舶用ディーゼル機関のNOx濃度認証試験結果の現状分析

技術研究所　椎原裕美、黒澤忠彦、西口優美

１．はじめに

2000 年からの遡及適用として、官民上げて準備してきた 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、2 年が経過した。現在、同条約の批准国数は 47 カ国で、これらの船腹量は世界の 74.73%と報告されている。今後、条約発効から丸 3 年経過する 2008 年 5 月までに、400GT 以上の国際航行する船舶は、初回検査を完了させて、IAPP(International Air Pollution Prevention)証書を保持する必要がある。

この条約により規制されるのは窒素酸化物 (NOx)，硫黄酸化物(SOx)，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，以下にその概要を箇条書きに記す。

(1) 窒素酸化物

機関回転数が 130rpm 未満　：　17 g/kWh 以下

同 130rpm以上 2000rpm未満：　45.0・$n^{-0.2}$ 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、現在、世界中で、ホットな議論が行われている。その二次及び三次規制案の概要点を以下に箇条書きにして記す。ただし，本研究開発成果発表会(2007 年 11 月 28 日)時点では，10 月の BLG 中間会合における議論の結果，下記の案が更に明確なものになっているはずである。

(1) 窒素酸化物

二次規制は，現行規制値から 2～3.5g/kWh の削減と 2011 年実施でほぼ合意されている。また，三次規制は 2015 年又は 2016 年実施で，

A 案：現行より 80%削減を沿岸 50 海里の海域に適用，

B 案：二次規制値より 80%削減を SECA に適用，

C 案：現行より 40～50%削減を全海域に適用，

の 3 案で議論が続けられている。更に，燃料消費率(Specific Fuel Oil Consumption)を 2～4%の増加(=Fuel Penalty)に止めることもほぼ合意されている。

(2) 硫黄酸化物

燃料油中の硫黄分の規制値を，

A 案：現行通りの一般海域で 4.5%，SECA で 1.5%

B 案：SECA のみ 2010 年までに 1.0%，2015 年までに 0.5%

C 案：全海域で留出油を使用し，2012 年までに 1.0%，2015 年までに 0.5%

C2 案：C 案＋後処理装置の使用可

U.S.A.案：沿岸から X 海里の沿岸海域に適用し，Sox 排出量を 0.4g/kWh 未満又は，硫黄分 0.1%未満の留出油の使用

BIMCO 案：一般海域は 2012 年までに 3.0%，2016 年までに 1.5%
SECA は 2011 年までに 1.0%，2015 年までに 0.5%

の 6 案が出され，ほぼ，A 案と B 案が議論の対象から消えて，残りの 4 案での議論が続けられている。

以上の改正論議では、現行規制値をどこまで下げれるか、その為の問題点と達成可能レベル、達成可能年度はいつ頃かと言うことが論議の焦点となる。その論議の背景に存在する排ガスに関する技術的問題点として，現在，実験室レベルから実用直前レベルまで各種の技術が混在し，多額の開発費用やライセンシー/ライセンサーを巻き込んだ国際的な競争もある。その中で，NOx(窒素酸化物)、SOx(硫黄酸化物)、PM(浮遊粒子状物質)等の内燃機関からの排ガス排出量削減に関する技術的な問題点に限って、以下にいくつかを箇条書きにした。

(1) NOx(窒素酸化物)と燃費(燃料消費率)はトレードオフの関係にあり、NOx を削減すると燃費が悪化する。

(2) EGR(排ガス再循環)、SAM(吸気加湿)、水噴射/噴霧、ミラーサイクル、電子制御燃料噴射装置等による機関本体での NOx 低減は概略 20～30%まで可能である。

(3) NOx40～80%低減には SCR(選択触媒削減、Selective Catalytic Reduction)装置等の後処理装置が必要である。

(4) Thermal NOx として空気から生成される大部分の NOx(窒素酸化物)は、高温になる程増大する。

(5) SOx(硫黄酸化物)の大部分は燃料中に含まれる硫黄分から生成される。

(6) PM(浮遊粒子状物質)は、炭素分(すす)、SOF(Soluble Organic Fraction、PM の内の有機溶剤に可溶物質)、硫酸塩(サルフェート)からなり、サルフェートは当然として、その他も燃料中の硫黄分の増加に従い増加する。

(7) NOx と PM はトレードオフの関係にあり、一方を削減すると片一方は増加する。

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、実際のエンジンの排出ガス計測(以降、NOx 排出濃度認証試験と称する)が行われ、各種エンジン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。

上記の要点の検証も踏まえて、条約改正論議で出てくる諸々の数値の背景と傾向に加えて，今後の各種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。条約改正議論が進む中で、官民挙げて一丸となった環境低負荷エンジンの開発もスタートし，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．NOx 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、NOx 排出濃度認証試験を実施して、NOx 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。

