

主要定期航路における減速航海によるCO₂排出量及び輸送コスト削減に関する研究

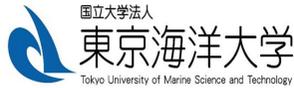
東京海洋大学 海洋科学技術研究科

海運ロジスティクス専攻

張 智鑫

チョウ チシン

指導教員 黒川久幸 教授



Tokyo University of Marine Science and Technology

1

発表の流れ

1. 研究背景・目的
2. 研究対象
3. 計算モデルの定式化
4. 感度分析の内容
5. 考察結果
6. 大型化の隻数増加
7. 待機船舶の投入
8. まとめ

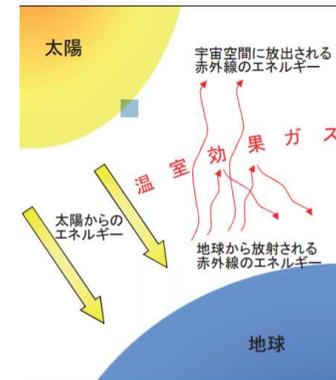
発表の流れ

1. 研究背景・目的
2. 研究対象
3. 計算モデルの定式化
4. 感度分析の内容
5. 考察結果
6. 大型化の隻数増加
7. 待機船舶の投入
8. まとめ

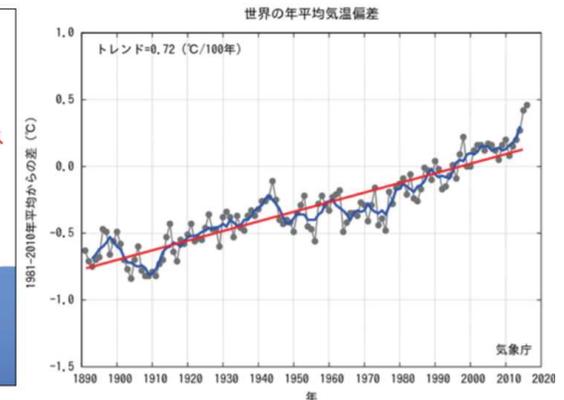
地球温暖化

- 産業革命以降、人間は化石燃料を大量に燃やして使用することで、大気中への**温室効果ガス** (GHG: Greenhouse Gas)^(注)の排出が急速に増加。このため、温室効果が強くなり、地球表面の温度が上昇。

(注) 二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)など、温室効果をもたらす気体の総称。



(出典) 環境省「STOP THE 温暖化2012」

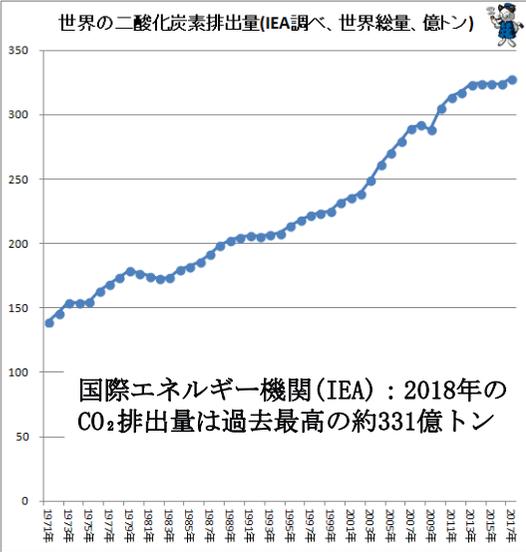
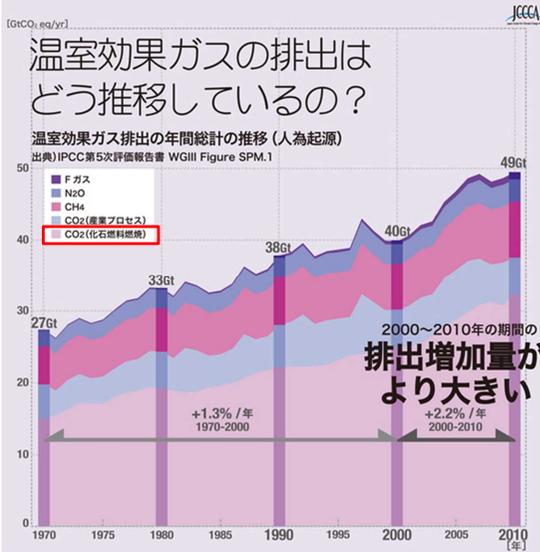


(出典) 気象庁HP (http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_wld.html)

3

4

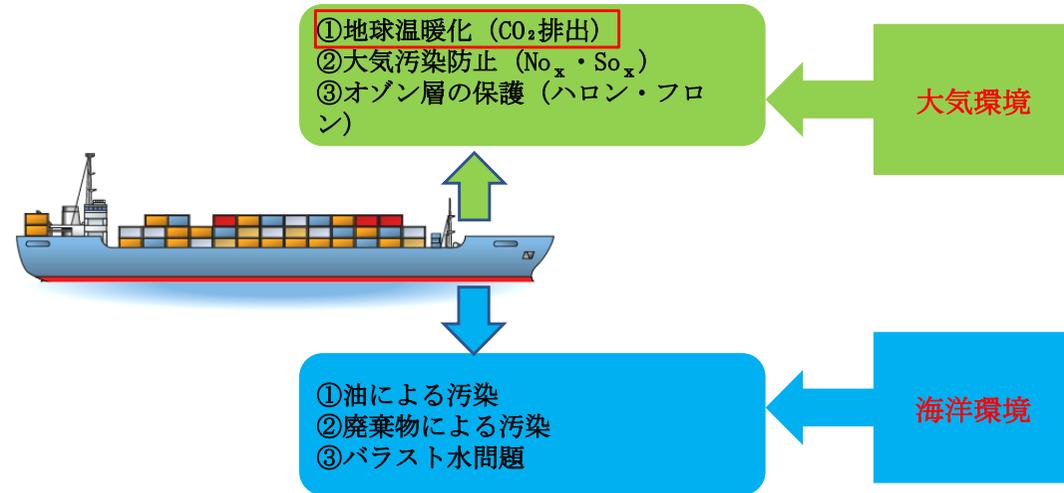
CO₂排出量の推移



出典：JCCCA 全国地球温暖化防止活動推進センター

出所：1971年以降の世界の二酸化炭素排出量比率をグラフ化してみる
<http://www.garbagenews.net/archives/2011544.html>

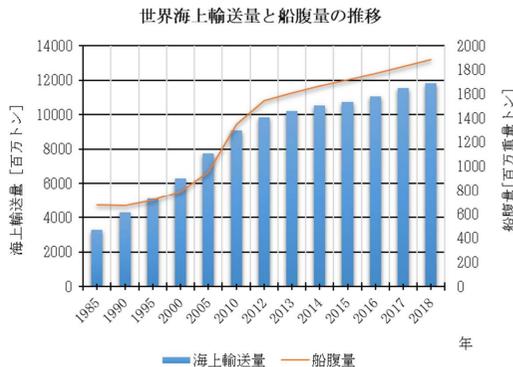
国際海運における環境問題



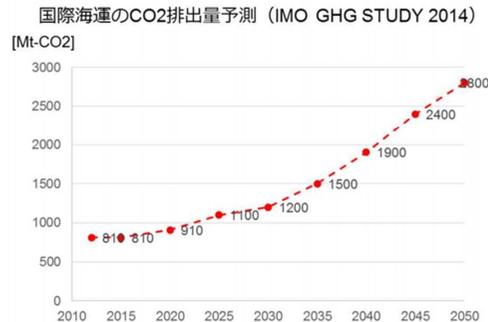
出典：JSA一般社団法人日本船主協HPより作成

国際海運におけるCO₂排出量

- ・ 国際海運からの排出量は約8億トン
- ・ 国際貿易量（海運の需要）の増加
- ・ 国際海運におけるCO₂排出量の増加



出典：SHIPPING NOW 2019-2020.



出典：IMO GHG STUDY 2014

IMO（国際海事機関）のGHG削減戦略



燃費効率：単位輸送当たりのCO₂排出量

出典：国土交通省 IMO GHG 削減戦略に関する発表資料

IMO（国際海事機関）の取り組み

技術的手法

（新造船のみを対象）

船舶の大型化

（燃費効率向上）

船舶向け浄化装置

（SOx排出量削減）

摩擦抵抗低減技術

（燃費効率向上）

LNG船（液化天然ガス）

（代替燃料の導入）

運航的手法

（既存船を含む全ての船舶）

減速航海

（速力最適化）

北極海航路の活用

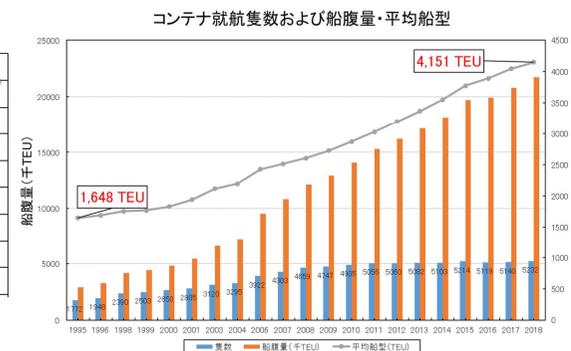
（航海距離の短縮）

ウェザールーティング

（潮流、風波を考慮した最適ルート
の選択）

出典：国土交通省 IMO GHG 削減戦略に関する発表資料

コンテナ船の大型化



出典：世界のコンテナ輸送と就航状況 2018年

- 新造船の平均船型は1,400TEU級から、8,000TEU級に増加。
- 就航船の平均船型の推移を見ると、平均船型が1,600TEU級から4,000TEU級に増加。
- コンテナ船が全体的に大型化に進み。

船舶燃料油のSOx排出規制



- 高品質な規制適合燃料油への切り替えため、価格の上昇による**燃料コスト**が増加
- 燃料消費量の削減が重要

		硫黄分質量%
HSFO	高硫黄重油	3.5%
LSFO	低硫黄重油	0.5%
MGO	マリンガスオイル	0.1%

	2020年	価格差[\$/t]
Ge Delft	LSFO-MGO	21
IEA	HSFO-MGO	350
JBC Energy	HSFO-LSFO	289
Drewry	HSFO-LSFO	303

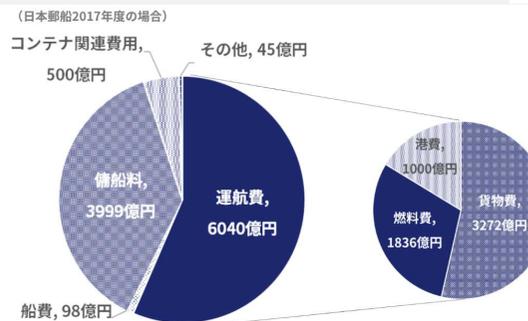
主要調査機関の船舶燃料油価格見通し

出典：日本政策投資銀行 産業調査部 2018/12

減速航海

- 燃料消費量を削減するために航海速度を落とすことを指す。
- 燃料費が占める割合は大きい
- 減速航海は燃費改善に効果がある

海運における燃料費の占める割合



船種別の船速と燃費（代表例）

速力 (%)	コンテナ船 (knot)	PGC (knot)	バルカータンカー (knot)	出力 (燃費) (%)
100%	26.4	21.1	15.9	100%
95%	25.0	20.0	15.0	85%
80%	21.1	16.9	12.7	51%
50%	13.2	10.6	7.9	13%
46%	12.2	9.7	7.3	10%

注：上記燃費とは単位時間当たりの燃費

出典：日本マリンエンジニアリング学会誌 減速運航の課題・対策及びその実績

出典：Clarkson Research Services Ltd.



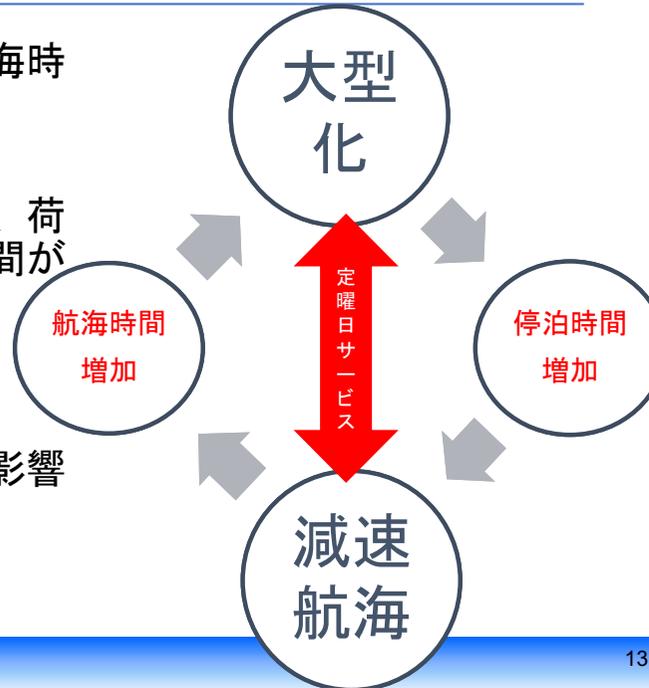
出典：国土交通省「SOx規制の概要」2017

「日本郵船 FACT BOOK II 2018 財務データ集、海運市況情報」2018年4月27日作成

出所：<https://sorabatake.jp/1184/>

大型化が減速航海に与える影響

- ・ 減速航海を行い、航海時間が増加する。
- ・ 船舶の大型化に伴い、荷役作業などの停泊時間が増加する。
- ・ 大型化が減速航海に影響を与える。



13

既存研究について

- ・ 既存研究においてCO₂排出量を削減するための船舶の大型化など種々の削減策における効果について検討を行っている。
- ・ しかし、CO₂排出量の削減策として最も有効な対策の1つである減速航海に関する検討は十分に行われていない。
- ・ 近年の船舶の大型化に伴い、荷役作業時間の増加が減速航海に与える影響に関する検討はほとんどなされていない。

14

研究目的

- ・ そこで本研究では、主要定期航路における船舶の大型化の影響を踏まえて、減速航海がCO₂排出量及び輸送コストに与える効果について分析を行う。
- ・ この分析から有効な減速航海の方策について検討することを目的とする。

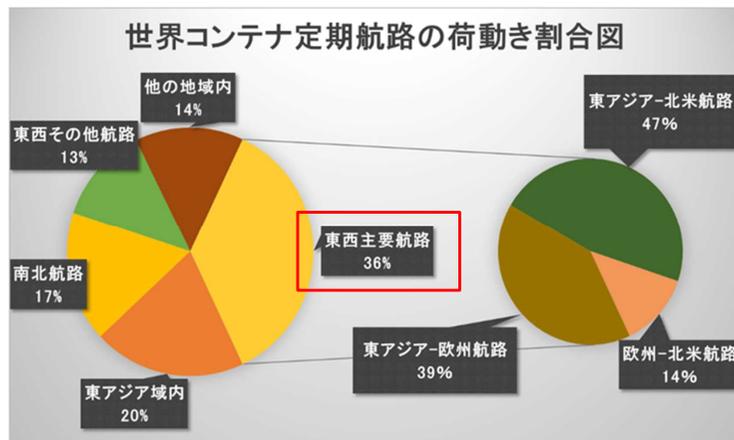
15

発表の流れ

1. 研究背景・目的
2. 研究対象
3. 計算モデルの定式化
4. 感度分析の内容
5. 考察結果
6. 大型化の隻数増加
7. 待機船舶の投入
8. まとめ

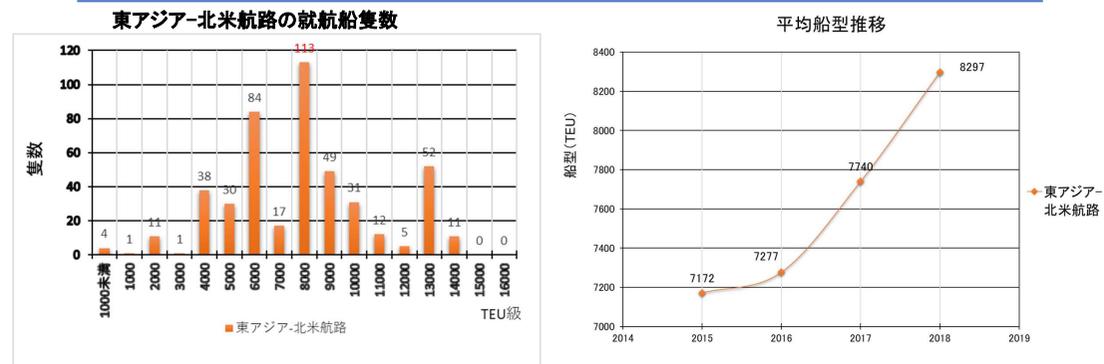
16

東西主要定期航路について



世界のコンテナ荷動き(2017):航路別の割合
出典:公益財団法人日本海事センター、SHIPPING NOWデータ編 2017-2018

東アジア-北米航路の配船状況

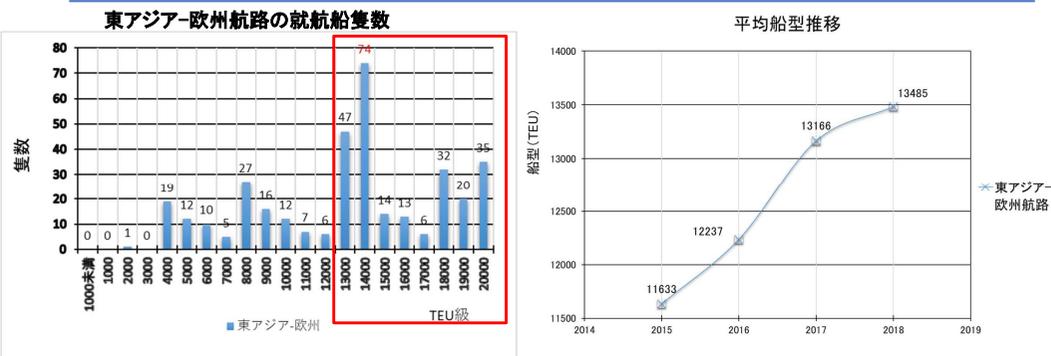


出典:世界のコンテナ輸送と就航状況(2018年度版)

- 東アジア-北米航路: 平均船型が8,297TEUで、推移を見ると、これからも大型化に進む航路である。
- 441隻の中に、8,000TEU級が113隻で、最も多く船型である。

17

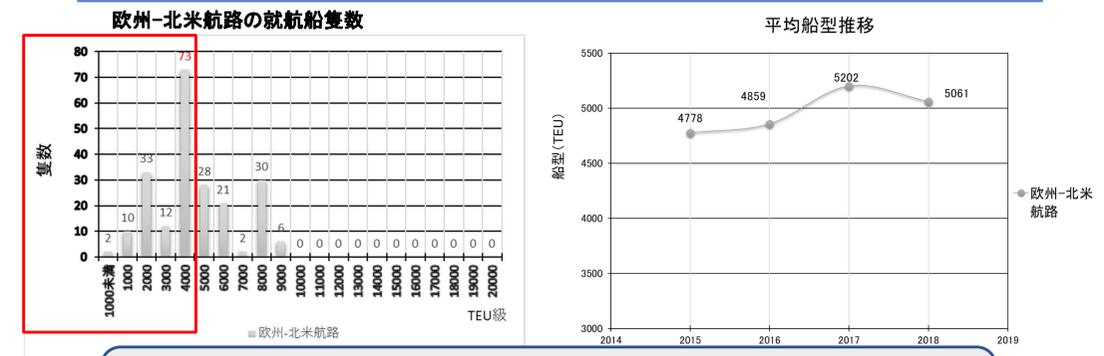
東アジア-欧州航路の配船状況



出典:世界のコンテナ輸送と就航状況(2018年度版)

- 東アジア-欧州航路: 平均船型が13,485TEUで、最大船型の航路である。
- 340隻の中に、241隻(70%)が13,000TEU級以上の大型船である。
- 平均船型の推移を見ると、これ以上の大型化が考えにくい。

欧州-北米航路の配船状況



各主要定期航路の大型化状況が異なるため、それを考慮した上で、減速航海の削減効果を検討することが必要である。

- 欧州-北米航路: 平均船型が5,061TEUで、減少傾向に入る動きがみられる。
- 217隻の中に、5,000TEU級未満が130隻(約60%)で、主要航路における最小航路である。

19

20

回帰分析の結果

- 回帰分析：定数を0、有意水準を95%として、分析を行い

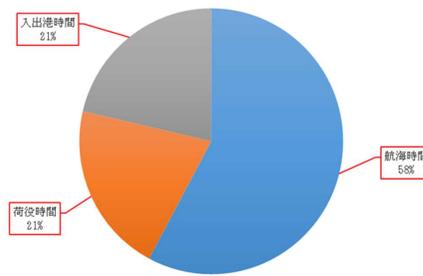
航路	重相関 R	重決定 R2
東アジア-北米航路	0.9333	0.9373
東アジア-欧州航路	0.9866	0.9734
欧州-北米航路	0.9756	0.9519

