

# IMOにおける大気環境規制の動向

村岡 英一

## Recent Movement of International Rules Regarding air Pollution Prevention from Ships in the International Maritime Organization

by

Eiichi MURAOKA

### 1. はじめに

船舶からの大気汚染防止の規制は、国際的には、国際海事機関 (IMO: International Maritime Organization) で定められた MARPOL 条約附属書VIにより行われている。附属書VIの規制は多岐にわたるが、主要なものとしては、窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>)、硫黄酸化物 (SO<sub>x</sub>) がある。附属書VIIは、1997年に採択され、2005年5月に発効し、同日から規制が開始されているが、世界的な環境保護意識の高まり、対策技術の進歩を受け、2005年7月には、規制の見直しを行うことが合意され、現在、IMOにおいて議論が行われており、2008年4月には、大筋で合意に達した。ここでは、IMOにおける見直しの背景事情や合意された内容を紹介するとともに、当研究における調査研究との関係を記述する。

### 2. IMOにおける規制の見直し作業開始の背景

IMOにおいて、大気汚染防止規制全般が見直しされることとなった直接の経緯は、2005年7月に開催された第53回海洋環境保護委員会 (MEPC53) に、欧州諸国が共同で見直しを提案したことに始まる。その理由としては、欧州等において大気汚染の状況が深刻であること、船舶からの寄与が大きいこと、現行規制が策定された時点より削減技術が進歩したことなどが挙げられている。まず、その背景を簡単に紹介する。

#### 2.1 船舶排ガス中の大気汚染物質による環境影響

船舶排ガス中の NO<sub>x</sub> は、燃料油中に含まれている窒素分に由来するものと、大気中の窒素と酸素とが燃焼過程で化学反応して生じるものがあるが、量的には後者が多いと言われる。船用ディーゼルエンジンは、大型、低速のメリットを生かした高効率なエンジンであるため、相対的には NO<sub>x</sub>

排出量は多いとされる。船舶起源の NO<sub>x</sub> は相対的に、自動車や固定排出源を含めた全体の NO<sub>x</sub> 排出量に占める割合が高いと言われ、平成 15 年度に国土交通省で行われた調査によると、日本全体の NO<sub>x</sub> 排出量のうち、船舶起因のものが 30%とされている。

また、船舶の燃料油中に含まれる硫黄分は、燃焼過程において酸素を結びつくことにより硫黄酸化物になるが、船舶は、他の用途に用いられる燃料油に比べて高い硫黄含有率の燃料を使用している（船用燃料油としては、常圧蒸留した残さ油を主原料とした重油が多く使用されているが、この重油は、硫黄分が高い）ため、全 SO<sub>x</sub> 排出に占める船舶の寄与割合は高いと言われ、同じく平成 15 年度に国土交通省で行われた調査では、日本全体の SO<sub>x</sub> 排出量のうち、船舶起因のものが 25%とされている。

NO<sub>x</sub> や SO<sub>x</sub> は、酸性雨による環境被害や呼吸器障害などの健康被害が懸念されているほか、大気中で、NO<sub>x</sub> 及び SO<sub>x</sub> に起因して二次的に生成する粒子状物質（PM）、さらにそれが、大気中の VOC（揮発性有機物質）と光化学反応を起こして生じる光化学オキシダントによる健康被害が懸念されている。

さらに、NO<sub>x</sub> や SO<sub>x</sub> 以外にも環境負荷低減の観点から、タンカー等の貨物から発生する VOC のさらなる削減、冷房設備や消火設備として使用されるオゾン層破壊物質の削減、燃料油中の重金属等の硫黄分以外の成分の規制導入も IMO に提案された。

なお、二酸化炭素等温室効果ガスは、地球温暖化防止の観点から、IMO で別途削減のための審議が継続中であるが、これについては、まだその結果の見通しが明確でないので、本稿では記述しない。

## 2.2 低減技術の進歩

NO<sub>x</sub> 低減技術には、燃料の噴射タイミングを変えるなど噴射系の改良による低減技術、燃焼室内に水を直接あるいは加湿した吸気を導入する低減技術、触媒を用いることにより排ガス中の NO<sub>x</sub> を窒素と水に還元することによる低減技術（SCR 装置）などが代表的なものである。これらの低減技術は、既に船舶に導入されている例もあり、こうした技術的進歩も規制見直しを行う理由の一つになっている。

ただし、水を用いた低減技術では、腐食対策を講じる必要があることや燃費が悪化すること、触媒を用いた低減技術は、使用する燃料油が高品質であることや排ガス温度が一定以上であること、還元剤が必要になることといった技術的制約がある。

また、SO<sub>x</sub> 削減技術については、排ガス中の硫黄酸化物を海水により取り除くスクラバー技術がある。

しかし、これには、強い酸性の廃水が発生するため、この廃水の排出による二次汚染が問題となる。また、低硫黄燃料油の使用も考えられるが、そのためには、残さ油をさらに分解する装置や脱硫する装置を石油精製工程に追加設置しなければならず、これには、多額の建設コストを要し、かつ建設までの時間がかかるため燃料供給面で不安があることや精製のため二酸化炭素の排出が増加するとの問題がある。

## 3. 新しい規制案の内容

### 3.1 現行規制の内容

本稿では、まず、現行の MARPOL 附属書VIの規制のうち、NO<sub>x</sub> と SO<sub>x</sub> の規制内容について、その概要を説明する。

#### (1) NO<sub>x</sub> の規制内容

##### (i) 規制対象：

2000 年 1 月 1 日以降に建造された船舶に搭載する出力 130kW 以上のディーゼルエンジン。ただし、国際航海に従事しない船舶に条約発効日より前に搭載するものは免除できることとなっている。

##### (ii) 規制値：

- ① 17.0g/kWh 回転数 130rpm 未満のもの
- ②  $45.0 \cdot n^{(0.2)}$  g/kWh 回転数 n が 130 以上 2000rpm 未満のもの
- ③ 9.8 g/kWh 回転数 2000rpm 以上のもの

##### (iii) 検査：

IMO が定めた NO<sub>x</sub> テクニカルコード（NTC）に規定されて検査されなければならない。NTC では、製造時に行われる NO<sub>x</sub> の計測方法（テストサイクルなど）や、定期検査や中間検査に行われる検査方法（検査すべきパラメータなど）を詳しく定めている。

#### (2) SO<sub>x</sub> の規制内容

SO<sub>x</sub> の規制については、排出規制ではなく、燃料油中の硫黄分によって、次のとおり規制されている。

- (i) 硫黄酸化物放出規制海域（バルト海及び北海）を航行する船舶…燃料油中の硫黄含有

量が1.5%未満とすること。ただし、低硫黄燃料油を使用する以外に、排ガス中の硫黄分を低減する装置を搭載することも認められる(ただし、低減後の排ガス成分や廃水について一定の制限値以下であることが必要とされる)。

(i) 特定の海域以外のすべての海域・・・燃料油中の硫黄含有率が4.5%未満とすること。

### (3) その他の大気汚染物質規制内容

(i) オゾン層破壊物質の新規搭載の禁止。ただし、HCFCの搭載は、2020年までは認められる。

(ii) IMOが指定する港湾内でのVOC(揮発性有機化合物)排出防止のための設備設置義務。ただし、まだIMOで指定された港湾はない。

(iii) 2000年以降船舶に搭載する船上焼却炉には、排ガス温度の要件等のIMOの定める基準を満たす焼却炉の設置義務がある。

(iv) 国際航海に従事する総トン数400トン以上の船舶に硫酸化物の濃度等を記載した船舶燃料油供給証明書の搭載義務がある。

## 3.2 規制の見直し審議経過

規制の見直しの直接の契機は、欧州諸国が共同で2005年7月に開催された第53回海洋環境保護委員会に全面的に見直しを行うことを提案し、審議の結果、次の内容について見直しを行うことが合意されたことにはじまる。見直しの項目としては、次の内容を合意した。

- ① 現在、開発段階にある大気汚染防止のための技術調査
- ② NO<sub>x</sub>低減技術の調査と次期規制値の提案
- ③ SO<sub>x</sub>低減技術の調査及び次期規制値の正当化
- ④ 貨物からのVOCの制御に係る検討
- ⑤ 粒子状物質(PM)の排出を管理するための現状調査
- ⑥ 以上を踏まえた条約や関連コードの改正案の作成

この結果を受け、IMOでは、NO<sub>x</sub>低減技術の評価作業から検討作業を開始した。2006年4月に開催された第10回BLG(Bulk Liquid and Gas; ばら積み液体及びガス)小委員会において、専門家による削減技術の評価を行い、既存のインエンジン技術については、20%程度、EGR(排気ガス再循環)等の進んだエンジン内技術では、40-50%、SCR等の後処理技術では80%程度であると取りまとめた。

