舶用機関における NOx 排出量の経年変化

技術研究所　大石真哉

1.はじめに

船舶に搭載されるディーゼル機関から排出される窒素酸化物(以後 NOx と呼ぶ)の排出量は MARPOL73/78 条約新付属書VI第 13 規則で制限され，その発効には 15 カ国以上が批准し，それらの国籍を有する商船の総トン数が世界の 50%以上になることを必要としている．現在批准しているのはノルウェー，スウェーデン，シンガポールの 3 カ国のみであり，総トン数は世界の 9%程度であるが，弊会においては NOx 排出量に関する鑑定業務の実施を既に開始しているところである．

規則上，機関の NOx 排出量のチェックは基本的には機関の製造時，機関の搭載後就航前，そして機関に改造が加えられた時に行わなければならない，と規定されている．この規則は機関の NOx 排出レベルが製造時もしくは改造時に高く，使用経過に伴ってその排出レベルを超えることはないとの見解から制定されたものと思われる．

このことを大型の一般商船で確認すべく, 著者らはある外航船の就航後 5 年間に渡って NOx 排出量の計測を実施してきた. これまでに蓄積された計測データに基づき機関の NOx 排出量の経年変化についてまとめたので，本稿ではその結果を報告する．また，機関一般諸元と NOx 排出量との関係で影響を及ぼす因子について考察を加えた.

2.計測概要

計測対象船は日本とペルシャ湾間を定期運行している VLCC であり，計測は 1 年間に 1 回のペースで 5 年間継続した．各年とも日本からシンガポールまでの航海時に本船に乗船して計測を実施した.

図 1 に計測装置の概要を示す．排気管の排ガスサンプリング部にはあらかじめフランジを設置しており，サンプリングプローブを取り付けられるようになっている．サンプリングプローブから採取したガスは水分を含んでおり，排気管から離れてサンプリングガスが冷やされると結露が発生することが考えられる．これにより計測対象成分の一つである NO_2 が溶融してしまう可能性があるため，一旦採取したガスは前処理装置において十分な除湿過程を設けている．また，サンプリング部から前処理装置に導くホースを 150℃に加熱し，サンプリング系統全体において結露の発生を防止している.

除湿されたサンプリングガスは排ガス計測器（テストターム製 testo33）に導かれ，NO，NO_2，O_2，CO_2 の成分分析が行われる．得られた分析結果はデータレコーダにより連続記録する．また，計測器のキャリブレーションを計測現場(E/R)で行うため，校正ガスも準備した．尚，本計測器の NOx 計測原理は定電位電解法(ECC)を採用している.

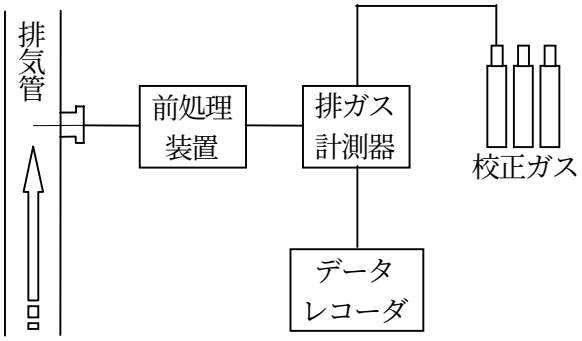

図 1　計測装置の概要

計測後に出力時間あたりの NOx 排出量を計算するために排ガス成分以外にも以下の機関一般諸元を記録した.

・機関出力(kW)
・掃気圧(kPa)
・掃気温度(℃)
・燃料消費量(kg/h)
・大気圧(kPa)
・吸気温度(℃)
・吸気湿度(%)
・燃料性状

これらのうち最初の 4 項目については本船に付属の表示装置から読み取ることとした.

3.計測結果

図 2 に計測対象船の就航後 5 年間の NOx 計測データを示す. 図中に示されているように計測データは濃度(ppm)で出力される．しかし，排ガス中の NOx 濃度は主機の運転状況，吸気温度，吸気湿度，燃料性状等の外的要因により影響を受けるため，環境の異なる各年の NOx 濃度を単純に比較することはできない．MARPOL73/78 条約新付属書VIの規定には，船舶に搭載されるディーゼル機関から排出される NOx は吸気温度，吸気湿度等について適度に補正され，かつ出力時間当たりの NOx 排出量(g/kWh)によって評価されなければならない旨が記載されており, 同時に各諸元の補正式や NOx 濃度(ppm)から出力時間あたりの NOx 排出量(g/kWh)への換算式も提唱されている．[1),2)]

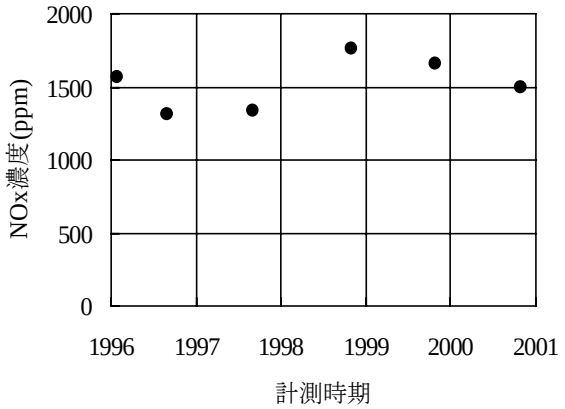

図 2　NOx 濃度(ppm)の推移

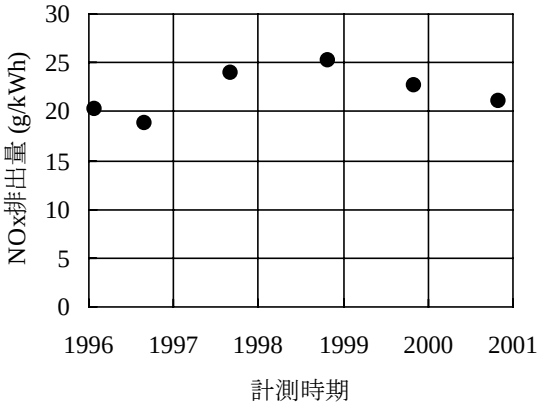

図 3　NOx 排出量(g/kWh)の推移

そこで上述の補正式，換算式に基づいて計算された出力時間あたりの NOx 排出量(g/kWh)の経年変化傾向を図 3 に示し，NOx 排出量の推移を検討する.

図 3 に示される NOx 排出量は計測 3 年目まで増加傾向があるように見られるが, 4 年目以降の値は徐々に減少していることがわかる．このことから舶用機関の排出する NOx 排出量は使用経過に伴って減少する（あるいは増加する）と一概に言い切ることは難しい．しかし，NOx 排出レベルの定常的な増加傾向を確認できなかったことから，規則に定める舶用機関の NOx 排出量の検査時期（機関の製造時及び改造時）の妥当性は, 1 船だけのデータではあるが，ひとまず確認されたと言ってもよい．また，付記すべき点は 2000 年 10 月の計測結果（グラフ中の一番右端のプロット）は本船が 5 年目の定期検査を終えた直後のものであることである．5 年毎に行われる定期検査では主機及び主機周りの構成要素の一部が点検，整備，清掃されるが，その前後の時期において，NOx 排出レベルに大きな変化が無いことが確認された.

4.考察

4.1 測定精度

年 1 回の計測は，約 1 週間に渡って午前と午後に 1 回ずつ実施し，各年とも 10 数個の計測データが得られている．（これらの各計測年毎のデータを平均してプロットしたものが前記の図 3 である．）1 週間の計測で得られたデータにはある程度のばらつきが見られるため，10 数個の計測データの平均値を工学的によく用いられる 95%信頼区間によってまとめた．

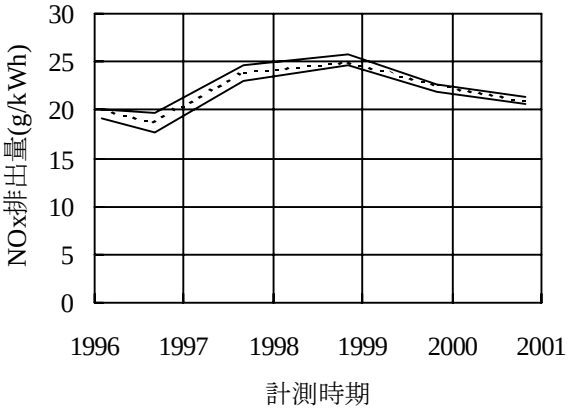

図 4　NOx 排出量(g/kWh)の推移(95%信頼区間)

図 4 のグラフは NOx 排出量の平均値を破線，平均値の 95%信頼区間の上限値と下限値を実線で表したものである．平均値と平均値の 95%信頼区間との差は全体的に±3%以内にあり，諸事情により計測データが 3 点しか得られなかった第 2 回計測においても約±5%に収まっていることがわかる．このことから今回の一連の NOx 排出量計測に関して，統計的には信頼性のあるデータが得られたと考えられる．

また，各年とも計測機器のドリフト量等（計測機器自身の誤差）を確認するため，計測実施前に校正ガスを用いて計測機器のキャリブレーションを行い，計測実施後には同様の校正ガスを用いて計測機器の読み値を記録し，その両者を比較した．その結果，計測前後のそれぞれの読み値には計測年によっては多少のばらつきが認められたので，計測機器自身の誤差が生じている可能性はあり得る．

4.2 機関諸元と NOx 排出量の関係

5 年間に計測された機関一般諸元データの一部を表 1 に示す.

これらのデータと NOx 排出量との相関を調査したが，目立った相関は認められなかった．この理由として考えられるのは本計測の計測範囲が狭かったことである．就航中の船舶であるということから，陸上試験，海上公試運転の場合と異なり，主機の運転状態がほとんど変わらず，機関諸元においても大きな変化が見られなかったので，NOx 排出量との相関関係を言及できるまでには至らなかった.

一般に 2 サイクル機関の NOx 排出量(g/kWh)は常用出力近傍で最大値を取り，なだらかで山なりの排出曲線を描くとされている．(社)日本造船研究協会第 224 研究部会（平成 6 年~平成 8 年）にて報告された 2 サイクル機関負荷率と NOx 排出量との関係を図 5 に示す．[3)]

表 1　機関一般諸元データ

	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回
計測年月	1996.2	1996.8	1997.8	1998.10	1999.10	2000.10
機関回転数 (rpm)	73.5	73.4	71.1	72.1	71.8	72.2
機関出力 (kW)	19154	18053	17560	18247	17768	17542
燃料温度 (℃)	79.6	73.8	-	64.3	135.2	130.8
燃料消費量 (kg/h)	3335	3308	3457	3435	3006	3364
吸気温度 (℃)	36.4	42.6	42.5	41.2	42.6	40.8
吸気相対湿度 (%)	40.5	32.3	40.8	39.9	49.3	44.7
掃気圧 (kPa)	240.3	238.9	228.6	205.4	189.7	208.0
掃気温度 (℃)	40.0	38.2	42.0	39.9	42.5	46.3
燃料中窒素分(%)			0.2		0.37	0.4

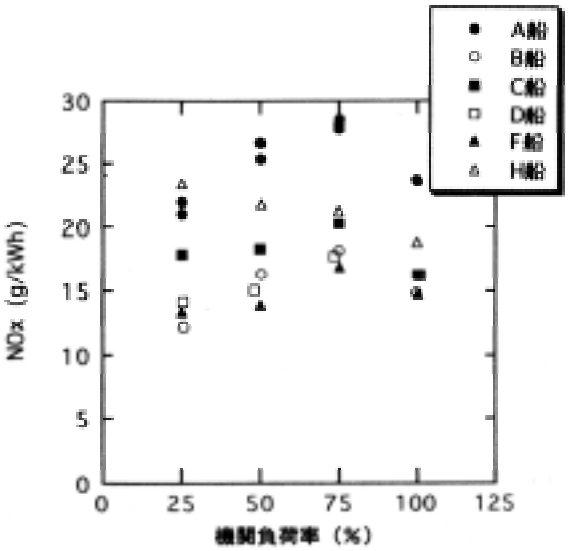

図 5　機関負荷率と NOx 排出量の関係 [3)]

このグラフによれば 2 サイクル機関の NOx 排出量は常用出力（本来はおよそ 90%近傍であるが [4)]，図中では 75%）付近で最大値を取り，なだらかな山なりの排出曲線を描く傾向にあることがわかる．これは燃焼状態が最適である場合に NOx 排出量が多くなることと対応しており，言い換えれば熱効率が優れている運転点において NOx 排出量が多くなるということである．一般に NOx 排出量と熱効率には正の相関関係があると言われており，燃料の燃焼温度を高くし，熱効率（燃料消費率）を改善すれば，同時に NOx 排出量も増加する．逆に NOx 排出量を低減させるために燃料噴射タイミングを遅らせたり，燃料中に水分を含ませて燃焼温度を下げる等の処置を講ずると熱効率（燃料消費率）が悪化してしまうと言われている．[5)]

上記のように同機関であっても機関負荷率によって NOx 排出量が変化する事実は MARPOL73/78 条約でも考慮されており，「全てのエンジンに対して……NOx 排出制限値に適合していることの検証のために規定されたテストサイクルの一つを適用すること」[1)]としている．具体的には定格出力の 25%，50%，75%，100% で NOx 排出量を計測し，得られたそれぞれの値に重み付けをし，その総和を総排出量として計算するということである.

本計測は就航船での計測ということもあり，25%，50%…等の定められた機関負荷率での計測は行っていない．したがって計測結果をまとめるにあたって MARPOL73/78 条約に示されるテストサイクルは適用できず，計測された各年の NOx 排出量をそのままグラフにプロットした．機関負荷率の違いによる NOx 排出特性の変化に関するファクターを取り入れれば図 3，図 4 のグラフがさらに平坦になるとも予想されたが，本計測における機関負荷率に大きな変化が見られなかった(75%~90%)ので，補正等の処理は行わなかった.

次に生データから NOx 排出量とその時の熱効率の関係を図 6 に示す.

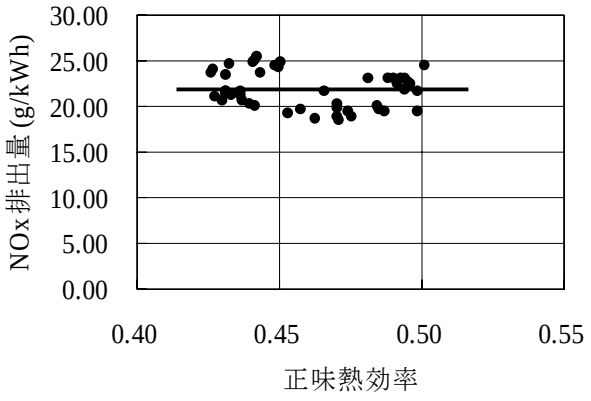

図 6　正味熱効率と NOx 排出量の関係

横軸の正味熱効率は C 重油の総発熱量を 10,300[cal/g]で一定であると仮定し，燃料消費量[kg/h]と機関出力[kW]から算出した．データのばらつきは計測機器のドリフト現象や海象の違い，操舵角の違い等 NOx 排出量の算出時に考慮し得なかったパラメータ，そして各年の C 重油発熱量のばらつき，計測機器自身の誤差，及び船体の汚れ等の影響によるものと思われる．

正味熱効率の計測範囲が狭いため, このグラフから正味熱効率と NOx 排出量との相関を見出すことは難しい．したがって両者の関連性を見出すまでには至らなかった.

5.まとめ

5 年間に渡りある外航船の NOx 排出量の計測を実施し，NOx 排出量の経年変化について調査を行った．5 年間の NOx 排出量のデータを通じて，減少傾向及び増加傾向ともに確認することはできず，NOx 排出量は就航直後より 5 年間，その排出レベルに大きな変化は生じないとの結論に至った.

舶用機関は定期的に点検，整備，清掃が行われており，不具合の生じた要素については修繕もしくは新替えされ，基本的には常にベストコンディションを維持している．したがって，船体，機関の良好な保守が行われている限り熱効率等が大きく変化することはなく，また NOx 排出量の変化も小さいと考えられる.

本船での計測結果が全ての船舶に当てはまるという確証はないが, MARPOL73/78 条約新付属書Ⅵ第 13 規則に示される NOx 排出量の検査時期（機関の製造時，改造時）の妥当性はひとまず確認されたと言える.

---

[1] 財団法人　日本海事協会，舶用ディーゼルエンジンからの NOx 排出規制に関するテクニカルコード，1998
[2] 日本内燃機関連合会，第 2 回オフロード用内燃機関の排気排出物に関する講演会　別冊資料，1994
[3] 社団法人　日本造船研究協会，第 224 研究部会　運転条件の違いによる機関諸元の挙動解析　平成 8 年度報告書，1997
[4] 園田．山下．中山．他 2 名，日本舶用機関学会誌，29-6(1994-6)，422~
[5] 後藤　悟，日本内燃機関連合会 “ 船舶排ガスからの大気汚染物質と対応技術 ” 講演論文集，1999