船上計測における NOx 排出値の簡易評価手法*

高 木 正 英** 平 岡 克 英** 柴 田 清***
井 亀 優** 大 橋 厚 人**

Alternative Index for Compliance Verification of NOx Emission Value through On-board NOx Monitoring

By Masahide TAKAGI, Katsuhide HIRAOKA, Kiyoshi SHIBATA,
Masaru IKAME, and Atsuto OHASHI

The NOx Technical Code under the MARPOL 73/78 Convention ANNEX 6 specifies the NOx emission limits and has determined the direct measurement and monitoring method for the on-board NOx verification procedure. But the monitoring method might not have been established yet, since it is reported that some results of NOx emission values measured on board exceed the 15% allowance even in the case of engines with certification. Since there are several constraints in the measurements on board, the uncertainty is enhanced comparing to the measurements at a shop-test. In this report an alternative index is proposed to reduce the uncertainty and simplify the on-board measurement. The index is named as NOx13 that is normalized with oxygen concentrations and contains the correction factor for humidity and temperature. The NOx emission value, NOx [g/kWh], is theoretically correlated to the NOx13 as in the following expression and the correlation is experimentally confirmed.

$$\text{NOx [g/kWh]} = \alpha_1 \times \alpha_2 \times \text{be [g/kWh]} \times \text{NOx13 [ppm]}$$

α_1, α_2 ; constant, be [g/kWh] ; specific fuel consumption

1. はじめに

国際海事機関 (IMO) による NOx 排出値規制が 2005 年 5 月より発効し、陸上試験台での認証試験に加えて中間・定期検査時の検査、認証が実務として必要になっている。NOx テクニカルコード (NTC) ⁽¹⁾では、中間・定期検査時の船上における NOx 排出値確認手法として、(1) パラメータチェック法、(2) 簡易計測法、(3) モニタリング法の 3 つを規定している。この中でモニタリング法は実運航中での計測結果に基づいて検証、確認が行えるため、実用的な手段であると考えられている。船上での計測については、これまで様々な研究、調査が行われてきた⁽²⁾⁻⁽⁶⁾が、陸上試験台では規制値を満足しているにもかかわらず、船上計測結果が NTC で認められている最大 15% の許容値 (RM 級燃料使用の場合、規制値×1.15) を超えてしまう例が報告されている⁽²⁾など、モニタリング法を実施するためには未だ課題が残されている。

NOx 排出値の規制は、単位時間、単位出力あたりの NOx 排出量 [g/kWh] で評価されるが、NTC では海上での計測の実効性を考慮して、陸上よりゆるやかな計測機器の許容偏差や、様々な推定値の使用が認められて

いる。例えば、燃料流量と出力の許容計測誤差は、陸上に比べて大きい。出力については主管庁が承認した推定法の使用が、燃料組成については船上 NOx 計測のガイドライン⁽⁶⁾において示されているモデル燃料組成の使用が認められている。また、計測項目が多いことは偶然誤差の積み重ねをまねく。これらのことは NOx 排出値算出時の誤差を増大する要因となり得る。従って、できるだけ簡素化した方法によってできるだけ精度良く NOx 排出値 [g/kWh] を評価する方法が望まれる。

本研究では船上計測による NOx 排出値の簡易評価法として 13%酸素換算 NOx 濃度による評価法を提案し、本方法が現在用いられている規制値との相関が取れること、船上での計測が簡素化できること、誤差の減少が得られることを示す。

2. NOx 排出値の感度解析

規制値である排出値 NOx [g/kWh] は式(1)にて算出されるが、以下ではまず各計測誤差の NOx 排出値に対する感度解析を行う。

$$\text{NOx [g/kWh]} = K_{\text{Hdies}} \times \text{NOx [ppm]} \times 10^{-6} \times 2053 [\text{g/m}^3] \times \frac{G_{\text{exh, w}} [\text{kg/h}]}{\rho_{\text{exh}} [\text{kg/m}^3]} \times \frac{1}{W_b [\text{kW}]} \quad (1)$$

*原稿受付 平成 19 年 4 月 16 日。

**正会員 (独)海上技術安全研究所 (三鷹市新川 6-38-1)。

***正会員 (独)海上技術安全研究所

(現; 千葉工業大学 習志野市津田沼 2-17-1)

ここで K_{Hdies} は大気条件に関わる温湿度補正係数, 2053 $[g/m^3]$ は NOx 密度, $G_{exh, w}$ は湿り排ガス流量, ρ_{exh} は排ガス密度, W_b はエンジン出力を表している. なお, NOx 及び気体の濃度は水分を含んだ湿り条件での結果を用いる. 水分を除いた渴き条件にて両者を計測した場合には, 乾湿補正係数 $K_{wr}^{(1)}$ を掛けて湿り条件にする必要がある. K_{Hdies} は, NTC ではインタクーラ (I/C) 付ディーゼルエンジンの場合, 以下の式で表される.

$$\frac{1}{K_{Hdies}} = 1 - 0.012(Ha - 10.71) - 0.00275(Ta - 298) + 0.00285(Tsc - Tsc_{ref}) \quad (2)$$

Ha は給気の絶対湿度 $[g/kg]$, Ta は空気温度 $[K]$, Tsc は I/C 後の給気温度 $[K]$, Tsc_{ref} は海水温度 $25^\circ C$ に対応する I/C 後の給気の参考温度 $[K]$ である. 式(1)を相対誤差の関係式に変形すると以下ようになる.

$$\frac{\partial NOx[g/kWh]}{NOx[g/kWh]} = \frac{\partial K_{Hdies}}{K_{Hdies}} + \frac{\partial NOx[ppm]}{NOx[ppm]} + \frac{\partial G_{exh, w}}{G_{exh, w}} - \frac{\partial W_b}{W_b} \quad (3)$$

ここで排ガス密度 ρ_{exh} を一定, 排ガス中の CO , HC , C 各濃度は 0, NOx は全て NO として, 計測値の相対誤差の各項の係数を表 1 に示す. K_{Hdies} は, 温度, 湿度, 圧力の関数であり, 相対誤差は 4 つの項で表され, 各係数には計測値が含まれている.

排ガス流量の算定法については, CO_2 濃度を用いた燃焼前後の炭素原子の収支に基づくユニバーサル炭素バランス法 (UCB) と O_2 濃度を用いた酸素原子の収支に基づくユニバーサル酸素バランス法 (UOB) がある. 排ガス流量は燃料流量, 燃料組成, ガス濃度の関数であり, UCB で 3 項, UOB で 6 項の相対誤差で表される. UOB の場合, 求めた係数には変数が含まれているので, 係数の定数化のために以下の仮定を用いた.

- ・燃焼条件として当量比を $\phi=0.3$ として, O_2 濃度を算出し, NO 濃度は $1000ppm$ とした.
- ・燃料組成のモル数割合算出にはガイドライン⁽⁶⁾内のモデル燃料組成を使用し, DM 級燃料の水素, 炭素, 硫黄の成分割合をそれぞれ, $\alpha=13.6\%$, $\beta=86.2\%$, $\gamma=0.17\%$ からモル比を $C:H:S=11:20.5:0.008$ とし, RM 級燃料では $\alpha=10.9\%$, $\beta=86.1\%$, $\gamma=2.7\%$ から, モル比を $C:H:S=11:16.6:0.129$ とした.

また, 燃料成分の相対誤差は NTC 内に規定されていないため, ここでは 2% とした.

以上の仮定と, 燃料流量, ガス濃度及び出力の相対誤差の値に NTC で各計測器に許容している偏差を用いた時の感度解析の結果を図 1 に示す. なお, K_{Hdies} の影響については 3.3 にて検討する. NOx 排出値に対するガス濃度, 燃料流量, 出力の 3 つの感度影響は同程度に大きく, 計測上重要な項目であることがわかる.

表 1 感度解析結果

係数				相対誤差
$\frac{\partial K_{Hdies}}{K_{Hdies}}$	$\frac{0.012 \times \frac{6.220 P_a P_b R_a}{(P_b - P_a R_a \times 10^{-2})^2}}{1 - 0.012(H_a - 10.71) - 0.00275(T_a - 298) + 0.00285(T_{sc} - T_{sc_{ref}})}$			$\frac{\partial R_a}{R_a}$
	$\frac{-0.012 \times \frac{6.220 P_a P_b R_a}{(P_b - P_a R_a \times 10^{-2})^2}}{1 - 0.012(H_a - 10.71) - 0.00275(T_a - 298) + 0.00285(T_{sc} - T_{sc_{ref}})}$			$\frac{\partial P_b}{P_b}$
	$\frac{0.00275 T_a + 0.012 \times \frac{6.220 P_a P_b R_a}{(P_b - P_a R_a \times 10^{-2})^2} \times \frac{4075.16}{(T_a + 236.516)^2} T_a}{1 - 0.012(H_a - 10.71) - 0.00275(T_a - 298) + 0.00285(T_{sc} - T_{sc_{ref}})}$			$\frac{\partial T_a}{T_a}$
	$\frac{-0.00285 T_{sc}}{1 - 0.012(H_a - 10.71) - 0.00275(T_a - 298) + 0.00285(T_{sc} - T_{sc_{ref}})}$			$\frac{\partial T_{sc}}{T_{sc}}$
$\frac{\partial NOx[ppm]}{NOx[ppm]}$	1			$\frac{\partial NOx[ppm]}{NOx[ppm]}$
$\frac{\partial G_{exh, w}}{G_{exh, w}}$	炭素 バランス 法	1	$\frac{\partial G_{fuel}}{G_{fuel}}$	$\frac{\partial G_{fuel}}{G_{fuel}}$
	1	$\frac{\partial \beta}{\beta}$	酸素 バラン ス法	$\frac{\partial \alpha}{\alpha}$
	-1	$\frac{\partial CO_{2w}}{CO_{2w}}$	$\frac{\partial \gamma}{\gamma}$	$\frac{\partial \beta}{\beta}$
				$\frac{\partial \gamma}{\gamma}$
$\frac{\partial W_b}{W_b}$	-1			$\frac{\partial W_b}{W_b}$

$$f_1 = 10^4 \frac{M_{wO_2}}{M_{vO_2}} \times O_{2w} + \frac{A_{wO}}{M_{vNO}} \times NO_w \quad f_2 = \alpha \frac{A_{wO}}{2A_{wH}} + \beta \frac{2A_{wO}}{A_{wC}} + \gamma \frac{2A_{wO}}{A_{wS}}$$

$$H_a = \frac{6.220 P_a P_b}{P_b - P_a R_a \times 10^{-2}} \quad P_a = \frac{101.3}{760} \exp \left(18.7509 - \frac{4075.16}{T_a + 236.516} \right)$$

τ : 湿り吸入空気酸素含有率 [%], A_{wC} : 炭素原子量 $[g/mol]$, A_{wH} : 水素原子量 $[g/mol]$, A_{wO} : 酸素原子量 $[g/mol]$, M_{vO_2} : 酸素分子体積 $[m^3/kmol]$, M_{vNO} : NO 分子体積 $[m^3/kmol]$, M_{wO_2} : 酸素分子量 $[g/mol]$, R_a : 吸気相対湿度 [%], P_a : 吸気の飽和蒸気圧 $[kPa]$, P_b : 大気圧 $[kPa]$, T_a : 大気温度 $[K]$, T_{sc} : インタークーラ出口給気温度 $[K]$, G_{fuel} : 燃料流量 $[kg/h]$, NO : NO 濃度 $[ppm]$, O_2 : 酸素濃度 [%], α : 燃料中水素成分割合 [%], β : 燃料中炭素成分割合 [%], γ : 燃料中硫黄成分割合 [%], 添字 w : 湿り (水分含) 濃度

図 1 計測誤差が NOx 排出値に与える影響

エンジン出力と燃料流量の感度に関しては陸上より海上の方が大きく、海上での燃料流量の感度は RM 級が DM 級より大きい。排ガス濃度の感度に関しては、排ガス流量算定法で差があり、UOB の感度が UCB より約 2 倍大きい。なお、排ガス流量算出方法の違いによってガス濃度を同一精度で計測してもガス流量に差が表れることは文献(7)にて示した。燃料成分については仮定した相対誤差 2% が正しければ、他の計測に比べて影響が小さいことがわかる。

以上で示した陸上と海上及び燃料種類の感度影響差を陽な形で含まない NOx 排出値の評価方法を次章で示す。

3. NOx 排出値と排出濃度の関係

3.1 NOx 排出値と 13%酸素濃度換算 NOx 濃度の関係

船上計測において NOx 排出値を算出する際の誤差要因を減少させるため、計測誤差が陸上試験台と船上で同じものを担保できるガス濃度に注目する。すなわち NOx 排出値の算出式である式(1)は NOx 濃度、排ガス流量、出力の関数であるが、これをガス濃度の関係式に以下のように変形する。

完全燃焼及び燃料が C_aH_b のように炭素と水素のみで構成されていることを仮定し、 F_f を燃料流量 [g/h]、 M_f を燃料の分子量 ($A_wC \times a + A_wH \times b$) [g/mol] とする。 A_wC 、 A_wH は炭素、水素の原子量である。燃料流量 F_f/M_f [mol/h] に必要な酸素量は $F_f/M_f(a+b/4)$ [mol/h]、燃料流量 F_f は燃料消費率 be [g/kWh] と出力 W_b の積で表されるため、消費酸素質量 O_{2_con} [g/h] は以下のようになる。

$$O_{2_con} = b_e \times W_b \times \frac{1 + 0.25(b/a)}{A_wC + A_wH(b/a)} \times M_wO_2 \quad [g/h] \quad (4)$$

以上の関係から消費酸素質量 [g/h] とエンジン出力 [kW] の関係が得られる。なお、 M_wO_2 は酸素の分子量 [g/mol] である。

消費酸素体積と排ガス体積の比で表される消費酸素濃度は、大気中酸素濃度 O_{2_sur} と排ガス中酸素濃度 O_{2_exh} の差として以下のように近似する。

$$\frac{O_{2_con} \times \frac{M_vO_2}{1000 M_wO_2}}{G_{exh_w}/\rho_{exh}} \approx [O_{2_sur} - O_{2_exh}] \quad (5)$$

M_vO_2 は酸素の分子体積 [$m^3_N/kmol$] である。大気中酸素濃度 O_{2_sur} は以下の式(6)にて表される。

$$O_{2_sur} = \frac{\frac{23.15}{M_wO_2}}{\frac{23.15}{M_wO_2} + \frac{75.51}{M_wN_2} + \frac{1.29}{M_wAr} + \frac{0.05}{M_wCO_2} + \frac{Ha}{10 \times M_wH_2O}} \quad (6)$$

M_wN_2 、 M_wAr 、 M_wCO_2 、 M_wH_2O はそれぞれ窒素、アルゴン、二酸化炭素、水の分子量である。式(4)と(5)を用いて式(1)の G_{exh_w}/ρ_{exh} と W_b を消去すると、

$$NOx [g/kWh] = K_{Hdies} \times NOx [ppm] \times \frac{1}{O_{2_sur} - O_{2_exh}} \times 2053 \times 10^{-6} \times \frac{M_vO_2}{1000} \times \frac{1 + 0.25(b/a)}{A_wC + A_wH(b/a)} \times be [g/kWh] \quad (7)$$

以上より、排ガス流量と出力は酸素濃度と燃料消費率によって置き換えることができた。ここで、NOx 濃度を正規化するため、ディーゼル機関から排出される NOx 濃度の指標として広く用いられてきた 13%酸素換算 NOx 濃度を式(7)に組込む。なお、13%酸素換算 NOx 濃度は K_{Hdies} を含む以下の式(8)で定義する。

$$NOx13 [ppm] = K_{Hdies} \times NOx [ppm] \times \frac{O_{2_sur} - 0.13}{O_{2_sur} - O_{2_exh}} \quad (8)$$

13%酸素濃度換算 NOx 濃度の意味は、排出された NOx 濃度から 13%酸素濃度雰囲気中に存在するときの濃度への正規化であり、燃焼によって消費された酸素量(濃度)と発生する NOx 量(濃度)が比例していることを仮定している。式(8)を式(7)に代入し、まとめると、

$$NOx [g/kWh] = \alpha_1 \times \alpha_2 \times b_e [g/kWh] \times NOx13 [ppm] \quad (9)$$

$$\alpha_1 = \frac{2053}{O_{2_sur} - 0.13} \times \frac{M_vO_2}{1000} \times 10^{-6} \quad (10)$$

$$\alpha_2 = \frac{1 + 0.25(b/a)}{A_wC + A_wH(b/a)} = \frac{\beta}{A_wC} + \frac{\alpha}{4 \times A_wH} \quad (11)$$

