

令和元年6月24日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06616

研究課題名(和文) 船用2ストロークディーゼル主機関の運転特性に及ぼす負荷変動の影響

研究課題名(英文) Influence of load fluctuation on engine performance of marine two-stroke diesel engine

研究代表者

塚本 達郎 (Tsukamoto, Tatsuro)

東京海洋大学・学術研究院・教授

研究者番号：50207346

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：船舶の推進機関から排出される大気汚染物質の排出特性に関する研究や、燃料消費率等の性能評価は、陸上での試験や平水中の海上公試にて行われている。これらと異なり、実際の航海中には、気象・海象の影響により機関の負荷は変動している。ここでは船用2ストロークディーゼル機関を供試機関として、機関に接続された水制動力計の給水ポンプ、排水弁等を制御することにより機関に負荷変動を与えて一酸化炭素、二酸化炭素、窒素酸化物、粒子状物質、スモーク濃度および燃料消費率の計測を実施した。計測器の応答性、負荷変動幅、負荷変動周期などが、計測結果に及ぼす影響について調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

航海中の推進用ディーゼル機関の負荷変動を陸上の実験設備で再現して、その影響を調べる研究は、他にない試みであり、これにより詳細な負荷変動影響に関する知見が得られ、また負荷変動時のガス濃度計測に対する留意点が明らかになる。本研究によって得られたデータによって、負荷変動と大気汚染物質排出状態、機関運転状態などの機関特性の関係が明らかになることにより、船体動揺や波浪といった情報から負荷変動を予測できれば、本研究の結果と合わせることで、工場試験運転時に得られるデータから、実運航時の大気汚染物質の排出量や燃料消費量の予測が可能となる。

研究成果の概要(英文)：The research on the emission characteristics of air pollutants emitted from the ship propulsion engine and the performance evaluation of the fuel consumption etc. are conducted by tests on land and sea trials on calm sea. Unlike these conditions, the engine load fluctuates during actual voyages, due to the influence of weather and sea conditions. In this study, a two-stroke marine diesel engine is used as the test engine, and the load fluctuation is given to the engine by controlling the feed water pump and drain valve of the water brake system connected to the engine. The measurements of carbon monoxide, carbon dioxide, nitrogen oxides, particulate matter, smoke concentration and fuel consumption were carried out. The influence of the response of the measuring instrument, the load fluctuation range, and the load fluctuation cycle on the measurement results was investigated.

研究分野：原動機工学

キーワード：船用ディーゼル機関 窒素酸化物 負荷変動

## 様式 C - 19, F - 19 - 1, Z - 19, CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ディーゼル機関から排出される大気汚染物質には NO<sub>x</sub>(窒素酸化物) SO<sub>x</sub>(硫黄酸化物) HC(炭化水素), CO(一酸化炭素), PM(粒子状物質)などが挙げられ, これらの大気汚染物質による, 酸性雨, 光化学スモッグ等の環境への悪影響, 呼吸器障害, 発ガン要因等の健康への影響が危惧されている。現在, 陸上の工場, 事業所および自動車からの排出ガスに対してはさまざまな規制が行われてきており, 今後のさらなる取り組み強化が展開されている。船舶から排出される大気汚染物質についても 2005 年に国際海事機関による規制が発効し, 現在, 段階的に強化されている。

船舶から排出される大気汚染物質の排出特性に関する研究や, 燃料消費率等の性能評価の多くは, 主に陸上に設置された供試機関や, 機関製造者による陸上試運転, 造船時の海上試運転にて性能の評価が行われている。陸上で行う研究・評価は, 主に運転台上に設置した機関の出力軸と制動力計を接続し, いくつかの機関負荷率における定常負荷運転で実施される。また, 造船時の海上試運転の多くは平水中で実施される。しかし, 実際の航海中には, 気象条件, 海象条件, 船体の動揺により, 主機関は常に負荷が変動する状態で運転されている。

陸上試験においては船用負荷(出力軸にプロペラが装着されている状態を模擬した運転で, 出力(L)は回転数(N)の 3 乗に比例する)の特性曲線上の運転点で一定の負荷にて実施されている。実際の運航時の運転状態は, 陸上試験の運転状態と異なり, 推進用ディーゼル機関は常に負荷変動の影響を受けており, 陸上試験での運転点とは異なる条件で運転されることになる。近年, 運航時に排出される大気汚染物質や燃料消費量の把握のために, 運航時の船舶での計測が行われている。しかしながら, 実際の運航時は, 周囲条件の不規則で急激な変化や専用の計測機器を設置する必要があるといった問題があり, 機関特性の把握のための十分なデータが得られていない。

また, 上述のとおり推進用のディーゼル機関は, 設定した回転数を一定に保つようにガバナによって燃料噴射量の制御が行われている。そのため, 負荷変動が生じると一定の回転速度を保つために, 燃料噴射量が変化し, そのため, シリンダ内では燃料噴射時に燃料が過濃となる領域, 希薄となる領域の状況に変化があると考えられる。このことにより, PM や NO<sub>x</sub> 等の大気汚染物質のシリンダ内における生成状況も変化を生じると考えられる。しかしガバナは, 負荷変動に対して, 必ずしも最適な制御がなされているとは限らない。実際の船舶において, ガバナの応答特性を変化させることにより, 燃料消費率を改善した報告もされているが, どのような状況(負荷変動)下で, どのような制御を行うと, 燃料消費率改善に繋がるかの詳細は明らかではない。

### 2. 研究の目的

本研究では, 東京海洋大学に既設の大型船用 2 ストロークディーゼル機関を用いて, 機関に接続された水制動力計の給水ポンプ, サーボ弁, バタフライ弁等をシーケンス制御することで, 給水量および排水量を制御して, 機関に負荷変動を与える実験を行い, 様々な負荷変動周期, 変動幅において, 一酸化炭素(CO), 二酸化炭素(CO<sub>2</sub>), 窒素酸化物(NO<sub>x</sub>), 粒子状物質(PM), PM の粒径分布, スモーク濃度および燃料消費率の計測を実施する。さらに, 実際に航海中の船舶の機関データを参考にして, それを模擬した負荷制御試験を実施し, 定常負荷試験との差異を明らかにする。またガバナの応答性を変更する実験を行い, 負荷変動に対するガバナの応答性が機関の大気汚染物質排出特性および燃料消費率に及ぼす影響を明らかにする。

### 3. 研究の方法

研究は, 実験室に設置された負荷変動装置を有する船用低速 2 ストロークディーゼル機関を用いて実施する。最初に, 船用特性上の負荷変動の無い定常負荷による運転を行い, 各種計測を実施する。また, 各負荷率の回転数に対して回転数一定で出力のみを変化させ計測を実施し, 出力と回転数に対して, 各大気汚染物質の排出状況, 燃料消費率を表すマップを作成する。次に, 作成したマップに対して負荷変動を与え, 負荷変動が, 各種の大気汚染物質と燃料消費率に与える影響を把握する。負荷変動は, 周期・変動幅を含め, いろいろな状況下で実験を実施する。その後, それまでに得られた知見を元に, 機関のガバナの応答に関するパラメータを変化させ, 燃料消費率と各大気汚染物質の排出特性とガバナの制御の関係を実験から把握し, 運用による二酸化炭素排出量, 大気汚染物質排出量の特性把握を実施する。

### 4. 研究成果

#### (1) 計測機器の種類と計測値応答速度の関係

船用機関から排出される NO<sub>x</sub> 濃度の計測では多くの場合に化学発光法計測が用いられる。化学発光法は, NO<sub>x</sub> 濃度のうち, NO 濃度が計測される手法であり, NO<sub>2</sub> 濃度に関してはプレコンバーターを用いて NO に変換する必要がある。また, プレコンバーターとともに, 発光強度を計測するセルが必要であり, 一般的には排気管内の排ガスを排気管からのサンプリング管経由で連続的にサンプリングした計測が実施される。そのため, 排気管内排ガスの NO<sub>x</sub> 濃度に対して計測値には遅れ時間が生じている。他の計測手法の一つにジルコニアセンサ法がある。この計測手法は, ジルコニア素子の酸素に対するイオンポンプ現象を用いて計測する手法で, 計測セ

ルは排気管内に直接配置することが可能であり、化学発光法と比較してサンプリングによる遅れ時間が無い計測手法である。

最初に各分析装置の応答速度を把握するための実験を行った。ここでは、ジルコニアセンサを分析装置 1、化学発光法濃度計を分析装置 2 と記している。

図 1 に実験装置の概要を示す。図は、分析装置 2(化学発光法)の応答速度実験装置であり、分析装置(測定セルおよびガス流路切替電磁弁)、標準ガスのレギュレータ等で構成される。標準ガスは、NO(N<sub>2</sub> バランス)で、NO 濃度 1,386 ppm を使用した。また、分析装置 1 では、センサ表面に直接標準ガスを供給し計測を行った。

図 2 に標準ガス供給時間と分析装置出力値(NO<sub>x</sub> 濃度)の関係、図 3 に標準ガス供給時間と分析装置出力値(O<sub>2</sub> 濃度)の関係を示す。

図はそれぞれ横軸に、標準ガス供給後の経過時間、縦軸に分析装置の計測値を示している。

NO<sub>x</sub> 濃度は、分析装置 1 では標準ガス供給後すぐに濃度表示値は上昇をはじめ、30 sec で標準ガス濃度を示した。分析装置 2 では、29 秒で濃度表示値が上昇し、110 sec の時間経過後に標準ガス濃度を示した。このことから、分析装置 1 のジルコニアセンサが分析装置 2 の化学発光法による計測より高速の応答であることがわかる。

酸素濃度は、分析装置 1 では 12 秒、分析装置 2 では 110 秒で標準ガスの酸素濃度である 0 を示した。酸素濃度においても、ジルコニアセンサが高速に反応していることがわかる。また、図 2 に示した NO<sub>x</sub> 濃度と比較すると分析装置 1 においては NO<sub>x</sub> 濃度より短い時間で標準ガス濃度を示すことがわかった。

図 4 に標準ガス供給時間と NO<sub>x</sub> 濃度計表示濃度の関係、図 5 に標準ガス供給時間と NO<sub>x</sub> 濃度計表示最大値の関係を示す。これは、分析装置 2(化学発光法)において、図中に示す秒数のみ標準ガス(1386 ppm)を供給した場合の計測値を示している。このように、供給時間が短いほど計測される最高値も低く、負荷変動の計測時には最高値が計測されない、または、平均的な計測結果に差が出ることが考えられる。

## (2) 船用ディーゼル機関の NO<sub>x</sub> 排出特性

実験は大乗に設置された船用 2 ストロークディーゼル機関を供試機関として実施した。供試機関の主要目を表 1 に、供試機関の外観を図 6 に示す。この機関はシリンダ数が 3 気筒の電子制御式船用低速 2 ストロークディーゼル機関であり、最高出力が 1,275 kW の静圧過給方式のクロスヘッド型機関である。この機関の出力軸は軸出力計を經由し水制動力計

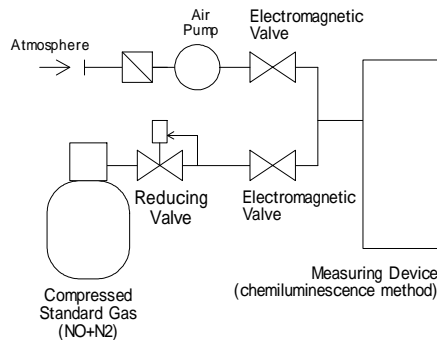


図 1 実験装置の概要

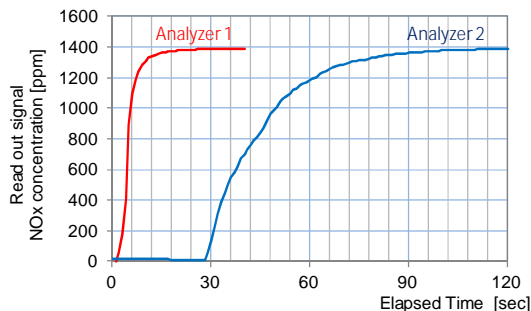


図 2 標準ガス供給時間と分析装置出力値(NO<sub>x</sub> 濃度)の関係

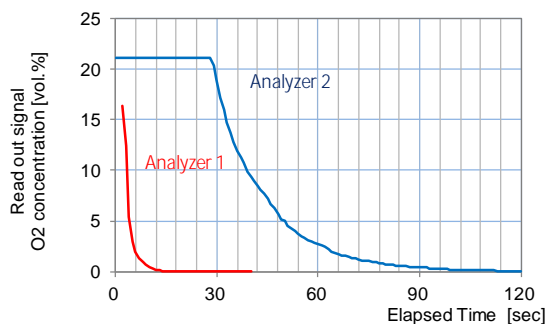


図 3 標準ガス供給時間と分析装置出力値(O<sub>2</sub> 濃度)の関係

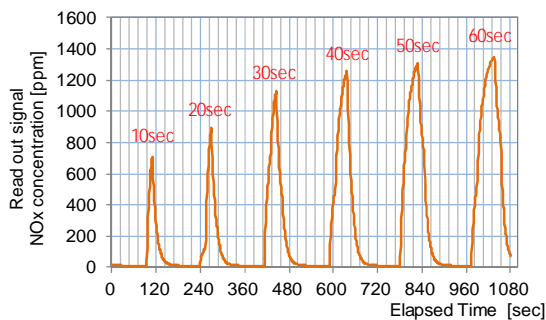


図 4 標準ガス供給時間と NO<sub>x</sub> 濃度計表示最高値(分析装置 2)

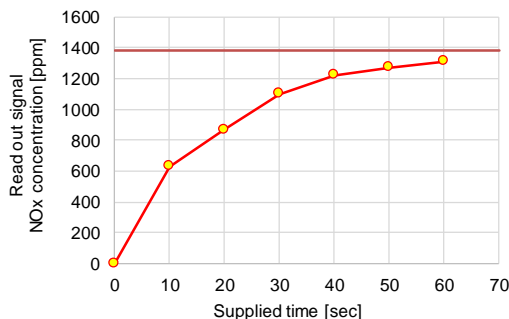


図 5 標準ガス供給時間と NO<sub>x</sub> 濃度計表示最大値(Analyzer 2 :化学発光分析法)

表 1 機関の主要目

| 名称       | 3UEC-33LS -Eco |             |
|----------|----------------|-------------|
| シリンダ数    | 3              |             |
| シリンダ内径   | mm             | 330         |
| ピストン行程   | mm             | 1050        |
| 出力       | kW (PS)        | 1275 (1734) |
| 機関回転数    | rpm            | 162         |
| 正味平均有効圧力 | MPa            | 1.752       |
| 平均ピストン速度 | m/sec          | 5.67        |



図 6 供試機関の外観

(図 6 の右下)に接続されており、機関の出力を吸収すると共に、軸馬力の計測が可能な仕様となっている。

この機関の船用特性における機関回転数と出力の関係を図 7 に示す。図は横軸に機関回転速度、縦軸に機関負荷率を示している。また、図中には 4 負荷率の機関出力、回転速度を記している。この機関の船用負荷特性の負荷率 25% で 318 kW, 102 rpm, 負荷率 50% で 637 kW, 129 rpm, 負荷率 75% で 956 kW, 147 rpm, 負荷率 100% で 1275 kW, 162 rpm である。以降、この 4 負荷率の NOx 濃度を中心に報告する。

最初に、供試機関の負荷率別の NOx 排出特性を把握した。図 8 に機関出力と NOx 排出率の関係を示す図は横軸に機関出力、縦軸に NOx 排出率を示している。機関出力 318 kW(負荷率 25%)において最も排出率が高く、637kW(負荷率 50%)から 1275 kW(負荷率 100%)の範囲で概ね 11 ~ 14 g/kWh の排出率である。

