

船舶から排出される大気汚染物質の 現況及び将来排出量データの作成

城田 英之*、横井 威*、亀山 道弘*、春海 一佳*

Preparation of Ship Emission Data on Concentrations of Air Pollutants in the Present Status and Future

by

Hideyuki SHIROTA*, Takeshi YOKOI*, Michihiro KAMEYAMA*
and Kazuyoshi HARUMI*

Abstract

At the National Maritime Research Institute (NMRI), computational simulations have been conducted by using “Community Multi-scale Air Quality Model (CMAQ)” developed by the United States Environmental Protection Agency, in order to assess the influences of air pollutants emitted from ships including sulfur oxide (SO_x), nitrogen dioxide (NO_x), particulate matters (PM), and ozone (O₃) on air environment. It is essential that both elaborate emission data on concentrations of air pollutants and precise climate data should be prepared for obtaining trustworthy simulation results.

Accordingly, the authors prepared ship emission data on concentrations of air pollutants in the year 2005 with higher accuracy compared with former ones by using Lloyd’s ship movement data and several government statistics, taking into consideration difference of ship classes, ship routes, changes of ship speeds, and so forth. Furthermore, the authors made rough estimates of future ship emissions of SO_x and NO_x for eight future scenarios where several environmental regulations are assumed to be applied, and assessed effects of these environmental regulations.

Part of these present and future emission data were utilized in the technological examination committee on Emission Control Area (ECA), which have been held by Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) during the Japan fiscal year from 2010 to 2012.

* 環境・動力系

原稿受付 平成25年12月6日

審査日 平成26年1月24日

目 次

1. はじめに	2	3.2.2 排出係数の設定	22
2. 船舶による現況排出量データの作成	3	3.3 将来シナリオの設定	22
2.1 対象排出源及び大気汚染物質の種類	3	3.4 各将来シナリオに対する将来係数の設定	23
2.2 対象年及び対象エリア	3	3.4.1 将来係数の計算事例	23
2.3 対象船舶	3	3.4.1.1 NO _x 排出に関する将来係数	23
2.4 現況排出量データの作成方法	4	3.4.1.2 PM 排出に関する将来係数	25
2.4.1 大気汚染物質排出量算定の考え方	4	3.4.1.3 SO ₂ 排出に関する将来係数	26
2.4.2 外航船の現況排出量データの作成方法	4	3.4.1.4 その他の大気汚染物質の排出に関する将来係数	28
2.4.3 内航船の現況排出量データの作成方法	5	3.4.2 各将来シナリオに対する将来係数	28
2.4.4 漁船の現況排出量データの作成方法	6	3.5 将来排出量データに関する考察	29
2.5 大気汚染物質排出量の算定における設定	7	4. おわりに	33
2.5.1 代表船への分類（外航船／内航船）	7	謝辞	33
2.5.2 漁業形態及び活動範囲の設定（漁船）	8	参考文献	33
2.5.3 機関種類及び機関出力	8		
2.5.3.1 主機の機関種類及び常用出力	8		
2.5.3.2 補機の機関種類及び常用出力	9		
2.5.4 航行モード（外航船）	10		
2.5.5 機関の燃料消費率	10		
2.5.6 燃料種類及び性状	11		
2.5.7 排出係数	11		
2.5.7.1 NO _x 排出係数の設定	12		
2.5.7.2 PM 排出係数の設定	13		
2.5.7.3 SO ₂ 排出係数の設定	14		
2.5.7.4 その他の物質の排出係数の設定	14		
2.5.8 排出源高さ（外航船／内航船）	14		
2.5.9 燃料消費量の設定（内航船／漁船）	15		
2.5.9.1 統計データの選定	15		
2.5.9.2 燃料使用割合の補正（内航船／漁船）	16		
2.6 作成した現況排出量データの概要	16		
2.6.1 現況排出量データのマップ例	16		
2.6.2 我が国沿岸距離別の排出量データ	17		
2.7 現況排出量データの比較検証及び考察	17		
2.7.1 OPRF による船舶現況排出量データとの比較	17		
2.7.2 2nd IMO GHG Study によるデータとの比較	18		
3. 船舶による将来排出量データの作成	20		
3.1 船舶からの将来排出量データ作成の基本方針	20		
3.2 将来データ作成における活動量及び排出係数の設定方法	21		
3.2.1 活動量の設定	21		
3.2.1.1 外航船の将来船齢構成	21		
3.2.1.2 内航船の将来船齢構成	21		
3.2.1.3 漁船の将来船齢構成	21		

1. はじめに

船舶からの排ガスによる大気汚染防止については、国際海事機関（IMO）により採択された、船舶による汚染防止のための国際条約（MARPOL 条約）の 1997 年改正議定書（2005 年 5 月 19 日発効）の附属書 VI に基づき、現在、国際的な規制が実施されている¹⁾。規制対象となる大気汚染物質のうち、窒素酸化物（NO_x）、硫黄酸化物（SO_x）、粒子状物質（PM）については、各国の判断で自国周辺海域を放出規制海域（ECA; Emission Control Area）に指定することにより、その海域内を航行する船舶に対してより厳しい規制（3 次規制）を課すことが認められている。現在、これらの物質について段階的に規制が強化されているところである。

NO_x については、出力 130kW を超えるディーゼル機関を搭載する船舶を対象に、図-1.1 に示すように規制上限値が機関回転数の関数として与えられている。2011 年に開始された 2 次規制（Tier2）では 1 次規制（Tier1）比約 20%削減、2016 年開始予定の 3 次規制（Tier3）では同上比約 80%削減となる（ただし監督官庁の判断により、設計・建造上適合させることが困難な一部の船舶を除外することが認められている）。

SO_x 及び PM については、図-1.2 に示すように使用燃料油中の硫黄（S）分濃度の上限値での規制が基本である。しかしながら、水スクラバなどの排ガス洗浄装置を利用することで排出量を低減させることも認められている。燃料油中の S 分濃度の上限値は、一般海域では 2012 年から 3.5%、ECA では 2010 年 7 月から 1.0%となっている。将来的には、2015 年に ECA 内の S 分濃度上限値が 0.1%となるほか、2020 年（または 2025 年）

には一般海域でも S 分濃度上限値が 0.5%まで引き下げられる予定である(グローバル S 分規制)。なお、グローバル S 分規制については、2018 年までに実施可能性に関するレビューが行われ、その結果を踏まえて実施時期が決定される見込みである。

また、二酸化炭素 (CO₂) については温室効果ガス (GHG; Greenhouse Gas) として問題視されており、2011年7月に IMO/MEPC62において、一定サイズ以上の外航船に対してその燃費効率 (EEDI: CO₂ g/ton-mile で示す) が一定基準値を満たすことが義務づけられることとなった²⁾。

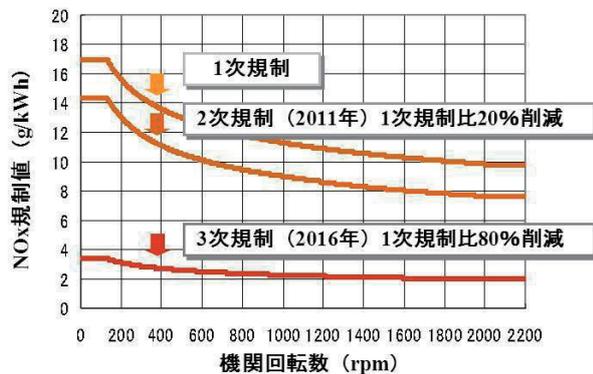


図-1.1 IMOによる船用ディーゼル機関からのNOx排出規制値

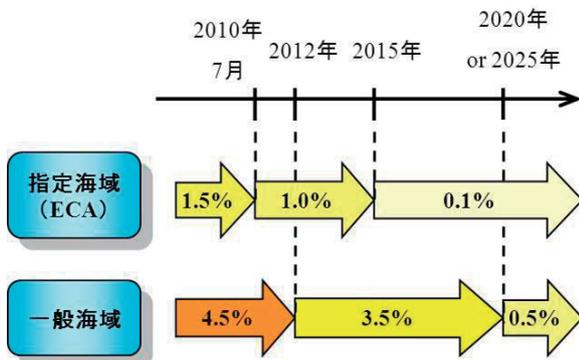


図-1.2 IMOによる使用燃料油中のS分濃度の上限値

以上のような状況を背景として、当所では、船舶から排出される SO_x、NO_x、微小粒子状物質 (PM_{2.5})、O₃ 等の大気汚染物質の大気環境濃度への寄与度を評価することを目的に、広域大気質予測モデル CMAQ (Community Multi-scale Air Quality Model) を用いた拡散・大気反応シミュレーション計算を実施している³⁾。

CMAQ は、アメリカ合衆国環境保護庁 (U.S. EPA) により開発された第3世代大気質モデルであり、特に PM_{2.5} 及び O₃ 等の二次生成粒子を含

む大気汚染物質が大気環境に与える影響を高精度で評価することが可能な点に大きな特徴がある。二次生成粒子とは、大気中に放出された燃焼由来のガス状物質 (揮発性炭化水素 (VOC)、塩化水素 (HCl)、アンモニア (NH₃) 等) が、光化学反応や中和反応を経て粒子化した物質をいう。CMAQ を用いて信頼性の高い計算結果を得るためには、高精度の大気汚染物質排出量データ及び気象データを入手することが重要である。

日本周辺海域を対象に作成された排出量データとしては国立環境研究所によるアジア地域排出インベントリ (REAS)⁴⁾ 等があるが、船舶に関しては詳細かつ最新の排出量データであるとは言い難く、船舶由来の大気汚染物質の大気環境濃度への寄与度を評価する目的に使用するには問題が多い。そこで当所では、船舶動静データ及び統計資料等を利用することにより、船種の区別、船舶航路、航行速度の変化等を考慮した、従来データよりも精度の高い船舶排出量データを作成した。

本報告では、“現況”及び“将来”における船舶由来の大気汚染物質排出量データの作成方法、及びデータの概要について述べる。

2. 船舶による現況排出量データの作成

2.1 対象排出源及び大気汚染物質の種類

データ作成の対象とする排出源、及び大気汚染物質の種類は以下の通りである。

- (a) 停泊時/航行時における船舶の主機/補機機関の燃焼に由来する大気汚染物質 (SO_x、NO_x、PM、NMVOC (非メタン揮発性炭化水素)、CO、CH₄、NMVOC、N₂O)
- (b) 荷揚げ・荷下ろし中 (停泊時) における貨物から大気への蒸発に起因する大気汚染物質 (NMVOC)

2.2 対象年及び対象エリア

現況排出量データの対象年は 2005 年、データを作成する対象エリアは沖縄を含む我が国周辺 200 海里以内を含む海域とした。

2.3 対象船舶

データ作成の対象とする船舶については、以下の通りとした。

(a) 外航船

国際航海に従事する一般商船。船種としては、タンカー、LNG/LPG 船、ばら積み貨物船、コンテナ船、RORO 客船、一般貨物船、クルーズ船、旅客船、自動車運搬船、作業船、観測船

(b) 内航船

一般貨物船、石油タンカー、砂利船、車輛運搬船、カーフェリー、旅客船、ケミカル船、タンク船、セメント船、コンテナ船

(c) 漁船

内航漁船については、船種ではなく4種類の基本漁業形態（海面養殖業、沿岸漁業、沖合漁業、遠洋漁業）に分けて取り扱うこととした。

外航漁船については、航路や操業等に関するデータが入手困難であり、また、操業の大部分が我が国沿岸200海里以遠であり、我が国周辺海域での消費燃料量は内航漁船と比べて充分小さいと考えられるため、考慮しないこととした。

2.4 現況排出量データの作成方法

2.4.1 大気汚染物質排出量算定の考え方

一般に、大気汚染物質の排出量は活動量と排出係数との積によって算出される。ここで活動量とは時間当たりの燃料消費量（単位は例えば[ton-fuel/hour]）あるいは平均出力[kWh]として表される。また排出係数は、大気汚染物質ごとに燃料消費量当たりの排出量[kg/ton-fuel]、あるいは平均出力当たりの排出量[kg/kWh]として定義される量である。

船舶から燃焼由来で発生する大気汚染物質の排出係数に関しては、使用する燃料が同じであればいかなる船型・船種でも一定となる物質（例えばSO_x）と、使用する燃料が同じであっても燃焼機関の定格出力の差異によって排出規制値が異なるために、異なる排出係数を取り扱う必要性が生じる物質（例えばNO_x）とがある。このため、実際の計算においては、船型・船種によって排出係数が異なることを考慮した式(2.1)が用いられる。

$$E_S = \sum_i \sum_j A_{ij} \times F_{Sij} \quad (2.1)$$

ここに

E_S : 大気汚染物質 S の単位時間当たりの排出量

A_{ij} : 船種 i 、船型 j の時間当たりの活動量

F_{Sij} : 船種 i 、船型 j に対する大気汚染物質 S の排出係数

船舶の船種、総トン数、出力、航行パターン等は、外航船、内航船、漁船によって大きく異なる。そこで本研究では、船舶由来の排出量データについて外航船、内航船、漁船に分けて別個に作成することとした。

以下に、外航船、内航船、漁船のそれぞれに対する現況排出量データの作成方法について示す。

2.4.2 外航船の現況排出量データの作成方法

外航船の排出量データに関しては、本来ならば使用されたエネルギー量の統計値を用いたトップダウン補正による方が良いと考えられるものの、外航船の給油地が世界各国に散らばっていて消費燃料量の実態が不明なこと、また燃料を消費する航行海域も我が国周辺海域とは限らないこと等から、個別船舶の活動量に基づき燃料消費量及び大気汚染物質排出量を推定するボトムアップ手法を用いることによって作成した。

個別船舶の活動量としては、Fairfield社による船舶動静データ(2005年)を利用した。当該データは、総トン数100GT以上の国際航海に従事する船舶及び一般商船(ただし高速フェリー等の定期航路は除く)を対象に、2005年における個別航海データ(約40,000隻、約190万航海)を網羅したもので、一隻ごとの船舶がどの港(運河・海域等)からどの港へいつ出港していつ着港したか(日単位)のデータが整理されている。地点を表す港湾要目データには地名・種別・経緯度が、船舶要目データには、ID・船名・船籍・建造年・船種・船腹量等がそれぞれ明記されている。

当該データにはミスや抜け落ちが存在しており完全なデータではないが、現段階において、船舶の寄港実績や諸元をこれ以上の精度で網羅しているデータは存在しない。なお、船舶動静データの精度に関しては、1998年に我が国の主要港に寄港した国際コンテナ船を対象として当該データと港湾統計とを比較検証した文献⁵⁾がある。これによれば、港ごとの寄港隻数の誤差はおおむね1%未満に収まっており、船舶動静データが高い精度を有するデータであることが分かる。

データの解析フローを図-2.1に示す。

外航船の大気汚染排出量データ作成手順の概要は以下の通りである。

- (1) 約40,000隻の船舶を、船種10種類、総トン数範囲12種類の120グループに分類し、グループごとに平均的と考えられる代表船の要目を設定する(第2.5.1節を参照)。
- (2) 船型要目最適化プログラムHOPE(Hull Optimization Program for Economy)⁶⁾及び文献⁷⁻¹⁰⁾を用いて、各代表船に対して主機常用出力、補機定格出力、及び航行時/停泊時の機関負荷率を設定する(第2.5.3節を参照)。
- (3) 船舶の航行区間を低速区、港湾区、減速区、巡航区の4種類に分類し、船舶動静データの出入港日及び全航海距離を考慮しつつ、AIS情報等を参考に、代表船ごとに各区間の距離及び航行速度を設定する(第2.5.4節を参照)。

- (4) (1)及び(3)の結果を用いて個別航海ごとに航行時の主機／補機出力量、及び停泊時の補機出力量を推算する。さらに、文献¹¹⁾より航行／停泊時の機関燃費を設定し、個別航海ごとに航行／停泊時の燃料消費量を求める(第2.5.5節～第2.5.6節を参照)。
- (5) 文献^{10), 12), 13)}を参考に、各大気汚染物質に対

する排出係数(単位燃料消費量当たり)を設定し、(4)の結果から航行／停泊時の大気汚染物質排出量を求め、航路別に集計する(第2.5.7節を参照)。

- (6) (5)の集計結果を、GIS(地理情報システム)を用いて航路及び港に地理的に割り付けし、メッシュデータに変換する。

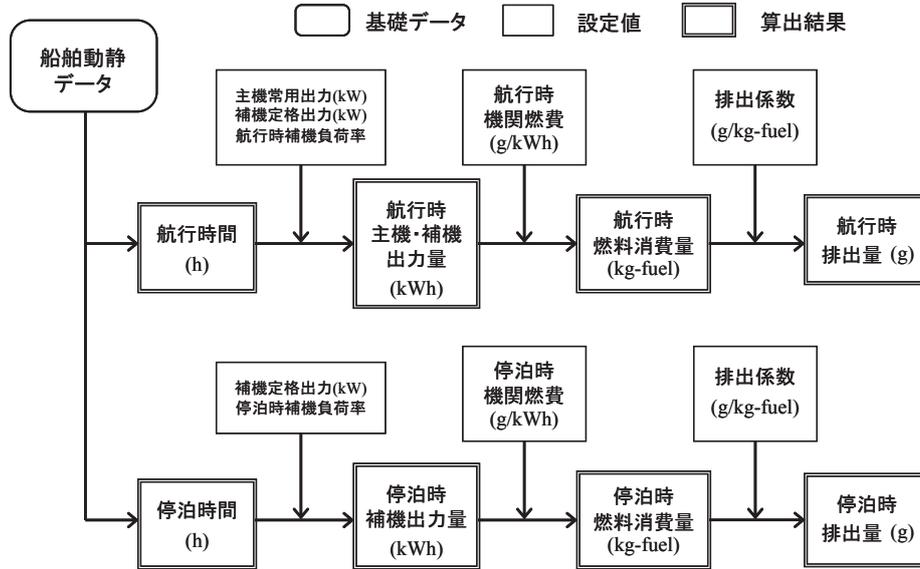


図-2.1 外航船の大気汚染排出量解析フロー

2.4.3 内航船の排出量データの作成方法

内航船の排出量データに関しては、内航貨物／旅客の移動データから推定される活動量に基づき燃料消費量及び大気汚染物質排出量を推定した後に、内航船によって使用されたエネルギー量の統計値を用いてトップダウン補正を行うことにより作成した。

