

NOx 船上モニタリングに関する簡易評価手法及び 運航中実船計測に関する研究

高木 正英*、大橋 厚人*、井亀 優*、平岡 克英*、
柴田 清**

Alternative Index for Compliance Verification of NOx Emission Value Through On-board NOx Monitoring and Study of On-board Measurement

by

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

Abstract

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

Furthermore, in this study, the NOx emission measurement, made on the same two-stroke engine, and with the same gas analyzer, was carried out on three occasions. That is a shop test, an at sea trial and during in-service. The effects on the NOx emission value are discussed with regard to the derivation methods of the exhaust gas flow rate. They are gas concentrations in UOB (universal oxygen balance) and UCB (universal carbon balance) method, compositions of the sampled fuel, stability of engine output power in operation, and the temperature & humidity correction factor K_{Hdies} . The coefficient of humidity term, for the factor K_{Hdies} , should be larger than that of K_{Hdies} as specified in the NOx technical code. This correlates the NOx emission values measured at sea trial and during in-service. The temperature and humidity should be measured in the engine room rather than in the steering house. The stability of the engine power can be evaluated alternatively by using the C.O.V. of the oxygen concentrations. The NOx emission values on an actual vessel do not agree to those at a test-bed due to the effect of the derived exhaust gas flow rate and the temperature of the intercooler outlet air.

* エネルギー・環境評価部門

** 元エネルギー・環境評価部門 (現; 千葉工業大学)

原稿受付 平成20年 5月29日

審査済 平成20年 6月 6日

目 次

1. まえがき	3
2. NO _x 排出率の感度解析	3
3. NO _x 排出率と排出濃度の関係	4
3.1 NO _x 排出率と 13%酸素濃度換算 NO _x 濃度の関係	4
3.2 実験結果からの検討	5
3.3 NO _x 13 の感度解析	6
4. 陸上計測と船上計測との比較	7
5. 実船計測方法	8
6. 計測結果及び検討	9
6.1 NO _x 排出率に関わる計測項目	9
6.1.1 排ガス流量に及ぼす算定法と 燃料成分の影響	9
6.1.2 設定負荷の安定度	10
6.1.3 温湿度補正係数の変化	11
6.2 海上計測と陸上計測の比較と差 異の要因分析	12
6.3 温湿度補正係数の評価	14
7. まとめ	15
謝辞	15
参考文献	16

記 号

A/F ;	空燃比	[-]
A _w C ;	炭素原子量	[g/mol]
A _w H ;	水素原子量	[g/mol]
A _w O ;	酸素原子量	[g/mol]
A _w S ;	硫黄原子量	[g/mol]
a ;	炭化水素系燃料炭素原子数	[-]
b ;	炭化水素系燃料水素原子数	[-]
be ;	燃料消費率	[g/kWh]
fa ;	大気係数	[-]
F _f ;	燃料流量	[g/h]
G _{fuel} ;	燃料流量	[kg/h]
G _{exh_W} ;	湿り排ガス流量	[kg/h]
Ha ;	給気絶対湿度	[g/kg _{dry air}]
K _{Hdies} ;	温湿度補正係数	[-]
K _{wr} ;	乾湿補正係数	[-]
M _f ;	燃料分子量	[g/mol]
M _V O ₂ ;	酸素分子体積	[Nm ³ /kmol]
M _V NO ;	NO 分子体積	[Nm ³ /kmol]
M _w N ₂ ;	窒素分子量	[g/mol]
M _w Ar ;	アルゴン分子量	[g/mol]
M _w CO ₂ ;	二酸化炭素分子量	[g/mol]
M _w H ₂ O ;	水分子量	[g/mol]
M _w O ₂ ;	酸素分子量	[g/mol]
Ra ;	吸気相対湿度	[%]

Pa ;	吸気の飽和蒸気圧	[kPa]
P _B ;	大気圧	[kPa]
Ps ;	湯き大気圧	[kPa]
Ta ;	大気温度	[K]
T _{in} ;	ターボチャージャ入口温度	[K]
T _{out} ;	ターボチャージャ出口温度	[K]
T _{sc} ;	インタークーラ出口給気温度	[K]
T _{scref} ;	海水温度 25℃に対応する I/C 後の給気の参考温度	[K]
NO ;	NO 濃度	[ppm]
NO _x 13 ;	酸素 13%濃度換算 NO _x 濃度	[ppm]
O ₂ ;	酸素濃度	[%]
O _{2_exh} ;	排ガス酸素濃度	[%]
O _{2_sur} ;	雰囲気酸素濃度	[%]
O _{2_con} ;	消費酸素質量	[g/h]
W _b ;	機関出力	[kW]
W _F ;	各負荷率での重み係数	[-]
α ₁ ;	係数 (式(10))	[g/kmol]
α ₂ ;	係数 (式(11))	[kmol/g]
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	[%]
φ ;	当量比	[-]
τ ;	湿り吸入空気酸素含有率	[%]
ρ _{exh} ;	排ガス密度	[kg/m ³]
ω ;	タービン回転速度	[rpm]
添字 w ; 湿り (水分含) 濃度		

1. まえがき

国際海事機関 (IMO) による NOx 排出率規制が 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 排出率確認手法として、(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)~5)}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 排出率の規制は、単位時間、単位出力あたりの NOx 排出量 [g/kWh] に基づいて行われるが、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 排出率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 排出率 [g/kWh] を評価する方法が望まれる。

本報告では船上計測による NOx 排出率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。

次に、現行規制である NOx 排出率 [g/kWh] についても、陸上と海上での計測に生じる差異を合理的に説明できないため、海上計測における問題点を明らかにすることを目的に NOx 排出率の計測を行った。本計測では、不確定な要因をできるだけ排除するため、同一の船用 2 ストローク機関について、陸上試験台、海上公試及び通常運航時を通じて、同一計測器を用いた排ガス計測を行った。また、通常運航時において、同一補油燃料使用期間に同一出力レンジにおける計測を複数回行った。

本報告では、運航時の排ガス計測結果に基づき、

排ガス流量算出法及び燃料組成の NOx 排出率に及ぼす影響、機関負荷の計測精度及び温湿度補正係数の適正化について考察した。更に通常運航時と陸上試験台、海上公試時での結果との比較を行い、NOx 排出率の差異の要因分析を行った。

2. NOx 排出率の感度解析

規制値である排出率 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 排出率に対する感度解析を行う。

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

ここで K_{Hdies} は大気条件に関わる温湿度補正係数、2053 [g/m³] は NOx 密度、 $G_{\text{exh, w}}$ 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。水分を除いた湿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。