その後、2006年11月に開催されたBLG大気汚染防止ワーキンググループ中間会合から、具体的なNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>規制値についての議論が開始された。

初期の会合では、NO<sub>x</sub>の新エンジン規制について、主に議論され、段階的に規制強化を図ることを合意した。具体的には、最初の規制強化(二次規制)については、2011年頃、さらに進んだ規制強化(三次規制)については2016年頃として検討を進めること、規制値についてはエンジン回転数をベースとした現行の規制値の決定方式を踏襲することなどが初期の会合で合意された事項である。しかし、初期の会合では、具体的なNO<sub>x</sub>規制値の値については、結論が出せなかった。これは、特に三次規制の規制値について、海域を限定せず、世界的に緩やかな規制値を主張する国々と、沿岸域において厳しい規制値を主張する国との意見の隔たりが大きかったため、二次規制も含めて規制値が合意できなかったためである。

新エンジンのNO<sub>x</sub>規制値について、我が国は、初期の会合以来、一貫して、沿岸域において厳しい規制値を導入することが合理的であることを主張してきた。特に、2007年11月に開催されたBLG11においては、財団法人日本船舶技術研究協会の委託を受けて当研究所が行った研究結果に基づいて、80%削減するための後処理装置の技術に関する技術情報の提供、全海域で規制強化するよりも沿岸域で規制を強化した方が、沿岸域での環境保護の面から合理的であることを説明するシミュレーション結果の提供を行うなど、詳細な科学的根拠を示して説明する文書を提出した。さらに、この会合中には、プレゼンテーションを行うなど積極的な説明活動を行った。このような我が国の説明に対して、初期の会合では理解を示す国が少なかったが、会合を重ねるごとに理解を示す国が次第に増加し、2008年2月に開催されたBLG12会合では、幅広い支持を受けるようになり、その結果を受けて開催された2008年4月に開催されたMEPC57において、我が国の提案にほぼ沿った内容、すなわち沿岸域で厳しい規制値を導入する案が承認された。

現存エンジンの規制については、環境保護上の見地から規制の必要性を主張する国と、実行上の困難さを挙げ、規制強化に反対する国との意見の対立が激しく、規制案の具体的な検討がなかなか進まなかった。しかし、最終的には、一定の期間、かつ一定の大きささ

削減技術を開発したと認めたエンジンに対してのみ一次規制値を義務化することが合意された。

一方、SO<sub>x</sub> 規制については、一部の国から、一般海域において燃料油中の硫黄分を早期に大幅に引き下げるべき（2015年までに0.5%以下とする）との強い主張がある一方、石油精製施設の整備が不透明であり、精製のための二酸化炭素の増加のおそれがあることから、規制強化に強硬に反対する意見もあり、意見がなかなか集約されない状況が続いた。初期の会合において、中間的な案も含め、6以上の様々な規制案が作成されたが、各国の対立は根強く、意見を集約するのは難しいような状況に陥った。このような状況を打開するため、2007年7月に開催されたMEPC56において、燃料油供給の専門家から構成される専門家グループを設置し、その業務内容として、全世界の沿岸域で規制強化した場合や世界的に規制値を引き下げた場合などの幾つかの規制強化案を仮定した上で、必要となる低硫黄燃料の量の変化や沿岸での硫黄酸化物排出量への影響などを科学的に見積もることを要請することを決定した。そして、その結果を基に規制値の審議を改めて行うこととした。なお、専門家グループの一員として、当研究所の吉田公一国際連携センター長も選ばれた。

その調査結果では、規制値を厳しく、かつ規制海域を増やすほど硫黄酸化物の濃度は低下すると結論が得られる一方、短期的には低硫黄燃料の供給は困難であるとの結果が得られた。この結果を受け、2008年2月のBLG11及び2008年4月のMEPC57で、再び、環境保護を最重要視する国と燃料供給を不安視する国との間で議論が再開された。その結果、世界的な規制値は0.5%以下と大幅に強化されるものの、燃料油供給に不安がある場合は2025年から実施するとの案が最終的に合意された。

### 3.3.2 IMOで合意された規制強化案の内容

2008年4月に合意に達した規制強化案は次のとおりである。なお、この規制強化案は2008年10月に改正条約として採択される見通しであり、2010年春頃に発効すると見込まれている。

#### ①NO<sub>x</sub> 規制

##### (i)新エンジンの規制強化

- 2011年～ 現行規制値（2005年規制値）より、定格回転数に応じて15.5～21.8%の規制値削減
- 2016年～ IMOが指定する海域を航行する船舶に搭載されるエンジンについて、現行規制値（2005年規制値）より、8

0%の規制値削減（24m以下のレクリエーション用船舶、合計推進出力750kW以下であって主管庁が設計上困難と認める船舶に搭載されるエンジンは、除外。）

##### (ii)現存エンジンへの規制導入

これまで未規制であった2000年1月1日以前に建造された船舶に搭載されたエンジンのうち、次のものについて2005年規制値による規制を導入することを決定。1990年以降に建造された現存船のエンジンのうち、シリンダー容積90L以上かつ出力5,000kW以上であり主管庁が適切な規制適合手法を有すると認証したもの（主管庁が規制適合手法があると認定して1年後から規制開始）。

##### (iii)エンジンの試験方法の変更

(i)、(ii)の内容及び最新のISOの方法を取り入れ、エンジンの試験方法の改正に合意。

### ②SO<sub>x</sub>及びPM規制

排出規制海域、一般海域の2つに分けられ、燃料油規制がある。燃料油の硫黄分を削減する以外に、排ガス中のSO<sub>x</sub>分を脱硫する機械の設置も代替手段として認められることになった。なお、PMについては、個別の規制値は設定されず、燃料油中の硫黄分濃度の規制値の設定を通じて削減することになった。

#### (i)排出規制海域（これまでバルト海、北海が指定されている。）

- 現行：1.5%未満  
2010年：1.0%未満  
2015年：0.1%未満

#### (ii)一般海域

- 現行：4.5%未満  
2012年：3.5%未満  
2018年：世界の燃料供給見通しを考慮して、次の規制強化時期を2020年とするか、25年とするか決定。  
2020年（又は2025年）：0.5%未満

### ③その他の規制変更点及び規制強化が今後見込まれる点

- ・タンカーに対し、荷役や運航中のVOCの排出をVOC管理計画の作成義務付

- ける。
- ・オゾン層破壊物質の記録簿の作成義務付けた。
  - ・燃料油のPSC手順を定めた。
  - ・また、硫黄分以外の燃料油の品質基準については、ISOに検討を要請し、ISOの結果を受けて改めて検討する。

4. 規制見直しと当研究所における研究との関係

4.1 概要

3.で述べたとおり、海上技術安全研究所では、IMO規制強化の動きに対応して、様々な研究を行っている。IMOへの日本提案文書に反映されたものとしては、財団法人日本船舶技術研究所から委託を受け、NOx規制案の違いによる沿岸域のNOx濃度の違いをシミュレーション計算することにより、NOx規制効果を検証する調査研究、NOx排ガス後処理装置に関する技術的な問題点及び技術的方策などの調査研究や、SOx科学者グループの一員として、世界の沿岸域で航行する船舶数の調査などがある。また、環境技術自体の開発に関する研究も行っており、国土交通省の委託を受け、エンジンの燃焼改善改良等によるNOx低減技術や後処理装置の開発に関する調査研究を行っている。

4.2 当所で行われた研究の具体例

当研究所で行っている研究は、4.1で述べたとおり多岐にわたるが、ここでは、IMOへの提案文書に反映されたものとして、日本船舶技術研究所から委託されたNOx規制効果検証に関する調査研究の概要を紹介する。

4.2.1 調査研究の概要

BLG11までの審議において、ノルウェーは、機関本体の改良(in-engine)又は機関燃焼時に水噴射しNOxの発生を抑制(現行の排出量に対してNOx削減率40~50%)する装置を措置して全海域で適応することを提案していた。それに対して、日本は、機関より排出されたNOxをSCR(Selective Catalytic Reduction)により除去する排気ガス後処理技術(現行の排出量に対してNOx削減率80%)を措置して、特定の海域のみ適応することを提案した。両者ともにNOxを削減することは可能であるが、船舶を運航する上で新たなエネルギー(CO<sub>2</sub>排出の増大)を必要

とするので、NOx-CO<sub>2</sub>のトレードオフを最小限に抑えつつ、最大限に陸域(住宅域)の被害を抑制する方法が必要である。

そのため、両者の削減方法に関して、ブルームモデルを利用して、船舶から排出されるNOxが陸域に及ぼす濃度分布から適切な方法(削減方法、制限海域等)を比較検討した。

なお、当時の日本提案及びノルウェー提案の内容を下の表1に示す。

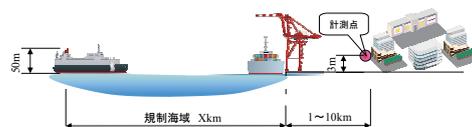
表1 日本提案とノルウェー提案の内容

	日本提案		ノルウェー提案
Tier Iからの削減率(%)	80		40-50
削減方法	SCRの搭載		機関本体の改良又は水噴射
対象船舶	全船舶		全船舶
海域制限	指定海域 Tier III	指定海域外 Tier II	全海域

4.2.2 調査研究に使用した計算式及び計算上の仮定

日本提案及びノルウェー提案の両者を比較する状態としては、図1に示すような200海里から港に向けて直線上に航行してくる船舶が、港湾施設に到着(停泊も含む)までに排出したNOxが港湾施設より1~10km離れた住宅地等の人的被害を及ぼす地点に対する濃度で比較することとした。

図1 計算の概念図



船舶の煙突より排出されるNOxは、煙突近傍で酸化作用によりNO<sub>2</sub>に変化し、風等により拡散されて、排出源からの距離によって、濃度が低下することが予想される。海上における拡散による濃度低下は、陸上でのそれと異なる障害物による複雑な拡散過程がないため、単純に風、温度、排出高さ等によって予測することとし、式(1)の正規ブルームモデルを用いて排出源より、ある距離離れた測定場所の濃度を推定することとし、次式により、単純化して計算した。

$$C(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[ \exp\left(-\frac{(z-He)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+He)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

…式(1)

Q: 排出源の放出強度 (g/s)、u: 風速 (m/s)、He: 有効煙突高さ (m)  
 y: 濃度計地点の y 座標 (風向と直角方向) (m)  
 z: 濃度計地点の z 座標 (鉛直方向) (m)  
 $\sigma_y$ : y 軸方向の拡散幅 (m)  
 $\sigma_z$ : z 軸方向の拡散幅 (m)

なお、対象船舶は、主機が定格出力 65,210kW (定格プロペラ回転数 100rpm) のコンテナ船とし、Tier I (17.0g/kW・hr) での NOx 排出量を扱った。拡散に関連する各種パラメータは、次の表のとおりとした。

表 2 拡散に関連する各種パラメータの値

排出源の放出強度	285.2g/s(0.146m <sup>3</sup> /s)
風速/風向	5.0(m/s)一様風/沿岸に向かって垂直方向
煙突高さ(有効高さ)	50.0(m)(CONCAWE式で推定)
環境温度/排出ガス温度	15℃/200℃
濃度計設置高さ(計算対象高さ)	Z=3.0(m)
拡散幅(大気安定度)	Pasquill-Giffordチャート(1時間値、大気安定度は中立(D)を仮定)

さらに、船舶、エンジン、船舶運転モード等は、一般的な実船(8,600TEU)のデータを用いた。主機は65,210kW(M.C.R: 定格回転数100rpm)の2ストロークエンジン、発電用の補機は3,440kW×4台(13,760kW: 定格回転数750rpm)の中速エンジンと仮定した。入港時の運航パターンとしては、パイロットステーション(沿岸より0.56km)37km前から減速を開始し、18.5km手前でHarbour Fullになり、各運転モードでパイロットステーションに接近して行くと仮定した。