内航船による活動量の推定には、内航貨物／旅客の港間での移動が記録されている国土交通省の統計資料¹⁴⁾を利用した。

データの解析フローを図-2.2に示す。

内航船排出量データの作成手順の概要は以下の通りである。

- (1) 貨物等の種類(貨物81種類、旅客、車輛)ごとに航路・港別の流動重量を求め、輸送距離データを用いて貨物／旅客の輸送量(単位: ton・n.mile)を求める。
- (2) 貨物船／旅客船の代表船(船種7種類)を設定し、文献^{7), 15)-17)}に基づき、代表船の航行速度、主機／補機の定格出力、航行／停泊時の補機負荷率を設定する(第2.5.1節を参照)。
- (3) 国土交通省の輸送統計値¹⁸⁾に基づき、代表船ごとの平均輸送距離、平均貨物積載率、及び燃

料種類の使用比率を設定する。設定した各代表船の速度と平均輸送距離より、代表船ごとの平均航行時間を推算する。また、文献¹⁰⁾に基づき、代表船ごとの平均停泊時間を設定する。

- (4) 代表船ごとの定格出力、負荷率、平均貨物積載率、平均航行／停泊時間より、代表船ごとの航行／停泊時燃料消費量を推算する。さらに、代表船ごとの航行／停泊時排出係数(単位燃料消費量当たり)^{10), 12), 13)}を設定し、航行／停泊時の大気汚染物質排出量を推算した結果を航路別に集計する(第2.5.3節、第2.5.5節～第2.5.7節を参照)。
- (5) 資源エネルギー庁による統計資料¹⁹⁾における内航船によるA重油及びC重油の総消費量をベースに、その油種別消費内訳を、内航海運による報告書²⁰⁾に合わせてエネルギーベースで補正したものを内航船による“正”の燃料消費量とする。(4)で求めた燃料消費量を“正”の燃料消費量で総量補正する。これに伴い、大気汚染物質排出量についても再計算する(第2.5.9節を参照)。
- (6) (5)で求めた大気汚染物質排出量を、GISを用いて航路及び港に地理的に割り付けし、メッシュデータに変換する。

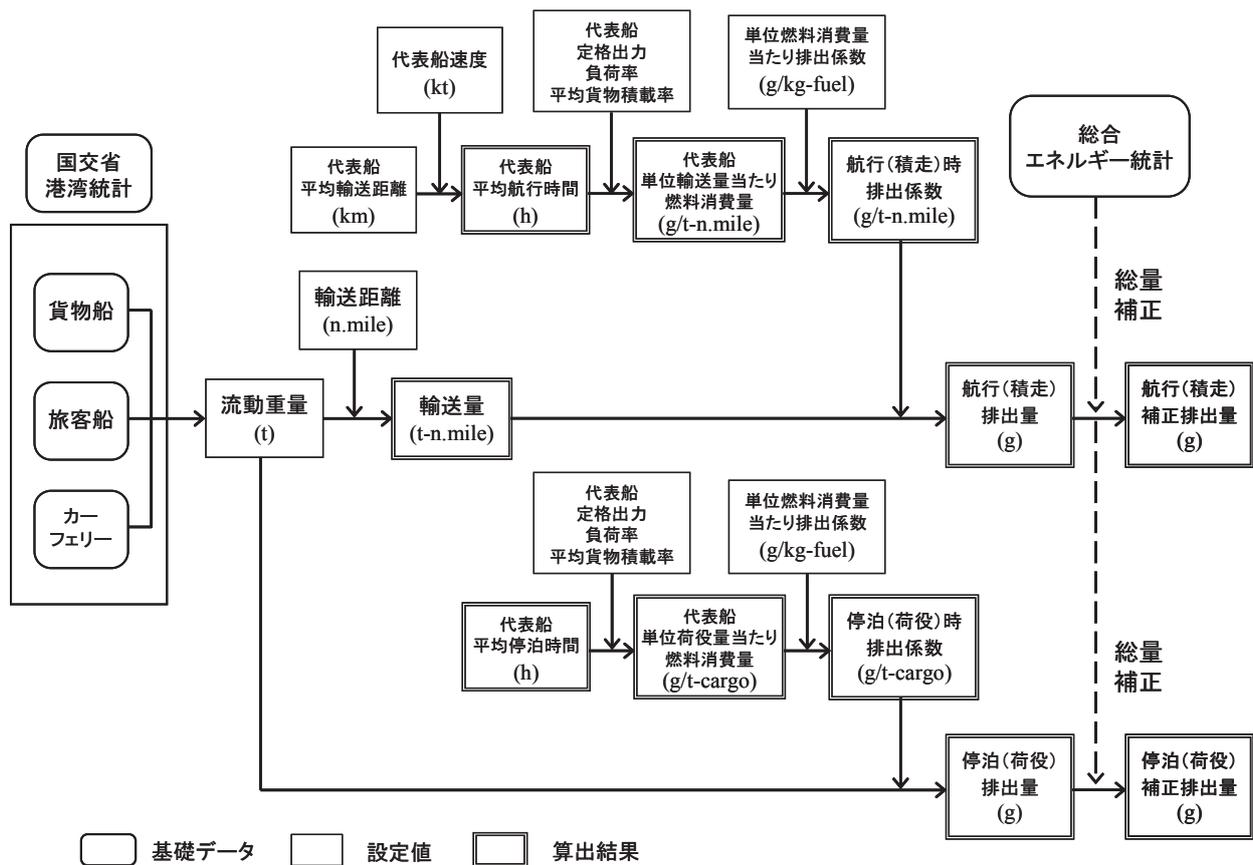


図-2.2 内航船の大気汚染排出量解析フロー

2.4.4 漁船の排出量データの作成方法

漁船の排出量データに関しては、漁船によって使用されたエネルギー量の統計値を、漁業形態別、漁業海区別に配分するトップダウン方式により作成した。

データの解析フローを図-2.3 に示す。

漁船排出量データの作成手順の概要は以下の通りである。

- (1) 資源エネルギー庁による統計資料¹⁹⁾における漁船による軽油、A重油、C重油の総消費重量を、経済産業省による統計資料²¹⁾に基づく油種別使用割合に合わせてエネルギーベースで補正按分し、漁船による年間燃料消費量とする(第2.5.9節を参照)。
- (2) (1)の燃料消費量を、総務省による統計資料²²⁾を用いて燃料ごとに4種類の基本漁業形態(海面養殖業、沿岸漁業、沖合漁業、遠洋漁業)に按分する。

- (3) 各燃料に内燃機関を対応付けし、各機関の機関回転数を設定する(第2.5.3節を参照)。
- (4) 各大気汚染物質に関する燃料消費量当たりの排出係数^{10), 11), 15)}を設定し、(2)の燃料消費量と排出係数を用いて各大気汚染物質排出量を燃料種類ごとに推算する(第2.5.5節～第2.5.7節を参照)。
- (5) (4)で求めた大気汚染物質排出量を、水産庁による統計資料²³⁾に基づき、都道府県/漁業形態別に按分する。さらに、農林水産省による統計資料²⁴⁾に基づき、これを漁業海区/漁業形態別に比例按分し、漁業海区/漁業形態別の大気汚染物質排出量を推算する。
- (6) 漁業形態別の活動半径と漁業海区ごとの代表漁港を設定し、大気汚染物質排出量を漁業形態別に代表漁港からの活動半径内に均一配分する(第2.5.2節を参照)。
- (7) GISを用いてメッシュデータに変換し、メッシュ単位で排出量を集計する。

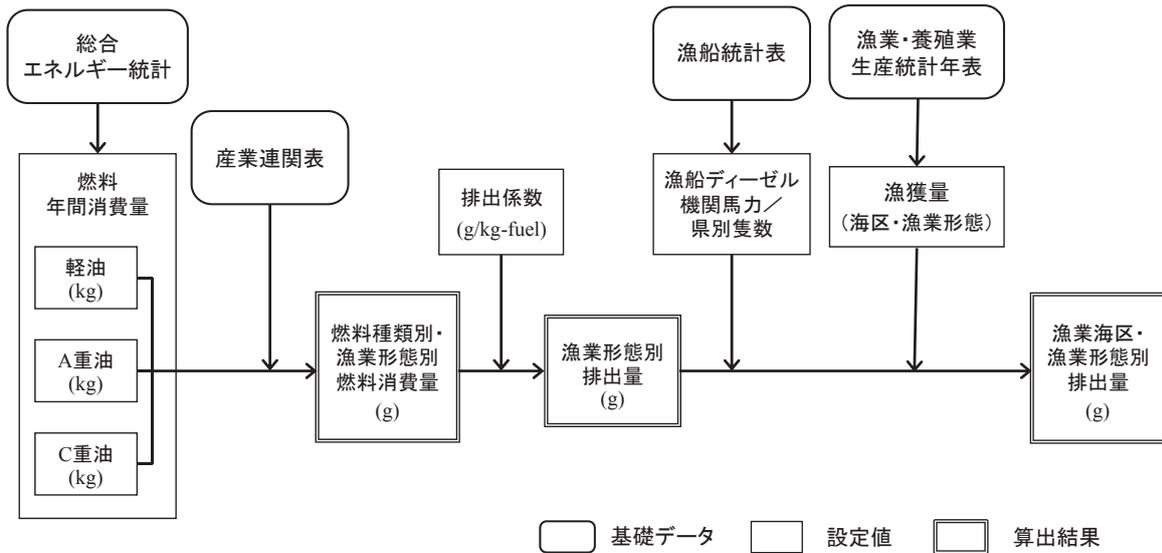


図-2.3 漁船の大気汚染排出量解析フロー

2.5 大気汚染物質排出量の算定における設定

我が国の内航船及び漁船による燃料消費量に関しては統計値が存在するが、外航船の燃料消費量や船舶由来のSO₂排出量等については実状を示す統計値が存在しないため、本研究で得られる推計結果を正値との比較によって検証することは困難である。

海洋政策研究財団(OPRF)では、2009年のAIS情報等に基づき、当所と同時期に同種の船舶排出量データ(2005年)を作成している^{25), 26)}。そこで本研究では、統計資料の一部や排出係数等、共有することが可能な項目についてはOPRFと共同で検討した結果を使用し、推計結果を相互に比較しながらデータの作成を進めた。

本節では、第2.4.2節～第2.4.4節で述べた大気汚染物質排出量の算出方法(概要)への補足として、船舶活動量及び大気汚染物質排出量の算定に必要な各種設定値、及び必要と思われる事項について追加説明を行う。

2.5.1 代表船への分類(外航船/内航船)

(a) 外航船

船舶動静データに掲載されている約40,000隻の船舶を、船種及び総トン数を基準として、これらの船舶がほぼ網羅されると思われる120グループ(代表船10種類×総トン数クラス12種類)の代表船に分類した。

代表船の船種は、ばら積貨物船(B)、兼用船(C)、一般貨物船(G)、LNG船/LPG船(L)、旅客船(MPR)、自動車運搬船(MVE)、フェリー(OFY)、RORO船(PRR)、タンカー(T)、コンテナ船(U)の10種類とした。また、総トン数クラスは～100GT、100～200GT、200～500GT、500～1,000GT、1,000～2,000GT、2,000～5,000GT、5,000～10,000GT、10,000～20,000GT、20,000～50,000GT、50,000～100,000GT、100,000～200,000GT、200,000GT～の12クラスとした。

船舶動静データの船種の代表船への割り当て一覧を、表-2.1に示す。

(b) 内航船

内航船については、国土交通省の港湾統計(2005年)を用いて、貨物等の種類(貨物81種類、旅客、車)を基準として、これらの船舶がほぼ網羅されると思われる7グループの代表船に分類した。

代表船の船種としては、ばら積貨物船(B)、一般貨物船(G)、LNG船/LPG船(L)、旅客船(MPR)、フェリー(OFY)、RORO船(PRR)、タンカー(T)の7種類とした。総トン数については、実際の分布状況を参考に各代表船に対して代表的と思われる値(一定値)を個別に設定した。

内航船の代表船への割り当て及び代表船の総トン数の設定値を、表-2.2に示す。

表-2.1 船舶動静データの代表船への割り当て
(外航船)

船種	船種識別記号		代表船の船種
	Generic Type	Sub Type	
ばら積み貨物船	B	all	B
兼用船	C	all	C
しゅんせつ船	D	all	G
漁船	F	all	G
一般貨物船	G	all	G
LNG/LPG船	L	all	L
動物運搬船	M	LV	G
自動車運搬船		VE	MVE
客船		PR	MPR
フェリー	O	FY	OFY
特殊船		other	G
RORO船	P	RR	PRR
調査船	R	all	G
タンカー	T	all	T
コンテナ船	U	all	U
タグ	X	all	G
掘削船	Y	all	G

表-2.2 港湾統計データの代表船への割り当て
(内航船)

貨物の分類		代表船の船種		船舶総トン数 (GT)
大分類	中分類			
農水産物		一般貨物船	G	749
林産品		一般貨物船	G	749
鉱産品	原油	タンカー	T	749
	その他	一般貨物船	G	749
金属機械工業品		一般貨物船	G	749
化学工業品	セメント	ばら積み貨物船	B	3828
	重油	タンカー	T	749
	石油製品	タンカー	T	749
	LNG	LNG/LPG船	L	749
	LPG	LNG/LPG船	L	749
	化学薬品	タンカー	T	499
	その他	一般貨物船	G	749
軽工業品		一般貨物船	G	749
雑工業品		一般貨物船	G	749
特殊品		一般貨物船	G	749
分類不能のもの		一般貨物船	G	749
旅客	人(カーフェリー)	フェリー	OFY	199
	人(客船)	客船	MPR	199
RORO車両		RORO船	PRR	3686

2.5.2 漁業形態及び活動範囲の設定 (漁船)

漁船は外航船や内航船と異なり定期航路を持たないため、代表船を設定せず、4種類の基本漁業形態(海面養殖業、沿岸漁業、沖合漁業、遠洋漁業)別に排出量データを作成した。

漁船については、漁業形態別に漁港からの活動範囲を想定し、各漁港からおうぎ形に設定した海域内で均等に燃料が消費され、大気汚染物質を放出されるものと仮定してデータを作成した。漁業形態別の活動範囲については、関係者からの聞き取り調査等の結果に基づき、海面養殖業及び沿岸漁業では12海里以内、沖合漁業では200海里以内と設定した。なお、遠洋漁業については操業の大部分が我が国沿岸200海里以遠であり、我が国周辺海域での消費燃料量は他の漁業形態と比べて十分に小さいと考えられるため、本研究では考慮しないこととした。

2.5.3 機関種類及び機関出力

2.5.3.1 主機の機関種類及び常用出力

(a) 外航船

外航船の主機の常用出力については、航行モードの速度と、船型要目最適化プログラム HOPE⁶⁾により得られる速度-主機出力の馬力曲線(3次関数)に基づいて算出した。

HOPEは当所が作成した船型要目最適化プログラムで、長さ・幅・喫水・排水量・船速等の必要最小限の要目と計算条件を入力すれば、その船型の推進・運航性能、建造コスト及び運航コスト

(燃料消費量等)を推定することが可能である。

主機出力の馬力曲線は、常用出力(NOR)15%、シーマージン(SM)4.0%、波浪条件としてCALM SEAの状態を想定して作成した。また、停泊時の主機関の負荷率は0%とした。

主機種類としては、ディーゼル機関及び蒸気タービン(総トン数50,000GT~のLPG船/LNG船のみ)を設定した。ディーゼル機関の種類については、HOPEの解析結果におけるNORでの回転数を基準として、以下のように分類した。

(i) 低速ディーゼル機関(SSD): 130rpm未満

(ii) 中速ディーゼル機関(MSD): 130rpm以上
2,000rpm未満

(iii) 高速ディーゼル機関(HSD): 2,000rpm以上

外航船120グループに対する主機種類の設定を表-2.3に示す。表-2.3において、矢印→(←)は、それぞれ代表船の総トン数がより大きい(小さい)クラスと同じとみなしたことを示す。

(b) 内航船

内航船7グループの代表船については、表-2.2に示したように各代表船に対して代表的と考えられる総トン数とし、その主機種類はすべて中速ディーゼル機関(MSD)に設定した。

内航船の主機の常用出力についても、外航船と同様に、船型要目最適化プログラムHOPE⁶⁾により得られる速度-主機出力の馬力曲線に基づいて算出した。

(c) 漁船

漁船については、使用燃料別に機関種類を設定した。軽油、A重油、C重油を使用する主機として、それぞれ高速ディーゼル機関、中速ディーゼル機関、低速ディーゼル機関を想定し、各機関の機関回転数をそれぞれ 2,000rpm、750rpm、

200rpm と設定した。

なお、漁船に関しては、代表船を設定せず漁業形態別にデータを作成しており、燃料使用量に基づき大気汚染物質排出量を推算することから、機関の常用出力は設定しなかった。

表-2.3 各代表船に対する主機種類の設定 (外航船)

代表船	記号	~100GT	100GT~200GT	200GT~500GT	500GT~1,000GT	1,000GT~2,000GT	2,000GT~5,000GT	5,000GT~10,000GT	10,000GT~20,000GT	20,000GT~50,000GT	50,000GT~100,000GT	50,000GT~100,000GT
ばら積み貨物船	B	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	SSD	SSD	SSD
兼用船	C	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	SSD	SSD	SSD
一般貨物船	G	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	←	←
LNG/LPG船	L	→	→	MSD	MSD	MSD	MSD	SSD	SSD	SSD	ST	ST
客船	MPR	→	→	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	←
自動車運搬船	MVE	→	→	→	MSD	MSD	MSD	MSD	SSD	SSD	SSD	←
フェリー	OFY	→	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	←	←
RORO船	PRR	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	←
タンカー	T	→	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	MSD	SSD	SSD	SSD	SSD
コンテナ船	U	→	→	MSD	MSD	MSD	MSD	SSD	SSD	SSD	SSD	SSD