表-1 感度解析結果

		係数		相対誤差	
$\frac{\partial K_{\text{Hdies}}}{K_{\text{Hdies}}}$		$\frac{0.012 \times \frac{6.220 P_b P_a R_a}{(P_a - P_b R_a \times 10^{-2})^2}}{1 - 0.012 (H_a - 10.71) - 0.00275 (T_a - 298) + 0.00285 (T_{sc} - T_{sc, ref})}$		$\frac{\partial R_a}{R_a}$	
		$\frac{-0.012 \times \frac{6.220 P_b P_a R_a}{(P_a - P_b R_a \times 10^{-2})^2}}{1 - 0.012 (H_a - 10.71) - 0.00275 (T_a - 298) + 0.00285 (T_{sc} - T_{sc, ref})}$		$\frac{\partial P_a}{P_a}$	
		$\frac{0.00275 T_a + 0.012 \times \frac{6.220 P_b P_a R_a}{(P_a - P_b R_a \times 10^{-2})^2} \times \frac{4075.16}{(T_a + 236.516)^2} T_a}{1 - 0.012 (H_a - 10.71) - 0.00275 (T_a - 298) + 0.00285 (T_{sc} - T_{sc, ref})}$		$\frac{\partial T_a}{T_a}$	
		$\frac{-0.00285 T_{sc}}{1 - 0.012 (H_a - 10.71) - 0.00275 (T_a - 298) + 0.00285 (T_{sc} - T_{sc, ref})}$		$\frac{\partial T_{sc}}{T_{sc}}$	
		1		$\frac{\partial \text{NOx [ppm]}}{\text{NOx [ppm]}}$	
$\frac{\partial G_{\text{exh, w}}}{G_{\text{exh, w}}}$	炭素 バ ラン ス 法	係数	相対誤差	係数	相対誤差
		1	$\frac{\partial G_{\text{fuel}}}{G_{\text{fuel}}}$	1	$\frac{\partial G_{\text{fuel}}}{G_{\text{fuel}}}$
		1	$\frac{\partial \beta}{\beta}$	$\frac{\alpha}{f_2 + r} \frac{A_w O}{2 A_w H}$	$\frac{\partial \beta}{\beta}$
		-1	$\frac{\partial \text{CO}_{2w}}{\text{CO}_{2w}}$	$\frac{\beta}{f_2 + r} \frac{A_w O}{2 A_w C}$	$\frac{\partial \gamma}{\gamma}$
				$\frac{\gamma}{f_2 + r} \frac{2 A_w O}{A_w C}$	$\frac{\partial \text{O}_{2w}}{\text{O}_{2w}}$
				$\frac{10^4 \text{ O}_{2w}}{10^4 \rho_{\text{exh}} \tau - f_1} \frac{M_w \text{ O}_2}{M_w \text{ O}_2}$	$\frac{\partial \text{NO}_w}{\text{NO}_w}$
				$\frac{\text{NO}_w}{10^4 \rho_{\text{exh}} \tau - f_1} \frac{A_w O}{M_w \text{ NO}}$	
$\frac{\partial W_b}{W_b}$			-1		$\frac{\partial W_b}{W_b}$

$$\begin{aligned} f_1 &= 10^4 \frac{M_w O_2}{M_v O_2} \times O_{2w} + \frac{A_w O}{M_v NO} \times NO_w & f_2 &= \alpha \frac{A_w O}{2 A_w H} + \beta \frac{2 A_w O}{A_w C} + \gamma \frac{2 A_w O}{A_w S} \\ H_a &= \frac{6.220 P_b P_a}{P_b - P_a R_a \times 10^{-2}} & P_a &= \frac{101.3}{760} \exp \left(18.7509 - \frac{4075.16}{T_a + 236.516} \right) \end{aligned}$$

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

Ha は給気の絶対湿度 (空気 1kg 当たりの水分量 g) [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℃ 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, CO₂ 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 O₂ 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, O₂ 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, $\alpha=13.6\%$,

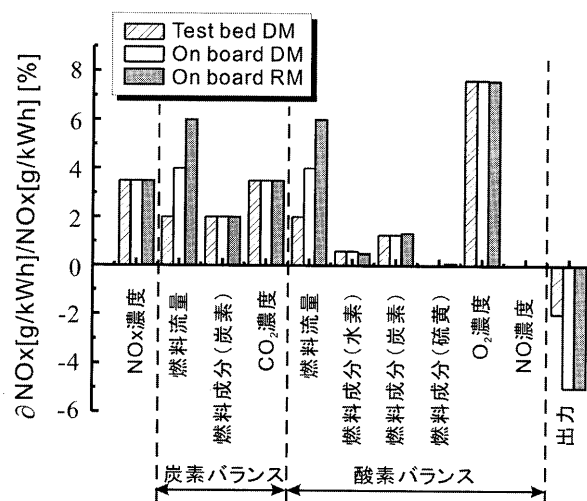


図-1 計測誤差が NOx 排出値に与える影響

$\beta=86.2\%$, $\gamma=0.17\%$ 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 排出率に対するガス濃度, 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。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 排出率の評価方法を次章で示す。

3. NOx 排出率と排出濃度の関係

3.1 NOx 排出率と 13%酸素濃度換算 NOx 濃度の関係

船上計測において NOx 排出率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 排出率の算出式である式(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] は以下ようになる。

$$O_{2_con} = b_e \times W_b \frac{1 + 0.25(b/a)}{A_wC + A_wH(b/a)} \times M_w O_2 \quad [g/h] \quad (4)$$

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。

$$\frac{O_{2_con} \times \frac{M_v O_2}{1000 M_w O_2}}{G_{exh_w} / \rho_{exh}} \approx [O_{2_sur} - O_{2_exh}] \quad (5)$$

$M_v O_2$ は酸素の分子体積 [Nm³/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。

$$O_{2_sur} = \frac{\frac{23.15}{M_w O_2}}{\frac{23.15}{M_w O_2} + \frac{75.51}{M_w N_2} + \frac{1.29}{M_w Ar} + \frac{0.05}{M_w CO_2} + \frac{Ha}{10 \times M_w H_2 O}} \quad (6)$$

$M_w N_2$, $M_w Ar$, $M_w CO_2$, $M_w H_2 O$ 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、

$$NOx [g/kWh] = K_{Hdies} \times NOx [ppm] \times \frac{1}{O_{2_sur} - O_{2_exh}} \times 2053 \times 10^{-6} \times \frac{M_v O_2}{1000} \times \frac{1 + 0.25(b/a)}{A_w C + A_w H(b/a)} \times be [g/kWh] \quad (7)$$

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、

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

$$\alpha_1 = \frac{2053}{O_{2_sur} - 0.13} \times \frac{M_v O_2}{1000} \times 10^{-6} \quad (10)$$

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

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 排出率 [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 、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 排出率の関係について調べた。

図-2に NOx 排出率 [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 排出率の関係は、相関係数 r

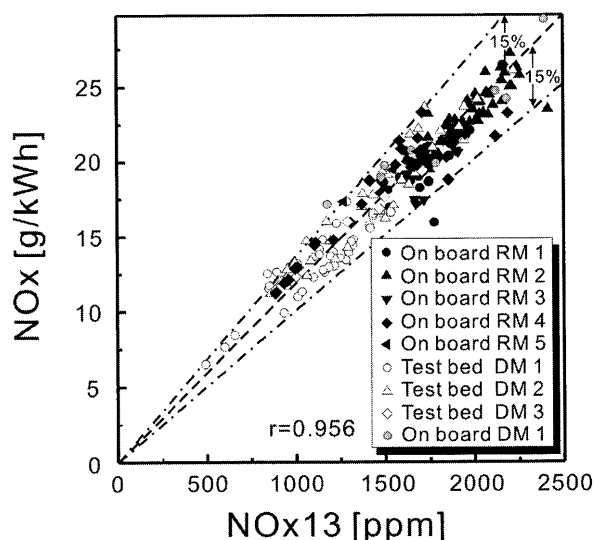


図-2 NOx [g/kWh]と $NOx13$ [ppm]の関係

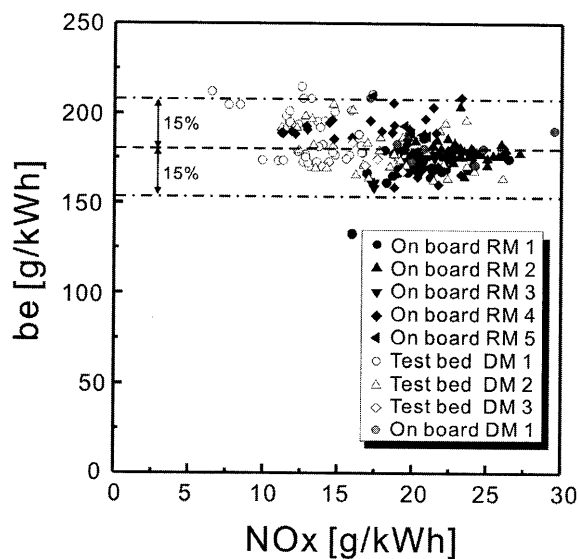
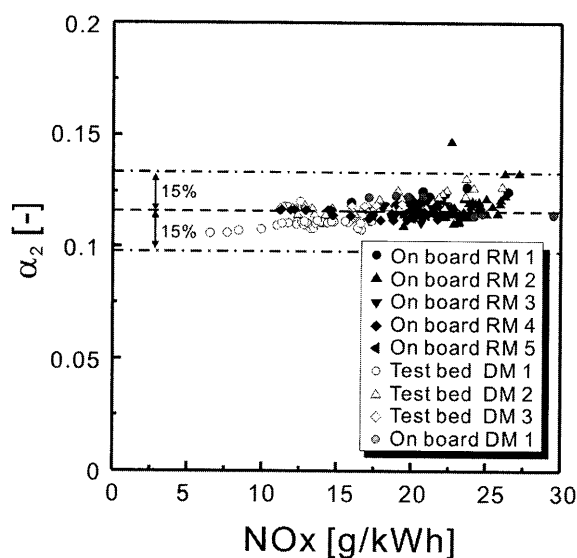


図-3 NOx[g/kWh]と燃費 be[g/kWh]の関係

図-4 NOx[g/kWh]と α_2 [g/kWh]の関係

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 排出率と 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 排出率に対して、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。

図-4 に NOx 排出率と 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、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、排出率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 排出率を算出するために必要な計測値を利用して算出す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。

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

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。 $\partial O_{2_exh}/O_{2_exh}$ 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。

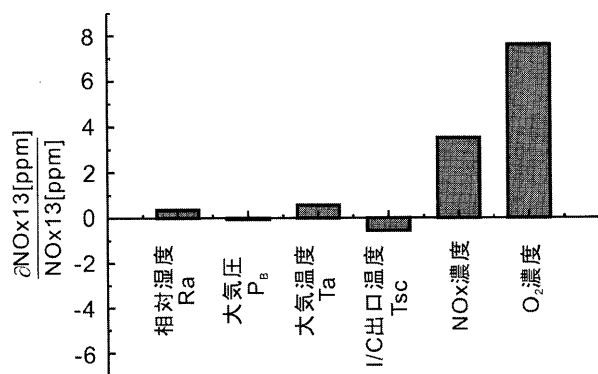


図-5 計測誤差が NOx13 に与える影響

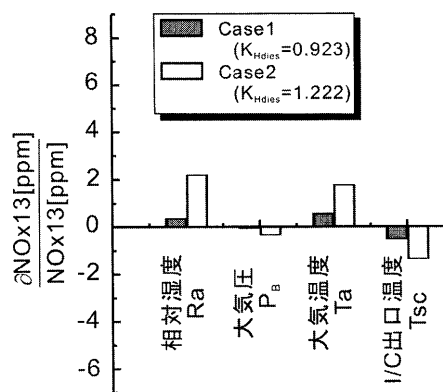


図-6 大気条件の違い

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 $T_{sc,ref}=313.15\text{K}$ ($K_{Hdies}=0.923$) 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で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 ($K_{Hdies}=1.222$)、 $T_a=320.15\text{K}$ 、 $P_B=100.3\text{kPa}$ 、 $R_a=35\%$ 、 $T_{sc}=325.15\text{K}$ 、 $T_{sc,ref}=312.05\text{K}$ を用いている。 $K_{Hdies}=0.923$ となった標準的な条件を Case1、 $K_{Hdies}=1.222$ 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

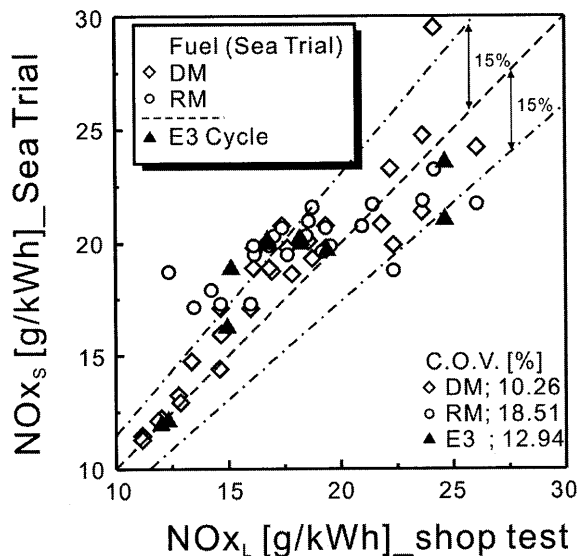


図-7 NOx 排出率[g/kWh]での陸上試験台と船上計測の比較

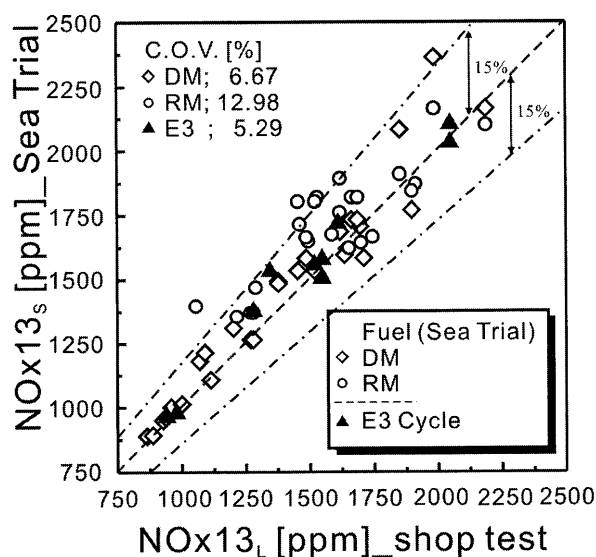


図-8 NOx13[ppm]での陸上試験台と船上計測の比較

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 排出率と 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

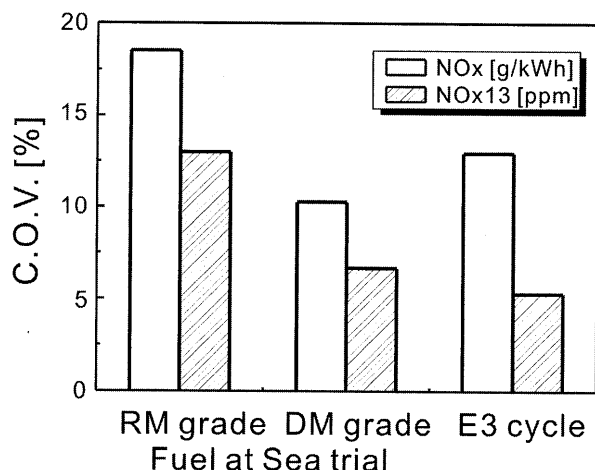


図-9 陸上試験台と船上計測の差異の比較

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 排出率の関係を図-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 排出率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 負荷での排出率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。

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

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。

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

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 排出率でも式(15)の NOx13 を NOx 排出率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 排出率よりも変動率が小さいことがわかる。また、NOx13、NOx 排出率とも船上で 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. 実船計測方法

次に陸上及び海上計測での NOx 排出率の差異を明らかにするために行った計測について示す。計測を実施した船は総トン数 62,190GT、載貨重量 21,417DW、搭載数 5,400 台の自動車運搬船で、主機関諸元を表-2 に示す。船上計測は、日本（横浜）からシンガポールに向けた航海中に実施し、計測期間は 2005 年 11 月 22 日から 11 月 30 日までの 9 日間、計測回数は 1 日 4 回（但し、22, 23 日は 1 回、24 日は港停泊のため無し、30 日は 3 回）、計 25 回である。