α_1 は式変形及び単位換算による定数、 α_2 は燃料 1mol あたりに消費する空気 [mol] と燃料分子量の比であり、最終的には燃料中の含有成分割合によって求められる。ここで、 α は燃料中水素含有割合、 β は炭素含有割合である。一般的な硫黄や酸素、窒素を含んだ燃料においても α_2 は定数となる。これより変数になり得るのは、燃料消費率 be と NOx13 となる。

3.2 実験結果からの検討 NOx 排出値 [g/kWh] は式(9)で示したように近似的に係数 α_2 、燃料消費率 be 、

図2 NOx[g/kWh]とNOx13[ppm]の関係

排出濃度 NOx13 の関数として表される。ここでは、実験データに基づき、これら変数と NOx 排出値の関係について調べた。

図2にNOx 排出値 [g/kWh]とNOx13 [ppm]の関係を示す。データは、船上計測ではRM 級燃料油使用が5件、DM 級燃料油使用が1件、陸上試験台での計測ではDM 級燃料油使用が3件である。それぞれ負荷率25%から100%を含み、エンジン定格出力は440kW から58840kW の範囲にある。全ての平均値とその±15%を表す線を併せて示す。NOx13 とNOx 排出値の関係は、相関係数 r が0.956 となったことから燃料消費率と燃料成分の影響は小さいと考えられる。

図3にNOx 排出値と be [g/kWh]の関係を示す。様々な機関、出力の結果にも関わらず、NOx 排出値に対して、燃料消費率は±15%のバラツキはあるものの、ほぼ一定で大きな影響を及ぼしていない。小型機関のTest bed DM 1 (○印) はわずかに平均値の15%を超えている。

図4にNOx 排出値と α_2 の関係を示す。 α_2 は燃料由来の定数のため、DM 級、RM 級燃料のそれぞれにおいて異なる線上に乗ることが考えられたが、両者の違いは表れなかった。船上NOx 計測のガイドラインにはRM 級、DM 級燃料の代表値として炭素、水素、硫黄の3成分が記載されており、この3成分を用いた時の α_2 は以下ようになる。

$$\alpha_2 = \frac{\beta}{A_w C} + \frac{\alpha}{4 \times A_w H} + \frac{\gamma}{A_w S} \quad (12)$$

γ は硫黄含有割合、 $A_w S$ は硫黄の原子量である。RM 級、

図3 NOx[g/kWh]と燃費 be[g/kWh]の関係

図4 NOx[g/kWh]と α_2 [g/kWh]の関係

DM 級燃料のモデル成分を用いて α_2 を計算すると、RM 級では $\alpha_2=0.0996$ 、DM 級では $\alpha_2=0.1056$ となる。このことから燃料成分による α_2 の違いは小さいことがわかる。また、 α_2 は図3に示した燃料消費率よりも全体のバラツキが小さい。

以上の結果から、機関定格出力、負荷率によって燃料消費率にバラツキはあるが、NOx [g/kWh]とNOx13には相関関係があることが示された。NOx13による簡易評価手法を用いると、排出値を求めるために必要な燃料質量流量、燃料組成、エンジン出力の計測もしくは推定法の使用を行わなくなるため、誤差要因を減ら

すことができ、船上での計測及び評価に適していると考えられる。また、酸素換算 NOx 濃度は、陸上試験台での計測において NOx 排出値を算出するために必要な計測値を利用して算出できることも利点として挙げられる。

3.3 NOx13 の感度解析 簡易評価手法である NOx13 [ppm]に関する計測値の誤差の感度解析を行う。NOx13 の式(8)を、相対誤差を表す式に変形すると式(13)のようになる。

$$\frac{\partial \text{NOx13}[\text{ppm}]}{\text{NOx13}[\text{ppm}]} = \frac{\partial K_{\text{Hdies}}}{K_{\text{Hdies}}} + \frac{\partial \text{NOx}[\text{ppm}]}{\text{NOx}[\text{ppm}]} + \frac{1}{\frac{\text{O}_{2_sur}}{\text{O}_{2_exh}} - 1} \frac{\partial \text{O}_{2_exh}}{\text{O}_{2_exh}} \quad (13)$$

