海運における温室効果ガス削減施策の評価ー般船の生存時間解析とシミュレーションから一

運輸総合研究所 客員研究員 東京都市大学 環境学部 岡田 啓

目次

- 1. 研究の背景
- 2. 研究の目的
- 3. 2050年における船舶の燃費・効率の検討: 数値シミュレーション
- 4. シミュレーション結果
- 5. 本研究のインプリケーション
- 6. まとめ

研究の背景:気候変動に対する世界の状況と温室効果ガス削減

- 気候変動が一因と考えられる異常気象が世界各地で散見
 - 台風、シベリアでの高温、中国の大雨
- これら異常気象により人的、物的、経済的な負担も
- 気候変動に対する世界の認識が近年大きく変化
 - パリ協定が 2016年発効。 2020年以降の温室効果ガス(GHG)排出 削減のための国際枠組み。 21世紀後半に世界全体でカーボンニュー トラルを目指す
 - 環境(E)・社会(S)・ガバナンス(G)を重視した経営を行う企業へ投資 をするESG投資がビジネス界で拡大
 - 持続可能な開発目標(SDGs) の13番目のゴールに
- 菅総理が所信表明演説にて2050年までにカーボンニュートラル、脱炭素社会を目指すことを宣言されたことも記憶に新しい

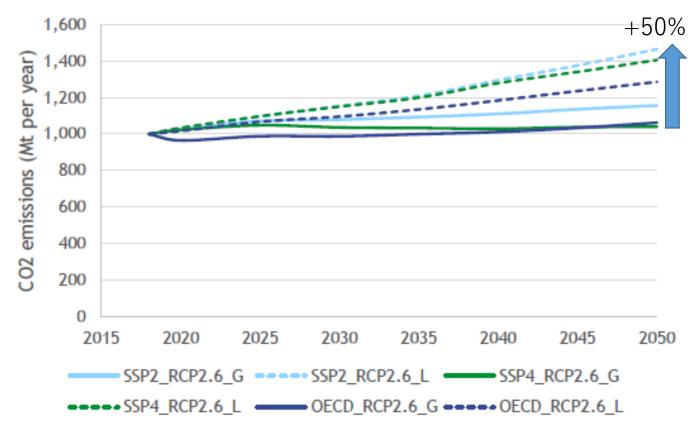
研究の背景:国際海運のCO₂排出

- 海運は大量輸送に優れる輸送機関
- 輸送の動力は化石燃料を燃焼して取得。燃焼毎に二酸化炭素 (CO₂)が排出
- 国際海運が排出する温室効果ガス対策については、国際海事機関(IMO)にて議論・調整
- 2020年 8 月:IMOが温室効果ガスに関する第 4 次報告書
- 2018 年に国際海運から排出されたCO₂量は7億4千万トン
 - 世界 CO₂ 総排出量の約 2%
- ・海運輸送そのものはエネルギー効率に優れるが、排出CO₂は総量としては無視できない

研究の背景:海運CO₂排出量将来予測

- 第4次報告書で今後の排出 予測
- 海運の排出量BAUは、2018 年比で0~50%増加と予測
 - ・輸送量・船隊・エネルギー効率・使用燃料の予測を経て導出

・世界の気候変動対策に歩調を合わせ、海運も積極的な CO₂排出削減が迫られる



出典: MEPC 75/7/15, p.5に加筆

研究の背景:国際海運から排出される温室効果ガス削減議論の進展

- 2018年4月、第72回海洋環境保護委員会(MEPC)で温室効果ガス削減戦略が合意
 - ・「運航エネルギー効率改善→ 絶対量の削減」と 数値目標
 - 2030年目標: 効率40%改善(2008年比)
 - 2050年目標:温室効果ガス総量半減(2008年比)
- 2030年目標達成実現の施策とその合意形成が着実に進展
- 2030年目標達成のための施策「既存船への燃費性能規制」(EEXI規制) が当初見込みよりも3年前倒しで、IMOにて合意される見通し
- 今後、2050年目標「温室効果ガス排出量半減」(2008年比)をどのよう に達成するのかが視野に

研究の背景:半減目標達成に向けた議論

- •日本の海事クラスターが持続的発展を図りつつ、どのように大幅な温室効果ガス削減を実現するのかを議論するため、 2018 年に国際海運ゼロエミッションプロジェクトが設立。
 - 2050年目標を達成することを視野に入れ、温室効果ガス削減方策を技術的・制度的側面から議論・検討
- ゼロエミッションプロジェクトは、独自に2050年の国際海運が 排出する温室効果ガス量を推定。
- それに基づき、2050年目標を達成するためには 「80~90%以上のGHG削減効果を有する代替燃料・技術を 2030年頃から投入していく必要がある」と提言した
- ・→代替燃料船の効率的導入施策が求められる

本研究の目的と実施する事柄

- ・本研究では、国際海運から排出される温室効果ガス、特にCO₂の排出量を削減するための代替燃料船導入施策について、
 - ・実証分析・シミュレーションなどを用いて、数量的に評価
 - ・さらに、評価に基づき、政策インプリケーションを提示
- 代替燃料船導入施策の中でも、代替燃料船の効率的な導入を行うために、
- 1. 船舶の生存時間解析および将来の燃費・効率の検討
- 2. 代替燃料船導入を促進するためのインフラストラクチャーの整備・間接ネットワーク効果に関する分析 を実施する。

ゼロエミッションプロジェクトのシナリ オ検討

- ゼロエミッションプロジェクトでは、80~90%のGHG削減を「省エネ技術・運航効率化」と「代替燃料への転換」によって実現
- 重油から、いかなる代替燃料に転換するのかについて、技術開発の 状況を鑑みつつ2つのシナリオ
 - 1. LNG→カーボンリサイクルメタ ン移行シナリオ
 - 2. 水素・アンモニア燃料拡大シナリオ

LNG→カーボンリサイクルメタン移行シナリオ

水素・アンモニア燃料拡大シナリオ

省エネ技術・運航効率化

- 2030年に国際海運全体の平均燃費40%改善を想定。
- 2050年に国際海運全体の平均燃費45%改善を想定(2030年から+5%の改善)。

石油系燃料油の使用

- 2050年までに陸上において燃料としての原油需給が減少し、これに伴って舶用重油の供給が減少すると想定。
- 石油系燃料油を使用する船舶の建造が減少し、2035年以降は全ての新造船がLNGその他の代替燃料を使用すると想定。

LNG燃料

 2050年時点で、国際海運の消費エネルギーの約35% がLNGで賄われると想定。

カーボンリサイクルメタン・バイオメタン

 2050年時点で、国際海運の消費エネルギーの約40%が カーボンリサイクル/バイオメタンで賄われると想定。

水素・アンモニア

 2050年時点で、国際海運の消費エネルギーの約10% が水素又はアンモニアで賄われると想定。

船上CO2回収

2050年時点でLNG燃料を使用する船舶の約20%が導入することを想定。

LNG燃料

 2050年時点で、国際海運で消費されるエネルギー約 30%がLNGで賄われると想定。

カーボンリサイクルメタン・バイオメタン

 2050年時点で、国際海運の消費エネルギーの約7%が カーボンリサイクル/バイオメタンで賄われると想定。

水素・アンモニア

 2050年時点で、国際海運の消費エネルギーの約45% が水素又はアンモニアで賄われると想定。

船上CO₂回収

2050年時点で、国際海運全体の約5%が導入すると想定。

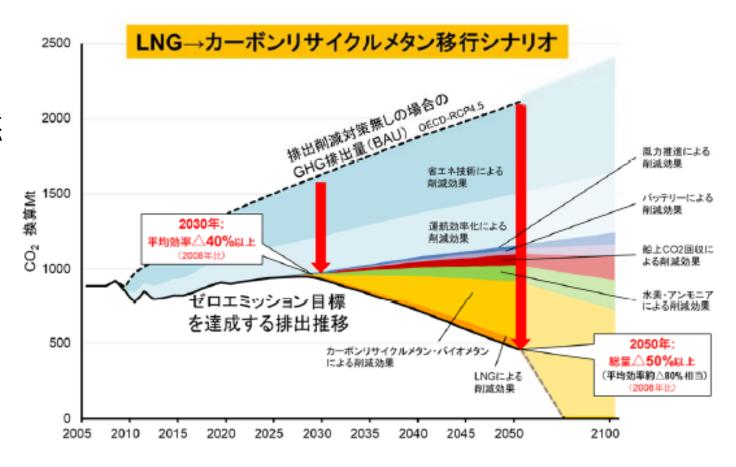
風力推進・バッテリー

風力推進、バッテリーともに、2050年時点で、国際海運全体の約2%が導入すると想定。

出典:『IMO GHG削減戦略への対応に関する調査研究(国際海運ゼロエミッションプロジェクト)(2019年報告書)』

ゼロエミッションプロジェクトのシナリ オ検討

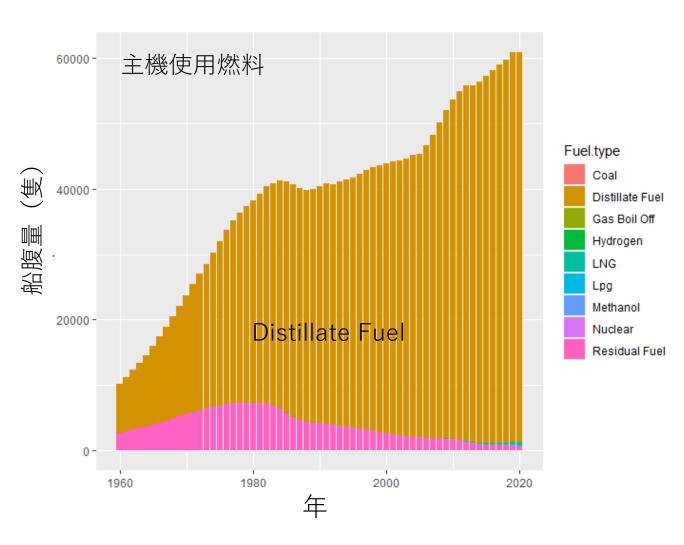
- ・予測した船舶の輸送量と シナリオに沿って省エネ技 術・運航効率化および代替燃 料が導入された場合における GHG排出量を算定
- シナリオに沿うならば、 2050年までに、80%相当効 率改善によりGHG半減が可 能であること確認



出典:『IMO GHG削減戦略への対応に関する調査研究(国際海運ゼロエミッションプロジェクト) (2019年報告書)』

シナリオ評価の必要性

- 現在、船舶の主機は重油を主に 使用
- ・船舶のエネルギー転換は、既存の重油エンジン船が代替燃料エンジン船に置き換えられることによって実現
- 先ほどの2シナリオにおいては、 既存船の解撤や代替燃料船の普 及に関する想定は明確に見受け られない
- ・船舶の入れ替えの面から「80%以上効率改善」の評価が必要



