

# 港内において船舶から排出される大気汚染物質の特性評価

前田和幸\*<sup>1</sup>・津田 稔\*<sup>1</sup>・小松和也\*<sup>2</sup>・一瀬純弥\*<sup>3</sup>

## Evaluation of Exhaust Emissions from Ships in the Harbor

Kazuyuki Maeda\*<sup>1</sup>, Minoru Tsuda\*<sup>1</sup>, Kazuya Komatsu\*<sup>2</sup>,  
and Jyunya Ichinose\*<sup>3</sup>

In order to clarify the characteristics of exhaust emissions from marine diesel engines and ships in the harbor, and discuss the method of reducing the emissions, CO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>/PM emissions, ship speed, engine output, indicator diagram, etc. were examined by using 2342GT/2795kW and 1020GT/1618kW ships equipped with controllable pitch propeller. In addition, cylinder gas temperature and heat release rate were calculated from the indicator diagram to analyze the relationship between exhaust emissions and combustion. The results obtained from the examinations are as follows: (1) CO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> emissions from the main engines increase with increasing the engine load at both arrival and departure conditions; (2) PM emissions from the main engines at departure condition larger than arrival condition; (3) CO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>/PM emissions from the generator engines increase with increasing engine load at both starting and running conditions; (4) It is effective to reduce the emissions to reduce the ship speed in the harbor; (5) As almost emissions in the harbor are emitted from generator engine, countermeasure to the engines are more effective to reduce the emissions in the harbor.

### 1 まえがき

船舶から排出される大気汚染物質には、地球温暖化の原因とされるCO<sub>2</sub>（二酸化炭素）、酸性雨の原因とされるNO<sub>x</sub>（窒素酸化物）やSO<sub>x</sub>（硫黄酸化物）、人体に直接悪影響を及ぼすPM（粒子状物質）などがある。これらの物質は、陸上の工場や自動車等においては厳しい規制がなされているが、船舶においても2000年以降に建造される船舶の130kW以上のエンジンを対象としたIMO（国際海事機関）による規制<sup>1)</sup>がなされつつある。これに対し、船用ディーゼル機関や航行中の船舶から排出される大気汚染物質の低減に関する研究が行われている<sup>2~6)</sup>が、近年の調査によれば、大気汚染に対する船舶の寄与割合は大きく<sup>7)</sup>、特に港内や狭水道等、船舶が密集する海域において特にこの傾向が強いようである。このため、東京湾や大阪湾における排出実態調査等が行われているが、いずれも船舶の運航実態や燃料消費量による推計で、実際の船舶を用いた港内航行

中における排出実態に関する報告は少ない。

そこで本研究では、まず、水産大学の練習船耕洋丸と天鷹丸を用いて、港内での出・入港時および停泊中において4サイクル主機関と2サイクル主機関および4サイクル発電機関から排出される大気汚染物質（CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM）の排出特性を明らかにした。次に、指圧線図による燃焼解析を行い、その生成機構と低減方法についての検討を行った。さらに、港内における大気汚染物質の排出実態を明らかにするとともに低減の指針を示した。

### 2 実験装置と方法

表1に、実験に用いた2隻の船舶の主要目を示す。表に示すように、練習船耕洋丸の主機関は中形低速2サイクルディーゼル機関で練習船天鷹丸の主機関は中形低速4サイクルディーゼル機関である。また発電機関は両船とも小形中速4サイクルディーゼル機関である。

2002年11月8日受付. Received Nov. 8. 2002.

\* 1 水産大学校 海洋機械工学科 (Department of Ocean Mechanical Engineering, National Fisheries University).

\* 2 水産大学校練習船 天鷹丸 (Training Ship Tenyo-Marui, National Fisheries University).

\* 3 水産大学校練習船 耕洋丸 (Training Ship Koyo-marui, National Fisheries University).

図1に排ガス分析ラインの概要を示す。図に示すように、煙道の途中に先端を45度の角度にカットしたサンプリングプローブをガスの流れ方向に向けて差し込み、排ガスがサンプリング管を通して排ガス分析装置および希釈トンネルに入るようにした。サンプリング管はフレキシブルヒーターと保温材により加熱・保温し、排ガス分析装置および希釈トンネル入口部の排ガス温度が120°C以上になるようにした。NO<sub>x</sub>、O<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>濃度は排ガス分析装置で計測し、PMは分流式希釈トンネルによりフィルター上に捕集した。希釈トンネルに導いた排ガスは25±1°Cに温度調整した清浄な希釈空気により温度が52°C以下になるように希釈し、希釈率は希釈前後のNO<sub>x</sub>とCO<sub>2</sub>濃度から算出した。希釈率は希釈空気の圧力を調整することにより5前後に保つようにした。PMの質量は、実験前後において温度22°C、相対湿度50%に設定した状態で20~80時間静置後、精密天秤により測定したフィルターの質量差とした。

実験は、まず主機関の出港時（起動時、エンジン各部の温度が機関室温度に近い状態から徐々に温度が上昇する場合：以後、これを冷態時と記す）と入港時（航海中、エンジン各部の温度が十分高い状態から徐々に低下する場合：以後、これを温態時と記す）における大気汚染物質の排出特性を明らかにするために、夏の日本海において海上が平穏な時期を選んで行った。耕洋丸の出港時における計測は、青森港で3日間停泊後機関回転数を通常の出港に用いる値（145rpm）に設定し、翼角度を変更することにより主機関

Table 1. Principal Specifications

Ship's Name	Koyo Maru	Tenyo Maru
Main Engine		
Type	6 UET 45/75C	6 ELS-32
Output	kW 2795	1618
Engine speed	rpm 230	280
Pme	MPa 1.02	2.25
Bore	mm 450	320
Stroke	mm 750	640
Generator Engine		
Type	6 UAL-UT	S165L-DT
Output	kW 544	309
Engine speed	rpm 900	1200
Pme	MPa 1.60	1.15
Bore	mm 200	165
Stroke	mm 240	210

Table 2. Fuel Properties

Fuel Properties		Koyo Maru	Tenyo Maru
Density	(g/cm <sup>3</sup> )	0.8638	0.8599
Kinematic Viscosity	(mm <sup>2</sup> /s)	2.80(50°C)	2.45(50°C)
Flash Point	(°C)	70.0	68.0
Constituent	C (mass%)	86.6	86.5
	H (mass%)	12.6	12.6
	S (mass%)	0.59	0.44
	N (mass%)	0.033	—
Residual Carbon	(mass%)	0.28	0.33

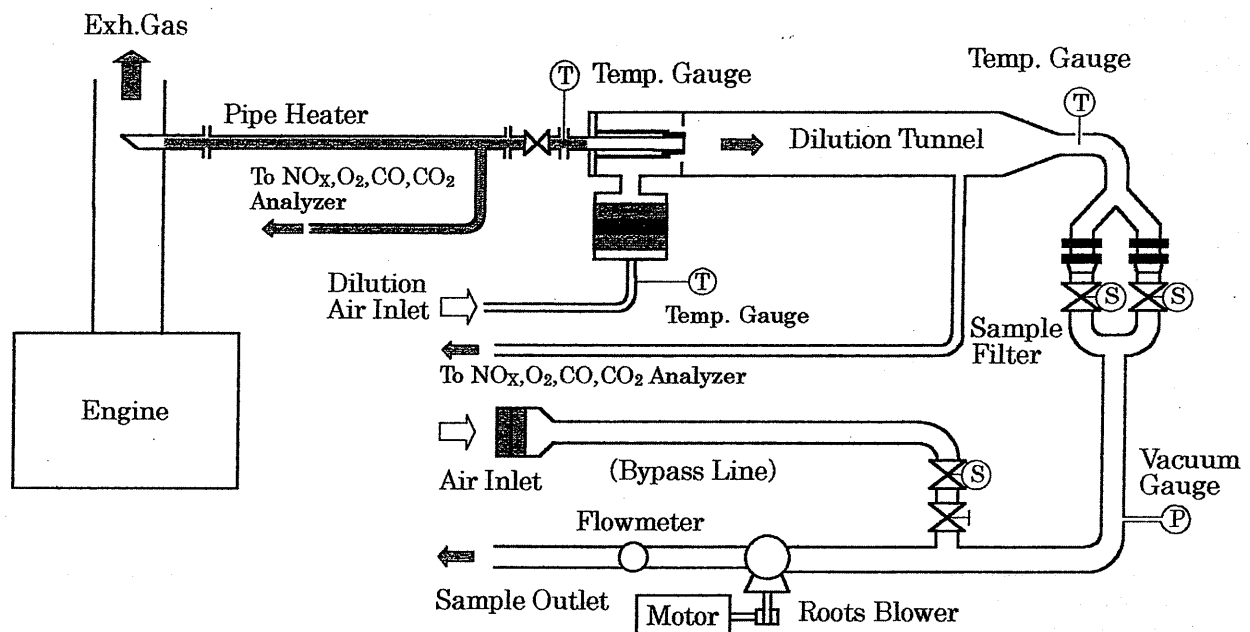


Fig. 1. Measuring System of Exhaust Emissions.

の負荷率と船速を変化させ、それぞれの状態における大気汚染物質の計測実験を行った。また、入港時における計測は、青森港を出港後常用負荷付近で約5時間航行した後、北海道沖において機関回転数を通常の入港に用いる値(145rpm)に設定し、翼角度を変更することにより主機関の負荷率と船速を変化させ、それぞれの状態における大気汚染物質の計測実験を行った。天鷹丸の出港時における計測は、秋田沖で12時間漂流後耕洋丸と同様な実験を行った。また、入港時における計測は、秋田沖において常用負荷付近で約5時間航行した後耕洋丸と同様な実験を行った。

次に、発電機関の起動時、運転時および停止時における大気汚染物質の排出特性を明らかにするために、両船舶の発電機関を2日間停止および運転後に負荷率0~50%における大気汚染物質の計測を行った。なお、発電機関においても、停止から負荷率を上昇させた場合を冷態時、通常運転時から負荷率を減少させた場合を温態時と記す。

燃料は市販のA重油を用いた。表2に供試燃料油の性状を示す。

### 3 実験結果

図2に、出・入港時における耕洋丸と天鷹丸の船の速度(以後、船速と記す)と主機関の負荷率との関係を示す。本研究に用いた2隻の船舶は可変ピッチプロペラを備えており、出・入港時においては回転数を一定とし、翼角度を変えることにより船速を変化させるが、港内においては安全上一般に最大船速を11ノット付近に設定して航行する場合が多い。図2より両船とも11ノット付近における負荷率

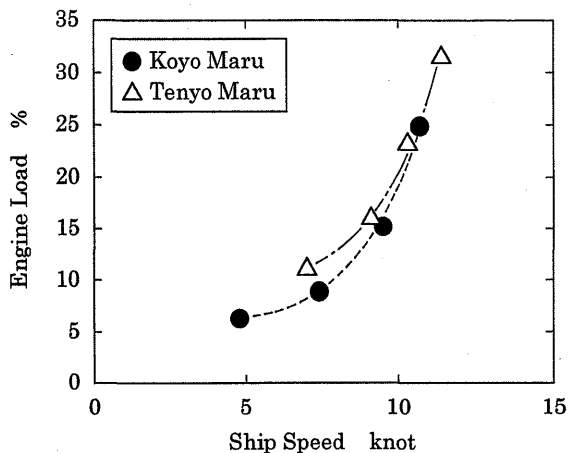


Fig. 2. Relationship Between Ship Speed and Engine Load.

は約25%となっている。離岸・接岸時においてはこれよりも低速運航となり主機関の負荷率は更に低下するため、本研究では主機関の最大負荷率を30%付近とした。

図3に、両船における負荷率と単位時間当たりのCO<sub>2</sub>排出量の関係を示す。図において白抜き符号は主機関および発電機関の冷態時を示し、黒く塗りつぶした符号は温態時を示す。両機関において冷態時と温態時における差はほとんど見られない。CO<sub>2</sub>は燃料中の炭素分の燃焼によって生成され、表2に示すように、燃料油中には約86%の炭素分を含むため燃料油1kgの燃焼により約3.15kgのCO<sub>2</sub>が生成される。このことより、一般に出力の大きいエンジンは多量の燃料を消費するためCO<sub>2</sub>排出量が多いといえる。表1において、両船の主機関と発電機関の連続最大出力を比較すると、いずれも主機関が発電機関の約5倍となっているが、図3(a),(b)において主機関は発電機関の約4倍のCO<sub>2</sub>を排出している。これは、主機関の燃料消費率が発電機関に比べて低いためである。

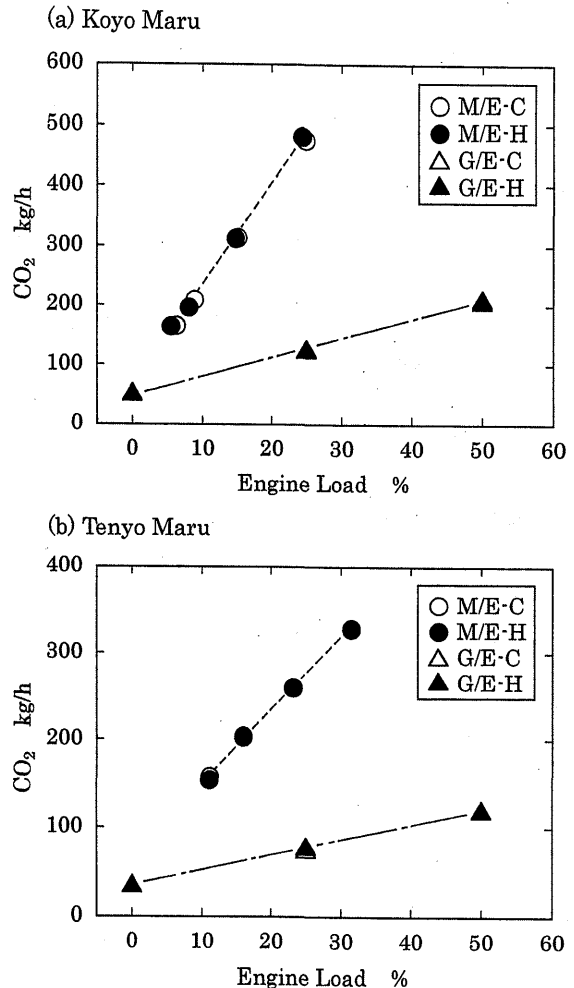


Fig. 3. Relationship Between Engine Load and CO<sub>2</sub>.

図4に、両船における負荷率と単位時間当たりの $\text{NO}_x$ 排出量の関係を示す。まず負荷率と $\text{NO}_x$ 排出量については、図4(a)耕洋丸の負荷率25%付近において主機関から排出される $\text{NO}_x$ は発電機関の約4倍となっており、 $\text{CO}_2$ 排出量の割合とほぼ等しい。これに対し、図4(b)天鷹丸の負荷率25%付近において主機関から排出される $\text{NO}_x$ は発電機関の約8倍の値を示している。これは、天鷹丸主機関は出力の割に多量の $\text{NO}_x$ を排出していることを示している。次に冷態時と温態時とを比較すると、耕洋丸の主機関では同一負荷率における $\text{NO}_x$ 排出量は温態時のほうが多くなっている。しかし、耕洋丸の発電機関および天鷹丸の主機関、発電機関においては冷態時と温態時に大きな違いは見られない。これは、耕洋丸の主機関が発電機関や天鷹丸の主・発電機関に比べ大型であるため燃焼室が暖まりにくいのに加え燃料噴射圧力も低いいため、冷態時に不完全燃焼が起

り易くなり $\text{NO}_x$ の生成が抑えられたためと思われる。

図5に、両船における負荷率と単位時間当たりのPM排出量の関係を示す。まず負荷率とPM排出量については、図5(a)、(b)の負荷率25%付近において主機関から排出されるPMは発電機関の約4倍となっており、 $\text{CO}_2$ 排出量の割合とほぼ等しい。次に冷態時と温態時とを比較すると、両船における主機関と発電機関の同一負荷率におけるPM排出量は冷態時のほうが多くなっており、特に耕洋丸の主機関においてはこの傾向が顕著である。これは、起動時は燃焼室や冷却水の温度が低いため着火遅れ期間が長くなり、噴霧が着火前にピストン頂面やシリンダ壁に到達し、燃料が不完全燃焼したり未燃の状態では排ガスに混入するためと考えられる。また、耕洋丸においては、エンジンの起動時にシリンダ注油器により強制注油を行うため、シリンダ壁付近に達した火炎がこの潤滑油の蒸発を促進するため、更

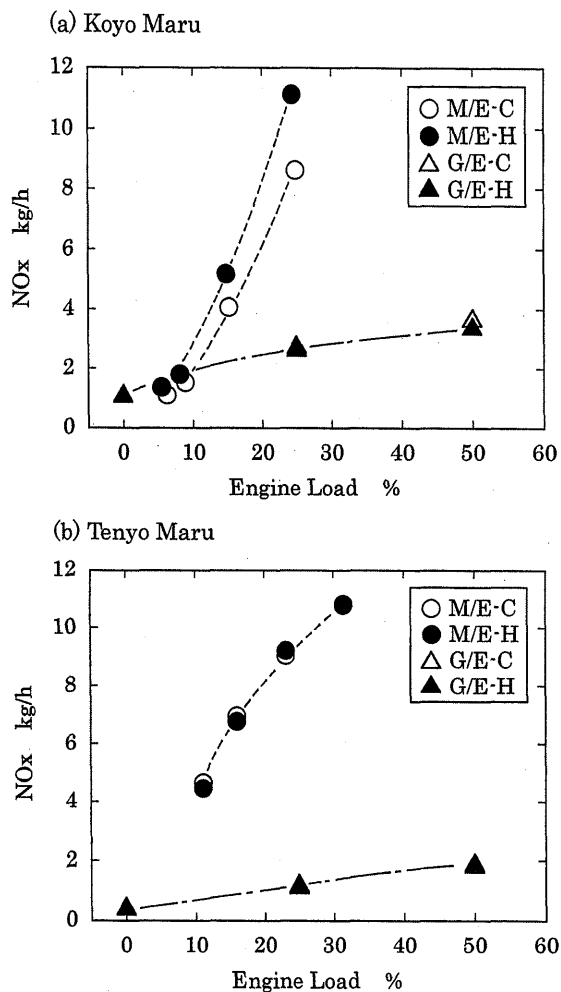


Fig. 4. Relationship Between Engine Load and  $\text{NO}_x$ .

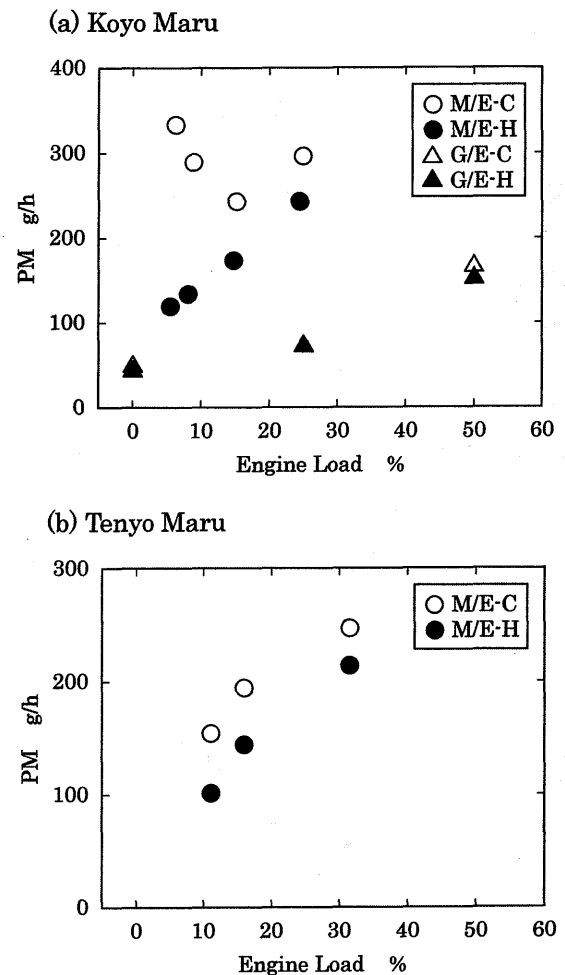


Fig. 5. Relationship Between Engine Load and PM.

にPMの量が増加するものと考えられる。

#### 4 結果の考察

前章において、船舶が港内を航行したり停泊する際の大気汚染物質の排出特性を明らかにしたが、本章ではこの結果について考察するとともにその低減方法について検討す

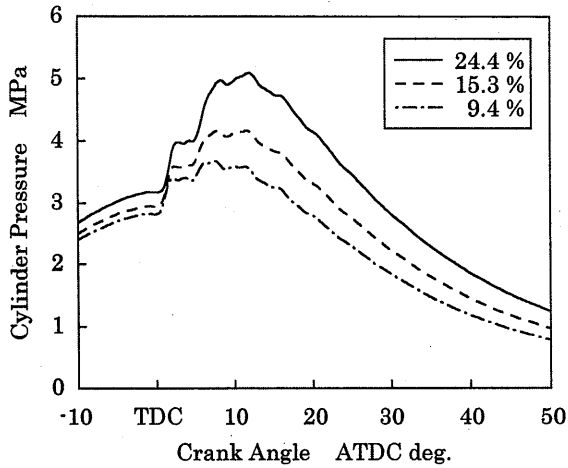


Fig. 6. Indicator diagram.

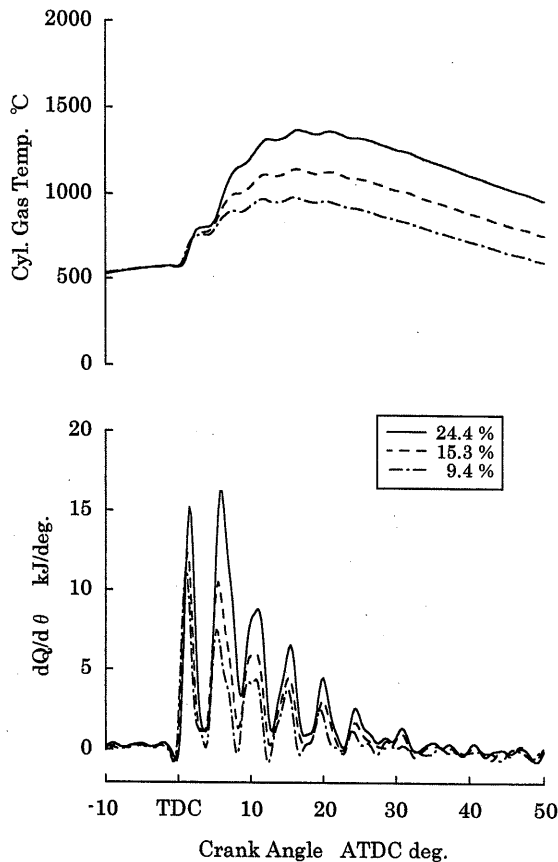


Fig. 7. Rate of Heat Release and Cylinder Gas Temperature.

る。

#### 4.1 大気汚染物質の生成と低減方法

CO<sub>2</sub>は、先に述べたように、燃料中の炭素分の燃焼により生成され排出量は燃料消費量に比例するため、同一船舶においては負荷率を低くすることによりエンジンから排出されるCO<sub>2</sub>を低減できる。主機関の負荷率を低くすると船速が低下し航行時間が長くなるが、図2で示したように、負荷率の低下に対する船速の低下割合は小さいため、港内航行中に船舶から排出されるCO<sub>2</sub>の総量は少なくなる。また、発電機関の場合は停泊中の運転機器を極力少なくすることにより負荷率が低下し、CO<sub>2</sub>の排出量を少なくすることができる。

NO<sub>x</sub>には、シリンダ内で燃料が燃焼する際、火炎の高温部において空気中の窒素と酸素が結合して生成されるThermal NO<sub>x</sub>と、燃料油中の窒素分の燃焼により生成されるFuel NO<sub>x</sub>がある。図4においてNO<sub>x</sub>は負荷率の増加とともに増大したが、この理由について検討する。図6に、耕洋丸における負荷率の変化による指圧線図の変化を示す。なお、この図は各負荷率における150サイクルの平均である。図7に、この指圧線図より算出した熱発生率とシリンダ内平均ガス温度を示す。図において機関回転数が一定であるので噴射時期もほぼ一定と考えると、負荷率の変化に対する着火遅れ期間の変化は小さいので予混合燃焼域における熱発生量はほぼ同じである。しかし、負荷率の増加とともに燃焼期間が長くなり、拡散燃焼域における熱発生量が増加するためシリンダ内圧力が増加するとともに、シリンダ内平均ガス温度の最大値も高くなっている。Thermal NO<sub>x</sub>の生成に直接影響を与える因子として局

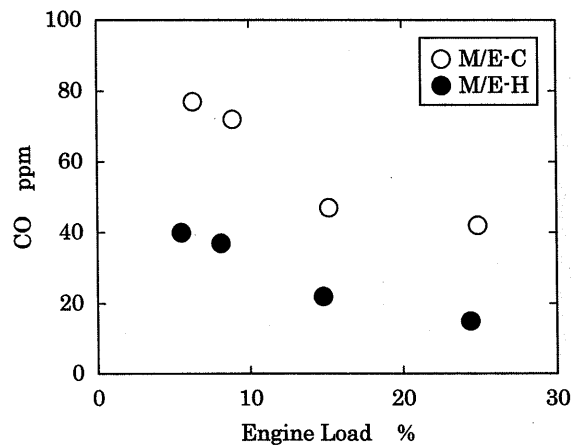


Fig. 8. Relationship Between Engine Load and CO (Koyo Maru).

部分的な温度と燃焼の持続時間が挙げられる。指圧線図から算出したシリンダ内平均ガス温度は高温の火災および既燃ガスと圧縮温度に近い周囲の空気との平均温度であるので、この平均温度が高いほどシリンダ内において高温の火災および既燃ガスの占める割合が大きいものと考えられる。このシリンダ内平均ガス温度は急激には変化せず緩やかな山形となるので、この最大値が高いほど高温部分の持続期間も長いので、Thermal NO<sub>x</sub>の生成量が増加するものと考えられる。また、負荷率の増加とともに燃料消費量も増大するため、Fuel NO<sub>x</sub>の生成量も増加する。このように、NO<sub>x</sub>排出量は負荷率の増加とともに増大するため、港内における排出量を低減するためにはCO<sub>2</sub>と同様な対策が有効である。

PMは、燃料油や潤滑油の不完全燃焼成分や未燃成分、燃料油中に含まれる硫黄分に起因するサルフェートと結合水等から構成される。図8に耕洋丸における負荷率とCO濃度の関係を示す。この図において、CO濃度は高負荷域よりも低負荷域のほうが高く、温態時よりも冷態時のほうが高い。このことから、低負荷域や冷態時においては不完

全燃焼に起因するPMが多く排出されるものと思われる。負荷率の増加とともに、図7に示したように、シリンダ内平均ガス温度が上昇すると潤滑油の蒸発が促進され、未燃の潤滑油に起因するPMが増加するものと思われる。また、燃料消費量が増加するとサルフェートと結合水の排出量も増加する。このように、PM排出量も負荷率の増加とともに増大するため、港内における排出量を低減するためにはCO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>と同様な対策が有効である。また、比較的大形のエンジンにおいては起動時の低負荷域において特にPM排出量が多くなるため、これを低減するための対策が必要になる。

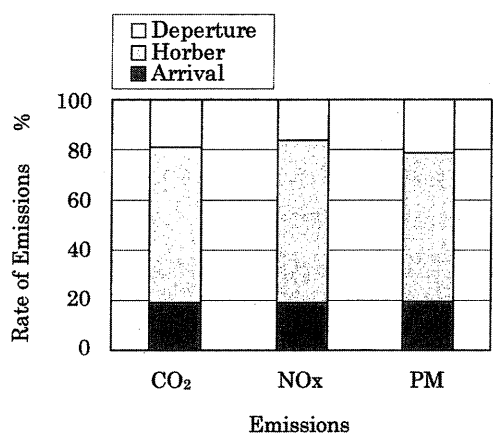
## 4.2 港内における大気汚染物質の低減

港内において主機関は着岸時と離岸時に使用されるのみであるが、発電機関は停泊中も稼動し続ける。図9に港内に1日停泊した場合の大気汚染物質の排出量を示す。図の総排出量は、出・入港時の各々において主機関は船速11ノットで1時間航行するものとし、発電機関は主機関運転中は100%負荷（スタンバイ時に2台の発電機を各50%で運転）、停泊中は常時25%負荷で24時間運転したものとして計算した。図3～5に示したように、同一負荷率においては主機関のほうが大気汚染物質の排出量が多いが、図2に示したように港内においては主機関の負荷率が小さくなるとともに使用時間も短いため、総量は少ない。これに対し、発電機関は出・入港時においては使用する機器の数が増加するため負荷率が増加する。また、停泊時も連続運転となるため総量は多くなり、図9に示すように、港内で船舶から排出される大気汚染物質の大部分は発電機関から排出されていることが分かる。なお、出・入港に要する時間が図9に示した条件より短いほど、停泊日数が長いほど発電機関の寄与割合は大きくなる。このことから、港内における大気汚染物質の排出量を低減するためには、停泊中に陸上電源に切り替える等、発電機関に対する対策が有効であるといえる。

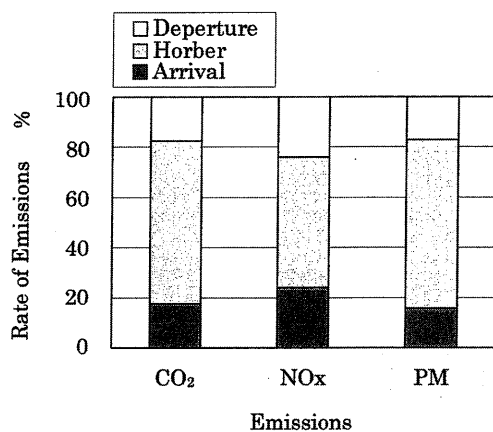
## 5 まとめ

港内において船舶から排出される大気汚染物質の排出特性を明らかにするとともに、その生成機構と低減策について検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 主機関から排出されるCO<sub>2</sub>とNO<sub>x</sub>の単位時間当たりの排出量は負荷率の増加とともに増大し、出港時（冷態時）と入港時（温態時）における差は少ない。



(a) Koyo Maru



(b) Tenyo Maru

Fig. 9. Emissions in Port.

- (2) 主機関から排出されるPMの単位時間当たりの排出量は入港時(温態時)においては負荷率の増加とともに増大するが、出港時(冷態時)における排出量は入港時(温態時)よりも多く、低速2サイクル機関においてはこの傾向が顕著となる。
- (3) 発電機関から排出されるCO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PMの単位時間当たりの排出量は負荷率の増加とともに増大し、起動時(冷態時)と運転・停止時(温態時)における差は少ない。
- (4) 港内において船速を通常よりも抑えて運航することにより、船舶から排出される大気汚染物質を低減できる。
- (5) 港内において排出される大気汚染物質の大部分は発電機関から排出される。これを低減するためには、停泊中に運転機器を極力少なくするとともに、陸上電源に切り替える等、発電機関に対する低減策が重要となる。
- 最後に、本研究に際しご協力頂いた耕洋丸(船長:長友洪太氏)と天鷹丸(船長:貞包弘之氏)の乗組員諸氏に謝意を表します。

## 文 献

- 1) ㈱日本海事協会: 船用ディーゼル機関からのNO<sub>x</sub>排出規制に関するテクニカルコード, ㈱日本海事協会, 東京, 1988, pp.1-231.
- 2) K.Mollenhauer, D.Mooser, G.W.Israel, and H. Klingenberg: MTZ, 56(10), 602 - 606(1995).
- 3) F.Fleischer, E.J.Ulrich, R.Krapp, and W.Grundmann: 22nd CIMAC, 1455 - 1463 (1998).
- 4) 秋本成太: 日本マリンエンジニアリング学会誌, 36, 340-344(2001).
- 5) 近藤博美: 日本マリンエンジニアリング学会誌, 36, 949-955(2001).
- 6) K.Maeda, K.Takasaki, T.Kirihata, and M. Tsuda: 23rd CIMAC, 562 - 569(2001).
- 7) シップアンドオーシャン財団: 船舶排ガスの地球環境への影響と防止技術の調査報告書, シップアンドオーシャン財団, 東京, 1999.