

## 発電機・エネルギー貯蔵システム切り替え運転による

### 電気推進船の燃料消費特性

東京海洋大学 ◎澤本美咲 木船弘康

#### 1. はじめに

舶用の発電機原動機は負荷率が80%前後で最も高効率になる(図1)。しかし、船内の電力需要は状況に応じて変化するため、常に負荷率を80%程度に維持した運転を行うことは困難である。これに対し、複数台の発電機を持つディーゼルエレクトリック船では電力需要に応じて発電機の運転台数を制御することができるため、負荷変動への柔軟な対応ができるとされる<sup>(1)(2)</sup>。しかし、負荷変動幅に対して発電機定格が大きいために、電力需要と供給能力とのギャップが大きくなりやすい。その結果、実際には中低負荷での運転時間が長くなる傾向にある。発電機の長時間にわたる低負荷運転は、効率低下による燃料消費の悪化という問題を引き起こす。また、燃焼室温度の低下によるカーボンの付着<sup>(3)</sup>やシリンダライナの低温腐食<sup>(4)</sup>など、留意すべきことも多い。

この課題に取り組むため、エネルギー貯蔵システム(ESS, Energy Storage System)の導入によって、発電機が高負荷かつ高効率な運転を維持できるようサポートする手法が提案されている<sup>(5)(6)(7)</sup>。

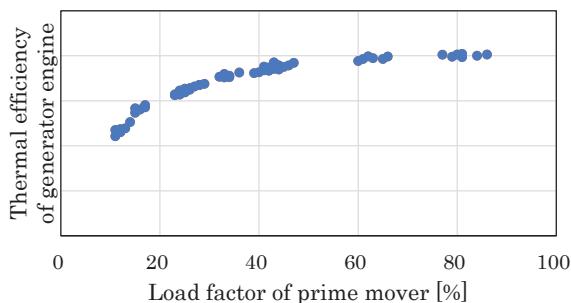


Fig.1 発電機原動機の負荷率と効率の関係

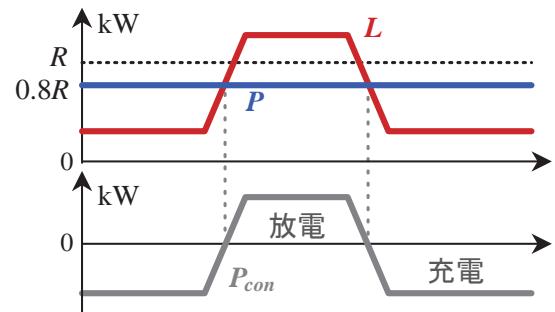


Fig.2 ESS動作の概略

ESSは大容量電池と電力変換器で構成され、発電機群と並列に交流母線へと接続する。これにより、ESSから放電して発電機と並列運転させることで、一時的に電源として利用できる。あるいは、発電機に対して負荷としてふるまうよう充電動作をさせることもできる。この作用により、発電機の負荷率をESSにより間接的に制御することが可能になる。

図2において、 $L$ は船内の電力需要、 $P$ は発電機の出力、 $R$ は発電機の定格出力、 $P_{con}$ はESSの充放電電力(放電・電源動作を正、充電を負と定義)である。ESSが動作するまでの制御パラメータとして、発電機効率の負荷率を80%(=0.8R[kW])に維持することを目標としている。 $L$ が0.8Rを下回る場合、発電機の負荷率が0.8Rに維持されるよう、ESSが充電動作をして一時的に負荷になる。一方、 $L$ が0.8Rよりも大きくなる場合には、ESSを放電させることによって発電機の負荷率を0.8Rに抑えるとともに、発電機の追加始動を抑制する。このように、ESSの充放電によって発電機を高負荷率(=高効率)動作させることで、燃料消費量の節減を目指す。

なお、ESSによる燃料節減効果は、搭載電池容量が多ければ多いほど顕著になることが明らかになっている<sup>(8)</sup>。しかし依然としてリチウムイオン電池は高価であり、なおかつ専用の設置スペースを必要とすることから、際限なく容量を増やせるわけではない。そこで本研究は、電池容量を大きくせずに制御手法を見直すことによって、ESSによる燃料節減効果を高める手法を提案する。

## 2. シミュレーション条件

ESSによる燃料消費節減効果を評価するため、東京海洋大学の所有する電気推進船「神鷹丸」の交流電源系統にESSを接続した場合のシミュレーションを構築し、解析を行った。

神鷹丸には定格750kWの発電機が3台搭載されている(表1)。そこに、リチウムイオンバッテリとAFE(Active Front End)コンバータ、チョッパにて構成されるESS(図3)を並列に接続する(図4)。バッテリは公称電圧3.5Vのバッテリセルを直列に160個、並列に50個接続したものを規定する(表2)。

Table.1 神鷹丸の発電機仕様

発電機定格出力[kW]	750
使用燃料(A重油)低位発熱量[MJ/kg]	42.3
発原動機定格出力[kW]	810
発電機原動機回転数[min <sup>-1</sup> ]	900

Table.2 バッテリの仕様

充電終止電圧[V/cell]	4.2
公称電圧[V/cell]	3.5
放電終止電圧[V/cell]	2.8
電流容量[Ah/cell]	10
内部インピーダンス[Ω/cell]	0.01
バッテリセルの直列数[個]	160
バッテリセルの並列数[個]	50

Table.3 電力変換器の仕様

IGBT 定格電圧[V]	1200
DC リンク部電圧[V]	690
スイッチング周波数(chopper)[kHz]	3.6
スイッチング周波数(AFE)[kHz]	5.0

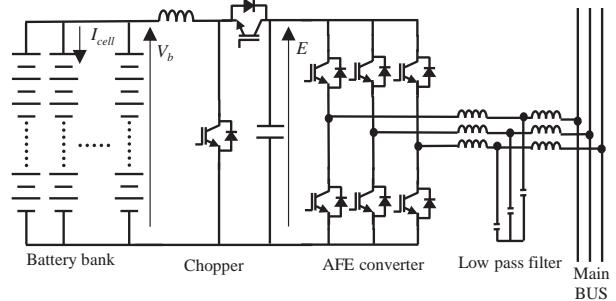


Fig.3 ESS の回路構成

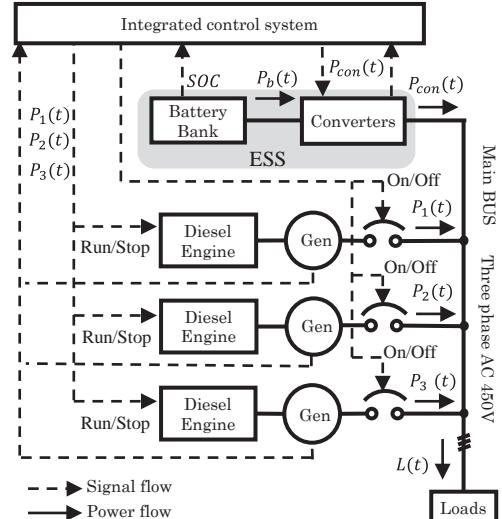


Fig.4 ESS 導入時の電気系統図

チョッパは放電時に昇圧動作、充電時に降圧動作させ、DCリンク部電圧Eは690Vとした。THD改善を目的として、AFEコンバータのスイッチング周波数を若干高めに設定している(表3)。コンバータ部の電力損失(スイッチング損、導通損、銅損、冷却損)はテーブル化してシミュレーションに格納した。

シミュレーションは図4に示す電力の向きを正と

して扱い、燃料消費と電力、信号の流れをシナリオに沿って毎秒計算した。

解析に使用するシナリオとして、2023年2月23日正午から2023年3月4日正午までの9日間に神鷹丸で実測された電力需要データを用いた(図5)。また、シミュレーションの妥当性を確保するため、ESSの充電率がシミュレーション開始時と終了時で一致するように解析を行った。

