



# 令和5年度海運CO<sub>2</sub>排出削減のための燃料転換 に関する調査研究

## 附属書3 (シミュレーションの詳細設定)



## 目次

1.	開発したシミュレータについて.....	4
1.1.	全世界単一モデルのシミュレーション.....	4
1.1.1.	概要.....	4
1.1.2.	造船・解撤モデル.....	5
1.1.3.	導入船舶の選択と燃料データ計算モデル.....	5
1.1.4.	燃料消費量計算モデル.....	8
1.1.5.	既存船の解撤を考慮したシミュレーション.....	8
1.2.	船種・サイズを考慮したシミュレーション.....	9
1.2.1.	船種・サイズ別のシミュレーション.....	9
1.2.2.	船団単位でのシミュレーション.....	9
1.3.	シミュレータの入出力ファイルについて.....	10
1.3.1.	入力データ.....	10
1.3.2.	出力データ.....	12
1.3.3.	出力データの可視化について (visualization.xlsx).....	14
2.	シミュレーションにおける設定.....	17
2.1.	輸送需要に関する設定.....	17
2.2.	輸送効率（エネルギー効率）に関する設定.....	18
2.3.	その他設定.....	19

## 1. 開発したシミュレータについて

### 1.1. 全世界単一モデルのシミュレーション

#### 1.1.1. 概要

全世界シミュレーションでは、全世界を航行する船舶を対象とし、1年単位で造船・解撤、導入される燃料船の選択と燃料使用データの作成、燃料消費量と排出量・排出強度・コストの計算を行う。シナリオとしては、輸送需要(ton-mile)、船齢-残存率曲線、GFS規制を規定する GFI、燃料ごとの船舶データ(船価、導入開始時期、燃料消費量)、燃料データ(価格、排出強度、供給量)を入力する。計算のフローと入出力、使用するシナリオを図1にまとめる。図の通り、造船・解撤モデル、導入船舶の選択と燃料データ計算モデル、燃料消費量計算モデルの3つから構成される。

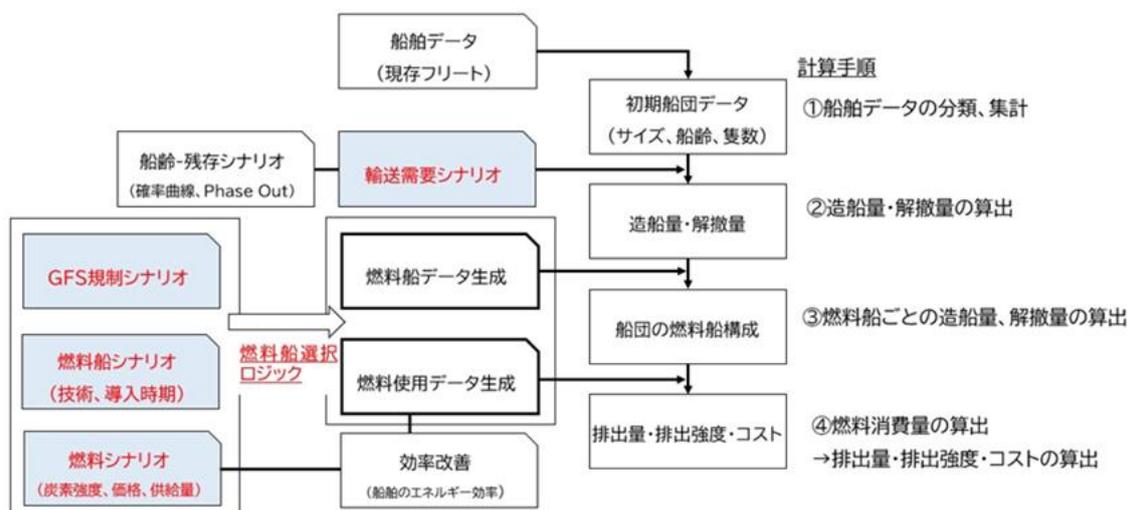


図1 開発したシミュレーションの概要

本シミュレーションでは、時系列での GFI( $\text{gCO}_2\text{eq/MJ}$ , LSFO =100)によって GFS を定義し、GFI を超えないことを前提に船舶と燃料を運用する。シミュレーションは、2021年から2050年まで1年のタイムステップで繰り返し実行され、WtW 排出量、WtW 排出強度 ( $\text{gCO}_2\text{eq/MJ}$ )、燃料・船価を含めたコストを出力する。加えて、造船・解撤量、各タイムステップで導入される船舶の燃料タイプ、運航に利用される燃料を出力するものとした。以下では、各ステップで使用するデータと計算手順について説明する。

GFS 規制は船舶間での排出量のやり取りを前提とした柔軟性措置の導入が検討されている。そのため本研究では、柔軟性措置を考慮しないシミュレーションと考慮したシミュレーションの2種類のシミュレーション機能を実装している。計算の大枠は共通のものを使用し、導入船舶の選択と燃料データ計算モデルにおいて異なる最適化計算を行うことでそれぞれの違いを表現している。詳細は1.1.3で説明する。また、本シミュレータは、GFSを規定する GFI (以下、GFI Pathway)を入力して、それが遵守されることを前提に計算を

進めるが、シナリオによっては遵守が不可能なケースが存在する。シミュレータのノーマルモードでは、遵守できないことによる罰金額を仮想的に設定し、排出量およびコストの両方が最も小さくなるように最適化することで、遵守できない場合でも計算を進めることとした。この場合、計算結果はGFSを遵守できているとは言えないが、規制とそれを遵守できない場合の乖離を見るために実装した。また、規制遵守ができない場合、既存HFO燃料船の解撤が進んでいない、もしくはHFO燃料船の対応に必要なバイオ燃料が不足していることが要因であるとして、規制が遵守可能となるまでHFO燃料船を解撤し、計算を進める機能についても実装を行った。以下の説明ではノーマモードで説明を行い、1.1.5で解撤を考慮した場合の計算方法について説明を行う。

### 1.1.2. 造船・解撤モデル

前提として、造船量は輸送需要、解撤量は船齢によって関連付けられるものとしてモデルの構築を行った。まず、船齢、燃料船タイプ、隻数で定義される船団構成データをもとに、各年の解撤量を計算する。燃料船タイプ $type$ 、船齢 $a$ ごとの解撤量(隻) $Scrap_{t,a}^{type}$ は式(1)で計算される。船団構成データ(隻数)は $Ship_{t,a}^{type}$ で定義され、 $Sr(a)$ は船齢 $a$ における残存率である。開発シミュレータでは、任意の船齢-残存率曲線が入力可能である。本研究で使用した曲線は3章にて説明する。

$$Scrap_{t,a}^{type} = Ship_{t,a}^{type} \cdot (1 - Sr(a+1)/Sr(a)) \quad (1)$$

新造船数は、輸送需要の増加に対応するための新造船数にスクラップ量を加えたもので新造船数 $Built_t$ は、式(2)で算出される。

$$Built_t = \sum_{type} \sum_a Scrap_{t,a}^{type} + \sum_{type} \sum_a Ship_{t,a}^{type} \cdot (1 - Transportwork_{t+1}/Transportwork_t) \quad (2)$$

$Transportwork_t$ は時間 $t$ における輸送需要(ton-mile)であり、このプロセスを通じて、燃料タイプ、船齢ごとの解撤量・造船量が出力される。

### 1.1.3. 導入船舶の選択と燃料データ計算モデル

ここでは、前のステップで計算された造船量に対して建造される船種を選択し、次の時間ステップで船隊が消費する燃料を計算するためのモデルについて説明する。このプロセスは、柔軟性メカニズムがある場合とない場合で異なる。まず、柔軟性メカニズムがない場合のモデルを説明し、次に柔軟性メカニズムがある場合の違いを説明する。

柔軟性メカニズムがない場合、船団内の各船が個別で規制を遵守し、排出削減を分担しない。導入船種の選択と燃料データの計算モデルは、導入可能な船種の集合から3種類の船種を

選び、これらの船種をあらかじめ定義したシェア率で組み合わせたリストを作成し、それぞれの組み合わせが導入される場合の船団内の燃料データ(使用割合)を最適化し、すべての組み合わせの中で最もコストが低い組み合わせを抽出する、というステップで構成される。最適化に関する数式を(3)～(8)に示す。

$$\min \sum_{type} \left( \sum_{fuel} x_{fuel}^{type} \cdot DFC \cdot FP_{fuel} + \frac{1}{20} SP_{type} \right) \cdot Ship_{t+1}^{type} \quad (3)$$

s.t.

$$\sum_{fuel} x_{fuel}^{type} \cdot CI_{fuel} \leq \frac{GFI}{100} \cdot CI_{LSFO} \quad (4)$$

$$\sum_{type} x_{fuel}^{type} \cdot DFC \cdot Ship_{t+1}^{type} \leq Limit_{fuel}, \forall fuel \in FUEL \quad (5)$$

$$\sum_{fuel \in MAIN, PILOT} x_{fuel}^{type} = 1, \forall type \in SHIP \quad (6)$$

$$\sum_{fuel \in MAIN} x_{fuel}^{type} \leq 1 - pfr, \forall type \in SHIP \quad (7)$$

$$\sum_{fuel \in PILOT} x_{fuel}^{type} \geq pfr, \forall type \in SHIP \quad (8)$$

$x_{fuel}^{type}$ は特定の燃料船タイプが使用する燃料の使用割合 (0 – 1),  $DFC$ は1年間の船舶の燃料消費量(MJ),  $Ship_t^{type}$ は時間 $t$ における燃料船タイプ $type$ の船舶数,  $FP_{fuel}$ は燃料価格(USD/MJ),  $SP_{type}$ は船舶価格(USD),  $CI_{fuel}$ は各燃料の炭素原単位(gCO<sub>2</sub>eq/MJ),  $GFI$ は入力されたGFI値,  $Limit_{fuel}$ は燃料消費量(MJ),  $FUEL$ ,  $SHIP$ は計算対象となる燃料および燃料船タイプの集合である。

式(3)が最小化すべき目的関数を表しており、燃料費と船価を含めた総コストとなっている。船価については20年で償却されるものとして計算している。式(4), (5)はそれぞれGFS規制を遵守するための制約、と燃料消費量が燃料供給量を超えないための制約である。式(6)～(8)は燃料使用に関する制約である。 $MAIN$ は船舶の主燃料として使用可能な燃料の集合、 $PILOT$ はパイロット燃料として使用可能な燃料の集合を表している。例えば、LNGのデュアルフューエル船(DF船)では、LNG、メタン(ブルー)、メタン(グリーン)、バイオメタンが主燃料として使用可能であり、LSFOおよびバイオHFOがパイロットとして使用可能である。式(6)～(8)はパイロット燃料の使用率が定義された使用率以上を常に満たすことを制約する数式である。本シミュレーションでは、2040年までは5%、2040-2049年では3%、2050年以降は0%のパイロット燃料が必要であるとして計算している。表1に本研究で想定した燃料船タイプと対応する主燃料、パイロット燃料の対応を示す。

表 1 本研究における燃料船タイプおよび主燃料・パイロット燃料

燃料船タイプ	主燃料	パイロット燃料
HFO	LSFO, バイオ HFO	N/A
DF(HFO,LNG)	LNG, e メタン(ブルー), e メタン(グリーン), バイオメタン	LSFO, バイオ HFO
DF(HFO, NH <sub>3</sub> )	e アンモニア(ブラウン), e アンモニア(ブルー), e アンモニア(グリーン)	LSFO, バイオ HFO
DF(HFO, MeOH)	e メタノール(ブラウン), e メタノール(ブルー), e メタノール(グリーン)	LSFO, バイオ HFO
H <sub>2</sub>	液化水素(ブラウン), 液化水素(ブルー), 液化水素(グリーン)	N/A

柔軟性措置がある場合は、式(4)を式(9)のように変更することで計算する。式(9)では、燃料タイプごとの制約ではなく、全てを積算した WtW 排出量が GFS 規制の規定する排出量を超えないよう最適化されている。

$$\sum_{type} \sum_{fuel} x_{fuel}^{type} \cdot CI_{fuel} \cdot Ship_{t+1}^{type} \leq \frac{GFS}{100} \cdot CI_{LSFO} \cdot \sum_{type} Ship_{t+1}^{type} \quad (9)$$

上記の最適化計算を建造する可能性がある燃料船タイプ 3 種類の組み合わせ全てで行い、それらの組み合わせの中でも最も低いコストが実現できる燃料船タイプの組み合わせが建造船として選択される。計算のためには、将来導入される船種の市場シェアがどの程度かを決定する必要がある。本研究では、3 種類の船型のシェアが 50%, 30%, 20% で一定であると仮定してシミュレーションするものとした。将来の市況を設定することは困難であるが、本研究では日本の複数の海運会社にインタビューを行い、上記の仮定を作成した。このステップでは、新造船の船種と船種ごとの燃料使用率を出力する。新造船の船種が決まれば、次年度の運航のための更新された船団構成が計算できる。

本モデルでは、入力された GFI Pathway と燃料供給シナリオによっては、最適解が存在しない場合がある。これは、入力された GFI Pathway がシナリオによって遵守できないことを意味する。この場合、ノーマルモードでは計算を実行するために式(4)で表現する GFI の制約を取り除き、排出量に対するペナルティを目的関数に追加する。これにより、コストと排出量の両方を最小化する最適化問題へと書き換える。これは、できる限り排出量を抑えながら、なおかつコストを抑えるようなケースを計算していると言える。ペナルティとしては、FuelEU Maritime で提案されているペナルティを参考に設定した。式(10), (11)にその詳細

を示す。  $GHGIE_{target}$  が目標となる GHG 排出強度，  $GHGIE_{actual}$  が実際の排出強度で，超過した割合を燃料消費量(MJ)にかけ，それに約 0.06 EUR/MJ をかけることで罰金額を計算している。実際のシミュレーションでは，計算を簡略化するため  $GHGIE_{target} \approx GHGIE_{actual}$  であることを前提に，式(10)の分母を  $GHGIE_{target}$  に置き換え計算することとした。

$$Penalty = \frac{|Compliance\ Balance|}{GHGIE_{actual} \times 41000} \times 2400 \quad (10)$$

$$Compliance\ Balance = (GHGIE_{target} - GHGIE_{actual}) \times (\sum M_i \cdot LCV_i + \sum E_k) \quad (11)$$

#### 1.1.4. 燃料消費量計算モデル

燃料消費量は，前のステップで得られた最新の船団構成と燃料データに基づいて計算される。燃料消費量を計算した後，WtW 排出量，WtW 排出強度，コストを計算した。計算式を(12)～(15)に示す。  $FOC_{fuel}$  は各燃料の燃料消費量(MJ)，  $FU_{type}^{fuel}$  は特定の船種で使用される燃料使用割合，  $Emission_{WtW}$  は WtW 排出量(トン)，  $Emission_{intensity}$  は LSFO を原単位として正規化された船団の GHG 排出強度，  $FuelCost$  は船団全体の燃料コストである。出力するコストとしては，CAPEX が燃料費に加算され，合計コストとなる。CAPEX については，船価のみを考慮し，償却期間を 20 年と仮定して，総船価の 1/20 を計上している。

$$FOC_{fuel} = \sum_{type} FU_{type}^{fuel} \cdot Ship_{t+1}^{type} \cdot DFC \quad (12)$$

$$Emission_{WtW} = \sum_{fuel} FOC_{fuel} \cdot CI_{fuel} \quad (13)$$

$$Emission_{intensity} = \sum_{fuel} (FOC_{fuel} \cdot CI_{fuel}) / (CI_{LSFO} \cdot \sum_{fuel} FOC_{fuel}) \quad (14)$$

$$FuelCost = \sum_{fuel} FOC_{fuel} \cdot FP_{price} \quad (15)$$

#### 1.1.5. 既存船の解撤を考慮したシミュレーション

1.1.3 に示した燃料船選択および燃料データ計算においては，燃料供給量シナリオおよび入力した GFI Pathway によっては，最適化ができず，規制が遵守できないケースが存在することを述べた。ここでは，規制が遵守できない場合に HFO 燃料船を解撤し，代替燃料船としてリプレースすることで規制に遵守するシミュレーションについて説明する。基本的に，柔軟性措置の有無によらず同様の手順で計算が可能であるが，柔軟性措置がない場合において，バイオ燃料特にバイオ HFO の供給量がないシナリオを入力した場合は，規制が達成できないタイミングで全ての HFO 燃料船がリプレースされてしまい，計算ができないことに留意されたい。

シミュレーションのステップは以下の通り。

1. 既存船団の HFO 燃料船数に応じて単位解撤隻数を定める
2. 既存船の船団で HFO 燃料船の数を減らし，新造船量に同量を追加する

3. 再度，最適化計算を行い，解があるかどうかを判定する
  4. 解があれば，リプレース量として確定し，解がなければ1に戻り繰り返し計算する
- つまり，規制の遵守が可能となるまで，HFO 燃料船の数を減少させ，新規造船量を増加させるフローを繰り返すことでリプレース量を求める。

## 1.2. 船種・サイズを考慮したシミュレーション

### 1.2.1. 船種・サイズ別のシミュレーション

1.1 で述べたシミュレータを拡張し，船種ごとにシミュレーションが実行可能なプログラムの開発を行なった。基本的な計算ロジックは同様であり，船種ごとに入力情報を変化させることで計算する。開発したシミュレータではさらに船種内でのサイズごとにデータを入力することを可能とした。具体的には，船価データ，残存率，排出量デフォルト値，初期船団分布についてはサイズ別で入力することが可能である。この時，柔軟性措置を考慮したシミュレーションを行う際，サイズ間で排出量をやり取りすることはシミュレーション内で表現されておらず，サイズ内で規制の遵守を完結するよう実装されている点に注意が必要である。図 2 にサイズ別シミュレーションのイメージを示す。図に示した通り，それぞれのサイズごとで完結した形で，1.1 で述べたロジックが適用され，計算する。

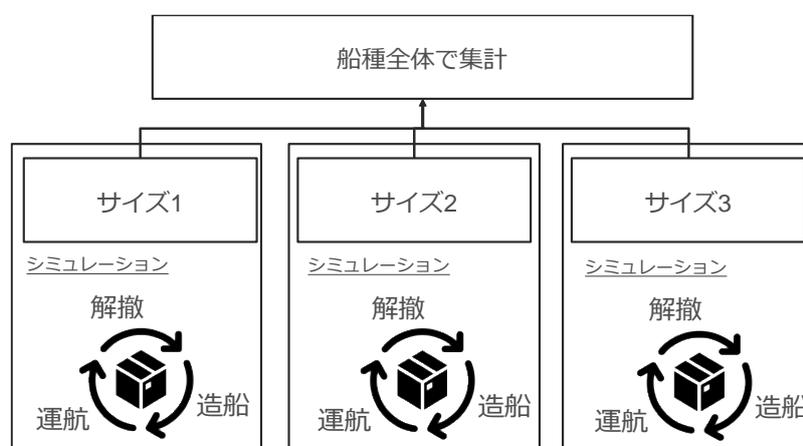


図 2 船種・サイズ別シミュレーションの概要

### 1.2.2. 船団単位でのシミュレーション

これまでのシミュレーションでは，全世界の船舶を対象としてきたが，ここでは特定の船社の船団を対象として実行できるよう拡張したシミュレーションについて説明する。この時，船団には複数の船種が含まれるものとし，特定の船種で重点的に脱炭素化を進める，例えば PCTC から積極的にゼロエミ燃料の導入を進めるようなシナリオを設定することを想定し，船種ごとに脱炭素化に向けた「重み」を設定できる機能を追加した。設定した重みに基づいて計算する手法について説明する。

重み付け係数に関しては、それぞれの船種について無次元量で直感的に入力させるものとした。例えば、BulkCarrier, Container, PCTC, Tanker それぞれに(1, 1, 2, 0.5)のように入力させる。数値が大きいほど、重点的に排出量削減に取り組むものとした。この入力については、合計が 1 になる等の制約はなく、ユーザーが自身の直感に応じて数値を割り当てて良い。シミュレータ内では、入力された数値に基づいて、船団全体で必要とされている WtW 排出量の削減量を各船種に割り当て、それぞれに架空の GFI が定義されているかのように取り扱うことで、船団全体では GFS を満たしつつ、船種ごとには異なる強度での排出量削減に取り組む様子を表現することとした。実際にそれぞれの船種に課される制約を式(16)に示す。 $Emission_{ship}^{LSFO}$  は LSFO を使用した場合の排出量(ton),  $Emission_{ship}$  は実際の排出量(ton),  $ER$  は船団全体で必要な削減量(ton),  $N_{ship}$  は船種  $ship$  の隻数,  $FOC_{ship}$  は燃料消費量(MJ),  $Weight_{ship}$  は入力された重みである。

$$Emission_{ship}^{LSFO} - Emission_{ship} > ER \frac{N_{ship} \cdot FOC_{ship} \cdot Weight_{ship}}{\sum_{ship} (N_{ship} \cdot FOC_{ship} \cdot Weight_{ship})} \quad (16)$$

式(16)で制約をかけることで、船団に所属する船種ごとに排出量の上限值が設定されることになり、結果的に排出削減に積極的な船種とそうでない船種を、船団全体での規制履行を条件としながら表現することが可能である。

### 1.3. シミュレータの入出力ファイルについて

本報告書の付録として、計算に使用した入力ファイル、出力ファイル、出力の可視化ファイルをデータフォルダとして提出する。それらの構成・内容について説明する。

#### 1.3.1. 入力データ

本プログラムは、規定のフォーマットに従う Excel ファイルを入力として計算を実行する。

Excel ファイル内には以下のシートが含まれる。

- GFS 規制値
- 輸送需要予測
- 燃料データ
- 船価データ
- 残存率
- 排出量デフォルト値
- 初期船団分布
- 船舶導入率
- 効率改善率

それぞれについて説明する。

## GFS 規制値

シミュレーション開始時点から将来にわたる GFS 規制値を入力する。LSFO の GHG 排出量 (gCO<sub>2</sub>eq/MJ) を 100 とした際に、超えてはならない GHG 排出強度を入力する。シートの A 列に時間(2021 年~2050 年)、B 列に規制値、C 列に対象となるスコープを入力する。対象となるスコープとして入力可能な文字列は 'WtW', 'TtW' の 2 種類であり、WtW = Well to Wake, TtW = Tank to Wake を意味する。WtW を指定した場合は、船上での排出だけでなく、燃料のライフサイクル全体での排出量で持って規制を定義することとなる。一般的に GFS 規制では WtW をスコープとすることで考えられているため、特別な理由がない限り WtW を指定する。

## 輸送需要予測

シミュレーション開始時点から将来にわたる輸送需要(billion ton mile)を入力とする。シートの A 列に時間(2021 年~2050 年)、B 列に輸送需要を入力する。入力にあたっては将来の輸送需要を予測する必要があるが、IMO 4<sup>th</sup> GHG Study において様々なシナリオでの輸送需要予測結果が掲載されており、それらの数値を入力データとして使用できる。

## 燃料データ

シミュレーション開始時点から将来にわたる燃料データとして、WtW 排出強度 (gCO<sub>2</sub>eq/MJ)、TtW 排出強度(gCO<sub>2</sub>eq/MJ)、WtT 排出強度(gCO<sub>2</sub>eq/MJ)、コスト(USD/GJ)、燃料供給量上限 (EJ)、燃料供給開始時期を入力する。燃料供給量上限とは、その年に供給可能な燃料ごとの上限値を表しており、シミュレーション内ではこれを超えて船舶は燃料を使用することができない、という最適化における制約条件として機能する。燃料供給開始時期を定義すると、それより以前の年にはその燃料は使用することができない、つまり上限値 0 として上書き設定をする。任意の燃料を追加することはできないため、変更する際は、ファイルフォーマットを変更することがないように十分に注意すること。

## 船価データ

シミュレーション内での各燃料船の船価を入力する。A 列にサイズ、B 列に種類、C 列に船価(USD)の形で構成される。本シミュレータ内で使用可能なサイズ、種類はあらかじめ決まっているため、C 列のみ変更が可能である。

