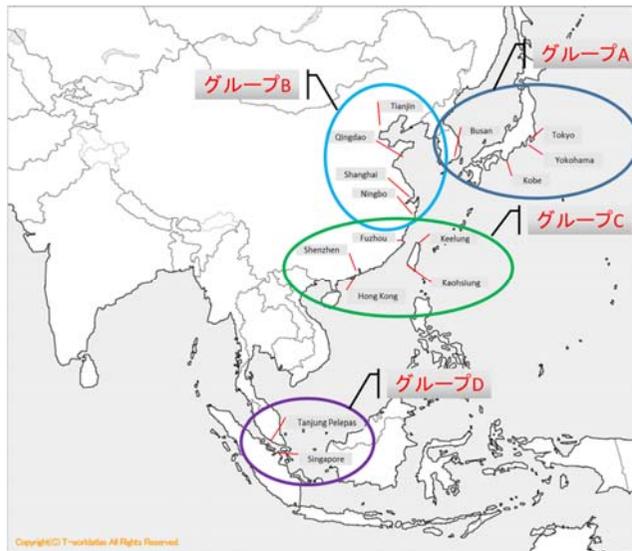
- ・ 航路：アジアー北米東岸航路
- ・ 港湾の抽出：アジア上位15港、北米東岸上位10港
- ・ グループ化：アジア\*4つのグループ (A,B,C,D)、北米東岸\*2つのグループ (E,F)
- ・ 参照項目：サービス上の港の寄港回数、寄港毎のコンテナ取扱量、港湾間距離

表2 アジアー北米東岸における港グループ化

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

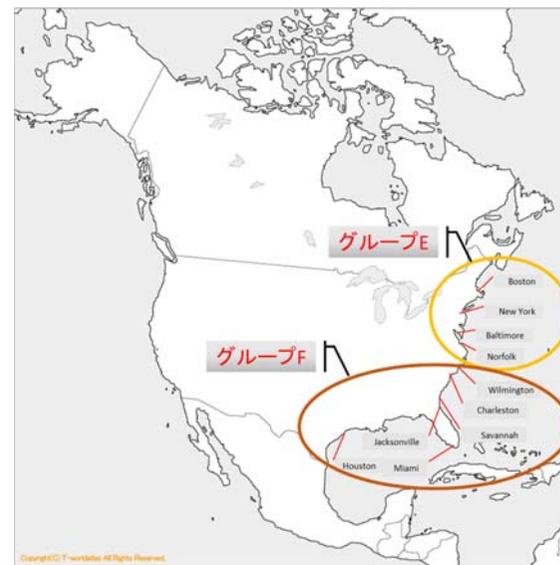
(出典：国際輸送ハンドブック、Containerisation International Yearbook(2011年版)を推計)

20



	Kobe	Xingang	Fuzhou
	Tokyo	Qindao	Shenzhen
A	Yokohama	Shanghai	Hong Kong
	Busan	Ningbo	Keelung
			Kaohsiung
D	Tanjung Pelepas	Boston	Wilmington
	Singapore	New York	Charleston
		Baltimore	Savannah
		Norfolk	Jacksonville
			Houston
			Miami

図5：アジアの港グループ



	Kobe	Xingang	Fuzhou
	Tokyo	Qindao	Shenzhen
A	Yokohama	Shanghai	Hong Kong
	Busan	Ningbo	Keelung
			Kaohsiung
D	Tanjung Pelepas	Boston	Wilmington
	Singapore	New York	Charleston
		Baltimore	Savannah
		Norfolk	Jacksonville
			Houston
			Miami

図6：北米東岸の港グループ

輸送ネットワークの設計で用いるデータ：

コンテナ需要量の推計

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

表3 2016年港グループ間の年間需要量推計 (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		

輸送ネットワークの設計で用いるデータ：

グループ間の距離の推計

- ・グループ毎に、寄港頻度が最も多い港を抽出
- ・各グループ間の航海距離 = 抽出した港間の航海距離

表4 グループ間の運航距離(nm)

	A	B	C	D	E	F
A	0	2221	4056	5789	19334	18607
B	2221	0	2342	4075	20024	19297
C	4056	2342	0	3415	21231	20504
D	5789	4075	3415	0	23362	22634
E	19334	20024	21231	23362	0	2153
F	18607	19297	20504	22634	2153	0

