

PS-21 国際海運における GHG 削減対策の影響評価のためのモデル開発

知識・データシステム系 * 和田 祐次郎 和中 真之介

1. はじめに

国際海事機関（IMO）の温室効果ガス（GHG）削減に向けた戦略を受け、国際海運は全体として GHG 排出量を 0 にすることが要求されている。我が国では、2050 年に国際海運のゼロエミッションを達成するため、様々な技術的検討を推進している。GHG 排出量の予測や分析に関しては既往研究¹⁾において取り組まれているが、各種の GHG 削減対策が海事産業全体にどのような影響を与えるのか十分に把握できていない。

そこで本研究では、各種の GHG 削減対策の複合的な影響を評価可能な System Dynamics（SD）モデルを開発する。そして、開発モデルを用いてシミュレーションを実施することで、各種の GHG 削減対策が海事産業に与える影響を評価する。

2. 基本方針

2.1 SD モデルの基本構成

SD は様々な要素が相互に影響し合う複雑システムのモデル化やその評価に有効な手法である。本研究ではこの SD の手法を用いて海運・造船市場と GHG 排出量の関係をモデル化し、GHG 排出量削減対策の複合的な影響を評価するモデルを開発する。

GHG 削減対策影響評価モデルの構成を図-1 に示す。本研究では、先行研究²⁾で開発したモデルを基に、GHG 排出量および各種コスト（詳細は 2.2 を参照のこと）を算出する。

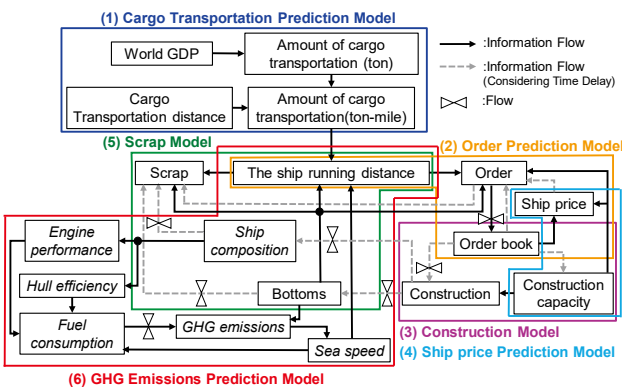


図-1 GHG 削減対策影響評価モデル

- (1) 貨物輸送量予測モデル：世界 GDP と貨物輸送距離を入力し、世界の海上荷動き量を予測する。
- (2) 発注量予測モデル：海上荷動き量、船腹量、船価、手持工事量と建造能力から新造船の発注量を決定する。
- (3) 建造モデル：発注された船舶は手持工事量に追加され、ある建造期間を経て海運市場へ投入される。竣工量は建造能力と手持工事量から決定する。
- (4) 船価予測モデル：手持工事量と建造能力を用いて船価を予測する。

- (5) 廃船モデル：海運・造船市況を示す船舶航海距離と発注量を用いて廃船量を決定する。
- (6) GHG 排出量予測モデル：GHG 排出量は燃料消費量、船腹量から算出する。また、減速による発注量の増加や船齢によるエンジン性能の変化も考慮する。

2.2 GHG 排出量および各種コストの算出

海運における経済的影響を評価するため、(1)-(3)式を用いて GHG 排出量、貨物の輸送コストを算出する。(1)-(2)式は既往研究の研究成果²⁾を基にしており、図-1 のモデルを基に算出される。(3)式については既往研究の研究成果³⁾⁻⁴⁾に基に各種のコストを算出している。

$$Pme_t^i = Pref^i \times \left(\frac{Vt_t^i}{Vref^i}\right)^3 \times \alpha_t^i \quad (1)$$

$$GHG_t = \sum_i \{ (Pme_t^i \times sfc_t^i \times time_t^i + \beta^i) \times Cf \times N_t^i \} \times \gamma \quad (2)$$

$$TrC_t = FC_t + DC_t + BC_t + PC_t \quad (3)$$

ここに、 Pme ：メインエンジン出力(kw)、 $Pref$ ：平均メインエンジン設計出力(kw)、 $Vref$ ：平均設計速度(knot)、 Vt ：平均航海速度(knot)、 α ：抵抗係数、 sfc ：kwh当たりの燃料消費量(gfuel/kwh)、 Cf ：炭素含有量(g)、 $time$ ：平均航海時間(hour)、 β ：補機・ボイラー平均燃料消費量(g)、 N ：船腹量(隻)、 GHG ：GHG排出量(g)、 γ ：船腹量補正係数、 TrC ：総コスト、 FC ：燃料費、 DC ：減価償却費、 BC ：業務費、 PC ：港湾費、 i ：船舶サイズ(1:Capesize, 2:Panamax, 3:Handymax, 4:Handysize)、 t ：シミュレーション時間(month)を表す。

3. モデルの妥当性の検証

モデルの妥当性を確認するため、2013 年から 2018 年までのシミュレーションを実施した。2013 年の市場の状況を初期値とし、世界 GDP、貨物輸送距離、航海速度の実績値を入力した。表-1 に GHG 排出量シミュレーションの結果を示す。先行研究¹⁾の結果を基に比較した結果、GHG 排出量を誤差-2.5%~+1.6%の範囲で推計できていることを確認した。また図-2 に船齢構成の比較結果を示す。2018 年の船齢構成を概ね再現できている。以上より、モデルの妥当性を確認した。

表-1 妥当性の確認

Year	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Previous Study ¹⁾ ($\times 10^6$ ton)	177.7	177.3	184.2	192.0	198.4	193.4
This Study ($\times 10^6$ ton)	177.2	180.1	185.5	190.4	193.5	195.4
Error(%)	-0.3	1.6	0.7	-0.8	-2.5	1.0

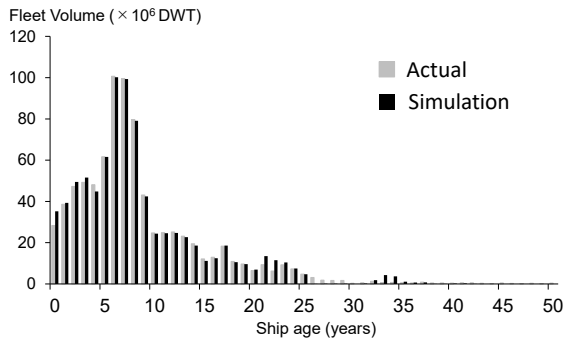


図-2 モデルの妥当性の検証（船齢構成）

4. GHG 削減対策シナリオの検討

ここでは、開発モデルを用いて 2013-2050 年までのシミュレーションを実施し、想定される幅広いシナリオから IMO GHG 削減戦略の目標（2008 年比で 2050 年に 0）を達成可能なシナリオを評価する。

4.1 シミュレーション条件

- (1) 世界 GDP・貨物輸送距離：2019 年までは実績値，2020 年以降 GDP 成長率 3.5%，貨物輸送距離は一定と仮定した。
- (2) 航海速度：2019 年までは実績値，2020 年以降は一定（Current），又は 2050 年まで線形的に 30%減速，40%減速と仮定する。
- (3) 代替燃料：重油燃料船，LNG 燃料船，ゼロエミッション船（NH₃ 船）の建造比率を設定する。2030 年まで重油燃料船と LNG 燃料船の建造比率を 5:5 とする。また 2030 年以降，重油燃料船は建造しないとし，2030 年～2040 年で LNG 燃料船と NH₃ 船の建造比率を 4:6，2040 年～2050 年で LNG 燃料船と NH₃ 船の建造比率を 0:10 と仮定する。
- (4) 技術開発：2013 年竣工船に対し 2015 年～2019 年の建造船は 2.5%，2020 年～2024 年の建造船は 12.5%，2025 年以降の建造船は 22.5%の燃費改善を仮定する。
- (5) 燃料油課金：2013 年の燃料価格に対して 2050 年時点で HFO（\$/GJ）が 4.5 倍，LNG（\$/GJ）が 6 倍になるように 2030 年以降段階的に課金する。
- (6) 金利優遇：HFO 船，LNG 船，NH₃ 船の年利をそれぞれ 6%，2%，0%に設定する。
- (7) CII rating：燃費格付け結果を基に，燃費効率が悪い船舶の強制解撤を実施する。基準値の強化を毎年 2%，3%と設定する。