2.5.3.2 補機の機関種類及び常用出力

外航船、内航船、漁船の補機ディーゼル及び補機ボイラの常用出力については、各補機の定格出力に負荷率を乗じて求めた。

補機の定格出力としては、ディーゼル発電機(D/G)については、Lloyd's データ(2006年)のデータを整理して得られた日本船舶技術研究協会の報告書⁷⁾に基づく設定値を、ボイラ(BLR)については、(旧)日本船用機関学会の報告書⁸⁾に基づく設定値をそれぞれ使用した。補機の定格出力の設定値を表-2.4に示す。

表-2.4 補機ディーゼル発電機及び補機ボイラの定格出力の設定値

船種	ディーゼル発電機合計定格出力		ボイラ 定格容量 (t-steam/h)
	出力(kW/隻)=a・GT ^b		
	a	b	
コンテナ船	2.169	0.7428	0.0267*GT ^{0.48}
RORO船	1.1536	0.8036	
タンカー	18.327	0.4597	
貨物船	0.4578	0.875	
客船	0.9252	0.8594	
その他	0.4578	0.875	

補機の負荷率としては、ディーゼル発電機の負荷率については、アメリカ合衆国環境保護庁(U.S.EPA)による報告書⁹⁾に基づき、代表船/航行モードごとにそれぞれ表-2.5に示すように設定した(なお、航行モードについては、第2.5.3節を参照されたい)。表-2.5において、出典に記述のない低速区における補機ディーゼル発電機の負荷率については、港湾区のと同一と仮定して設

定した。

表-2.5 補機ディーゼル発電機の負荷率の設定値

代表船の船種	記号	停泊	航行モード			
			低速区	港湾区	減速区	巡航区
ばら積み貨物船	B	0.10	0.45	0.45	0.27	0.17
兼用船	C	0.10	0.45	0.45	0.27	0.17
一般貨物船	G	0.22	0.45	0.45	0.27	0.17
LNG/LPG船	L	0.26	0.33	0.33	0.28	0.24
旅客船	MPR	0.64	0.80	0.80	0.80	0.80
自動車運搬船	MVE	0.26	0.45	0.45	0.30	0.15
フェリー	OFY	0.64	0.80	0.80	0.80	0.80
RORO船	PRR	0.26	0.45	0.45	0.30	0.15
タンカー	T	0.26	0.33	0.33	0.28	0.24
コンテナ船	U	0.19	0.48	0.48	0.25	0.13

また、補機ボイラの負荷率については、海洋政策研究財団による報告書¹⁰⁾に基づき表-2.6に示すように設定した。表-2.6において、出典に記述のない客船の停泊時の補機ボイラ負荷率については、港湾区(及び低速区)のそれと同一と仮定して設定した。なお、巡航区及び減速区では主機からの排熱回収が可能と仮定し、負荷率を0とした。

表-2.6 補機ボイラの負荷率の設定値

代表船の船種	記号	停泊	航行モード			
			低速区	港湾区	減速区	巡航区
ばら積み貨物船	B	0.20	0.20	0.20	0	0
兼用船	C	0.20	0.20	0.20	0	0
一般貨物船	G	0.20	0.20	0.20	0	0
LNG/LPG船	L	0.40	0.20	0.20	0	0
旅客船	MPR	0.20	0.20	0.20	0	0
自動車運搬船	MVE	0.20	0.20	0.20	0	0
フェリー	OFY	0.30	0.20	0.20	0	0
RORO船	PRR	0.20	0.20	0.20	0	0
タンカー	T	0.40	0.20	0.20	0	0
コンテナ船	U	0.20	0.20	0.20	0	0

2.5.4 航行モード（外航船）

外航船については、内航船及び漁船と比べて一般的に航行距離が長く、停泊から巡航までの速度変化もより大きいと考えられる。そこで本研究では、実際の船舶動静を高い精度で表現するため、図-2.4 に示すように外航船の航行区間を 4 種類

に分類し、AIS 情報等を参考にして代表船ごとに各区間の距離及び航行速度を設定した。従ってこの場合、外航船の航行モードは、停泊モード、低速モード、港湾モード、減速モード、巡航モードの 5 種類となる。

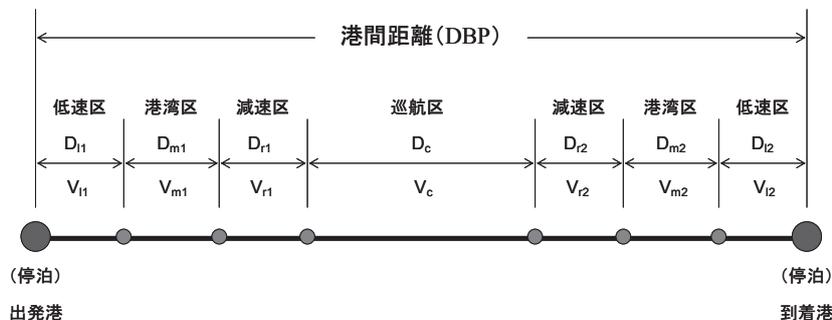


図-2.4 外航船の航行モード設定の考え方

2.5.5 機関の燃料消費率

本研究では、機関の燃料消費率については負荷率によらず一定値とし、IMO による報告書¹¹⁾に基づき、表-2.7 及び表-2.8 に示すように設定し

た。全体量としては僅少であるため表-2.7 には示していないが、蒸気タービンの燃費については、実績値に基づき 228 [g-LNG/kWh] (ただし 276 [g-HFO/kWh] 相当) とした。

表-2.7 主機／補機ディーゼル機関及び補機ボイラにおける燃料消費率の設定値

機種	ディーゼル機関		ボイラ
	主機 (g-fuel/kWh)	補機 (g-fuel/kWh)	補機 (g-fuel/kWh)
外航船 内航船	Second IMO GHG Study 2009関連文書 (*1) を参照して設定 175~205	800kW未満: 230 (*3) 800kW以上: 220 (*3)	275 (C重油) (外航船のみ*3)
漁船	225 (*2)		—

*1: PREVENTION OF AIR POLLUTION FROM SHIPS Updated 2000 Study on Greenhouse Gas Emissions from Ships Phase 1 Report (MEPC59/INF.10) より、表-2.8 を作成した。

*2: 報告書¹¹⁾における小型一般貨物船の値

*3: 報告書¹¹⁾における A1-12, A1.3

表-2.8 主機ディーゼル機関の船種／総トン数別の燃料消費率の設定値 (単位: g-fuel/kWh)

総トン数	船種					
	貨物船	タンカー	旅客船	タグボート	その他	外航 コンテナ船
~500	205	205	195	190	205	195
~1,000						
~3,000						
~6,000	195	195	195	190	195	185
~10,000						
~30,000						
~60,000	185	185	185	185	185	175
~100,000						
100,000~						

2.5.6 燃料種類及び性状

外航船の使用燃料については、総トン数100,000GT～のLPG船/LNG船の蒸気タービンでLNGを使用する以外はすべてC重油と仮定した。内航船の使用燃料については、A重油あるいはC重油、漁船の使用燃料については軽油、A重油、C重油のいずれかを使用するものと仮定した。

燃料の性状に関する設定値のうち、燃料発熱量

については内航総連による報告書²⁰⁾及び資源エネルギー庁の統計値¹⁹⁾を用いて設定した(表-2.9)。また、燃料中硫黄分濃度については報告書²⁰⁾、IMOによる資料²⁷⁾及び環境省による資料²⁸⁾に基づき設定した(表-2.10)。

表-2.9中のLHV(Lower Heating Value:低位発熱量)、HHV(Higher Heating Value:高位発熱量)のどちらの値を使用するかに関しては、参照元のデータによって適宜選択するものとした。

表-2.9 燃料発熱量の設定値

油種	発熱量 (MJ/kg-fuel or MJ/kL-fuel)		
	C重油	A重油	軽油
全船 (LHV)	40.64 (MJ/kg-fuel) ²⁰⁾	42.31 (MJ/kg-fuel) ²⁰⁾	42.31 (MJ/kg-fuel) ²⁰⁾
外航船 内航船 (HHV)	43.04 (MJ/kg-fuel) ²⁰⁾	45.12 (MJ/kg-fuel) ²⁰⁾	37.76 (MJ/kL-fuel) ¹⁹⁾
漁船 (HHV)			

表-2.10 燃料中硫黄分濃度の設定値

油種	硫黄分濃度 (%)		
	C重油	A重油	軽油
外航船	2.7 ²⁷⁾		
内航船	2.53 ²⁰⁾	0.61 ²⁰⁾	
漁船			0.005 ²⁸⁾

2.5.7 排出係数

第2.4.1節の式(2.1)から分かるように、排出係数は算出する大気汚染物質排出量に対してダイレクトに影響を及ぼす。従って、排出量データの作成に使用する排出係数は、特に検討を重ねた上で慎重に設定する必要がある。

陸上発生源の排出係数については、環境省による窒素酸化物総量規制マニュアル、IPCCによるGHGに関する算定ガイドライン等がある。一方、船舶から排出される大気汚染物質の排出係数については上記のようなマニュアルやガイドラインは国内外ともに存在しないが、測定値をベースとしたデフォルト値が整理されているところである。

本研究においては、我が国及びEU等における算定方法を比較し、

- (1) 原出典などが明らかであり信頼度の高いもの、かつ、IMOなどにおいて使用・引用された実績があること、
 - (2) ECA等の環境規制を適用した場合の大気汚染物質排出量の削減効果を定量的に評価することができるものであること、
 - (3) 外航船から漁船まで、いずれの機関規模に対しても適用できるような柔軟性を有すること、
- の3点を考慮しつつ、現時点で最も妥当と考えられる排出係数を設定した。

検討の結果、ディーゼル機関から排出されるNOx及びPMについては、機関出力当たりの排出係数を、それ以外の大気汚染物質については、燃料消費量(重量あるいは熱量)当たりの排出係数を適用することとした。また、NOx、SO₂及びPMについては、

MARPOL73/78 条約附属書 VI に規定された規制による排出係数の変化を設定できるように留意した。同時に NO_x については改正内容が新造船にも適用されることから、船齢構成による平均的な排出係数を設定した。

第 2.1 節で述べたように、本研究でデータ作成対象とする大気汚染物質は、NO_x、SO₂、PM、CO、CH₄、NMVOC、N₂O である。

一般に、SO₂ は燃料中の硫黄分が酸化されて放出されるため、燃料当たりの排出量 (kg/t-fuel) として整理される。その一方で、NO_x については、機関中の燃料の燃焼雰囲気下において窒素と酸素が結びついて発生するいわゆる Thermal NO_x が主体となるため、燃料組成よりも燃料の形式 (機関種類、機関規模など) によって排出係数が異なる場合が多い。このため、MARPOL73/78 条約附属書 VI における NO_x 規制値も、定格回転数をパラメータとして機関規模を考慮した規制値として定められている (図-1.1)。

すなわち、SO₂ に代表されるような物質については、排出係数は、主機/補機の平均出力、燃料消費率等から算出した燃料消費量に、燃料当たりの排出係数を乗ずることによって求めることができる。一方で、NO_x については機関によって NO_x 排出係数が異なることから、船舶の規模に幅がある点を考慮すると、燃料当たりの排出係数を用いるべきではなく、船種別のエンジン平均出力から排出係数を設定すべきである。

排出係数の設定に当たっては、以下の文献を参考にした。

(a) IPCC (1996) :

1996 年改定 IPCC ガイドライン

(b) EC (2002) :

Quantification of Emissions from Ships Associated with Ship Movements between Ports in The European Community, Final Report, Entec UK Limited (2002)

(c) IPCC (2006) :

2006 年 IPCC ガイドライン

(d) EMEP/CORINAIR (2007) :

EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook - 2007

(e) S&O (2008) :

平成 19 年度 船舶起源の粒子状物質 (PM) の環境影響に関する調査研究報告書、財団法人シップ・アンド・オーシャン (2008)

(f) GHG 2nd Study (2009) :

The Second IMO GHG Study 2009

以下に、各大気汚染物質の排出係数の設定につい

て述べる。

2.5.7.1 NO_x 排出係数の設定

各文献で用いられている NO_x 排出係数を表-2.11 に整理して示す。

表-2.11 より分かるように、IPCC1996 では燃料消費量当たりの NO_x 排出係数を単一で与えているが、EC (2002)、EMEP/CORINAIR (2007)、GHG 2nd Study (2009) では、機関スピードや規制の有無によって 3 つの区分に分け、それぞれの区分に対して燃料消費量当たりの NO_x 排出係数を設定している。本来、NO_x 排出係数はエンジンの規模によって異なるため、前者においては誤差が大きい。すなわち、船舶構成が不明の平均化された燃料消費量当たりの NO_x 排出係数よりもエンジン規模 (出力) によって設定した NO_x 排出係数を用いる方が適切であると考えられる。

表-2.11 NO_x 排出係数の比較

出典	NO _x 排出係数	備考
IPCC (1996)	1.8 [g/MJ]	・航行中ディーゼル機関
EC (2002)	91.9~92.8 [kg/ton-fuel] (低速) 65.0~65.7 [kg/ton-fuel] (中速) 59.1~59.6 [kg/ton-fuel] (高速)	・海上航行時 ・エンジン/燃料/場所ごとに設定
EMEP/CORINAIR (2007)	87 [kg/ton-fuel] (低速) 72 [kg/ton-fuel] (中速) 57 [kg/ton-fuel] (高速)	
GHG 2nd Study (2009)	89.5 [kg/ton-fuel] (未規制) 78.2 [kg/ton-fuel] (Tier1規制) 84.9 [kg/ton-fuel] (2007年平均)	・低速ディーゼル機関
	59.6 [kg/ton-fuel] (未規制) 51.4 [kg/ton-fuel] (Tier1規制) 56.3 [kg/ton-fuel] (2007年平均)	・中速ディーゼル機関
	7 [kg/ton-fuel]	・補助ボイラ
IPCC (2006)	-	(記載なし)

また、GHG 2nd Study (2009) では、Pre Tier1 及び Tier1 に対して異なる NO_x 排出係数 (前者は後者の 15%増し、すなわち Tier1 規制の導入効果は約 15%の削減としている) を設定している。この値は国内で用いられる最大削減幅 30%と比較すると小さいが、GL (Germanischer Lloyd) 等の調査によると、Pre Tier1 機関であっても、一部の機関については既に燃料消費量に影響しない範囲で低 NO_x 機関の導入を果たしており、その効果が現れていると説明されている。

本研究においては、規制の効果 (Pre Tier1 において Tier1 の 3 割増し、Tier2 と Tier3 において対 Tier1 のそれぞれ 2 割減及び 8 割減) との整合性を取るため、Tier1 に対する Pre Tier1 の上乗せ率を 3 割と設定することとした。

以上の検討等を踏まえ、本研究における外航船、内航船、漁船に対する NOx 排出係数の設定方法は次の通りとした。

- 定格出力 (kW) 及び機関回転数の関係式から回転数 (rpm) を求め、回転数と排出係数の関係から NOx 排出係数 (g/kWh) を設定する。なお、漁船は中速機関と仮定し、定格出力として一定値 (750kW) を採用する。
- 回転数と排出係数の関係については、IMO の現行規制値 (Tier1) を基本とする。Tier1 規制による内燃機関の回転数と NOx 排出係数の関係を表-2.12 に示す。
- 外航船については、2000 年以前に建造されたものについては Pre Tier1 (Tier1 に対して 3 割を上乗せした値)、2000 年以降に建造されたものについては Tier1 とする。内航船及び漁船については、2005 年当時は Tier1 適合船が皆無であったと仮定し、すべて Pre Tier1 とする。
- 補機ボイラの NOx 排出係数としては、GHG 2nd Study (2009) で報告されている消費燃料当たりの NOx 排出係数 (7[g/kg-fuel]) を採用する。

表-2.12 ディーゼル機関の NOx 排出係数のベース設定値 (IMO による 1 次 (Tier I) 規制値)

項目	設定値 (g/kWh)	機関回転数条件
ディーゼル機関	17	130rpm 未満
	$45 \times \text{rpm}^{-0.2}$	130rpm 以上 2,000rpm 未満
	9.8	2,000rpm 以上

2.5.7.2 PM 排出係数の設定

各文献で用いられている PM 排出係数を表-2.13 に整理して示す。

S&O (2008) の出典元データでは希釈法による測定結果を用いており、サルフェート (硫酸塩; SO4 粒子) を含む PM 排出係数となっている。EMEP/CORINAIR が PM 排出係数の設定に用いた出典元データ (Cooper and Gustafsson (2004)) の測定方法は不明であるが、S&O (2008) とほぼ同レベルの値となっている。GHG 2nd Study (2009) の PM 排出係数は、CORINAIR (2007) の値を採用している。一方で、EC (2002) の排出係数は、S&O (2008) 及び EMEP/CORINAIR (2007) よりも大きい値となっている。

本研究では、GL (Germanischer Lloyd) による燃料中硫黄分と希釈法における PM 排出成分比の関係 (図-2.5) より、外航船、内航船及び漁船の主機/補機ディーゼル機関に対する PM 排出係数として、

