運航中船舶でのNOx 排出値計測に関する研究*

高 木 正 英**

大 橋 厚 人**

井 亀

優**

平 岡 克 英**

柴 田

清***

Study on On-board Measurement of NOx Emission Value

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

The on-board NOx monitoring method is one of the three ways for the periodical survey, which demonstrates compliance by means of the measurement of the NOx emission value on in-service conditions. In this study of 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.

1. はじめに

国際海事機関 (IMO) による NOx 排出規制に関する NOx テクニカルコード (NTC) ⁽¹⁾では、陸上試験台での初期認証試験のみならず、中間・定期検査時の検査、再認証においても NOx 排出値を確認しなければならない。その方法として、(1) パラメータチェック法、(2) 簡易計測法、(3) 直接計測及びモニタリング法 (以下モニタリング法) が規定されている。これらの中でモニタリング法は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おり、その実施要領として船上 NOx 評価手順に関するガイドライン⁽²⁾が定められている。しかし、船上での計測は、NTC によって認められている許容値、即ち規制値の 15% (RM 級燃料使用の場合) を超える例が報告されている⁽³⁾など、未だ確立されていない。すなわち海上での計測は様々な要因が同時に変化するため、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でいる。そこで我々は海上計測における問題点を

明らかにすることを目的に、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、試験台上試験、海上公試、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排ガス計測を多数回行った。

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 排出値に及ぼす影響、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 排出値の差異の要因分析を行った。

表 1 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

*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)

図1 計測器による排出値，濃度への影響

表2 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

2. 計測方法

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 1 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）2 時間間隔で約 10 分間，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 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 回転速度，ターボチャージャタービン入口・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（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 2 に Case1~3 として示す．図 1 に各負荷率に対する NOx 濃 度（Wet）と基準となる Case1 での NOx 排出値との比 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 排出値算出のた 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 排出値について 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．

3. 計測結果及び検討

3.1 NOx 排出値に関わる計測項目 NTC の NOx 排 出値の算出式を式(1)に示す．

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

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_{exh_w} は湿り排ガス流量，ρ_{exh} は排 ガス密度，W_b はエンジン出力である．以下では，排ガ ス流量，出力，K_{Hdies} について検討する．

3.1.1 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 2 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 排出値とその平均値 $\overline{\text{NOx}}$ との差を対比して図 3 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、最も排出値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、

図2 燃料分析結果

図3 燃料分析による排ガス推定法の差

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⁽⁴⁾と同様である。

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 4 に燃料組成のバラツキが NOx 排出値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 排出値と平均値との差、縦軸は最初に採取した燃料の組成分析結果 (図 2 内の 11/22) を代表として用いて算出した NOx 排出値 ($\text{NOx}_{\text{first}}$) 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 排出値が大きいが、大きく見積もっても 2%程度の差であり、NOx 排出値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

図4 燃料タンク内での成分偏在の影響

図5 運航中での排ガス流量の差異

りも大きくない。

図5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。

3.1.2 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6に出力、NO_x、O₂濃度の時間変化の一例を示す。

(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

(a) 定常運航時

(b) 過渡運航時

図6 出力、濃度特性例

り、平均値から±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±10%を超えるデータもある。O₂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O₂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NO_x濃度はO₂濃度ほどの追従性はない。

図7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O₂濃度を用いて出力の変動を確認することができる。ことがわかる。

3.1.3 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⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾が、NTCにおいてイン

図7 出力とO₂濃度のC.O.V.の関係

図8 海上計測中の温湿度補正係数の変化

図9 温湿度計測位置の排出濃度への影響

図11 K_{Hdies} を補正した排出値での陸上-海上計測の比較

図10 温湿度による排出濃度補正の効果

表2 K_{Hdies} の各重み係数

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

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。

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

ここで 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℃ に対応する I/C 後の給気の参考温度[K]を表している。

図8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。

$$f_a = \left(\frac{99}{Ps} \right)^{0.7} \left(\frac{Ta}{298} \right)^{1.5} \quad (3)$$

Ps 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8に示すが、今回の計測期間中の f_a は、試験が有効な範囲である 0.96~1.06⁽⁹⁾に入っていた。

図9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10に NOx 濃度に K_{Hdies} を乗じて補正した NOx 濃度と 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 補正值が得られていない。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(5)と同様に今回の計測結果

図12 陸上、海上公試、運航中計測時の計測及び算出項目の比較

から重回帰分析を行い、本機関に合った K_{Hdies} を求めた。表2に Ha , Ta , Tsc の係数を示し、図10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_{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ストロークコジエネ機関での結果⁶⁾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。

3.2 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11に各負荷率に対するNOx 排出値の陸上試験台、海上公試、運航時での結果を併せて示す。

K_{Hdies} は表2に示した K_{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⁶⁾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

図13 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

～0.47%である。NOx 排出値は、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 排出値の標準偏差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12に陸上試験台、海上公試、運航時の負荷率70～80%でのNOx 排出値に関する各項目の変化を示す。

NOx 排出値は、式(1)に示すように温湿度補正されたNOx濃度 ($K_{Hdies} \times NOx$ [ppm]) と単位出力当たりの排ガス流量 [kg/kWh]の積で表される。海上公試ではDM, RM級 (◇, ○印) 燃料を使用しているが、温湿度補正したNOx濃度は共に運航時データの平均値より約4%小さい。それに対して、単位出力当たりの排ガス流量は約22%大きい。つまり、海上公試のNOx 排出値が運航時の結果より約18%大きくなるのは排ガス流量の違いによる影響が大きい。この排ガス流量の差は、ターボチャージャの回転速度 ω [rpm]の差にも表れており、海上公試時は運航時より約10%大きい。

陸上試験台での結果 (◆印) は、温湿度補正NOx濃度が運航時より約6%大きく、排ガス流量が約12%大きいので、NOx 排出値としては海上公試時と同様に運航時より大きい結果となっている。

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13に示

の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。

海上公試時と比べて運航時の空気量が少なくなっている理由としては、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。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 13 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 13 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 は以下の式で定義される。

$$NOx13[ppm] = K_{Hdies} \times NOx[ppm] \times \frac{O_{2_sur} - 0.13}{O_{2_sur} - O_{2_exh}} \quad (4)$$

O_{2_exh} と O_{2_sur} はそれぞれ排ガス中、大気中酸素濃度(湿り条件)である。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、海上公試時は図 12 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ものに対して、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。陸上試験台での結果は酸素濃度に関する項、温湿度補正 NOx 濃度とも運航時の値より大きく、NOx13 が運航時の結果から大きく離れる。但し、図 13 の NOx13 は K_{Hdies_2} に対して傾きを持っており、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。 T_{sc} 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。

4. まとめ

海上計測における NOx 排出値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 排出値に及ぼす影響、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 排出値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。

- (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大きくなく、NOx 排出値に対して最大で 2% 程度の影響である。
- (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。
- (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。
- (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。
- (5) 陸上試験台及び船上での NOx 排出値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

本研究における計測には、日本郵船殿に多大なる協力を頂いた。また、計測時に協力いただいた関係各位も併せて、ここに謝意を表する。

参考文献

- (1) IMO, Technical Code on Control of Emission of

- Nitrogen Oxides form Marine Diesel Engine, Sep. 1997
- (2) Guideline for On-Board NO_x Verification Procedure – Direct Measurement and Monitoring Method, MEPC49/22/add.1 Annex5, 1-14
 - (3) Prevention of Air Pollution from Ships –On-board NO_x Measurement and Monitoring, IMO MEPC49/INF.10, 又は, 日本造船研究協会, RR E-301 NO_x 技術規則に関する調査研究
 - (4) 中村, 他 3 名, レイアウト線図上の大型 2 サイクル機関の NO_x 排出特性, 日マリ学誌 34-4 (1999-4) 243-252
 - (5) 近藤, ディーゼル機関の排出 NO_x に関する大気条件の影響, 日マリ学誌 33-5 (1998-5) 319-324
 - (6) Nagai, T. and Kawakami, M., Study into Reduction of NO_x Emission in Medium-Speed Diesel Engines, ISME'90, C-1-17-C-1-24
 - (7) 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
 - (8) 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
 - (9) ISO 8178-1:2006, Reciprocating internal combustion engines -- Exhaust emission measurement -- Part 1: Test-bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions