

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 24 日現在

機関番号：54102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560993

研究課題名(和文) 船用ディーゼルエンジンに適用するPM低減システムの実用化に関する研究

研究課題名(英文) Study on utilization of PM reduction system applied to a marine diesel engine

研究代表者

窪田 祥朗 (Kubota, Sachio)

鳥羽商船高等専門学校・商船学科・准教授

研究者番号：20290760

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：ディーゼルエンジンから排出される排気ガスには有害物質のPM(粒子状物質)が含まれており、船舶用低減システムの実用化が期待されている。本研究では、実用化を念頭に、高周波電源とフィルターユニットをそれぞれ検討し、PM低減システムを構築した。システム用高周波電源に、擬似可変コンデンサを適用することによって、フィルターに強磁性金属を適用でき、急速加熱と高温加熱により、電源効率の向上を確認した。また、PM除去とシステムの安定動作を可能とした。

研究成果の概要(英文)：PM (particulate matters) which is the toxic substance is contained in the exhaust gas from a diesel engine. Therefore, utilization of the reduction system for marine diesel engine is required. In this study, high frequency power supply and the filter unit have been examined, respectively. A ferromagnetic metal is applicable to the PM trapping filter by using quasi variable capacitor. As a result, improvement in power supply efficiency has been proved because a rapid heating and a high temperature heating were achieved. Moreover, removal of PM and operational stability of the system have been confirmed.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：誘導加熱 PM(粒子状物質) ソフトスイッチング 共振

### 1. 研究開始当初の背景

環境汚染防止の観点から、大気汚染源となる有害排気ガスの低減が重要とされ、自動車産業界はゼロエミッションビークルを目指し、エンジン車からハイブリッド車、電気自動車へと移行しつつある。船舶も同様に電気推進船への転換が図られている。特に、出入港、狭水道の航行において機関の出力調整が頻繁に必要な内航船舶では、電気推進船が有利である。電気推進船の利点は、二重反転プロペラやポッド推進に代表されるように、推進性能の向上、機関室配置の自由度、船体設計の有利性などが挙げられる。将来的には、外航船舶も電気推進船へ移行することも予想される。

電気自動車の場合、充電するための給電システムは、発電所からの電力を利用すれば良いが、船舶は陸上からの支援がなく、船内発電機によって電力を自給しなければならない。太陽電池などの新エネルギー発電が効率となり、大電力を供給できればゼロエミッション船を実現できるが、現時点で船内電力を全て供給することはできない。そのため、発電機の原動機としてディーゼルエンジンが必要となり、ディーゼルエンジンからの排気ガスの浄化が必要不可欠である。

ディーゼルエンジン排気ガス中の有害物質は、窒素酸化物(NOx)、硫黄酸化物(SOx)、ディーゼル排出微粒子(PM:Particulate Matter)が挙げられる。これらの浄化技術に関する研究が種々検討され、SOxに関しては燃料成分の改良によって低減可能となった。しかし、PMとNOxはトレードオフの関係にあり、ディーゼルエンジン本体のみの改良では両方を低減できない。一般的にNOxは燃焼温度を低温化することで低減できるが、この場合PMの排出量が増加する。そのため、低NOx排出のディーゼルエンジンは、後処理装置としてPMを低減するシステムが必要となる。

PMは肺ガンやアレルギーを引き起こす要因の一つと環境省より発表されており、NOxとともにその低減対策が急がれている。そこで、2001年に自動車NOx・PM法が成立し、2002年から施行された。2008年3月には、世界で最も厳しい規制となる「ポスト新長期規制」が国土交通省で制定され、2009年10月から順次適用されている。また、ヨーロッパにおいても自動車の排気ガス排出規制が強化されており、2009年9月から、PMに関して厳しく規制するEuro-が施行された。2014年からはEuro-が導入され、さらに厳しく規制される。

アメリカでは、排気ガス規制として2010年からUS10が施行されている。このように自動車に関する規制が整備されつつあるため、船舶でもPM排出に関する同様の規制が検討されている。2005年7月には第53回国際海事機関(International Maritime Organization: IMO)の海洋環境保護委員会

が開催され、船舶からの大気汚染防止対策としてMARPOL附属書VIの内容の見直しを検討されることとなり、2008年4月の第57回海洋保護委員会でPM規制案が審議された。現在は具体的な規制値が設けられていないが、今後厳しく規制されることは間違いない。

### 2. 研究の目的

本研究では、SOxとNOxを低減したディーゼルエンジンを前提とし、NOxとトレードオフの関係にあるPMの低減に主眼をおく。つまり、増加したPMや未燃焼ガスを完全燃焼させることで、排気ガス中の有害物質を浄化することを目的とする。現在までの研究により、PM低減システムによるPMの低減効果についてはすでに実証済みであり、今後は実際の船舶で運用するため、実用化に向けた諸問題点を解決する段階にある。

現在まで検討してきたPM低減システムは、排気管に接続するフィルターユニット内の雰囲気温度を高温化する方式を採用し、ディーゼルエンジン本体の性能への影響を小さくする方針であった。これが理想的な方式であるが、PM低減率に対して消費電力が非常に大きくなる問題があり、費用対効果が懸念される。また、排気ガスに関しては浄化できるが、環境負荷を考慮すると必ずしも最良の方法とは言えない。現在までの研究から、フィルター形状の最適化により、ディーゼルエンジン本体への影響を抑制可能なことが分かっている。

実用化を念頭に置いた場合、環境負荷低減を目的にPM低減システムの消費電力量を低く抑える必要がある。そこで、省電力高周波電源を開発するとともに、システムの連続運用におけるフィルターの耐久性とPM低減効果について検証する。

### 3. 研究の方法

本研究では、PM低減システムを船舶に搭載することを前提に、PMを捕集するフィルターユニットに適した電源を開発する。

提案システムは、PMの加熱に高周波誘導加熱を用いる。フィルターには強磁性体金属を用いることで容易に高温加熱できるが、温度上昇とともに物性が変化するため、電気回路としての等価パラメータが変化する。この変化に対応するには高精度の周波数制御を行うことが一般的であるが、本研究ではシンプルな制御でフィルターの高温加熱と温度制御を実現するインバータと、その駆動法を提案する。

#### 4. 研究成果

##### (1) PM 捕集用フィルターの誘導加熱等価負荷

PM 低減システムは誘導加熱を用いて PM を加熱し、浄化させることが特徴である。このとき、捕集フィルターには誘導加熱に適した強磁性金属のフィルターを用いる。ただし、強磁性金属にはキュリー温度が存在し、キュリー温度以上の高温に加熱すると、常磁性金属に変化する特性を持つ。このとき、誘導加熱の等価負荷となるインダクタンス  $L$  と抵抗  $R$  の値が急激に変化する。図 1 に、強磁性金属で構成された PM 捕集用フィルターを加熱した際の温度特性の一例を示す。温度変化に伴い、 $L$  と  $R$  が変化していることが分かり、また、キュリー温度となる約 650 で急激にこれらの値が変化していることが分かる。この変動に対してソフトスイッチングを維持するなど、安定な運転を維持できない場合、スパイク電圧やサージ電流により、誘導加熱電源が故障する恐れがある。そこで、電源の安定駆動のために共振追尾制御が利用される。一般的には PFM (パルス周波数制御) が利用される。

図 2 は、インダクタンスの値が変化した場合に対応する共振周波数、および、駆動周波数が一定だった場合に制御すべき共振コンデンサの値を示す。PFM を適用した場合、駆動周波数が、図 2 に示す各温度に対応する共振周波数へ制御される。これにより、共振を維持し、電源の安定駆動を実現する。