出典:IHS Markit社のSea Webデータより作成

2050年における船舶の燃費・効率の検討

・船舶の入れ替えを踏まえて、<u>2020~2050年における船舶の燃</u>費・効率を数量的に検討するために、次の①~④を実施

1 船腹量

- 1. 船舶の生存関数、 寿命の推定
- 2. 既存船舶の船腹量と 将来の新造船数

②レスリー行列を応用した 建造年別船腹量の計算

- ③ 船舶の燃費・効率シナリオ
 - 1. 船舶の燃費値の整理
 - 2. コンセプト船の投入時期
 - 3. 新造船等の燃費・効率
 - 4. 代替燃料船の新造船普及率

42020~2050年の国際海運全体、船種別の燃費・効率

2050年における船舶の燃費・効率の検討

• 対象の船舶は載貨重量トン (DWT) 5000t以上の船舶

① 船腹量

- 1. 船舶の生存関数、 寿命の推定
- 2. 既存船舶の船腹量と 将来の新造船数

②レスリー行列を応用した 建造年別船腹量の計算

- ③ 船舶の燃費・効率シナリオ
 - 1. 船舶の燃費値の整理
 - 2. コンセプト船の投入時期
 - 3. 新造船等の燃費・効率
 - 4. 代替燃料船の新造船普及率

42020~2050年の国際海運全体、船種別の燃費・効率

船舶の生存関数の推定

1 船腹量

- 1. 船舶の生存関数、 寿命の推定
- 外航船は耐久消費財。入れ替えを考える際には、船舶が市場に 何年残存するのかを知ることが必要
- 船舶の寿命は20~30年と言われている
 - 20年、もしくはより長い[ゼロエミッションプロジェクト]、25年 [MEPC75/7/15]
- ある年に建造された船舶がt年後にどの程度残っているのかは、 生存関数で表現。
- 今回は、船舶の生存関数を推定するため、「打ち切り」を考慮できるカプラン・マイヤー法を採用

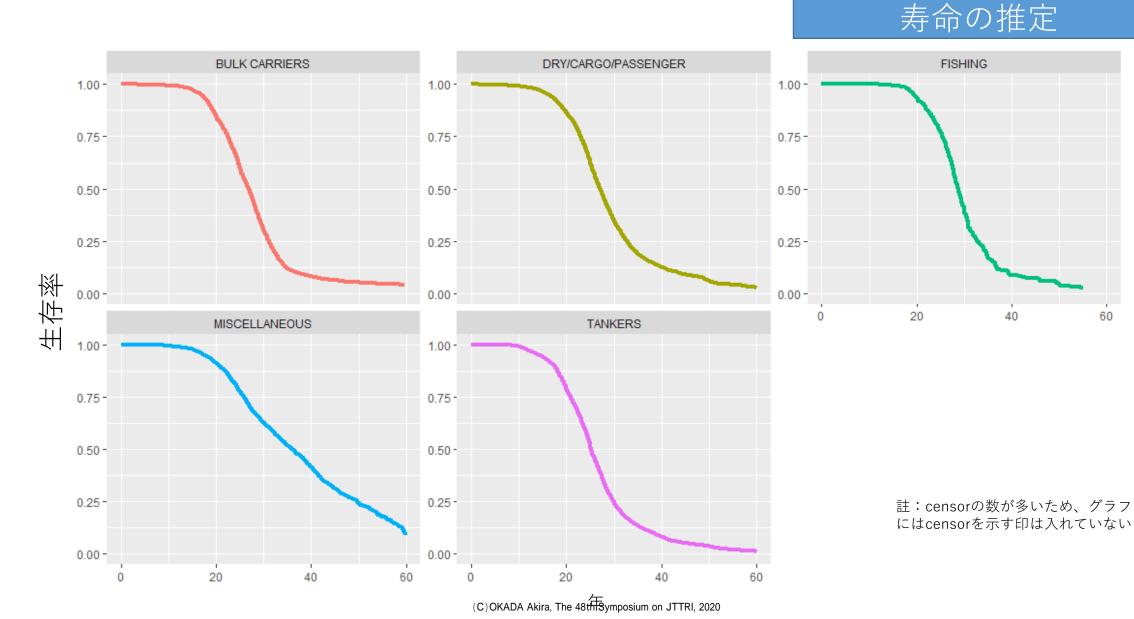
使用データの説明

- 1 船腹量
 - 1. 船舶の生存関数、 寿命の推定

- IHS Markit社のSea Webデータ
 - IMOの船舶、会社、登録所有者番号システムの世界的な唯一の発行機関
 - 記載されている船舶の属性データ
 - オーナー・登録、安全・認証、船舶建造、性能データ等
 - 船舶の生存関数を推定する際には、建造年月、船舶の状況(年月日)の データを使用
- IHS Markit社ではStatCode 5 Shiptype Coding Systemという分類 法を用いて船舶の種類を分類(Level1 ~ Level5)
- Level2 を用いて船種を 5 種類に集約
 - BULK CARRIERS, DRY/CARGO/PASSENGER, FISHING, TANKERS, MISCELLANEOUS
 - 参考として12種類に集約し推定した結果も提示

生存関数推定結果

船腹量 1. 船舶の生存関数、



60

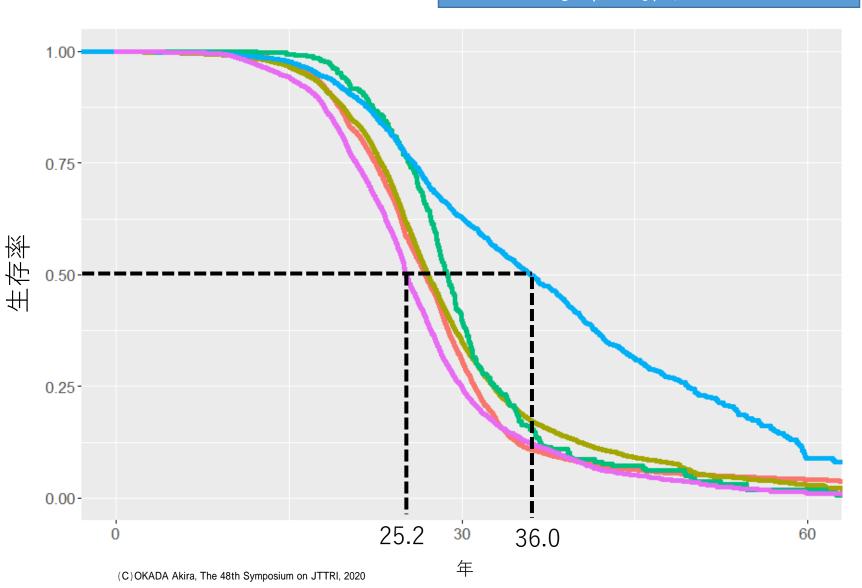
船舶寿命の推定結果

1. 船舶の生存関数、 寿命の推定

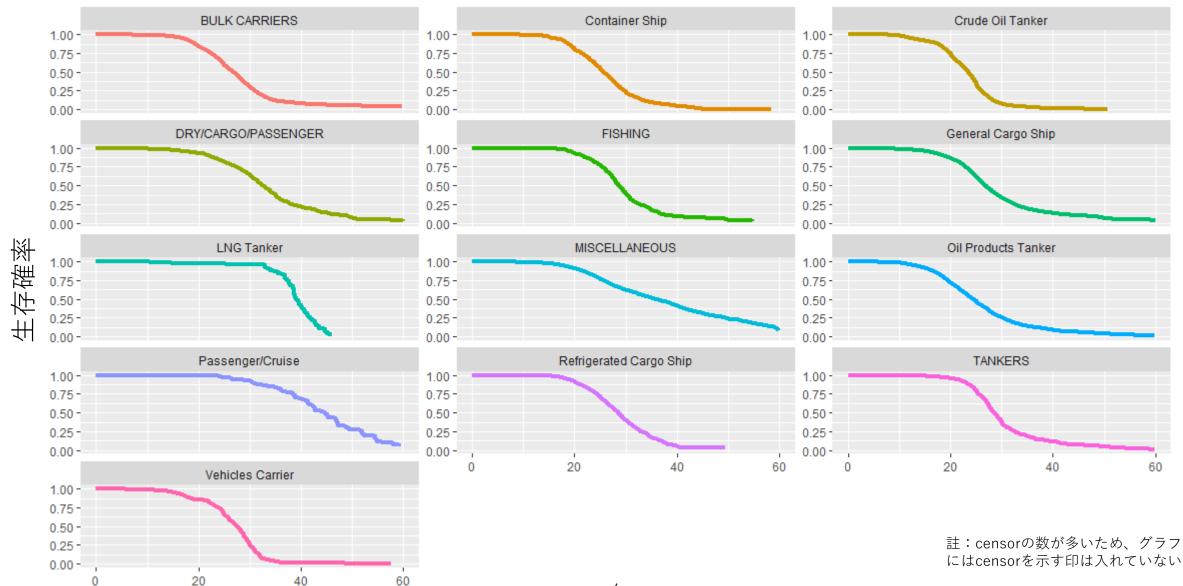
船腹量

- ・生存率0.5に対応 する生存時間である 生存期間中央値を寿 命として採用
- ・推定曲線の生存期 間中央値は25~36 年の間に。

註:censorの数が多いため、グラフにはcensorを示す印は入れていない

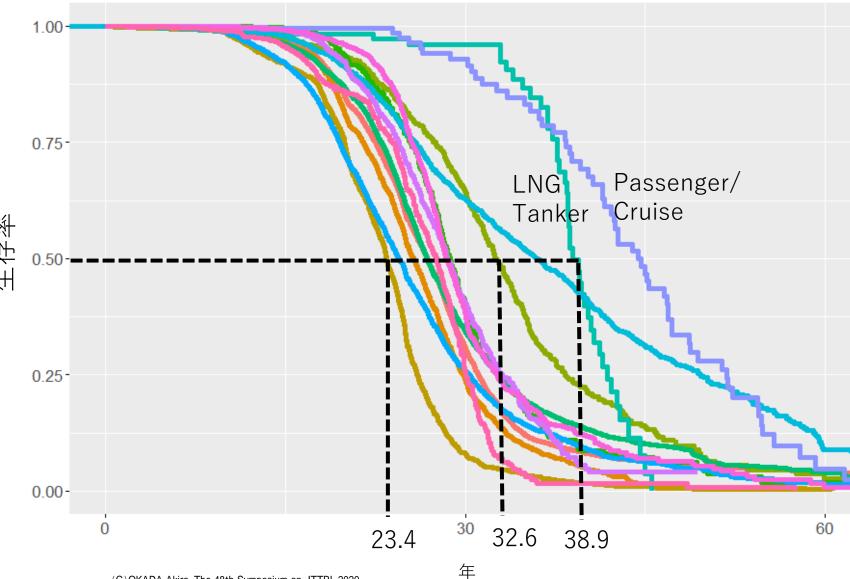


生存関数推定結果:船種12種 (参考)



船舶寿命の推定結果:船種12種 (参考)