燃料中 S 分 [%] と PM 排出係数 [g/kWh] を求めた直線近似式 (2.2) を使用した。

$$(PM \text{ 排出係数}) [g/kWh] = 0.585 \times S [\%] + 0.281 \quad (2.2)$$

表-2.13 PM 排出係数の比較

出典	PM 排出係数	備考
S&O (2008)	1.44~6.45 [g/kg-fuel]	・燃料中 S 分 0.5~2.7%
EMEP/CORINAIR (2007)	6.7 [kg/ton-fuel]	・Residual oil 使用時
	1.1 [kg/ton-fuel]	・Distillate fuel 使用時
GHG 2nd Study (2009)	6.7 [kg/ton-fuel]	・Residual oil 使用時
	1.1 [kg/ton-fuel]	・MGO 使用時
EC (2002)	4.4 [kg/ton-fuel] (低速)	・港内航行、MGO/MDO 使用時 ・海上航行時は設定なし
	4.0 [kg/ton-fuel] (中速)	
	4.0 [kg/ton-fuel] (高速)	
IPCC (1996)	11.2 [kg/ton-fuel] (低速)	・港内航行、Residual oil 使用時 ・海上航行時は設定なし
	10.3 [kg/ton-fuel] (中速)	
	10.3 [kg/ton-fuel] (高速)	
IPCC (1996)	-	(記載なし)
IPCC (2006)	-	(記載なし)

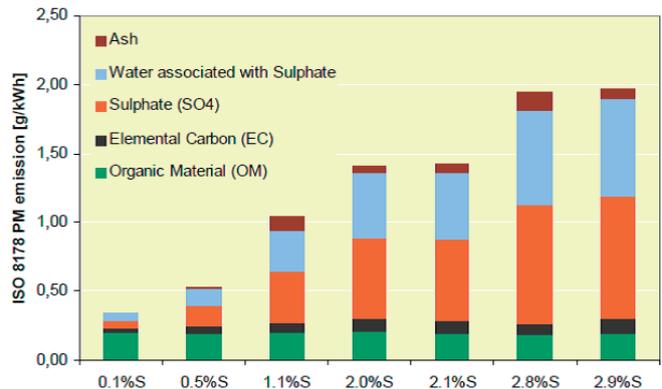


図-2.5 燃料中硫黄分 [%] と希釈法における PM 排出成分比の関係 (Germanischer Lloyd による)

補助ボイラの PM 排出係数については、文献²⁹⁾では小型ボイラの PM 排出係数として A 重油に対して 2[g/kg-fuel]、C 重油に対して 3~4[g/kg-fuel] とそれぞれ設定されている。また、文献¹⁰⁾では、東京都による報告書³⁰⁾において陸上小規模施設での C 重油利用のボイラの PM 排出係数が 2.5[g/kg-fuel] と設定されていることに鑑み、Heavy Fuel Oil を使用するボイラの PM 排出係数を 2.5[g/kg-fuel] と設定し、燃料油の使用割合を考慮してボイラの PM 排出係数を設定している。

本研究では、内航船舶におけるボイラ使用量はタンカーを除いて少ない点に鑑み、外航船のみに対して 2.5[g/kg-fuel] を適用し、内航船/漁船については

補助ボイラによる PM の排出は考慮しないこととした。

2.5.7.3 SO₂ 排出係数の設定

各文献で用いられている SO_x 排出係数を整理したものを表-2.14 に示す。

表-2.14 より分かるように、EC (2002)、EMEP/CORINAIR (2007)、GHG 2nd Study (2009) では、いずれも燃料中硫黄分に基づいて SO₂ 排出係数を設定しているため、ほぼ同レベルの値となっている。一方で、S&O (2008) では、PM に区分されるサルフェートとして排出される量を補正して SO₂ 排出係数を設定している。このため、EC (2002) などによる SO₂ 排出係数と比較して数%程度小さい値となっている。

表-2.14 SO_x 排出係数の比較

出典	SO _x 排出係数	備考
S&O (2008)	9.4~50.6 [g/kg-fuel]	・燃料中S分0.5~2.7%
EMEP/CORINAIR (2007)	20×%S [kg/ton-fuel]	・S : 燃料中硫黄分 [%wt]
GHG 2nd Study (2009)	54 [kg/ton-fuel]	・Residual oil 使用時
	10 [kg/ton-fuel]	・MGO 使用時
EC (2002)	4.9 [kg/ton-fuel]	・海上航行、MGO 使用時 ・エンジン/燃料/場所ごとに設定
	20.0~20.2 [kg/ton-fuel]	・海上航行、MDO 使用時 ・エンジン/燃料/場所ごとに設定
	53.8~54.0 [kg/ton-fuel]	・海上航行、Residual oil 使用時 ・エンジン/燃料/場所ごとに設定
IPCC (1996)	—	(記載なし)
IPCC (2006)	—	(記載なし)

SO₂ の排出量は、燃料中に含まれる S 分[%]と燃料消費量の積に比例するが、燃料油種によって含有する硫黄分が異なることから、SO₂ 排出量を計算する際には、油種ごとの燃料使用割合を考慮する必要がある。本研究における燃料油種別の硫黄分含有率については、表-2.10 の値を適用した。

SO₂ 排出係数は、表-2.10 の硫黄分含有率を用いて式(2.3)によって求められる。

$$\begin{aligned} & (\text{SO}_2 \text{ 排出係数}) [\text{g/kg-fuel}] \\ & = \frac{S[\%]}{100} \times \frac{M_{\text{SO}_2}}{M_S} \times 10^3 = 20 \times S[\%] \end{aligned} \quad (2.3)$$

ここに

$$M_{\text{SO}_2} : \text{SO}_2 \text{ の分子量 } (=64)$$

$$M_S : \text{S の原子量 } (=32)$$

ここで得られる SO₂ 排出係数には SO₂ の凝縮により生成されるサルフェートが含まれるため、PM として排出される分を減じる必要がある。このとき、外航船、内航船及び漁船に対する SO₂ 排出係数の式は(2.4) のようになる。サルフェートについては、図-2.5 より PM 排出係数と同様に直線近似式(2.5)を単位換算して使用した。

$$(\text{SO}_2 \text{ 排出係数}) [\text{g/kg-fuel}] = 20 \times S[\%]$$

$$- (\text{PM として排出されるサルフェートの排出係数}) \quad (2.4)$$

ここに

$$\begin{aligned} & (\text{サルフェート排出係数}) [\text{g/kWh}] = \\ & 0.267 \times S[\%] - 0.009 \end{aligned} \quad (2.5)$$

2.5.7.4 その他の物質の排出係数の設定

その他の大気汚染物質 (CO、CH₄、NMVOC、N₂O) の排出係数については、1996 年改訂 IPCC ガイドラインの報告値を適用した (表-2.15)。これらの係数は、熱量当たりの排出量 [g/MJ] として整理されているため、表-2.9 に示した発熱量の値を用いて重量換算した。

表-2.15 CO、CH₄、NMVOC、N₂O の排出係数

排出物	ディーゼル機関	補助ボイラ
CO	0.18 (g/MJ)	0.015 (g/MJ)
CH ₄	0.007 (g/MJ)	0.003 (g/MJ)
NMVOC	0.052 (g/MJ)	—
N ₂ O	0.002 (g/MJ)	0.0003 (g/MJ)

2.5.8 排出源高さ (外航船/内航船)

船舶は、一般にその総トン数 (GT) によって煙突の高さが大きく異なる。すなわち、燃焼由来の大気汚染物質が排出される高さ (排出源高さ) が異なるため、本研究においては、相対的に総トン数の大きい船舶が多いと考えられる外航船及び内航船を対象に、以下の手順によって排出源高さを設定し、排出量データの作成に反映させた。

排出源高さの設定では、有効煙突高さ H_a (船舶の煙突高さ H_0 と排ガス上昇高さ ΔH の和) を考慮した。

船舶の煙突高さ H_0 については、(旧) 日本船舶機関学会による報告書⁸⁾における船会社 85 社へのア

ンケート調査の結果に基づき、船舶の総トン数別に設定した(表-2.16)。

表-2.16 総トン数別の船舶の煙突高さ H_0

総トン数(GT)	煙突高さ(m)
1,000	13.0
2,000	15.3
5,000	19.0
10,000	22.4
20,000	26.3
50,000	32.6
100,000	38.4
200,000	45.1

備考:満載喫水線からの高さ

船舶の総トン数 X [GT]から煙突高さ H_0 [m]を与える近似式は、表-2.16の結果に基づき式(2.6)で与えられる。

$$H_0 = 2.5875X^{0.2342} \quad (\text{決定係数 } R^2 = 0.7939) \quad (2.6)$$

煙突頭部からの排ガス上昇高さ ΔH [m]については、文献²⁹⁾に基づき、以下に示す修正 CONCAVE 式(2.7)を用いて求めた。

$$\Delta H = 0.175 \times Q_H^{0.5} \times u^{-0.75} \quad (2.7)$$

ここに

Q_H : 排出熱量[cal/s] ; $Q_H = 310.32 \times Q_S \times \Delta t$

u : 煙突頭部における風速[m/s]

Q_S : 湿り排気ガス量[Nm³/s]

Δt : 排出ガス温度と外気(15℃)との温度差[℃]

ここでは、船舶の主機を2ストロークディーゼル機関(燃料:HFO、燃費:180[g/kWh])と仮定し、 $=5.46$ [Nm³/s], $\Delta t = 150 - 15 = 135$ [℃]として、機関出力別に ΔH と航行速度との関係を求めた。

以上より、船種・船舶総トン数別に代表船に対する有効煙突高さ H_a を求めた。結果の概要は以下の通りである。

- (1) 航行時には、バルカーを除く総トン数 10,000GT 以上のすべての船種で H_a が 30[m]を超える。
- (2) 港湾モードで船速が低下すると ΔH が急激に増加するが、機関出力も低下するため、大型コンテナ船でも ΔH は 30[m]程度となる。
- (3) 停泊時には主機関は停止し、補機(ディーゼル発電機、補助ボイラ)のみが稼働する。ディーゼ

ル発電機の出力は自動車運搬船でもたかだか 1,000[kW]程度と考えられるため、 ΔH は 30[m]程度と考えられる。

以上の考察を踏まえて総合的に判断し、本研究においては、総トン数 5,000GT 以上のすべての船種について、有効煙突高さ H_a を 30[m]以上として処理し、5,000GT 未満のすべての船種については H_a は 30[m]未満として処理することとした。

2.5.9 燃料消費量の設定(内航船/漁船)

第2.4.2節~第2.4.4節でも述べたように、現況排出量データのうち、外航船については船舶動静データをベースとして積み上げることによって作成されている(ボトムアップ方式)。一方、内航船については、内航船による消費エネルギー実績値(統計値)に基づき最終的に総量補正されており、また漁船については、漁船による消費エネルギー実績値(統計値)からスタートしてトップダウン方式でデータが作成されている。

本節では、内航船及び漁船排出量データの作成に使用した統計値(総合エネルギー統計)について述べる。

2.5.9.1 統計データの選定

資源エネルギー庁による統計値(総合エネルギー統計)¹⁹⁾は、“日本に輸入され、あるいは国内で生産され供給された石炭・石油・天然ガス等のエネルギー源が、どのように転換され、最終的にどのような形態でどの部門や目的に消費されたかを定量的に示した”ものであり、使用燃料の漏れが最も少ないと考えられる。さらに、当該調査による統計値は、我が国が国際機関に対して提出するセクタごとのエネルギー使用量としても使用されており(例:OECD(経済協力開発機構)が編纂する「Energy Statistics」、あるいは UNFCCC(気候変動に関する国際連合枠組条約)に対して毎年提出される我が国の地球温暖化ガス排出量報告書「National Inventory Report」、国際的に検証された数値であるという観点から、内航船及び漁船の排出量データの作成に使用する目的に最も適する統計データであると判断した。

本研究で拠所とした総合エネルギー統計による内航船及び漁船の年間エネルギー使用量(2005年)を表-2.17にエネルギーベースで示す。

表-2.17における油種ごとの消費量については、その配分が必ずしも船舶の運航実態と符合していないと考えられたため、熱量の合計値のみをトップダウン値として採用することとし、燃料油種への配分については第2.5.9.2節に示すように補正すること

とした。

表-2.17 総合エネルギー統計による燃料使用量の統計値 (エネルギーベース、2005年)

	軽油 [TJ]	A重油 [TJ]	C重油 [TJ]	合計 [TJ]
内航船舶	—	51,752	123,184	174,936
漁船	973	97,012	13,478	111,463

2.5.9.2 燃料使用割合の補正 (内航船/漁船)

(a) 内航船

内航船のA重油使用割合については、内航総連による報告書²⁰⁾に基づく表-2.18に示すデータを使用した。AISデータ及び入港データに基づく船舶の総トン数ごとの総活動量[kWh]、及び表-2.18より、内航船におけるA重油及びC重油の使用割合を設定(補正)した。補正後の内航船による燃料消費量(2005年)を表-2.19に示す。

表-2.18 内航船によるA重油の使用割合

船型	A重油使用割合 (%)		
	主機ディーゼル機関	補助ディーゼル機関	補助ボイラ
500 総トン未満	89.04	100	56
500 ~ 1,000 総トン未満	89.04	100	38
1,000 ~ 3,000 総トン未満	30.08	100	38
3,000 ~ 6,000 総トン未満	22.15	69	0
6,000 ~ 10,000 総トン未満	4.55	69	0
10,000 ~ 30,000 総トン未満	4.35	41	0
30,000 総トン以上	4.35	0	0

表-2.19 補正後の内航船による燃料消費量 (エネルギーベース、2005年)

	軽油 [TJ]	A重油 [TJ]	C重油 [TJ]	合計 [TJ]
内航船舶	—	97,622	77,314	174,936

(b) 漁船

漁船における軽油、A重油及びC重油の使用割合については、経済産業省による統計資料(エネルギー生産・需給統計年報)²¹⁾で報告されている1991~2001年の実績値より求めた。1991~2001年における軽油及び重油の使用比率の経年変動を図-2.6及び図-2.7に示す。これらの図より分かるように、燃料使用比率の推移の傾向が1999年を境に大きく変化しているため、現況(2005年)における燃料使用比率は、1999~2001年の3年間の比率の変動に基づいて回帰式を作成して外挿することにより設定した。

外挿により求めた現況(2005年)における燃料使用比率は、熱量ベースで軽油26.7%、C重油2.6%となった。補正後の漁船による燃料消費量(2005年)

年)を表-2.20に示す。

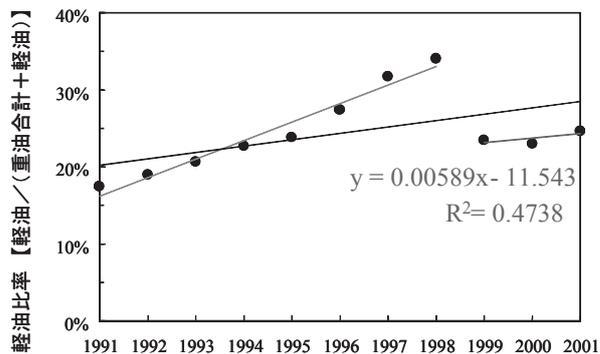


図-2.6 軽油の使用比率の経年変動 (1991~2001年)

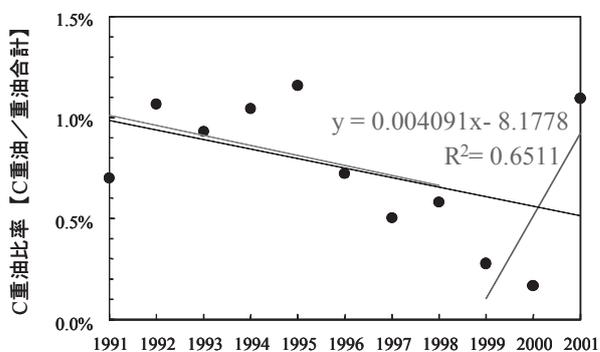


図-2.7 C重油の使用比率の経年変動 (1991~2001年)

表-2.20 補正後の漁船による燃料消費量 (エネルギーベース、2005年)

	軽油 [TJ]	A重油 [TJ]	C重油 [TJ]	合計 [TJ]
漁船	29,707	78,931	2,825	111,463

2.6 作成した現況排出量データの概要

第2.4節で述べた方法により作成した船舶の燃焼由来による排出量データの概要について、第2.6.1節及び第2.6.2節に示す。

2.6.1 現況排出量データのマップ例

作成した船舶排出量データの例として、外航船、内航船、及び漁船によるNOx排出量データをGIS上にマップ表示したものをそれぞれ図-2.8~図-2.10に示す。これらの図において、NOx排出量の大小は海上のメッシュの色で表示されている(排出量の大きい方から赤色-橙色-黄色-黄緑色-緑色の順)。

外航船の排出量マップ(図-2.8)では、NOx排

出量が我が国から航路に沿って放射状に分布している様子が見られる。内航船の排出量マップ(図-2.9)では、NO_x 排出量データの大部分が我が国沿岸 50 海里以内に集中している。漁船の排出量マップ(図-2.10)では、各漁港からおうぎ形に設定した海域内で均等に燃料が消費されると仮定したため、外航船及び内航船の排出量マップとはかなり様相の異なるデータとなっていることが分かる。

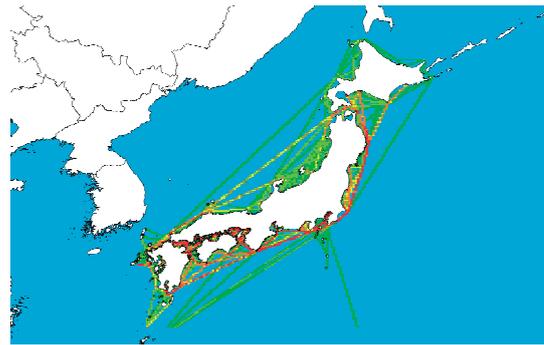


図-2.9 内航船の NO_x 現況排出量のマップ表示 [2次メッシュ (1メッシュ: 10km×10km 四方)]