- 3つの航路の重決定R2が0.9以上、t値が高いため、モデル式が妥当と言える。

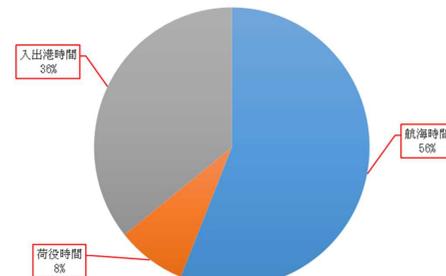
因子	東アジア-北米航路		東アジア-欧州航路		欧州-北米航路	
	寄港回数	平均船型	寄港回数	平均船型	寄港回数	平均船型
係数	40.689	0.034	47.296	0.009	39.895	0.038
t	4.633	3.385	13.932	2.639	3.817	2.197

各航路の1サイクル時間の構成

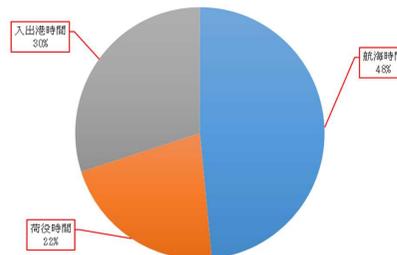
東アジア-北米航路の1サイクル時間構成図



東アジア-欧州航路の1サイクル時間構成図



欧州-北米航路の1サイクル時間構成図



- 停泊時間(荷役時間と入出港時間)が4割以上に占めている
- 東アジア-欧州航路の荷役時間が少なく、入出港時間が大きい。

1サイクル時間と必要隻数の関係

- 必要隻数：1サイクル時間で、週1回（定曜日）寄港するweeklyサービスを行うための隻数。

$$N = \text{ROUNDUP} \{ [T_0 / (24 \times 7)] , 0 \}$$

N：必要隻数[隻]

T₀:1サイクル時間[h]

1



1サイクル時間 = (航海日数47) × (1日時間24)
 必要隻数 = (47 × 24) ÷ (1週時間24 × 7) = 6.71隻
 小数点を切り上げ、7隻になる
 1サイクル日数 = 7隻 × 7 = 49day
 航路サービスは設計上で**余裕時間**が存在する。

Latest News

OCEAN ALLIANCE

EastBound

Port	寄港地	航海日数	Transit Time
TIANJIN XINGANG, CN			0
QINGDAO, CN			1
SHANGHAI, CN			4
PRINCE RUPERT, BC, CA			16
PRINCE RUPERT, BC, CA			16
LOS ANGELES, CA, US			23
OAKLAND, CA, US			29
TIANJIN XINGANG, CN			47

Transit Time Calculation (as per proforma)

From: Select the port of departure

To: Select the port of arrival

Frequency: Weekly (寄港頻度)

Vessel Fleet: 7 (隻数)

Ports of Call: 6 (寄港回数)

Duration: 49 Days (1サイクル日数)

出所: oma-cgm航路スケジュール

CO₂排出量の算出式



年間燃料消費量の算出式

$$FL = F_0 \times (S \times 1.852) \times f$$

$$F_0 = 6.87 \times 10^{-5} \times \{DSP \cdot (1 - 0.65 \times LF) \times DWT\} \times DSP^{(-1/3)} \times (V \times 1.852)^2$$

$$DSP = 1.37 \times DWT + 1660$$

$$DWT = D \times 10.8 + 12400$$

- FL : 年間燃料消費量 [kg/年]
- F₀ : 燃料単位距離消費量 [kg/km]
- S : 航海距離 [nm]
- f : 寄港頻度 [回/年]
- DSP : 船舶の満載排水トン [トン]
- LF : 消費率 [%]
- DWT : 船舶の載貨重量 [トン]
- V : 航海速度 [KT]
- D : 船型 [TEU]

出典: 国土総合技術研究所のCO₂排出量における燃料消費量の推計式

CO₂排出量の算出式

$$CO_2 = \alpha \times FL$$

CO₂ : 年間CO₂排出量 (トン/年)
 α : 船舶燃料におけるCO₂排出係数 [トン/kg]

出典: 日本環境省
 温室効果ガス排出量計算のための算定式及び排出係数一覧

- 航海速度と船型による燃料消費量を求め、CO₂排出への影響を検討。

輸送コストの算出式



年間輸送コストの算出式

$$TC = FC + HC + PC + SC + CRE$$

- TC : 年間輸送コスト [USD/年]
- FC : 年間燃料コスト [USD/年]
- HC : 年間荷役作業料金 [USD/年]
- PC : 年間入出港料金 [USD/年]
- SC : 船隊の年間船費 [USD/年]
- CRE : コンテナ関係費 [USD/年]

出典: 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, 日本航海学会論文集101 巻 (1999)

1 TEU当たり輸送コストの算出式

$$TC' = TC \div Q$$

$$Q = D \times f \times 2$$

$$TC' : 1 TEU 輸送コスト [USD/TEU]$$

- Q : 年間輸送量 [TEU/年]
- D : 船型 [TEU]
- f : 寄港頻度 [回/年]

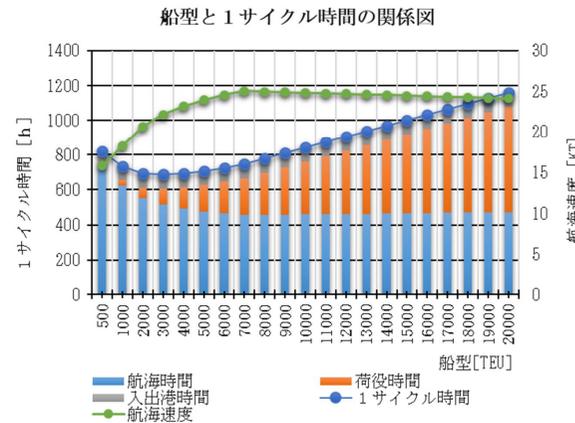
- 年間輸送コストを年間輸送量に除算し、1 TEU当たり輸送コストを検討する。

発表の流れ

1. 研究背景・目的
2. 研究対象
3. 計算モデルの定式化
4. 感度分析の内容
5. 考察結果
6. 大型化の隻数増加
7. 待機船舶の投入
8. まとめ



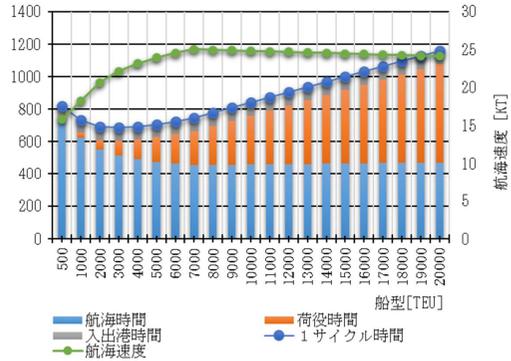
大型化の感度分析



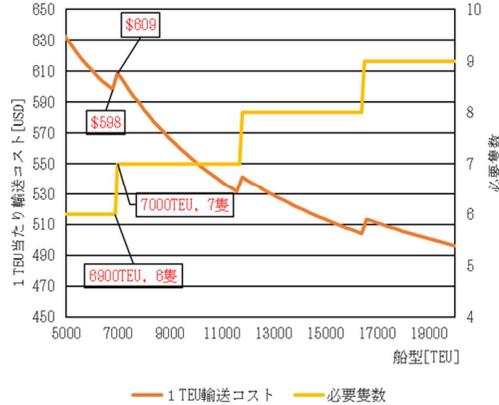
- 航海速度は船型による変化
- 船舶が大型化することで、荷役作業時間が増加
- 3000TEUから1サイクル時間が増加

大型化の感度分析

船型と1サイクル時間の関係図

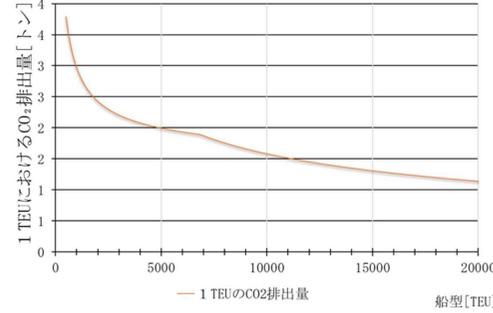


船型に対する1TEU当たりの輸送コスト

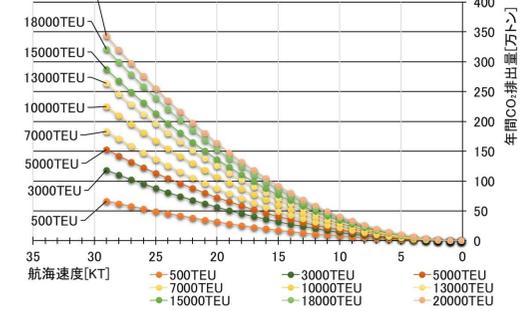


減速航海の感度分析

船型TEUに対するCO₂排出量



船型TEUに対する年間CO₂排出量

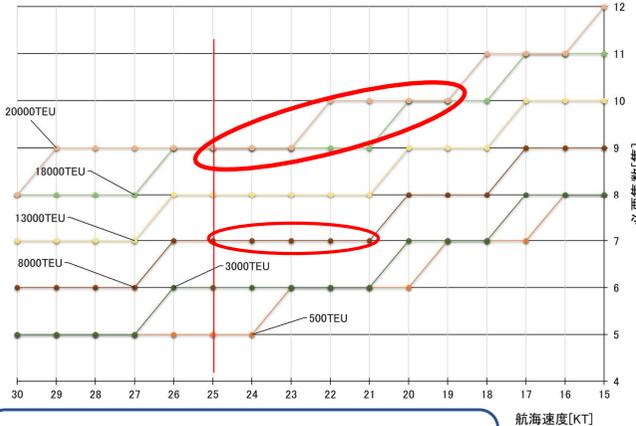


- 航海速度は船型による変化
- 船舶が大型化することで、荷役作業時間が増加
- 3000TEUから1サイクル時間が増加
- 大型化に伴い、輸送コストが減少傾向
- 1サイクル時間の増加により、必要隻数が増加
- その際に、輸送コストが増加

- 船型が大型化すると、1回に運べる貨物量を増加することで、単位当たりCO₂排出量が削減
- 大型化: 環境規制に対する有効策
- 航海速度を落とすことで、年間CO₂排出量が削減
- 減速航海: 環境規制に対する有効策

必要隻数の変化

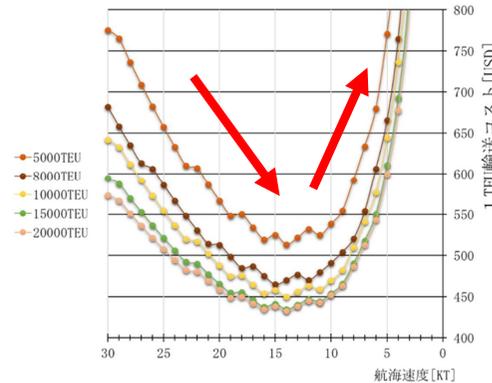
減速航海を行う際の必要隻数の変化傾向



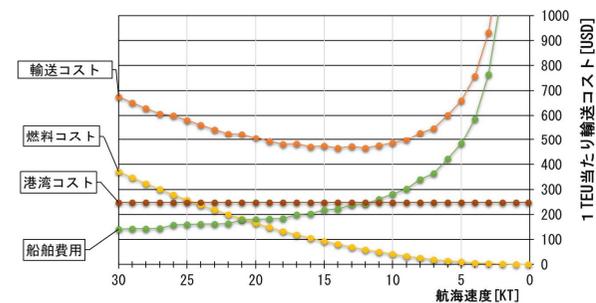
- 必要隻数を増やせず、減速航海が可能
- 必要隻数を1つ増加することで、かなりの減速航海が可能

減速航海による輸送コストの変化

減速航海を行う際の1TEU輸送コスト

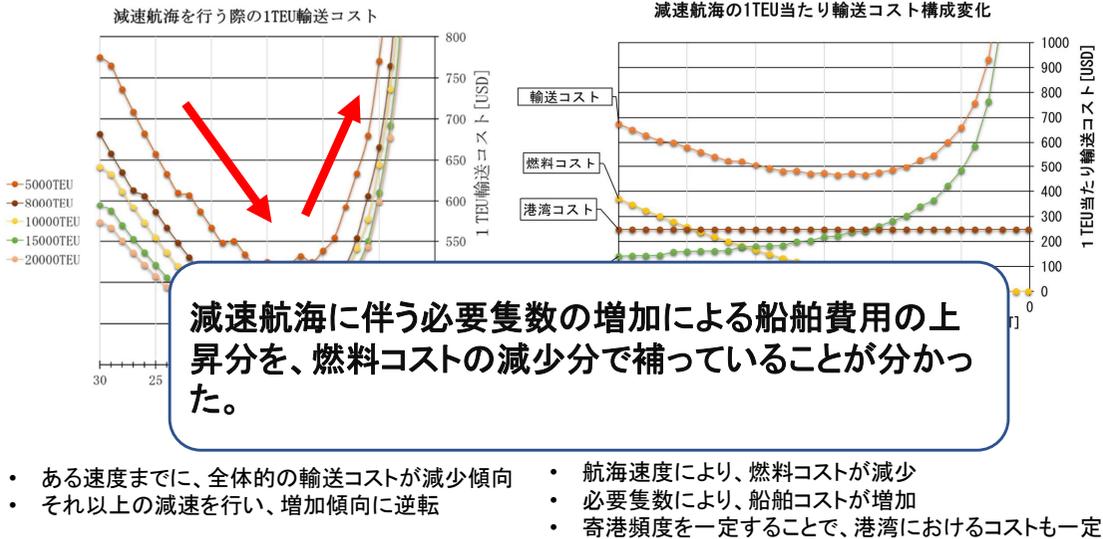


減速航海の1TEU当たり輸送コスト構成変化



- ある速度までに、全体的の輸送コストが減少傾向
- それ以上の減速を行い、増加傾向に逆転
- 減速航海により、燃料コストが減少
- 必要隻数の増加により、船舶費用が増加
- 寄港頻度を一定することで、港湾におけるコストも一定

減速航海による輸送コストの変化



考察結果

- ① 航路サービスは設計上の余裕時間が存在すること
- ② コンテナ船を大型化する際に、必要隻数の増加に伴う減速航海が可能であること
- ③ 待機船舶を投入し、減速航海が可能であること
- ④ 荷役作業の効率向上や入出港時間の短縮は減速航海を可能にし、CO₂削減効果があること



発表の流れ

1. 研究背景・目的
2. 研究対象
3. 計算モデルの定式化
4. 感度分析の内容
5. **考察結果**
6. 大型化の隻数増加
7. 待機船舶の投入
8. まとめ

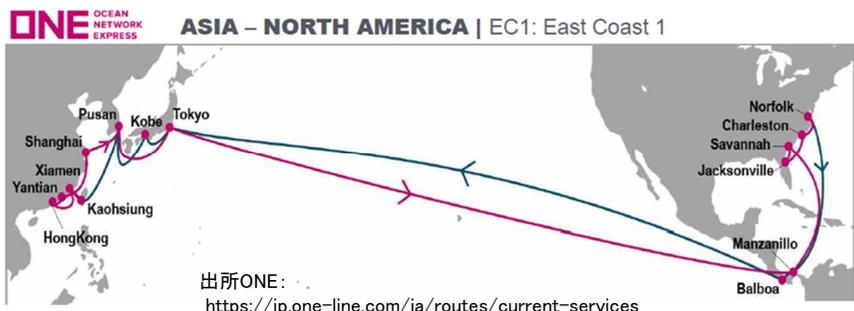


発表の流れ

1. 研究背景・目的
2. 研究対象
3. 計算モデルの定式化
4. 感度分析の内容
5. 考察結果
6. **大型化の隻数増加**
7. 待機船舶の投入
8. まとめ



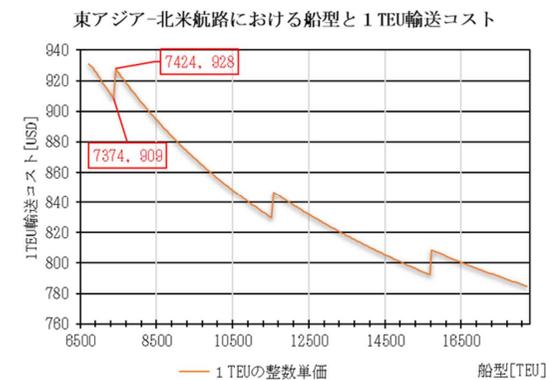
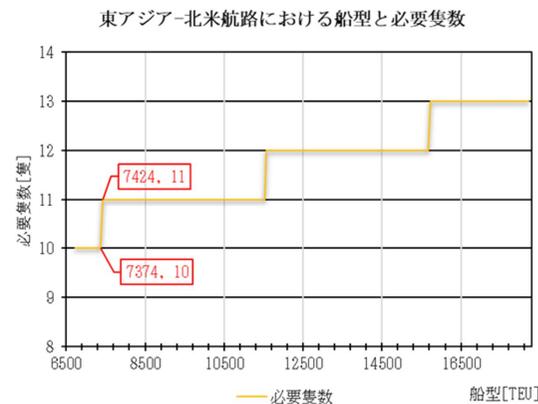
実際航路サービスへの考察



サービス名	距離 (nm)	寄港回数	平均船型 (TEU)	平均速度KT	隻数	1サイクル時間 h	航海時間	停泊時間
EC1	21985	13	6724	24.5	10	1680	897.3469	782.6531

- 東アジア-北米航路の平均船型が2018年に初めて8,000TEUを超え、これからも大型化していくことを予想される。

大型化による変化



- 7,374TEUから7,424TEUまで50TEUを増加すると、1隻の必要隻数が増え
- 必要隻数が増える際に、輸送コストも増加

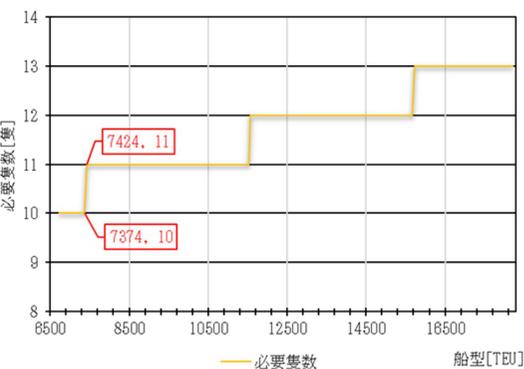
41

42

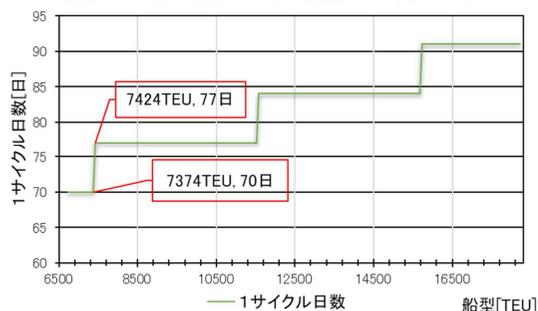
1 サイクル時間の変化



東アジア-北米航路における船型と必要隻数



東アジア-北米航路における船型と1 サイクル日数

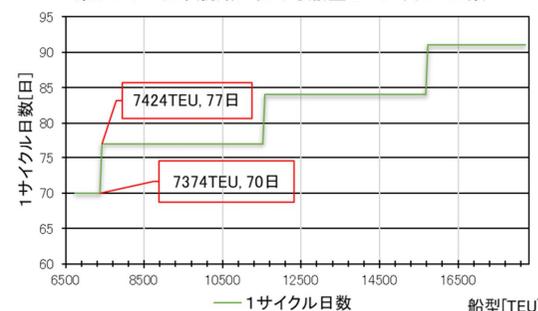


- 7,374TEUから7,424TEUまで50TEUを増加すると、1隻の必要隻数が増え
- 必要隻数を増加すると、隻数を増えた分に対して、1サイクル時間は、7日の時間が増加

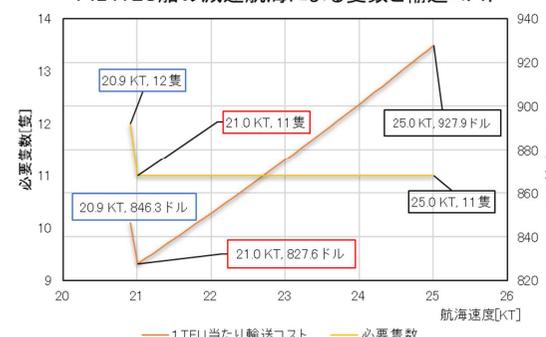
大型化による隻数増加の減速航海



東アジア-北米航路における船型と1 サイクル日数



7424TEU船の減速航海による隻数と輸送コスト



- 増加した時間による減速航海を行い
- 隻数を11隻に維持するが
- 航海速度は25KTから、21KTまでの減速ができる

43

44

隻数を維持した削減効果

大型化による隻数増加: 輸送コスト削減



大型化による隻数増加: CO2排出削減

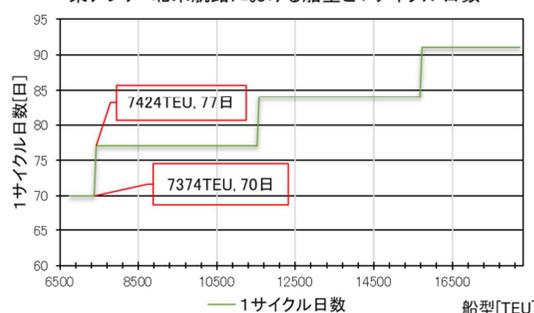


単位	[KT]	[KT]	[KT]	削減効果
	平均速度	減速航海	減速程度	
東アジア-北米航路EC1	25.01	21.01	4.00	
年間CO2排出量[百万トン]	1.79	1.26		0.53
年間燃料コスト[億USD]	2.64	1.86		0.78
1 TEU当り輸送コスト[USD]	927.90	827.60		100.30

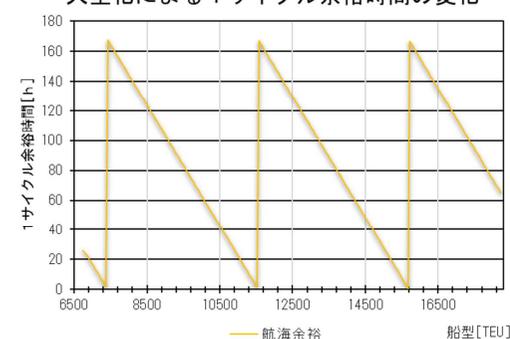
- 4KTの減速が可能、削減効果大きい
- 1TEU当り輸送コストは100ドルの削減
- 年間CO₂排出量は、53万トンの削減

大型化による隻数増加の余裕時間変化

東アジア-北米航路における船型と1サイクル日数



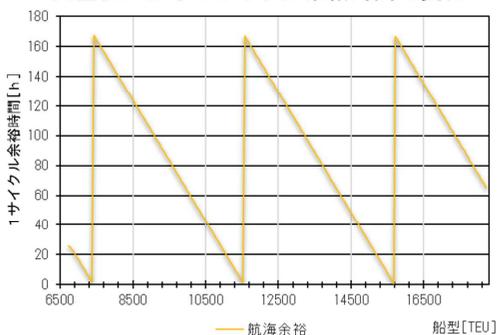
大型化による1サイクル余裕時間の変化



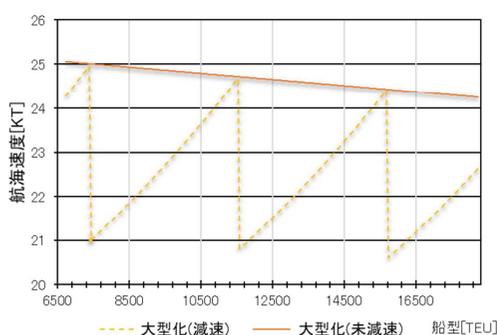
- 大型化による隻数増加が1サイクル日数を増加
- 1隻を増えると1サイクル時間時間が168hに増加
- また、大型化による荷役時間の増加に伴い、余裕時間が少なくなる

減速航海の速度変化

大型化による1サイクル余裕時間の変化



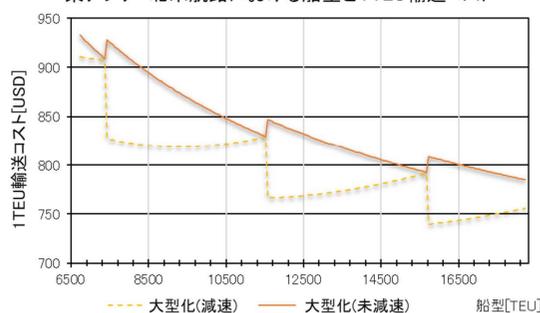
東アジア-北米航路における船型と航海速度



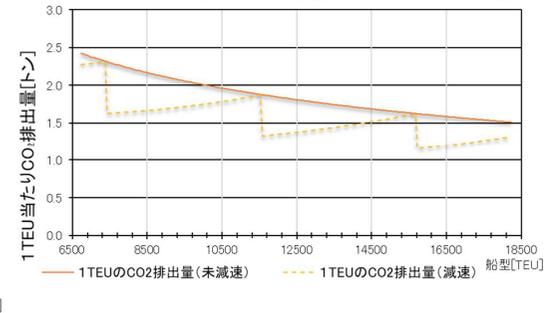
- 1サイクルの余裕時間の変化により、最適な航海速度が変化する。

減速航海の削減効果変化

東アジア-北米航路における船型と1TEU輸送コスト



東アジア-北米航路における船型と1TEU当りCO2排出量



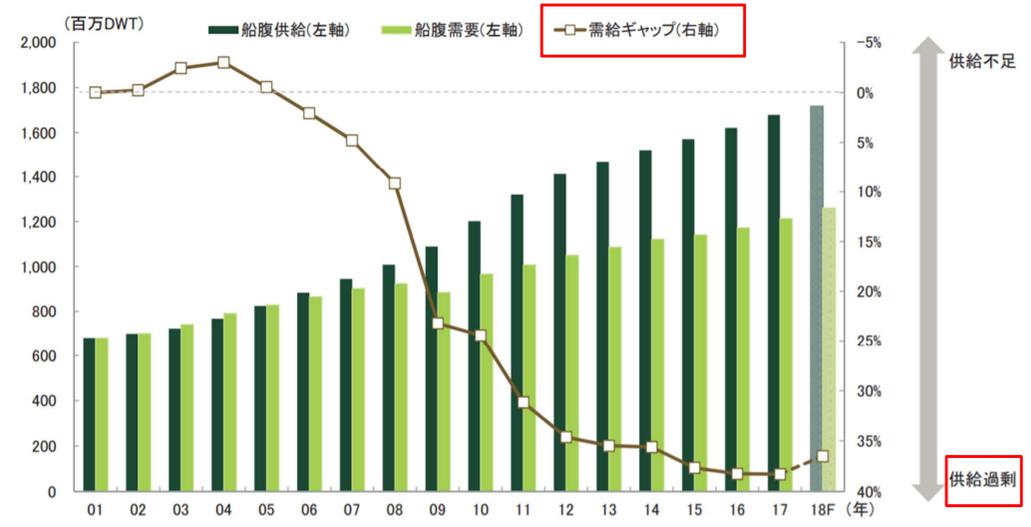
- 船舶の大型化に伴う必要隻数の増加は、減速航海によるCO₂排出量の削減効果が最も大きい
- ただし、極端な大型化は、荷役時間の増加をもたらす、結果として削減効果が減少する。