- ・Bulk carriersなどの 主要な船種では、生存 期間中央値は23~33 年の間に
- ・LNG Tankerなど 一部の船種で40年に近 61

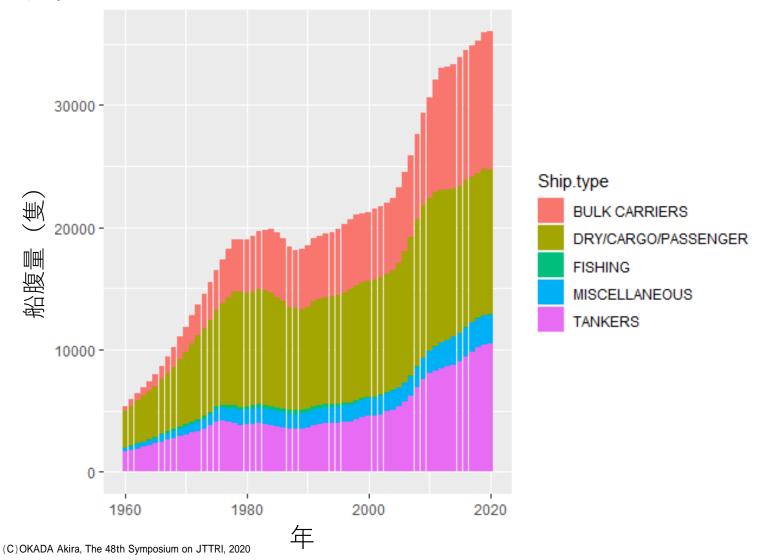


註:打ち切りの数が多いため、グラ フには打ち切りを示す印は入れてい ない

既存船舶の船腹量と 2020~2050年の新造船数

2. 既存船舶の船腹量と 将来の新造船数

既存船舶の船腹量はSea webデータより、船種 別・建造年別に集計

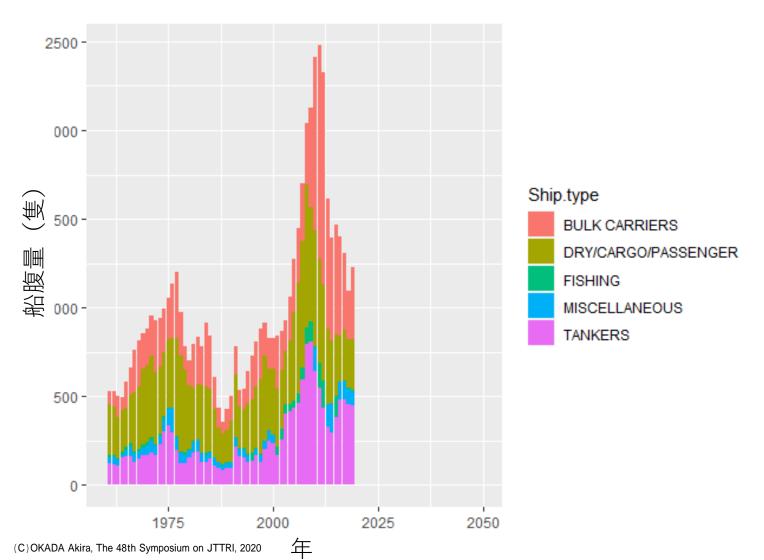


船腹量

既存船舶の船腹量と 2020~2050年の新造船数

- 1 船腹量
 - 2. 既存船舶の船腹量と 将来の新造船数

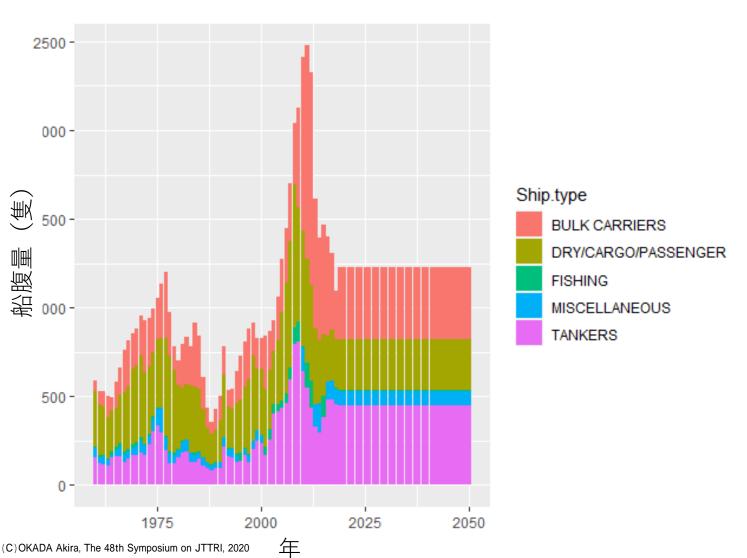
- 既存の船舶船腹量はSea webデータより、船種 別・建造年別に集計
- 新造船も集計



既存船舶の船腹量と 2020~2050年の新造船数

- 1 船腹量
 - 2. 既存船舶の船腹量と 将来の新造船数

- 既存の船舶船腹量はSea webデータより、船種 別・建造年別に集計
- 新造船も集計
- 2019年における新造船 数を、
- 2050年までの新造船数 として固定



レスリー行列を用いた船舶の隻数 推定

• 最大齢 α を持ち、各齢 $a \coloneqq (0,1,2,\cdots,\alpha)$ 毎に生存率 p_a をもつ同じ建造年の船腹量 $P_t(a)$ が、

$$p_a P_t(a) = P_{t+1}(a+1)$$

(生存率) \times (t年の船腹量) = (t+1年の船腹量) という関係を満たすとする。

• このとき、右にある行列(レスリー 行列)を用いると、n年後の残存船 腹量を算定することができる ②レスリー行列を応用した 建造年別船腹量の計算

レスリー行列

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ p_{1} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & p_{2} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \cdots & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & p_{\alpha-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & p_{\alpha} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{\alpha}(a) \\ \vdots \\ P_{t}(a) \\ \vdots \\ P_{t}(a) \\ \vdots \\ P_{t}(0) \end{pmatrix}$$

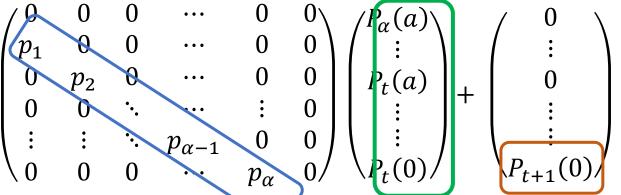
$$= \begin{pmatrix} P_{\alpha}(a) \\ \vdots \\ P_{t+1}(a+1) \\ \vdots \\ P_{t+1}(1) \\ 0 \end{pmatrix}$$

(C)OKADA Akira, The 48th Symposium on JTTRI, 2020

レスリー行列を用いた船腹量推定

②レスリー行 列を応用した 建造年別船腹 量の計算

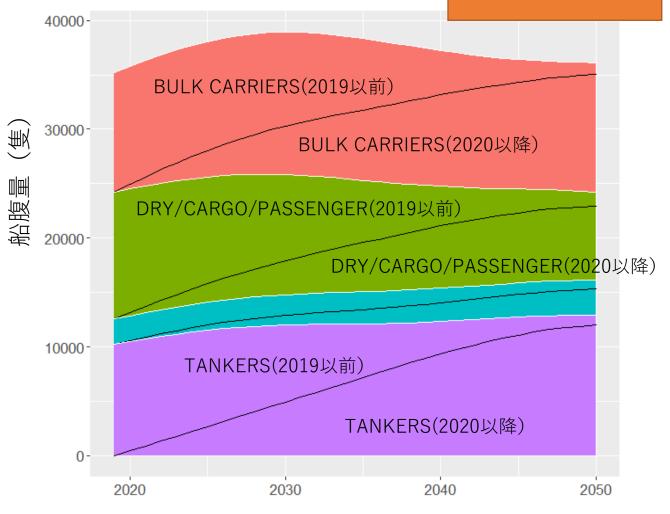
- 生存率 p_a の部分に船種毎のカプラン・マイヤー法の推定値を使用
- 建造年が同じ船腹量 $P_r(a)$ は先に集計した船腹量データを代入
- 2020年以降の新造船数は前年の計算終了後に一番下の行にデータを追加することで対応



レスリー行列を用いた船腹量推定

②レスリー行 列を応用した 建造年別船腹 量の計算

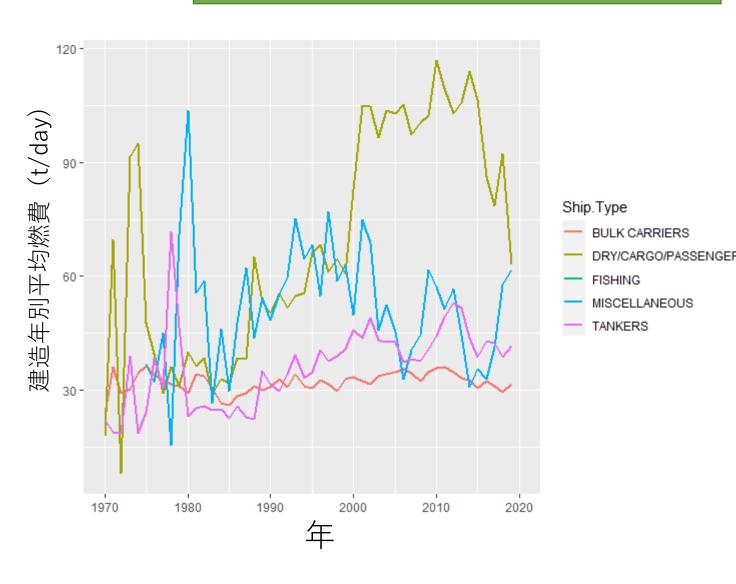
• 計算の結果、右図のように 2020~2050年の船腹量が推 定される



船舶の燃費値の整理

③ 船舶の燃費・効率シナリオ 1. 船舶の燃費値の整理

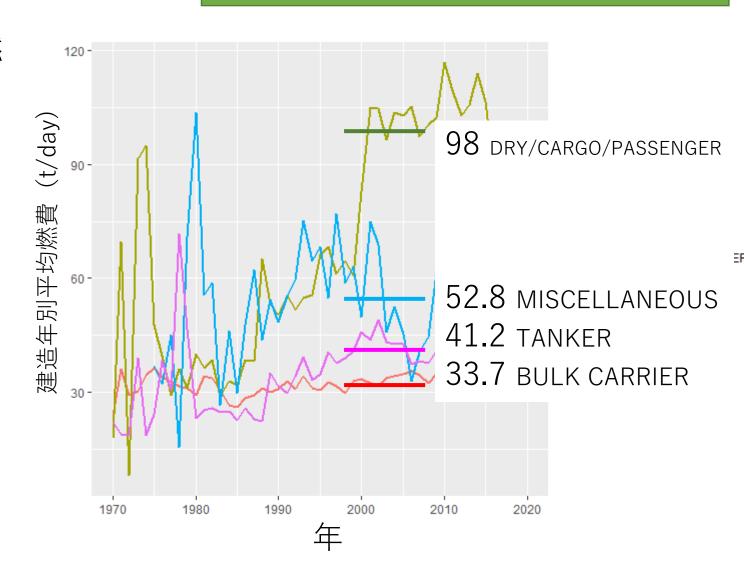
- 既存の船舶燃費はSea Webより燃費(t/day)を整理 →燃費の計算に使用
 - MEPCが前提にしている輸送量あたりの原単位とは異なる。
 - 船舶入れ替えによる燃費・効率改善 の傾向を見るため、代替指標として 使用



船舶の燃費値の整理

③ 船舶の燃費・効率シナリオ 1. 船舶の燃費値の整理

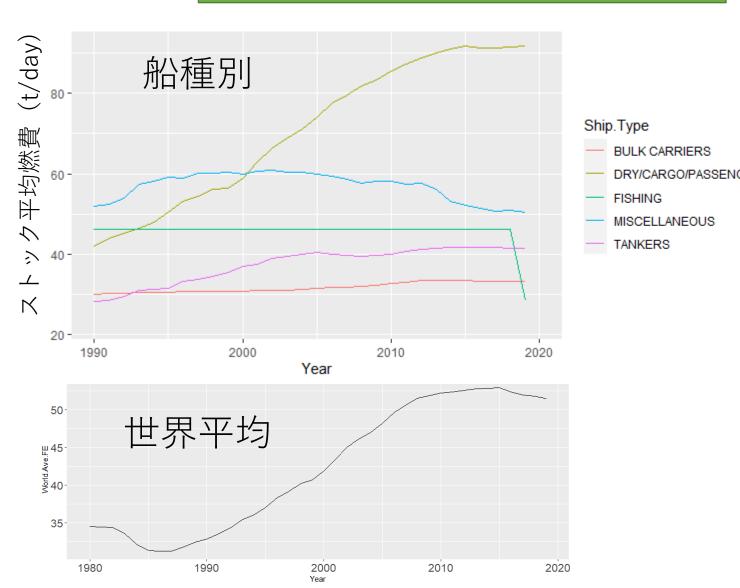
- 既存の船舶燃費はSea Webより燃費(t/day)を整理 →燃費の計算に使用
 - MEPCが前提にしている輸送量あたりの原単位とは異なる。
 - 船舶入れ替えによる燃費・効率改善の傾向を見るため、代替指標として 使用
- 1999~2008年の平均燃費も船種毎に計算→2020年以降の新造船燃費基準値に



船舶の燃費値の整理

③ 船舶の燃費・効率シナリオ 1. 船舶の燃費値の整理

- 既存の船舶燃費はSea Webより燃費(t/day)を整理 →燃費の計算に使用
 - MEPCが前提にしている輸送量あたりの原単位とは異なる。
 - 船舶入れ替えによる燃費・効率改善 の傾向を見るため、代替指標として 使用
- 1999~2008年の平均燃費も船種 毎に計算→2020年以降の新造船 燃費基準値に
- 船腹量で加重平均をしたストック 平均燃費を計算。



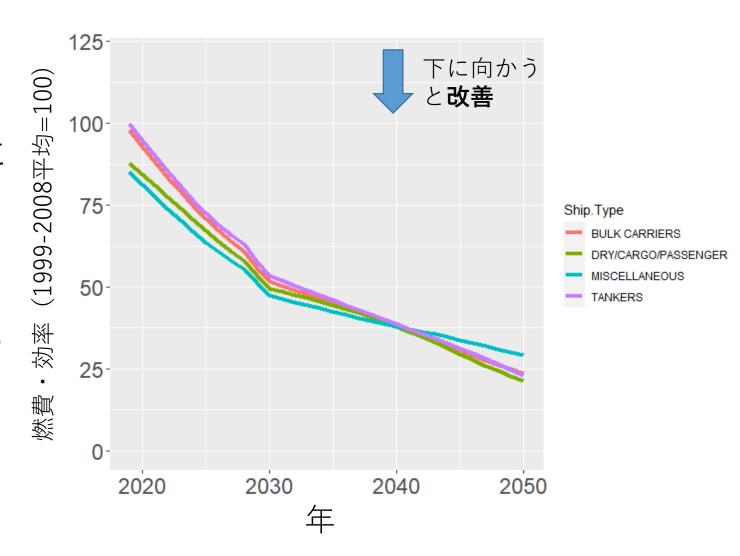
2020年以降の船舶燃費・効率

- ③ 船舶の燃費・効率シナリオ
 - 2. コンセプト船の投入時期
 - 3. 新造船等の燃費・効率
 - 4. 代替燃料船の新造船普及率

・2020年以降の船舶の燃費・効率に関わる2つのシナリオ

	効率改善率 (99-08年平均比)	コンセプト 船投入時期	普及率	その他
シナリオ 1 [基準シナリオ]	90%	2028	2029年から 100%	EEDIフェーズ2・3遵守 2030年で海運全体効率性 40%改善(2008年比)、そ の後5%改善
シナリオ 2 [遅延シナリオ]	90%	2033	2034 年から 100%	EEDIフェーズ2・3遵守 2030年で海運全体効率性 40%改善(2008年比)、そ の後5%改善

- シナリオ1:船種別結果
- ・2030年までは運航効率改善
- 2030年以降は新技術船導入により改善
- ・ただし、改善率は減少
- 2050年に燃費・効率70%強の 改善
 - 71~79%の改善

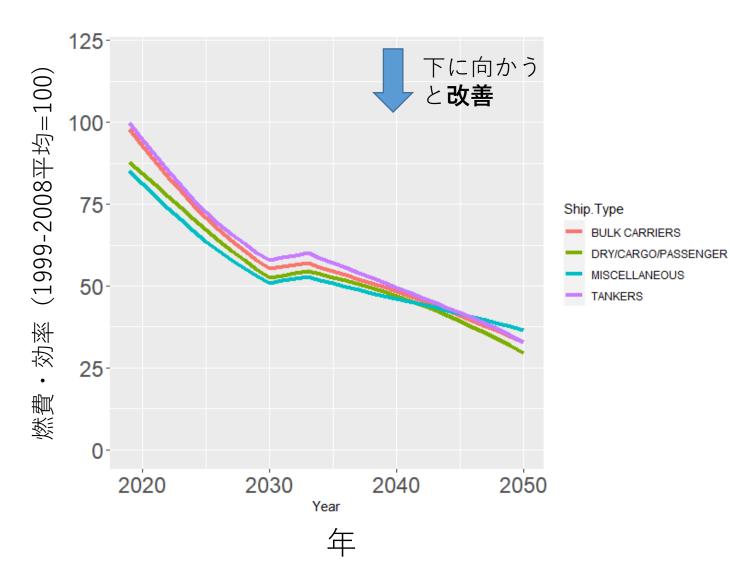


シミュレーション結果2

④2020~2050年までの船種別の燃費・ 効率

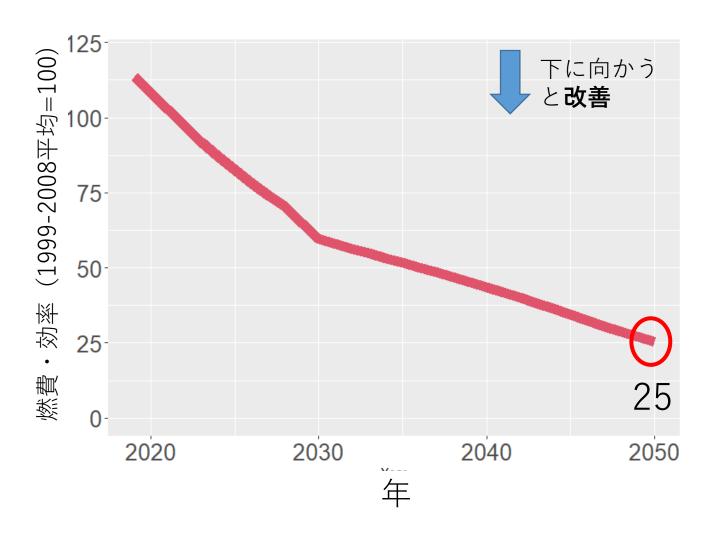
- シナリオ2:船種別結果
- ・2030年までは運航効率改善
- ・以降は、新技術船導入の遅延 により、燃費・効率改善はシ ナリオ1より進まず

- 2050年に概ね65%改善
 - 65~70%の改善
 - 80%改善には届かない

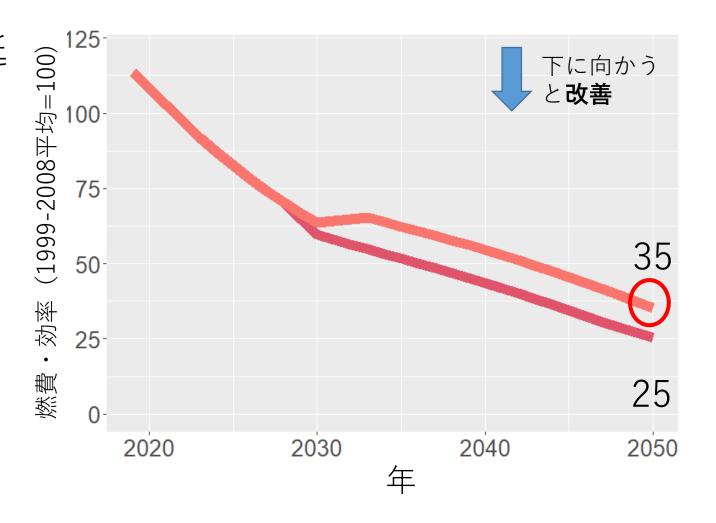


- <u>国際海運全体</u>における燃費・ 効率のシミュレーション結果
- <u>シナリオ 1</u>
- 船種毎と同様の傾向。
- 2050年にインデックスが25 →75%の燃費・効率改善

• 80%改善にはもうすぐ



- <u>シナリオ 2</u>:
- 代替燃料船投入時期が5年遅延 した場合、
- 2050年にインデックスが35 →65%の改善
 - 結果、80%改善には届かない



本シミュレーションの限界

- 本研究のシミュレーションはシンプルなシミュレーション
 - 船社の行動モデルは入っていない。
 - 利潤最大化行動、新造船も踏まえた船隊の調整、ESG投資等の状況を踏まえた先行 的な行動
- 燃費「t/day」「t-CO₂/トンマイル」という単位の差
 - 本シミュレーションの燃費単位には輸送(トンマイル)は入っていない。
- 代替燃料船などの新技術船の普及に関し考慮しなければならない点(インフラの整備等)を含めていない

本研究のインプリケーション

- 2つのインプリケーション
- ・シミュレーションの結果、2050年に燃費・効率改善は75%に留まる
 - →80%改善を実現するためには、より積極的施策導入について要 検討
 - 経済的手法等
- 船主が新技術船を選ぶ割合をコンセプト船投入後すぐに100% にしている
 - →100%に届かない場合、遅延シナリオと似た軌跡になる可能性。 よって、国際海運全体で80%以上の燃費・効率改善を目指す場合、船主が新技術や代替燃料を選好するように促す措置が必要

まとめ

- ・船舶の入れ替えの面から2050年における船舶の燃費・効率 80%以上改善シナリオを評価・検討した
- ・実証分析より、船舶の生存関数を推定し、寿命(生存時間中央値)を算定した。寿命は船種により異なるが25~36年
- ・船舶の生存関数を踏まえ、2050年までの燃費・効率の数値シミュレーションを実施。国際海運全体における燃費・効率は75%改善に届くものの、80%には届かない
- ・以上の結果より2つのインプリケーションを導出
 - より積極的な施策(経済的手法等)導入検討の必要性、コンセプト船 導入後に速やかな普及を促す措置の検討の必要性