図5にNOx13 [ppm]に及ぼす各項の影響を示す。それぞれの計測相対誤差は NTC 内にて認められている誤差を与えた。 $\partial \text{O}_{2_exh}/\text{O}_{2_exh}$ の係数には酸素濃度 O_{2_exh} が含まれているが、これは負荷などによって消費酸素濃度が変わると、係数自体も変化することを表している。この係数は図1を求めた時の仮定と DM 級燃料を適用

図5 計測誤差がNOx13に与える影響

図6 大気条件の違い

すると2.15となる。この場合、 O_2 濃度の計測値は14.3%であり、 O_2 濃度が大きくなる条件、つまり当量比が小さくなる条件では計測誤差の影響が大きくなる。これよりNOx13の算出には O_2 濃度の計測に最も注意を要することがわかる。

大気条件が次のような標準的な値の場合、すなわち大気温度 $T_a=293.15\text{K}$ 、大気圧力 $P_B=101.3\text{kPa}$ 、相対湿度 $R_a=50\%$ 、I/C後の給気温度 $T_{sc}=323.15\text{K}$ 、その参照温度 $T_{sc,ref}=313.15\text{K}$ ($K_{\text{Hdies}}=0.923$)の場合、表1に示した K_{Hdies} に関する相対誤差の各係数の値は図5に示している通りであるが、標準的な大気条件下では、 K_{Hdies} に関する計測誤差はNOx13に大きな影響を与えないことがわかる。

図6には実航海にて起こり得る大気条件下での K_{Hdies} の影響を調べ、標準的な大気条件下の影響と比較した結果を示す。航海中の条件として、参考文献(2)中の一隻の運航中で最も K_{Hdies} が大きくなった条件 ($K_{\text{Hdies}}=1.222$)、 $T_a=320.15\text{K}$ 、 $P_B=100.3\text{kPa}$ 、 $R_a=35\%$ 、 $T_{sc}=325.15\text{K}$ 、 $T_{sc,ref}=312.05\text{K}$ を用いている。 $K_{\text{Hdies}}=0.923$ となった標準的な条件をCase1、 $K_{\text{Hdies}}=1.222$ となった運航中の条件をCase2とする。実際の大気条件では、大気温度、湿度、I/C出口温度がNOx13の相対誤差に対して約2%程度の影響を与えることがわかる。しかし、このような極端な条件を用いても大気条件がNOx13に与える影響は濃度計測値よりも小さくなっており、濃度計測精度の重要性は変わらない。但し、大気関連の計測値が大きな値になると、その重要性は増していくことになる。

4. 陸上計測と船上計測との比較

前章でNOx排出値とNOx13は、理論的解析及び実験結果から良い相関関係があることが示された。ここでは陸上試験台と船上での計測結果がNOx13を用いてどのような関係になるかを文献(3)及び(8)のデータを基に考察する。同一機関、同一負荷率における試験台と船上でのNOx排出値の関係を図7に、NOx13 [ppm]での関係を図8に示す。ここで、試験台での使用燃料はDM級燃料、船上では機関によってDM級(◇印)、RM級(○印)燃料を使用している。また負荷率は25, 50, 75, 100%での結果を示している。NOx排出値は船上の方が試験台での結果より全体的に大きく、±15%の範囲を超えるデータが多い。一方、NOx13の場合、ほとんど±15%の範囲内にある。NTC内にある主機関に用いる4負荷での排出値に対する重み付き平均値であるE3サイクルでの結果も併せて図7に示した。図8に示すNOx13 [ppm]の場合には、以下に示す重み付き平均値を用いた。

図7 NOx 排出値[g/kWh]での
陸上試験台と船上計測の比較

図8 NOx13[ppm]での
陸上試験台と船上計測の比較

$$\text{NOx13}_{\text{E3}} = \sum_i W_{\text{Fi}} \times \text{NOx13}_i \quad (14)$$

ここで、 W_{Fi} はE3 サイクルでの各負荷率の重み係数、 NOx13_i は各負荷率でのNOx13である。NOx13でも個別のデータで見ると、両者の差異が15%を超えている事例も存在するが、E3 サイクルと同様の平均操作を行うことによって、陸上試験台と船上での差は小さくなっている。各条件で陸上試験台と船上での差を評価す

図9 陸上試験台と船上計測の差異の比較

るため、式(15)にて変動率を求めた。

$$\text{C.O.V.} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{\text{NOx13}_{L_j} - \text{NOx13}_{S_j}}{\text{NOx13}_{L_j}} \right)^2} \quad (15)$$

n は計測点数、下添字のLは陸上試験台での、Sは船上での計測値を示す。NOx 排出値でも式(15)のNOx13をNOx 排出値に変更した同様の式にて評価した。それぞれの変動率の計算結果を図9に示す。NOx13の方がNOx 排出値よりも変動率が小さいことがわかる。また、NOx13、NOx 排出値とも船上でDM 級燃料を用いた場合の方が、陸上計測時との差が小さい。同一 grade 燃料でも変動するのは、例えばCH 比等の燃料成分の違い⁹⁾、船上でRM 級燃料を使用した時に変動率が増加するのは、Fuel NOx の影響¹⁰⁾があると考えられる。

5. まとめ

モニタリング法によるNOx 排出値算出時の計測誤差の減少を目的として13%酸素濃度換算NOx 濃度(NOx13)による簡易評価法を提案し、その有効性について検討した結果、以下のことを示した。

- (1) NOx 排出値 [g/kWh]は燃料消費率 b_e [g/kWh]とNOx13 [ppm]を含む次の関数になることを理論解析により示した。

$$\begin{aligned} \text{NOx}[\text{g/kWh}] &= \alpha_1 \times \alpha_2 \times b_e[\text{g/kWh}] \times \text{NOx13}[\text{ppm}] \\ \alpha_1, \alpha_2; &\text{定数} \end{aligned}$$

- (2) 実験結果に基づいた検証から、NOx [g/kWh]とNOx13 [ppm]の関係は、燃料性状及び燃料消費率の影響が小さく、ほぼ線形関係にある。
- (3) NOx13 [ppm]の算出においては濃度計測の誤差が

大きく影響する。大気関連計測値である大気温度、湿度、圧力の誤差の影響は小さいが、温湿度補正係数 K_{Hdies} が大きくなるような条件では、その影響が大きくなる。

- (4) NOx13 [ppm]における陸上計測と海上計測での差異は、NOx 排出値における差異より小さい。RM 級燃料を用いると、陸上計測と海上計測との差異は DM 級燃料の場合より大きくなる。

謝辞

解析を行ったデータの一部は日本財団の助成事業である旧（社）日本造船研究協会の RR-E301（平成 15 年度）と SR224 研究部会（平成 8 年度）の成果をご提供いただいた。また、陸上、船上計測に関しては、多くの関係者にご協力いただいた。ここに記すと併に関係各位に謝意を表する。

参考文献

- (1) IMO, Technical Code on Control of Emission of Nitrogen Oxides form Marine Diesel Engine, Sep. 1997
- (2) 日本造船研究協会, RR E-301 NOx 技術規則に関する調査研究
- (3) 日本造船研究協会, SR224 研究部会 運転条件の違いによる機関諸元の挙動解析
- (4) 佐々木, 他 2 名, 船用機関における NOx 排出量の経年変化, 日マリ学誌, 37-11(2002-11) 817-821
- (5) 日本造船研究協会, RR-MP3 大気汚染防止基準の作成に関する調査研究, 平成 16 年度報告書
- (6) Guideline for On-Board NOx Verification Procedure – Direct Measurement and Monitoring Method, MEPC49/22/add.1 Annex5, 1-14
- (7) 柴田, 他 4 名, NOx 排出率計測における誤差要因, 日マリ学講, 73 回論集 (平 17-5) 61-62
- (8) 高木, 他 4 名, 運航中船舶での NOx 排出値計測に関する研究, 日マリ学誌, 42-6(2007-11)掲載予定
- (9) Azetsu, A, et. al., Effect of Aromatic Components in Fuel on Flame Temperature and Soot Formation in Intermittent Spray Combustion, SAE Paper No. 2003-01-1913 (2003) 1-10
- (10) Nagai, T. and Kawakami, M., Study into Reduction of NOx Emission in Medium-Speed Diesel Engines, ISME'90, C-1-17-C-1-24