船舶運航条件が亜酸化窒素排出に及ぼす影響*

柳 東 勲** 林 美 鶴***
新 田 好 古** 藤 田 浩 嗣****

Effects of Engine Operating Conditions on Nitrous Oxide Emission Characteristics of Ship

By Dong-Hoon YOO, Mitsuru HAYASHI, Yoshifuru NITTA and Hirotsugu FUJITA

Diesel engines are used as the main power source of marine transport and the continuous improvement of their performance offers better specific fuel oil consumption (SFOC). From the standpoint of Carbon Dioxide (CO₂) emission, marine engines are environment friendly compared to those used in land transportation and other industries. Attention should be focused only on CO₂ emissions but also on other greenhouse gases (GHG), such as Nitrous Oxide (N₂O), which is the result of a reaction between nitrogen and sulfur components of low-grade fuels.

N₂O is known as the third major GHG following CO₂ and methane (CH₄). The global warming potential (GWP) of N₂O is 310 times as large as that of CO₂ because N₂O in the atmosphere is very stable, and it becomes a source of secondary contamination after photo-degradation in the stratosphere. N₂O concentration 1800 years before was less than 280 ppb, but in the last 200 years it has increased rapidly. Since N₂O emission from natural sources is very difficult to control, discussions on N₂O emission reductions should be centered on artificial N₂O which represents 35% of the total N₂O emissions. To argue this point, it should be noted that there are some reports on the N₂O exhaust characteristics from stationary power plants and land transportations, but those of marine transportations are very limited.

In this experimental study, the authors investigated N₂O emission characteristics of an actual ship at the sea, and examined relationships between N₂O and other gaseous emissions. The experimental results showed that N₂O emission exhibited different characteristics compared with NO which makes up over 80 percent in NO_x, and had exhaust characteristic very similar to SO₂ emission. But when based on the excess air ratio, the difference between these two species increased with decreasing excess air ratio.

1. はじめに

高い熱効率を持つディーゼルエンジン機関は 1970 年代の世界オイルショックにより海上運送で重要な動力源として役割を果たしている。一般に、船用ディーゼルエンジンは、陸上運送動力源及び産業動力源に比べ環境負荷が少ないと認識されているが、陸上機関より極めて低質な燃料を使用しており、2010 年の船舶建造量は、世界的造船需要の増大によって、約 9,601 万トンで過去最大が記録され⁽¹⁾、地球環境の保全を考えたとき船舶起因の汚染物質の排出量を無視することはできない。

一方で温室効果ガス(GHG, Green House Gas)の一種類である亜酸化窒素(以下 N₂O)は二酸化炭素、メタン

と並んで温暖化を引き起こすガスとして知られている。大気中の N₂O ガスは極めて安定であり、光分解以降 2 次的に(N₂O + O → 2NO, NO + O₃ → NO₂ + O₂, NO₂ + O → NO + O₂)オゾン層を破壊するため⁽²⁾、地球温暖化係数(GWP, Global Warming Potential)は CO₂ の 310 倍である。現在大気中の N₂O 濃度は約 310ppbv であるが、年 0.2%~0.3%の増加率を示しており、産業革命以降約 8%増加した⁽³⁾⁽⁴⁾。N₂O を自然的起因と人為的起因に区分すると、自然起因が 65%、人為起因が 35%である。ただし、N₂O 排出量を議論するとき、自然から発生する N₂O の制御は不可能であるため、35%の人為的起因を低減するしかない⁽⁴⁾。Table 1 は人為的に排出される温室効果ガスの CO₂ 換算ベースとしての割合を示す⁽²⁾。一方、世界的に国際協約に基づく温室効果ガス低減の努力が進んでおり、その代表が 1997 年採択された京都議定書 2.2 である。ここでは「付属書 I に掲げる締約国(先進国)は、国際民間航空機関及び国際海事機関を通じて、航空機用及び船舶用の燃料からの温室効果ガスの排出の抑制又は削減を追求する」と規定された。

