

重質燃料適応エンジンの基礎研究

Fundamental Study on Heavy Fuel Diesel

技術本部 高石龍夫*¹ 永江禎範*²
 石田裕幸*³
 横浜製作所 宮野弥明*⁴

KU型中速4サイクルディーゼルエンジンの商品力向上には、重質燃料使用時の低公害燃焼技術を確立することが必要である。本研究では重質燃料の燃焼特性を把握するためシリンダ内の光学的観察を実施し、A重油の場合と比較して燃料蒸発が著しく遅れることが分かった。また、高速単筒エンジンを用いた試験により、重質燃料燃焼の問題点を明らかにし、問題解決のために当社独自の層状燃料噴射システム（A重油と重質燃料を一つの燃料弁から層状に噴射）による燃焼改善の可能性を確認した。

It is necessary to confirm the combustion techniques of medium speed diesel engines in order to increase the KU series' market share. The authors observed the combustion process in the cylinder by optical methods. It was shown that the vaporization of heavy fuel oil was much slower than that of diesel fuel oil. Engine tests were also conducted which indicated the problems in bunker fuel oil combustion. It was revealed that stratified diesel fuel oil and heavy fuel oil injection system had the potential to improve the combustion characteristics of bunker fuel oil.

1. ま え が き

重質燃料使用が可能な中速4サイクルと低速2サイクルエンジンを比較した場合、定置用（発電用）エンジンとしては、従来の納入実績が示すように、中速4サイクルエンジンが優位である。

図1にKU30Aの発電プラントの例を示す。

中速4サイクルエンジンの最大の特徴は設備費が少ないことで、これは中速4サイクルエンジンが低速2サイクルエンジンに対してショートストロークで高回転のトランクピストン型のため、発電機、基礎、建屋等が小型であることによる。

反面、低速2サイクルに対して高回転であるために絶対燃焼時間が長く取れず、また、ショートストロークであるために燃焼空間が狭く、良好な燃焼を得ることが困難であるのが実状である。

このような中速4サイクルエンジンにおける重質燃料使用時の低公害化（低NOx、低ばいじん）の燃焼基礎技術を確立することにより、同エンジンの市場拡大を図る。

2. 重質燃料についての要素研究

2.1 試験装置

図2に噴霧燃焼観察装置の概要を示す。

行程280mmの往復動クランク機構②がモータ③で駆動され、直径135mmのピストン①が往復動する。始めに通気弁⑦を油圧ラム⑧により押開けた状態にして、ピストン①を上下運動させる。タンク④内の空気の温度が設定温度に達すると、ラム⑧に加わる油圧を解放して通気弁⑦を下死点で閉じ、シリンダ内の空気を圧

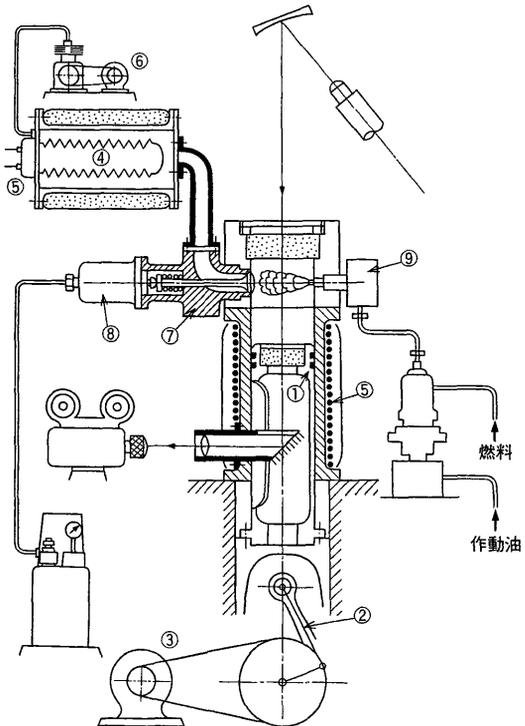


図2 噴霧燃焼観察装置 燃焼室上下面をガラスで構成し、光学的観察を可能としている。
 Experimental apparatus for observation of spray combustion

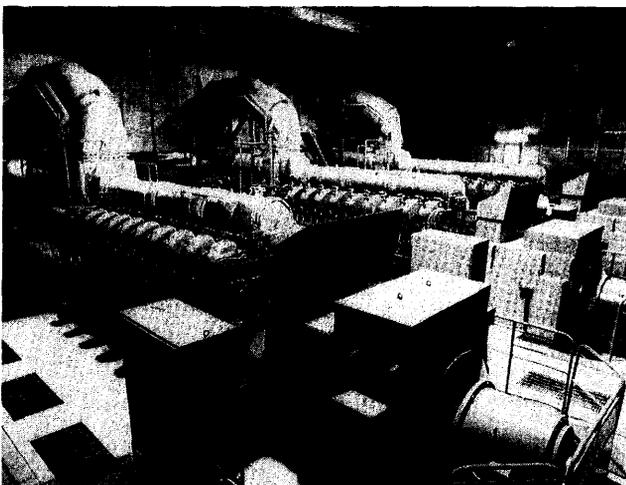


図1 KU 30 A ディーゼル発電プラントの例 18 KU 30 A (5 650 kW) × 3 台で構成されている。
 KU 30 A diesel generation plant

*1 長崎研究所内燃機・油機研究推進室長
 *2 長崎研究所内燃機・油機研究推進室主務

*3 長崎研究所内燃機・油機研究推進室
 *4 原動機技術部主管

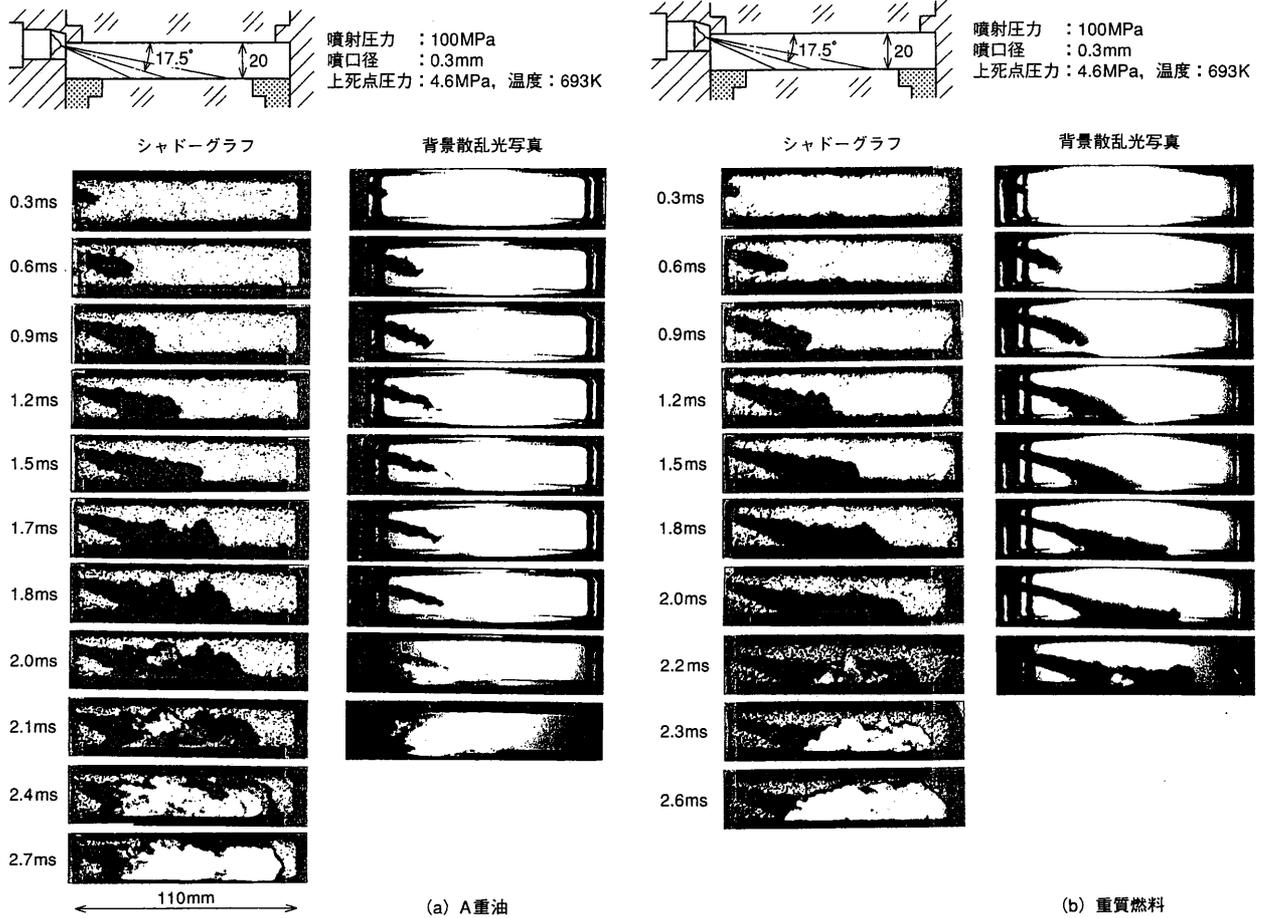


図3 A重油と重質燃料のシャドウグラフと背景散乱光写真
 背景散乱光写真で撮影された非蒸発部は、重質燃料の方が長く伸び、ピストン上面に衝突している。
 Comparison between diesel oil and heavy fuel oil spray combustion by shadowgraphy and diffused background method

縮する。このとき設定温度に加熱された燃料が、上死点付近で燃料噴射ノズル⑨から1回だけ噴射される。

2.2 試験結果

図3に、シリンダ側方から撮影したA重油と重質燃料(留点500℃以上の成分を体積率で約50%含む)単一噴霧の噴射開始から着火までのシャドウグラフと背景散乱光写真を示す。シャドウグラフでは蒸発部を含む噴霧全体が、背景散乱光写真では噴霧の非蒸発部(液相部)だけが観察される。シャドウグラフを見ると、両燃料共噴射開始後約1msで噴霧はピストン上面に衝突、その後は面に沿って発達する。そして着火は、図3(a)A重油では噴射開始後2.0ms、図3(b)重質燃料では2.2msで起っている。

A重油はピストン上面に沿って発達する際に噴霧上部の起伏が多く、これらの起伏は噴霧の進行方向と逆方向に(写真では反時計回りに)巻いている渦であり、燃料と空気の混合が盛んに起っていることが分かる。これに対して、重質燃料では噴霧が細く見え、また2ms付近で比較すると、噴霧先端がA重油噴霧よりも先行しており、空気との混合があまり盛んに行われないうま進行していることが分かる。