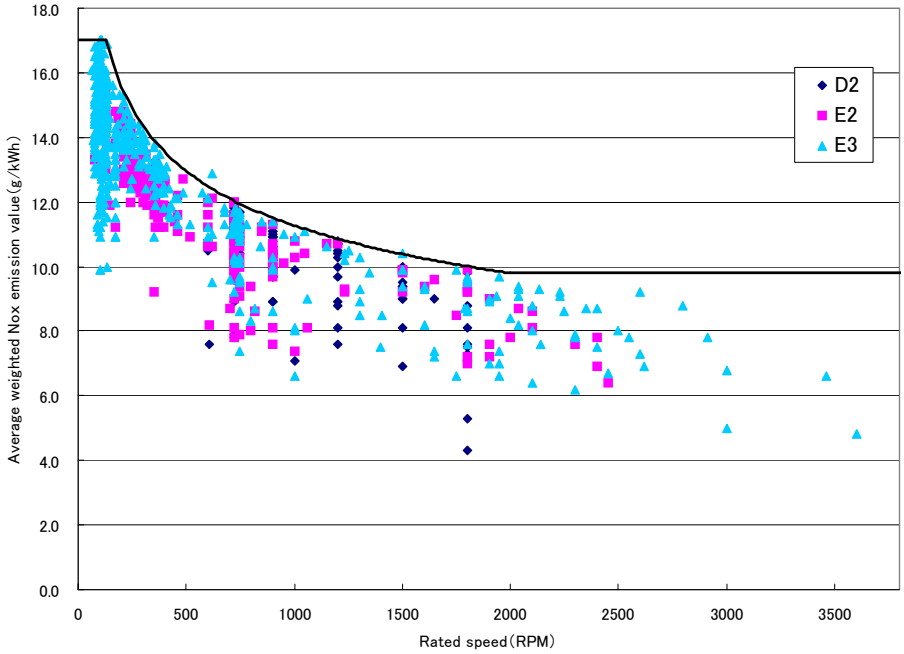
E2 型テストサイクル：定回転主推進機関

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



Relationship between average weighted Nox emission value and engine rated speed

図 1 機関回転数による NOx 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。現在論議が煮詰まりつつある 2011 年実施で現行より 2～3.5g/kwh 低減と言う二次規制案を，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みる。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。

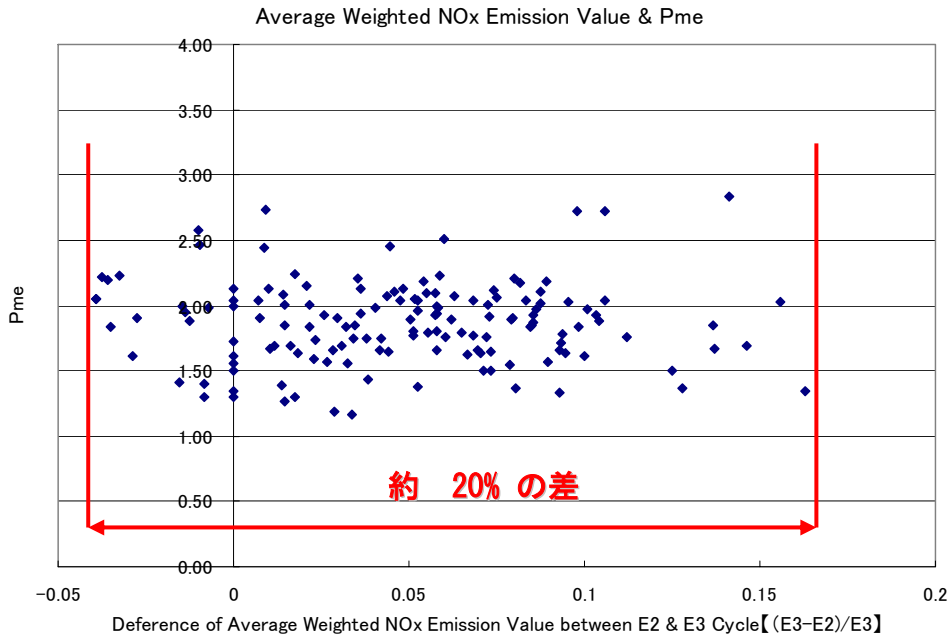


図 2 テストサイクルの違いによる NOx 排出係数の値

次に, 前項で示した NOx 濃度と燃料消費率がトレードオフの関係にあるか否かを見てみる。図 3 に縦軸に NOx 排出係数, 横軸に燃料消費率(SFOC:Specific Fuel Oil Consumption)の値を 100 件のデータで示す。黒色菱形マークが 2 ストローク機関，赤色四角マークが 4 ストローク機関の値を示し，両方共，明確に相関があると推定できる。

この相関式を同図から求めて，NOx 排出係数値を[NOx](g/kWh)，燃料消費率を[SFOC](g/kWh)で表すと，

2 ストローク機関：[NOx] ＝ 55 － 0.233・[SFOC]

4 ストローク機関：[NOx] ＝ 30 － 0.095・[SFOC]

の式が得られる。これは，従来の燃焼システムのままで，機関本体の改良による NOx 低減を目指した場合の燃料消費率悪化の推定値を示すと考えられる。因みに，議論がほぼ煮詰まりつ

つある二次規制案の 3.5g/kWh を削減した場合，燃費の悪化の度合いを 2 ストローク機関で見てみる。

[NOx]：17 ⇒ 13.5 g/kWh の 3.5g/kWh，20%ダウンした場合，

[SFOC]：163 ⇒ 178 g/kWh の 15g/kWh，17%アップする

と予測される。従って，NOx 削減と燃費増加はトレードオフの関係にあることが確認され，燃費の悪化を押さえて NOx 削減を達成する為には，従来の燃焼システムの改良又は異なるシステムが必要となることが推定される。

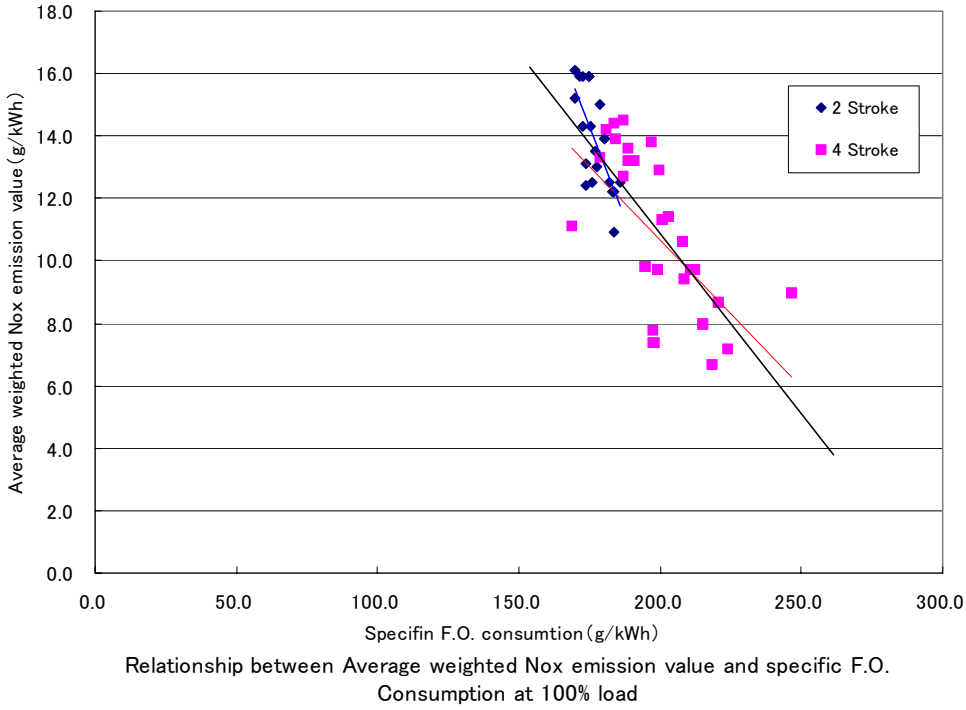


図 3 NOx 排出係数と燃料消費率

３．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，現在の機関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。機関の計測値を諸々の角度から検討，解析して見た結果，各計測値を当該機関の計測時の出力(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訳である。

図 4 及び図 5 に NOx 濃度と Pmax(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，Pmax 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 4 及び図 5 では負荷の上昇に従って、空気過剰率が低下するが、Pmax の影響より、空気過剰率低下の影響が現れているとも考えられるが、更なる検討が必要である。

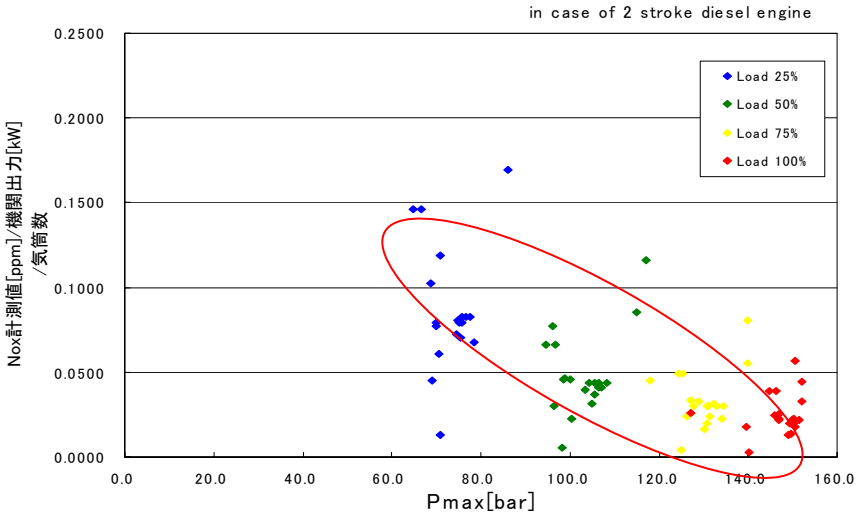


図 4　2 ストローク機関の NOx 濃度と Pmax

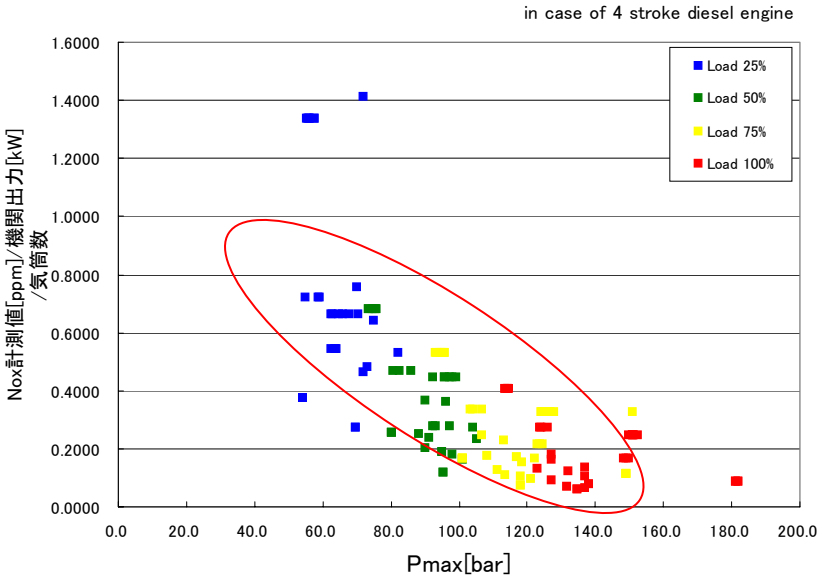


図 5　4 ストローク機関の NOx 濃度と Pmax

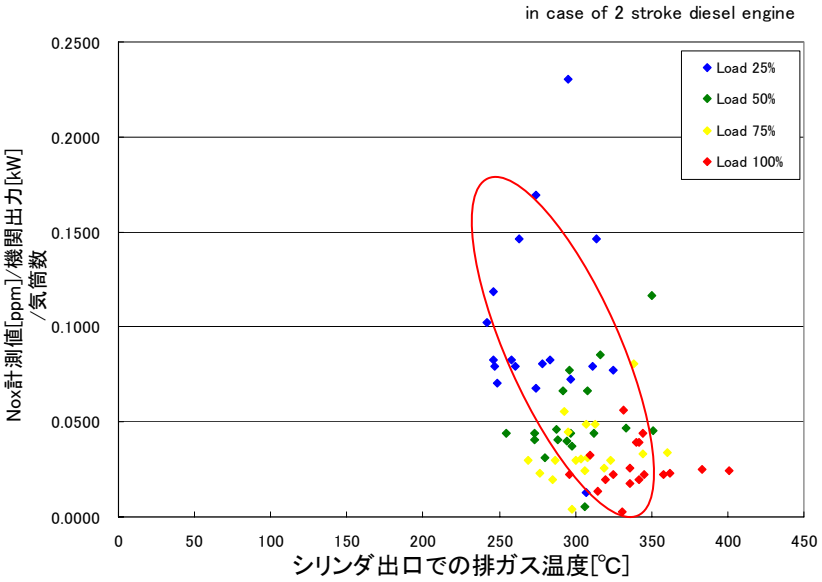


図 6　2 ｽﾄﾛｰｸ機関の NOx 濃度と排ガス温度

図 6 及び図 7 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、排ガス温度と NOx 濃度の間に負の相関が見られ，排ガス温度の上昇が NOx 濃度の減少に繋がる傾向が見られる。しかし，4 ストローク機関では，概略、排ガス温度の上昇が NOx 濃度の増加に繋がっている傾向が見られる。

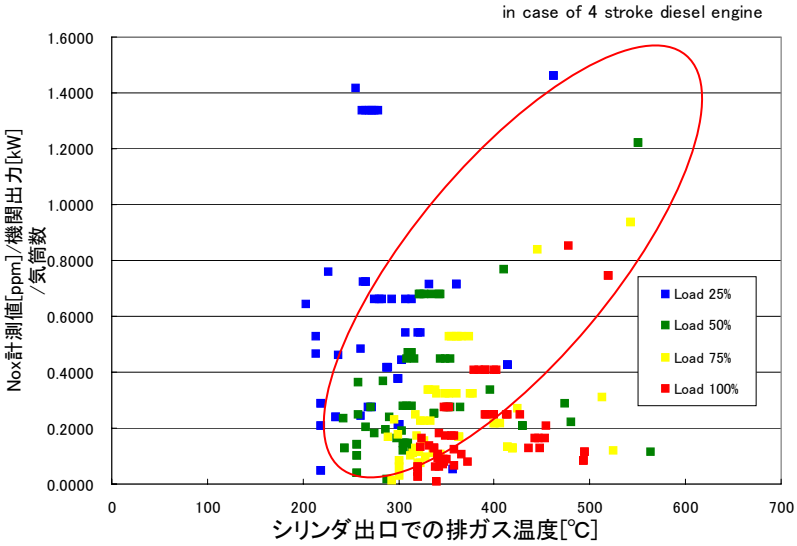


図 7　4 ｽﾄﾛｰｸ機関の NOx 濃度と排ガス温度

図 8 に 2 ストローク機関の NOx 濃度と掃気温度の関係を示す。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。

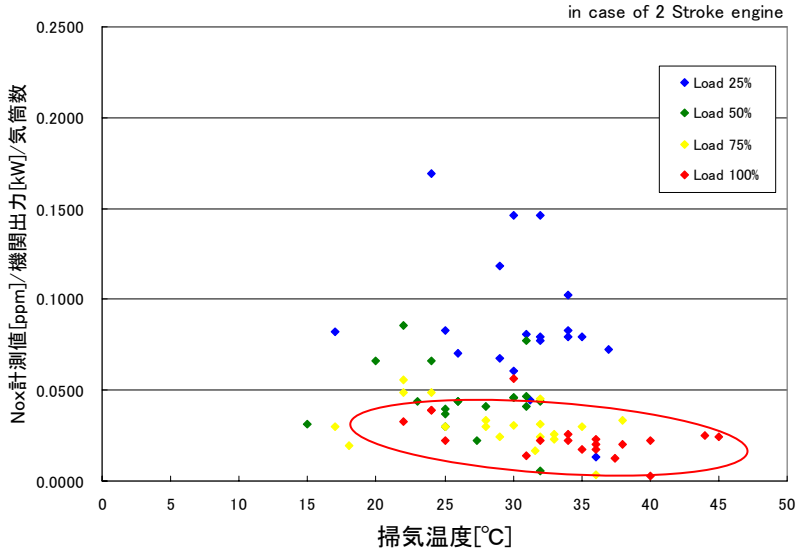


図 8　2 ストローク機関の掃気温度と NOx 濃度

次に，同じ排ガス中の成分との相関を見てみる。図 9 と図 10 は NOx 濃度と CO 濃度を示している。明確な相関は見られないが、4 ストローク機関で、若干、CO 濃度と NO 濃度に負の相関が見られる。これは高温で良好な燃焼故に NOx が増加し、一方、不完全燃焼としての CO が減少することを裏付けていると考えられる。

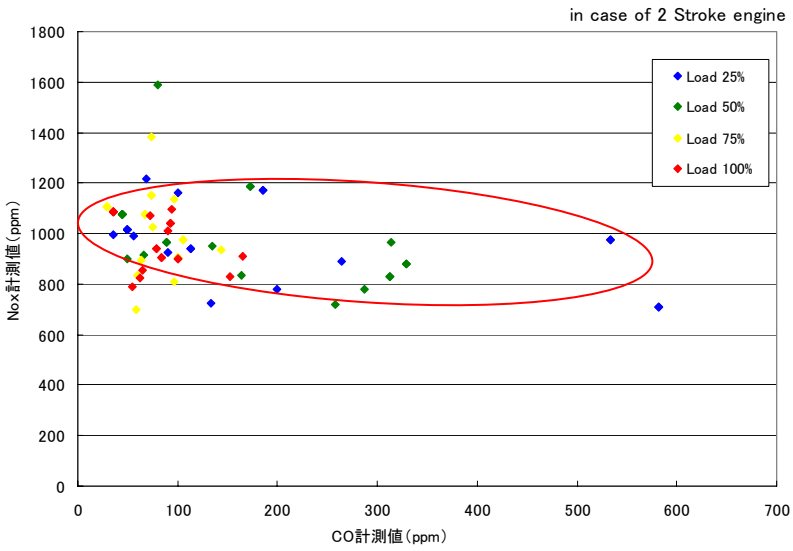


図 9　2 ｽﾄﾛｰｸ機関の NOx 濃度と CO 濃度

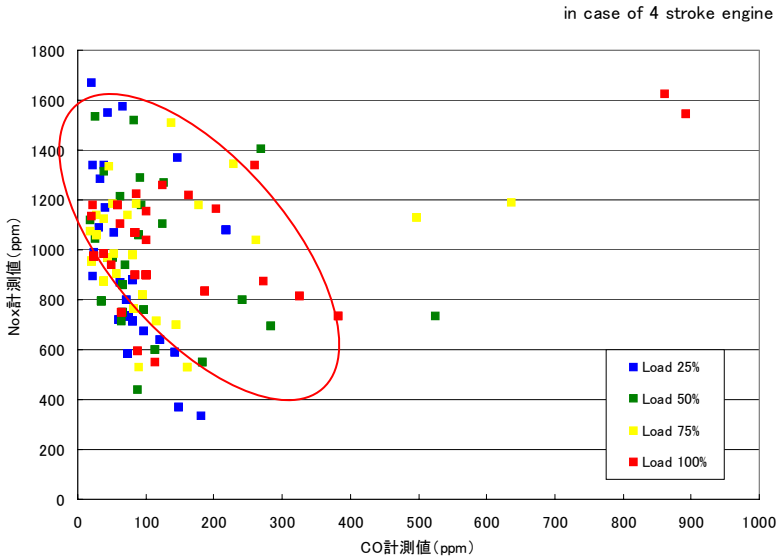


図 10　4 ｽﾄﾛｰｸ機関の NOx 濃度と CO 濃度

図 11 と図 12 にNOx濃度とO_2濃度の関係を示す。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、O_2濃度は増加する傾向にあるが、2 ストローク機関では、バラツキはあるものの、その相関は強い傾向が見られる。一方、同様なNOx濃度のバラツキの範囲で、4 ストローク機関では、O_2濃度のバラツキの幅が大きいことが分かる。2 ストローク機関では 100%負荷時でも最大 1.5%程度のO_2濃度の差しか見られない中で、4 ストローク機関では、約 3 倍の開きとなっている。

また, 図 13 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、O_2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O_2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。

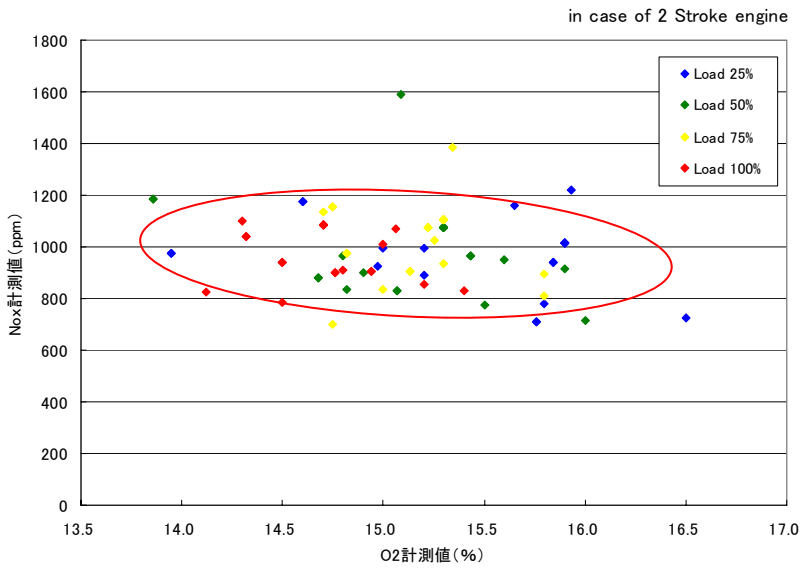


図 11　2 ｽﾄﾛｰｸ機関のNOx濃度とO_2濃度

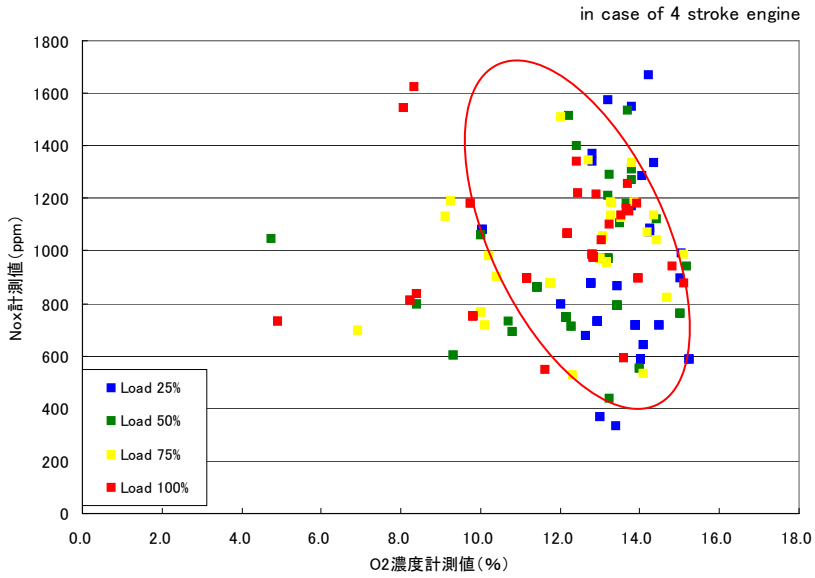


図 12　4 ｽﾄﾛｰｸ機関のNOx濃度とO_2濃度

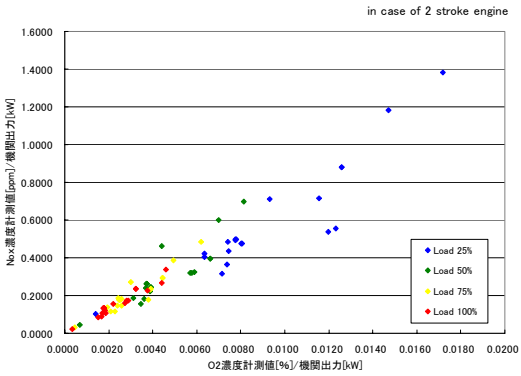


図 13　2 ストローク機関の NOx 濃度と O2 濃度(機関出力で除した場合)

図 14 と図 15 に NOx 濃度と THC(Total Hydrocarbon 炭化水素)濃度の関係を示す。若干のバラツキはあるものの，2 ストローク機関では、THC 濃度の増減に対して、NOx 濃度は殆ど変化ない一方で、4 ストローク機関では、明確に THC 濃度の増加と NOx 濃度の増加が相関する傾向が見られる。

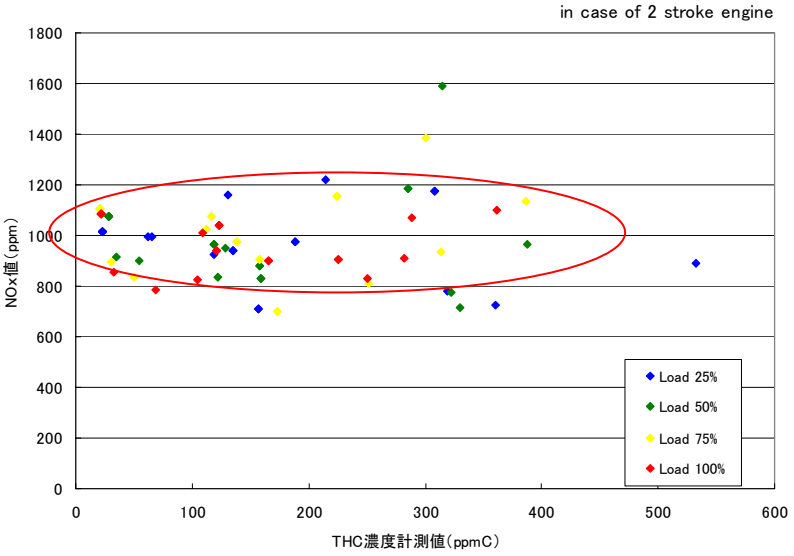


図 14　2 ｽﾄﾛｰｸ機関の NOx 濃度と THC 濃度

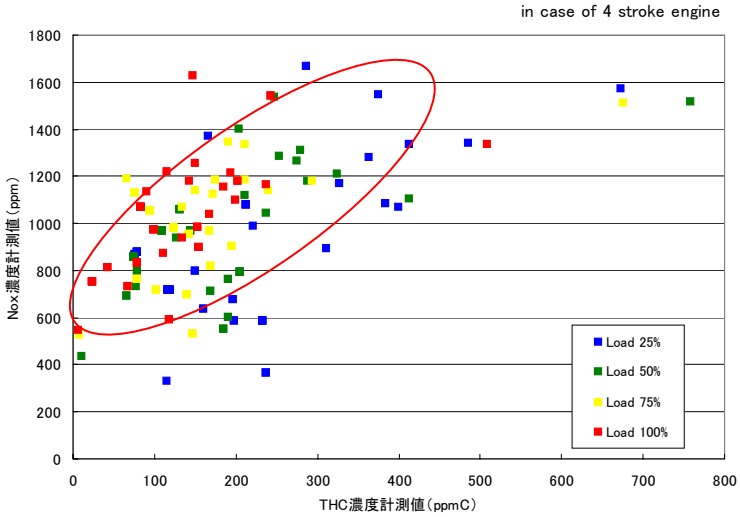


図 15　4 ｽﾄﾛｰｸ機関の NOx 濃度と THC 濃度

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 級舶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 16 にテストで使用した燃料油の密度と NOx 濃度を示す。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。

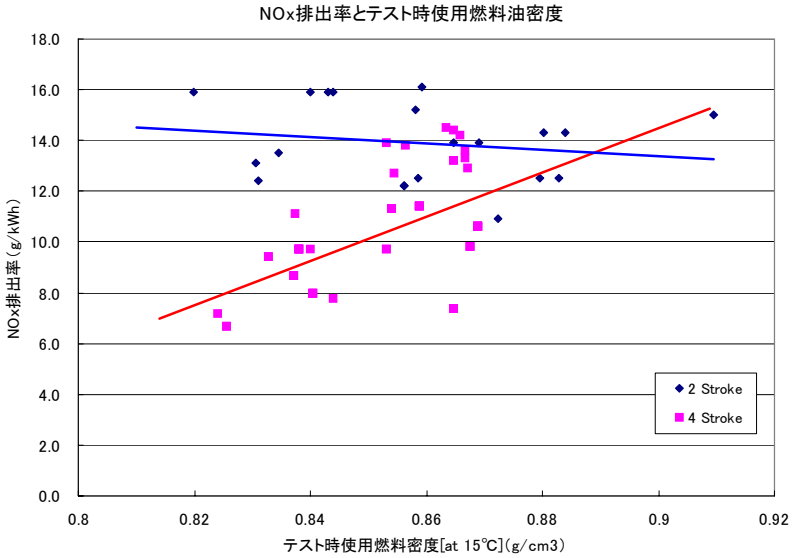


図 16　テストで使用した燃料油の密度と NOx 排出係数

同様に使用燃料油の粘度と NOx 濃度を見たのが図 17 である。4 ストローク機関では，殆ど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。

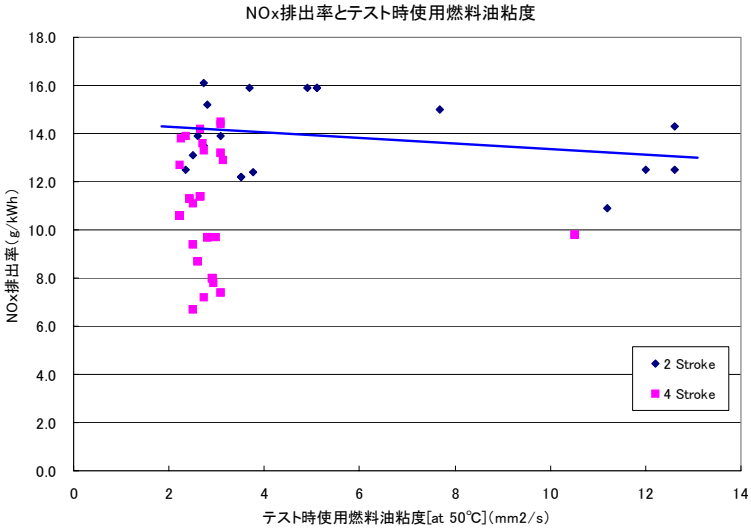


図 17　テストで使用した燃料油の粘度と NOx 排出係数

4．考察

以上、NOx 濃度に関する傾向をデータで見たが，それを考察してみる。図 18 に定容積燃焼試験器 FIA100 による燃焼時間とその時に計測された 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を空気で 45bar，450℃の温度にして，燃料油を上部 0.35mm φ 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にならないかも研究している。

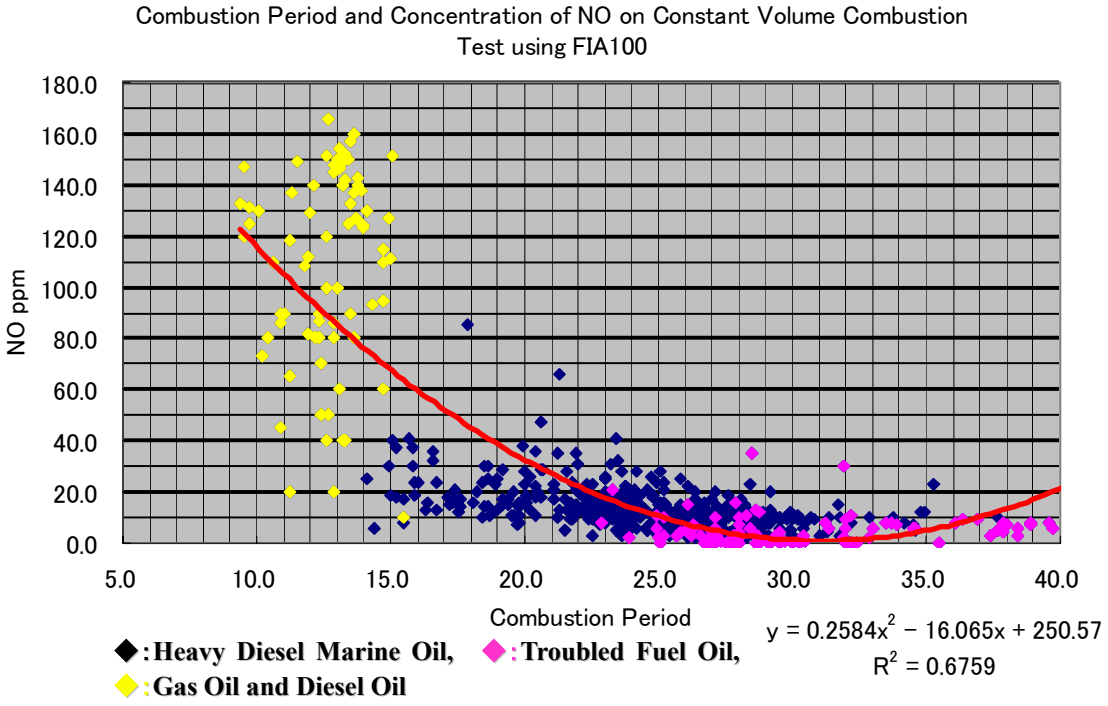


図 18 定容積燃焼試験器 FIA100 による燃焼時間と排出 NO 濃度

図 18 はその結果の 1 例を示したものであり，横軸が燃焼時間を示し，縦軸が NO 濃度を示す。左側の黄色の一団はガスオイル及びディーゼルオイル，中央下側の黒色の一団は C 重油，中央下側から右にかけての赤色の一団は燃焼障害を発生した C 重油の値を示す。ガスオイル及びディーゼルオイルは燃焼時間が短く，燃焼が良好であることが推定されるが、一方で，NO 濃度が高くなっている。C 重油は燃焼時間が長くなるが，全体的に NO 濃度は低い。一方，燃焼障害を起こした油は燃焼時間も更に長くなり，NO 濃度は更に低くなる。つまりは，燃焼不良になるほど NO 濃度は低くなる傾向を示している。

これらの事を示差熱天秤で計測される燃料油の蒸発温度で見てみる。示差熱天秤では，天秤皿の中に，適量の燃料油を入れ，容器内で順次温度を上昇させて，油が蒸発する量を計測する。蒸発温度≒着火温度が推定できる。図 19 に示差熱天秤で縦軸に計測された油量の変化を，横軸に容器内温度を取り，A 重油/ガスオイル/ディーゼルオイル等の変化と，C 重油の変化を合わせて概要図として示す。ディーゼルオイル/ガスオイル等は 200～300℃に蒸発のピークがあり，これらの油はこの領域で良い着火すると推定され、良い燃焼の結果，NO 濃度が高くなると考えられる。一方，C 重油は 350～400℃付近と 550～600℃付近の 2 箇所に蒸発のピークが存在する。前者はカッター材として加えられた粘度調整用油と考えられ，後者は FCC 残渣油で高アロマ成分の多い燃料油成分と考えられ、それぞれの着火温度領域に一致すると考えられる。因みに、この前者の成分が最初に着火、燃焼することで、後者の成分を燃焼に導くと推定でき、前者の成分が少なく，後者の成分が多い C 重油は難燃性を示し，燃焼障害発生の原因となると考えられる。しかし，一方では，燃焼不良故に NO 濃度が低下すると考えられる。

