

船用ディーゼル機関のNO_x濃度認証試験結果の現状分析

財)日本海事協会 技術研究所 椎原裕美、黒澤忠彦

1. 緒言

2000年からの遡及適用として、官民上げて準備がなされてきたMARPOL Annex VIが2005年5月19日に発効した後、大きな混乱もなく、早、3年が経過した。2008年5月末現在、同条約の批准国数は51カ国で、これらの船腹量(tonnage%)は世界の80.36%と報告されている。また、条約発効から丸3年経過した2008年5月までには、400GT以上の国際航行する船舶は、条約で要求された初回検査を行いIAPP(International Air Pollution Prevention)証書の保持が完了した。

この条約により規制されるのは窒素酸化物(NO_x)、硫黄酸化物(SO_x)、オゾン層破壊物質、VOC(Volatile Organic Compounds, 揮発性物質)及び船上焼却炉であり、以下にその要点を箇条書きに記す。

(1) 窒素酸化物

機関回転数が130rpm未満 : 17g/kWh以下
同130rpm以上2000rpm未満 : $45.0 \cdot n^{-0.2}$ g/kWh以下、nは機関回転数
同2000rpm以上 : 9.8 g/kWh以下

(2) 硫黄酸化物

燃料油中の硫黄の量が4.5%(m/m)以下。ただし、SECA(Sox Emission Control Area)では1.5%(m/m)以下

(3) オゾン層破壊物質

Halons、CFCs(R-11, R-12に代表されるフロン)、HBFCsの新規設備禁止。ただし、HCFCs(R-22, R-123に代表されるフロン)は2020年から新規設備禁止。

(4) VOC

港でのタンカーからの排出禁止。

(5) 船上焼却炉

型式承認されたものを設備。

一方で、同条約の5年毎の見直し規定により、2005年開催のMEPC53から、規制強化の審議が続けられた結果、2008年4月開催のMEPC57でほぼその詳細が決まった。以下にその要点を記す。

(1) 窒素酸化物

(a) 二次規制

2008年2月開催のBLG12(第12回ばら積み液体・ガス小委員会)で合意されていた、2011年二次規制は、機関回転数に応じて現行規制値から15.5~21.8%削減する案が、MEPC57で承認された。

(b) 三次規制

同上BLG12で合意された2016年から指定海域において、現行規制値より80%削減する案が承認された。

(c) 現存船の機関に対する規制

現存船に搭載された機関に対するNO_x規制については、BLG12において取り纏られ、以下の規制案で合意された。

- ① 対象機関：1990年以降に建造された現存船の機関の内、シリンダ容積が90L以上かつ出力5,000kW以上で、主官庁が規制適合手法を有すると認めたもの
- ② 規制値：MARPOL Annex VIの一次規制値
- ③ 規制実施時期：主管庁が規制適合手法を認証し、IMOに通報してから1年以後の最初の定期検査

(2) 硫黄酸化物

MEPC57では燃料油中の硫黄分規制についても合意された。当該承認案は2008年10月開催予定のMEPC58で採択のための審議を経て、採択された場合はその16ヶ月後に発効する。

(a) 一般用件

一般海域で使用する船用燃料油の硫黄分は以下の通りとする。

- ① 現行 : 4.50 % m/m
- ② 2012年1月1日以降 : 3.50 % m/m
- ③ 2020年1月1日以降 : 0.50 % m/m

ただし、0.50 % m/mに削減する時期については、2018年までに低硫黄燃料油の世界的な供給体制、低硫黄燃料油の製造に伴うCO₂排出量の増加等を調査して決定される。調査結果が否定的である場合は、0.50 % m/mへの削減時期は2025年に延長される。

(b) ECA(Emission Control Areas : 排出規制海域)

ECAで使用する船用燃料油の硫黄分は以下の通りとする。

- ① 現行 : 1.5 % m/m
- ② 2010年3月1日以降 : 1.0 % m/m
- ③ 2015年1月1日以降 : 0.10 % m/m

(3) 燃料油性状に対する要求事項

燃料油性状に対する要求項目は、現行のMARPOL Annex VIでは硫黄分のみ規定されているが、2008年4月開催のMEPC57において、硫黄分以外の大気汚染や船舶の安全に影響する性状項目についても規定することが合意された。この作業は下記要求事項においてIMOからISOに委託することも合意された。

- ① 大気汚染、船舶の安全、機関の性能、乗組員の健康に関連した適切な性状項目を選定する。
- ② これらの性状項目の推奨制限値を提案し、ISO8217の改定に導入する。
- ③ 規制すべき性状項目例として、以下が挙げられる(表1)。

Marine Heavy Fuel Oil (残渣油)		Marine Distillate Fuel Oil (留出油)	
①密度	②動粘度	①密度	②動粘度
③流動点(冬期)	④流動点(夏期)	③引火点	④流動点
⑤残留炭素分	⑥引火点	⑤硫黄分	⑥セタン価
⑦硫黄分	⑧灰分	⑦残留炭素分	⑧灰分
⑨セジメント(TSP)	⑩セジメント(TSE)	⑨セジメント(TSP)	⑩水分
⑪水分	⑫Al + Si		
⑬Na	⑭着火燃焼性		
⑮硫化水素(H ₂ S)			

表1. Indicative List of Parameters to be forwarded to ISO

以上、現行規制値及び合意に達した規制強化案により、今後は、機関製造メーカーの開発が促進され、一方で、供給される船用燃料油の性状値及び供給体制に問題が移ることになるものと思われる。

さて、機関から排出される大気汚染物質の中で、SO_x(硫黄酸化物)、PM(浮遊粒子状物質)は燃料油中の硫黄分にその排出量が依存することから、上記の様に、低硫黄燃料油への規制強化で対処されて来ている。一方、NO_x(窒素酸化物)は、その大部分が燃焼により空気中の窒素分から生成される(Thermal NO_x)為に、機関本体又は脱硝装置での対処となるが、その確認はNO_xテクニカルコードにより、その計測方法及び排出量の算出方法が規定されている。

本会は、同条約締約国だけでなく、非締約国からも、本条約による検査、証書又は鑑定書発行に関する権限を付与されていて、その数は現在、49カ国に上がっている。現在までに、EIAPP(Engine International Air Pollution Prevention)証書又はDOC(Document of Compliance)、SOC (Statement of Compliance)を約12,400件発行してきている。その証書又は鑑定書発行に際して、NO_xテクニカルコードに従った機関からの排出ガス計測(以降、NO_x排出濃度認証試験と称する)が行われ、各種機関パラメータ及び関連排ガス計測データが蓄積されている。

今後の研究の方向を探る目的で、今回、100件の計測事例の解析を行い、排ガス濃度の現状分析を行った。従来、NO_x排出濃度認証試験は機関の陸上公試時に、空気、酸素、窒素等の参照ガスを用いて行われて来ているが、2016年からの第三次規制による80%削減では脱硝装置を含める必要があり、その認証方法も検討が必要と考えられている。

現在、官民挙げて一丸となった環境低負荷エンジンの開発も進められているが、現在の関係技術の現状を把握しておくことは、有効で適切な判断に対して必要なことと考えられる。今回は、その、一部を報告することにより、関係する方々の参考になれば幸いである。

2. NO_x排出濃度認証試験と窒素酸化物濃度、燃費の現状

EIAPP証書の発給を受ける為には、NO_x排出濃度認証試験を実施して、NO_x濃度が条約で規定される許容値以下であることを確かめる必要がある。試験はNO_xテクニカルコードに規定されるDM級燃料油であるA重油を用いて、以下の4種類のテストサイクルに従って実施される。グループ又はファミリーを形成するシリーズエンジンの親エンジンのデータにより、子又はメンバーエンジンはテストを省略される。

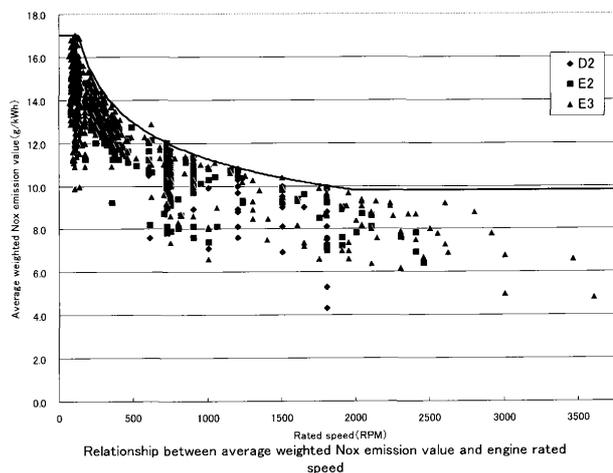
E2型テストサイクル：定回転主推進機関

E3型テストサイクル：プロペラ則に従う主推進機関及び補機関

D2型テストサイクル：定回転補機関

C1型テストサイクル：速度と出力が変化する補機関

図1にNO_x排出濃度認証試験結果として、縦軸にNO_xテクニカルコードに従って算出されたNO_x排出係数(Average Weighted NO_x Emission Value)を、横軸に機関回転数で示す。

図1. 期間回転数によるNO_x排出係数の現状

図中の実線は条約で規制される許容限度を示し、青色三角マークはE3テストサイクル、赤色四角マークはE2テストサイクル、黒色菱形マークはD2テストサイクルにより得られた値である。2011年実施予定である15.5%~21.8%低減の二次規制を、現在でも、1/3~1/2程度のエンジンが既にクリアしていると考えられ、各社とも第三次規制を念頭に置いた技術開発に注力していることがうかがえる。

ここで、テストサイクルによるNOx排出係数の差を見ても。大型低速機関を除き、多くのエンジンは可変ピッチプロペラと固定ピッチプロペラの双方に対応可能とする為に、E2とE3両方のテストサイクルで計測を実施している。その状況を図2に縦軸にPme(Mean Effective Pressure, 平均有効圧力)、横軸に双方のNOx排出係数を[E2], [E3]とした場合の([E3] - [E2]) / [E3]の値で示す。平均5%前後で0~10%の差が計測されていて、最大約20%の差があることが分かる。一方で、Pmeに関しては、殆ど相関性が無いことも分かる。

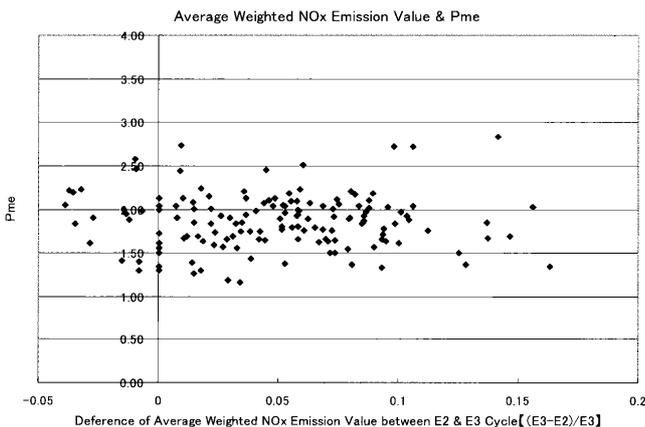


図2. テストサイクルE2とE3の差とPmeの関係

一般に、NOx濃度と燃料消費率はトレードオフの関係にあると言われている。図1で分かるように、NOx濃度は機関回転数が大きくなるに従い低下することが予想されるので、図3に縦軸にNOx排出係数、横軸に燃料消費率(SFOC: Specific Fuel Oil Consumption)の値、更に4ストローク機関は、回転数により500rpm(赤色□)、500~1500rpm(青色△)、1500rpm以上(黒色×)の3グループに分けて示す。黒色菱形マークの2ストローク機関は殆どが130rpm以下であり、それを同一の回転数グループと考えた場合には、明確にNOx排出係数とSFOCとの間に相関が見られる。一方、4ストローク機関の場合は、3つの回転数

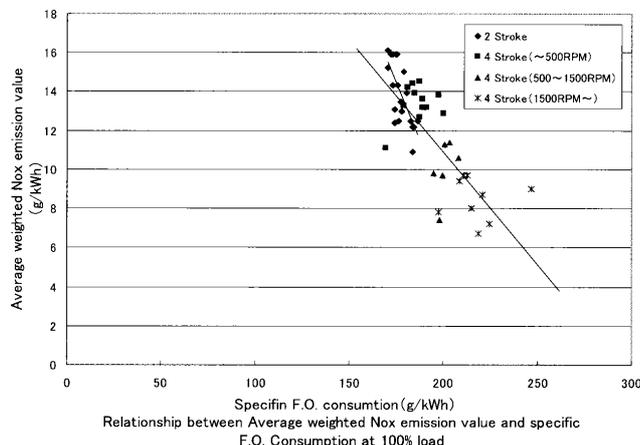


図3. NOx排出係数とSFOC(燃料消費率)との関係

域で、回転数が大きくなるに従い、NOx排出係数の低下とSFOCの増加傾向にあるが、同一回転数グループ内では明確でない。

一方、NOx排出濃度認証試験はNOxテクニカルコードの規定に従って、通常、A重油を用いて実施される。比較認証の為に使用燃料油の統一が望ましいが、一方では、通常C重油を焚く多くのエンジンの実際の排出量を示しているのではないことを忘れた議論が進む懸念もある。そこで、図4で、A重油とC重油でのNOx排出量の違いをしてみる。

図4は燃料油の着火燃焼性を見る為の定容積燃焼試験器FIA100で実施した、A重油(軽油及びディーゼル油相当油)、C重油及び燃焼障害が発生したC重油の3種類の燃料油の試験結果¹⁾であり、横軸に燃焼時間を、縦軸に燃焼の結果排出された排ガス中のNO濃度(ppm)を示す。

定容積燃焼試験器は1リッター弱の円筒形の燃焼室内を空気で45bar、450℃の温度にして、燃料油を上部0.35mmφの穴から噴射、燃焼させ、筒内圧力変化を記録して、燃焼時間、着火遅れ、最高圧力等の燃料油の燃焼特性を計測するものである。本会では、その燃焼後に排出される排ガスの各成分も計測して、燃料油の燃焼特性を判断する指標としてデータを蓄積、解析している。ディーゼル機関の燃焼室は圧縮、着火、膨張行程を経て、燃焼室容積は変化するが、この定容積燃焼試験器では燃焼の前後を通して燃焼室容積が変化しない。しかし、燃料油の燃焼特性を掴むには、定容積燃焼で十分であり、その結果は色々な問題時に燃焼における示唆を与えてくれる。

図4からわかるように、黄色ひし形で左側一団のA重油の場合は20~160ppmの範囲に分布して平均的に100ppm程度のNOが計測されている。一方、青色ひし形で中央下部の一団のC重油の場合は、5~40ppmに分布して平均的に15~20ppm程度のNOが計測されている。従って、FIA100による燃焼では、A重油とC重油の間には約4~5倍程度のNOx濃度の差が予想される。それに従うと、多くのエンジンは、実際にC重油を焚くので、その運転状態では

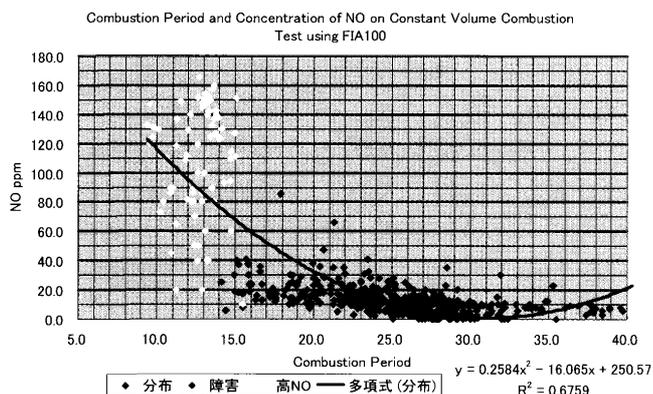


図4. 定容積燃焼試験器FIA100における燃料油種と排ガス濃度

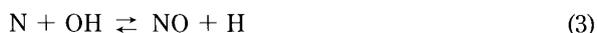
図1より大幅に低いNOx濃度で運転されていることが推察される。

3. 排ガス濃度に影響する因子

NOx濃度とエンジンパラメータの関係を見る前に、NOx濃度はどのような因子の影響を受けるかをNOxの反応式から見てみる。当量比が1より小さい燃料希薄火炎においては、NOxはthermal NOxとして空気中の窒素と酸素の反応により、その殆どをZeldovich機構と呼ばれる以下の反応により生ずると考えられている²⁾。



また、一部のNOは以下の拡大Zeldovich機構で生成される。



これらの生成機構によるNO生成速度は以下の式で表される²⁾。

$$d[\text{NO}]/dt = k_{1f}[\text{N}_2][\text{O}] - k_{1b}[\text{NO}][\text{N}] + k_{2f}[\text{O}_2][\text{N}] - k_{2b}[\text{NO}][\text{O}] + k_{3f}[\text{N}][\text{OH}] - k_{3b}[\text{NO}][\text{H}] \quad (4)$$

ここで、[NO]、[N₂]、[O]、[NO]、[N]、[O₂]、[OH]及び[H]は各反応の各成分モル濃度を示し、k_{1f}、k_{2f}及びk_{3f}は各反応の正反応速度定数で、k_{1b}、k_{2b}及びk_{3b}は各反応の逆反応速度定数である。

上記(4)式の各正反応速度定数を以下に示す³⁾。

$$k_{1f} = 1.4 \cdot 10^{14} \cdot \text{Exp}(-75400/\text{RT}) \quad (5)$$

$$k_{2f} = 6.4 \cdot 10^9 \cdot T \cdot \text{Exp}(-6250/\text{RT}) \quad (6)$$

$$k_{3f} = 4.2 \cdot 10^{13} \quad (7)$$

(5)及び(6)の速度定数の中に温度Tが含まれることから、(1)と(2)の反応は燃焼温度に依存し、更に(2)の反応の方がより大きく依存していることが分かる。一方、(3)の反応は温度とは無関係である。また、NO濃度は上記の式を積分して求めるので、燃焼時間に依存すると考えられる。

また、NO生成初期の段階では、(4)式は

$$d[\text{NO}]/dt = 2k_{1f}[\text{N}_2][\text{O}] \quad (8)$$

と近似される²⁾ことから、着火初期段階では、(5)式の速度定数に大きく依存することが考えられる。

従って、NOx濃度は燃焼温度に大きく依存することから、その結果としての排ガス温度及び掃気温度との相関が期待される。

また、Zeldovich Noxは圧力の1.5乗にほぼ比例する生成速度を示す²⁾と言われるので、P_{max}及びP_{me}との相関が推定されるが、図3では、P_{me}の影響は見られない。局所的な燃焼における圧力上昇には関係するが燃焼室全体の圧力上昇にはほとんど無関係と推察される。

また、図5に自動車用エンジンの例で示すが、排ガス中の各濃度は空燃比にも依存し、又、排ガス中のCO濃度及びTHC濃度は未燃焼成分として燃焼状態を推定することが

できると思われる。

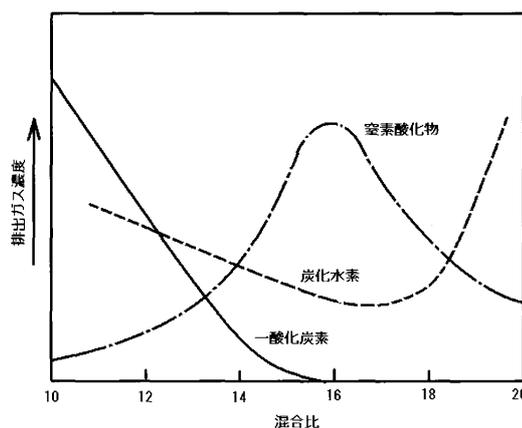


図5. 自動車用エンジンの排ガス濃度と空燃比の関係⁴⁾

4. NOx排出濃度認証試験結果100件のNOx濃度と各種パラメータの傾向

100件のNOx排出濃度認証試験データを用いて、現在のエンジンの各種エンジンパラメータとNOx濃度の相関性の有無を見てみる。エンジンの計測値を諸々の角度から検討、解析して見た結果、各計測値を当該エンジンの計測時の出力(kWh)及び気筒数で除した値で良い相関が得られた。所謂、1シリンダ、単位出力当たりの値で比較する。

図6及び図7にNOx濃度とP_{max}(Maximum Pressure、最高圧力)の関係を、テスト時の25%、50%、75%、100%負荷での値を各色分けして示す。2ストローク機関及び4ストローク機関とも、P_{max}の上昇に従ってNOx濃度がほぼ直線的に減少する傾向を示している。図6及び図7では負荷の上昇に従って、空気過剰率が低下するので、NOx濃度の低下はP_{max}より、空気過剰率低下によるものと考えられる。

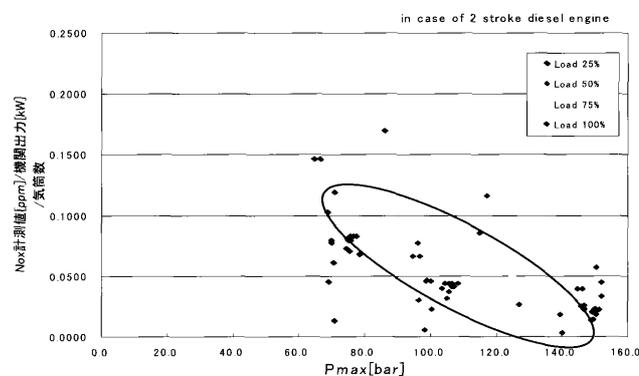


図6. 2ストローク機関のP_{max}とNOx濃度

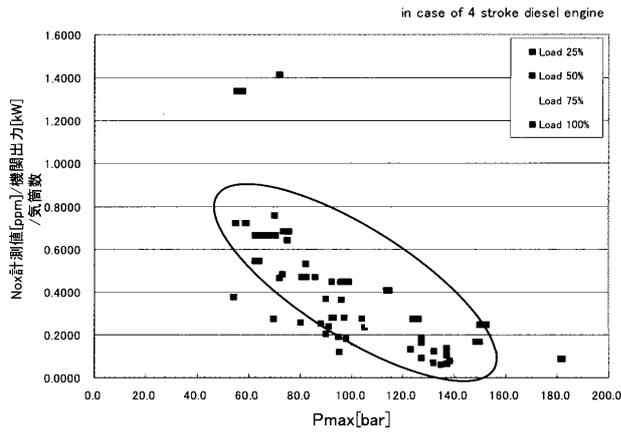


図7. 4ストローク機関のNOx濃度とPmax

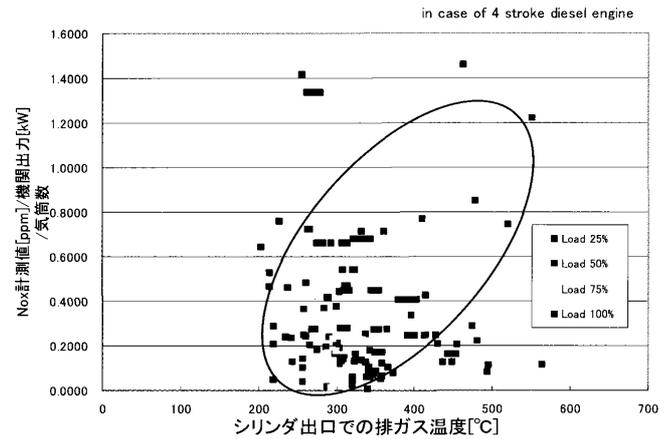


図9. 4ストローク機関のNOx濃度と排ガス温度

図8及び図9にNOx濃度と各シリンダ出口での排ガス温度の関係を示す。2ストローク機関では概略、高い排ガス温度で低いNOx濃度を示している。ただし、この場合は前Pmax同様に、空気過剰率の影響が含まれるので、明確な排ガス温度との相関とは言い切れない。一方、25%、50%、75%、100%の各々同じ負荷の中で見ると、逆に排ガス温度が高くなるとNOx濃度も高くなる傾向にあり、概略、NOx生成則に従った傾向と推察される。

図9の4ストローク機関では、全体的な傾向及び25%、50%、75%、100%の各々同じ負荷の中での傾向共に、概略、排ガス温度が高くなると、NOx濃度も高くなる傾向が見られるので、2ストローク機関同様に、NOx生成は燃焼温度に依存することを裏づけた傾向と推察される。

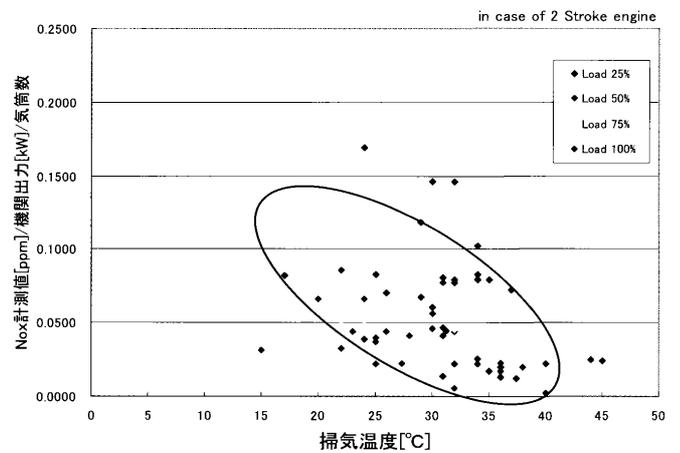


図10. 2ストローク機関の掃気温度とNOx濃度

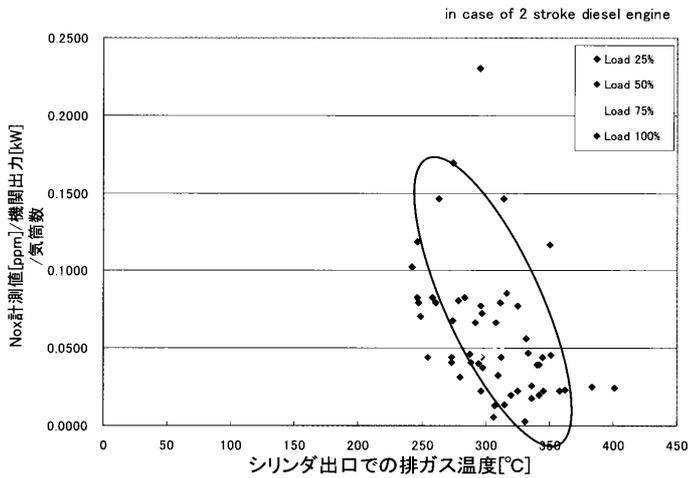


図8. 2ストローク機関のNOx濃度と排ガス温度

燃焼温度は掃気温度の影響を受けることが推察され、その結果、NOx濃度にも相関することが考えられる。図10に2ストローク機関のNOx濃度と掃気温度の関係を示すが、同図からは明確な相関は見られない。100%負荷に限ってみても、掃気温度がNOx濃度に影響している様子は明確ではない。局部的な燃焼温度は掃気温度以上に、噴口径及び形状により異なる噴霧形状の影響が大きいことが推察される。

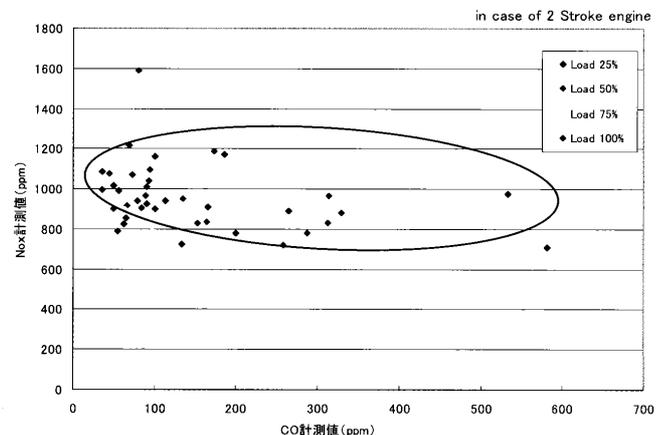


図11. 2ストローク機関のNOx濃度とCO濃度

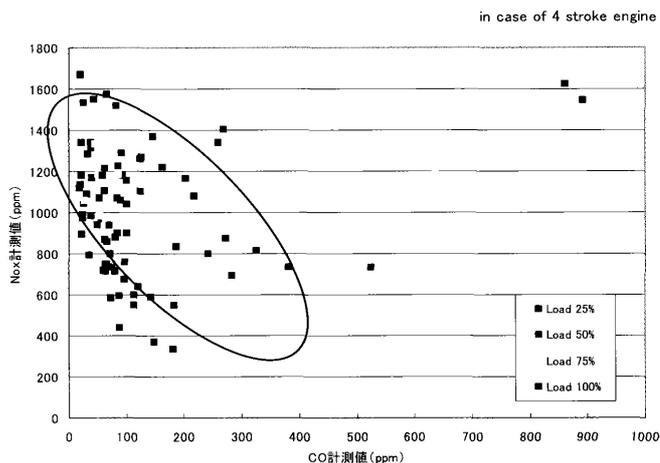


図12. 4ストローク機関のNOx濃度とCO濃度

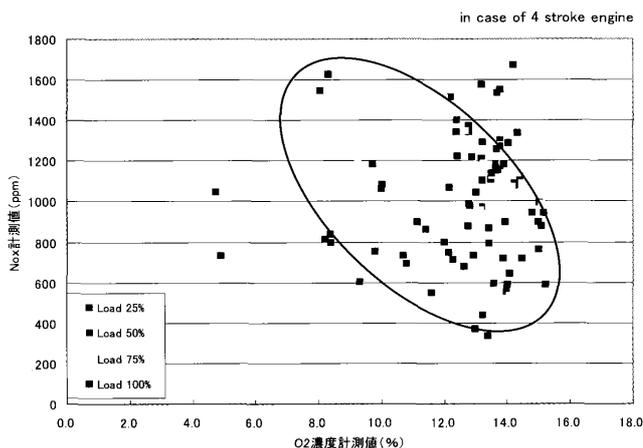


図14. 4ストローク機関のNOx濃度とO2濃度

次に、同じ排ガス中の他の成分濃度との相関を見てみる。図11と図12はNOx濃度とCO濃度を示している。一般的に良好な燃焼によりNOx濃度は増加することが推察されるが、COは不完全燃焼の結果であることを考えると、高いNOx濃度では低いCO濃度が推察される。図11の2ストローク機関では、概略、NOx濃度の増加とCO濃度の減少が相関している様子が伺え、100%負荷時を取っても同様に相関している様子が見られる。図12の4ストローク機関では、多少のバラツキと分布の広がりはあるものの、明確に、NOx濃度の増加とCO濃度の減少は相関していると見ることが出来る。

また、図15に、NOx濃度計測値とO2濃度計測値を其々の機関出力[kW]で除した値で見ると、負荷の上昇に従って、NOx濃度、O2濃度は低下する傾向にある。これは、負荷の上昇に従って、空燃比（燃料量に対する空気量）が低下し、その結果、排出されるO2濃度も低下すると考えられる。同時にNが酸化する割合も低下する結果、NOx濃度も低下すると考えられる。

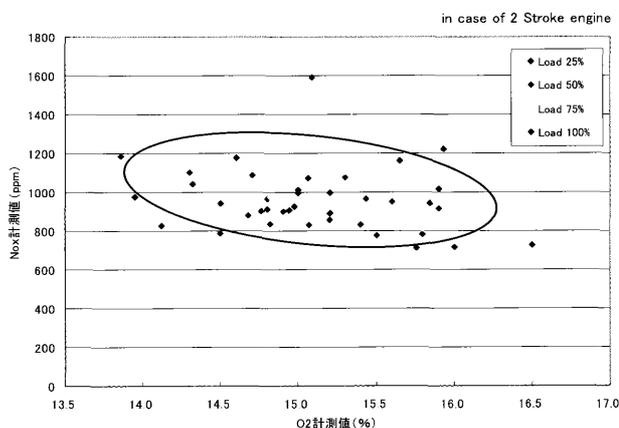


図13. 2ストローク機関のNOx濃度とO2濃度

図13と図14にNOx濃度とO2濃度の関係を示す。一般的に良好な燃焼によりNOx濃度は増加する一方で、その結果O2は消費され、O2濃度は低下することが推察される。図13及び図14では、概略、2ストローク機関と4ストローク機関とも、NOx濃度の低下に従って、O2濃度は増加する傾向にあるが、4ストローク機関では、分布の広がりがあるものの、その相関が強い傾向が見られる。

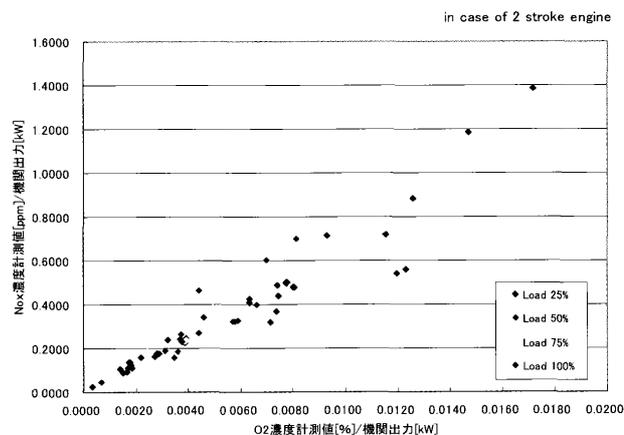


図15. 2ストローク機関単位出力当りのNOx濃度とO2濃度

図16と図17にNOx濃度とTHC(Total Hydrocarbon炭化水素)濃度の関係を示す。THCはCOと同様に未燃焼残渣物であるので、良好な燃焼によりNO濃度は増加する一方で、燃焼不良で生成されるTHC濃度は減少することが推定される。図16の2ストローク機関では、分布の広がりはあるもののTHC濃度の増減に対して、NOx濃度は殆ど変化が見られない。一方で、図17の4ストローク機関では、NOx濃度の増加とTHC濃度の増加が相関する傾向が見られる。高いNOx濃度は良好な燃焼の結果と考え、その状態で推定される低いTHC濃度ではないので、局部的な燃焼と燃焼残渣物の関係等更なる調査を待ちたい。

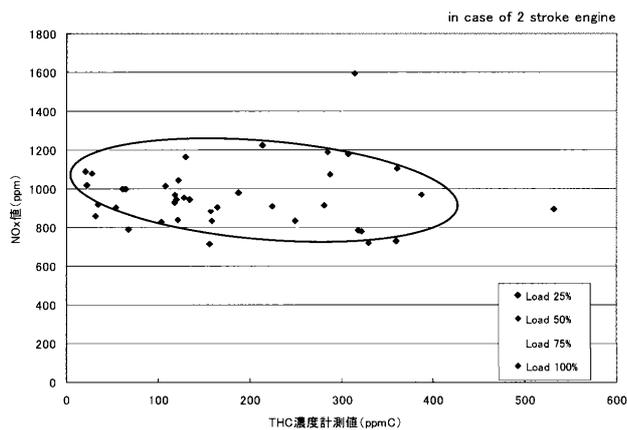


図16. 2ストローク機関のNOx濃度とTHC濃度

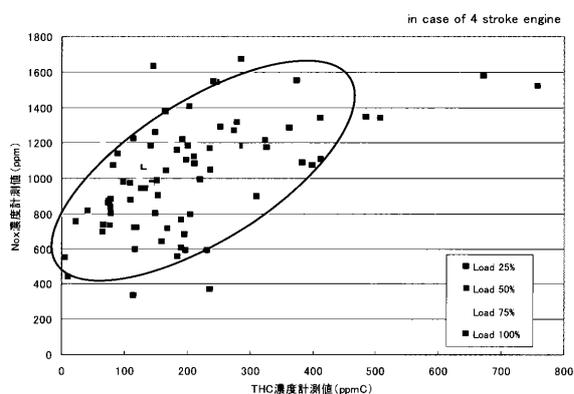


図17. 4ストローク機関のNOx濃度とTHC濃度

試験に使用する燃料油はNOxテクニカルコードに従い、ISO8217(1996)に指定されているDM級船用燃料油が用いられる。その使用する燃料油の性状によっては、NOx濃度が増減する可能性が考えられる。

図18にNOx排出濃度認証試験で使用した燃料油の密度とNOx濃度の関係を示す。かなりのバラツキが有る中でも、4ストローク機関では密度が低くなるほどNOx濃度も低下する傾向にあるが、2ストローク機関では密度の低下によりNOx濃度は増加する傾向にある。

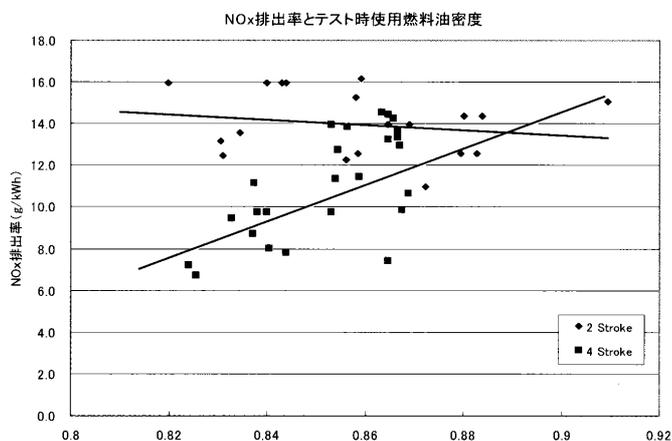


図18. NOx排出濃度認証試験で用いた燃料油の密度とNOx濃度

同様にNOx排出濃度認証試験で使用した燃料油の粘度とNOx濃度の関係を見たのが図19である。4ストローク機関では、使用した燃料油の粘度に大きな差は見られないが、2ストローク機関では、かなりのバラツキがある中で、粘度が高くなるとNOx濃度は低下する傾向が見られる。

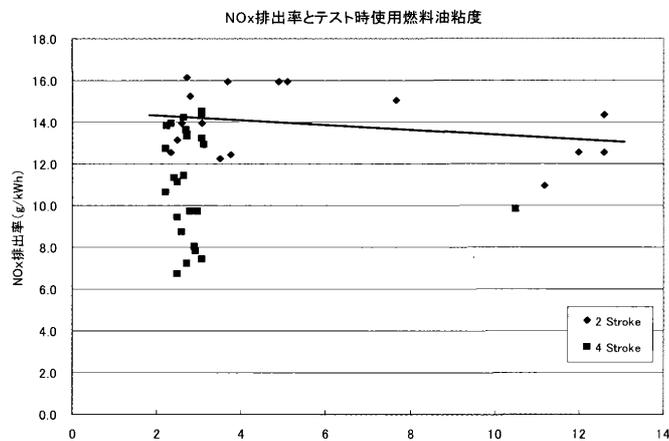


図19. NOx排出濃度認証試験で用いた燃料油の粘度とNOx濃度

5. 考察と結論

以上の結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 現在までのNOx排出濃度認証試験結果でも、2011年から予定される二次規制値である15.5%~21.8%減をクリアできる機関が多数存在する。ただし、この値はA重油を用いた試験結果であり、多くの機関で、実際のC重油を焚いた運行状態では、それらより更に少ないNOx排出量が予想される。
- (2) 130rpm以下の回転数を同一視した場合、2ストローク機関のNox排出係数と燃料消費率(SFOC)は良い相関が見られた。一方、4ストローク機関の場合、500rpm、500~1500rpm、1500rpm以上の3つの回転数域で分けて見た場合、NOx排出係数及びSFOC共に回転数依存性が見られ、回転数が上昇するに従って、NOx排出係数が低下する一方、SFOCは増加する傾向が見られた。同一回転数グループ内では明確な関係は見られなかった。
- (3) Nox濃度は、4ストローク機関の場合、排ガス温度と良い相関が見られ、Thermal Nox生成が温度に大きく依存することを裏付けている。しかし、2ストローク機関では、逆に高い排ガス温度で低いNOx濃度の傾向が見られる。ただし、空気過剰率の影響が含まれるので、25%、50%、75%、100%の各々同一負荷の中で見ると、逆に高い排ガス温度で高いNOx濃度になる傾向にあり、概略、NOx生成則に従った傾向と推察される。
- (4) 図6及び図7で、2ストローク機関及び4ストローク機関とも、高いPmax下では低いNOx濃度を示す傾向が見られたが、今回のデータが、25%、50%、75%、

100%負荷の混在したものであり、通常、負荷の上昇に従って、空気過剰率が低下することを考慮すると、図6及び図7の結果は、PmaxとNOx濃度の関係よりは、空気過剰率とNOx濃度の関係を示していると判断できる。同一負荷に於いても、明確な傾向は見られなかった。

- (5) 2ストローク機関の場合、NOx濃度はCO濃度、O₂濃度及びTHC濃度の違いに対して殆ど差が見られない。一方、4ストローク機関では低いNOx濃度で、O₂濃度は高く、CO濃度も高くなるが、一方、THC濃度は低くなる傾向を示している。因みに、2ストローク機関のNOx濃度及びO₂濃度を機関出力で除した図15で見ると、負荷が25%、50%、75%、100%と高くなるに従って、それぞれの濃度は低くなる傾向を示しているため、空気過剰率の低下が排ガス中のO₂濃度の低下及びNOx濃度の低下に繋がっているものと考えられる。
- (6) NOx濃度は、NOx認証試験時に使用した油の密度及び粘度との相関が見られた。4ストローク機関の場合、密度の低い油、2ストローク機関の場合は密度の高い油を使用するとNox濃度も低くなる傾向が見られた。

現在、2011年の二次規制及び2016年の三次規制に対する研究開発が精力的に進められる中、今回、過去に計測されたNOx濃度と各種機関パラメータの関係を見たが、概略、従来のNOx生成プロセスを裏付ける傾向が確認された。2016年からの第三次規制では脱硝装置を含めたNOx排出濃度認証試験も必要となり、その為の各エンジンパラメータとの相関を明確にする必要もある。今後、更なる分析と研究により、NOx排出低減対策に伴う規則及びNOx排出濃度認証のバックグラウンドが示せるようにしたいと考えている。

参考文献

- 1) (財)日本海事協会研究開発成果発表会講演予稿集、2007年11月
- 2) 大友一友、藤原俊隆共著、燃焼工学、コロナ社
- 3) 日本機械学会、燃焼に伴う環境汚染物質の生成機構と抑制法
- 4) 日経サイエンス「エンジン」、有賀基、日本経済新聞社