排ガス濃度計測は船内に計測機器を持込み NOx、O₂（堀場製作所製作所製 MEXA-720、Zr）、CO₂（島津製作所製 CGT-7000、NDIR）を計測し、校正は計測毎に毎回実施した。機関関係計測に関しては全て船内搭載機器を使用し、掃気圧、掃気温度、ターボチャージャー回転速度、ターボチャージャータービン入口・出口温度、機関出力（軸馬力計）、回転速度、トルク、エアークーラ冷却水入口・出口温度、ガバナ index、燃料流量、燃料温度を計測した。大気圧、大気温度、相対湿度については、機関室、デッキ、操舵室の 3 箇所にて計測を行った。機関室、デッキでは持込機器（アズワン社製 TH-321）、操舵室では船内搭載機器を使用した。

船上計測に用いたジルコニア（Zr）式 NOx・O₂ 計は Wet 条件でかつ、NOx と O₂ を一つのセンサで同時に計測することができる利点がある。しかし、ジルコニアセンサは NOx 濃度分析機器としては NTC には記載されていない。そこで精度確認のため、陸上試験台での計測時に化学発光式

表-2 機関諸元

エンジンサイクル	2 ストローク
気筒数	8
ボア [mm]	600
ストローク [mm]	2300
定格出力 [kW]	15540
定格回転速度 [rpm]	104
平均有効圧力 [MPa]	1.72

表-3 濃度計測器

	NOx	O ₂
Case1	CLD(化学発光式, dry)	磁気式
Case2	HCLD(加熱化学発光式)	ガルバニ電極式
Case3	Zr (ジルコニア式)	Zr

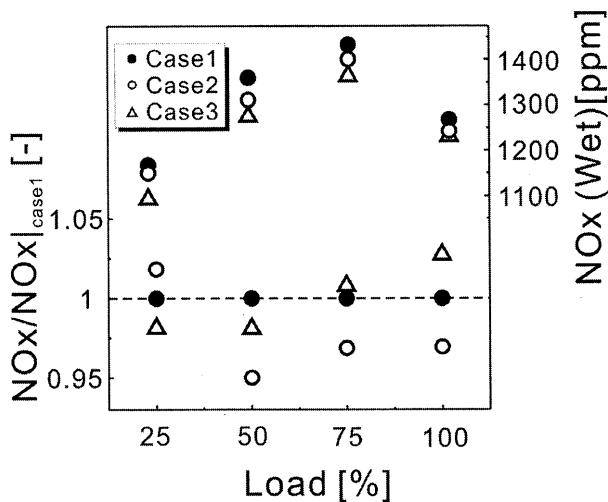


図-10 計測器による排出値、濃度への影響

(CLD) と加熱化学発光式 (HCLD) NOx 計と同時計測を行い比較検証した。同時に計測した酸素濃度については各 NOx 計が多成分計となっているため、それぞれに付属している酸素計を用いた。3 ケースの計測方式の組み合わせを表-3 に Case1~3 として示す。図-10 に各負荷率に対する NOx 濃度 (Wet) と基準となる Case1 での NOx 排出率との比を示す。なお, Case1 は乾き条件の計測結果を湿り条件に換算して示している。また, NOx 排出率算出のための排ガス流量算定法には酸素バランス法を用いている。NOx 濃度は Case1 が最も高く Case3 が最も低い。しかし, Case3 と Case1, Case2 との濃度差は最大でそれぞれ 85 ppm, 35 ppm である。NOx 排出率については, NOx 濃度と排ガス流量算定に用いる O₂ 濃度が関係するが, Case1 と比較して Case2, 3 は±5%以内に収まっている。また, Case3 と Case2 との差は, 最大 0.9 g/kWh, Case2 と Case1 との差は最大 0.9 g/kWh である。以上より測定器差はあるが計測器としての利便性を考慮して Case3 の Zr 式 NOx・O₂ 計を陸上試験台, 海上公試, 海上運航時で使用し, これらの計測結果を基として以下で検討を行う。

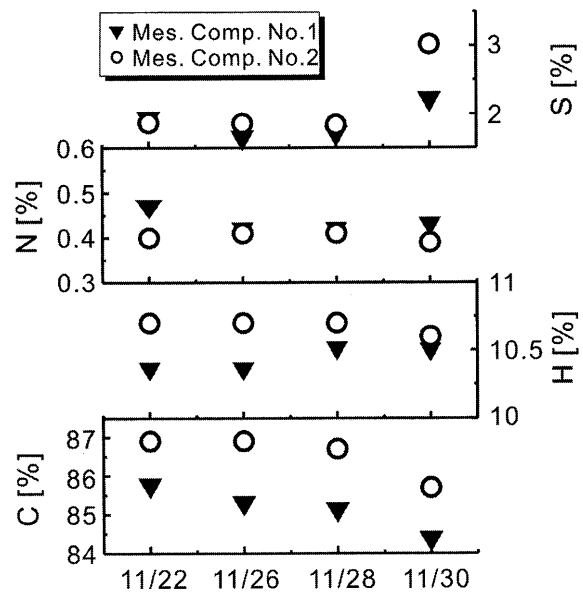


図-11 燃料分析結果

6. 計測結果及び検討

6.1 NOx 排出率に関わる計測項目

NTC の NOx 排出率の算出式は式(1)にて示されているが, 以下では, この中から排ガス流量, 出力, K_{Hdies} について検討する。

6.1.1 排ガス流量に及ぼす算定法と燃料成分の影響

排ガス流量を算定する方法は炭素バランス法 (UCB) と酸素バランス法 (UOB) がある。両者を比較するために運航時に O₂ 濃度と同時に CO₂ 濃度も計測した。また, 排ガス流量算定には燃料組成が影響するので, 燃料組成分析を行った。採取した燃料は同一の補油燃料であるが, 採取日時をずらして 4 回採取し, さらに同一サンプルに対して 2 社 (No.1, No.2) で組成分析を行った。図-11 に燃料分析結果を示す。横軸は採取した日付である。なお, 酸素は計器検出下限値以下であったためここには示していない。硫黄と窒素は 11/30 の硫黄を除き, 採取日, 分析メーカーによる差はほとんどない。しかし, 炭素は採取日, 分析メーカーによってそれぞれ 1%程度異なること, 採取日が遅くなると小さくなる傾向があることがわかる。水素は分析メーカーによって最大 0.5%程度異なる結果となった。

ガイドラインは組成分析の代用として認めるモデル燃料組成を記載している。このモデル燃料組成と 2 つの組成分析結果を用い, それぞれ UCB, UOB 法により算出した NOx 排出率とその平均値

