

AIS データに基づく船舶起源大気汚染物質の排出量 インベントリーの作成方法と大気質シミュレーション

横井 威*, 城田 英之*

Methodology for Emission Inventories of Air Pollutants from Ship based on AIS data and Air Quality Simulation

by

Takeshi YOKOI, Hideyuki SHIROTA

Abstract

In recent years, a greater interest has been taken in global environmental issues and also, ship operation has needed not only the efficiency improvement for fuel cost reduction with the introduction of new energy saving technology but also reduction of the emissions of exhaust gas. The International Maritime Organization (IMO) is also working for the further advancement of regulation in Nitrogen Oxide (NO_x), Sulfur Oxide (SO_x) and Particulate Matter (PM) emission reduction from ship's diesel engines. According to the IMO regulations on harmful gases, ships built after 2016 need to reduce NO_x emission (Tier III) by 80% from the Tier I regulation when ships run into ECA (Emission Control Area). All the ships are also required to use fuel which contains less than 0.1% sulfur content in ECA from 2015, and less than 0.5% sulfur content in other sea areas from 2020. In order to assess the environmental impact from ship's emissions, this study proposes a method for estimation of the emissions from ships, based on the messages provided by the AIS (Automatic Identification System) data. In addition, the spatial concentrations of air pollutants and the contribution ratios of the ships were simulated by an air quality model.

* 環境・動力系

原稿受付 平成30年11月20日

審査日 平成31年 1月15日

目 次

1. まえがき	108
2. 研究の背景及び目的	108
3. AIS データを利用した船舶起源大気汚染物質の排出量データの作成	109
3.1 大気汚染物質推定方法の概要	109
3.2 AIS データに基づく船舶活動量の推定方法	109
3.3 船籍の識別	110
3.4 主機出力の推定	111
3.5 燃料消費量の推定	113
4. 大気質シミュレーション	115
4.1 気象及び大気質シミュレーションの概要	115
4.2 大気質シミュレーションの結果	115
4.3 船舶の寄与度	117
4.4 環境基準値との比較	118
5. まとめ	119
謝辞	119
参考文献	119

1. まえがき

近年、地球環境問題への関心が高まっており、船舶運航においても省エネルギー技術の導入による燃料コストダウン効果だけではなく、排ガスの排出低減も要求されるようになった。船舶起源の大気汚染物質に関しては、国際海事機関（IMO）において、船舶用ディーゼルエンジンから排出される窒素酸化物（NO_x）、硫黄酸化物（SO_x）および粒子状物質（PM）を対象とする排出規制が実施されている。このうち NO_x については、2016 年以降に建造された船舶が放出規制海域（ECA, Emission Control Area）を航行する場合には、NO_x Tier I 規制比で 80% の NO_x 排出量（NO_x Tier III）を削減することが要求されている。また、SO_x/PM については、すべての船舶は、2015 年以降に ECA において硫黄含有率 0.1% 未満、2020 年以降に一般海域において硫黄含有率が 0.5% 未満の燃料をそれぞれ使用する必要がある。

2. 研究の背景及び目的

船舶の主機及び補機を作動させる燃料としては、一般的に重質の残渣油や留出油が使われていることに加え、機関燃焼特性に起因して、船舶は自動車や航空機よりも大量かつ高濃度の大気汚染物質を排出している。特に NO_x、SO_x 及び PM は高濃度であり、これらは呼吸器官に影響を及ぼし、また広範囲に拡散した場合は酸性雨などの環境破壊が起こる。

2005 年 5 月 19 日に IMO MARPOL 73/78 条約附属書 VI が発効したことを受け、現在、400 総トン数以上のすべての船舶から排出される大気汚染物質が規制の対象となっている。北海及びバルト海は 2005～2006 年に SO_x ECA に指定されて以来、SO_x 規制が段階的に強化されており、2021 年には NO_x ECA として NO_x3 次規制の対象となる予定である。米国・カナダの沿岸 200 海里内の海域および米国領カリブ海海域は、2011～2013 年に SO_x ECA 及び NO_x ECA に指定され、2015 年より燃料中硫黄分（SO_x）の含有率が 0.1% 以下に規制され、2016 年からは NO_x3 次規制が適用されている。中国では 3 つの海域において 2017 年より 11 箇所の重要港で燃料中の硫黄分が 0.5% 以下に規制され、2018 年からは同海域の全港湾に本規制が適用されている。このように IMO と中国による規制が導入されている状況において、数多くの輻輳海域を有する我が国では船舶に由来する大気汚染物質に

関する基礎的な排出量データの整備や環境影響評価が十分になされているとは言い難い。これまで、著者らは船舶動静データや種々の統計資料に基づき排出量データを試作^{1), 2), 3)}してきたが、空間分解能の限界や実際の運航状況に必ずしも合致していない点等の問題があった。本研究では、より高い空間分解能を有し、より忠実に実運航状況が反映された排出量データの作成を目指し、AIS (Automatic Identification System) 情報を活用して問題の解決を図った。本論文ではAIS 情報に基づく船舶起源大気汚染物質の排出量データの作成方法について説明する。また、気象モデル及び大気質モデルを用いて、排出量データ等に基づき大気汚染物質の濃度分布を算出し、陸上に対する船舶の排出寄与度を推算した結果についても述べる。

3. AIS データを利用した船舶起源大気汚染物質の排出量データの作成

3.1 大気汚染物質推定方法の概要

一般に、船舶から排出される大気汚染物質の排出量は、式3.1³⁾を用いて算出することができる。単位時間当たりにおける大気汚染物質の排出量は、船種 (コンテナやタンカー等)・船型 (総トン数) ごとの船舶活動量、即ち燃料消費量と大気汚染物質ごとの排出係数との乗算で求めることが可能である。

$$E_s = \sum_i \sum_j A_{ij} \times F_{Sij} \quad (3.1)$$

ここに、

E_s : 単位時間当たりの大気汚染物質 S の排出量 [kg/h]

A_{ij} : 単位時間あたりの船種 i , 船型 j の活動量 [ton-fuel/h]

F_{Sij} : 船種 i , 船型 j における大気汚染物質 S の排出係数 [kg/ton-fuel]

本研究では、陸上 AIS データ受信局の受信限界を考慮し、日本全土を囲む沿岸線から 50 海里以内の海域を船舶の航行領域とする。対象とする船舶の総トン数 (GT) と船種については、以下のとおりである。

(1) AIS 搭載船

内航船: 500 GT 以上, 外航船: 300 GT 以上, 総トン数によらず全ての旅客船。AIS 非搭載の漁船は対象としない。

(2) 船種

一般貨物船, タンカー (原油タンカーと LNG/LPG タンカーを含む), バルクキャリア, コンテナ, PCC (自動車運搬船), 旅客船, その他の船舶。

(3) 総トン数 (GT)

0~500, 500~1,000, 1,000~3,000, 3,000~6,000, 6,000~10,000, 10,000~30,000, 30,000~60,000, 60,000~100,000, 100,000 以上。但し、国内総トン数と国際総トン数に関する換算は行っていない。

3.2 AIS データに基づく船舶活動量の推定方法

日本全国の陸上 AIS データ受信局より受信したデータに基づいて船舶活動量を集計する方法を図1に示す。また、集計方法の各手順の概要は以下のとおりである。

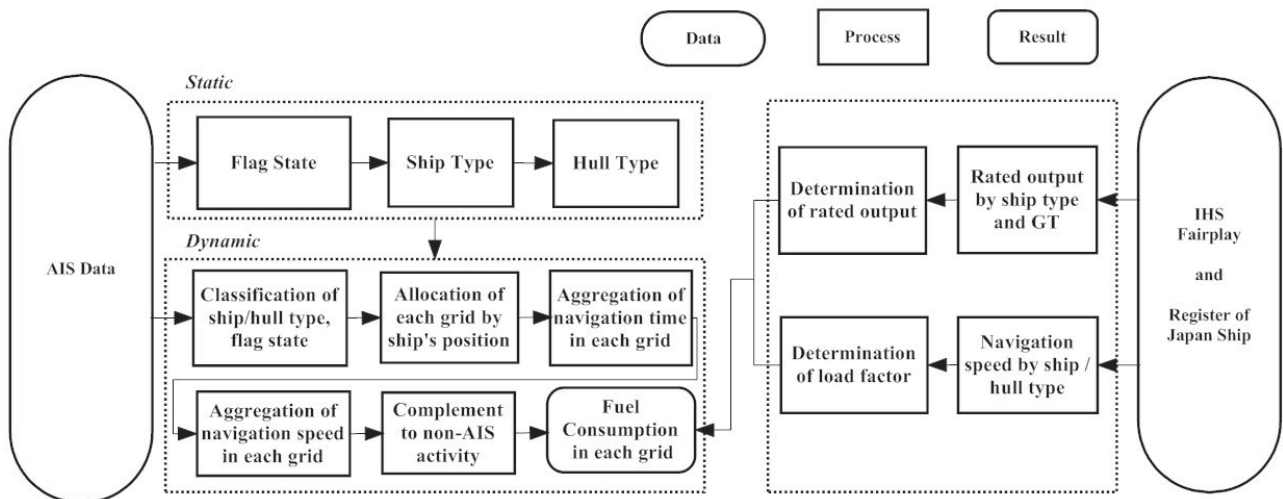


図1 AISデータに基づく船舶活動量の集計フロー

- (1) 日本周辺海域を航行する内航船と外航船について、個船別の船籍、船種と船型等の静的な情報を AIS データより抽出する。外国船籍の船舶は全て外航船とし、日本船籍の船舶は 3.3 節で述べる手法を用いて内航船と外航船に振り分ける。
- (2) 3.1 節で述べた設定に基づき、日本領域では 2 次メッシュ（約 10km×10km 四方）別に、重要港湾領域では 3 次メッシュ（約 1km×1 km 四方）ごとに個船の位置情報、船種情報、船の長さ情報を AIS データより抽出する。さらに、各メッシュにおける船種ごとの隻数、平均航行時間と平均航行速度等の動的情報を算出して集計する。
- (3) 500 GT 以下の AIS 非搭載船の活動量については、先行研究⁴⁾に基づき 500 ～1000 GT の AIS 搭載船の活動量から推定する。ただし、同メッシュ内における 500 GT 以下の船舶の平均航行時間と平均航行速度は、500 ～1000GT と同じ値を用いるものとする。また、港湾統計（年報）を用いて 500 GT 以下と 500 ～1000 GT との入港隻数の比率を求め、各メッシュにおける 500 GT 以下の平均隻数を算出する。
- (4) 船種ごとの船の長さ情報を AIS データより抽出し、長さ情報から総トン数を推定する。さらに、IHS Fairplay や船舶明細書等の統計データを用いて、総トン数と主機定格出力間の回帰曲線を求めた後に、船種・船型ごとに機関負荷率を推定する。
- (5) (4)の結果に基づき、各メッシュにおける航行中の主機ディーゼルの常用出力を算出する。また、補機ディーゼル発電機の定格出力と負荷率については、統計資料³⁾を用いて出力を算出する。
- (6) 燃料油の種類ごとに、各メッシュ・単位時間当たりの個船の燃料消費量を算出する。
- (7) (6)の集計結果を、GIS（地理情報システム）を用いてメッシュデータに変換し、合計値を算出する。

3.3 船籍の識別

個船の船籍を特定して外航船と内航船に振り分けるため、本研究では AIS データに含まれる MMSI（Maritime Mobile Service Identity）コードを用いる方法を採用した。MMSI コードは個船に付与される 9 桁の数字から構成される認識番号であり、最初の 3 桁は船籍を示す。図 2 に個船船籍の識別フローを示す。AIS データより抽出した MMSI コードのヘッダーに日本船籍を示す 431 もしくは 432 が含まれ、かつ、船舶明細書および IHS Fairplay に外航船として明記されている個船については、日本船籍の外航船とし、左記以外はすべて日本船籍の内航船とした。また、MMSI コードに 431 もしくは 432 以外のデータが含まれている個船については、すべて外国船籍の外航船とした。

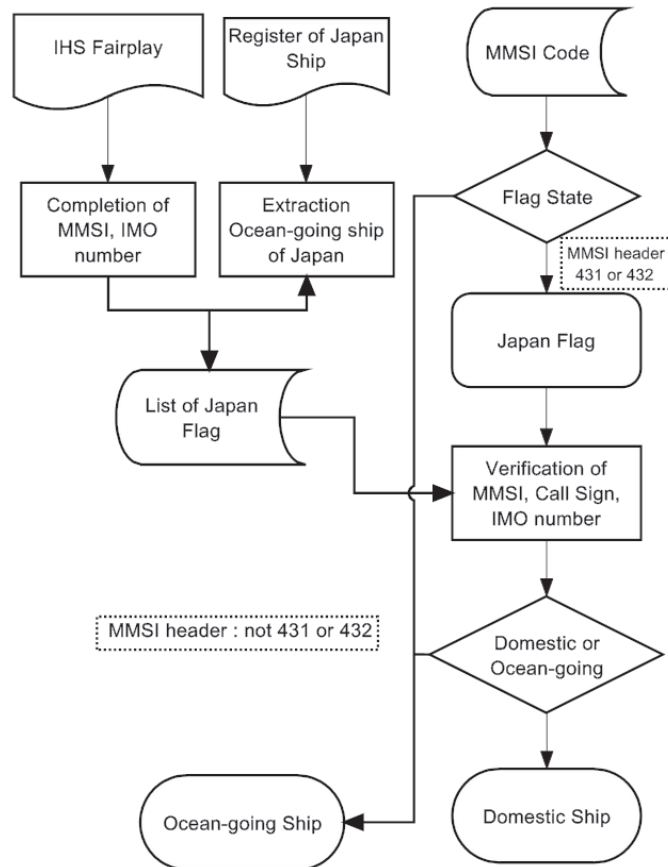


図2 個船船籍の識別フロー

3.4 主機出力の推定

内航船と外航船の主機の常用出力については、主機の定格出力に負荷率を乗じることにより推定する。また、主機定格出力については、船種別の総トン数に基づき回帰曲線を用いることにより推定する。AIS データには個船の総トン数に関する情報が含まれていないため、本研究では先行研究⁵⁾より船の長さから総トン数を推定する手法を用いて個船の総トン数を算出している。推定結果の例として、内航及び外航のタンカーにおける総トン数と主機の定格出力との関係（回帰曲線）を、図3及び図4にそれぞれ示す。

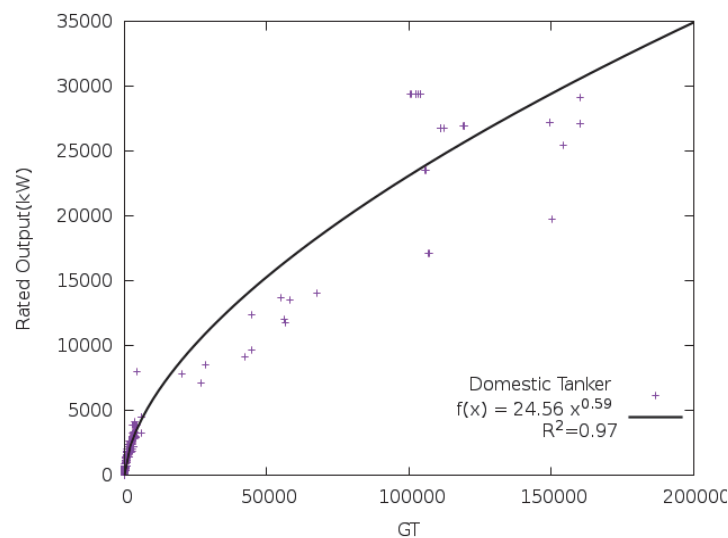


図3 内航タンカーにおける総トン数と主機定格出力との関係

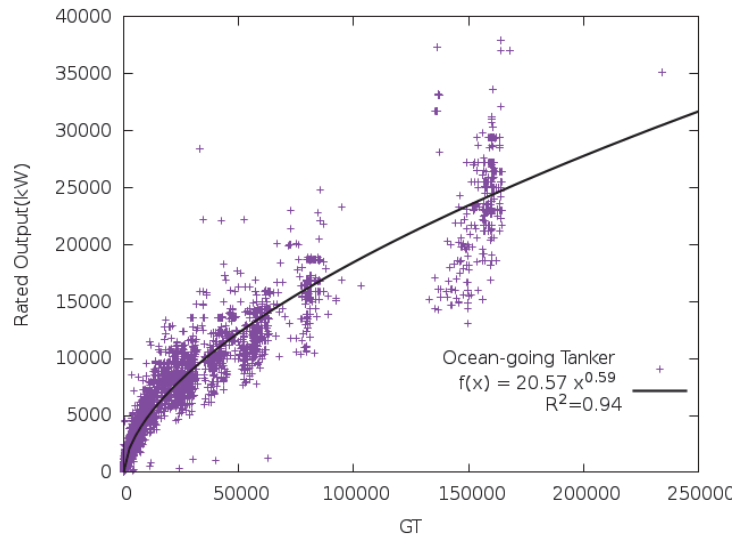


図4 外航タンカーにおける総トン数と主機定格出力との関係

主機の負荷率については、一般に船速（実際の航行速度）の3乗とサービス速度の3乗との比に比例することから、式3.2⁴⁾を用いて推定する。サービス速度については、AISデータの単位時間当たりの船速の情報に基づき、船舶明細書等より抽出した。また、サービス速度における航行時の主機の負荷率を85%⁴⁾とし、推定結果の例として、内航及び外航の一般貨物船における船速と主機負荷率との関係を、図5及び図6にそれぞれ示す。

$$L_{me} = S_n^3 \div S_s^3 \quad (3.2)$$

ここに、

L_{me} : 主機の負荷率 [%]

S_s^3 : サービス速度 [knot]

S_n^3 : 船速 [knot]

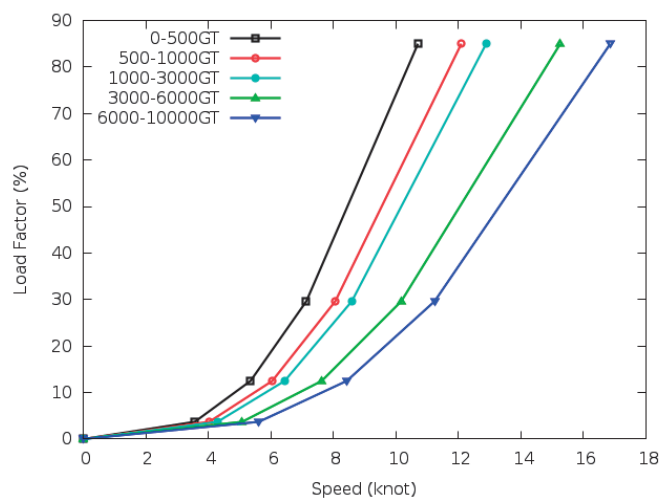


図5 内航一般貨物船における船速と主機負荷率との関係

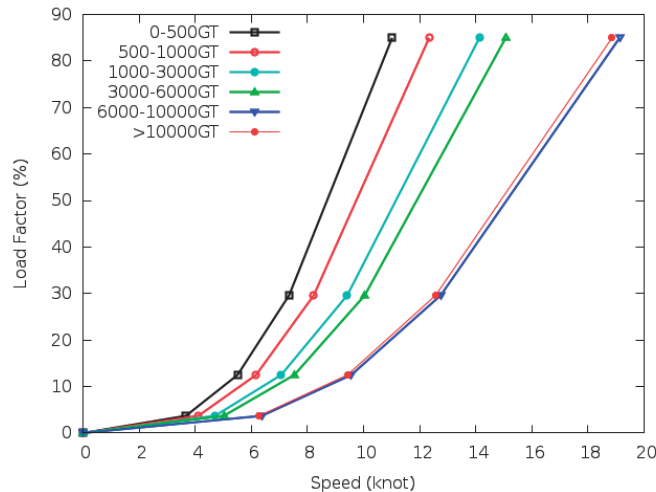


図6 外航一般貨物船における船速と主機負荷率との関係

3.5 燃料消費量の推定

主機ディーゼル機関及び補機ディーゼル発電機の燃料消費量については式 3.3 を用いて、ボイラーの燃料消費量については式 3.4 を用いてそれぞれ求めた⁴⁾。補機ディーゼル発電機、ボイラーと主機ディーゼル機関の燃料消費率については、IMO GHG 2nd Study 2009 等を精査した文献³⁾の値を使用した。ただし、燃料消費率は機関負荷率の変動によらず一定値とし、蒸気タービンについては燃料消費率を 276 [g-HFO/kWh]³⁾と設定した。また、補機ディーゼル発電機の定格出力、ボイラーの定格容量と両者の負荷率についても、同文献³⁾の値を使用した。

$$F_e = SFC \times PS_e \times L \times T \quad (3.3)$$

$$F_b = 73.48 \times PS_b^{0.41} \times L \times T \quad (3.4)$$

ここに、

F_e : 主機ディーゼル機関と補機ディーゼル発電機の燃料消費量 [g]

F_b : ボイラーの燃料消費量 [ton]

SFC : 燃料消費率 [g/kWh]

PS_e : 主機ディーゼル機関と補機ディーゼル発電機の定格出力 [kW]

$PS_b^{0.41}$: ボイラーの定格容量 [ton/h]

L : 負荷率 [%]

T : 運転時間 [h]

また本研究では、外航船及び内航船の燃料消費量について、個船の活動量を集計して積み上げ方式で算出しているが、内航船については、地域ごとのエネルギー消費量がまとめられている統計資料があるので、これを用いてトップダウン手法で燃料消費量の算出値に対して補正を行った。一方、外航船については、必ずしも日本国内で補油するとは限らないため、外航船に関するエネルギー消費の統計資料は存在しない。従って、外航船に対する補正は行っていない。燃料油の種類については、すべての外航船が HFO (Heavy Fuel Oil) を使用するものと設定した。内航船については、表 1 に示す総トン数別の MDO (Marine Diesel Oil) の使用率⁶⁾に基づき、燃料油の

種類を区別した。燃料油に含まれる硫黄分については、外航船では HFO: 2.7%, 内航船では HFO: 2.53%, MDO: 0.61%⁶⁾ と設定した。

表 1 内航船における総トン数別の MDO の使用率

総トン数(GT)	主機ディーゼル	補機ディーゼル	ボイラー
0-500	89.04	100	56
500-1,000	89.04	100	38
1,000-3,000	30.08	100	38
3,000-6,000	22.15	69	0
6,000-10,000	4.55	69	0
10,000-30,000	4.35	41	0
30,000 more	4.35	0	0

ここで、2011 年 12 月の 1 ヶ月分の AIS データを利用して、日本沿岸 50 海里以内を航行する外航船及び内航船について、総トン数別における停泊中及び航行中の年間燃料消費量（1 ヶ月分に 12 を乗じた値）を積算した結果を、図 7 に示す。また、船種別における外航船及び内航船の年間燃料消費量を、図 8 に示す。

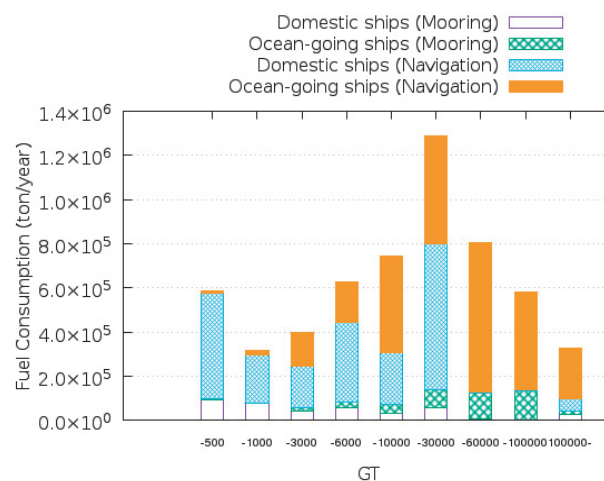


図 7 外航船及び内航船における停泊中及び航行中の年間燃料消費量

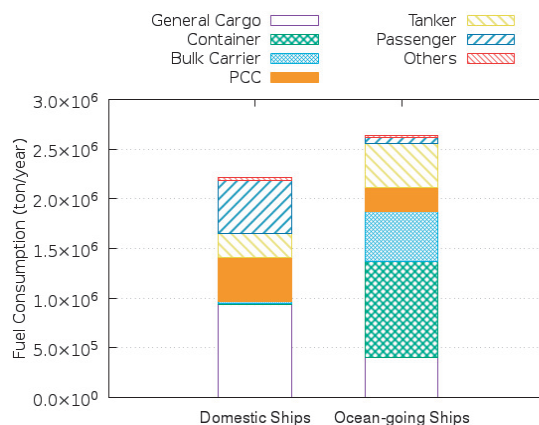


図 8 外航船及び内航船における船種別の年間燃料消費量

4. 大気質シミュレーション

4.1 気象及び大気質シミュレーションの概要

船舶から大気中に排出される NO_x, SO_x, PM 等の大気汚染物質は、海上風等の影響を受けて拡散・反応しながら陸地まで輸送されると、その陸地における環境濃度が高くなる可能性がある。本研究では、排出量データに基づき、気象と大気質シミュレーションを通して船舶に由来する大気汚染物質の環境影響評価を行った結果について述べる。船舶起源の排出量データについては、船舶の燃料消費量に大気汚染物質の排出係数を乗じて求めたが、AIS データに基づく排出量データの作成はまだ途中であったため、本研究では船舶動静データ³⁾に基づく排出量データ（2005 年）を使用した。また、陸上発生源起源の排出量については、東アジア領域の人為発生源汚染物質の排出量データとして、REAS⁷⁾を使用した。日本の陸上排出源については、JCAP（Japan Clean Air Program）I, II⁸⁾ ならびに JATOP（Japan Auto-Oil Program）⁸⁾ により推定された排出量データを使用した。

実際の気象場を再現するため、本研究では次世代メソスケールモデルである WRF（Weather Research and Forecasting）3.1.1⁹⁾ を用いる。また、初期入力データは NCEP FNL 083.2¹⁰⁾ の再解析データを採用するが、計算領域の中心座標は 36.0N, 140.0E であり、タイムステップは 60s である。単位グリッド距離は 18km、東西方向は 147 グリッド、南北方向は 162 グリッドと分割している。鉛直方向は、入力データの σ レベルに合わせ、26 層と定義する。同領域における大気質を算出するため、米国環境保護庁（EPA）が開発した CMAQ（Community Multiscale Air Quality）4.7.1¹¹⁾ モデルを採用する。気圧追従の鉛直層については、地表面から 100hPa までの間に 14 層と設定する。この鉛直層の設定は、WRF モデルの 26 鉛直層に対して地表面から 14 層を抽出し、成層圏における汚染物質の拡散を考慮しないことを意味する。計算期間については、2005 年 8 月 1 日 00 時（UTC）から 9 月 1 日 00 時（UTC）までの 745 時間と設定する。CMAQ モデルの反応スキームの設定及び初期条件の詳細を表 2 に示す。

表 2 CMAQ モデル計算条件の詳細

大気質モデル	CMAQ-4.7
中心緯度・経度	36N, 140E
格子数 (x, y, z)	105 x 108 x 14
水平格子サイズ	18 x 18 km
鉛直拡散	Eddy
CCTM	ctm yamo
水平移流	Hyamo
鉛直移流	Vyamo
気相反応	ebi_saprc99_ae5
エアロゾル	aero5
エアロゾル沈着	aero_devp2
Mechanism	saprc99_ae5_aq

4.2 大気質シミュレーションの結果

ここで、鉛直方向の最下層における NO₂, SO₂ 及び PM_{2.5} の拡散結果の月平均をそれぞれ、図 9～図 11 に示す。NO₂, SO₂ および PM_{2.5} の拡散状況については、工業地域である中国北部及び韓国、日本太平洋側の大都市付近においては高濃度の分布が確認された。特に日本国内の主要港湾付近については、陸上港湾施設や船舶起源の大気汚染物質の排出量が多いため、大気中における濃度が高い。また、東京湾口付近は入出港航路であるため、大気中の濃度分布は船舶の航路形状に沿うように再現された。さらに、当計算期間中において、NO₂, SO₂ 及び PM_{2.5} の輸送方向はともに風下方向へ拡散しながら輸送して行く様子が確認された。同様に、図 10 に示すように、SO₂ は火山活動に伴って排出されることから、鹿児島湾に位置する桜島火山から排出される SO₂ の拡散状況はよく再現できていると言える。

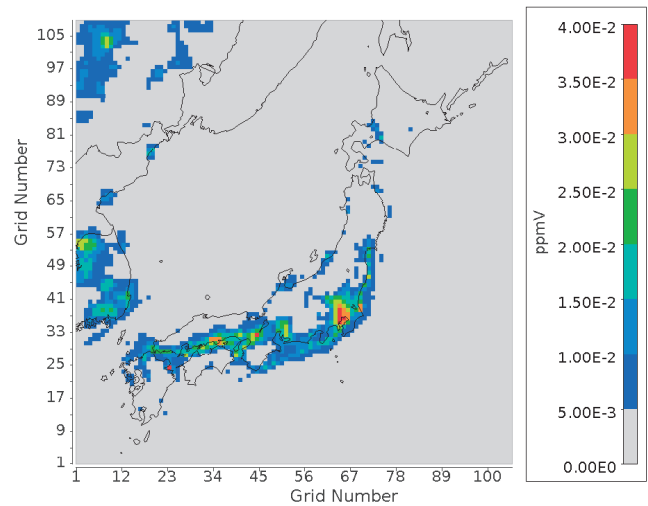


図9 NO₂濃度分布の月平均（最下層）

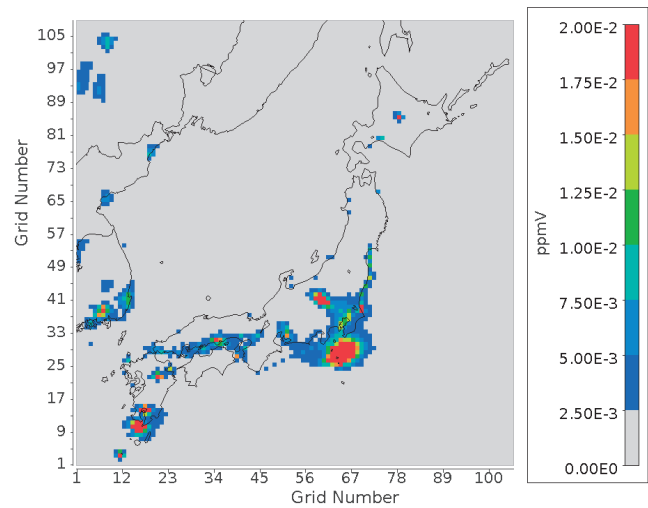


図10 SO₂濃度分布の月平均（最下層）

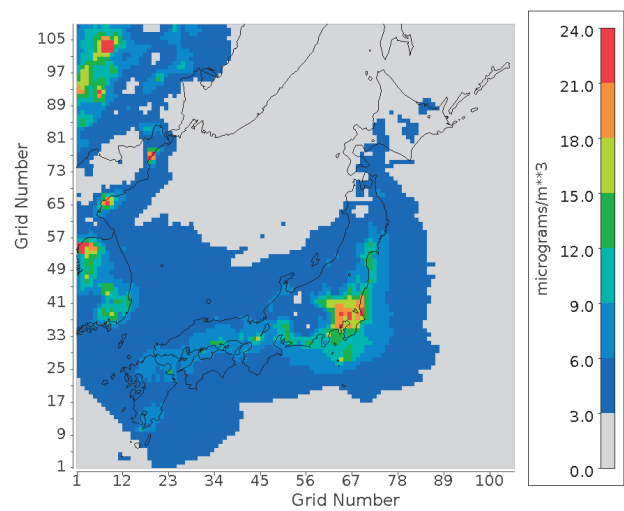


図11 PM_{2.5}濃度分布の月平均（最下層）

4.3 船舶の寄与度

船舶による陸域環境への影響を評価するため、船舶起源の排出量データを除く排出量データ（以後、バックグラウンドデータと呼ぶ）に基づく拡散反応計算を行う。すべての発生源による排出量データ及びバックグラウンドデータによる計算結果の差分を船舶寄与分と定義し、 NO_2 、 SO_2 及び $\text{PM}_{2.5}$ における月平均の船舶寄与率の算出結果を、それぞれ図12～図14に示す。船舶から排出される NO_2 、 SO_2 及び $\text{PM}_{2.5}$ は航路上では高い寄与率を示すものの、内陸まで輸送されるのはごく少量であるため、環境影響は比較的小さい傾向にある。

ここで、港湾付近における船舶による環境影響を評価するため、釧路港、横浜港、名古屋港、神戸港、博多港に着目して、船舶排出の寄与率を算出した結果を、図14に示す。例えば釧路地域のような清浄地域では、陸上排出源が少ないことに起因して、船舶排出の寄与率が大きくなっている。一方で、名古屋地域のような工業地域では、清浄地域とは逆の傾向が見られる。なお、本研究では計算領域の水平格子サイズを粗く設定（ $18\text{km} \times 18\text{km}$ ）しているため、同一港においても隣接する二つの格子における船舶排出寄与率の結果が大きく変わるケースもある点に注意する必要がある。

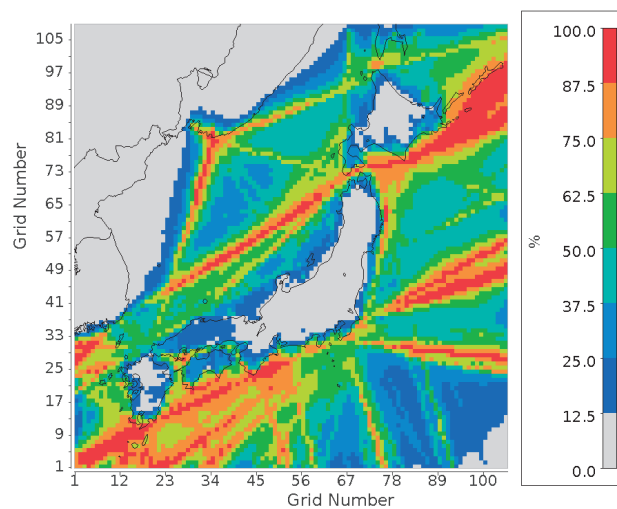


図12 NO_2 濃度分布における船舶の寄与率

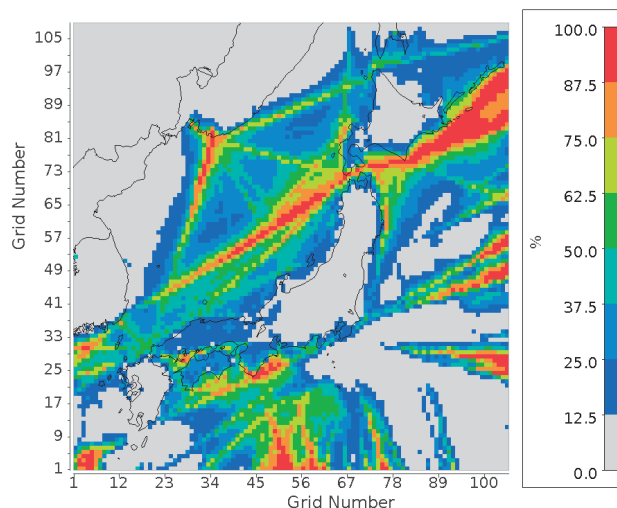


図13 SO_2 濃度分布における船舶の寄与率

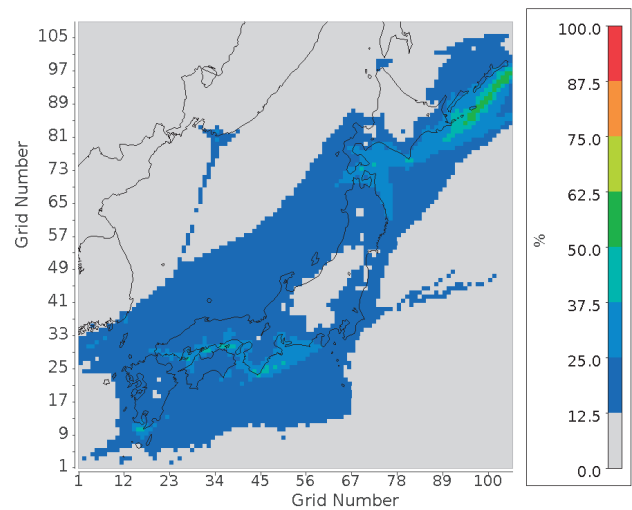


図 14 PM_{2.5} 濃度分布における船舶の寄与率

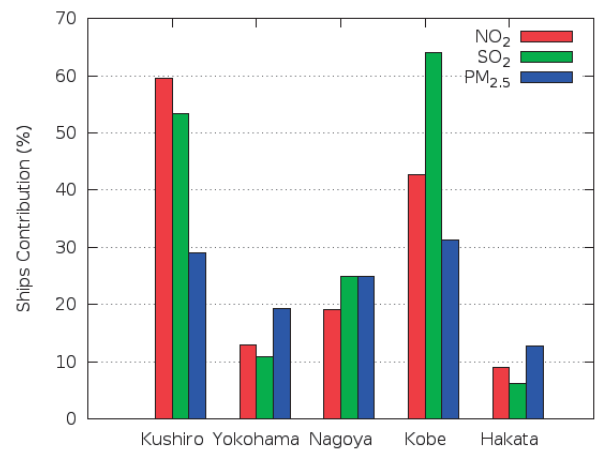


図 15 代表港における NO₂, SO₂ 及び PM_{2.5} 濃度の船舶寄与率

4.4 環境基準値との比較

日本国内の NO₂, SO₂ 及び PM_{2.5} における環境基準値の詳細を表 3 に示す。陸上発生源及び船舶に由来する大気汚染物質の排出量データに基づき、大気質シミュレーションによって釧路港、横浜港、名古屋港、神戸港、博多港における濃度の日内平均を算出した結果を図 16 に示す。図 16 から分かるように、NO₂ 及び SO₂ については代表港における濃度の計算値が、環境基準値のおおむね半分程度に収まっている。NO₂ の濃度が最も高い第 30 日目の横浜港については、0.04～0.06 ppm のゾーンに収まっており、環境基準に適合していると言える。PM_{2.5} については、横浜港において日平均値の 35µg/m³ を超えた日が 6 日間あった。図 15 に示した横浜港における船舶寄与率を考慮すると、船舶による影響だけではなく横浜付近の陸上発生源による影響が大きい傾向にあるものと推察される。

表 3 NO₂, SO₂ 及び PM_{2.5} の国内環境基準値

二酸化窒素 (NO ₂)	二酸化硫黄 (SO ₂)	微小粒子状物質 (PM _{2.5})
1 時間値の日平均値が 0.04ppm から 0.06ppm までのゾーン内、またはそれ以下	1 時間値の日平均値が 0.04ppm 以下であり、かつ、1 時間値が 0.1ppm 以下	年平均値が 15µg/m ³ 以下であり、かつ、日平均値が 35µg/m ³ 以下

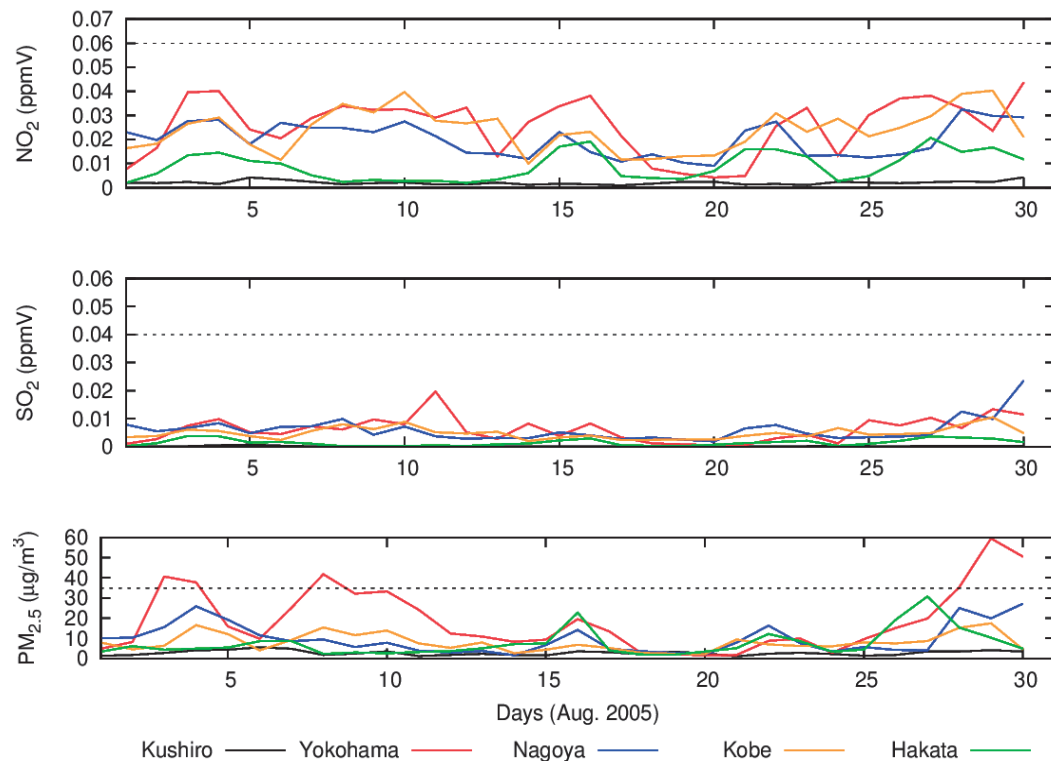


図16 代表港におけるNO₂、SO₂及びPM_{2.5}の濃度の計算値と環境基準値との比較

5. まとめ

本研究では、先行研究と比べてより実際の船舶の運航状況が反映できる AIS データ及び統計資料等を用いて、船舶起源大気汚染物質の排出量データを作成する手法について述べた。また、気象モデル及び大気質モデルを用いて、排出量データ等に基づき日本国内の5つの代表港についてNO₂、SO₂及びPM_{2.5}の濃度分布を算出し、大気汚染物質別に陸上に対する船舶の排出寄与度を推算した。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP15K06631, JP16K06922 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 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, マリンエンジニアリング学会講演論文集, 第83号(2013), pp.103-104.
- 2) Takeshi Yokoi and Hideyuki Shirota: Development of Ship Emission Inventory and Future Scenario in Japan, Proc. Asia Navigation Conf. 2014, (2014), pp.200-207.
- 3) 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現況及び将来排出量データの作成, 海上技術安全研究所報告, 第13巻第3号(2013), pp.383-416.
- 4) 海洋政策研究財団: 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, (2010) .
- 5) Nobuo Arimura, Kazunari Yamada, Shinobu Sugawara and Jirou Ikegami: Study on Statistical Analysis of Various Elements Related to Vessel, The Journal of Japan Institute of Navigation (1993), Vol. 89, 237-243.
- 6) 内航総連: 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, (2007)

- 7) Ohara, T., Akimoto, H., Kurokawa, J., Horii, N., Yamaji, K., Yan, X., and Hayasaka, T.: An asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, pp. 4419 - 4444, (2007).
- 8) 石油エネルギー技術センター:http://www.pecj.or.jp/japanese/jcap/airmodel/index_airmodel.html, (2018)
- 9) National Center for Atmospheric Research (NCAR), National Centers for Environmental Prediction (NCEP), Forecast Systems Laboratory (FSL): <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>, (2018)
- 10) NCEP: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>, (2018)
- 11) Byun, D.W., and Schere, K.L.: Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system overview, *Applied Mechanics Reviews*, 59, 51-77, (2006).