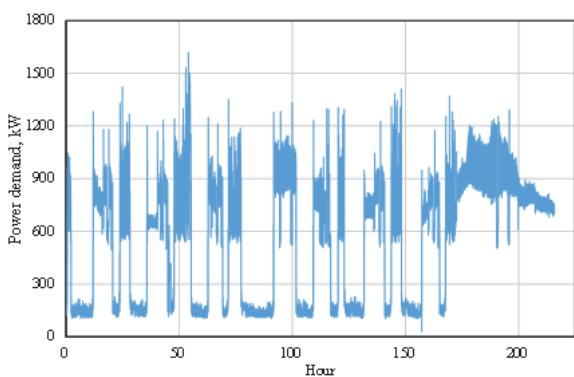


Fig.5 2023年2月23日正午から2023年3月4日の期間に神鷹丸で実測された電力需要

### 3. 先行研究における運用

先行研究では、運転中の発電機の供給余力を電池に吸収させ、電力が不足すれば電池がアシストする、という単純な需給ギャップの調整機能をESSに求めている。しかし図6に示す通り、ひとたび電池のSOCが100%に到達してしまうと、それ以上電池を負荷として運転することができない。そのためESSが不稼働状態となり、発電機負荷率を高く維持し続けられないという状況に陥った。電池容量を増やすことでESSが稼働できる時間を増やすことができるものの、一般的にはコスト、設置スペースの制約があるため、現実解とは言い難い。

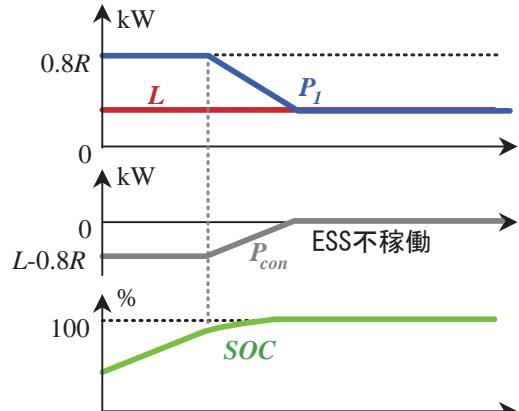


Fig.6 充電完了によるESS不稼働状態

### 4. 提案する運用

SOCが100%に到達することによってESSが不稼働状態に陥ってしまう状況を回避するため、本研究では発電機の負荷率に加えて、SOCの大きさによってもESSの充放電を切り替える運用方法を提案する。SOCが上限値を超える場合は放電し、下限値を下回れば充電する、という運用にすることで、電力需要に関係なく常にESSを稼働させられることが期待できる。しかし、図6のように $L$ が $0.8R$ を下回っている状況でESSを放電させると、供給電力が $L$ に対して過剰になり、結果として発電機の分担すべき負荷が更に低下してしまう。そこで本運用では、ESSを放電させることで供給電力が過剰になる場合には、運転中の発電機を停止させる操作を組み込んだ。

図7は、図6と同様に発電機1台で賄うことができる電力需要 $L$ における本運用のイメージ図である。SOCが10%~90%の範囲内である場合は、先行研究の運用と同じく運転中の1号発電機の出力 $P_1$ が $0.8R$ となるようにESSを充電させている。SOCが90%に達したならばESSを放電動作に切り替えるとともに1号発電機を停止させ、ESSによる単独放電を行う。また、ESSの放電動作中にSOCが10%を下回ったならば、発電機を始動してESSを再び充電動作に

切り替え、発電機の負荷率が 80 %に維持されるよう制御を行う。

このように、SOC に応じて ESS の充放電を切り替えるとともに、発電機を停止して ESS が単独運転で電力供給をするような切り替え運転を運用モードとして加える。これにより、ESS が不稼働状態になることを抑制し、発電機の負荷率を常に高い状態に維持することを目指す。

なお、図 7 は運用のイメージを把握しやすくするため、発電機原動機のアイドリング状態や負荷移行などの細かな動作は省略している。

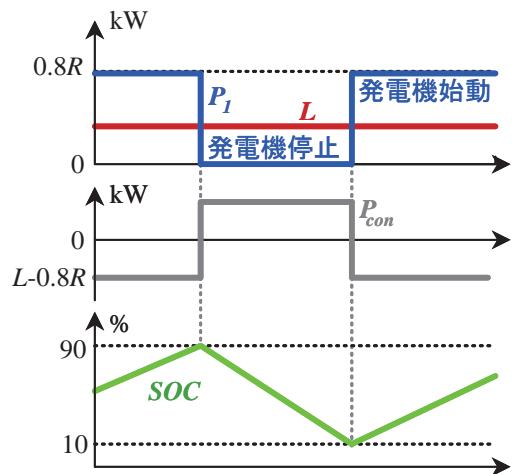


Fig.7 SOC に応じた充放電の切り替えによる ESS 不稼働状態の回避

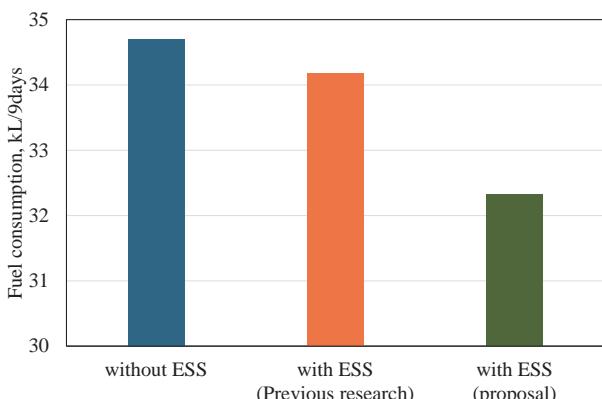


Fig.8 燃料消費量の比較

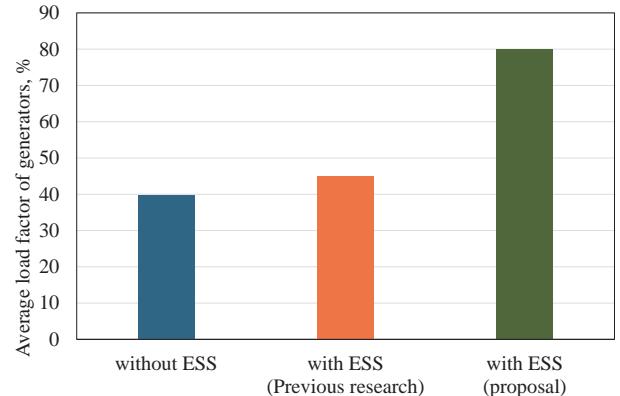


Fig.9 運転中の発電機一台当たりの平均負荷率の比較

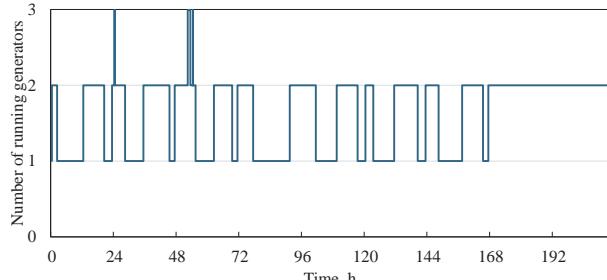
## 5. シミュレーション結果

図 8 に燃料消費量のシミュレーション結果を示す。ESS を搭載しない場合の 9 日間における燃料消費量は 34.7 kL である。これに対し、表 1~表 3 の条件で設計し ESS を搭載した先行研究における手法で制御した際の燃料消費量は 34.2 kL であった。一方、ハードウェア仕様は一切変更せずに、制御アルゴリズムのみを変更した提案手法では 32.3 kL となった。ESS を搭載しない場合と比較すると約 2.3 kL、先行研究における手法と比較すると約 1.8 kL の燃料節減効果を期待できる結果となった。

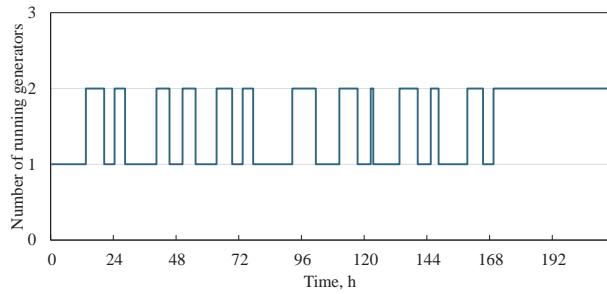
この結果を得た要因を解析する。まず、運転中の発電機一台当たりの平均負荷率を算出した(図 9)。ESS を用いない場合および先行研究の運用では発電機の負荷率は 50%を下回っていたが、本運用では約 80 %となった。本提案制御アルゴリズムの採用により、発電機の平均負荷率が大幅に改善されており、結果として高効率条件で運転できることが示された。

また、先行研究では燃費改善のメカニズムを解釈する方法として、発電機の並列運転時間が少なくなるほど燃料消費の節減効果が表れるとしていた。そこで、発電機の運転台数の推移について調べた(図 10)。(b)先行研究と比較して、(c)本提案方式では発電機が

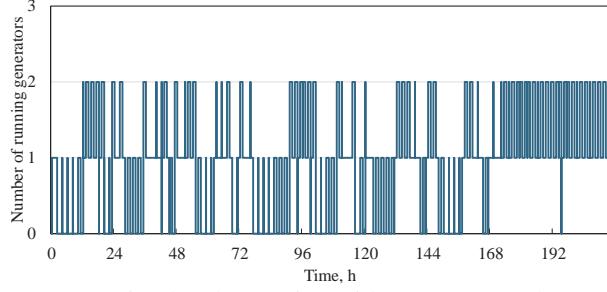
頻繁に自動発停しており、発電機が 2 台以上並列で運転する時間を約 61 時間削減することに成功している。加えて本運用では、ESS が単独で電力供給(放電)をすることによって、運転中の発電機台数が 0 台になる時間が約 62 時間あった。



(a) Observed original data (without ESS)



(b) Simulated operation with ESS (previous research)



(c) Simulated operation with ESS (proposal)

Fig.10 発電機の運転台数の比較

2 台以上の発電機が並列運転する時間を削減できた要因として、ESS が不稼働状態にあったものを改善できたことが考えられる。そこで、SOC の変化も含めて各電源の出力状態を詳細に解析する(図 11)。図 11 はシミュレーション開始から 48~56 時間目における電力需要  $L$  と 1 号発電機の出力  $P_1$ 、2 号発電機の出力  $P_2$ 、電池の充放電電力  $P_{con}$ 、SOC である。先行研究の運用において、48~50 時間目の期間では、1

号発電機を単独運転するとともに ESS を放電している。このとき、ESS は  $P_1$  が 600 kW になるよう制御しており、さらに 2 号発電機の追加始動を抑制できている。SOC が 10 %を下回ると、2 号発電機を立ち上げて 1 号発電機と並列運転を開始し、ESS は放電から充電へと動作を切り替える。このとき、ESS は 2 台の発電機が負荷率 80 %で運転できるよう、充電電力を制御している。しかし、51 時間目付近で SOC が 100 %に到達すると、 $P_{con}$  が 0 になり、 $P_1$ 、 $P_2$  は  $L$  の変動を追って低下している。さらに、その後 2 時間程度 ESS の不稼働状態が続いている。53 時間目付近で  $L$  が 1,200 kW 程度まで上昇すると、ESS が放電し、再び  $P_1$ 、 $P_2$  が 600 kW になるよう制御できている。 $L$  が 600 kW 程度まで低下すると、ESS は充電動作に切り替わる。このとき、SOC が高い状態で充電が開始したので、SOC がすぐに 100 %に到達し、またしても ESS が不稼働状態に陥っている。また、55~56 時間目の期間では電力需要が 200 kW 程度まで低下したので 2 号発電機を停止させ、1 号発電機の単独運転を行っているが、このときも SOC が 100 %であるために ESS の充電動作が行えず、 $P_1$  が低下している。このように、先行研究の運用では、SOC が 100 %に達したことにより ESS の充電動作ができず、発電機出力を期待通りに制御できていない期間が存在していることが確認できる。

一方で、提案する運用では  $P_{con}$  が 0 になる期間がなく、ESS が常に稼働している。SOC が 90 %に到達すれば放電し、10 %を下回れば充電する、という単純なサイクルを繰り返すことで、 $L$  の大きさや発電機の運転状況にかかわらず ESS を活用することができている。結果として、発電機出力  $P_1$ 、 $P_2$  はいずれも運転中は 600 kW 程度を維持しており、 $L$  の変動による影響を受けていない。また、先行研究の運用では 2 号発電機が 4 時間以上継続して運転しているのに対し、提案する運用では、SOC が 90 %を超えると 2 号発電機を停止させている。これによって、発電機の

並列運転時間が大幅に削減されていることが確認できる。また、 $L$  が 200 kW 付近まで低下すると、発電機を 2 台とも停止させて、ESS による単独放電を行っている。

このように、本研究で提案する運用では、先行研究の運用に比べて、ESS の稼働率を高めるとともに発電機の運転台数を削減できていることが確認できた。

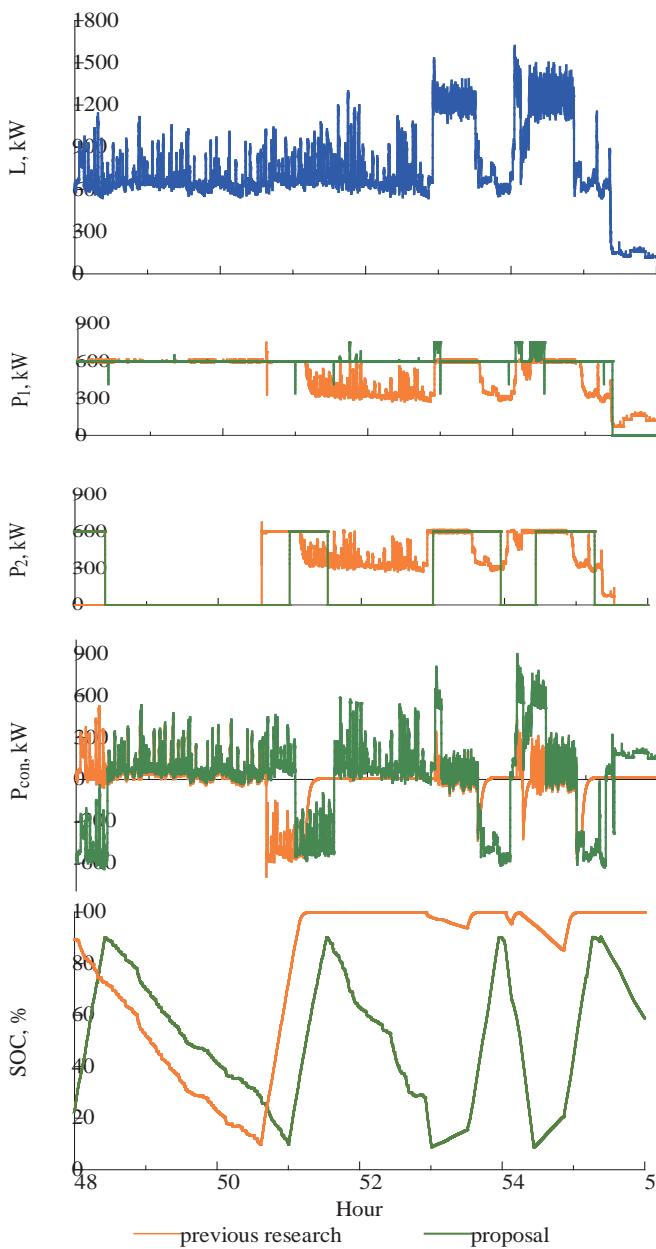


Fig.11 電力需要と発電機出力、ESS  
電力および SOC の推移

## 参考文献

- (1) 藤田昌考, 大沢博, インバータ駆動による船舶電気推進(2)-交流可変速駆動装置の特徴と動向, 日本マリンエンジニアリング学会誌第 40 卷第 3 号(2005), 50-55.
- (2) 服部和夫, 板坂均, 船用電気機器(動力), 日本マリンエンジニアリング学会誌第 42 卷第 4 号(2007), 104-109.
- (3) 新井満, 補助発電機用ディーゼルエンジン, 日本マリンエンジニアリング学会誌第 45 卷第 2 号(2010), 54-57.
- (4) Stig B. Jakobsen, 上田昭志, 低負荷運転とシリンドライナ低温腐食に対する対応, 日本マリンエンジニアリング学会誌 第 49 卷 第 1 号(2014), 43-51.
- (5) Dedes EK, Hudson DA, Turnock SR. Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping. Energy Policy 2012; 40(1), 204–218.
- (6) Mo O, Guidi G. Design of Minimum Fuel Consumption Energy Management Strategy for hybrid marine vessels with multiple diesel engine generators and energy storage. In In 2018 IEEE Transportation and Electrification Conference and Expo, ITEC 2018 in Long Beach, California. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.: Piscataway, NJ(2018), 537–544.
- (7) Norichika Nagayama, Hiroyasu Kifune, Impact of Rated Power of Power Converter in Energy Storage System on Fuel Consumption to Improve Efficiency of Onboard Generators, Ieej Transactions on Electrical and Electronic Engineering (2025), [1931-4973].
- (8) 永山紀周, 木船弘康, 船舶の発電機における燃料消費量節減を目的とした電池システムのシミュレーション, 電気学会研究会資料(半導体電力変換/家電・民生/自動車合同研究会-1), 35-40.
- (9) 永山紀周, 木船弘康, Fuel Saving Effects using ESS for Shipboard Generators and Influence of Load Demand Variations, 第 93 回マリンエンジニアリング学会学術講演会講演論文集(2023), 261-262.