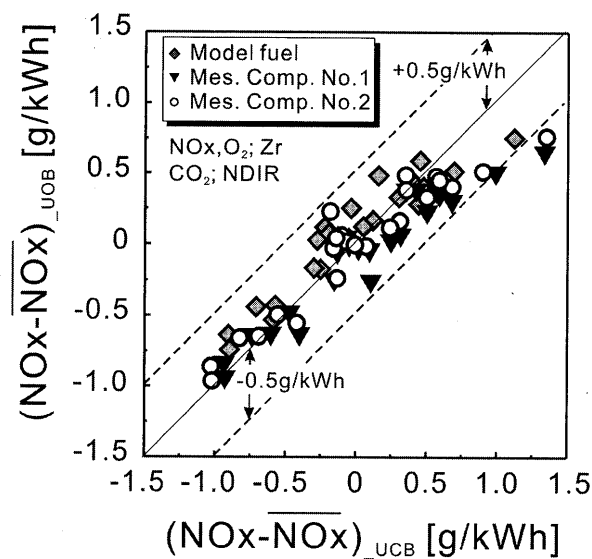


図-12 燃料分析による排ガス推定法の差

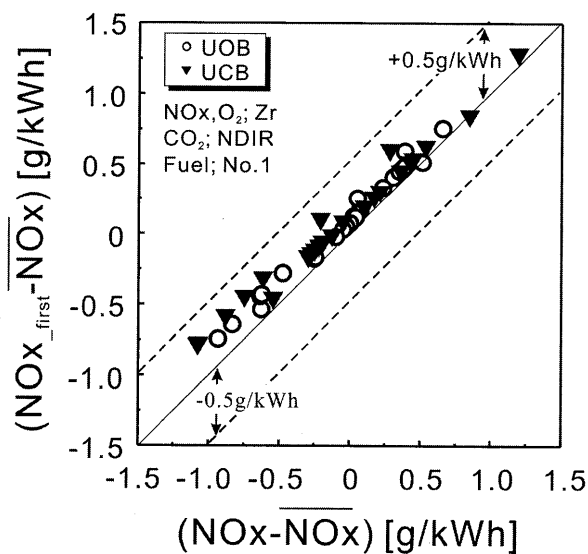


図-13 燃料タンク内での成分偏在の影響

NOx との差を対比して図-12 に示す。3つの燃料組成の内では、No.2 組成を用いた場合が、最も排出率を大きく評価しているが、燃料組成の差は大きくない。排ガス流量算定法については、モデル燃料組成の場合は UOB を用いた時、No.1 成分の場合には UCB を用いた時の結果が若干大きく評価されているが、両者の差は約 2.5%程度であり、排ガス算定法による差異は大きくない。この結果は排ガス流量の算定値と実測値とを比較した報告¹²⁾と同様である。

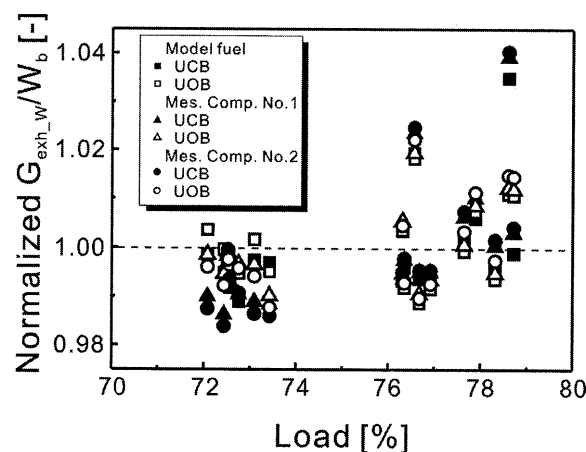


図-14 運航中での排ガス流量の差異

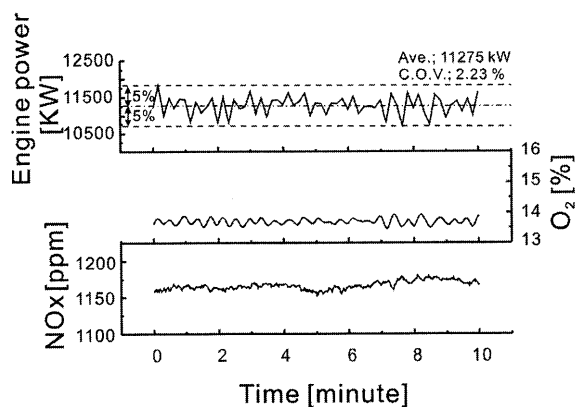
今回の 4 回のサンプリングは同一補油燃料での燃料組成のバラツキを分析したことになる。図-13 に燃料組成のバラツキが NOx 排出率へ及ぼす影響を示す。横軸は排ガス計測時に最も近い時期に採取した燃料の組成分析結果を用いて算出した NOx 排出率と平均値との差、縦軸は最初に採取した燃料の組成分析結果 (図-11 内の 11/22) を代表として用いて算出した NOx 排出率 (NOx_{first}) と平均値との差を示している。UCB, UOB のどちらの算定法を用いた場合でも、燃料組成の代表値を使った NOx 排出率が大きい、大きく見積もっても 2%程度の差であり、NOx 排出率に及ぼすタンク内燃料組成のバラツキの影響は排ガス推定法による差よりも大きくない。

図-14 に今回計測した負荷率 70~80%における単位出力当たり排ガス流量を平均値に対する相対値として示す。どの燃料組成、ガス流量算定法を用いても排ガス流量には大きな差はなく、ほぼ一定の流量である。UCB で平均値から最大 4%, UOB で 2%の差があるが、負荷率 70~80%の範囲では、負荷率の変化が単位出力当たりの排ガス流量へ及ぼす影響は大きくない。

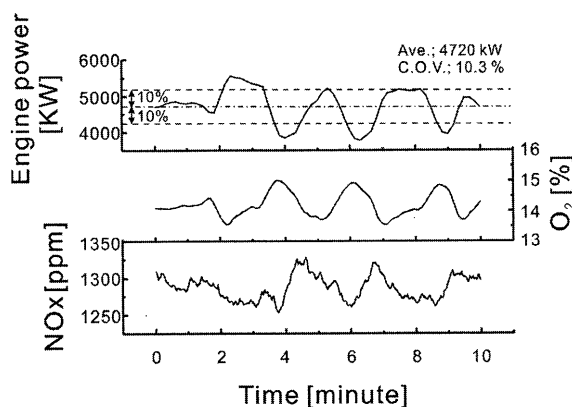
6.1.2 設定負荷の安定度

設定負荷の安定性に関しては、ガイドラインではサンプリングレート 1Hz 以上で 10 分以上の計測を行い、その C.O.V.が 5%以下でなければならないとしている。今回の計測では軸出力のサンプリングレートは軸馬力計の制限により 0.1Hz であるが、ガス濃度は 1Hz で計測した。ここでは濃度の変動率と軸出力の安定性について議論する。

図-15 に出力、NOx, O₂ 濃度の時間変化の一例



(a) 定常運航時

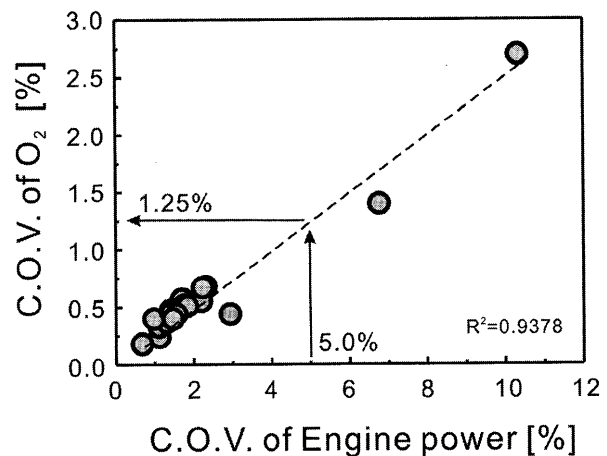


(b) 過渡運航時

図-15 出力、濃度特性例

を示す。(a)は定常運航時(平均出力 11275kW, C.O.V. 2.23%), (b)は過渡運航時(平均出力 4720kW, C.O.V. 10.3%)の結果である。(a)は一定速度で運航中のデータであり、平均値から $\pm 5\%$ を超えるデータはない。(b)は、機関停止準備中に計測したデータであり、出力が平均から $\pm 10\%$ を超えるデータもある。 O_2 濃度は出力の変動に対する追従性が高い。負荷が増加すると O_2 は減少するが、これは、負荷の増加に伴い燃料噴射量が大きくなる一方、空気量はタービンが細かな出力変動には追従できないのでほぼ一定となり、空気過剰率が減少するためであると考えられる。それに対して NOx 濃度は O_2 濃度ほどの追従性はない。

図-16に出力と酸素濃度のC.O.V.の関係について示す。一定速度で運航中の出力のC.O.V.は約3%以下であり安定している。出力と酸素濃度のC.O.V.には線形関係があり、ガイドラインで求められている出力のC.O.V.が5%以内であることに対応する酸素濃度のC.O.V.は約1.25%以内である。これより、運航中の計測において出力計測が直接できない時には O_2 濃度を用いて出力の変動を確認することが