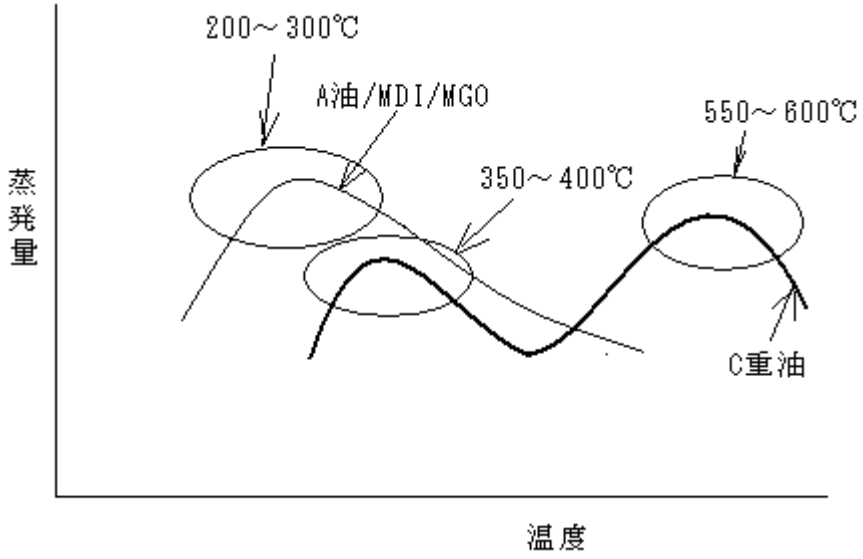


図 19 示差熱天秤で計測された燃料油の蒸発温度の違い

次に, NOxの反応式から考察してみる。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[1)]。

$$N_2 + O \rightleftarrows NO + N \quad (1)$$

$$O_2 + N \rightleftarrows NO + O \quad (2)$$

また，一部の NO は以下の拡大 Zeldovich 機構で生成される。

$$N + OH \rightleftarrows NO + H \quad (3)$$

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[1)]。

$$d[NO]/dt = k_{1f}[N_2][O] - k_{1b}[NO][N] + k_{2f}[O_2][N] - k_{2b}[NO][O] + k_{3f}[N][OH] - k_{3b}[NO][H] \quad (4)$$

ここで, [NO], $[N_2]$、[O]、[NO], [N], $[O_2]$, [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[2)]。

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

$$k_{1f} = 6.4 \cdot 10^{9} \cdot T \cdot \mathrm{Exp}(-6250/RT) \quad (6)$$

$$k_{1f} = 4.2 \cdot 10^{13} \quad (7)$$

(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

$$d[NO]/dt = 2k_{1f}[N_2][O] \quad (8)$$

と近似される[1)]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⇒排ガス温度と良い相関が期待されるが、図 7 の 4 ストローク機関の場合に、その傾向が見られるだけで、2 ストローク機関では、図 6 に示すように、概略、逆の傾向を示している。NOx 排出濃度認証試験では A 重油が一般的に用いられることを考慮すると、図 18 及び図 19 で示したように、A 重油は燃焼状態も良く、高温での良好な燃焼故に NOx 濃度が高くなることが推定されるので、4 ストローク機関では、良好な燃焼により、上記の(1)ないし(2)の燃焼温度に依存した反応により、温度依存性が現れたと推定される。一方、2 ストローク機関では、図 6 では温度依存性が逆に見られ、掃気温度との相関が殆ど見られない。今後の研究としたい。

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[1)]と言われるが、図 4 及び図 5 のPmaxとNOx濃度の相関に関しては、全く逆の結果を示していて、別の因子の影響が推定される。これに関しても今後の研究としたい。

また、排ガス中のNOx濃度とO_2濃度は空燃比にも依存すると推定される。一方、CO濃度及びTHC濃度は燃焼状態を表していると推定されるが、特に、2 ストローク機関ではこれらの濃度変化に対して殆ど変化がない。4 ストローク機関でもNOx濃度の低下に従いTHC濃度は低下するが、一方ではCO濃度は増加する傾向を示し、明確な理由が着け難い。今後も検討を継続する予定である。

一方、NOx 濃度と燃費の相関は明確に現れている。使用燃料油の密度、粘度との相関もバラツキはあるものの、かなりの相関が見られる。

５．まとめ

以上をまとめて以下に箇条書きにする。

(1)現在でも議論されている 2011 年の二次規制値、 2.0～3.5g/kwh 減をクリアできるエンジンが多数存在する。

(2)Nox 排出係数と燃料消費率(SFOC)とは良い相関があり、ＮＯｘを低下させると燃費が上昇する。

(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、逆に排ガス温度の増加は NOx 濃度低下に繋がる傾向が見られ、温度以外の Thermal NOx への影響因子が考えられ、燃焼不良の可能性が推定される。

(4)NOx 濃度は、2 ストローク機関及び 4 ストローク機関とも Pmax とは逆の相関が見られ、高温になるに従って、NOx 濃度は低下する傾向を示している。このことは、今後の、電子制御機関による高圧多段噴射化の流れの中で、燃焼圧力増上昇が NOx 濃度低下に繋がる可能性を示している。

(4) 2 ストローク機関の場合、NOx濃度はCO濃度、O_2濃度及びTHC濃度の変化に対して、殆ど変化ない。一方、4 ストローク機関ではNOx濃度の低下に従いTHC濃度は低下するが、一方ではCO濃度は増加する傾向を示している。

(5) 2 ストローク機関では、機関出力で除した場合、NOx濃度及びO_2濃度共に、機関出力の上昇

に従って、低下する傾向を示し、これは、空気過剰率が低下した結果、燃焼室内O_2濃度の低下とそれによるNO生成反応の低下の結果と推定される。

(5) NOx 濃度は、テスト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。

今後、2011 年の二次規制及び 2015 又は 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、現状の NOx 濃度の傾向を見たが、従来の NOx 生成プロセスでは十分に説明できない傾向も見られ、特に、2 ストローク機関では、燃焼温度及び燃焼圧力に依存しない傾向が見られることから、メーカが諸々の努力をして NOx 排出濃度認証試験をクリアしている現状が推察される。

今回、100 件のデータを分析したが、負荷の違いによる検討を含めて、従来の理論的な裏付けでは不明瞭な傾向も見られ、今後、更なる分析と研究により、明確な NOx 排出低減への方向付と規則および 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) 大友一友，藤原俊隆共著，燃焼工学，コロナ社
2) 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