

船用機関等の燃焼技術に関する研究（１）

松 永 直 也*

A Study on the Combustion Technology of Marine Engine (1)

Naoya Matsunaga*

１．はじめに

近年、環境問題への関心が高まり地球温暖化対策のための温室効果ガス排出削減が気候変動枠組条約で採択されたことにより、温室効果ガスである二酸化炭素の排出、燃料の燃焼に伴う大気汚染等についてはいっそう注目されている。また世界各地で起こっている自然災害や異常気象等により環境問題が身近な問題となっている。

瀬戸内海では他地域より「船舶」の利用頻度が比較的高い。このような背景から本研究では我々を取り巻く地球環境にはどのような問題があるのかを探り、瀬戸内海域において住民と密接な関係がある「船舶」からのばい煙発生、そして住民生活に関係の深い「ごみ焼却センター」のボイラーなどばい煙発生施設の燃焼技術を調査することで、大気汚染防止のため科学技術的な現在の対策を考察し、さらに我々のライフスタイルの面からも大気汚染や環境問題への対策を考え、日本の温室効果ガス削減割当量に近づく方策を考察した。

２．地球環境問題

地球環境で現在問題にされている事項にはさまざまなものがあるが、これらについてその問題事項と具体例を列挙すると次のようになる。

問題事項	具体例
１）大気汚染	酸性雨
２）地球温暖化	海面上昇，異常気象
３）土壌汚染	農産物汚染
４）海洋汚染	油流出による海洋生物の汚染
５）河川・地下水汚染	河川生物の減少 農産物の汚染
６）熱汚染	異常気象，ヒートアイランド現象
７）有害廃棄物の増加	ダイオキシン類の増加
８）熱帯雨林の減少	生物種の絶滅

- ９）砂漠化食糧生産基盤の減少
 10) 生物多様性の減少生態系の破壊

大気汚染・河川及び海洋の水質汚染等については、以前は公害問題といわれていたが、近年では環境問題といわれている。ここで注意しなければならないことは、これらの問題事項の原因を除去すれば解決するように見えても、その直接的原因の背景には社会的要因、技術的原因があり、この社会的要因が環境問題の大きな原因といえる。

また、それぞれの問題が独自で発生しているのではなく、互に関連している部分があることも環境問題の特徴である。

３．大気汚染物質

大気汚染防止法では、規制対象物質として次のものが挙げられている。

① ばい煙	硫黄酸化物 ばいじん 有害物質	二酸化硫黄 三酸化硫黄 すすなど 窒素酸化物（NOx）など カドミウム，鉛，フッ化水素，塩素，塩化水素 など	（特定有害物質） 未指定
② 粉じん	一般粉じん 特定粉じん	セメント粉，石炭粉 鉄粉など 石綿	
③ 自動車排出ガス		一酸化炭素，炭化水素，鉛，窒素酸化物など	
④ 特定物質		フェノール，ピリジン など	

そのほかこれらの発生形態，発生施設，規制基準，

規制措置等が定められている。
これらの中の「ばい煙」としては、

- ア) 燃料その他の物の燃焼に伴い発生する硫黄酸化物
イ) 燃料その他の物の燃焼又は熱源としての電気の使用に伴い発生するばいじん
ウ) 物の燃焼, 合成, 分解, その他の処理に伴い発生する物質
となっている。

4. 大気汚染の発生源

ばい煙は大気汚染物質であり, その発生源は工場などの固定発生源と自動車, 飛行機, 船舶などの移動発生源に分けることができる。この移動発生源のうちで長距離トラックを除く自動車は, 飛行機や船舶に比較してその大気汚染物質の発生が都市部に集中することから, 拡散性の面からは地域的な固定発生源と考えることができる。

ここで船舶からの排出ガスについては, 使用している燃料が飛行機と異なり, 軽油及び重油が使用されていることに注意しなければならない。船舶に使用されている軽油燃料の性状(表1)及び重油燃料の性状(表2)について調査した。

表1 軽油性状表

密度 @15	g/cm ³	0.8372
色(セーボルト)		+11
セタン指数		56.5
引火点		76.1
流動点		-7.5
目詰点		-5
動粘度 @30	mm ² /s [cSt]	3.930
残留炭素分(10%残油)質量%		0.01
硫黄分	質量%	0.037
窒素分	質量%	0.003
高位発熱量	MJ/Kg	45.8
低位発熱量	MJ/Kg	42.9