図-16 出力と O_2 濃度のC.O.V.の関係

できることがわかる。

6.1.3 温湿度補正係数の変化

温湿度補正係数は様々な検討がなされてきた^{10), 13)~15)}が、NTCにおいてインタークーラ(I/C)付きディーゼル機関に用いる温湿度補正係数 K_{Hdies} は式(2)で表されている。

図-17に運航時計測中の温湿度補正係数 K_{Hdies} の時系列での変化を示す。日本からシンガポールに向かうに従って K_{Hdies} は大きくなり、乾燥状態から高湿度状態に変化しているが、インタークーラ内での結露は起こっていない。機関室、デッキ、操舵室での K_{Hdies} は大きく異なり、機関室での結果が最も小さく、乾いている。これは本船が通風機によって機関室へ給気を行っているために機関室と外気の温湿度条件が異なるためと考えられる。

試験の妥当性を示すための大気係数 f_a はターボ過給機付ディーゼル機関の場合、以下の式で表される。

$$f_a = \left(\frac{99}{P_s} \right)^{0.7} \left(\frac{T_a}{298} \right)^{1.5} \quad (16)$$

P_s は過き大気圧[kPa]である。機関室のデータを用いて算出した f_a を図-17に示す。今回の計測期間中の f_a は、試験が有効な範囲である $0.96 \sim 1.06^{16)}$ に入っていた。

図-18に機関室と操舵室で計測した温湿度を用いた K_{Hdies} と NOx 濃度の関係を示す。負荷率が70~80%での18点の結果のみを示している。操舵室の計測値を用いた K_{Hdies} は機関室の場合と比べて大きく、値のバラツキが大きい。温湿度の計測位置は重要であり、機関室での温湿度計測が必要である。今回の計測中で同一負荷率の範囲にお

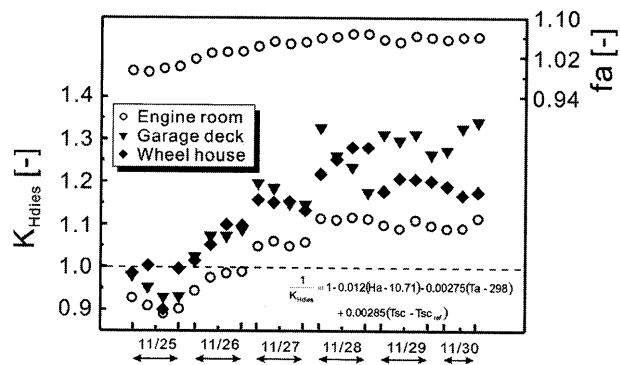


図-17 海上計測中の温湿度補正係数の変化

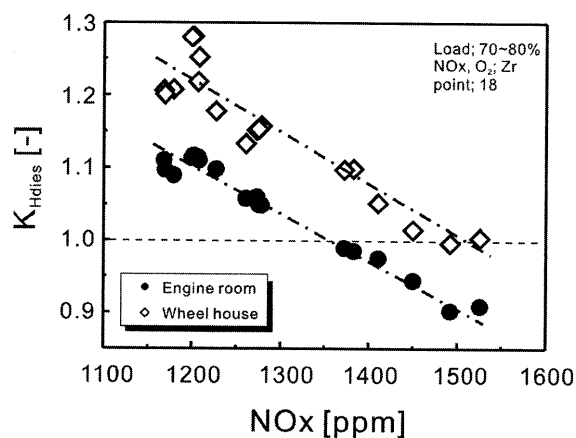


図-18 温湿度計測位置の排出濃度への影響

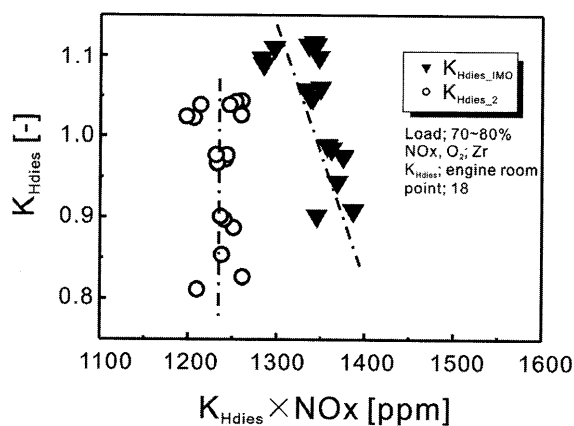


図-19 温湿度による排出濃度補正の効果

いて変化するのは、前項までに述べた燃料組成の変化、単位出力あたりの排ガス流量、設定負荷の安定度を考慮すると温湿度以外にないと考えられる。図-19に NOx 濃度に K_{Hdies} を乗じて補正した NOx 濃

表-4 K_{Hdies} の各重み係数

	Ha	Ta	Tsc
$K_{\text{Hdies_IMO}}$	-0.012	-0.00275	0.00285
$K_{\text{Hdies_2}}$	-0.0175	-0.000911	0.00804

度と K_{Hdies} の関係を▼印で示す。補正 NOx 濃度は 100 ppm 以上のバラツキが残り、しかも温湿度補正係数に対して傾きを持ち、一定の NOx 補正値が得られていない。NTC には、関係当事者の合意と主管庁の承認があれば他の補正式を使っても良いことが記載されている。そこで参考文献 13)と同様に今回の計測結果から重回帰分析を行い、本機関に合った K_{Hdies} を求めた。表-4 に Ha, Ta, Tsc の係数を示し、図-19 に補正しなおした結果を○印で示す。改めて温湿度補正を行うと、 NOx 補正値は大気条件によらず約 1230ppm で一定となる。今回求めた補正係数 ($K_{\text{Hdies_2}}$) は、IMO 補正係数に比べて湿度で約 1.5 倍、温度で約 1/3 の係数を持つことになり、4 ストロークコジェネ機関での結果¹³⁾と同じく湿度に対する補正を大きくする必要があるという結果になった。

6.2 海上計測と陸上計測の比較と差異の要因分析

前節までの検討により、運航時計測の状態が明らかになった。以下では陸上試験台、海上公試での結果との比較を行う。

図-20 に各負荷率に対する NOx 排出率の陸上試験台、海上公試、運航時での結果を併せて示す。 K_{Hdies} は表-4 に示した $K_{\text{Hdies_2}}$ を用いている。全ての濃度計測は同一計測器 (Zr) にて行われており、排ガス流量は UOB で算定している。燃料中の窒素分が NOx に転換することが知られている¹⁰⁾が燃料中の窒素含有量は陸上試験台での DM 級燃料で 0.19%、海上公試時の DM, RM 級燃料で 0.15, 0.2%, 海上運航時で 0.42~0.47%である。 NOx 排出率は、陸上試験台、海上公試時では燃料の違いによらず、ほぼ一致した結果が得られているが、運航中の結果は陸上試験台、海上公試時よりも約 2 g/kWh 以上小さい。この差を運航中の負荷率 70~80%における NOx 排出率の標準偏差 0.37 g/kWh と比べると十分大きい。

その原因を調べるために、図-21 に陸上試験台、海上公試、運航時の負荷率 70~80%での NOx 排出率に関する各項目の変化を示す。

NOx 排出率は、式(1)に示すように温湿度補正された NOx 濃度 ($K_{\text{Hdies}} \times \text{NOx}$ [ppm]) と単位出

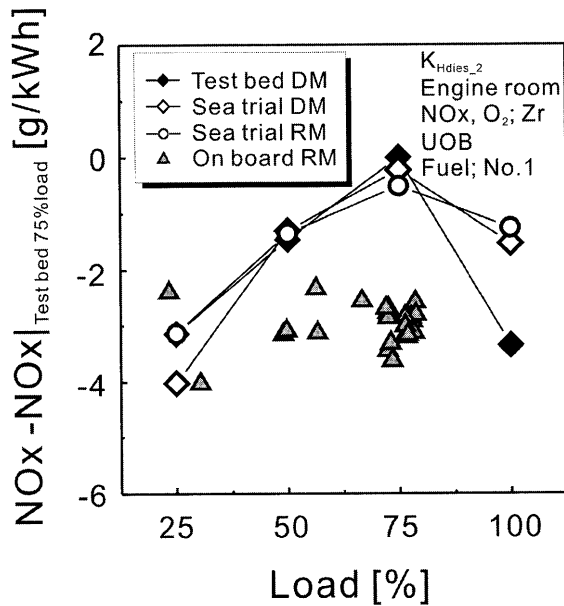


図-20 K_{Hdies} を補正した排出値での
陸上－海上計測の比較

力当たりの排ガス流量 [kg/kWh]の積で表される。この両者を比較すると、NOx 排出率ではほぼ同じ値になった陸上試験台と海上公試の結果は、濃度、排ガス流量とも異なっていることがわかる。陸上試験台と海上公試の結果のどちらも運航時との差は、単位出力当たりの排ガス流量の方が大きい。海上公試で流量が大きくなっているのは、ターボチャージャの回転速度 ω [rpm]にも表れており、海上公試時は運航時より約 10%大きい。この理由としては、海上公試から今回の運航時の計測まで約 1 年が経過していることによって、タービンブレードの汚れが進み、タービン回転速度が減少したためであると考えられる。

陸上試験台での単位出力当たりの排ガス流量は運航時の結果と比べて大きい、タービン回転速度は運航時とほとんど変わらない。これは、後述する図-22 に示すように陸上試験時の空気温度は約 10～20℃低く、密度が若干大きくなったことが、同一空気量を供給するために必要なタービン回転速度を減少させる要因の一つになったと考えられる。

以上のことは、今回の海上運航時の計測は、空気、排ガス流量の面において陸上試験台及び海上公試時とは同一条件にて計測が行えていないことを示している。

陸上試験台での温湿度補正 NOx 濃度は他の条件に比べて高い値を示すが、この理由を調べるため図-22 に K_{Hdies_2} と補正係数の各項の関係を示す。 K_{Hdies_2} は運航時の H_a , T_a , T_{sc} を用いて求めている。

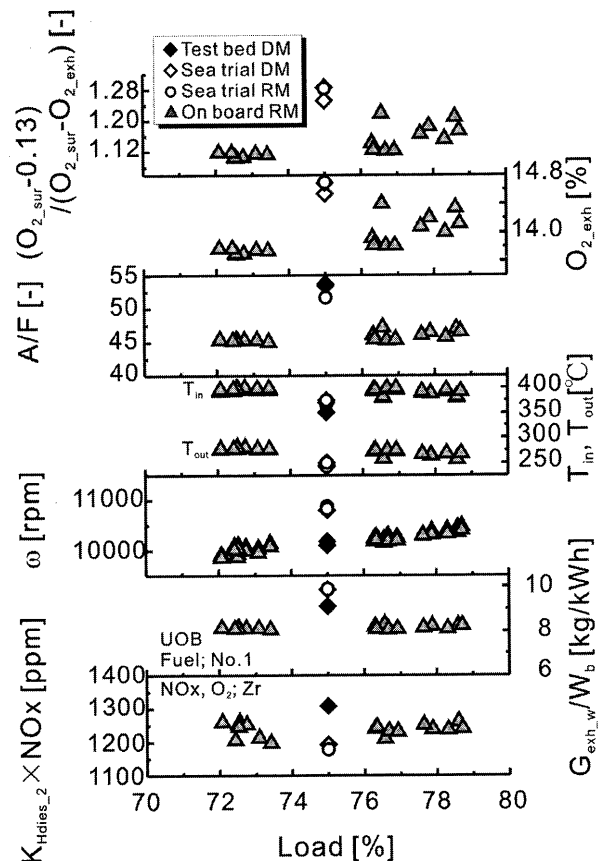


図-21 陸上、海上公試、運航中計測時の
計測及び算出項目の比較

るので、運航時の温度、湿度は K_{Hdies_2} に対して直線的に分布していることが確認できる。陸上試験台と海上公試での計測結果は K_{Hdies_2} の係数を算出する際に用いていないが、海上公試時の値は運航時の値と同一直線上にある。それに対して、陸上試験台時の値は直線から外れ、 K_{Hdies_2} では補正できていないことを表している。 K_{Hdies_2} は H_a ; 4~20 g/kg, T_a ; 27~39℃, T_{sc} ; 51~53℃ の範囲で求められた結果であり、この範囲に含まれない陸上試験台での結果は内挿の範囲外になり、結果として正しく補正されていない。

図-22 には同時に酸素換算 NOx 濃度である NOx13 を併せて示している。NOx13 は式(8)で定義される。NOx13 の場合でも陸上試験台での結果は直線上から大きく外れているのに対して、海上公試時の結果は、運航時の結果と一致している。これは、図-21 に示した酸素濃度に関する項 $(O_{2_sur} - 0.13) / (O_{2_sur} - O_{2_exh})$ が運航時より大きい のに対して、温湿度補正 NOx 濃度は小さく、結果として両者が相殺されるためである。但し、図-22 の NOx13 は K_{Hdies_2} に対して傾きを持ってお

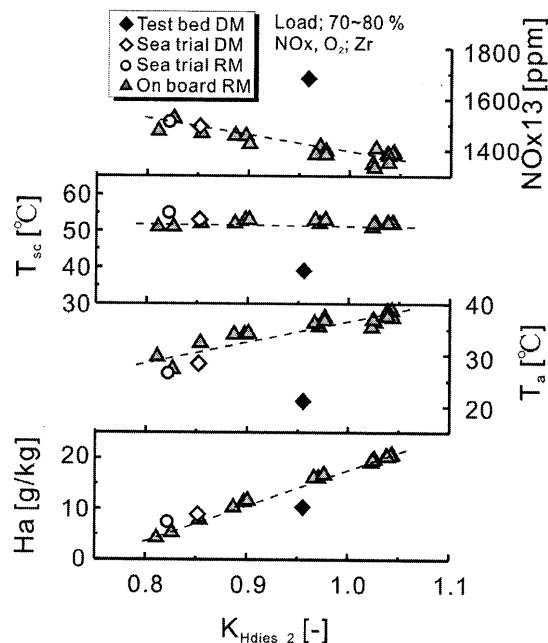


図-22 温湿度補正に関する各項と酸素濃度換算 NOx 濃度への影響

り、温湿度の影響を排除できていないことがわかる。これは、温湿度補正が NOx 濃度に対してのみ行われているため、酸素濃度の変化を補正できていないからである。Tsc に関しては陸上と船上で大きく異なる。この差はエアクーラの冷却水温度に起因しており、陸上試験台と船上計測での差を生じさせる一要因になっている。

6.3 温湿度補正係数の評価

6.1.3 にて求めた本運航時の実験にて求めた温湿度補正係数は、図-19、表-4 に示したように補正係数 (K_{Hdies}) $\times$ NOx [ppm] が一定になるように湿度、温度、I/C 出口温度の重み係数が調整されている。しかし、前節の通り温湿度の変化によって NOx 濃度のみならず他の値(燃料消費率、O₂ 濃度等)も変化する。従って、 K_{Hdies} によって何を補正するのが重要となる。例えば Nagai ら¹⁰⁾や近藤¹³⁾は NOx13 [ppm] が一定になるように補正係数を求めており、また、式(1)に示した NOx 排出率を補正すると考えたときには、NOx 排出率が一定になるように補正係数を求めることもできる。6.1.3 で行ったように、 K_{Hdies} が NOx 濃度だけを補正するものであるとすれば、燃料消費率や酸素濃度の補正を同様に行うか、その他の影響がないことを明らかにしないと正しい評価はできないことになる。6.1.3 の重回帰分析では、データ点数分 (18 点) の NOx 濃度平均値に最も近づくような湿度、温度、I/C 出口温度の重み

表-5 K_{Hdies} の各重み係数

	一定値	Ha	Ta	Tsc
K_{Hdies_IMO}	—	-0.012	-0.00275	0.00285
K_{Hdies_2}	NOx [ppm]	-0.0175	-0.000911	0.00804
K_{Hdies_3}	NOx13 [ppm]	-0.02009	-0.004024	0.005839
K_{Hdies_4}	NOx [g/kWh]	-0.01668	-0.001717	0.005903

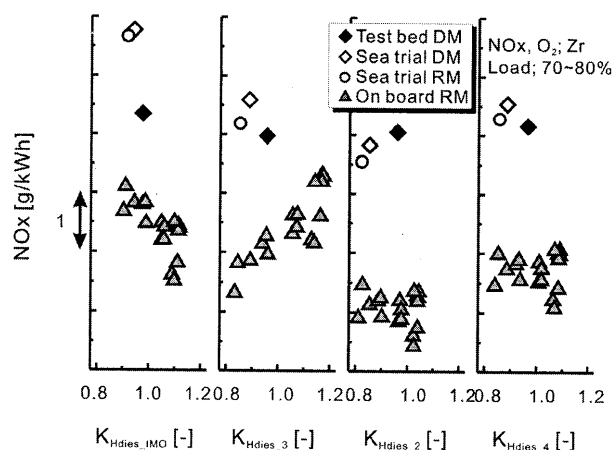


図-23 各温湿度補正係数と NOx 排出率の関係

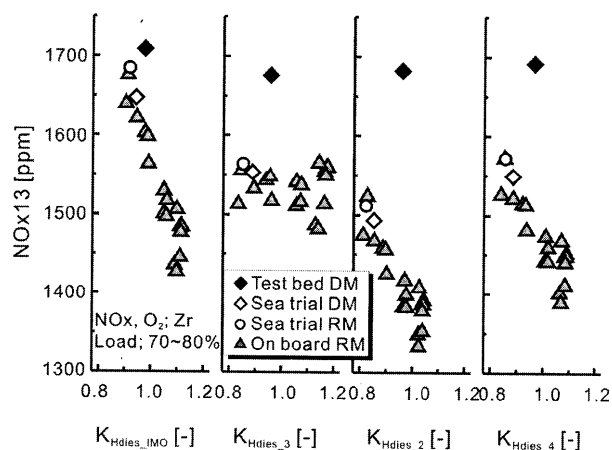


図-24 各温湿度補正係数と NOx13 の関係

係数を求めている。そこで、ここでは NOx13 と NOx 排出率についても同様の重回帰分析を行い、重み係数に変化があるか、また各種 (NOx 濃度、NOx13、NOx 排出率) によって求めた K_{Hdies} によって補正された NOx13、NOx 排出率がどのよう

な傾向をもつのかを調べた。

表-5に負荷70~80%でのNOx濃度, NOx13, NOx排出率の各々を一定にするようにしたときの湿度, 温度, I/C出口温度の重み係数を示す。図-23に各々の K_{Hdies} とNOx排出率の関係, 図-24にNOx13との関係を示す。求められた K_{Hdies} の重み係数はそれぞれ異なり、湿度の重み係数は元のIMO補正係数(K_{Hdies_IMO})より大きくなっている。NOx排出率を基に求めた K_{Hdies_4} とNOx13を元に求めた K_{Hdies_3} はNOx排出率, NOx13をそれぞれ一定にしていることが確認できる。NOx濃度から求められた K_{Hdies_2} はNOx排出率の絶対値は異なっているがNOx排出率からの K_{Hdies_4} と同様にNOx排出率を一定に評価している。従って、今回検討した陸上・海上での差異の検討においてはNOx濃度による K_{Hdies_2} でNOx排出率の検討を行うことは問題ないことが確認できる。NTCでは他の補正式を使うことも認められているが、評価する指標(NOx濃度, NOx13, NOx排出率)によって K_{Hdies} が異なる、また異なる指標によって求めた K_{Hdies} で補正を行おうとしても正確に補正ができない、具体的にはNOx13から求めた K_{Hdies_3} ではNOx排出率の補正はできないことから、補正係数と指標を合わせる必要があることがわかる。

7. まとめ

モニタリング法によるNOx排出率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。

- 1-1) NOx排出率 [g/kWh]は、燃料消費率 be [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。

$$NOx[g/kWh] = \alpha_1 \times \alpha_2 \times b_e[g/kWh] \times NOx13[ppm]$$

α_1, α_2 ; 定数

- 1-2) 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。
- 1-3) NOx13 [ppm]の算出においてはガス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。
- 1-4) NOx13 [ppm]における陸上計測と海上計測での差異は、NOx排出率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。

海上計測におけるNOx排出率算出時の問題点を明らかにすることを目的に、同一2ストローク機関について陸上試験台、海上公試、通常運航時を通じて同一計測器にて排ガス計測を行った。運航時の計測に基づいた排ガス流量推定法と燃料組成のNOx排出率に及ぼす影響、設定負荷の安定度と温湿度補正係数の補正に関する考察を行うと共に、陸上試験台、海上公試時のNOx排出率の比較及びその差異の要因分析を行い、以下の結論を得た。

- 2-1) 運航時の計測結果において、炭素、酸素バランス法を用いた排ガス推定法の差異はほとんど現れない。また、同一補油内での燃料成分の差異は小さく、NOx排出率に対して最大で2%程度の影響である。
- 2-2) 一定速度で運航中の出力のC.O.V.は約3%以下で安定している。出力を直接計測しない場合、出力のC.O.V.と線形関係のある排出ガスの酸素濃度のC.O.V.を用いることで出力の安定性を確認することができる。
- 2-3) 温湿度の船上での計測位置によって温湿度補正係数は大きく変化するので、機関室内で温湿度計測を行わないと正確なNOx排出に対する評価ができない。
- 2-4) 運航時負荷率70~80%におけるNOx濃度を対象に重回帰分析を行い、温湿度補正係数 K_{Hdies} の係数を算出した。今回計測を行った大型2ストローク機関の温湿度補正係数はIMOでの補正係数より湿度の影響を大きくする必要がある。
- 2-5) 陸上試験台及び船上でのNOx排出率の比較を行った結果、吸込空気量に大きな差があること及び雰囲気条件、とりわけインタークーラ出口温度が大きく異なることが、両者の差を生じさせる要因になっている。また、今回運航中データに基づいて求めた温湿度補正係数では陸上試験台での結果を補正できないことを示した。

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、日本郵船殿に多大なる協力を頂いた。その他、関係各位と併せてここに記すと共に謝意を表する。

参考文献

- 1) IMO, Technical Code on Control of Emission of Nitrogen Oxides from 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) 107-114
- 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
- 11) Prevention of Air Pollution from Ships -On-board NOx Measurement and Monitoring, IMO MEPC49/INF.10
- 12) 中村, 他 3 名, レイアウト線図上の大型 2 サイクル機関の NOx 排出特性, 日マリ学誌 34-4 (1999-4) 243-252
- 13) 近藤, ディーゼル機関の排出 NOx に関する大気条件の影響, 日マリ学誌 33-5 (1998-5) 319-324
- 14) 馬場, 他 3 名, 大型ディーゼル機関の燃焼領域温度に及ぼす大気条件の影響解析, 日マリ学講, 72 回論集 (平 16-10) 39-40
- 15) 日本船用機関学会, 船舶上における大気汚染物質測定法検討調査報告書 (平 8-3) 15-19, 88-90
- 16) ISO 8178-1:2006, Reciprocating internal combustion engines -- Exhaust emission measurement -- Part 1: Test-bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions