

136 電池推進船らいちょう N を用いた運航プランとシステム構成について

東京海洋大学 ○竹内 透 山岸 雅 木船 弘康

1. はじめに

本研究では電池推進船が定期観光船のように決められた 1 日の間に複数回運航する状況を想定する。一般的に排水量型の船舶では船速と所要推進動力との間には 3 乗の関係があり船速を上げれば消費エネルギーが著しく増加する。これは電池推進船では電池の消耗に関連し電池残量(以下 SOC:State Of Charge と呼称する)の適切な管理は安全運航に不可欠な要素となる。このため過去の研究事例では SOC の適切な管理を目的とした運航支援システムの開発が行われている。これは現在地から目的地までの航行距離と SOC のデータから許容消費電力を算出し、推奨航行速度等を算出する仕組みである。しかし SOC を考慮に入れた運航スケジュールの策定あるいは逆に運航スケジュールを考慮に入れた電池システム構成のあり方については未検討のままである。そこで本研究では船速、推進所要電力、航行時間、離着岸作業や充電作業の時間、船内ユーティリティ消費電力、SOC、電池電圧、充電特性をも加味した運航シミュレーションを作成した。

このシミュレーションでは電池推進船「らいちょう N」をサンプルとして用いた。速度と消費電力の関係や船内ユーティリティ電力の消費動向については「らいちょう N」での実測データに基づいて関係式のパラメーターを同定した。そしてこのシミュレーションを用いて「らいちょう N」定期観光船として見立てた時の電力消費傾向を計算した。さらに SOC に余裕のある安全運航を実現する上で電池システムをどのように構成すべきかについても検討を行った。

2. 電池推進船らいちょう N について

2.1 らいちょう N の仕様

らいちょう N はリチウムイオン電池に蓄えた電力を使って航行する電池推進船である。本船は伝達効率やコストでは劣るが NOx、SOx といった有害物質を排出せず、大きな発電機による騒音や振動も無いため静かで快適な船が実現出来る。

表 1. らいちょう N の主要目

全長	14m	モータ定格 定格回転数	45kW 4880rpm
船幅	3.5m	インバータ定格 スイッチング周波数	150Arms
総トン数	9.1GT	電池容量	13.2kWh

2.2 電池システム

らいちょう N の電気系統の概略を図 1 に示す。本船では左舷側と右舷側の電池が独立した系統を持っており、別々に充電する仕組みとなっている。各舷の電池は図 2 に示すように電池モジュールを直並列に接続して構成しており、各モジュール内には 24 個のセル(12 直列×2 並列)が組み込まれている。現在の「らいちょう N」は左舷側が $N_s=12$ 、 $N_p=5$ の構成で 60 個、右舷側が $N_s=12$ 、 $N_p=6$ の構成で 72 個であり、全部で 132 個の電池モジュールを搭載している。なお、船内ユーティリティ電力を右舷側電池より供給する仕組みとしているため、右舷側の方が電池モジュール数が多くなっている。

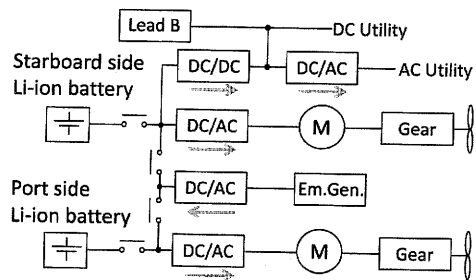


図 1. 電気系統図

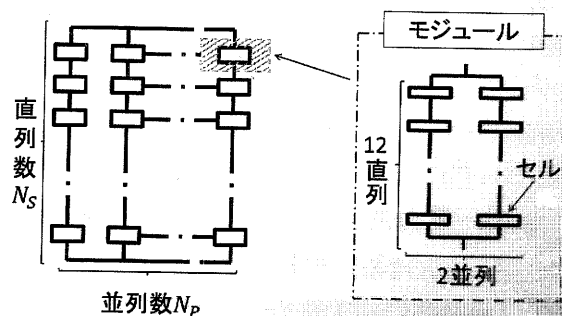


図 2. 電池システム構成図

2.3 CHAdeMO について

らいちょう N の充電方法は CHAdeMO 方式による急速充電を採用している。CHAdeMO とは電気自動車用の急速充電規格である。環境意識の高まりから電気自動車の数が徐々に増えており、これに伴って充電インフラの整備が急ピッチで進められている。CHAdeMO プロトコル準拠の急速充電器メーカーは世界で 40 社を超えており、設備としての価格はこなれてきている。このため、らいちょう N のようにシステム全体を CHAdeMO プロトコルに準拠することは充電インフラのオペラビリティを高める利点がある。現在の CHAdeMO 方式では最大充電電力が 50kW、最高充電電圧 V_{max} が 500V、最大電流 I_{max} が 125A という設定になっている。このため、図 3 に示す範囲内で充電制御を行うことが可能である。

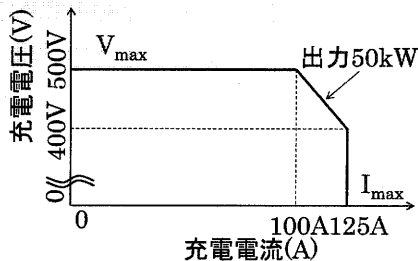


図 3. CHAdeMO を用いた際の電流と電圧の関係

2.4 船速と消費電力の関係

風や潮流等に強く影響を受けない環境条件の日に試験航走を実施し船速と推進所要電力の関係を実測した。その時の結果が図 4 である。船速と消費電力との間には指数関数的な関係が見て取れる。

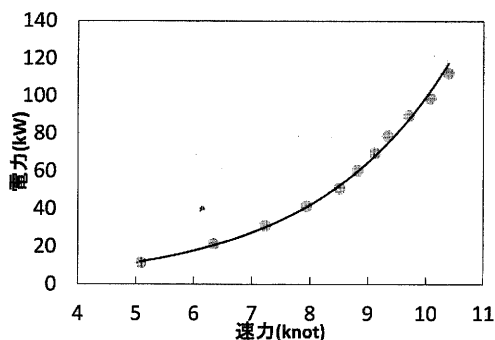


図 4. 船速と消費電力の関係

3. 電力消費シミュレーション

3.1 航路設定

1 航海 1 時間程度の定期観光船を模擬して東京海洋大学越中島キャンパスを出て 7.7mile の航路を走行して戻って

くるとい航路を設定した。航路は複数の区間(7 区画)に分け各区間における速力は出来るだけ一定として航走するものとする。運航条件としては 9 時 45 分から第一便の出港準備作業を開始し 10 時に出港、最終便(第 5 便)が 18 時 30 分過ぎに戻ってくるというスケジュールを設定した。

3.2 航海中に要する電力量の計算

各区間での消費電力を求める。区間 n の距離を L_n 、速力を V_n 、航走するのに要する時間を T_n とする。また一般に外乱を無視すれば船速と両舷の合計推進電力 P_n [kW] は図 4 のように線形の関係にあることから $P_n = f(V_n)$ 図 5 のように異なる区間に入って船速を変更する場合について考える。船体運動における時定数は極めて大きいため、加減速時のトランジェント状態も考慮に入れることとする。トランジェントの時間を T_{trans} [sec]、トランジェント状態での船速の平均値を V_n' とすると次式が成立する。