* 原稿受付 平成 25 年 4 月 8 日。
** 正会員 海上技術安全研究所(東京都三鷹市6-38-1)
*** 神戸大学 自然科学系先端融合研究環 内海 域
環境教育研究センター(兵庫県神戸市東灘区深
江南町5-1-1)
**** 正会員 神戸大学大学院海事科学研究科(兵庫県神戸市
東灘区深江南町5-1-1)

Table 1. Greenhouse gases caused by human life ⁽²⁾

Ranking	Gases	Percentage
1	CO ₂ from fossil fuel	56.6%
2	Deforestation, etc	17.3%
3	Methane	14.3%
4	Nitrous Oxide	7.9%
5	etc.	3.9%

また、これを採択した第3回気候変動枠組条約締約会議(COP3)では、「国際航行船舶から排出される GHG は国別の排出量には入れないで、別途報告すること」も決議された⁽⁵⁾。地球温暖化に及ぼす影響力が強い N₂O は削減対象物質の一つであり、国際又は国内での規制が始まる可能性が高いと予想される。

陸上動力源での主な研究はボイラーの燃焼又は排出中の N₂O の発生経路や影響物質等である。特に、燃料中の窒素分から直接発生する N₂O⁽⁶⁾⁽⁷⁾及び石炭燃料の燃焼により生成される Char を経由する N₂O の発生⁽⁸⁾が課題になっており、反応動力学的解析による発生経路の究明と共に触媒技術を用いる N₂O 低減方法が検討されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。一方、陸上ディーゼルエンジンに於いては、N₂O 発生起因物質として知られている燃料中の窒素又は硫黄分が極めて少ないため、燃料起因 N₂O より三元触媒又は酸化触媒による N₂O 発生が課題になっており、その発生反応経路の究明及び削減方法について検討されている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。しかし、低質燃料油を主燃料とする船用ディーゼルエンジンについては N₂O の発生に関する研究が極めて少なく、概略的な数値しか存在しない。また、実船に於いてエンジン負荷率による N₂O 発生特性の評価はなされていない。そのため、本実験の研究では、実船での N₂O 定量測定により船舶からの排出量及び排出特性を調べ、N₂O 排出率を算出し、エンジンの運転状態が N₂O 排出に及ぼす影響について調査した。また、他の排出ガスと N₂O の相関関係を明確にすることにより N₂O の排出特性を考察した。

2. 実験装置及び実験方法

本実験は航海環境及び機関運転状況の把握が可能である神戸大学附属練習船「深江丸」を対象とした。Table 2 は「深江丸」の主要目である。「深江丸」は、学生の運航実習及び研究を目的として建造されたため、主機関の運転や航海状態等を約 1,100 項目で自動測定し、船内 LAN システムによりデータ取得が可能である⁽¹³⁾。本研究では、海上の状態変化が排ガス成分に影響を及ぼす可能性があるため、エンジン運転及び船舶運航に影響するパラメータの選択計測を行い、結果分析に反

映している。

Figure 1 は本実験が行われた航海区域を示している。実験中の波高は 0.3m 以下であり、エンジンの負荷変動に与える影響は無視できる値である。また、それぞれの実験においてプロペラピッチ角を一定とし、舵を 0 度に固定することによる直線運転を行い、意図的な運航条件変更をなくすことでエンジン負荷に及ぼす影響をできる限り少なくした。

実験エンジンである 6DLM-26S(Daihatsu)は、6 気筒、4 ストローク、直接噴射式、1100kW/720rpm(MCO, 最高連続出力)の仕様を持っており、過給機及び空気冷却器が設置されている。また、本実験船では 2 台のディーゼル発電機及び非常用発電機が設置されているが、主エンジンとは異なる煙突を使用するため、測定場所における排ガス混合の可能性はない。

Figure 1. Route of research navigation and experiment area

Table 2. Specification of tested ship

Ship name	Fukaemaru	Shipyard	Mitsui
Gross Tonnage	674 ton	Length	49.95 m
Depth	6.10/3.75 m	Width	10.00 m
Con. Speed	12.5 knot	Max. Speed	14.28 knot
Propeller	4 blade, Dia. 2100mm	Pitch Control	CPP

Table 3. Engine loads in navigational conditions

Engine Load	Speed	Output, P	Air Excess Ratio, λ	
	knot	kW	Range	Ave.
Dead Slow	4	111.9<P<119.4	5.03<λ<4.91	4.95
Slow	5.9	134.3<P<134.3	4.66<λ<4.55	4.63
Half	9.0	216.3<P<223.8	3.81<λ<3.71	3.78
Full	11.0	313.3<P<320.8	3.36<λ<3.32	3.34
Run Up	12.5	805.7<P<820.6	2.65<λ<2.61	2.63

Table 3 は運航状態による船速、エンジン負荷、空気過剰率を表す。Dead Slow(12.4%, 常用連続出力)、Slow(14.9%)、Half(24.8%)、Full(34.8%)及びRunup(90.3%)の 5 つの負荷条件で増速実験を行い、

Figure 2. N₂O and exhaust gases sampling system on ship

それぞれの負荷間隔は20分とした。ただし、高負荷での急な負荷変動はエンジン損傷に繋がる恐れがあるため、FullからRunupへは徐々に上昇させた後、目標負荷に達した後20分間計測を行っている。

本実験で使用した燃料は低硫黄 MDO(A 重油, 密度:0.8461 g/cm³, 動粘度(15℃):2.137cts, 発熱量:42.8MJ/kg, 硫黄:0.07% mass/mass, 窒素:0.01% mass/mass)である。

Figure 2 は実験装置の概略図を示す。すべての排ガスのサンプリングは主機の過給機出口から3.5m付近で一つのサンプリング管により行っており、前処理装置の吸引力により採取される。排ガスの温度測定ではK-type型熱電対を使用しており、排ガス採取と同じ場所において同サンプル間隔で収録を行った。N₂O濃度は、水蒸気及びSO₂が存在する条件ではNOの反応により増加する⁽¹⁴⁾⁽¹⁶⁾⁽²⁸⁾恐れがあるため、サンプリングラインは煙突の測定点から1次冷却器までリボンヒータ及び断熱材で保温し、水蒸気の凝縮を防止した。(1)-(2)式はNOからのN₂Oの生成反応である。

すべてのサンプリングラインの内径は6mmであり、素材をステンレス(SUS316)にすることにより管の触媒反応によるサンプルガスの変質を防止した。一次冷却器にはコイル型二重管式の熱交換器(SUS304)を使用し、サンプルガスの外側を海水で冷却することにより管内の排ガスを急冷させ、反応を防止した。これにより採取口から一次冷却器までのガス滞留時間は1.5sec以下である。また、急速負荷変動時サンプリング

グガスの温度増加による前処理装置の内部での温度上昇を防ぐため、装置の前にガラス素材の二次冷却機を直列に設置した。前処理装置(PSU-102)では4℃以下まで温度を下げサンプルガス中の水蒸気を取り除いた。前処理装置の出口では、測定上時間的な誤差を最小化するため、一つのサンプリング管から二つに分岐させ測定器に供給している。また、前処理装置の前には二つのPMフィルター(GB-100R, Advantec)を取り付け、測定器中でのPMによる干渉を防いだ。

Table 4 は使用されたN₂O及び他の一般排ガスの測定法を示す。PG-250(Horiba)ではNO, SO₂, CO, CO₂及びO₂を、46C(Thermo Environment)はN₂Oを測定しており、1秒の間隔で同時連続測定を行った。

Table 4. Specification of gas analyzers

HORIBA PG-250	Analysis method (general gases)
NO	Chemiluminescence Detection (CLD)
SO ₂	Non-dispersive Infrared Absorption (NDIR)
CO	
CO ₂	Galvanic Cell
O ₂	
Thermo Environment 46C	Analysis method (N ₂ O)
N ₂ O	Gas Filter Correlation (GFC)

実験後、標準ガスによるN₂Oの測定器の誤差を確認(Figure 3)したが、すべての濃度(Span値:16.4ppm, 検査値:Zero, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%)において1.6%以下の誤差であったため、実験途中の計測中での異常検出はなかったと判断した。

本実験はJIS K 8008-1, JIS K 0095-2, IMO Technical Codeに従った計測を行っており、排ガスの発生率への

換算では JIS K 8008-1 の炭素バランス方法を使用した。ただし、上記の規格に明確には記述されていない N_2O の測定方法及び排出率計算の一部分に於いては文献等を参考にした⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁹⁾⁽²¹⁾。

Figure 3. Post experiment calibration results of N_2O analyzer.

3. 実験結果

Figure 4 は連続負荷変更によるエンジン出力、燃料消費率、排ガス温度及び熱効率を時系列で示す。燃料消費率は Half 負荷で最高値がみられている。また、Half 負荷以下での燃料消費率及び熱効率の変動は大きい、船速が低速であるため、風や流れ等の外部影響と、燃料管内の脈動及び大流量計による流量誤差等の内部影響に起因すると考えられ、低負荷での実験は注意が必要であると考えられる。

Figure 4. Time series of engine output, specific fuel consumption (SFC), exhaust gas temperature and thermal efficiency of the main engine

以降の結果解析では、プロペラ及びエンジン負荷制御に伴う一時的な当量比増加と思われる測定値(Figure 4, 丸点線)が含まれているため、負荷変更後 3~5 分間の排ガス濃度を採用していない。また、Full→Runup の負荷移動中のデータは安定的に採集されたため、解析データとして採用する。

3.1 エンジンでの N_2O 発生率特性 N_2O は煙突中の温度状況、排ガスの成分等の周囲環境により変質しや

すい特性があり⁽¹⁴⁾⁽¹⁶⁾、 N_2O のサンプリング方法に関しても、煙突での採取の場所・サンプルラインの長さ・採取方法等、数多くの課題が存在する⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。本研究では、船上測定の特異な環境によりサンプリング場所が限られているため、エンジンの過給機から 3.5m 付近のみでの採取を行うことにより、煙突出口での N_2O 濃度と見なして、エンジン負荷変動による排ガス中の N_2O 濃度を重点として考察する。

Figure 5. Effects of exhaust gas temperature and engine load on N_2O

Figure 5 ではエンジン出力変化及び排ガス温度による N_2O 濃度/発生率の変化を示す。グラフでは、 N_2O の発生特性を明らかにするために N_2O の濃度(ppm)及び発生率(g/kWh)を同時に考察する必要がある、それぞれのグラフを記載している。また、Figure 6 では酸素 13%換算を行った SO_2 及び N_2O 値を示す。排ガスの温度は、過給機出口とサンプリングポイントとの間の温度差は 10 度以下であったため、サンプリングポイントでの温度を基準にしている。グラフによると、 N_2O 濃度(ppm)の増加率は、約 200kW/220℃付近まで出力・温度の増加と共に急激に上昇するが、それ以上での増加幅は小さくなる。また、両グラフの N_2O の最高発生率(g/kWh)は 210kW/210℃付近であり、それ以上の出力・温度では減少している。Figure 6 の SO_2 濃度は温度の増加と共に直線的に増加しているが、 N_2O の濃度は 220℃付近まで一定(又は、少し増加)傾向が表れた後減

少している。N₂O の主な生成場所がエンジンの燃焼室の中であるか、煙突の中での温度等による他のガス成分の変質にあるかは議論の余地がある。ただし、N₂O 濃度(Figure 5, Figure 6)はエンジン負荷による上昇領域と安定/減少期が存在することが分かった。この実験で使用されたエンジンは MDO を使用する 4 ストロークの中速エンジンであり、ピストンのストロークや圧縮比、燃料成分、過給機の性能等の違いにより多少異なる結果が得られると考えられるが、基本的に、N₂O は温度依存性が高いため、負荷による N₂O 濃度発生傾向はある程度維持されると考えられる。

また、今回の実験での N₂O の最高濃度は 3ppm を超えていないが、MDO 中には窒素分や硫黄分など N₂O の生成に関連する粒子が少ないため⁽²⁷⁾、それ以上の高い濃度が検出されていないと考えられる。

Figure 6. Concentrations of N₂O and SO₂ based on 13% O₂ Conversion

3.2 N₂O と他のガスとの排出特性の比較 本論文ではディーゼル NO_x で 80%以上を占める NO を NO_x の代表物質と見なして、N₂O の排出特性について比較・検討を行った。

Figure 7 は排ガス温度における各排ガス成分の排出率を示す。N₂O 及び NO の発生率を比較すると、前述したように N₂O の発生率ピークは 210°C 付近であるが、NO の排出率ピークは 240°C 付近である。特に NO はピークまで急上昇しているが、N₂O の場合、ピークまで少し増加後減少が始めている。これにより、N₂O は NO_x の一種類であるが、NO とは異なる排出特性を持っていることが確認された。また、N₂O の発生率は SO₂ 発生率と類似な排出曲線を持っているが、温度上昇により発生率の差(点線)は大きくなっている。

Figure 8 は空気過剰率によるそれぞれの排ガスの発生率を示す。Figure 7 と同様に NO 及び N₂O の発生率曲線は異なり、NO の発生率は空気過剰率の低下と共に増加し $\lambda=3.5$ 付近で最高発生率を表しているが、N₂O の発生率は $\lambda=4.5$ 以上までは少し増加して後、それ以下の空気過剰率では低下している。また、N₂O 発生率は、Figure 7 と同様に SO₂ 発生率と類似な排出特性が

表れるが、低空気過剰率に移動するほど発生率の差は大きくなっている。Figure 7 及び Figure 8 の高温(高負荷)で二つの物質の発生率の差が多くなっていることは、Figure 6 のグラフで説明ができる。即ち、SO₂ 濃度は排気温度の上昇(負荷・燃料消費量(l/h))の増加と共に増加するが、N₂O 濃度は、中負荷以上で燃焼室の温度の増加により発生量の減少が考えられる。

Figure 7. Effect of exhaust gas temperature on gaseous emissions

Figure 8. Effect of air excess ratio on gaseous emissions

Figure 7,8 の CO の発生率は、排ガスの温度増加(空気過剰率の減少)するほど 300°C ($\lambda=3.0$) 付近まで減少しているが、燃焼室の温度の上昇による CO から CO₂ への活発な変換⁽²⁸⁾が考えられる。また、それ以降の CO 発生率は多少増加しているが、空気過剰率の低下が主な原因であると考えられる。

Figure 9. Correlation factor of N₂O with SO₂ and NO

Figure 9 は N_2O 発生率と SO_2 及び NO の発生率の相関度を示す。 N_2O の SO_2 との相関度の場合、 $R^2=0.953$ で高い値を示すが、 NO とは $R^2=0.257$ であり、相関性が低い。 SO_2 は殆どが燃料に起因しており、燃料中には硫黄分以外に窒素分も存在するため、 N_2O の一次的な発生場所は燃焼室内部である可能性がある。ただし、高温・高圧の燃焼室を持つディーゼルエンジンに於いて、空気中の窒素による N_2O 生成メカニズム及び燃料中の窒素分による N_2O 生成量に関する考察がなされていないため、Figure 9 の相関度だけで N_2O 発生経路を議論ことは難しい。したがって、以上の船用ディーゼルエンジンにおいて、 N_2O の発生場所、メカニズム及び原因物質の影響度等は、煙突上でのガス変化量及びサンプリング過程でのガス変質の究明を含め、今後の課題である。

また、A 重油を使用する 4 ストロークディーゼルエンジンに於いて、相関度を基本にした SO_2 の測定から N_2O の発生率推定は、ある程度までは可能であると考えられる。しかし、高負荷では、 N_2O と SO_2 の発生率の差が大きくなるため、結果の信頼性が低く、燃料中の窒素分の影響も考慮しなければならない。

4. 結論

本研究では、MDO を燃料とする実船 4 ストロークディーゼルエンジンに於いて、船舶の運航条件による N_2O の排出量及び排出特性を調べた。また、他の排出ガスと N_2O の相関関係から N_2O の排出特性を明確にした。以下は本実験で得られた結果である。

- ・ N_2O 濃度はエンジン出力約 200kW、排ガス温度 220℃まで出力の増加と共に増加するが、それ以上の負荷では殆ど増加しない。また、 N_2O の最高発生率(g/kWh)は 210kW、210℃付近であり、それ以上の出力・温度では減少する。 N_2O 濃度はエンジン負荷による上昇領域と安定/減少期が存在する。
- ・ N_2O の発生量ピークは 210℃/ $\lambda=3.5$ 付近であるが、 NO の排出率ピークは 240℃/ $\lambda=4.5$ 付近であり、二つの物質は異なる排出特性を持っている。
- ・ N_2O 発生率は SO_2 発生率と非常に類似な排出特性が表れたが、低空気過剰率に移動するほど発生率差は大きくなる。

なお、カーボンバランス法で算出した今回の研究航海中の N_2O の排出率は約 35.5mg/kWh であり、 N_2O の温暖化係数 310 掛けた場合⁽²⁾、同時点に排出される CO_2 の約 1.8%である。

謝辞

本研究に協力して頂いた神戸大学大学院附属練習船 深江丸の矢野船長以下乗務員の皆さんに深く感謝の意を表す。本研究の費用の一部は日本学術振興会科学研究補助金(課題番号：23560971、代表者：林美鶴)によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) 世界の新造船建造量の推移、国土交通省 海事局
- (2) A. F. Bouwman, J.A. Taylor and C. Kroeze, Testing hypotheses on global emissions of nitrous oxide using atmospheric models, *Chemosphere - Global Change Science*, (2000), Vol. 2, pp. 475-492
- (3) IPCC, *Climate Change 2007 Synthesis Report*, (2007), pp 1-52, Valencia, Spain.
- (4) Prather, M., R. Derwent D. Ehhalt, P. Fraser, E. Sanhueza, and X. Zhou., *Radiative forcing of climate change: Other trace gases and atmospheric chemistry*, Cambridge University Press, (1996), Cambridge, U.K.
- (5) 吉田公一, 海洋環境の保護と海上安全の向上へさらに進展, 船と海のサイエンス, 海上技術安全研究所, 冬号, (2012)
- (6) John C Kramlich, Jerald A Cole, James M McCarthy, Wm. Steven Lanier, *Mechanisms of nitrous oxide formation in coal flames*, *Combustion and Flame*, Vol. 77, Issues 3-4, (1989), pp. 375-384
- (7) Molinari H., Ragona L., Varani L., Musco G., Consonni R., Zetta L., Monaco H.L., Hamalainen J.P., Aho M.J., *Conversion of fuel nitrogen through HCN and NH_3 to nitrogen oxides at elevated pressure*, *Fuel*, Vol. 75, (1996), pp. 1377-1386
- (8) 倉本 浩司, 小泉 一博, 成瀬 一郎, 大竹 一友, チャー燃焼場における N_2O 生成特性, *化学工学論文集*, Vol. 20, No. 4, (1994), pp.482-488
- (9) Freek Kapteijn, José Rodriguez-Mirasol, Jacob A. Moulijn, *Heterogeneous catalytic decomposition of nitrous oxide*, *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol. 9, Issues 1-4, (1996), pp. 25-64
- (10) Ots, A., *Formation and emission of compounds affecting environment*, *Oil Shale*, Vol. 22, Issue 4, (2005), pp. 499-535
- (11) 鈴木 央一, 石井 素, 尿素 SCR における亜酸化窒素の排出及び生成要因に関する考察, *自動車技術会論文集*, Vol. 40(4), (2009), pp. 991-996
- (12) 宮寺達雄, 亜酸化窒素(N_2O)問題とその低減技術,

- NIRE, (2001)
- (13) 若林 伸和, 矢野 吉治, 林 祐司, 村井 康, IP ネットワークを利用した航海データ収集・転送システムの開発 : 練習船深江丸における実装, 日本航海学会論文集, Vol. 106, (2002), pp. 29-37
 - (14) De Soete, G.G., Parametric study of N_2O from sulphur oxides and nitric oxide during storage of flue gas samples, Report no. 36732, (1988), Institut Français du Pétrole, Rueil-Malmaison Cedex, France
 - (15) S. A. SLOAN and C. K. LAIRD, Measurements of Nitrous Oxide Emissions from P.F. Fired Power Stations, Atmospheric Environment, Vol. 24A, No 5, (1990), pp. 1199-1206
 - (16) 平木 隆年, 玉置 元則, 固定発生源からの燃焼排気中の N_2O 測定法, 日本化学会誌, 1991(5), pp. 410-415
 - (17) ガス状排出物及び粒子状排出物の台上計測, JISB8001-1, 日本規格協会(JIS), (2009)
 - (18) 秋山 薫, 岩崎 好陽, 辰市 祐久, 排ガス中の N_2O の採取方法と保存中における N_2O の生成について, 東京環境科学研究所年報, 1991(2), pp. 3-8
 - (19) 原油及び石油製品-密度の求め方-, JISK2249-4, 日本規格協会(JIS), (2011)
 - (20) 排ガス資料採取方法, JISK0095, 日本規格協会(JIS), (1999)
 - (21) IMO, Technical code on control of emission of nitrogen oxides from marine diesel engines, (2008)
 - (22) M. Galle, D. W. Agar, O. Watzenberger, Thermal N_2O decomposition in regenerative heat exchanger reactors, Chemical Engineering Science, Vol. 56, (2001), pp. 1587-1595
 - (23) Wargadalam, V.J., Löffler, G., Winter, F., Hofbauer, H., Homogeneous formation of NO and N_2O from the Oxidation of HCN and NH_3 at 600-1000°C, Combust. Flame, Vol. 120, (2000), pp. 465-478
 - (24) William C. Trogler, Physical properties and mechanisms of formation of nitrous oxide, Coordination Chemistry Reviews, Vol. 187, (1999), pp. 303-327
 - (25) 塚本達郎 他 3, 船用低速ディーゼル機関の亜酸化窒素排出濃度の計測, 日本機械学会講演会 2001 年度年次大会講演論文集(II), 日本機械学会, (2001), pp. 527-528
 - (26) Agung Sudrajad, Osami Nishida, Hirotsugu Fujita, Wataru Harano, Nitrous Oxide Emissions from Marine diesel Engine sources, Ocean 2006, (2006), Singapore
 - (27) 桑原孫四郎 他 6, 船用機関から排出される N_2O 等有害排ガスに与える燃料性状及び脱硝装置の影響, 日本マリンエンジニアリング学会, Vol. 34, No.2, (1992), pp. 94-100
 - (28) Stephen R. Turns, An introduction to combustion - second edition, McGraw-Hill, (2000), pp.152, 167-168