(出典：国際輸送ハンドブック(2011年版)、BLM-Shippingを推計)

## 輸送ネットワークの設計で用いるデータ：

### パナマ運河通航料の推計

船体に関する通航料 = 空荷状態の通航料

実績状態 - 空荷状態 = 貨物の通航料

表5 パナマ運河の通航料の推計

	2007年	2008年	2009年	2016年
実績のコンテナ船舶 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
貨物通航料(ドル・/TEU)	10.8	12.6	14.4	31.6

(出典：Embassy of Panama in Japanより作成)

25

## 輸送ネットワークの設計で用いるデータ：

### サービス

表6 パナマ運河の通航料の推計

サービス経路	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		

28

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	

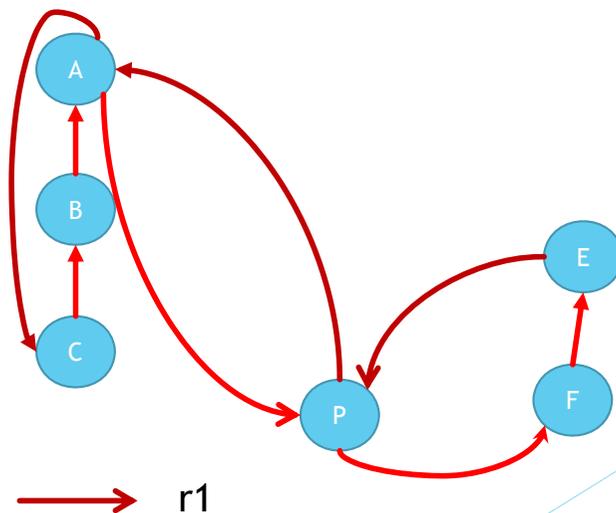


図7：サービスのイメージ図

27

## 輸送ネットワークの設計で用いるデータ：

### 1 サイクル時間

- 重回帰分析：北米航路のサービスにおける実際のサービスの運航時間と途中の寄港回数、運航距離、船型
- 1サイクル時間 = 港を一巡するのに係る時間 + 航海時間、荷役時間、入出港時間等

※ 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

$$Tim = 1.54342 * y + 0.00069565 * s + 0.00168289 * D + 0.57469$$

y：航路毎の年間寄港回数[回/年]

s：船型 (TEU)

D：サービスの距離 (nm)

(出典：国際輸送ハンドブック2011年版)

28

## 発表の流れ

1. はじめに：研究背景と目的
2. 北米航路及びパナマ運河の概要
3. 海上輸送ネットワークの定式化
4. 就航隻数の算出式
5. 輸送ネットワークの設計で用いるデータ
6. **パナマ運河拡張後の輸送ネットワーク**
7. おわりに

29

## パナマ運河拡張後の輸送ネットワーク：

### 大型コンテナ船の就航効果

船型：12000TEU 輸送費用：63.37億ドル 船型：5000TEU 輸送費用：71.72億ドル

**大型化による削減効果：12.69億ドル**

船型：12000TEU 年間航海回数：合計355回 就航隻数：106隻

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

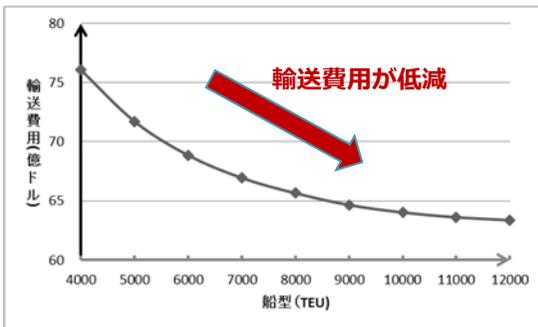
表7 サービス毎の航海回数と就航隻数

輸送費用	6,337,466,493ドル		
サービス	年間航海回数	就航隻数	船型
r1	48.1	16	12000TEU
r2	146.0	39	12000TEU
r3	49.0	14	12000TEU
r4	31.8	13	12000TEU
r5	80.0	24	12000TEU
合計	354.9	106	