$$L_n = V_n' \cdot T_{trans} + V_n(T_n - T_{trans})$$

なお、実測では $T_{trans} = 30$ sec 程度であり、いずれの速度条件においても概略として次式の関係が得られた。

$$V_n' = \frac{1}{3}V_{n-1} + \frac{2}{3}V_n$$

ただしトランジェント状態での推進出力制御用のスロットルレバーの位置は一定であることから船速 V_n' 時の消費電力 P_n' は P_n にほぼ等しい。

$$P_n' = P_n$$

以上より区間 n を航走するのに必要となる電力量 Q_n [kWh] は

$$Q_n = P_n \cdot T_n / 3600$$

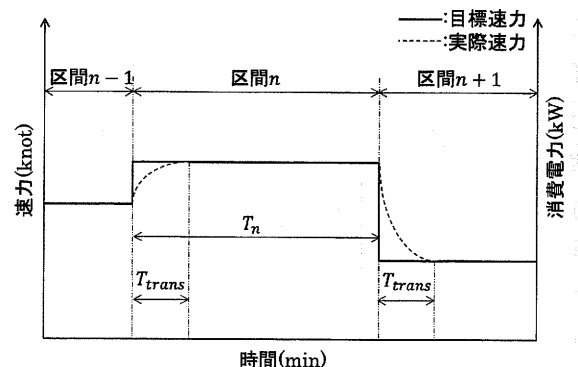


図 5. 時定数の関係

出港および入港の操船時に消費する平均推進電力を P_m 、出入港作業に要する時間を T_m とすると、このときの消費電力量 Q_m は

$$Q_m = P_m \cdot T_m / 3600$$

出港してから帰港するまでの区間数がKであるとき、1航海あたりの推進に要する両舷の消費電力量 Q_{prop} は次式で表される。

$$Q_{prop} = \sum_{n=1}^K Q_n + Q_m$$

なお、船内ユーティリティ電力の平均値を P_{util} とすると航海中の消費電力 $Q_{util-navi}$ は

$$Q_{util-navi} = P_{util} \cdot \left(\sum_{n=1}^K T_n + T_m \right)$$

左右舷の推進所要電力量は等しいと考えれば航海中に左舷および右舷で消費される電力量 Q_{navi-p} 、 Q_{navi-s} は次式で与えられる。

$$Q_{navi-p} = \frac{1}{2} Q_{prop}$$

$$Q_{navi-s} = \frac{1}{2} Q_{prop} + Q_{util-navi}$$

3.3 停泊中について

帰港後は出来るだけ速やかに充電を開始し少しでも長く充電することでSOCを回復させることとなる。リチウムイオン電池の特性はメーカーによって異なるが、SOCと電池電圧 V_b の間には概略線形の関係がある。

$$V_b = f(SOC)$$

先述の通り、CHAdemo規格では最大充電電力 P_{c-max} は50kW、最大充電電流 I_{max} が125Aである。このため充電電流は

$$I = \begin{cases} I_{max} & (V_b < 400V) \\ P_{c-max}/V_b & (V_b \geq 400V) \end{cases}$$

左舷側電池を充電する時間を T_p 、右舷側電池を充電する時間を T_s とする。このとき左舷および右舷に充電される電力量 $Q_{charge-p}$ 、 $Q_{charge-s}$ は

$$Q_{charge-p} = \int_0^{T_p} I \cdot V_b dt$$

$$Q_{charge-s} = \int_0^{T_s} I \cdot V_b dt$$

ところで、CHAdemo規格では急速充電中においてはSOCの厳密な管理を目的としてメインシステムを停止するため、ユーティリティ用電力をリチウムイオン電池から引き出すことが出来ない。しかし定期観光船であれば空調

やスナック用の冷熱機器があるため、船内電力供給を停止することは出来ない。そこで右舷側リチウムイオン電池を充電している間は低圧鉛蓄電池から電力供給することとなる。鉛蓄電池はリチウムイオン電池からDC-DC変換機を通して充電するため運用時間全体で考えれば、充電中のユーティリティ電力も右舷側リチウムイオン電池の負荷として算入される。よって停泊中のユーティリティ消費電力量 $Q_{util-berth}$ は次式で与えられる。

$$Q_{util-berth} = P_{util}(T_{pre} + T_p + T_s)$$

ただし、 T_{pre} は充電準備および片付け作業に要する時間である。

よって停泊中における各舷電池残量の増減量 ΔQ_{berth} は

$$\Delta Q_{berth-p} = Q_{charge-p}$$

$$\Delta Q_{berth-s} = Q_{charge-s} - Q_{util-berth}$$

3.4 運航スケジュール全体での電力消費

定格容量 Q_{rating} の電池のSOCが朝の出港準備作業開始時において $\alpha\%$ である時、初期電池残量 Q_{ini} は

$$Q_{ini} = \frac{\alpha}{100} Q_{rating}$$

である。1日の航海回数を f とすると f 回目の帰港時における左舷および右舷の電池残量 Q_{f-p} 、 Q_{f-s} は次式で表される。

$$Q_{f-p} = Q_{ini-p} - f \cdot Q_{navi-p} + (f-1)Q_{berth-p}$$

$$Q_{f-s} = Q_{ini-s} - f \cdot Q_{navi-s} + (f-1)Q_{berth-s}$$

安全運航の観点からは、ある程度電池残量 Q_f に余裕を持たせることが望ましい。

4. シミュレーション結果

4.1 船速と消費電力量

同じ航路を同じ時間で航走しても船速の出し方によって1航海あたりの電力消費量が異なる。そこで設定航路の各区画を出来るだけ8knot前後とした場合(パターン①)と7knot、8knot、9knotとおおまかに変化させた場合(パターン②)の電力消費計算を行った。図6が速度パターンを示し、図7が電力消費傾向を示している。この計算結果では1航海あたり約3.2kWhの電力消費量の違いが見られ、消費電力節減の観点からは出来るだけ増速しなくて済むように一定速で航走する方が良いことが分かった。

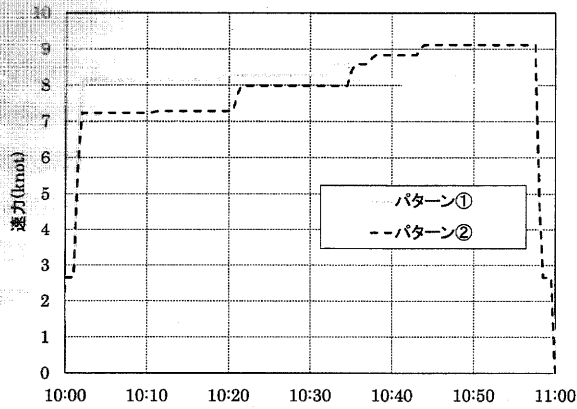


図 6. 速力の比較

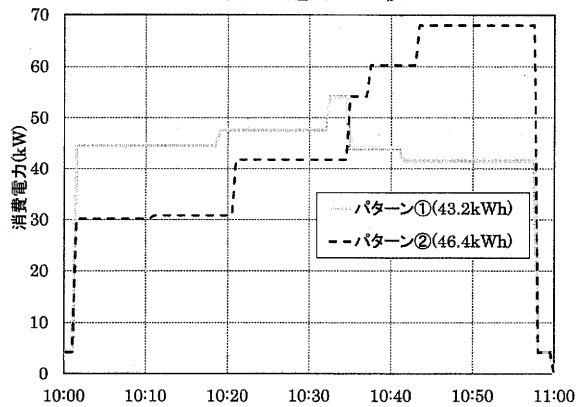


図 7. 消費電力の比較

4.2 電池システム構成の影響

本研究で作成したシミュレーションでは各区間の距離や船速等の航海条件だけでなく、ユーティリティ電力や停泊中の各舷の充電時間等もパラメータとすることが出来る。更に、電池システムのモジュール数(直列数、並列数)も変更することが出来る。ここでは電池モジュール直並列数の違いによる影響についてのシミュレーション結果を示す。このシミュレーション条件を表 2 に示す。図 8 は現行のらいちょう N(左舷 $N_p=5, N_s=12$ 右舷 $N_p=6, N_s=12$ モジュール数 132 個)をある速度パターンで航走させた時の両舷電池の SOC の推移を示したものである。18 時 30 分前後に 5 航海目を終了した時の SOC は両舷とも 20% を少し上回っている。次にモジュールの並列数を減らし、直列数を増した条件(左舷 $N_p=4, N_s=15$, 右舷 $N_p=5, N_s=15$ モジュール数 135 個)で同様の速度パターンで航走させた時の SOC の推移をシミュレーションした(図 9)。電池モジュール数が 3 個(約 3.3kWh)増えただけであるにもかかわらず、5 航海目の終了時の SOC は両舷とも 35% を上回っている。この主な理由は CHAdeMO の充電器特性が大きく影響している。電池推進船では SOC の低下とともにシステム電圧が V_b 低下する。そして充電器の最大充電電流が

125A で制限されているため、 V_b が 400V を下回ると、充電電力が 50kW を下回ってしまい、充電器能力を最大に引き出せなくなる。現行のらいちょう N では SOC=100% であっても V_b が 400V 未満であるため、50kW での充電が出来ない。一方で電池モジュールの直列数を大きくすると SOC が低下しても V_b が 400V を下回らなくなるため、最大電力での充電が可能となる。よってシステム電圧が出来るだけ高い方が短時間急速充電での SOC 回復に寄与するといえる。システム電圧が高くなると各機器の定格電圧に影響するという技術課題があるものの、電池推進船が定期運航する場合においては、SOC の余裕という点で良い効果がある。

表 2. シミュレーション条件

P_{util}	T_{pre}	T_s	T_p
2kW	6min	21min	21min

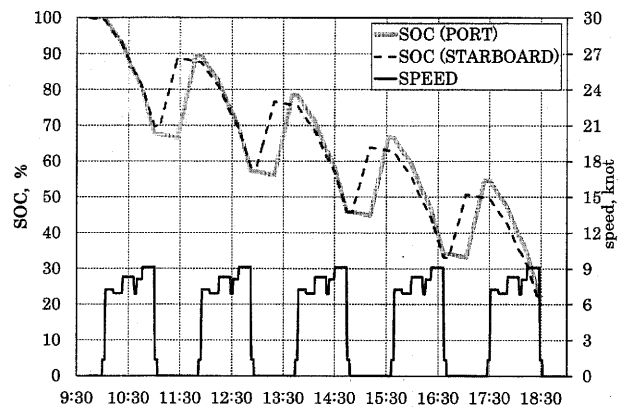


図 8. モジュール直列数 12 個の場合

(左舷 $N_p=5, N_s=12$ 右舷 $N_p=6, N_s=12$ モジュール数 132 個)

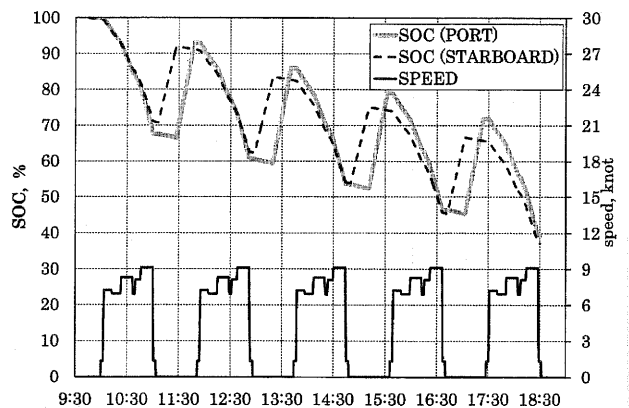


図 9. モジュール直列数 15 個の場合

(左舷 $N_p=4, N_s=12$ 右舷 $N_p=5, N_s=12$ モジュール数 135 個)

参考文献

- (1)清水悦郎、西村真佐人「電池推進船用運航支援システム」日本マリンエンジニアリング学会誌第 47 巻、第 1 号、pp.34-37(2012)