船用ディーゼルエンジンからの 排気排出物計測に関する検討*

柳 瀬 啓** 馬 場 宣 裕** 城戸 口 秀 典**

Investigation about Measurement of Exhaust Emission from Marine Diesel Engine

By Satoru Yanase, Nobuhiro Baba, Hidenori Kidoguchi

Recently, it is concerned with the problem of environmental pollution in the world, and the prevention of exhaust emission is enforcing day by day.

The air pollution from vessel is also no exception. The regulation for pollution materials in the exhaust emission from the marine diesel engine will be enforced a few years after. This draft of regulation is now examining, but measurement data have been short and the measuring method itself seems to be unclear.

The purpose of this study is to make an objective technique that measures pollution materials in the exhaust emission from vessel. There are many unknown factors in the measuring method at present yet. But we restrict only the oxide of nitrogen (common name: NO_x) in this report.

When the exhaust gas measurement is carried out on board, following items must be taken into account with the field condition:

- Practicality, especially portability
- Reliability of measured results

Investigations about following items are described in this report:

- Difference of measured data due to the difference of the measurement principle
- Difference depending whether the sampling tube is heated or not
- Response of the measuring system

1. は じ め に

近年、地球環境汚染の問題は世界的な注目の的であり、大気汚染防止に関しても各方面で検討が行われている。船舶から排気される有害物質も検討対象となっており、ディーゼル機関からの排気ガスに関しては、国際的な規制の実施が予定されている。しかし、規制にあたり実情の把握、計測法の確立等、解決すべき問題が少なくない。

本研究では、船舶からの有害排出物質の一つである窒素酸化物（以下，“NO_x”と略す）の計測法に關しての絞って検討を行う。

船舶では、従来、陸上のプラントや自動車等で使用されているものに比べ、

- 連帶性を始めとする実用性
- 計測値の信頼性

に關して、使用状況を勘案した上で検討を加える必要がある。

そこで、本報告では主に、

- 測定原理による違い
- 排気ガスサンプリング導管の加熱、非加熱による指示差

*原稿受付 平成7年9月12日

ISME YOKOHAMA'95講演(平成7年7月18日)

**正会員 財団法人日本海事協会技術研究所(千葉市緑区大野台1-8-3)

Table 1 Engines subjected to measurement

		A	B	C	D	E	F	G
Engine type	Rated output (kw)	12,100	20,594	9,003	20,226	7,723	34,421	9,194
	Rated revolution (rpm)	64.0	62.0	105.0	64.0	92.5	100.0	105.0
	Fuel (Viscosity, cST 50°C)	C(168.0)	A(3.08)	A(3.15)	C(189.2)	C(97.8)	C(-)	C(151.1)
ship	type	Tanker	Tanker	Bulk	Tanker	Bulk	Container	Bulk
	Tonnage (DWT)	82,000	280,000	70,740	300,000	70,000	58,600	69,700
	Fuel (shop test)					A heavy oil		

Notes: Blank entries in the bottom line indicate that the measurement was not carried out on shop test.

In case of engine D, No.1 engine installed the series ships was measured at sea trial, and No.2 engine was measured at shop test. Therefore engines of both measurements were not exactly same.

Table 2 Particulars of measurement equipment

Measuring principle		Chemiluminescent detector	Electrochemical meas. cell
Manufacturer (Co., Ltd.)		Horiba Test	Test-Term
Type		Prototype	testo33
Measured Items		NOx, O ₂	NO, NO ₂ , O ₂ , CO, SO ₂
N O x A c c u r a c y	Meas. range (ppm)	0-2000	0-2000
	Reproducibility	±1%FS	±1%FS
	Drift	±1%FS/day	—
	Temp. Sensitiv.	±1%FS/10°C	±1%FS/5°C
	Response time	10sec.	≤ 60sec.
Sampling tube		Heated	Heated
Dimensions (W×H×D)		430×310×550	200×400×300
Approx. Weight		30kg	8kg

Note : Dimensions and weight include pre-processing equipments.

・計測系の時間応答性
に関して検討した結果に触れる。

2. 計測概要

1993年より昨年6月までに、海上運転あるいは陸上運転の機会を利用して11例の計測を実施した。表1にそれらの対象エンジンの主要目及び使用燃料油を示す。エンジンD、E、F、Gに関しては陸上及び海上の両ケースで計測を行った。但し、エンジンDに関しては同一エンジンではなく陸上運転時は同型2番船用のものの計測を行った。計測には、測定原理の異なる2種類の分析器を使用した。一方は化学発光法（CLD method）であり、もう一方は定電位電解法（ECC method）である。表2は使用した分析器の簡単な仕様である。排気ガスのサンプリング箇所はターボチャージャーの後流側で行った

が、エンジンGの海上での計測ではコンポジットボイラの後流側でおこなった。図1に典型的な計測機器系統の概略図を示す。排気ガスのサンプリングは、排気管直径方向にガスを平均化するという意味で図2に示すような複数の穴の開けた内管を排気管に挿入し実施した。穴は、排気流れ方向に向いて開いている。サンプリング導管は、CLD法の機器では5あるいは10cm、ECC法の機器では2.2mのものを使用した。

海上運転時には、エンジンの運転状態を把握するために推進軸の回転数及び軸トルクの計測も実施した。

海上運転では、定常状態（速力試験、M0 続行試験等）と過渡状態（旋回試験、非常停止試験、操舵機試験、振り振動試験等）の機関運転状態時に計測を行った。陸上運転では、定常状態時（負荷試験）のみ計測を行った。

計測の記録は、分析器からの出力信号をデータレコーダーに連続記録したほか、CLD法の機器はチャート紙に、ECC法のものは附属プリンターでデジタル出力した。

3. 計測結果

表3にエンジンの定格でのNO_xの計測結果を示す。（ ）内はISO 8178による補正をしたものを単位：g/kWhで示した。

3.1 測定原理による計測値差 図3は前述の2種類の分析器によって計測した値の差を示している。A～Gは海上運転の速力試験時の結果であり、D'～G'は陸上運転の負荷試験時の結果である。ECC法では一酸化炭素（NO）及び二酸化炭素（NO_x）を各々単独で測定できる。ここでECC(0)とはECC法によって計測したNO単独の値、ECC

Table 3 Measurement results with rated engine conditions

Engine		A	B	C	D	E	F	G
Shop	ECC method (g/kWh)	-	-	-	1779 (21.91)	1467 (16.29)	1670 (18.89)	1561 (18.34)
	CLD method (g/kWh)	-	-	-	1736 (21.38)	1475 (16.45)	1684 (19.03)	1543 (18.12)
At Sea	ECC method (g/kWh)	1617 (21.21)	1524 (25.51)	1655 (24.61)	2090 (23.49)	1549 (17.98)	1660 (21.70)	1597 (18.58)
	CLD method (g/kWh)	1458 (19.12)	1373 (23.01)	1348 (20.06)	1883 (21.16)	1413 (16.41)	1774 (12.94)	1520 (17.72)

Fig. 1 Schematic diagram of measurement system

Fig. 2 Sampling probe (multi-hole probe)

(+) とは同様に計測した $\text{NO} + \text{NO}_x$ の値、いわゆる NO_x 値である。CLDとはCLD法によって計測した NO_x 値である。

この結果から陸上での計測時には割とECC (+) とCLDは近い値を示し、海上での計測ではECC (0) とCLDが近い値を示している。これは、燃

Fig. 3 Comparison of CLD-method and ECC-method measurement results

料性状、機関運転状態、計測環境及び測定原理の違いに起因したものであろう。

陸上運転時と海上運転時とでの相違点としては、使用燃料の性状については、やはり硫黄分の含有量が大きく異なることが挙げられる。

機関運転状態の違いについては、陸上運転、海上運転では根本的に負荷、出力が異なり測定方法も異なることから客観的な比較は出来ない。また、陸上においては、刻々と変わる気象・海象に運転状態は影響を受けやすい。

計測環境の違いについては、計測機器設置箇所においては相違点として挙げるほどのものはない。しかし、各々の計測時期は異なることから天候気象的な相違は多々ある。これは機関の運転状態の違いに影響してくる。

測定原理の違いによる計測値への影響は、一般に、CLD法は、二酸化炭素 (CO_2) の励起エネルギーを奪う性質 (クエンチング現象) により負の妨害を与えると考えられるが、実際上問題とならない程度である。しかし水蒸気によるクエンチングが 25°C 飽和水蒸気圧下で $-5 \sim -18\%$ 認められている。また、二

Fig. 4 Effects of sampling tube on measurement results

酸化硫黄 (SO_2) が反応槽に入ったときはオゾンによって無水硫酸 (SO_3) となりこれがミストとしてフィルタに付着する事による光量の減少による負の影響がある。

ECC法は、 NO 、 NO_2 を測定するには電位を約 1.0V に設定するが、 NO 、 NO_2 では拡散係数が異なり、検出感度が異なるので、 NO_2 の割合が高い場合は誤差が大きくなる。排ガス中に共存する成分中の HC (不飽和炭化水素) によって正の干渉応答を示した例がある。 CO_2 は電気化学的に不活性で妨害の影響はない。しかし SO_2 は大きな妨害となり、正の干渉をする。

今回の計測結果では、一般的に言われている上記の2種類の測定原理の違いに起因する指示差が出ていることは、ほぼ明白である。しかし、前述した諸々の起因分子が、それぞれの機器の分布能力にどれだけの割合での影響を与えているか定かでない。

3.2 サンプリング導管の加熱の影響 図4はM0 続行試験時の計測結果の一例である。この図のデータはECC法によって計測したもののみである。これらのデータから、非加熱のものは加熱したものより総 NOx 濃度の $1 \sim 6\%$ 低いが、3ケース (Eng. B, E, G) とも減少量はそれぞれ異なる。この減少の理由としては、サンプリング導管内で排ガス中の凝縮した水分に NO_2 成分が溶解したことが考えられる。この傾向は、多少はあるにしても他の計測結果の全てに見られる。これらの理由

Fig. 5 Response of CLD-method analyzer (during calibration)

Fig. 6 Response of ECC-method analyzer (during calibration)

から、非加熱の場合、凝縮した水分に一般に総 NO_x の数%の割合で NO_2 成分が溶解するという事が出来る。そこで、 NO_2 成分の溶解量が推定することが可能であれば、測定結果を補正することにより、加熱サンプリング導管なしで計測することが可能になろう。

3.3 計測系の応答時間

計測系の対応時間とは、

- 1) 機関の排気弁出口から計測点までのガスの移動時間
- 2) 計測点からサンプリング管を通して計測器本体

に至るまでの時間

3) 計測機器の反応が安定するのに要する時間の合計である。1), 2) については排気流速及びサンプリングポンプ能力等により推定が可能である。また、3) の機器の応答時間の把握にはサンプリングガスの変化した時点を明確にとらえる必要がある。その方法としては、較正信号記録時の計測機器の応答を分析する方法と機関が過渡運転状態の計測結果から求める方法がある。

図5, 6はそれぞれCLD, ECC法の機器の較正時に約1900ppmのスパンガスを用いたステップ応

Fig. 7 Example of measurement results during crash stop test

Fig. 8 Example of measurement results during torsional vibration tests

答の出力信号である。これらによれば、ステップ応答の立ち上がりが安定するのに要する時間は、CLD法のものではおよそ6～8秒、また校正終了時の指示値がゼロに安定するのに要する時間も同じくおよそ6～8秒である。ECC法のは、前者がおよそ15～20秒、後者も同じくおよそ15～20秒である。

図7は非常停止試験時計測結果の一例であり、CLD法、ECC法によるNOx計測値、機関回転数、及び軸トルクの時系列データを示している。これによれば、CLD法、ECC法の応答時間は、前者がおよそ15秒、後者がおよそ25秒である。

図8は振り振動試験時の回転数とNOx計測値の関係を示したものである。図中の□、○は定常状態

Fig. 9 Mean levels, Variance, and number of samples

(速力試験)時の計測結果(50, 75, 90, 100%負荷)を回転数ベースで併せて記したものである。これから定常状態と過渡状態では、同様な傾向を示しているものの全域に渡って10～15%程、定常時のものが高い値をとっている。

3.4 計測時間及びサンプリング間隔 図9は、平均値と分散をサンプリング間隔及び個数を換えて算出したものを横軸(対数)にサンプリング個数を取って示した例である。ここでサンプリング

の個数 (N) と間隔 (S) には以下の関係がある。

$$N * S = A$$

A : サンプル母集団

ここで、A はあくまでも機関運転状態が定常状態の時に採取したものである。この例では母集団 A = 1500 (300秒) である。またサンプリング間隔は等間隔であり、その間隔は、最小が 0.2 秒、最大が 300 秒である。図 9 より平均値及び分散はサンプリング個数 10~15 (サンプリング間隔 30~20 秒) 近傍から安定した値を取り始めている。従って、この例ではサンプリング個数 10~15 (サンプリング間隔 30~20 秒) で算出した平均値はかなり信頼度の高い計測値として扱えるであろう。今まで測定した、全てのデータにこの処理を行ってはいないが、数例に実施したところ、同様の傾向を得た。

4. 考 察

船用ディーゼル機関での排気ガス計測の現実的な計測法の早期確立が重要であるとの観点から、十分な分析とは言えないが現在まで実施してきた計測結果の一部を報告した。その過程で得られた知見を以下に列記する。

従来、CLD 法のものの方が精度がよいとされており、また最近小型化したものも出てきているが、それでも、ECC 法のものの方が携帯性及び操作性の点で上である。実際現段階では、船舶での排気ガス計測は、海上で実施するしか方法はなく、実用性の観点から、ECC 方式の機器を使用する機会が増えることも考えられる。そこで計測精度に関する厳密な検討に加え、信頼度の確保に必要な計測手順の確立が重要となる。本稿の結果では定性的には妥当な結果となったが、定量的な関係を影響分子と共に解明できるか否かが課題になる。しかし、それぞれの影響分子が計測値に及ぼす影響を定量的に解明するためには、今後これまで以上に機関運転状態及び計測環境のより詳細なるデータを必要とする。

サンプリング導管の加熱の必要性は、計測作業上大きな負担となる。この加熱の省略は、船舶における排気ガス計測に要求される精度との兼ね合いに依存するが、適切な補正手順を含めて可能性を検討していく必要がある。本稿の結果からも加熱導管使用と未使用とでは明らかに差が出ているものの、その差はケースによって異なり特定は出来ていない。

ケースによる差は燃料性状、燃焼空気中の水分量及び燃焼過程等の微妙な違いから生じたと思われるが、解明できていない。詳細な原因の究明が必要である。

計測系の応答時間及び安定性の把握は、計測作業の効率の点から重要である。定常状態で計測を開始する観点、平均操作を行うのに必要となる繰り返し数等は、計測時間を直接的に左右する。これは機関運転状態とも密接に関係があり、両者の状態を総合的に判断して始めて、決定できる問題と言える。本稿 3.3、3.4 で取り上げた結果から、十分に信頼度の確保できる計測値を得るためには、著者は、定常状態の計測では計測機器の応答性及び安定性、計測時間、測定間隔及び平均操作等を考慮して、機関運転状態安定後、計測時間 5 分 (測定間隔 : 20~30 秒、サンプリング個数 : 10~15 個) 以上で、可能であると判断する。更に図 7 の様な振り振動試験時等の計測結果より、全回転域での排出カーブを得ることができ、各エンジンの排気排出特性の把握に役立つ。

機関の運転状態による計測結果の差は、興味ある問題である。両者の結果から何らかの定性的且つ定量的な因果関係を見い出せれば、陸上運転時の計測結果から海上運転の実稼働時の推定が可能になる。しかし、今回の計測結果ではデータのばらつきが多く、原因の究明には至っていない。今後更なる、詳細なるデータの収集が必要である。

以上触れた諸点の結論を導くためには、解明すべき不確定要素が非常に多く、更なるデータの収集蓄積が必要となる。排出規制に際して、計測誤差量をどの程度とするかも非常に大きな問題となるでしょう。今後鋭意データの収集及び分析を行い、現実性のある妥当な計測方法の確立に向けて貢献したい。

本計測は、(株)日本造船工業会機関部会環境グループの作業の一貫として実施した。計測の機会を提供していただき、また結果の公表を許可していただいた同会に謝意を表します。なお、陸上の計測に関しては(株)日本船用工業会の協力も頂いたことを記するとともに謝意を表します。さらに円滑な計測の実施を可能とした両会会員各社の関係者の多大の援助に対して謝意を表します。また、計測機材および労力の提供を頂いた岡本和博氏を始めとする(株)堀場製作所、加藤満明氏を始めとするホダカテスト(株)に謝意を表します。計測データの分析に際しては当会技術研究所の佐々木千一技師の助力を得た。

参 考 文 献

- (1) 塚本, 大江, 岡田 : 日本船用機関学会第53回学術講演会, 17-20, 1994.
- (2) ISO/DIS 8178 RECIPROCATING INTERNAL COMBUSTION ENGINES
- EXHAUST EMISSION MEASUREMENT -