## 残存率

シミュレーションでは船齢に応じて解撤量(隻数)を計算する。その際に使用する船齢-残存率の関係を入力する。残存率とは、その船齢になった時点で何割の船舶が解撤されるかを意味する。最大船齢を 50 歳とし、その中で 1 から 0 へと減少する数値を入力する。A 列に船齢、B 列に残存率を入力する。

### 排出量デフォルト値

船舶が1年間に消費する燃料消費量(MJ)を入力する。シミュレーション内では、このデフォルト値に効率改善率を乗ずることでその年の1隻当たりの燃料消費量を計算する。

### 初期船団分布

初期船団として想定する船団のデータを入力する。初期船団はすべてHFO燃料船であると想定し、船齢とそれに対応する隻数を入力する。1行目に船齢、2行目に対応する隻数を入力する。

### HFO 導入率

シミュレーション開始時点から将来にわたって、各燃料船がどの程度導入されるか(%)を入力する。各年のデータを行ごとに入力するが、すべてを合計して100を超えないよう留意が必要である。本来シミュレータでは、各燃料船がどの程度導入されるかを自動で計算するが、現状のデータを入力したい、特定の導入率で固定して計算したい、といった場合にこの設定を使用する。使用しない場合は全て0を入力してよい。

### 効率改善率

シミュレーション開始時点から将来にわたって、船舶の効率がどのように改善するかを入力する。将来的に船型や省エネ付加物、空気潤滑システム、風力利用によって船舶1隻あたりにエネルギー効率が改善することを想定し、その割合を0-1の範囲で入力する。1は効率改善なし、0は燃料使用の必要がないことを意味する。A列に時間(2021年~2050年)、B列に効率改善率を入力する。

## 1.3.2. 出力データ

### 出力データの形式

本プログラムの解析結果としての出力データはoutput.xlsxというファイル名でユーザーが指定したフォルダに出力される。ファイルは以下のシートで構成される。

- 燃料使用データ
- 燃料船導入データ
- 燃料消費量
- 排出量・コスト
- 建造量
- 解撤量
- 船団構成

それぞれのシートで出力されるデータについて説明する。

### 燃料使用データ

燃料使用データでは、HFO 燃料船, DF(HFO, LNG), DF(HFO, NH<sub>3</sub>), DF(HFO, MeOH), H<sub>2</sub> 燃料船の順番に各船舶がどの燃料をどの割合で使用したかを出力する。出力される割合は合計が 1 になるよう計算されており、時系列によって変化するため、そのデータが列方向に並ぶ。

### 燃料船導入データ

燃料船導入データでは、各年にどの燃料船がどの程度(%)で導入されたか、を出力する。行方向に HFO, DF(HFO, LNG), DF(HFO, NH<sub>3</sub>), DF(HFO, MeOH), H<sub>2</sub> 燃料船の導入割合(%)が並んでおり、列方向にその時系列変化が記録される。行方向での合計は 100 である。

### 燃料消費量

燃料消費量では、各年の燃料の消費量(MJ)を出力する。行方向に燃料の種類、縦方向に時系列が並ぶ。

### 排出量・コスト

排出量・コストでは、時系列での排出量及び排出強度、コスト、規制の遵守ができたかどうかを出力する。具体的には、TtW 排出量(ton), WtW 排出量(ton), WtW 排出強度(gCO<sub>2</sub>eq/MJ, LSFO=100), 燃料コスト(USD), CAPEX(USD), Solver の項目で構成される。Solver の列には、入力された GFS 規制がシミュレーション上遵守できたかどうか記録される。True の場合は船団全体で規制に適合できたことを意味し、False の場合は規制が遵守できなかったことを意味する。シミュレーションの前提として、入力された GFS 規制に適合することを誓約として最適化計算を行うが、入力された初期条件、燃料供給量、GFS 規制値の値によっては規制に適合ができず最適化が行えないケースが存在する。その場合でもシミュレーションは一定の過程のもと計算を続行するが、Solver の項目に False を記録することで区別する。

### 建造量

建造量では、各燃料船の建造量(隻)を出力する。HFO, DF(HFO, LNG), DF(HFO, NH<sub>3</sub>), DF(HFO, MeOH), H<sub>2</sub> 燃料船の順に各年の建造隻数が並ぶ。

### 解撤量

解撤量では、各燃料船の解撤量(隻)を出力する。HFO, DF(HFO, LNG), DF(HFO, NH<sub>3</sub>), DF(HFO, MeOH), H<sub>2</sub> 燃料船の順に各年の解撤隻数が並ぶ。

### 船団構成

船団構成では、各燃料船が何隻ずつで船団を構成しているかを出力する。HFO, DF(HFO, LNG), DF(HFO, NH<sub>3</sub>), DF(HFO, MeOH), H<sub>2</sub> 燃料船の順に各年の隻数が並ぶ。

### 1.3.3. 出力データの可視化について (visualization.xlsx)

#### 出力データの可視化ファイルの形式

本シミュレータは結果を Excel ファイルで出力する。出力されたデータを集計し、簡易な分析が可能となるよう、集計・可視化のテンプレートとなる別の Excel ファイル 集計\_可視化.xlsx を用意した。ファイルは以下の 4 シートで構成される。

- 燃料消費量 + 排出量
- 船団構成
- 建造隻数
- コスト

それぞれで集計・可視化される情報を説明する。

#### 燃料消費量+排出量

船団全体での燃料消費量の時系列での変化とその時の WtW 排出量(2008 年を 100 とした時の相対量)を出力する。本シートで作成される可視化を図 3 に示す。棒グラフによって燃料消費量を、折れ線グラフによって排出量を可視化している。棒グラフの色はそれぞれ燃料の種類を表している。凡例を合わせて付記する。