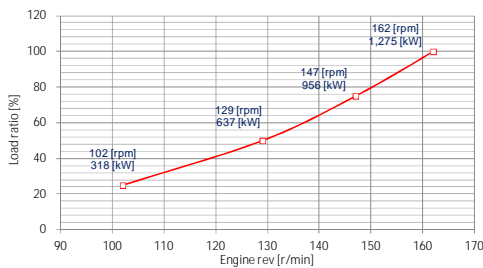


図 7 機関回転数と出力の関係

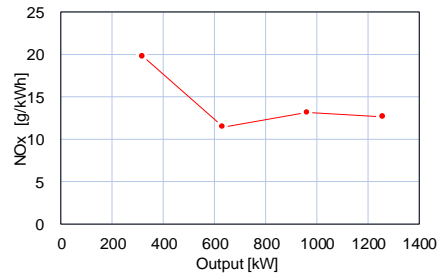


図 8 機関出力と NOx 排出率の関係  
(船用特性負荷特性)

### (3) 単一負荷変化時の計測濃度変化

供試機関に接続している動力計の制動力を操作することによって、単一の負荷変化を機関へ与え、NOx 濃度の計測を行った。計測装置は(2)項と同様に、ジルコニアセンサを分析装置 1、化学発光法濃度計を分析装置 2 としている。

図 9 に単一負荷変化時(負荷下降時)の NOx 濃度変化を示す。実験は機関負荷率 25%時に、機関の回転速度設定値をそのままとして、制動力のみを 25%低下させている。図は横軸に経過時間を示しており、上に示すグラフに過給機回転速度と機関出力、下に示すグラフに NOx 濃度を示している。NOx 濃度は(2)項に一部を示した実験によって把握した、計測機の計測応答遅れ時間を考慮し、経過時間方向に補正を行っている。この実験では、機関出力が低下するまでに 30 秒の時間を要した。この時の NOx 濃度は、負荷低下前に約 1700 ppm であったのに対して、負荷低下後には約 1950 ~ 2000 ppm へ上昇した。また機関出力の変化が約 30 秒であったのに対して、過給機の回転速度変化と NOx 排出濃度変化に係る時間は 150 秒ほどを要している。分析装置 1 と分析装置 2 の計測値を比較すると、濃度変化を開始するタイミングはほぼ等しく、また、変化が完了する時間もほぼ等しい結果となり、機関の出力変化が 30 秒ほどの場合には、事前に分析装置、サンプリング、プレコンバーターによる前処理の遅れ時間を把握していれば、化学発光法、ジルコニアセンサともほぼ等しい変化を示すことがわかった。

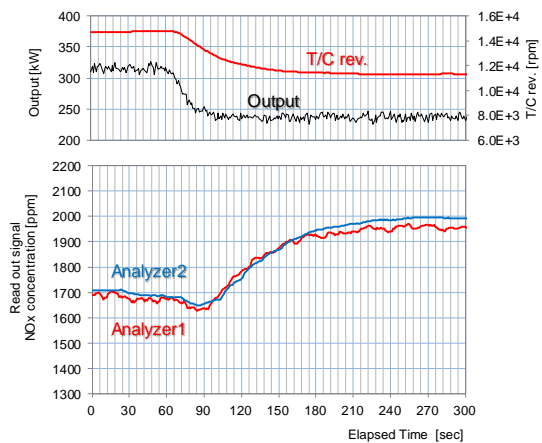


図 9 単一負荷変動(負荷下降)時の NOx 計測濃度



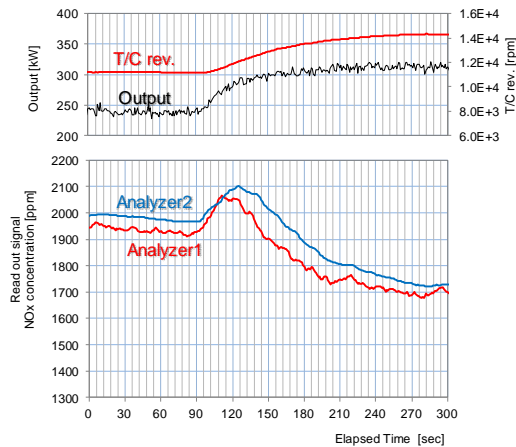


図 10 単一負荷変動(負荷上昇)時の NOx 計測濃度

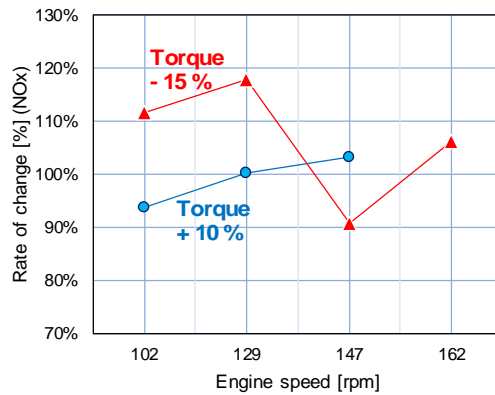


図 11 トルク変化時の NOx 濃度変化率 (船用特性基準に対する変化率)

図 10 に単一負荷変化時(負荷下降時)の NOx 濃度変化を示す。ここでは図 9 と同様に横軸に経過時間、下のグラフの縦軸に NOx 濃度、上のグラフの縦軸に機関出力、過給機回転速度を示している。図 9 に示した負荷下降時に対して、負荷上昇時には NOx 濃度は低下する。分析装置 1 と 2 を比較すると、濃度の上昇変化時には、ほぼ等しい濃度変化であったが、濃度の下降変化時には、分析装置 1 の方が先に低下していることがわかる。このため、分析装置の違いによって計測濃度の反応遅れ時間が生じる条件と、生じない条件が共存しており、負荷変動時の NOx 濃度計測では、この特性を考慮する必要がある。

#### (4) 制動力変化時の NOx 濃度

図 11 にトルク変化時の NOx 濃度変化率を示す。この図は、船用負荷特性による機関運転時の NOx 排出率に対して、機関の回転速度を設定するガバナハンドルはそのまま、水制動力計の制動力のみを変化させ、定常状態としたときの NOx 排出率の割合である。図は、横軸に機関回転速度、縦軸に NOx 排出率の変化率を示している。図中の赤い三角プロットが、制動力のみを 15%減少させた変化率、青い丸プロットが制動力のみを 10%増加させた変化率である。横軸の 102 rpm は機関負荷率 25%，129 rpm は負荷率 50%，147 rpm は負荷率 75%，162 rpm は負荷率 100%に対応する回転速度である。制動力を 15%低下した場合、機関負荷率 75%を除いて NOx 排出率は増加し、制動力を 10%上昇させた場合、102 rpm では排出率が低下し、129 rpm ではほぼ等しい値となり、147 rpm では排出率が上昇する特性であった。

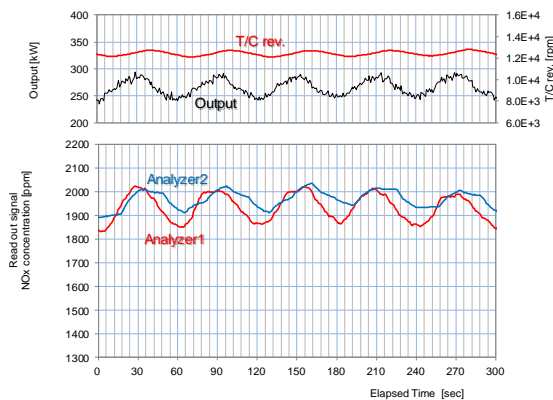


図 12 周期的負荷変動時の NOx 濃度 (変動周期：60 秒)

#### (5) 周期的負荷変動時の NOx 濃度

図 12, 13 に周期的負荷変動時の NOx 計測濃度を示す。図のデータは船用特性の機関負荷率 25%の運転時に、機関の回転速度設定値はそのまま、水制動力計によって制動力を 0 ~ -15%の範囲で周期的に変化させたときの、機関出力、過給機回転速度、NOx 濃度を示しており、

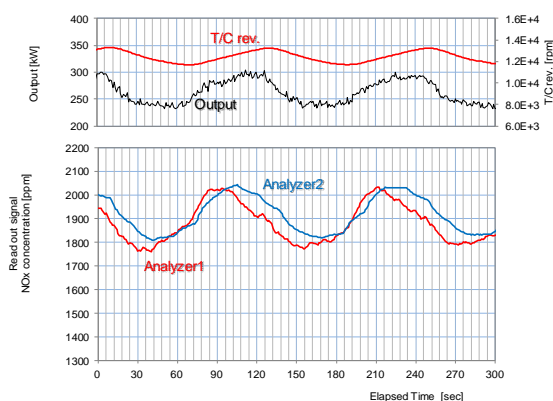


図 13 周期的負荷変動時の NOx 濃度 (変動周期：120 秒)