2.6.2 我が国沿岸距離別の現況排出量データ

本研究において作成した船舶排出量データを、日本周辺 12、50、200 海里以内の海域でそれぞれ集計した結果を表-2.21 に示す。

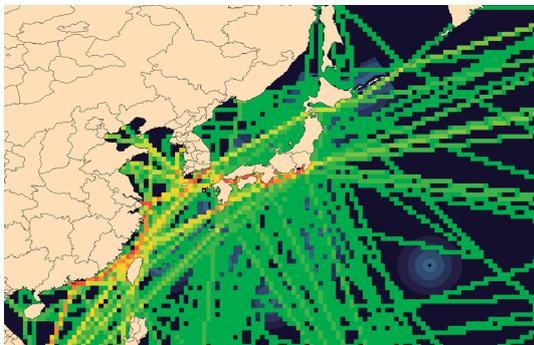


図-2.8 外航船の NO_x 現況排出量のマップ表示 [0.5度メッシュ (1メッシュ: 約 40~50km 四方)]

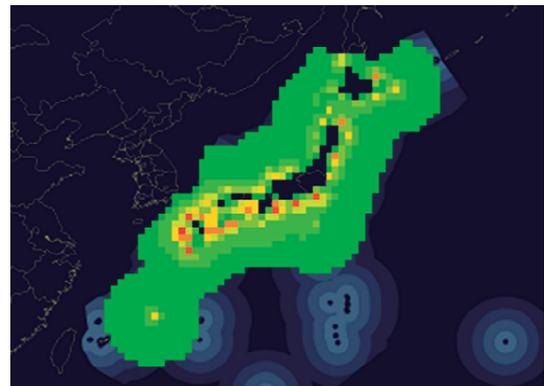


図-2.10 漁船の NO_x 現況排出量のマップ表示 [0.5度メッシュ (1メッシュ: 約 40~50km 四方)]

表-2.21 現況船舶排出量データ (2005年) の集計結果

船舶種類	航行/係留	離岸距離 (海里)	燃料消費量 (ton/year)				2005年における大気汚染物質排出量 (ton/year)		
			LNG	軽油	A重油	C重油	SO ₂	NO _x	PM
外航船	航行	係留	0	0	0	349,000	18,300	14,700	2,070
		0~12	53,500	0	0	3,090,000	159,000	290,000	29,700
		0~50	125,000	0	0	5,210,000	268,000	500,000	50,500
		0~200	282,000	0	0	7,820,000	402,000	763,000	76,100
内航船	航行	係留	0	0	418,000	317,000	18,400	30,500	1,860
		0~12	0	0	1,880,000	625,000	54,500	179,000	10,700
		0~50	0	0	2,560,000	823,000	72,900	243,000	14,400
		0~200	0	0	2,620,000	832,000	74,100	247,000	14,700
漁船	航行	0~12	0	481,000	876,000	12,900	11,000	89,100	3,180
		0~50	0	486,000	1,146,000	18,500	14,400	109,000	4,000
		0~200	0	492,000	1,430,000	24,500	18,100	129,000	4,870

2.7 現況排出量データの比較検証及び考察

第 2.5 節でも述べた通り、本研究で作成した現況排出量データ (特に外航船) を正値との比較によって検証することは困難である。そこで本節では、OPRF により作成された船舶排出量データ (2005年)^{25), 26)} との比較、及び 2nd GHG IMO Study¹¹⁾

によるデータとの比較を行うことで、作成した現況排出量データの検証を試みた。

2.7.1 OPRF による船舶現況排出量データとの比較検証

OPRF 及び当所は、それぞれ独自のデータ作成手

法に基づき、ほぼ同時期（2010～2011年）に同種の船舶由来の排出量データを作成している。当所の排出量データは、現在入手可能なデータとして最も信頼性の高い船舶動静データを元に作成しており、全世界における外航船の燃料消費量を比較的高い精度で推定することが可能であり、航路パターンの変化等の状況変化に対応することも比較的容易であるという長所を有するが、その反面、船舶の実際の航路及び航行速度を正確に再現することは難しい。一方で、OPRFがデータ作成に利用したAIS情報は、船舶の実際の航路及び航行速度を忠実に反映することが可能な反面、現状では網羅範囲が沿岸50海里程度に過ぎず、またAISの搭載が義務付けられている船舶が限定されている（国際航海に従事する

300GT以上の船舶、及び国際航海に従事しない500GT以上の船舶等）。従って、AIS情報を用いて排出量データを作成する場合には、50海里以内におけるAIS非搭載船による排出量、及び50海里以遠の排出量を何らかの手法によって補完する必要がある。

本研究において作成した現況排出量データ（航行時及び停泊時）をOPRFによるデータと比較した結果を表2.22に示す。OPRFによるデータには使用燃料種の内訳が明示されていなかったため、当所のデータも油種を問わず重量で合算した値を示し、単純に総量を比較するにとどめた。また、OPRFのデータについては、文献^{25), 26)}にある数値を有効数字3ケタに丸めて示した。

表2.22 当所データによる燃料消費量とOPRFによる燃料消費量^{25), 26)}の比較

船舶種類	航行／係留	離岸距離(海里)	当所のデータによる燃料消費量 (ton/year)		OPRFのデータによる燃料消費量 (ton/year)	
			合計	使用燃料	合計	使用燃料
外航船	係留		349,000		537,000	
		0～12	3,140,000	C重油(一部LNG)	1,320,000	C重油
	0～50	5,340,000	3,170,000			
	0～200	8,100,000	5,980,000			
内航船	係留		735,000	A重油/C重油	732,000	A重油/C重油
		0～12	2,510,000		2,610,000	
	0～50	3,380,000	3,220,000			
	0～200	3,450,000	3,230,000			
漁船	航行	0～12	1,370,000	軽油/A重油/C重油	957,000	軽油/A重油 (C重油は200海里 以遠で使用)
		0～50	1,650,000		(データなし)	
		0～200	1,950,000		1,742,000	

外航船の比較では、我が国沿岸50海里以遠における燃料消費量がほぼ一致しているが、50海里以内における燃料消費量ではOPRFの方が当所よりも約40%も小さくなっている点が目を引く。このように大きな乖離が生じた原因としては、①当所の手法ではAIS情報を用いたOPRFの手法と比べて航行中の船舶速度を正確に再現する点で弱く、燃料消費量を過大評価している、②OPRFの手法では500～1,000GTの船舶のAISデータ解析結果から50海里以内におけるAIS非搭載船のデータ補完を推定しているが、この推定プロセスで燃料消費量を過小評価している等、複数の可能性が考えられるが、詳細については不明である。

内航船の比較では、係留時／航行時の燃料消費量及び航行時燃料消費量の離岸距離別分布状況が極めて良く一致している。これは、当所とOPRFで共通の統計値（総合エネルギー統計）を用いて総量補正を行ったためと思われる。

漁船の比較では、我が国沿岸200海里以内の燃料消費量はおおむね一致しているが、離岸距離別分布状況には明確な差が見られる。両者の排出量データ間のこうした“量的一致”及び“質的差異”は、漁船の燃料消費量として共通の統計値を使用してまったく異なる手法でデータを作成した点に起因するものと考えられる。

2.7.2 2nd IMO GHG Study によるデータとの比較検証

第2.5.9節でも述べたように、本研究において作成した船舶の現況排出量データのうち、内航船舶及び漁船に関しては信頼性の高い消費エネルギー実績値に基づき総量が抑えられていることから、おおむね実態に合った排出量データとなっているものと考えられる。一方で、外航船については燃料消費量やSO₂排出量等の実状を示す統計値が存在しないため、

本研究における推計結果を正值との比較によって検証することは困難である。

第2.7.1節でも述べたように、当所の排出量データは、現在入手可能なデータとして最も信頼性の高い船舶動静データを元に作成しており、全世界における外航船の燃料消費量を比較的高い精度で推定することが可能である。そこで本節では、2nd IMO GHG Study による推計値と比較を行うこととした。当所による全世界を対象とした外航船の現況燃料消費量(2005年)の推計値を、2nd IMO GHG Study による推計値と比較した結果を表-2.23に示す。

両者を比較した結果、当所による推計値は、IMOが解析値の不確実性を考慮した範囲内には収まらず、Best値に比べると約40%程度小さい結果となった。

当所が作成した現況排出量データでは、①船舶動静データには高速船が含まれていない(ただし網羅されている全船舶と比較すると僅少である)、②デー

タ解析の都合上動静データの一部をカットしている等、解析値が実際の燃料消費量よりも低くなる原因が何点か考えられるが、現段階では詳細は不明である。さらに定量的評価を行うためには、個別の要因に関する詳細な検討を要する。

表-2.23 全世界における外航船の燃料消費量の比較(当所及びIMO資料¹¹⁾)

	外航船による現況燃料消費量(全世界) [単位:100万ton]	
	2nd IMO GHG Study による推計値	当所排出量データ
Low bound	204	153
Best	253	
High bound	314	

3. 船舶による将来排出量データの作成

日本周辺海域を対象とした大気反応・拡散シミュレーション計算を行い、様々な条件下における将来の大気質を予測するためには、将来排出量データを作成する必要がある。本節では、将来排出量データを作成するためのベースとなる将来シナリオの設定、排出量データの作成方法及び作成した将来排出量データについて述べる。

3.1 船舶からの将来排出量データ作成の基本方針

将来において船舶から排出される大気汚染物質量を推定するためには、船舶に課される予定の各種環境規制、船舶活動量の変化等を考慮して将来シナリオを設定する必要がある。

船舶の将来排出量データ作成に関する基本方針については、国土交通省との協議等を踏まえて以下の通りとした。

- 将来予測の対象年は2020年とする。
- 将来予測の対象大気汚染物質はNO_x、SO₂、PM、一酸化炭素(CO)、メタン(CH₄)、非メタン揮発性炭化水素(NMVOC)、亜酸化窒素(N₂O)

とする。

- 将来、船舶に課される各種環境規制を組み合わせる複数の将来シナリオを設定し、これに対応する排出量データを作成する。
- 将来(2020年)排出量は、当所で作成した現況(2005年)排出量データ³¹⁾(本論文では第2章を参照のこと)の結果に、各将来シナリオの考え方にに基づき設定した係数(以下、「将来係数」とする)を乗じることにより作成する。現況排出量データでは、各メッシュを通過する個別船舶の排出量を累積することによって各グリッド内の現況排出量を計算しているが、この現況排出量を既知とし、将来における現況に対する比率を概算することによって将来排出量を計算する。この際、活動量(燃料消費量)及び排出係数を除く現況計算時の条件は変化しないものと仮定する(従って船種・サイズ・航行パターンの変化等による差については考慮しない)。将来排出量データ作成の考え方を模式的に整理したものを図-3.1に示す。

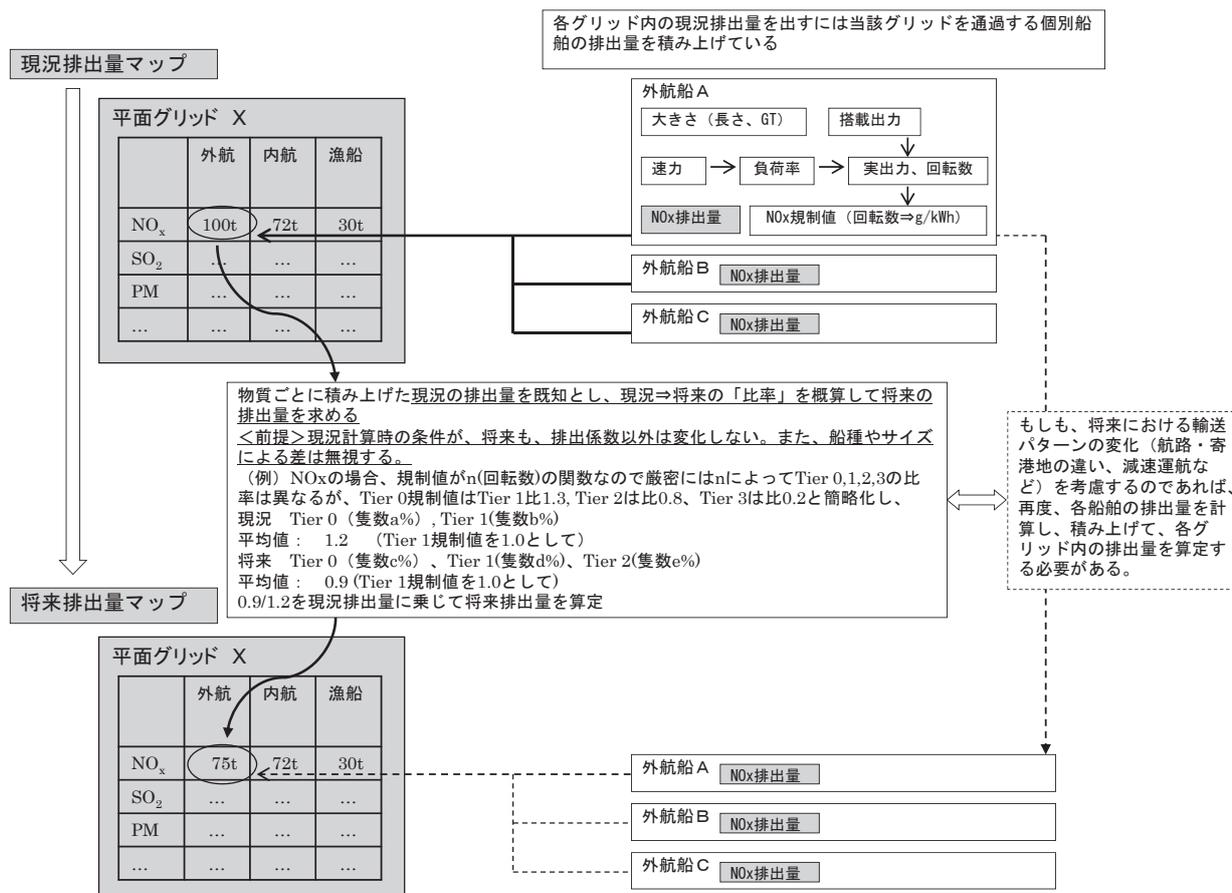


図-3.1 将来排出量データ作成の考え方

3.2 将来データ作成における活動量及び排出係数の設定方法

大気汚染物質の排出量は、第2.4.1節でも述べたように、基本的に”活動量”と”排出係数”の積で与えられるが、これらは大気汚染物質の種類や環境規制の内容によって異なる。

本研究で将来排出量を作成する際の、活動量及び排出係数の設定方法の概要について、以下に示す。

3.2.1 活動量の設定

船舶の活動量については、世界的には2008年頃から始まった不景気(リーマン・ショック)が船舶産業にも大きな影響を及ぼしている。現在多くの船会社では、減速航行(<60%MCR)、あるいは超減速航行(<20%MCR)を開始して、運航コストの削減を試みている。³²⁾

また、国内では2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震等により、内航産業及び漁業が甚大な打撃を受けたが、現在も十分な回復には至っていない状況にある。

2005年の現況排出量から2020年の将来排出量を作成するに当たっては、将来の経済発展に伴う活動量の伸びに加えて、リーマン・ショックや震災の影響を的確に反映させることが望ましい。しかしながら、前者については不確定要素が大きいため予想が容易でなく、後者についても現時点では定量的なデータを入手することが困難である。従って本研究では、活動量の増減については考慮せず一定(現状維持)と仮定し、外航船、内航船及び漁船の船齢構成の変化のみを考慮して将来データの作成を行った。大気汚染物質の排出という観点から見ると、リーマン・ショック及び東北地方太平洋沖地震はいずれも大きく減少方向に作用したと考えられるため、上記の”現状維持”という仮定は、環境影響評価の観点からはおそらく安全サイドの評価になるものと思われる。

外航船、内航船及び漁船の船齢構成の設定について、第3.2.1.1節～第3.2.1.3節に示す。

3.2.1.1 外航船の将来船齢構成

外航船の将来(2020年)船齢構成については、Lloyds-Fairplay データベースによる外航船の船種ごとの残存率曲線、及びIPCC(気候変動政府間パネル)の低成長シナリオ(B2)に基づき、IMO-GHG-Study で採用された荷動き量伸び率(コンテナ船 3.93% ; コンテナを除く外航 1.02%)を使用して求めた(表-3.1)。

表-3.1 2020年における外航船の船齢構成

2020年の船齢区分(外航船)	船齢構成割合
0～5年 (Tier3)	20.8%
5～10年 (Tier2)	27.4%
10～20年 (Tier1)	47.0%
20年～ (Tier0)	4.8%

3.2.1.2 内航船の将来船齢構成

内航船の将来(2020年)船齢構成については、2010年時点における船齢別隻数比率³³⁾に基づき、船齢30年で同数・同種の新造船に更新されると仮定して求めた(表-3.2)。

表-3.2 2020年における内航船の船齢構成

2020年の船齢区分(内航船)	船齢構成割合
0～5年 (Tier2/Tier3)	14.3%
5～10年 (Tier2)	14.7%
10～15年 (Tier1)	13.3%
15年～ (Tier0)	57.7%

3.2.1.3 漁船の将来船齢構成

漁船の将来(2020年)船齢構成については、2004年時点における漁船の船齢別隻数比率³⁴⁾に基づき、以下に示す簡略化のための仮定を置いて求めた(表-3.3)。

【簡略化のための仮定】

- 船齢30年で同数・同種の新造船に代替される。
- 新造後15年経過した際にエンジンを換装し、その時点における規制適合エンジンを搭載する。
- Tier3が免除され得る出力750kWのしきい値は、総トン数20GTのしきい値に対応するものとみなす。
- 将来にわたり規制対象外となる出力130kWのしきい値は、日本小型船舶検査機構の出力しきい値110kWと同一とみなす。(→カテゴリ2にはTier2までを適用する。カテゴリ1は規制を適用しない。)

表-3.3 2020年における漁船の船齢構成

2020年の船齢区分(漁船) 【カテゴリー1:150馬力(110kW) 未満、3GT未満を想定】	船齢構成割合
0～5年 (Tier2)	17.6%
5～10年 (Tier2)	24.7%
10～15年 (Tier1)	37.2%
15年～ (Tier0)	20.5%