4.2.3 調査研究結果

4.2.2の条件に基づき、沿岸より観測地点の距離をそれぞれ変えた場合の計算結果をそれぞれ、図2～図5のとおり示す。

図 2 沿岸より観測地点の距離 1km

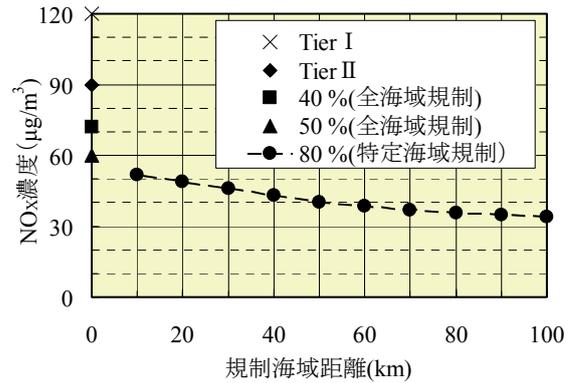


図 3 沿岸より観測地点の距離 2km

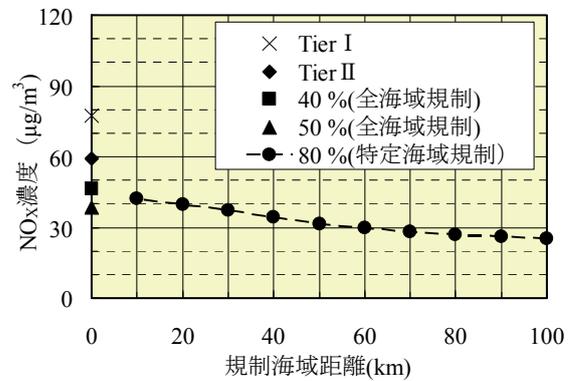


図 4 沿岸より観測地点の距離 5km

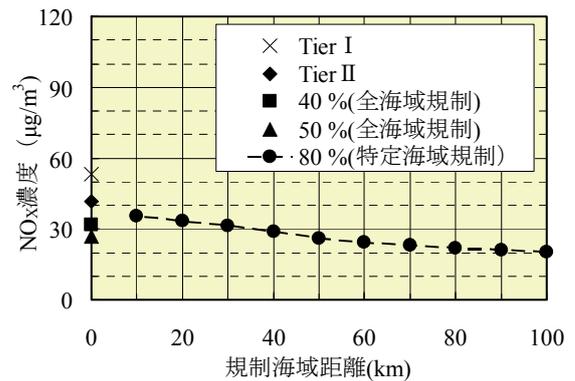
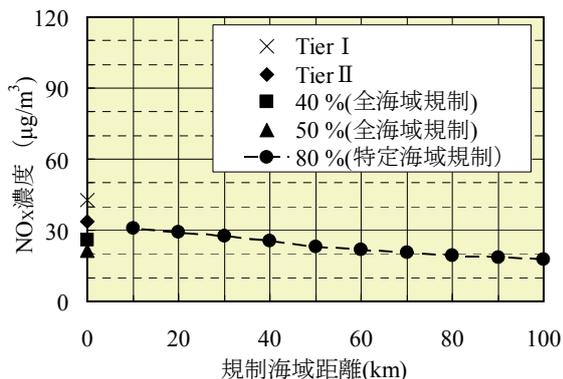


図5 沿岸より観測地点の距離10km



これらの結果から考察される結果は、次のとおりである。

- 1) 沿岸より陸域内に 1km 離れている観測地での NOx 濃度は、全海域に対して NOx を 50%削減した場合より、沿岸から約 10km 遠方より NOx を 80%削減した場合の方が、低減効果大きい。観測地点をより遠く 10km としても、沿岸から約 50km 遠方より NOx を 80%削減した場合の方が、低減効果大きい。
- 2) 沿岸より一定距離離れた観測地点で船舶より起因する NOx 濃度を一定以下とすることを達成しようとする場合、規制海域距離を一定以上大きくすることで達成できる。例えば、沿岸からの観測地点の距離 2~10km の場合であって、NOx 濃度として  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  以下を達成しようとする場合、規制海域を約 60km に設定して NOx を 80%削減することにより実現できる。
- 3) 1)及び2)の結果から、港湾域における NO<sub>2</sub>および NOx 濃度の削減のためには、NOx 削減を実施する規制海域を沿岸から数十 km 離れた距離に設定し、規制海域内は、NOx80%削減とし、それ以外の海域ではより緩やかな規制値とする方が、全海域規制より合理的である。

## 5. 謝辞

なお、本稿で記載した NOx 影響に関するシミュレーションや NOx 減技術の調査研究は、2007 年度 (財) 日本船舶技術研究協会「船舶の大気汚染防止に係る基準に関する調査研究 (大気汚染防止プロジェクト)」(日本財団助成事業)において実施したものである。

さらに、本稿を書くのに際して、国土交通省

及び (財) 海洋政策研究所の多数の発表資料を参考にさせていただいた。

関係者の方に、この場を借りて厚く感謝したい。

## 6. 参考文献

- 1) 「船舶からの排気ガスに関する国際基準導入による効果検証調査報告書」(国土交通省総合政策局環境・海洋課海洋室、平成15年3月)
- 2) 「船舶からの大気汚染防止に関する調査研究」(財団法人 船舶技術研究協会、平成20年3月)
- 3) MEPC57/21Add.1他多数のMEPC文書
- 4) Annex VI of MARPOL 73/78 Regulation for the Prevention of Air pollution from Ships and NOx Technical Code (International Maritime Organization ;ISBN 92-801-6089-3)