4.2 シミュレーション結果と考察

表-2 に各 GHG 削減対策の組み合わせの結果，図-3 に GHG 排出量予測結果を示す。以下に結果を整理する。

- ・ Case 1- Case 3 は IMO GHG 削減戦略の目標を達成可能なシナリオである。船舶の減速影響により GHG 排出量の推移が異なる。Case 1 では，2023 年～2033 年で GHG 排出量が増加する。これは，減速が Case 2，Case 3 に比べ不十分であるため，CII rating (3%) による強制解撤により船腹量の逼迫が発生し，重油燃料船と LNG 燃料船の発注，建造が増えた影響である。
- ・ Case 4 の結果より，CII rating 強化率が 2%の場合，40%減速としても 2050 年の目標達成は困難となる。

この結果より，アンモニア燃料等，既存船で利用が困難な燃料を用いてゼロエミッションを達成する場合，2030 年以降に 60%以上のゼロエミッション船を建造する必要があることが分かる。加えて，強制力のある既存船の解撤対策等が必要となり，この対策の導入のタイミングにより海運・造船市場は大きく変動すると考えられる。以上より，アンモニア等の新燃料の利用技術に加え，既存船でも利用可能な燃料（例えば，バイオ燃料やカーボンリサイクルメタン等）の導入により，海運・造船市場全体の安定を保ちつつ，2050 年にゼロエミッションの達成が可能と考えられる。

表-2 各種 GHG 削減対策の組み合わせ

各ケース	減速 運航	代替 燃料	技術 開発	燃料油 課金	金利 優遇	CII rating	総コスト ($\times 10^{12}$ USD)
Case 1	Current						7.92
Case 2	30%	High		on		3%	5.37
Case 3	40%						4.95
Case 4	40%	High		on		2%	4.76

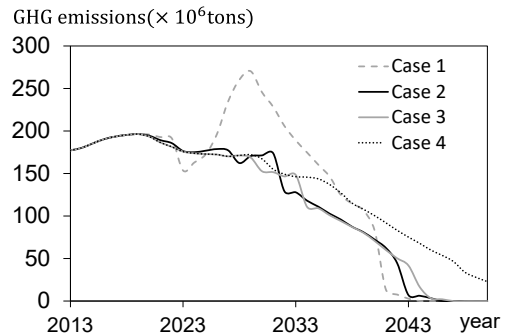


図-3 CO₂排出量のシミュレーション結果

5. まとめ

海運・造船市場における GHG 排出量削減対策の影響を評価する SD モデルを開発し，その妥当性を示した。2050 年に GHG 排出量 0 を達成するための GHG 削減対策の組み合わせを評価し，その影響を分析した。今後はモデルの精緻化を行い，様々なケースでのシミュレーションを実施する予定である。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP21K04501，JP20H00286 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) IMO: Fourth IMO GHG Study 2020, IMO MEPC 75/7/15, 2020.
- 2) Wada, Y. et.al, Evaluation of GHG Emission Measures Based on Shipping and Shipbuilding Market Forecasting, Sustainability 13, 2760, 2021
- 3) 赤倉康寛，瀬間基広：我が国へのドライバルク貨物輸送の効率化に向けた一考察，国総研資料第 560 号，No. 560
- 4) 鈴木ひろか，黒川久幸：鉄鉱石を対象とした国際海上輸送における物流コスト及び CO₂ 排出量の削減に関する研究，日本航海学会論文集 132, 151-159, 2015