発表の流れ

1. 研究背景・目的
2. 研究対象
3. 計算モデルの定式化
4. 感度分析の内容
5. 考察結果
6. 大型化の隻数増加
7. 待機船舶の投入
8. まとめ

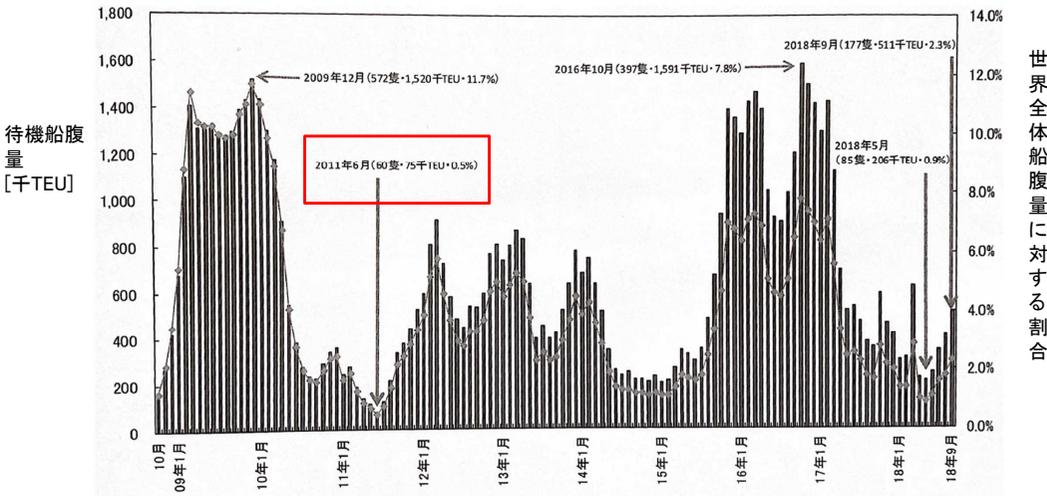


船腹需要量の推移



出所:海運市況動向と業界各社の戦略の変化
2018 Sumitomo Mitsui Banking Corporation(三井住友銀行)

待機船舶量の推移図



出所:世界のコンテナ輸送と就航状況(2018年度版)
日本郵船調査グループに集計

- 待機船腹量は季節により、変動しやすい。
- 2011年6月の待機船舶が最小にしても、60隻(75千TEU)が存在。

待機船舶の投入による減速航海

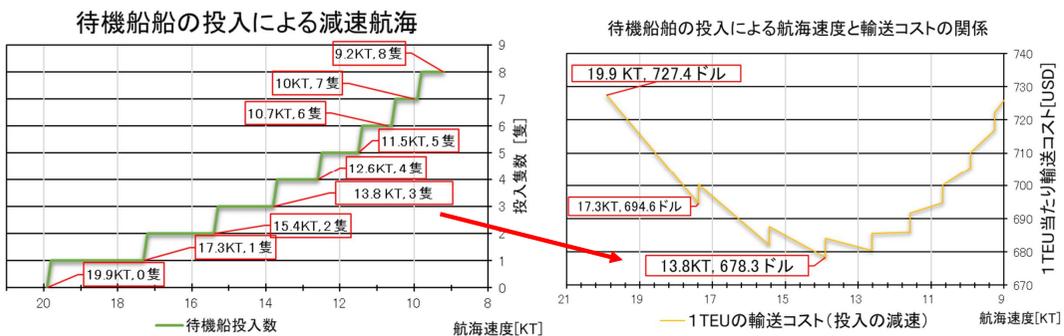


出所CMA CGM:
<https://www.cma-cgm.com/products-services/line-services/>

サービス名	総距離(nm)	寄港回数	平均船型 (TEU)	平均速度KT	隻数	1サイクル時間h	航海時間	停泊時間
FAL5	23273.3	12.0	20361.6	19.9	11.0	1848.0	1169.5	678.5

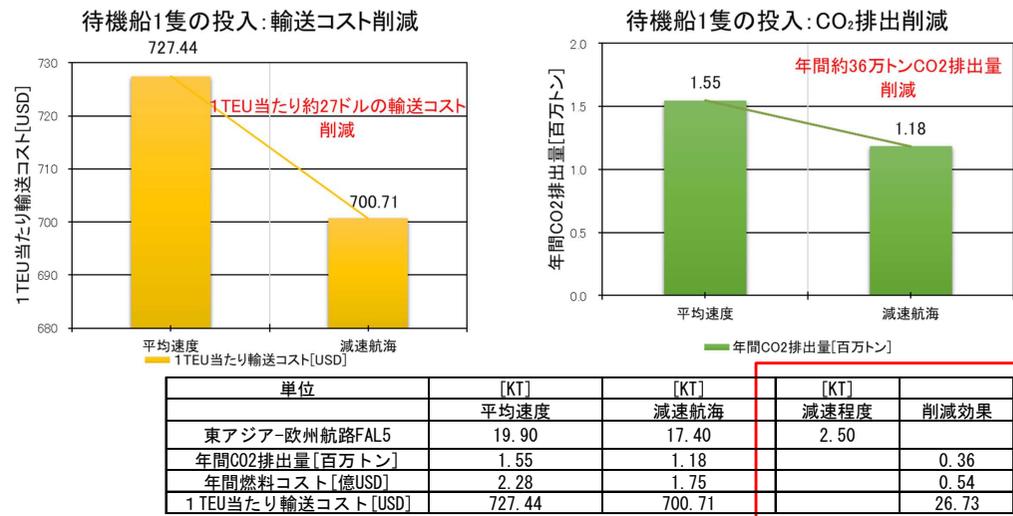
- 東アジアー欧州航路FAL5:平均船型が**20,361TEU**のため、
- これ以上の大型化が考えにくいため、考察対象とする。

投入隻数による減速航海



- 待機船舶の投入により、週1回の寄港サービスを維持し、減速航海が可能
- しかし、減速による燃料コストの削減効果を投入隻数の増加による船舶費用の増加が上回り、結果として輸送コストは下に凸となり、投入隻数には限界がある。

待機船1隻投入の削減効果



- 1隻の待機船舶の投入により、1割(2.5KT)程度の減速が可能。
- 単位当たり輸送コストは27ドルの削減
- 年間CO₂排出量は、2割(36万トン)の削減

53

発表の流れ

- 研究背景・目的
- 研究対象
- 計算モデルの定式化
- 感度分析の内容
- 考察結果
- 大型化の隻数増加
- 待機船舶の投入
- まとめ

55

まとめ

本研究では、主要航路における船舶の大型化を考慮した上で、CO₂排出量の削減に最も有効な対策の1つである減速航海について検討を行った。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 船舶の大型化と減速航海を同時に行う方策は、CO₂排出量及び輸送コストの削減効果が最も大きくなっている。
- (2) 待機船舶を投入する方策は、減速航海によるCO₂排出量及び輸送コストの削減に効果的である。海運会社にとっても、余剰船舶の活用というメリットがある。
- (3) 一方、船舶の大型化や減速航海がリードタイムの増加をもたらすことから、停泊時間の短縮がサービス利用者(荷主)にとって最も望ましい方策である。港湾の効率化策としても有効である。

56



	GHG 削減戦略（初期戦略）を採択
2019 年 1 月	フェーズ 1：データ収集（船舶からのデータ報告制度開始）
2019 年春 (MEPC74)	第 4 回 GHG スタディを開始
2020 年夏	2019 年のデータを IMO に報告
2020 年秋 (MEPC76)	フェーズ 2：データ分析 第 4 回 GHG スタディ報告とりまとめ

出典：国土交通省 IMO GHG 削減戦略に関する発表資料

- (1) 本研究では、先行研究の計算式を用いて、CO₂排出量及び輸送コストの推計を行ったが、2020年に船舶の運航実績データが報告され、そのデータを用いる検討が必要とされる。
- (2) 待機船舶については、海運アライアンスの再編やコンテナの荷動きにより、待機船舶の変動が激しく、より現実的な調査が必要である。

ご清聴ありがとうございました。