一方、背景散乱光写真で比較すると、A重油の非蒸発部の長さは、噴射開始後0.6~0.9msで40mmほどになるが、その後は成長しない。シャドウグラフの結果と組合せると、A重油は噴射ノズルから約40mm進む間にすべて蒸発し、その後はガス噴霧となって発達していることが分かる。それに対し、重質燃料では、非蒸発部は衝突後もピストン上面に沿って進展し、噴霧の先端位置まで非蒸発部が存在することが分かる。

この観察によって、重質燃料使用においては、燃料と空気の混合を積極的に進めさせることで燃料の蒸発を促進することが必要であり、また燃料噴射系、燃焼室形状の最適化においては、使用する燃料の性状を十分考慮することが重要であることが分かった。

3. 高速単筒エンジン試験

3.1 燃料性状が燃焼に与える影響把握試験

3.1.1 試験装置及び供試燃料

現在生産中のKU型中速4サイクルエンジンと要素研究に使用する高速4サイクル単筒エンジンの主要諸元を表1に示す。

この単筒エンジンは、KUと比較して回転数が早く絶対燃焼期間が短いため、重質燃料使用時の燃焼性能への影響は強く現れ、明確な試験結果が得られる傾向にある。

表1 KUシリーズと高速単筒エンジンの主要諸元
 Specifications of KU series and high speed experimental engine

項目	単位	KU 44	KU 34	KU 30 A	高速4サイクル単筒エンジン
シリンダ数		12~18	12~18	12~18	1
ボア	mm	440	340	300	170
ストローク	mm	580	400	380	180
機関回転数	s ⁻¹ (rpm)	8.57(514)	12.5(750)	12.5(750)	30(1800)
発電端出力	kW/シリンダ	917	533	313	110
平均有効圧力	MPa	2.55	2.45	1.95	2.15
平均ピストン速度	m/s	9.94	10	9.5	10.8

表2は試験に用いた燃料性状である。このうち、重質燃料はアスファルトを基材とし、C重油、流動接触分解法の灯軽油留分(Light Cycle Oil)を希釈材として製造したもので、アスファルテン濃度を段階的に変化させている。表中に着火性指標⁽¹⁾を示した。

重質燃料燃焼試験では、燃料タンク、燃料供給配管、燃料供給ポンプ、燃料噴射ポンプ、高圧噴射管の各部を加圧蒸気ライン及び電気ヒータにより390 K前後まで加熱することで動粘度を低下させ、一般的にいわれている噴射可能範囲内とした。

計測項目は、燃料噴射圧力、燃料弁針弁リフト、筒内圧力、出力、排ガス、燃費、システム各部の圧力、温度である。

表2 燃焼試験に使用した燃料性状
Specifications of test fuels

項目	単位	A重油	重質燃料 No.1	重質燃料 No.2	重質燃料 No.3
密度 15℃	g/cm ³	0.882	0.9617	0.9777	0.9889
動粘度 50℃	mm ² /s(cSt)	3.368	212	225	202
残留炭素	wt %	0.03	8	10	12
アスファルテン	wt %		3.4	4.2	5.1
飽和分	wt %		48.2	43.8	41.7
芳香族分	wt %		33.7	34.4	34.6
レジン分	wt %		14.7	17.6	18.6
S	wt %	0.51	2.65	2.89	3.04
高位発熱量 Hh	J/g	44 890	43 100	42 800	42 500
低位発熱量 Hu	J/g	42 210	40 800	40 500	40 200
着火性指標	-	57.3	61.3	64.6	67.3

着火性指標(簡易式) $Li = 216.2 D - 7.341 \log V - 129.5$
 D : 密度 kg/m³
 V : 動粘度 mm²/s 50℃

3.1.2 試験結果

燃料噴射量一定、空気過剰率一定の条件下で、各燃料による燃焼試験での燃料弁針弁リフトと筒内圧力、燃焼解析から得られる筒内ガス平均温度、熱発生率、総熱発生量を図4に示す。

燃料が重質化するほど熱発生が緩やかになり、ピークが低く、燃焼期間が長くなる。このとき、筒内温度は低下し、総熱発生量も低下する。

図5はこのときの排ガス性状を比較したものである。燃料が重質化するにつれてNOxは低減し、ばいじんは極度に増大する。

3.1.3 考察

噴霧燃焼におけるNOx生成量は、燃焼領域の温度と保持時間に強く依存しているため、燃焼初期における着火遅れ期間の延びによる急激な予混合燃焼を抑制し、続く燃焼中期での燃焼領域温度の平準化によってNOx低減が可能である。

また、ばいじん低減には、燃料蒸発と燃焼後期の再酸化促進によるすす生成量の低減をねらいとした燃料噴霧微粒化に有効な燃料噴射系の高圧・高噴射率化を図る一方で、燃料自体をすす発生の少ないものにすることが効果的である。

この低NOxと低ばいじんを同時に満足させるための手段として、一回の燃料噴射期間中に燃料の燃焼特性を制御することが非常に有効となる。

3.2 A重油・重質燃料層状噴射による燃焼改善効果確認試験

3.2.1 試験装置

前節で示した、一回の燃料噴射期間中に燃料の燃焼特性制御の手段として、着火性に優れるA重油と重質燃料を一つの燃料弁か

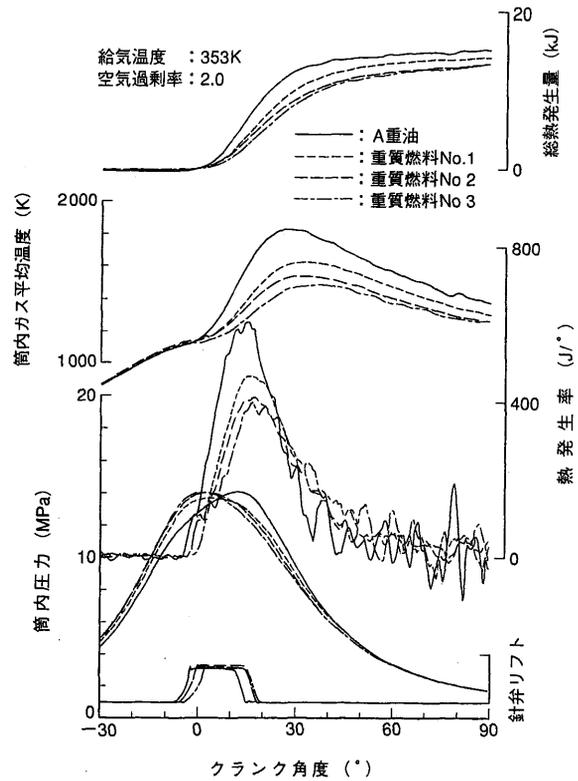


図4 燃料性状が燃焼特性に与える影響 燃料が重質化するほど熱発生率はなだらかになる。
Effects of test fuels on combustion characteristics

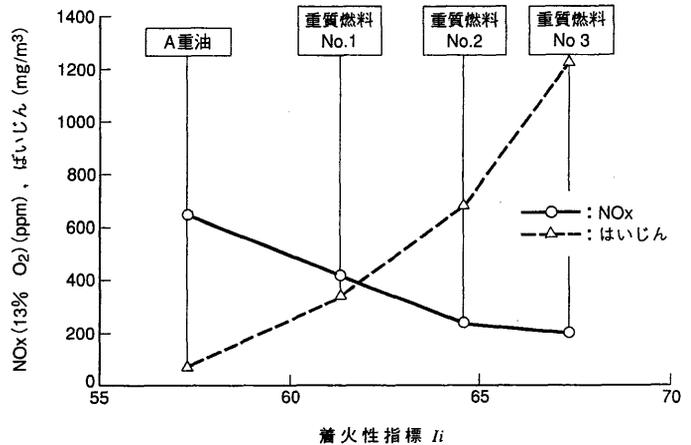


図5 燃料性状が排ガ斯特性に与える影響 着火性指標が高く(着火性が悪く)なるほど、ばいじんは増大し、NOxは減少する。
Effects of test fuels on noxious emissions

ら層状に噴射させる、当社独自の層状噴射システムによる燃焼改善の可能性について確認した。その概要を図6に示す。

燃料噴射弁内には、燃料噴射ポンプから圧送されるA重油通路に逆止弁を介して重質燃料の供給ラインが設けてある。4サイクルエンジンの1サイクルのクランク角度は720度で、燃料噴射期間はそのうちの約20度に過ぎない。この燃料噴射後から次の燃料噴射までの間に、重質燃料供給系の電磁弁を開閉することにより、所定量の重質燃料をA重油側燃料通路に押込むことができる。次の燃料噴射において、A重油・重質燃料・A重油の順に噴射される。

これにより、噴射初期のA重油による着火性の確保と、噴射後期のA重油による後燃えの改善をねらう。なお、この層状噴射技術は、燃料の中間に水を噴射して燃焼領域の熱容量増大による温度低下でNOxを低減させるシステム⁽²⁾⁻⁽⁴⁾の実績はあるが、中間に

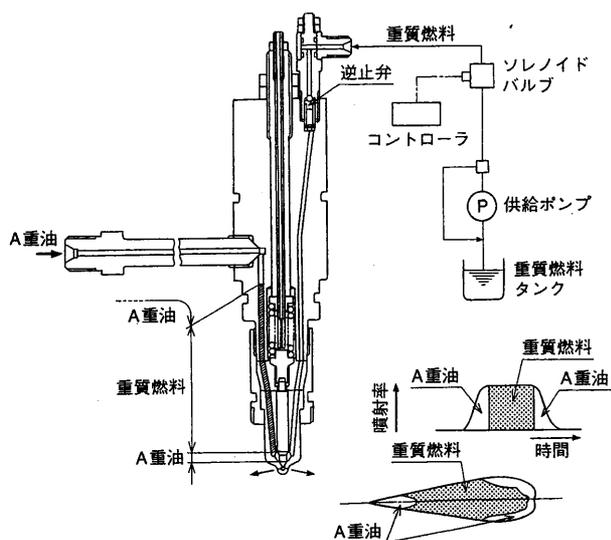


図6 A重油・重質燃料層状噴射システム 初期と後期にA重油を噴射することにより、着火性と後燃えの改善をねらう。
Stratified fuel injection system of diesel oil and heavy fuel oil

重質燃料を噴射するシステムは実施された例がない。

3.2.2 試験結果

総噴射量一定のまま重質燃料 No.2の割合を変化させたときの筒内圧力と燃焼解析結果を図7に重ねて示す。先行噴射されるA重油による着火特性改善及び後期に噴射されるA重油の後燃え改善効果が得られている。このときのNOxとばいじんの変化を図8に示す。この試験結果から、重質燃料の割合が50%付近まではA重油と同等の燃焼性能を確保できることが確認できた。しかし、更に重質燃料割合を増大した場合、急速に燃焼が悪化する。このため、噴射システムのみならず、燃焼室形状、空気流動の最適化を図り、燃焼性能を改善していく必要がある。

4. ま と め

- (1) A重油と重質燃料の光学的燃焼観察により、重質燃料は燃料と空気の混合が活発ではなく、燃料液滴が蒸発しないまま燃焼室壁面に衝突していることが分かった。
- (2) 高速4サイクル単筒エンジンを使用して燃料性状が燃焼に与える影響把握試験を実施した結果、燃料が重質化するほど、着火遅れ、熱発生期間が延び、ばいじんが急激に増大することが分かった。
- (3) A重油・重質燃料層状噴射による燃焼改善試験を実施した結果、重質燃料の割合が50%付近まではA重油と同等の燃焼性能が得られることを確認した。

今後は、現在製作中のKU型中速4サイクル単筒エンジンを用いて、A重油・重質燃料層状噴射システムで、より少ないA重油割合でも安定した燃焼を得られるよう改善するとともに、燃焼室形状の最適化、空気流動制御を組合せた燃焼技術の最適化を図っていく。

本研究は、通産省、(財)石油産業活性化センターによる補助金研究の一環として行ったものであり、ここに深く感謝の意を表します。

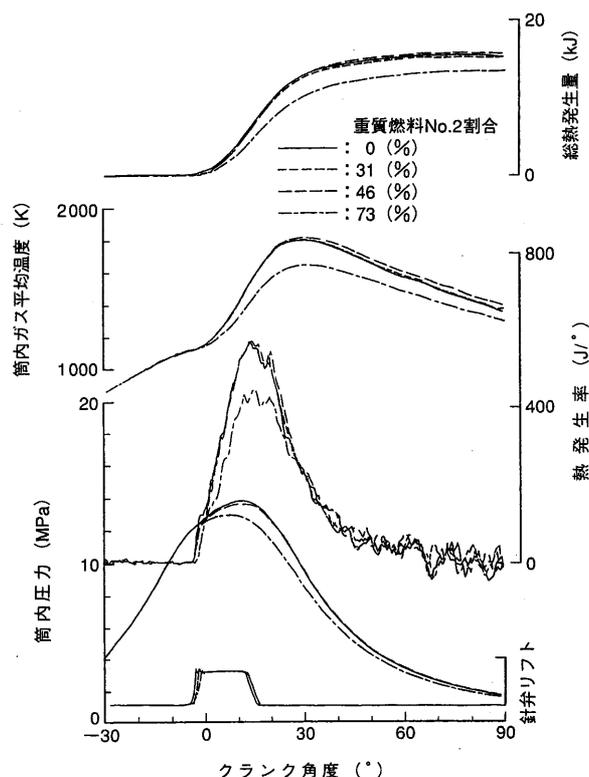


図7 層状噴射システムによる燃焼改善状況 重質燃料割合が46%以下ではA重油並みの燃焼を確保できている。
Improvement on combustion of heavy fuel oil by stratified fuel injection system

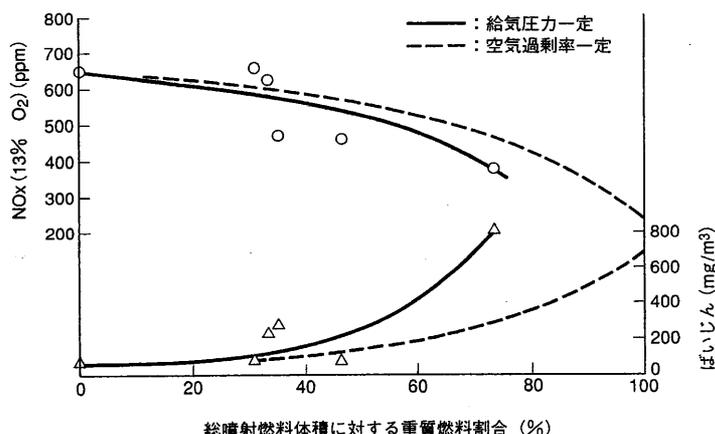


図8 重質燃料割合に対するばいじん、NOx排出量変化 重質燃料割合が50%程度まで、A重油並みのばいじん排出量に抑制できている。
Change in particulate matters and NOx by heavy fuel oil content ratio

参考文献

- (1) 野村宏次, 船用燃料の科学, 成山堂 (1994) p.144~151
- (2) 土佐陽三ほか, 燃料・水層状噴射によるディーゼル機関の低NOx燃焼研究 (その1), 日本機械学会論文集 (1992)
- (3) 土佐陽三ほか, 燃料・水層状噴射によるディーゼル機関の低NOx燃焼研究 (その2), 第10回内燃機関合同シンポジウム (1992)
- (4) Miyano, H. et al., "The Ship Test for Low-NOx by Stratified Fuel-Water Injection System", CIMAC (1993) D 24