しかし、誘導加熱では周波数が変化すると浸透深さも変更されるため、加熱箇所が変わってしまう。結果として、金属フィルターを効率的に加熱できない。この点を考慮すると、

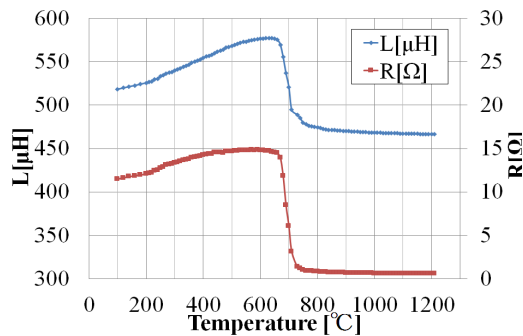


図 1 誘導加熱負荷の温度特性

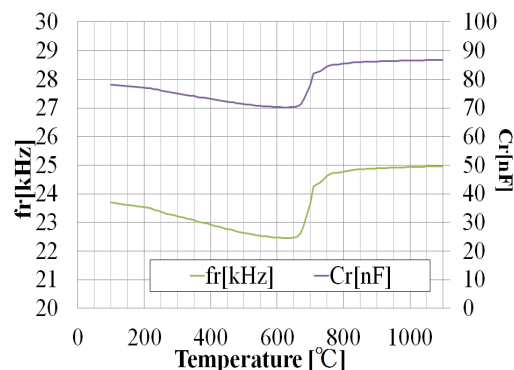


図 2 共振追尾

駆動周波数は一定であることが望ましい。図 2 のように、共振コンデンサの値を制御できれば、周波数は一定のまま、電源を安定に駆動できる。これを実現するため、本研究では擬似可変コンデンサを提案し、その有用性を検証した。

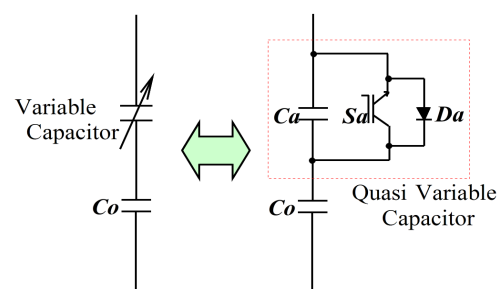
##### (2) 擬似可変コンデンサと主回路構成

図 3 に提案する擬似可変コンデンサを示す。擬似可変コンデンサには、直列接続タイプと並列接続タイプの 2 種類がある。直列接続タイプの擬似可変コンデンサは、 $C_o$  と  $C_a$  を直列に接続しており、補助スイッチ  $S_a$  の導通率を制御することで、合成容量を調整する。同様に、並列接続タイプの擬似可変コンデンサは、 $C_o$  と  $C_a$  が並列に接続されており、この合成容量を調整する。

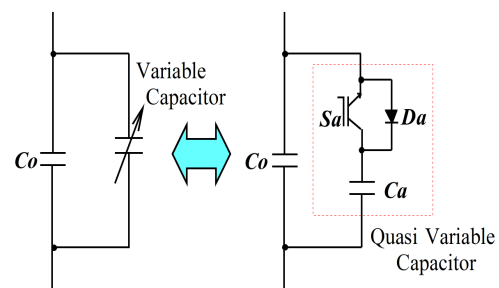
図 4 に提案する擬似可変コンデンサを適用した PM 低減システム用高周波電源の回路構成を示す。従来の SEPP (Single Ended Push Pull) インバータに擬似可変コンデンサを付加した回路構成になっている。図 5 に、各スイッチのゲート信号タイミングを示す。補助スイッチ  $S_a$  を PWM (Pulse Width Modulation) することで、擬似可変コンデンサの値を調整し、加熱温度が変化しても共振は維持される仕組みとなっている。各信号は、直列接続タイプと並列接続タイプの両方に適用する。

##### (3) 回路動作

提案する 2 種類の擬似可変コンデンサを適用した高周波電源で金属フィルターをキュリー温度以上の高温に加熱した際の動作波形を、図 6 および図 7 に示す。図 6 は直列接続タイプ、図 7 は並列接続タイプの実験結果を示す。金属フィルターを加熱した結果、すべての温度で共振を維持し、主スイッチに関

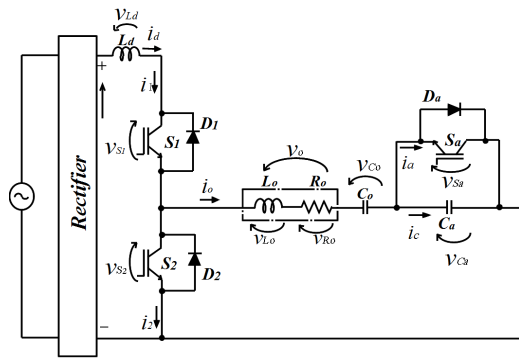


(a) 直列接続タイプ

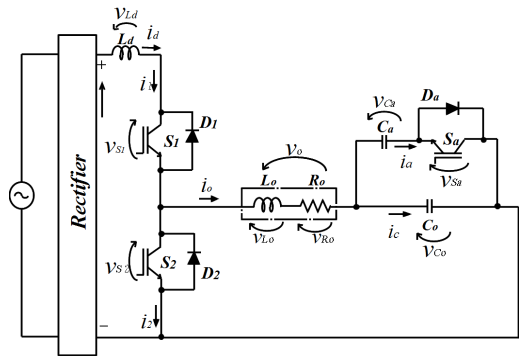


(b) 並列接続タイプ

図 3 擬似可変コンデンサ



(a) 直列接続タイプ適用



(b) 並列接続タイプ適用

図4 主回路構成

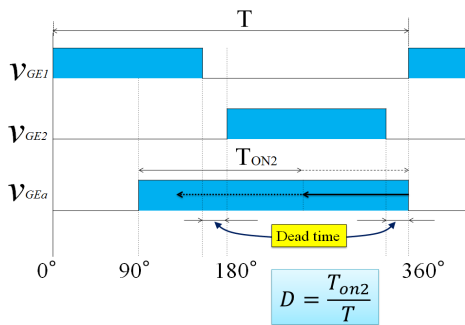


図5 ゲート信号タイミング

しては ZCS (ゼロ電流スイッチング) を、補助スイッチに関しては ZVS (ゼロ電圧スイッチング) を実現していること示される。したがって、すべてのスイッチでソフトスイッチングを実現しており、両タイプともに、安定に金属フィルタを加熱可能なことが実証された。

図6と図7の実験結果を比較すると、補助スイッチにかかる電圧および電流だけが異なっていることが分かる。図8、図9に、両タイプにおける各温度での補助スイッチ電圧最大値および補助スイッチ電流最大値の比較を示す。これらの結果から、補助スイッチ電圧に関しては、直列接続タイプを用いると、低く抑制されることが分かる。また、補助スイッチ電流に関しては、並列接続タイプを用いることで抑制できることが示される。したがって、直列接続タイプは低耐圧形のス

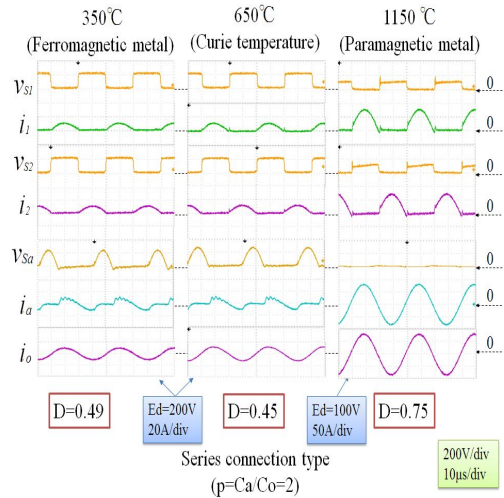


図6 動作波形 (直列接続タイプ)

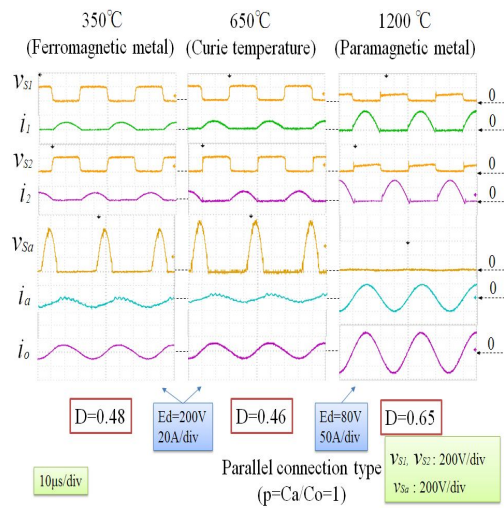


図7 動作波形 (並列接続タイプ)

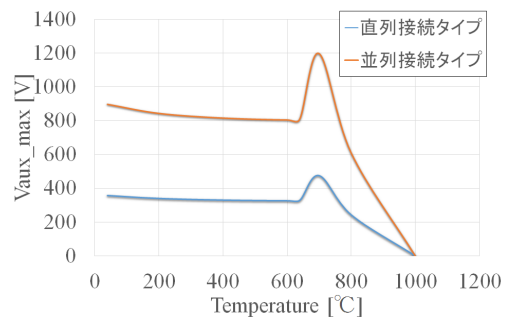


図8 補助スイッチ電圧最大値の比較

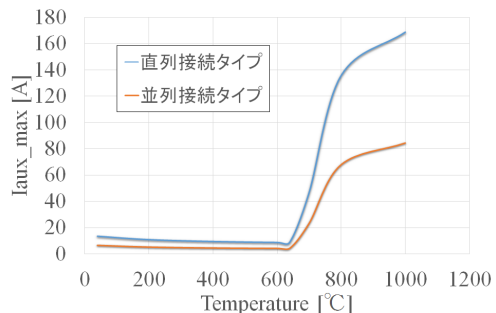


図9 補助スイッチ電流最大値の比較

スイッチングデバイスを利用できることが利点であり、並列接続タイプは、スイッチングデバイスの導通損失を抑制できることが利点である。金属フィルターを長時間、高温に加熱維持する場合は並列接続タイプが適しており、急速加熱と運転停止を繰り返すような間欠運転には直列接続タイプが適しているといえる。

#### (4)PM 低減システムの運転

運用試験を実施するため、実際に本校内燃総合実験室の船用ディーゼル機関に PM 低減システムを設置した。図 10 にその外観を示す。システム装着時と非装着時における PM 低減率およびディーゼルエンジンへの影響を比較するため、既設の排気管から分岐して PM 低減システムを設置している。

実用化を念頭に置くと、環境負荷の低減は最重要項目となり、PM 低減システムの消費電力量を低く抑える必要がある。そこで、PM の捕集と浄化を同時に行う連続再生方式と、PM の捕集と浄化を交互に行う間欠捕集方式を比較した。フィルター再生に関しては、間欠運転方式でも問題ないことが分かり、システムの連続運用におけるフィルターの耐久性に関しても、連続運転と間欠運転で差異が大きいことが分かった。ただし、船舶のように長い航海時間、連続でディーゼルエンジンを運転する場合、フィルターユニットを 2 つ以上設置する必要がある。そのためのスペースが必要になる。この点について、今後は、予備ユニットなしで間欠運転によるフィルター再生が可能か検証していきたいと考えている。

また、実際にディーゼルエンジンを運転し、PM 低減システムを運用し、排気ガスのスモーク濃度を計測した結果、ほぼ PM を除去できることが実証された。しかし、PM 捕集フィルターを再生する際、PM 低減システム単体で駆動した際に比べ、実際のエンジンに装着すると、電力消費量が過大になってしまうことが判明した。その原因として、漏れ磁束による影響が懸念されたため、その対策として、排気管とシステムの絶縁強化、および、磁気シールドを設置した。しかし、装置の大型化、

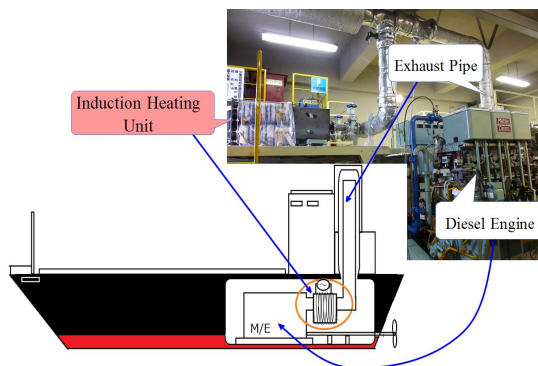


図10 PM低減システム

重量化につながるだけでなく、完全なシールドできないのが現状である。現在、その最適な対策について検討中である。

#### (5)結果と今後の課題

PM 低減システムは、連続運転よりも間欠運転が環境負荷低減を考慮すると適しているといえる。つまり、PM をフィルターで捕集した後、PM を高温燃焼させてフィルターを再生する。そのため、PM 低減システムは、間欠運転に適した直列接続タイプの擬似可変コンデンサを適用することが望ましいといえる。

実用化を念頭に、高周波電源とフィルターユニットをそれぞれ検討し、システムを構築した。PM 低減システム単体で運転した結果、提案する擬似可変コンデンサによって、フィルターを高温に加熱しても常に共振を維持し、安定動作を実現することが実証された。さらに、常にソフトスイッチングを維持することで、電源効率が向上し、システム運用上の消費電力を抑制できることを示唆した。

今後は、実際にディーゼルエンジンに装着してシステムを運転した場合の、損失低減が重要課題と考える。実用化には、漏れ磁束対策、絶縁対策が重要であり、この対策を検討していく。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

Sachio Kubota, Masami Fukushima, "Characteristics of Quasi Variable Capacitors for Induction Heating", Proceedings of 11<sup>th</sup> IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 査読有, (Sydney, Australia), (2015-6)

Sachio Kubota, Masami Fukushima, "Soft Switching Inverter for Induction Heating with Power Factor Control Function Using Quasi Variable Capacitor", Proceedings of 16<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, 査読有, (Antalya, Turkey), (2014-9)

Sachio Kubota, Fumio Ito and Yoshihiro Shimaoka, "Quasi Variable Capacitor Applied to Soft Switching Inverter for Induction Heating", Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 査読有, (Denver, USA), (2013-9)

Sachio Kubota, Naoki Yamamoto, Yoshihiro Shimaoka, Fumio Ito, "Novel Power Supply for Induction Heating with Power Factor Control Using Phase Shift", Proceedings of 15<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference, 査読有, (Novi Sad, Serbia), (2012-9)

〔学会発表〕(計3件)

福嶋将視, 窪田祥朗, 「誘導加熱電源に適用する擬似可変コンデンサの特性解析」,

電気学会全国大会講演論文集，東京都市大学，  
(2015-3)

福嶋将視，窪田祥朗，「一定周波数で駆  
動する誘導加熱用ソフトスイッチングイン  
バータ」，電気学会産業応用部門大会 講演  
論文集，東京電機大学，(2014-8)

窪田祥朗，廣瀬大和，「擬似可変コンデ  
ンサを用いた誘導加熱用ソフトスイッチ  
ングインバータ」，電気学会全国大会講演論  
文集，名古屋大学，(2013-3)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

窪田 祥朗 (KUBOTA Sachio)  
鳥羽商船高等専門学校・商船学科・准教授  
研究者番号：20290760

### (2) 研究分担者

なし( )

### (3) 連携研究者

なし( )