30

## パナマ運河拡張後の輸送ネットワーク：

### 船型と輸送費用の関係



大型化は有効な輸送費用の削減策

図8 船型による最小輸送総費用の変化

コンテナ船の寄港頻度に制約がない場合

パナマ運河拡張後の最大船型**12000TEU**までコンテナ船の大型化を進めるのが有効

31

## パナマ運河拡張後の輸送ネットワーク：

### 船型と輸送費用の関係

船会社の立場で考えると…**資金面**は重要な考慮事項

船腹量：12000TEUの場合は**1,272,000TEU**となり、5000TEUの場合は**890,000TEU**となる。

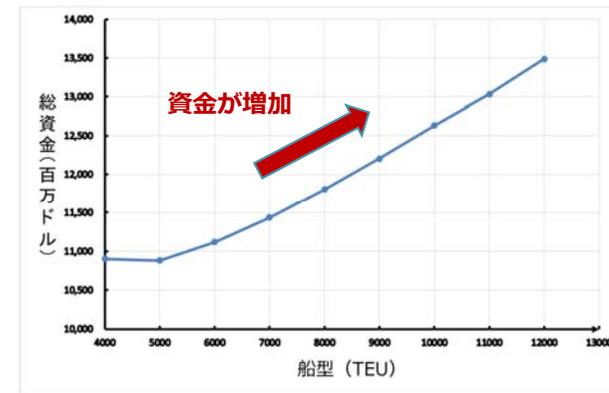


図9 船隊構成による必要な総資金

(出典) 船用工業関連データ集

32

## 総資金の増加理由

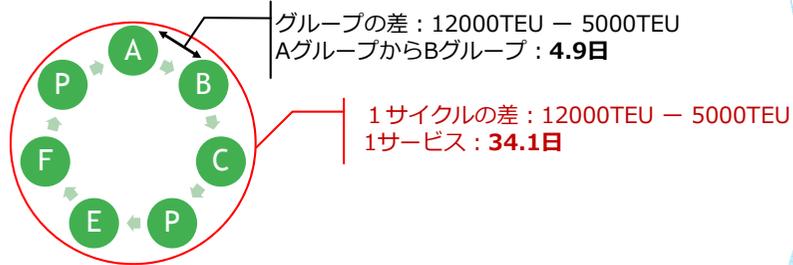
2.4倍に大型化

船型	12000TEU	5000TEU
就航隻数	106隻	178隻

半分まで  
減らしていない

コンテナ船の就航隻数：サービス別の年間航海時間に比例

年間航海時間の増加：船型による変化は運航時間に大きい影響を与える



12000TEUの場合も5000TEUの場合も速力一定  
∴航海時間は等しい

運航時間差の発生原因：

大型化に伴う、入出港の待ち時間と荷役時間の増加

33

## パナマ運河拡張後の輸送ネットワーク：

### 船型と輸送費用の関係

したがって、12000TEUを用いた場合は輸送費用が最小になるが、船腹量が大きくて、船会社は資金面で考えると、**運航総時間**に工夫する必要がある。荷役時間は一定であることで、削減することが難しい状況になる。しかし、**サービス別の寄港回数を減らせば**、大型船の入出港の待ち時間が短縮できる。

例えば、船会社が輸送ネットワークを設計する際に、**ハブ&スポーク**の輸送方法で、拠点（ハブ）となる湾港から、各拠点（スポーク）にサービスを展開させ、ハブ港同士の間には大量輸送できる基幹路線を設計し、**フィーダー輸送**で近い地方港へ輸送する案も考えられる。

34

## 発表の流れ

1. はじめに：研究背景と目的
2. 北米航路及びパナマ運河の概要
3. 海上輸送ネットワークの定式化
4. 就航隻数の算出式
5. 輸送ネットワークの設計で用いるデータ
6. パナマ運河拡張後の輸送ネットワーク
7. おわりに

35

## おわりに

### 検討内容

- ◆パナマ運河拡張後の輸送需要量を推計
- ◆輸送費用が最小となる輸送ネットワークについて検討
- ◆パナマ運河拡張に伴う就航船舶の大型化について
  - 大型船のメリット：船型12000TEU：輸送費用が63.37億ドル、既存の船型5000TEU：輸送費71.72億ドル。大型化による削減効果 = **12.69億ドル、13.2%削減**
  - 大型船のデメリット：12000TEUを用いた場合は船腹量が大きく5000TEUの**1.43倍の資金**が必要
- ◆船会社：待ち時間などを削減して運航総時間を減らす必要がある

36

ご清聴ありがとうございました