図 12 は変動周期 60 秒、図 13 は変動周期 120 秒の濃度である。図はそれぞれ、横軸に経過時間を示しており、上に示すグラフに過給機回転速度と機関出力、下に示すグラフに NOx 濃度を示している。

変動周期 60 秒の NOx 濃度は、1850 ~ 2020 ppm で計測される濃度に変化しているのに対して、

変動周期 120 秒では 1780 ~ 2050 ppm で変化する。(1)項で示した分析装置 1 の応答時間は 30 秒ほどであり、また、(4)項で示した単一負荷変動時では、NOx 濃度の変化に 150 秒ほど要していた。そのため、変動周期 150 秒未滿の図 12, 13 では、単一負荷変動時の NOx 濃度の下限時と上限時の変化より小さい変化となっていることがわかる。

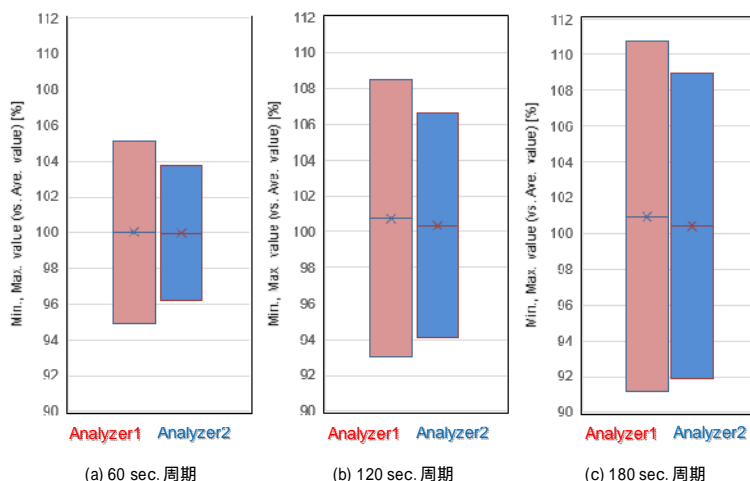


図 14 NOx 濃度の変化率と平均値

図 14 に、NOx 濃度の変化率と平均値を示す。図のデータは船用特性の機関負荷率 25 % の運

転時に、機関の回転速度設定値はそのまま、水制動力計によって制動力を 0 ~ 15 % の範囲で 60 秒、120 秒、180 秒の周期で変化させたときに計測される NOx 濃度の変化率を示している。変化率の 100 % の値は、連続的に計測を行った NOx 濃度の平均値である。図は (a) に 60 秒周期、(b) に 120 秒周期、(c) に 180 秒周期であり、それぞれ左側が分析装置 1 (ジルコニアセンサ)、右側が分析装置 2 (化学発光法) の変化幅を示している。また、各変化幅の中央付近のプロットは NOx 濃度最高値と最低値の平均である。周期的な負荷変動時に計測される NOx 濃度は、分析装置の応答速度によって変化率が異なり、周期が長いほど変化率が大きくなる傾向である。また、最高値と最低値の平均値は、連続的に計測した平均濃度より、周期が長いほど高くなる傾向があり、応答速度の速いジルコニアセンサの方が高い平均値となる。

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 2 件)

塚本 達郎, 佐々木 秀次, 大橋 慶勤, ジルコニアセンサを用いた船用ディーゼル機関から排出される NOx 濃度計測に関する研究, 第 86 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集, pp.11-12, 2016

黒田 雄介, 佐々木 秀次, 大橋 慶勤, 塚本 達郎, 船用 2 ストロークディーゼル機関の NOx 排出特性 - プロペラ特性運転におけるトルク変化の影響, 第 88 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集, pp.115-116, 2018

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名: 佐々木 秀次

ローマ字氏名: SASAKI Hidetsugu

所属研究機関名: 東京海洋大学

部局名: 学術研究院

職名: 助教

研究者番号 (8 桁): 00554958

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。