2020年の船齢区分(漁船) 【カテゴリー2:150馬力(110kW) 以上、3～20GTを想定】	船齢構成割合
0～5年 (Tier2)	22.1%
5～10年 (Tier2)	17.1%
10～15年 (Tier1)	26.3%
15年～ (Tier0)	34.5%

2020年の船齢区分(漁船) 【カテゴリー3:20GT以上を想定】	船齢構成割合
0～5年 (Tier2/Tier3)	31.0%
5～10年 (Tier2)	16.5%
10～15年 (Tier1)	8.5%
15年～ (Tier0)	44.0%

3.2.2 排出係数の設定

船舶から排出される大気汚染物質は、その種類ごとに発生メカニズムや環境規制等によって変化すると考えられる。本研究における排出係数設定の基本的な考え方を以下に示す。

- (1) 出力時間当たり、あるいは燃料消費量当たりの排出量が使用燃料中の硫黄分にほぼ比例すると考えられる物質 (SO₂、PM) : 現況及び将来の使用燃料の硫黄分の違いを排出係数の式 (S 分の関数) に当てはめ、排出係数の将来/現況比を乗じるべき係数とする。
- (2) 発熱量 (燃料消費量) 当たりの排出量が一定と考えられる物質 (CO、CH₄、NMVOC、N₂O) : 排出係数の将来/現況比は 1 とする。
- (3) 排出量が船齢構成 (すなわち環境規制) に依存する物質 (NO_x) : NO_x 規制値は建造年に依存するため、現況における外航船、内航船及び漁船の船齢構成をもとに将来時点でのそれぞれの船齢構成を算出し、1 次規制 (Tier1)、2 次規制 (Tier2)、3 次規制 (Tier3) の各規制値を、それぞれに対応する船腹量 (隻数) で重み付け平均することにより、NO_x 排出係数の将

来/現況比を算出して乗じるべき係数とする。

3.3 将来シナリオの設定

2020 年を想定した将来シナリオの設定に当たり、船舶に対してかかる環境規制としてまず SO_x・PM 規制と NO_x 規制を想定した。現時点ではグローバル S 分規制の開始時期は 2020 年あるいは 2025 年のいずれか未定であることから、2020 年の段階でグローバル S 分規制が開始されていないケースシリーズ A と開始されているケースシリーズ B を考え、さらに 3 次規制として我が国周辺海域に ECA for N、ECA for S (以下、それぞれ ECA-N、ECA-S で示す) をそれぞれ設定するか否かによって分類した。すなわち、将来シナリオとして表-3.4 に示す 8 ケースを設定した。

表-3.4 設定した将来シナリオ (8 ケース)

将来シナリオ	グローバル S 分規制	ECA-N設定	ECA-S設定
シナリオ A1	なし	なし	なし
シナリオ A2		あり	なし
シナリオ A3		なし	あり
シナリオ A4		あり	あり
シナリオ B1	あり	なし	なし
シナリオ B2		あり	なし
シナリオ B3		なし	あり
シナリオ B4		あり	あり

以上に加えて、CO₂ 排出 (EEDI) 規制の影響についても考慮した。2011 年 7 月に IMO の MEPC62 で採択された MARPOL 附属書 VI 改正により、一定サイズ以上の外航船は、その燃費効率 (EEDI: CO₂ grams/ton mile で示される) を計算し、一定の基準値を満たす必要がある。当該規制により、新造船の燃料消費は、同じ船種・同じサイズの既存船よりも確実に減少し、この影響は CO₂ のみならず燃料の消費に比例して排出されるすべての排出物質 (NO_x、SO₂、PM 等) に等しい比率で影響が及ぶ。EEDI の規制値は船種・建造時期により異なるが、今回は簡単のため、EEDI 規制による効果を外航船 (航行・停泊) に対して一律に上乘せして考えた。すなわち、外航船については、2020 年の SO₂ 及び NO_x 排出量を 2005 年比で 6.0% 減じて算定するものとした。

また、現況で使用されている残渣油 (C 重油) は、SO_x・PM 規制への対応に伴って留出油 (A 重油) に切り替わることが予想されるため、燃料切り替えによる Fuel-NO_x の減少分 (7%、アメリカ合衆国及びカナダ連邦による IMO への ECA 提案文書における値) についても考慮した。すなわち、2020 年にグローバル S 分規制あるいは ECA-S が適用されるケースでは燃料切り替えに

よる Fuel-NOx の減少分を勘案し、2020年の NOx 排出量を 2005年比で 7.0%減じて算定するものとした。

3.4 各将来シナリオに対する将来係数の計算

第 3.3 節で設定した各将来シナリオに対して、大気汚染物質に乗じるべき将来係数を外航船、内航船及び漁船別に計算した。

第 2.5.7 節でも述べたように、SO₂ 及び PM の燃料消費量当たりの排出量は、燃料中の S 分濃度にほぼ比例する。現況及び将来排出係数における燃料中 S 分濃度[%]については、環境規制に応じて表-3.5 のように設定した。ここで、外航船の C 重油の将来設定値としては、IMO による Sulfur monitoring programme³⁵⁾ における 2010 年の値 (2.61%) を用いることとした。

表-3.5 燃料中 S 分濃度の設定値

燃料中 硫黄(S)分	現況 (2005年) における 設定値	将来(2020年)における設定値		
		グローバル S分規制 なしの場合	グローバル S分規制 ありの場合	ECA-S ありの場合
A重油	0.61%	0.61%	0.5%	0.1%
C 重油				
外航船	2.7%	2.61%		
内航船・漁船	2.53%	2.53%		

すべての将来シナリオについて計算手順を示すと膨大な内容となるため、ここではシナリオ B4 を例にとり、将来係数を計算する手順と計算結果を以下に示す。

3.4.1 将来係数の計算事例

表-3.4 に示す通り、シナリオ B4 は、2020 年にグローバル S 分規制が施行され、かつ ECA-N 及び ECA-S による 3 次規制 (Tier3) も実施されるという、現時点で考え得る限りにおいて最も厳しい規制がかかるケースに相当する。

シナリオ B4 における将来係数を計算する手順を、大気汚染物質ごとに以下に示す。

3.4.1.1 NOx 排出に関する将来係数

(a) 外航船 (航行時)

表-3.1 において、各船齢区分における現況 (2005 年なので Tier1) 規制値比はそれぞれ、船齢区分 0~5 年 (Tier3) で -80%、船齢区分 5~10 年 (Tier2) で -20%、船齢区分 10~20 年 (Tier1) で ±0%、船齢区分 20 年~ (Tier0) で +30% である。

現況排出量データでは、外航船の主機で使用される燃料については、一部の LNG/LPG 船で

LNG と仮定している。しかしこれらは量的には約 3.5% と微量で残りはすべて C 重油であるため、ここでは C 重油 100% と仮定する。このとき、すべての燃料に関して燃料切り替えによる Fuel NOx の減少分 (7%) を考慮して NOx 排出係数に上乘せすれば、NOx 排出係数の将来/現況比は ECA-N 内では 0.581、ECA-N 外では 0.672 と求まる (表-3.6)。なお、現況 (2005 年) においては、外航船全体の 10% が 1 次規制 (Tier1) に対応し、残りの 90% は 1 次規制未対応 (Tier0) という仮定のもとに、現況 NOx 排出係数を 1.27 と仮定した。

表-3.6 外航船 (航行時) の NOx 将来係数の計算

2020年における 船齢区分	外航船 (航行時) (シナリオB4)			備考
	NOx排出係数 (Tier1を基準とした 相対値)		船舶 構成割合	
	ECA-N内	ECA-N外		
0~5年 (Tier2/Tier3)	0.2×0.93	0.8×0.93	0.208	燃料切り替えによるFuel-NOxの減少分を勘案して0.93を乗じる
5~10年 (Tier2)	0.8×0.93	0.8×0.93	0.274	
10~20年 (Tier1)	1×0.93	1×0.93	0.470	
20年~ (Tier0)	1.3×0.93	1.3×0.93	0.048	
平均 (Tier1比)	0.738	0.854	—	
NOx排出係数の 将来/現況比	0.581	0.672	—	船舶構成を勘案して2005年の排出係数を1.27と仮定

さらに、外航船に対する EEDI 規制の影響としてそれぞれに 0.94 を乗じれば、求めるべき外航船 (航行時) の将来係数は、ECA-N 内では **0.546**、ECA-N 外では **0.632** となる。

(a-2) 外航船 (停泊時)

停泊時に関しても、基本的な計算手法は航行中と同一である。従って、外航船 (停泊時) の将来係数は航行中の値と等しくなる (ECA-N 内では **0.546**、ECA-N 外で **0.632**)。

(b-1) 内航船 (航行時)

内航船 (航行時) の将来係数についても外航船 (航行時) と同様であり、表-3.2 等に基づき表-3.7 のように求められる。すなわち、求めるべき内航船 (航行時) の将来係数は、ECA-N 内では **0.778**、ECA-N 外では **0.843** となる。

なお、燃料油切り替えによる Fuel NOx の減少分については、A 重油と C 重油の使用比率によって按分した値を使用した。表-2.21 によれば、現況排出量データにおける内航船 (航行時) の燃料消費量 (我が国沿岸 200 海里以内) は、A 重油 : 2,620,000[ton/year]、C 重油 : 832,000[ton/year] であり、A 重油と C 重油の使用比率は 76:24 となっている。本来、A 重油と C 重油の使用比率は船型や海域等により変化するが、ここでは簡略化の

ため、A重油とC重油の使用比率は同一と仮定し、燃料油切り替えによるFuel NOxの減少分は一律に $7\% \times 0.24 = 1.7\%$ であるものとした。

表-3.7 内航船（航行時）のNOx将来係数の計算

2020年における船齢区分	内航船（航行時）（シナリオB4）			備考
	NOx排出係数（Tier1を基準とした相対値）		船舶構成割合	
	ECA-N内	ECA-N外		
0～5年（Tier3/Tier2）	0.2×0.983	0.8×0.983	0.143	燃料切り替えによるFuel-NOxの減少分（1.7%）を勘案して0.983を乗じる
5～10年（Tier2）	0.8×0.983	0.8×0.983	0.147	
10～15年（Tier1）	1×0.983	1×0.983	0.133	
15年～（Tier0）	1.3×0.983	1.3×0.983	0.577	
平均（Tier1比）	1.012	1.096	—	
NOx排出係数の将来/現況比	0.778	0.843	—	船舶構成を勘案して2005年の排出係数を1.3と仮定

(b-2) 内航船（停泊時）

停泊時に関しても、基本的な計算手法は航行時と同一である。表-2.21によれば、現況排出量データにおける内航船（停泊時）の燃料消費量（我が国沿岸200海里以内）は、A重油：418,000[ton/year]、C重油：317,000[ton/year]であり、A重油とC重油の使用比率は57:43となっている。燃料油切り替えによるFuel NOxの減

少分は一律に $7\% \times 0.43 = 3.0\%$ であるものとした。

従って、内航船（停泊時）の将来係数は、ECA-N内では、 $0.778 \div 0.983 \times (1-0.03) = \mathbf{0.768}$
ECA-N外では、 $0.843 \div 0.983 \times (1-0.03) = \mathbf{0.832}$ と求められる。

(c) 漁船（航行時）

漁船については、サイズによる隻数の差が大きいこと、小型漁船は活動範囲が限定されておりNOx規制対象から外されていること等のため、外航船、内航船とは異なる推計方法をとる必要がある。漁船の現況排出量データでは、停泊時については考慮せず航行時のみを考えているため、将来排出量データでもこれに準じて考える。

漁船（航行時）の将来係数については、第3.2.1.3節の表-3.3及び簡略化のための仮定に基づき、表-3.8のように求められる。

表-3.8の各漁業形態区分への適用は表-3.9の通りとする。沖合漁業は10～200GTを想定しており、本来カテゴリ2とカテゴリ3が混在しているが、ここでは簡略化のため、12海里をしきい値としてカテゴリ分けするという割り切りを行った。

表-3.8 漁船（航行時）のNOx将来係数の計算

2020年における船齢区分	漁船（航行時）（シナリオB4）								
	20GT未満						カテゴリ3 20GT以上		
	カテゴリ1 150馬力（110kW）未満 3GT未満を想定			カテゴリ2 150馬力（110kW）以上 3～20GTを想定					
	NOx排出係数（Tier1を基準とした相対値）		船舶構成割合	NOx排出係数（Tier1を基準とした相対値）		船舶構成割合	NOx排出係数（Tier1を基準とした相対値）		船舶構成割合
ECA-N内	ECA-N外	ECA-N内		ECA-N外	ECA-N内		ECA-N外		
0～5年（Tier0/Tier2/Tier3）	1.3		17.6	0.8		22.1	0.2	0.8	31.0
5～10年（Tier0/Tier2）	1.3		24.7	0.8		17.1	0.8	0.8	16.5
10～15年（Tier0/Tier1）	1.3		37.2	1		26.3	1	1	8.5
15～20年（Tier0/Tier2/Tier3）	1.3		1.8	0.8		4.7	0.2	0.8	6.1
20～25年（Tier0/Tier2）	1.3		6.8	0.8		11.7	0.8	0.8	10.0
25年～（Tier0/Tier1）	1.3		12.0	1		18.1	1	1	27.8
平均	1.3		—	0.889		—	0.649	0.872	—
NOx排出係数の将来/現況比 （※現況のNOx排出係数を1.3と仮定）	1.0		—	0.684		—	0.499	0.671	—

表-3.9 漁船形態別のNOx将来係数（航行時）の設定

漁業形態区分	漁船（航行時）（シナリオB4）				
	活動範囲	燃料種類	NOx排出係数の将来/現況比		備考
			ECA-N内	ECA-N外	
海面養殖業・沿岸漁業	0～12海里	軽油・A重油・C重油	1.0		カテゴリ1を適用
沖合漁業	0～12海里	軽油・A重油・C重油	0.684		カテゴリ2を適用
	12～200海里	軽油・A重油・C重油	0.499	0.671	カテゴリ3を適用

現況排出量データでは、漁船（航行時）の主機による燃料消費量（我が国沿岸 200 海里以内）は表-3.10 に示す通りとなっている。これらのうち C 重油の使用量は漁業形態によらず 1%程度と微量であるため、留出油の使用による Fuel NOx 減少については考えないこととした。

表-3.10 現況排出量データにおける漁船（航行時）の燃料消費量（我が国沿岸 200 海里以内）

現況（2005年） 排出量データ 漁船（航行時） 燃料消費量	軽油 [ton]	A重油 [ton]	C重油 [ton]	合計
海面養殖業 ・沿岸漁業	477,000	629,000	7,710	1,110,000
沖合漁業	15,300	804,000	16,800	836,000

3.4.1.2 PM 排出に関する将来係数

(a-1) 外航船（航行時）

第 2.5.7.2 節で述べたように、現況排出量データでは外航船、内航船及び漁船ともに主機／補機ディーゼル機関に対して、PM 排出係数を式(3.1)により設定している。

$$(\text{PM 排出係数}) [\text{g/kWh}] = 0.585 \times S (\%) + 0.281 \quad (3.1)$$

第 3.4.1.1 節における仮定と同様に、外航船の燃料は C 重油のみと考えると、シナリオ B4 に対応する外航船（航行時）の PM 排出係数の将来／現況比は、次のように計算される。

① ECA-S 内：

C 重油の燃料中 S 分の推移は、2.7%（2005 年）→0.1%（2020 年）であるから、
 $(0.585 \times 0.1 + 0.281) \div (0.585 \times 2.7 + 0.281) = 0.182$

② ECA-S 外：

C 重油の燃料中 S 分の推移は、2.7%（2005 年）→0.5%（2020 年）であるから、
 $(0.585 \times 0.5 + 0.281) \div (0.585 \times 2.7 + 0.281) = 0.308$

さらに、外航船に対する EEDI 規制の影響としてそれぞれに 0.94 を乗じれば、求めるべき外航船（航行時）の将来係数は、ECA-S 内では **0.172**、ECA-S 外では **0.290** となる。

(a-2) 外航船（停泊時）

現況排出量データでは、停泊時については補機

ディーゼル及び補機ボイラの稼働を想定している。このうち補機ディーゼルから発生する PM については航行中の式と同一、補機ボイラから発生する PM については 2.5 [g/kg-fuel] とそれぞれ設定している（この値は、補機ディーゼルで S 分 0.5%程度 の A 重油を燃やした際の PM 排出量とほぼ等しい）。ここでは簡単のため、補機ボイラはすべて補機ディーゼルとみなし、外航船（航行時）に対する PM 排出係数の式がそのまま使用できるものと仮定する。この場合、求めるべき外航船（停泊時）の将来係数は、外航船（航行時）と同一となる（ECA-S 内で **0.172**、ECA-S 外で **0.290**）。

(b-1) 内航船（航行時）

PM 排出係数の式(3.1)を用いて、各燃料の燃料中 S 分の推移と内航船（航行時）による A/C 重油の使用比率（A 重油：C 重油 = 76:24）を用いて重み付けをすれば（表-3.11）、求めるべき内航船（航行時）の PM 将来係数は、ECA-S 内では **0.374**、ECA-S 外では **0.631** となる。

(b-2) 内航船（停泊時）

補機ディーゼル及び補機ボイラから排出される PM の設定については、外航船（停泊時）の場合と同一である。簡単のため、補機ボイラはすべて補機ディーゼルとみなし、内航船（航行）に対する PM 排出係数の式がそのまま使用できるものと仮定する。各燃料の燃料中 S 分の推移と内航船による A/C 重油の使用比率（A 重油：C 重油 = 57:43）を用いて重み付けをすれば（表-3.12）、求めるべき内航船（停泊時）の PM 将来係数は、ECA-S 内では **0.303**、ECA-S 外では **0.511** となる。

(c) 漁船（航行時）

現況排出量データで漁船の使用燃料とされている軽油、A 重油、C 重油のうち、軽油については A/C 重油と比べて S 分含有率が 0.005%程度と極端に低いため、PM 排出にほとんど寄与しない。外航船（航行時）に適用した PM 排出係数の式を用いて、各燃料の燃料中 S 分の推移と漁船（航行時）による燃料使用量（表-3.10）を用いて重み付けをすれば、漁船（航行時）の将来係数は、表-3.13 のように求められる。

表-3.11 内航船（航行時）のPM将来係数の計算

内航船（航行時） （シナリオB4）		A重油		C重油		燃料消費量 による換算 PM排出係数 [g/kWh]	PM排出係数 将来/現況比
		S分 [%]	PM排出係数 [g/kWh]	S分 [%]	PM排出係数 [g/kWh]		
現況（2005年）		0.61	0.6379	2.53	1.761	0.9086	1
将来（2020年）	ECA-S内	0.1	0.3395	0.1	0.3395	0.3395	0.374
	ECA-S外	0.5	0.5735	0.5	0.5735	0.5735	0.631

表-3.12 内航船（停泊時）のPM将来係数の計算

内航船（停泊時） （シナリオB4）		A重油		C重油		燃料消費量 による換算 PM排出係数 [g/kWh]	PM排出係数 将来/現況比
		S分 [%]	PM排出係数 [g/kWh]	S分 [%]	PM排出係数 [g/kWh]		
現況（2005年）		0.61	0.6379	2.53	1.761	1.122	1
将来（2020年）	ECA-S内	0.1	0.3395	0.1	0.3395	0.3395	0.303
	ECA-S外	0.5	0.5735	0.5	0.5735	0.5735	0.511

表-3.13 漁船（航行時）のPM将来係数の計算

漁船（航行時） （シナリオB4）		軽油		A重油		C重油		燃料消費量 による換算 PM排出係数 [g/kWh]	PM排出係数 将来/現況比	
		S分 [%]	PM排出係数 [g/kWh]	S分 [%]	PM排出係数 [g/kWh]	S分 [%]	PM排出係数 [g/kWh]			
現況（2005年）	海面養殖業 ・沿岸漁業	(0.005)	0	0.61	0.6379	2.53	1.761	0.3725	1	
	沖合漁業	(0.005)	0	0.61	0.6379	2.53	1.761	0.6488	1	
将来（2020年）	ECA-S 内	海面養殖業 ・沿岸漁業	(0.005)	0	0.1	0.3395	0.1	0.3395	0.1941	0.521
		沖合漁業	(0.005)	0	0.1	0.3395	0.1	0.3395	0.3333	0.514
	ECA-S 外	海面養殖業 ・沿岸漁業	(0.005)	0	0.5	0.5735	0.5	0.5735	0.3279	0.880
		沖合漁業	(0.005)	0	0.5	0.5735	0.5	0.5735	0.5630	0.868

3.4.1.3 SO₂ 排出に関する将来係数

(a-1) 外航船（航行時）

第2.5.7.3節で述べたように、現況排出量データでは、外航船、内航船及び漁船ともに主機/補機ディーゼル機関に対して、SO_x量からPM中のサルフェート相当量を減じることにより、SO₂排出係数を式(3.2)を用いて計算している。

$$(\text{SO}_2 \text{ 排出係数}) [\text{g/kg-fuel}] = 20 \times \text{S}[\%] - \{0.267 \times \text{S}[\%] - 0.009\} [\text{g/kWh}] / (\text{機関の燃料消費率}) [\text{kg-fuel/kWh}] \quad (3.2)$$

機関の燃料消費率は船種及び総トン数により異なるが、ここでは簡単のため、航行中については主機の中央値(0.195[kg-fuel/kWh])と仮定する。このとき、SO₂排出係数は式(3.3)で与えられる。

$$(\text{外航船・内航船（航行時）のSO}_2 \text{ 排出係数}) [\text{kg-fuel}] = 18.63 \times \text{S}(\%) + 0.046 \quad (3.3)$$

第3.4.1.1節における仮定と同様に、外航船の燃料はC重油のみと考えると、シナリオB4に対応する外航船（航行時）のSO₂排出係数の将来/現況比は、次のように計算される。

① ECA-S内：

C重油の燃料中S分の推移は、2.7%（2005年）→0.1%（2020年）であるから、
 $(18.63 \times 0.1 + 0.046) \div (18.63 \times 2.7 + 0.046) = 0.0379$

② ECA-S外：

C重油の燃料中S分の推移は、2.7%（2005年）→0.5%（2020年）であるから、
 $(18.63 \times 0.5 + 0.046) \div (18.63 \times 2.7 + 0.046) = 0.186$

さらに、外航船に対するEEDI規制の影響としてそれぞれに0.94を乗じれば、求めるべき外航船（航行時）のSO₂将来係数は、ECA-S内では**0.0356**、ECA-S外では**0.175**となる。

(a-2) 外航船（停泊時）

現況排出量データでは、停泊時については補機

ディーゼル及び補機ボイラの稼働を想定している。このうち補機ディーゼルから発生するSO₂については航行中の式と同一としているが、補機ボイラから発生するSO₂についてはPMのサルフェート相当量を考慮していない。しかしながら、PMのサルフェート分はSO₂と比べるとたかだか数%に過ぎないため、ここでは補機ディーゼル及び補機ボイラの両方に対して外航船(航行時)に対するSO₂排出係数の式がそのまま使用できるものと仮定する。

機関の燃料消費率については、航行時とは異なる設定にする必要がある。ここでは簡単のため、補機ディーゼルの中間値(0.225 [kg-fuel/kWh])と仮定すると、SO₂排出係数は式(3.4)で与えられる。

(外航船・内航船(停泊時)のSO₂排出係数)
 $[g/kg-fuel] = 18.81 \times S[\%] + 0.040$ (3.4)

従って、シナリオB4に対応する外航船(停泊時)のSO₂排出係数の将来/現況比は、次のように計算される。

①ECA-S内:

$$(18.81 \times 0.1 + 0.040) \div (18.81 \times 2.7 + 0.040) = 0.0378$$

②ECA-S外:

$$(18.81 \times 0.5 + 0.040) \div (18.81 \times 2.7 + 0.040) = 0.186$$

さらに、外航船に対するEEDI規制の影響としてそれぞれに0.94を乗じれば、求めるべき外航船(停泊時)のSO₂将来係数は、ECA-S内では**0.0355**、ECA-S外では**0.175**となる。

(b-1) 内航船(航行時)

式(3.3)を用いてPMの場合と同様にすれば表-3.14が得られる。求めるべき内航船(航行時)のSO₂将来係数は、ECA-S内では**0.0953**、ECA-S外では**0.467**となる。

(b-2) 内航船(停泊時)

式(3.4)を用いてPMの場合と同様にすれば表-3.15が得られる。求めるべき内航船(停泊時)のSO₂将来係数は、ECA-S内では**0.0709**、ECA-S外では**0.349**となる。

(c) 漁船(航行時)

式(3.2)において、漁船の機関の燃料消費率としてSecond IMO GHG Study2009における小型一般貨物船の値(0.225 [kg-fuel/kWh])を用いると、式(3.5)が得られる。

(漁船(航行時)のSO₂排出係数) [g/kg-fuel]
 $= 18.81 \times S[\%] + 0.040$ (3.5)

式(3.5)を用いてPMの場合と同様にすれば表-3.16が得られる。

表-3.14 内航船(航行時)のSO₂将来係数の計算

内航船(航行時) (シナリオB4)	A重油		C重油		燃料消費量 による換算 SO ₂ 排出係数 [g/kg-fuel]	SO ₂ 排出係数 将来/現況比	
	S分 [%]	SO ₂ 排出係数 [g/kg-fuel]	S分 [%]	SO ₂ 排出係数 [g/kg-fuel]			
現況(2005年)	0.61	11.41	2.53	47.18	20.03	1	
将来(2020年)	ECA-S内	0.1	1.909	0.1	1.909	1.909	0.0953
	ECA-S外	0.5	9.361	0.5	9.361	9.361	0.467

表-3.15 内航船(停泊時)のSO₂将来係数の計算

内航船(停泊時) (シナリオB4)	A重油		C重油		燃料消費量 による換算 SO ₂ 排出係数 [g/kg-fuel]	SO ₂ 排出係数 将来/現況比	
	S分 [%]	SO ₂ 排出係数 [g/kg-fuel]	S分 [%]	SO ₂ 排出係数 [g/kg-fuel]			
現況(2005年)	0.61	11.41	2.53	47.18	26.84	1	
将来(2020年)	ECA-S内	0.1	1.909	0.1	1.909	1.909	0.0709
	ECA-S外	0.5	9.361	0.5	9.361	9.361	0.349

表－3.16 漁船（航行時）のSO₂将来係数の計算

漁船（航行時） （シナリオB4）		軽油		A重油		C重油		燃料消費量 による換算 SO ₂ 排出係数 [g/kg-fuel]	SO ₂ 排出係数 将来/現況比	
		S分 [%]	SO ₂ 排出係数 [g/kg-fuel]	S分 [%]	SO ₂ 排出係数 [g/kg-fuel]	S分 [%]	SO ₂ 排出係数 [g/kg-fuel]			
現況（2005年）	海面養殖業 ・沿岸漁業	(0.005)	0	0.61	11.51	2.53	47.63	6.830	1	
	沖合漁業	(0.005)	0	0.61	11.51	2.53	47.63	12.03	1	
将来（2020年）	ECA-S 内	海面養殖業 ・沿岸漁業	(0.005)	0	0.1	1.921	0.1	1.921	1.098	0.161
		沖合漁業	(0.005)	0	0.1	1.921	0.1	1.921	1.886	0.157
	ECA-S 外	海面養殖業 ・沿岸漁業	(0.005)	0	0.5	9.445	0.5	9.445	5.400	0.791
		沖合漁業	(0.005)	0	0.5	9.445	0.5	9.445	9.272	0.771

3.4.1.4 その他の大気汚染物質の排出に関する将来係数

先にも述べたように、大気汚染物質のうち燃焼由来のCO、CH₄、NMVOC、N₂Oに関しては、単位発熱量当たりの排出量が固定されている物質である。そこで、外航船についてのみEEDI規制の影響としてそれぞれに0.94を乗じる。従って、これらの大気汚染物質の外航船（航行時、停泊時）の将来係数は**0.94**、内航船（航行時、停泊時）及び漁船（航行時）の将来係数は**1**となる。

3.4.2 各将来シナリオに対する将来係数

第3.3節で設定した各将来シナリオに対して、大気汚染物質に乘じるべき将来係数を外航船、内航船及び漁船別に計算した結果のうち、SO₂及びNO_xについて整理したものを表－3.17及び表－3.18に示す。

各将来シナリオに対する将来排出量データは、当該シナリオの現況排出量メッシュデータに対して、船舶種類・大気汚染物質ごとに表－3.16～表－3.17等の将来係数を乗じることにより作成することができる。

表－3.17 将来係数一覧（シナリオAシリーズ）

船舶種類				シナリオA1		シナリオA2		シナリオA3		シナリオA4		
				SO ₂	NO _x							
外航船	ECA内	停泊	/	/	0.909	0.587	0.0355	0.632	0.0355	0.546		
		航行	/	/	0.909	0.587	0.0356	0.632	0.0356	0.546		
	ECA外	停泊	0.909	0.679	0.909	0.679	0.909	0.679	0.909	0.679		
		航行	0.909	0.679	0.909	0.679	0.909	0.679	0.909	0.679		
内航船	ECA内	停泊	/	/	1	0.792	0.0709	0.832	0.0709	0.768		
		航行	/	/	1	0.792	0.0953	0.843	0.0953	0.778		
	ECA外	停泊	1	0.858	1	0.858	1	0.858	1	0.858		
		航行	1	0.858	1	0.858	1	0.858	1	0.858		
漁船	ECA内	海面養殖業・沿岸漁業	0～12海里	航行	/	/	1	1	0.161	1	0.161	
		沖合漁業	0～12海里	航行	/	/	1	0.684	0.157	0.684	0.157	
			12～200海里	航行	/	/	1	0.499	0.157	0.671	0.157	
	ECA外	海面養殖業・沿岸漁業	0～12海里	航行	1	1	1	1	1	1	1	
		沖合漁業	0～12海里	航行	1	0.684	1	0.684	1	0.684	1	0.684
			12～200海里	航行	1	0.671	1	0.671	1	0.671	1	0.671

表-3.18 将来係数一覧 (シナリオ B シリーズ)

船舶種類					シナリオB1		シナリオB2		シナリオB3		シナリオB4	
					SO ₂	NO _x						
外航船	ECA内	停泊	/	/	0.175	0.546	0.0355	0.632	0.0355	0.546		
		航行	/	/	0.175	0.546	0.0356	0.632	0.0356	0.546		
	ECA外	停泊	0.175	0.632	0.175	0.632	0.175	0.632	0.175	0.632		
		航行	0.175	0.632	0.175	0.632	0.175	0.632	0.175	0.632		
内航船	ECA内	停泊	/	/	0.349	0.768	0.0709	0.832	0.0709	0.768		
		航行	/	/	0.467	0.778	0.0953	0.843	0.0953	0.778		
	ECA外	停泊	0.349	0.832	0.349	0.832	0.349	0.832	0.349	0.832		
		航行	0.467	0.843	0.467	0.843	0.467	0.843	0.467	0.843		
漁船	ECA内	海面養殖業・沿岸漁業	0~12海里	航行	/	/	0.790	1	0.161	1	0.161	1
		沖合漁業	0~12海里	航行	/	/	0.771	0.684	0.157	0.684	0.157	0.684
			12~200海里	航行	/	/	0.771	0.499	0.157	0.671	0.157	0.499
	ECA外	海面養殖業・沿岸漁業	0~12海里	航行	0.790	1	0.790	1	0.790	1	0.790	1
		沖合漁業	0~12海里	航行	0.771	0.684	0.771	0.684	0.771	0.684	0.771	0.684
			12~200海里	航行	0.771	0.671	0.771	0.671	0.771	0.671	0.771	0.671

3.5 将来排出量データに関する考察

本節では、先に想定した8ケースの将来シナリオに対して、将来(2020年)の時点で船舶燃焼由来のNO_x及びSO₂排出量が現況(2005年)からどのように変化するかをそれぞれ推算し、環境規制の効果について比較・考察する。

NO_x及びSO₂排出量の推算対象エリアは我が国沿岸200海里以内(図-3.2で白色で示したエリア)とした。

表-3.4の各将来シナリオに対する船舶燃焼由来のNO_x及びSO₂排出量を、船舶種類別に推算した結果の数値一覧を表-3.19~表-3.20に、これらの結果をグラフに表したものを図-3.3~図-3.6にそれぞれ示す。ECA-N及びECA-Sを設定したケースでは、設定海域範囲の効果を見るため、ECA設定海域を沿岸12海里、沿岸50海里及び沿岸200海里的3通りについて推算した。

これらの結果より分かることを整理すると、以下のようになる。

(a) SO₂排出量について

- 2020年にグローバルS分規制もECA-S設定も適用されない場合におけるSO₂総排出量は、現況に比べて約93%にとどまる。
- 2020年にグローバルS分規制が開始されると、SO₂総排出量は現況に比べて約24%まで削減される。船舶種類別(外航船、内航船、漁船)で見ると、それぞれ現況の約18%、約44%、約78%まで削減される。この差異は、現況では外航船が燃料中S分の高いC重油を多く使用しているのに比べて、内航船では使用燃料の約半分、漁船では使用燃料の大部分が、燃料中S分の比較的低いA重油であることに起因するものである。
- 2020年にグローバルS分規制なしで我が国の沿岸12海里、50海里及び200海里にECA-Sが設定されると、SO₂総排出量は現況に比べてそれぞれ約49%、約28%、約5%まで削減される。すなわち、グローバルS分規制と同等以上のSO₂削減効果を得るためには、少なくとも我が国沿岸50海里以上の海域をECA-Sに設定

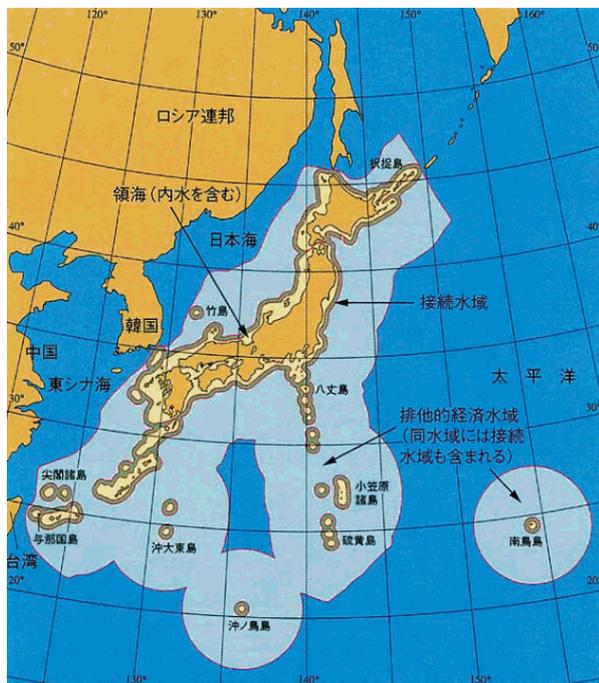


図-3.2 NO_x/SO₂排出量の推算対象エリア [白色部分：領海+排他的経済水域 (EEZ)]

する必要がある。

- 2020年にグローバルS分規制ありで、かつ我が国の沿岸12海里、50海里及び200海里にECA-Sが設定されると、SO₂総排出量は現況に比べてそれぞれ約14%、約9%、約5%まで削減され、SO₂総排出量削減の観点からは最大の効果が得られる。

(b) NO_x 排出量について

- 2020年にECA-Nが設定されない場合、新造船への更新が徐々に進むこと等により、2020年のNO_x総排出量は現況の約74%（グローバルS分規制なし）から約71%（グローバルS分規制あり）程度まで削減される。なお、グローバルS分規制の有無がNO_x排出量に与える影響は約3%程度と僅少である。
- 我が国の沿岸12海里、50海里及び200海里にECA-Nが設定されると、NO_x総排出量は現況の約63~71%程度まで削減される。ただしこのうちECA-Nを設定したことによるNO_x削減効果は、（2020年の段階では）設定範囲最大（200海里）の場合でもたかだか8%程度に過ぎない。これは、ECA-N設定の効果が船舶代替の進行に伴って徐々に現われるという性質を持つためである。従ってNO_xの場合はSO₂と

は異なり、その効果に関しては数十年のスパンで見ても必要がある。

本節では、2020年にグローバルS分規制及びECA設定を併用することで、SO₂及びNO_xの総排出量の削減の観点からは最大の効果が得られるという結果が得られた。しかしながら実際にECAが設定されると、船舶側でSO₂スクラバを搭載する等、ECA対応に伴うコスト増加が予想されるため、ECA設定の適否に関しては、費用対効果の観点も含めて慎重に検討する必要がある。

また、本節では、複数の将来シナリオに対して、船舶から排出されるNO_x及びSO₂の排出量が現況からどのように変化するかを推算し、その結果について比較・考察したが、これはあくまでも各種環境規制の効果を一次レベルで評価を試みたものである。PM_{2.5}及びO₃のような二次生成粒子を含む船舶由来の大気汚染物質が陸域に与える影響や、船舶以外の排出源（国内あるいはアジア大陸由来の人為由来の大規模排出源、あるいは火山、植生等の自然由来の排出源）と比較した場合の寄与度等を適切に評価するためには、CMAQ等の拡散・大気反応シミュレーション計算の結果を詳細に解析する必要があることを附記しておく。

表-3.19 船舶燃焼由来のSO₂/NOx 将来排出量の推定結果 (シナリオ A シリーズ)

現況	将来 (シナリオA1)		将来 (シナリオA2)			将来 (シナリオA3)			将来 (シナリオA4)		
	グローバルS分規制なし/ECA設定なし	グローバルS分規制あり/ECA-N設定あり	ECA設定12海里	ECA設定50海里	ECA設定200海里	ECA設定12海里	ECA設定50海里	ECA設定200海里	ECA設定12海里	ECA設定50海里	ECA設定200海里
SO ₂ 年間排出量 [ton/year]	外航船 (係留時+航行時)	382,053	382,053	382,053	382,053	227,197	131,997	14,961	227,197	131,997	14,961
	内航船 (係留時+航行時)	92,400	92,400	92,400	92,400	26,049	9,402	8,362	26,049	9,402	8,362
	漁船 (航行時のみ)	18,100	18,100	18,100	18,100	8,894	5,968	2,875	8,894	5,968	2,875
NOx年間排出量 [ton/year]	船舶総計 (日本周辺200海里内) [※カクコ内は現況比]	530,800	492,553 [93%]	492,553 [93%]	492,553 [93%]	262,140 [49%]	147,367 [28%]	26,198 [5%]	262,140 [49%]	147,367 [28%]	26,198 [5%]
	外航船 (係留時+航行時)	777,700	528,058	480,706	456,510	513,737	503,867	491,506	487,533	459,603	424,624
	内航船 (係留時+航行時)	277,500	238,241	224,414	219,915	234,763	233,807	233,740	221,176	216,080	215,722
NOx年間排出量 [ton/year]	漁船 (航行時のみ)	129,000	110,517	107,145	103,585	110,517	110,517	110,517	110,517	107,145	103,585
	船舶総計 (日本周辺200海里内) [※カクコ内は現況比]	1,184,200	876,816 [74%]	834,957 [71%]	808,061 [68%]	780,010 [66%]	859,017 [73%]	848,191 [72%]	819,226 [69%]	782,828 [66%]	743,931 [63%]

表-3.20 船舶燃焼由来のSO₂/NOx 将来排出量の推定結果 (シナリオ B シリーズ)

現況	将来 (シナリオA1)		将来 (シナリオA2)			将来 (シナリオA3)			将来 (シナリオA4)		
	グローバルS分規制なし/ECA設定なし	グローバルS分規制あり/ECA-N設定あり	ECA設定12海里	ECA設定50海里	ECA設定200海里	ECA設定12海里	ECA設定50海里	ECA設定200海里	ECA設定12海里	ECA設定50海里	ECA設定200海里
SO ₂ 年間排出量 [ton/year]	外航船 (係留時+航行時)	420,300	73,553	73,553	73,553	48,835	33,641	14,961	48,835	33,641	14,961
	内航船 (係留時+航行時)	92,400	41,003	41,003	41,003	15,629	8,789	8,362	15,629	8,789	8,362
	漁船 (航行時のみ)	18,100	14,111	14,111	14,111	7,258	5,128	2,875	7,258	5,128	2,875
NOx年間排出量 [ton/year]	船舶総計 (日本周辺200海里内) [※カクコ内は現況比]	530,800	128,667 [24%]	128,667 [24%]	128,667 [24%]	71,722 [14%]	47,558 [9%]	26,198 [5%]	71,722 [14%]	47,558 [9%]	26,198 [5%]
	外航船 (係留時+航行時)	777,700	491,506	447,242	424,624	491,506	491,506	491,506	465,302	447,242	424,624
	内航船 (係留時+航行時)	277,500	233,740	216,013	215,722	233,740	233,740	233,740	220,153	216,013	215,722
NOx年間排出量 [ton/year]	漁船 (航行時のみ)	129,000	110,517	107,145	103,585	110,517	110,517	110,517	110,517	107,145	103,585
	船舶総計 (日本周辺200海里内) [※カクコ内は現況比]	1,184,200	835,763 [71%]	770,400 [65%]	743,931 [63%]	835,763 [71%]	835,763 [71%]	835,763 [71%]	795,972 [67%]	770,400 [65%]	743,931 [63%]

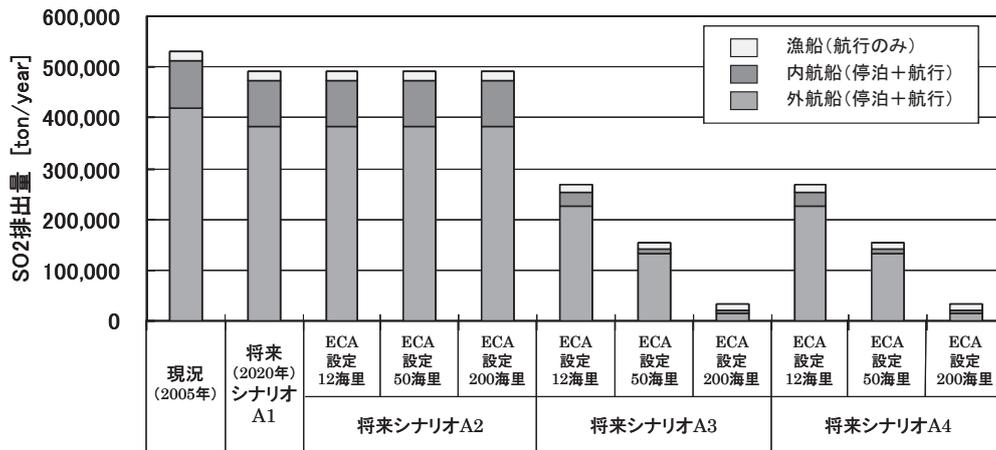


図-3.3 船舶燃焼由来の SO₂ 将来排出量の推定結果 (シナリオ A シリーズ)

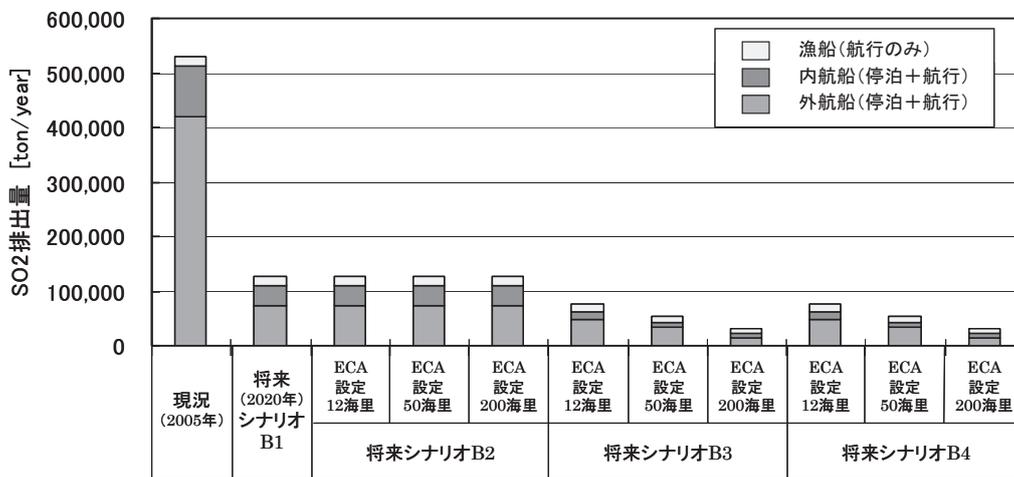


図-3.4 船舶燃焼由来の SO₂ 将来排出量の推定結果 (シナリオ B シリーズ)

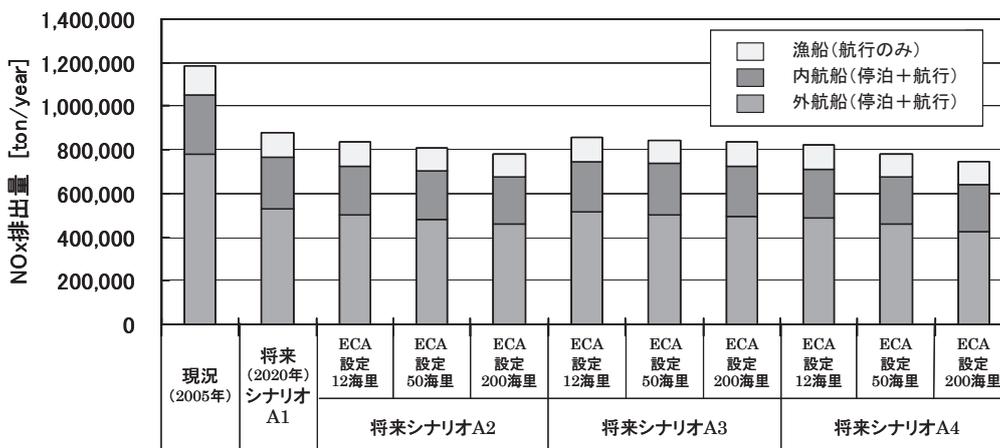


図-3.5 船舶燃焼由来の NO_x 将来排出量の推定結果 (シナリオ A シリーズ)

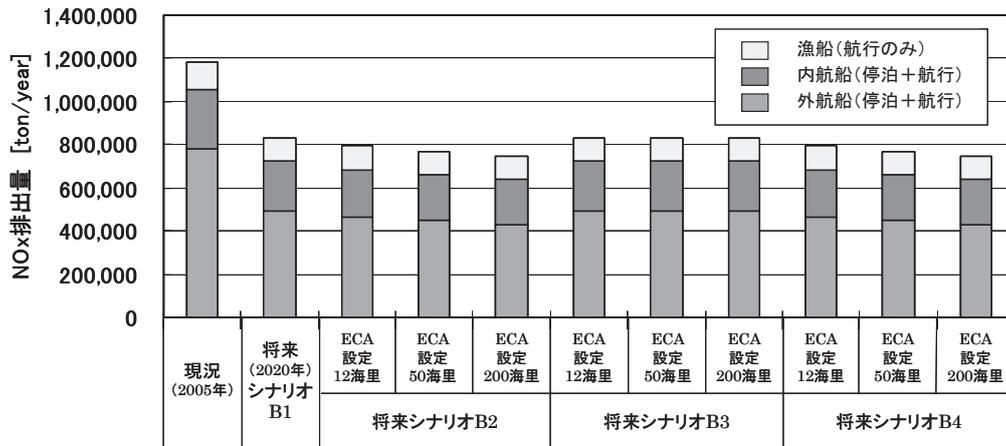


図-3.6 船舶燃烧由来の NOx 将来排出量の推定結果 (シナリオ B シリーズ)

4. おわりに

船舶動静データ及び統計資料等を利用することにより、船種の区別、船舶航路、航行速度の変化等を考慮した、従来データよりも精度の高い船舶排出量データを作成した。

本研究において作成された船舶の現況/将来排出量データの一部は、国土交通省総合政策局海洋政策課・海事局安全基準課の主導のもと、2010～2012年度に開催された「船舶からの大気汚染物質放出規制海域 (ECA) に関する技術検討委員会」において、船舶由来の大気汚染物質の大気環境濃度への寄与度を評価する目的に有効利用された。

謝 辞

本研究の一部は、ポートルースの交付金による日本財団の助成金を受け、一般財団法人 日本船舶技術研究協会の「2010年度～2012年度 大気汚染防止規制の円滑な導入のための調査研究 (大気汚染防止規制導入プロジェクト)」として実施されました。また、船舶による将来排出量データの作成においては、国土交通省海事局安全基準課 (当時) より、多大な御協力を賜りました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

1) 石田悟史、船舶からの大気汚染物質排出規制に関する国際動向について、日本マリンエンジニアリング学会誌、第 46 巻第 6 号 (2011)、

pp.46-48
 2) 大坪新一郎、山村真也、IMO における CO₂ 排出規制採択と今後の動向、日本船舶海洋工学会誌、第 39 号 (2011)、pp.44-47
 3) 横井威、城田英之、亀山道弘、春海一佳、日本周辺海域における船舶起源大気汚染物質の大気質シミュレーション、第 83 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集 (2013)、pp.101-102
 4) Ohara, T., J. Kurokawa, H. Akimoto, N. Horii, I. Uno, T. Hayasaka, D. Streets, and Tsinghua University group, REAS: Regional Emission inventory in Asia -Emission changes during 1980-2030-, ACCENT Workshop on remote sensing and inventories of anthropogenic emissions: The best of two worlds (2007)
 5) 高橋宏直、赤倉康寛、舟橋香、全世界のコンテナ船寄港実績に関する分析、運輸政策研究、第 5 巻第 1 号 (2002)、pp15-21
 6) 久米健一、南佳成、黒田麻利子、粉原直人、佐々木紀幸、設計支援ツールとしての船型要目最適化プログラム“HOPE”、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第 9E 号 (2009)、pp127-130
 7) 既存船舶からの世界的な大気汚染物質排出量に関する調査研究報告書、日本船舶技術研究協会 (2007)
 8) 船舶排出大気汚染物質削減手法検討調査報告書、日本船舶機関学会 (1995)
 9) Current Methodologies in Preparing Mobile Source Port-Related Emission Inventories Final Report, U.S. EPA (2009)

- 10) 船舶起源の粒子状物質 (PM) の環境影響に関する調査研究報告書、海洋政策研究財団 (2008)
- 11) Second IMO GHG Study (2009)
- 12) 改定 1996 IPCC Guideline
- 13) 船舶排出大気汚染物質削減技術調査、日本マリンエンジニアリング学会 (2005)
- 14) 港湾統計、国土交通省 (2005)
- 15) 第 11 回内航海運における使用燃料油、潤滑油に関する実態調査報告書、内航総連 (2007)
- 16) 公団共有船基本設計図表(旅客船・貨物船編)、船舶整備公団 (1996)
- 17) 平成 10 年度 船舶排ガスの地球環境への影響と防止技術の調査報告書、シップ&オーシャン財団 (1998)
- 18) 交通関係統計等資料 内航船舶輸送統計調査用途別・油種別燃料消費量、国土交通省 (2005)
- 19) 総合エネルギー統計、資源エネルギー庁長官官房総合政策課 (2005)
<http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/ukyu/>
- 20) 第 11 回内航海運における使用燃料油・潤滑油に関する実態調査報告書、内航総連 (2007)
- 21) エネルギー生産・需給統計年報、経済産業省 経済産業政策局調査統計部、資源エネルギー庁 資源燃料部 (2001)
- 22) 産業連関表 用途別燃料需要量に基づく漁業形態別の燃料消費割合、総務省統計局 (2005)
<http://www.stat.go.jp/data/io/>
- 23) 漁船統計表 漁業形態別燃料消費割合、水産庁 (2005)
- 24) 漁業・養殖業生産統計年報 県別漁船ディーゼル機関馬力、農林水産省 (2005)
- 25) 平成 22 年度 排出規制海域設定による大気環境改善効果の算定事業報告書、海洋政策研究財団 (2011)
- 26) 平成 23 年度 排出規制海域設定による大気環境改善効果の算定事業報告書、海洋政策研究財団 (2012)
- 27) IMO/MEPC55/4/1 (Sulphur Monitoring 2005) (2006)
- 28) 自動車の燃料に関する許容限度及び自動車の燃料に含まれる物質の量の許容限度、環境省 (2006)
- 29) 窒素酸化物総量規制マニュアル、公害対策研究センター (2000)
- 30) 平成 10 年度 船舶に係る窒素酸化物低減対策検討調査報告書、東京都 (1998)
- 31) 城田英之、横井威、亀山道弘、春海一佳、船舶から排出される大気汚染物質の 2005 年排出量データの作成、第 83 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集 (2013)、pp.103-104
- 32) Verbeeke Luc, Lubrication Challenges in Shipping Industry –Reliable Lubrication of Marine Low-Speed Engines, 日本マリンエンジニアリング学会誌、第 49 巻第 1 号 (2014)、pp.96-99
- 33) 船舶明細 2010、日本小型船舶検査機構 (2011)
- 34) 船舶明細 2004、日本小型船舶検査機構 (2005)
- 35) IMO/MEPC62/4 Annex1 (Sulphur Monitoring 2010) (2011)