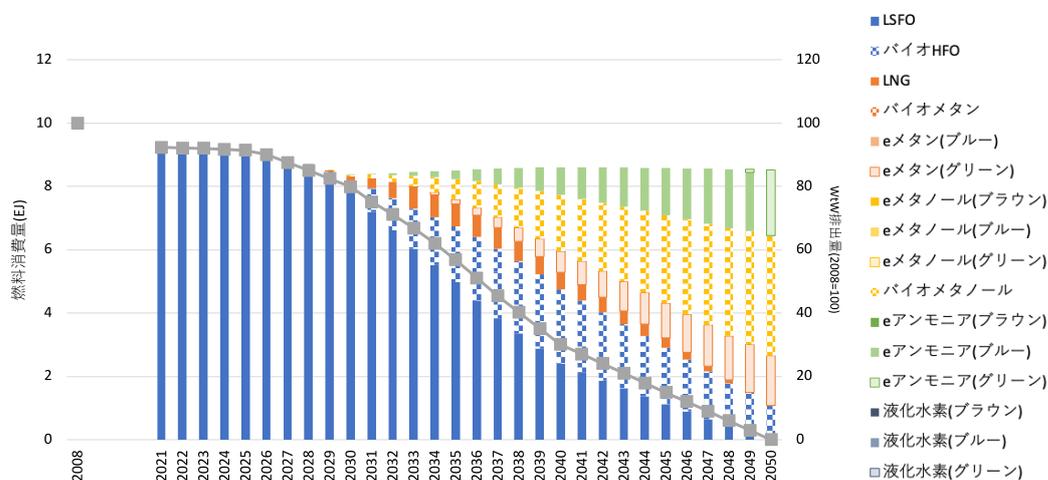


図 3 燃料消費量 + 排出量の可視化

#### 船団構成

船団の中でどの燃料船が何隻存在するか、という船団構成の時系列での変化を積み上げ棒グラフの形で可視化する。作成される図を図 4 に示す。色によって燃料船の種類を表しており、全体で船団の合計隻数を読み取ることができる。例からは HFO 燃料船が減少し、その他の代替燃料船で置き換えられていくこと、一方で 2050 年にも HFO 燃料船が一定残存

すること、などが読み取れる。

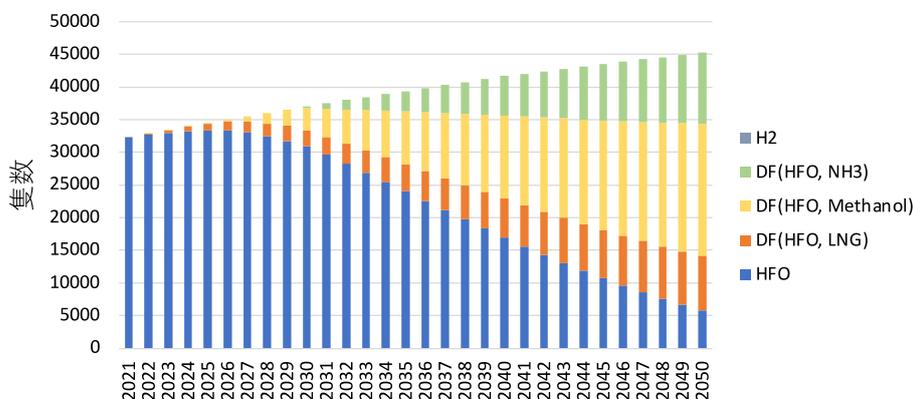


図 4 船団構成の推移

### 建造隻数

各年にどの燃料船が何隻ずつ建造されたかを積み上げ棒グラフの形で出力する。出力の様子を図 5 に示す。色によって燃料船の違いを表現している。図 4 からは読み取ることが難しかった、各年でどの燃料船が多く導入されているか、その変化の度合いを見ることが出来る。図の例では HFO 燃料船の導入量が減少し、メタノール、アンモニア、LNG 燃料船の順番で導入されていることが見て取れる。



図 5 燃料船ごとの建造隻数

### コスト

各年の船団全体での燃料コストと船価で代表される CAPEX の合計を可視化する。可視化の例を図 6 に示す。青が燃料コストであり、橙が CAPEX を表す。灰色で示された BAU では、輸送需要と輸送効率改善のみを考慮し、燃料船、使用燃料が LSFO で変わらず脱炭素化が進まなかった時のコストを示す。このラインと比較することで、脱炭素化によって運航に必要なコストがどの程度大きくなっているかが分析できる。図の例では、代替燃料の使用によって燃料コストが大幅に増加し、必要なコストがおおよそ 2~3 倍になっていることがわ

かる。

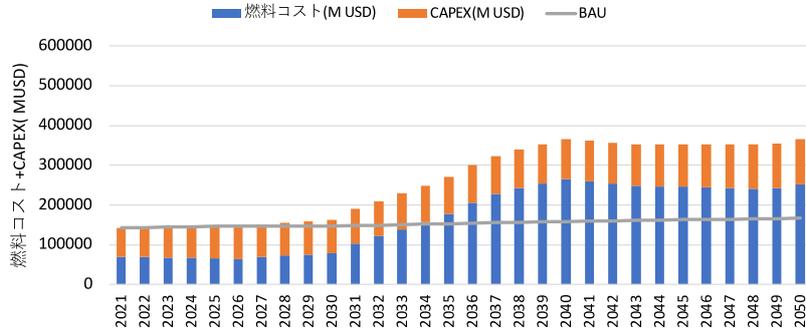


図 6 コストの可視化

## 2. シミュレーションにおける設定

本章では、開発シミュレータを使用したケーススタディを報告する。なおケーススタディで使用した燃料コスト、排出強度、供給量上限に関する設定については、附属書4を参照されたい。

### 2.1. 輸送需要に関する設定

2023 IMO GHG 削減戦略の達成に必要となる GFI Pathway を入力とし、これを達成するための条件(燃料船、代替燃料量、解撤量など)を求めた結果を示す。ただし、IMO GHG 削減戦略に幅があること、輸送需要や燃料についてのシナリオについては将来の不確実性が大きいことから、複数のシナリオを想定し、それぞれについてシミュレーションを行った。具体的には、GFI Pathway で2種類(厳、緩)、輸送需要量で2種類(高、低)、燃料シナリオで3種類(高位、中位、定位)、柔軟性措置の有無の合計24ケースで検討する。

輸送需要としては、IMO GHG Study より SSP2 RCP2.6L を高いシナリオ、OECD RCP2.6G を低いシナリオとして抽出した。それぞれの輸送需要を図7に示す。

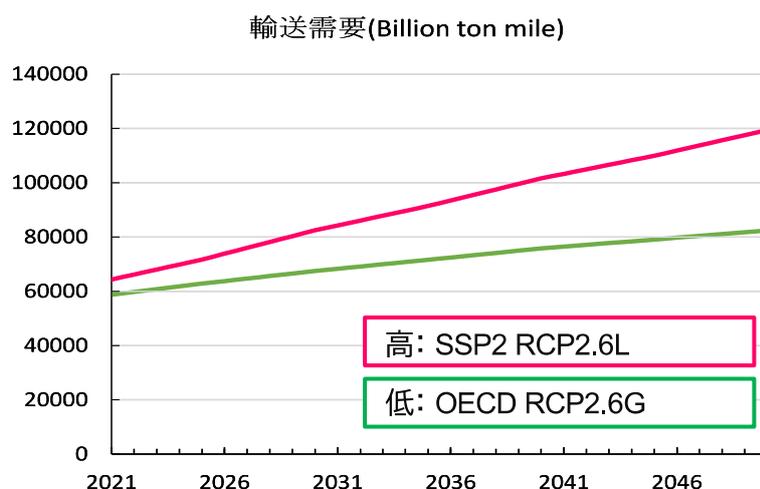


図7 ケーススタディにおける輸送需要シナリオ

これに対応する GFI Pathway を図8に示す。改訂された IMO の GHG 削減戦略では、2030年20-30%削減、2040年70-80%削減という幅のある目標が設定されている。それぞれ厳しいライン、緩いラインと輸送需要の高低の4通りの組み合わせによって定義される。図には FuelEU Maritime の規制値を合わせて示した。1章でも述べた通り、導入候補となる代替燃料船としては、HFO、DF(HFO, LNG)、DF(HFO, NH<sub>3</sub>)、DF(HFO, MeOH)、H<sub>2</sub>燃料船の5種類を想定した。DF(HFO, NH<sub>3</sub>)およびH<sub>2</sub>燃料船については現状の技術成熟度を考慮し、導入開始時期を2028年として設定した。

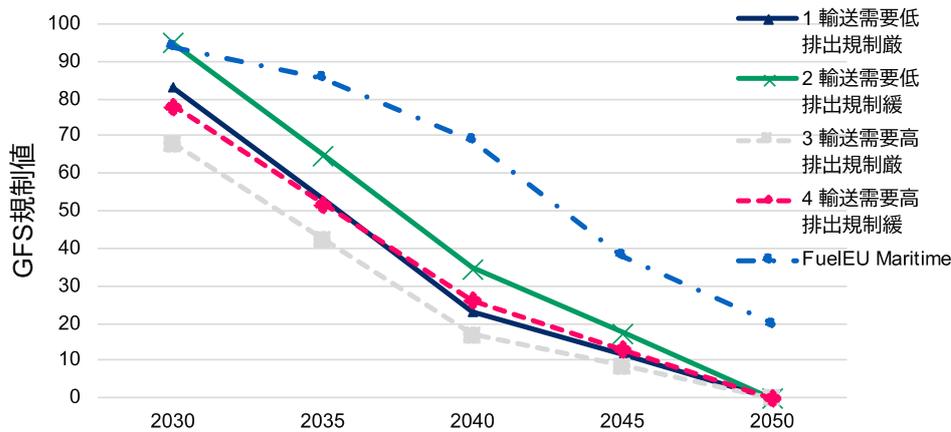


図 8 ケーススタディにおける GFI Pathway

## 2.2. 輸送効率（エネルギー効率）に関する設定

輸送効率の改善としては、図 9 に示す通り 2050 年に向けて燃費性能が向上し、燃料消費量が減少することとした。縦軸に効率改善率を示しており、燃料消費量のデフォルト値に乗ずることによってその年の燃料消費量を計算する。今後、EEDI や EEXI などのエネルギー効率規制が適用され、その規制に合わせて推進技術の改良が行われるため、燃料消費量は改善されていく。このケーススタディでは、2008 年の燃費を基準として、2018 年、2030 年、2050 年には、それぞれ 22%、40%、50% 効率が向上する。この仮定は、4<sup>th</sup> IMO GHG Study と 2018 年に採択された IMO GHG 削減戦略に基づく。4<sup>th</sup> GHG Study では、2018 年の年間効率比率が 2008 年と比較して 22% 改善すると報告しており、2018 年に採択された削減戦略は、2030 年までにエネルギー効率を 40% 改善することを目標としている。

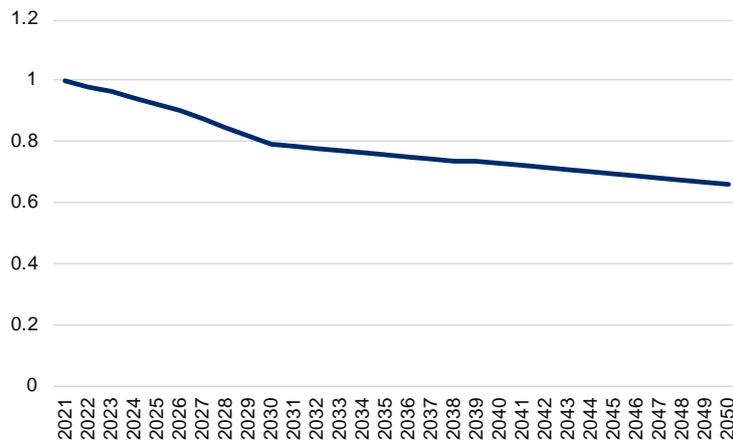


図 9 ケーススタディにおける輸送効率の改善

### 2.3. その他設定

ケーススタディでは、燃料船の導入動向を足元の状況と一致させるため、Clarkson Shipping Intelligence のデータを元に 2026 年までは各燃料船導入比率を入力した。Clarkson Shipping Intelligence の Orderbook および Delivery データを集計した結果とそれを元に作成した入力データを図 10、図 11 に示す。

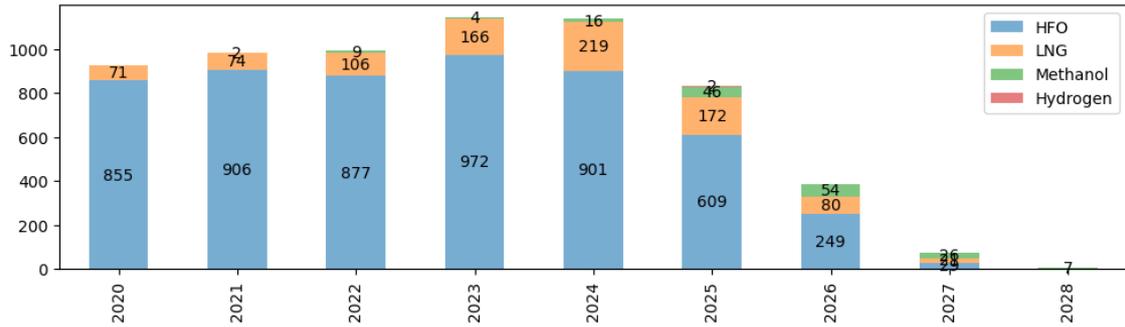


図 10 Clarkson Shipping Intelligence により Orderbook, Delivery データの集計



図 11 ケーススタディにおける代替燃料船の導入率(2026 年まで)

船舶に関する入力データとして、図 12 に初期船団の船齢分布、図 13 に各燃料船の船価、図 14 に船齢-残存率曲線を示す。

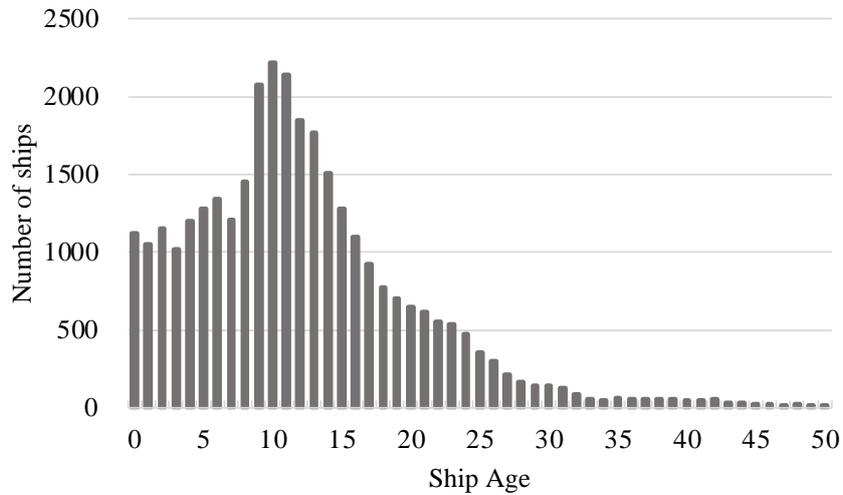


図 12 ケーススタディにおける初期船団の船齢分布

このケーススタディでは、世界中で運航されている総トン数 5000GT 以上の 32275 隻を初期船団として設定した。IHS Sea-web に基づき設定した。燃料消費量と排出量を計算するためには、1 隻あたりの平均燃料消費量を定義する必要がある。本ケーススタディでは  $2.85 \times 10^8$ (MJ) と定義した。

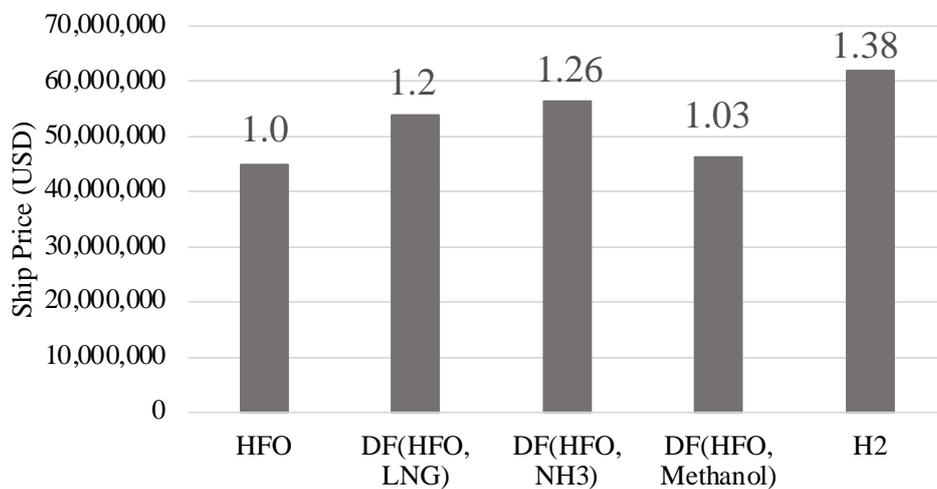


図 13 ケーススタディにおける各燃料船の船価

船価については、昨年度の調査結果をもとに、HFO 燃料船の平均船価とそこから各船舶の増加率を乗じることで算出した。

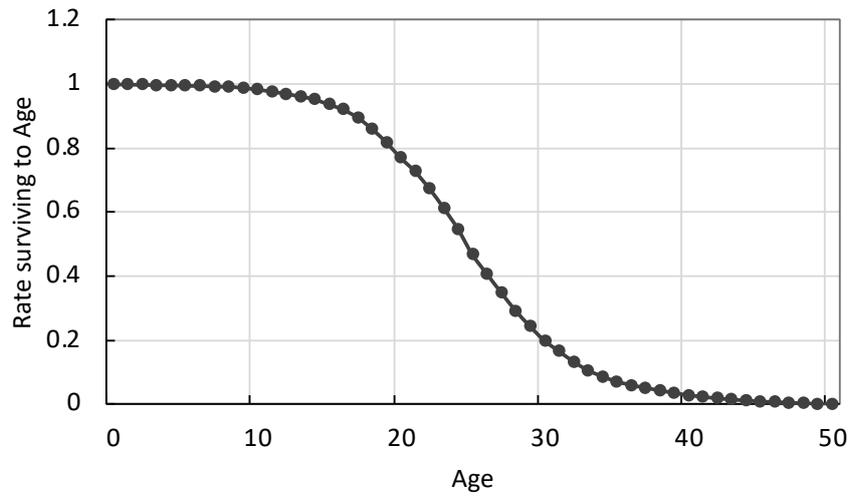


図 14 ケーススタディにおける船齢-残存率分布

船齢については、IHS Sea-web の解撤船齢のデータを集計し、最大船齢を 50 歳とした上で船齢と残存率の関係として整理し作成した。