この性状から軽油燃料の中にも硫黄分, 窒素分が含まれていることがわかる。

重油燃料(外航船舶における日本積み重油燃料の性状の一例), 特に大型船舶に使用される低質重油燃料の場合には硫黄分の数値は大きくなり, 水分, 灰分, パナジウム分なども含まれている。

近年, 船舶の主機は大部分がディーゼル機関であり, 蒸気タービン機関は, 液化天然ガス(LNG)運搬船やその他少数の船舶に限られている。またガスタービン機関もあるが艦艇や一部の高速船に限られている。このような状況からディーゼル機関について考えてみることにした。

表2 重油性状表

密度 @15	kg/m ³	979.1
引火点		70以上
動粘度 @50	mm ² /s [cSt]	372
水分	wt%	0.1
硫黄分	wt%	2.65
残留炭素	wt%	11.9
灰分	wt%	0.03
バナジウム	mg/kg	74
ナトリウム	mg/kg	12
アルミニウム	mg/kg	3
シリカ	mg/kg	10

5. 船用ディーゼル機関

ディーゼル機関の燃焼はボイラーのような連続燃焼ではない。吸入・圧縮・爆発・排気の4つの行程を, クランク軸が2回転すなわち4行程で行うものが4サイクル機関, 1回転すなわち2行程で行うものが2サイクル機関であるが, いずれも燃焼は間欠的な爆発燃焼である。

空気をシリンダ内でピストンにより高压に圧縮し, シリンダ内の温度が燃料の発火点以上になったところへ燃料噴射弁から約200~300kgf/cm²の圧力で噴霧状態で噴射し, 圧縮空気の高温で自然発火させ燃料を完全燃焼し, ピストンを押し下げることでクランク軸を介して回転運動を得る。

燃料中の硫黄分はこのような燃焼によりほぼ100%硫黄酸化物に転化する。

大型ボイラーでは負荷変動によるバーナー本数の増減こそあれ連続燃焼であり, 小型ボイラーにおいても蒸気圧力変動による点火及び消火があるが, ディーゼル機関のような瞬間的な爆発燃焼ではない。

このようなディーゼル機関を搭載している船舶の一例として, 総トン数240トンの練習船『弓削丸』の船舶要目を以下に示す。

船舶要目

全長	40.00m
幅	8.00m
主機関(ディーゼル機関)	
DAIHATSU 6DLM-24SL	1SET
シリンダ数	6
シリンダ径	240mm
行程	320mm
出力(MCR)	1300PS (956KW)
回転数	750rpm

燃料消費率	152g/ps・h
使用燃料	軽油
燃料噴射圧力	300kgf/cm ²

ディーゼル発電機原動機

YANMAR 6 LAAL - DTN 2 SET

シリンダ数	6
シリンダ径	148mm
行程	165mm
出力	300PS (220KW)
回転数	1200rpm
使用燃料	軽油
燃料噴射圧力	220kgf/cm ²

非常用空気圧縮機用原動機(ディーゼル機関)

YANMAR NF60

シリンダ数	1
シリンダ径	75mm
行程	80mm
出力	4.0PS (2.9KW)
回転数	2000rpm
使用燃料	軽油

通常航海中、使用するディーゼル機関としては、主機関及びディーゼル発電機であるが、設備としては非常用空気圧縮機(ディーゼル機関駆動)も設置されている。

また、外航船舶の場合は燃料の供給地が日本であることは稀であり、多くの場合供給地は外国である。

不定期船においては燃料の積み込み地は毎回異なることも珍しくなく、燃料の性状が一定であるとは考えにくいのも現状である。

6. 舶用ディーゼル機関 排気ガス分析

船舶の一例としてあげた240トンの練習船において、排気ガス分析計を用いて主機関からの排気ガスの酸素濃度等を測定した。使用燃料は軽油である。

使用機器はホダカテスト社製 testo33(分析計)及び testo339(排ガス前処理装置)を使用した。

主機関の運転状態はいずれも常用出力703KWである。

排気ガス分析結果

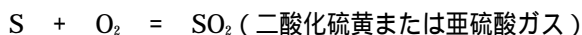
	1回目	2回目	3回目
排気ガス温度	346.3	349.3	343.9
O ₂ 濃度 %	13.5	13.3	13.5
ドラフト圧力 hPa	8.5	8.71	8.68

上記分析結果の中で、O₂濃度をみると一般に低空気比燃焼を行っているボイラーに比べ、排気ガス中のO₂濃度が高いことがわかる。このことから、燃料中の硫黄分

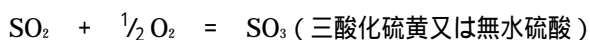
や窒素分、それに大気中の窒素分等により酸化物を生成する可能性があることがわかる。

7. 硫黄酸化物の生成

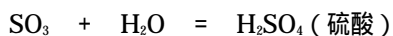
使用する燃料の中に硫黄分があれば、燃焼により必ず硫黄酸化物 SO_x は発生する。燃料中の硫黄分は亜硫酸ガスになる。



更に、燃焼ガス中に過剰な酸素 O が存在すれば



無水硫酸は水分を吸着しやすいから、ガス温度が露点以下に下がると水蒸気と化合して



となり、硫酸が発生することとなる。大気汚染に関連しては燃焼ガス中の SO_x は大部分が SO₂ であるが煙突から排出されると、大気中の酸素で酸化されて SO₃ となることで更に水蒸気と化合して硫酸が生成する。これが酸性雨となり地球環境を破壊することになる。

8. 硫黄酸化物抑制対策

硫黄酸化物による大気汚染の防止方法には次のような対策が考えられる。

- 1) 硫黄含有量の少ない燃料を使用する。
- 2) 排気ガス中の SO_x を除去する。

硫黄含有量の少ない燃料として天然ガスが注目されている。

① 気体燃料

硫黄分の少ない燃料すなわちメタンなどの天然ガスやプロパンガスはクリーン燃料ということで使用量が大幅に増加している。日本では天然ガスを液化したいわゆる LNG (Liquefied Natural Gas) として、インドネシアをはじめとする世界各国から専用の LNG 運搬船を用いて輸入しており、都市ガスやボイラー燃料として多く用いられている。

② 液体燃料

液体燃料について見てみると原油中の硫黄分は産出地域や油田によって様々であり、輸入量の多くを占める中近東産は硫黄分が高く1~3%であるといわれる(サウジアラビア産アラビアンナイトは、約1.7%)。

米国産は0.7~0.9%, インドネシア産のミナス原油は、ろう分が高く常温では固まってしまうため加熱しながらの輸送となるが、硫黄分は低く約0.1%である。

火力発電所などでは、低硫黄分の燃料が使用されているが、さらに重油を脱硫して低硫黄重油とすることが広範囲に行われている。

この重油の脱硫には水素を添加して、触媒を利用することで硫黄分を硫化水素として除去するもので、間接脱硫法と直接脱硫法がある。

排煙脱硫

排気ガス中のSO_xを除去するいわゆる排煙脱硫は、燃焼室出口から煙突出口の間で硫黄酸化物を除去する方法で種々の方式があり、湿式、半乾式及び乾式に大別されるが日本で実用化されているものの大部分は湿式である。

その中で設置数の多いものは、アルカリ溶液及びアルカリスラリーを吸着剤とするものである。

湿式の脱硫プロセスと副産物を列挙すると、

- ① 石灰スラリー吸収法
(石灰石 石こう法)石こう
 - ② 水酸化マグネシウムスラリー吸収法.....SO₂, 石こう
 - ③ アルカリ溶液吸収法硫酸アンモニウム
 - ④ ダブルアルカリ法石こう
 - ⑤ 酸化吸収法石こう
- などがあげられる。

一般には吸収剤として石灰を利用し、石こうを回収する方法が多用されている。石灰を含む水溶液で排気ガスを洗浄する方法であり、石灰は容易に入手することができ簡易で効率的であり、副産品の石こうは建材にも利用でき経済的である。

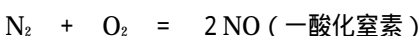
湿式の欠点としては排気ガスを洗浄することでガス温度が低下し、大気への拡散が悪くなることである。その対策として装置入口のガスで出口のガスを再加熱し大気への拡散が悪くならないように手段が講じられている。

石炭などの固形燃料が利用されている流動層燃焼方式では、炉内の流動層に燃料を供給する際同時に生石灰を供給することで炉内脱硫が可能であることが特長である。

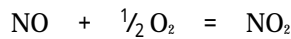
9. 窒素酸化物の生成

窒素酸化物は燃料の燃焼によって発生するものである。燃料や空気に含まれている窒素分が酸化し、主として一酸化窒素(NO)と二酸化窒素(NO₂)が発生し、これらを総称してNO_xと呼んでいる。このNO_xのうち90%以上がNOである。

燃料が燃焼し高温が発生すると、燃料中の窒素化合物や空気中の窒素ガスが酸素と化合してNOとなる。



これが更に酸素に酸化されると、



排気ガス中のNO_xはほとんどがNOであるが煙突から排出されると大気中の酸素で酸化されてNO₂になる。これが大気中の水分に溶けて酸性雨の原因にもなるという。

燃料が燃焼して生成するNO_xは、燃料中の窒素分に起因するFuel NO_xと、空気中の窒素(N₂)に起因するThermal NO_xに分類されている。

それぞれの発生起因を簡単にまとめると、

Fuel NO_x燃料中のN化合物が多いほど多く発生する。

Fuel NO_x, Thermal NO_x 双方とも
.....燃焼温度が高い。
高温域の滞留時間が長い。
燃焼域でのO₂濃度が高い。

等の条件で発生量が多くなる。

10. 窒素酸化物(NO_x)抑制対策

窒素分の少ない天然ガスはメタンが主成分で、これを使用すればFuel NO_xはほとんど発生せず、Thermal NO_xが主体となる。

NO_x対策から見ると窒素分の少ない天然ガス等を使用することが有利であるが、液体燃料には窒素分も含まれており、また燃料の脱窒素が一般には行われていない。これらの背景から、燃焼技術において窒素酸化物(NO_x)を抑制することが必要となる。

・・・燃焼技術による窒素酸化物(NO_x)の抑制・・・

これには発生起因を取り除けばよいことになるから、次のような抑制策を考えることができる。

- ① 燃焼域での酸素濃度を低くする。
- ② 燃焼温度を低くし、局所的な高温域をなくす。
- ③ 高温部での燃焼ガスの滞留時間を短くする。

新設の設備ならどのような対策でも施せるが、既存設備においては運転条件を変更することでしか対処できないのも現状といえよう。そこでまず運転条件の変更による方法を次に示した。

運転条件の変更による方法

1. 低空気比燃焼

燃料を完全燃焼させるための最小限度の空気量(理論空気量)に近い空気比で燃焼を行うことで、窒素分の酸化を抑制する方法である。この方法は熱効率向上

にも適しているが、空気比を下げすぎるとすすが発生しやすくなる。

2. 燃焼室熱負荷の低減

燃焼室単位容積当りの(燃料の発熱量+燃焼用空気の持込熱量)を燃焼室熱負荷というが、これを低減させると炉内温度及び火炎温度が下がり、窒素酸化物(NOx)生成量も減少する。この場合、大型設備(ボイラー)での低負荷運転ということになってしまう。

3. 空気予熱温度の低下

燃焼用空気の予熱は燃焼温度に直接影響を与えることになり、予熱温度を下げることにより窒素酸化物(NOx)の発生を抑制できるが、熱効率を低下させることになってしまう。

燃焼装置改造による方法

これには燃焼の際に生ずる窒素酸化物(NOx)をより少なくする抑制燃焼法と、生成してしまった窒素酸化物を燃料の還元性を利用して炉内で窒素に還元しようとする炉内脱硝燃焼法に分けることができる。

1. NOx 抑制燃焼法

この方法には

① 非平衡燃焼法

燃料と空気の混合状態を作意的に燃料過剰領域と空気過剰領域を作って燃焼する。

② 火炎冷却燃焼

火炎中に蒸気や水を吹き込んだり表面積の大きい火炎を作ることで被加熱物に早く熱を与え火炎を冷却する。

③ 排ガス再循環法

燃焼排ガスの一部を噴射燃料中や空気に再循環して燃焼することで燃焼ガスの容積を増し、火炎の温度を低くすることでNOxの生成を少なくする。

がある。

以上の燃焼法の中で①の非平衡燃焼法を取り上げどのような方法か調べてみた。

空気比とNOx生成量の関係では、NOx生成量は空気比を増すにつれて増加し、燃焼性から適切と思われる空気比の付近で生成量がピークとなり、それを超えると減少に転ずるといった特性がある。非平衡燃焼法はこの特性を利用したものである。

適切な空気比で燃焼する火炎中に空気比の高い領域と低い領域を故意に作り、NOx生成を抑制しようとするものである。この領域の作り方によって空気二段燃焼法とバイアス燃焼法がある。

空気二段燃焼法 燃焼用空気を一次、二次に分割して供給する燃焼法で、火炎の燃焼進行方向に低空気領域と高空気領域が存在する。

バイアス燃焼法 2本のバーナーのうち片方で低空気比燃焼させ、もう一方のバーナーでは高空気比燃焼させることで、全体として適正な空気比で運転しようとするものである。空気比の高低領域配分によって空気側バイアス燃焼法と燃料側バイアス燃焼法がある。

11. 考察及びまとめ

大気汚染については環境問題と密接にかかわっており、直接的な原因だけでなく社会的要因こそが環境問題であるといえる。

地域住民と密接な関係がある「ごみ焼却センター」を考えると、燃焼温度のコントロールを試みた場合、焼却物の性状が均一なら何ら問題は無いと考えられるが、焼却物の性状が均一でない、つまり焼却物の分別が不十分な場合、予期していた以上の発熱量が発生すると炉内の燃焼温度が上昇し、局所的な高温となればThermal NOxが発生する要因となってしまうことになる。このような例から考えた場合、注水等により燃焼温度をコントロールすることも考えられるが、注水によりこの状況を回避するには設備面及び技術面での外乱に対する余裕弾力性が求められることになる。

設備面での大型化・集約化は余裕弾力性をつけることができるが、ごみの輸送コスト上昇にもなりまた、トラック等の輸送手段から排気ガス排出量を増加させることにつながる。

これらのことから焼却センターにおいては、焼却物の分別回収がもっとも重要であると考えられる。それとともにリサイクル可能物品については更に積極的なリサイクル推進が必要であると思われる。

船舶の場合、ディーゼル機関はその機構から空気過剰の状態で燃焼させることになる。

燃料中に硫黄分がある場合は、生成した硫黄酸化物を煙道中で中和させるための中和剤投入が必要となる。窒素酸化物(NOx)に対しては、水を混合するエマルジョン燃料を使用したりすることで燃焼温度を低下させ、窒素酸化物を減少させることが考えられる。

舶用ディーゼル機関におけるばいじんについては、船舶の入港及び出港時の操船において、固定ピッチプロペラ推進器の船舶では、起動・停止を繰り返すことで操船を行うことになる。この場合黒煙を発生させやすいため、可変ピッチプロペラ推進器を採用することで主機関の起動・停止をなくし、出入港時の黒煙の発生を減少させることができるものと考えられる。

12. 参考文献

- 1) 二訂 大気汚染対策の基礎知識, 平成13年10月30日
発行
編集: 環境保全対策研究会, 発行: 社団法人産業環境管理協会
- 2) 五訂 公害防止の技術と法規 大気編 平成13年6月20日 3版
監修: 通商産業省環境立地局, 発行所: 社団法人産業環境管理協会
- 3) 燃料および燃焼(改訂版) 平成7年8月20日発行
発行所: 社団法人日本ボイラ協会
- 4) ボイラーにおける最近の燃焼技術
発行所: 社団法人日本ボイラ協会
- 5) ボイラーの燃焼と周辺技術の動向
発行所: 社団法人日本ボイラ協会
- 6) 新版 ボイラー便覧 平成9年12月30日発行
日本ボイラ協会編 発行所: 丸善株式会社
- 7) 新訂エネルギー管理技術 熱管理編 平成15年3月17日発行
編者/発行所: 財団法人省エネルギーセンター
- 8) 燃焼生成物の発生と抑制技術 平成9年4月27日発行
発行所: 株式会社テクノシステム 監修: 新井紀男
- 9) テクノライフ選書 燃える 平成6年3月28日発行
発行者: オーム社 著者: 新岡 崇