出力制限機能付電池推進船用運航支援システムの開発*

西 村 真佐人** 清 水 悦 郎*** 大 出 剛***

Development of Navigation Support System with Output Power Restriction Function in Electric Boat

Masato NISHIMURA*, Etsuro SHIMIZU***, Tsuyoshi ODE**

The possible cruising distance of the electric boats is still short compared with that of similar-sized internal combustion engine boats. Currently, electric boat operators have to estimate the possible cruising distance from weather (wind direction or power), wave (height and tide), and battery (voltage, current, state of charge) conditions. Battery failure has to be avoided from the viewpoint of operational safety. In order to solve this problem, a Navigation Support System (NSS) that provides the possible cruising distance and the recommended speed, and restricts the output power to achieve the desired operation, was developed. In this paper, in order to realize this system, an estimation algorithm and an output power restriction algorithm based on the analysis of characteristics of the boat, the motor and the battery discharge is derived. Verification tests in actual seas confirm the system's usability.

1. はじめに

電池推進船は電池コスト、重量、充電時間などの制約のため搭載できる電池容量は限られており、従来の同サイズの内燃機船に比べ航続可能距離が短い⁽¹⁾。例えば、東京海洋大学が開発した電池推進船、らいちょう I⁽²⁾の場合、電池容量は 18 [kWh]、モータ出力が 25 [kW]であるため、モータ定格出力で航行すると満充電状態から航行を開始しても 45 分弱、約 7 [mile] (Nautical mile, 1 [mile] = 1852 [m])しか航行できない。しかしながら、一般に、船舶の場合、出力は速度の約 3 乗に比例するという関係があるため、出力を落とし、船速を低下させると、その低下させる割合以上に抵抗を低下させることが可能であり、その結果、航続可能距離を延すことが可能である。現在は操船者が、気象、海象及び電池状態（電圧、残量、温度等）等の情報から船速を判断し、目的地へ到達可能な航続可能距離を確保できるように操船している。

限られた電池残量で目的地に到着するためには、このような繊細な操船が必要となるが、時々刻々と変化する航海状況に対応しながら行わなければならない、航続可能距離や最適船速の計算は非常に複雑であるため、船舶を操船しながら計算することは船舶の安全運航上好ましいことではない。

また、例えば自動車の場合、ガス欠や故障などで走行不能に陥っても道路の路肩に自動車を止め、救助を待つことが可能である。しかし船舶においては、航路には路肩のように他の船舶が行き来をしない“安全地帯”は無い。さらに潮流や風の影響を受け、短時間で流されてしまう可能性もある。そのため、船舶が航行不能に陥るということは、他の船舶との衝突や座礁といった海難事故の危機的状況に直結する。このため、船舶にとって航行不能状態は最も避けなければならない状況の一つである。

そこで本稿では、これらの問題を解決するために、先述のような計算を自動で行い、操船者に航続可能距離や目的地までの距離に応じた最適船速などの航海情報の提示する運航支援システムの開発を行う。そのうえで運航支援システム内において、もし航続可能距離が目的地までの距離を下まわった場合、操船者に対して警告を発し、さらに操船者がこの警告に気づかない場合を想定し自動的にモータ出力に上限を設けることで航続可能距離を確保する出力制限機能の開発を行う。

具体的には、まず、電池推進船用運航支援システムの開発の第一段階として、らいちょう I をモデルとし、実海域における実験を行うことで船体運動特性や電池放電特性を求め、得られた関係式を元に推定式を導出する。そのうえで、導出した推定式を用いて出力制限機能付運航支援システムを作成し、実海域にて出力制限機能の検証実験を行う。

*原稿受付 平成 24 年 12 月 12 日。

**東京海洋大学（東京都江東区越中島 2-1-6）。

***正会員 東京海洋大学（同上）。

2. らいちょう I 機器構成

らいちょう I の主要目及び主要機器の構成を表 1 及び図 2 に示す。図 2 において、各機器同士をつなぐ細線は信号線、太線は強電線を簡略的に表す。らいちょう I の動力機器は、主にモータ、インバータ、リチウムイオン 2 次電池から構成されており、各機器はメインコントローラによって管理されている⁽³⁾。特にモータの制御はインバータを介して行われており、操船者からのモータへの指令はスロットルレバー、メインコントローラ、インバータを経由して送信され、インバータはモータのトルクを一定に保つよう制御を行っている。スロットルレバーから送信される信号は 4-20 [mA] の電流信号であり、メインコントローラはスロットルレバーからの信号に適切な処理変換処理を行った後に CAN (Control Area Network) とよばれる通信方式でインバータへ信号を送信している。

また、各動力機器との通信も CAN で行われており、例えばモータ回転数、トルク、インバータ電流、電圧値、BCU (Battery Control Unit とよばれる電池を管理する機器) からの電池電圧値、電流値、充電状態等々の情報がメインコントローラへ送信されている。本稿で行う実験はこれらのデータを計測値として用いる。

表 1 らいちょう I 主要目

全長, 全幅, 全深さ	10[m], 2.3 [m], 1.2 [m]
総トン数	2.5 [ton]
モータ出力	25 [kW]
速力	
半載 (6 名)	10 [knot]
満載 (12 名)	8.5 [knot]
定員	12 名 (乗組員 2 名含む)
リチウムイオン電池容量	18 [kWh]
最大出力航行可能時間	45 [min]
充電方式	CHAdemo プロトコル

図 2 らいちょう I 主要機器構成図

3. 運航支援システム

本稿で述べる運航支援システムとは、以下に示すような事項の計算、処理をリアルタイムで行い、タッチパネルモニタ等の GUI を用いて操船者の操船を支援するシステムである。特に 3, 4 番目の事項を出力制限機能とよぶ。

- ① 航続可能距離の推定
- ② 目的地までの最適船速の推定
- ③ 航続可能距離が目的地までの距離を下まわった際、操船者への警告
- ④ 航続可能距離が目的地までの距離を下まわった際の目的地まで航行可能な最大出力を推定し、出力指令値への上限值を設定

上記、運航支援システムの計算、処理には電池容量、モータ出力、スロットル信号等の船内情報が必要であるため、運航支援システムを船内メインコントローラに実装する。また、計算結果の表示や各種パラメータの調整、さらに緊急時の出力制限機能の解除ボタンを設けるためにインターフェイスである船内のタッチパネルモニタと通信を行う。

4. 航続可能距離及び最適船速推定アルゴリズム

前章で述べたシステムを開発するために、まず航続可能距離及び最適船速の推定アルゴリズムの導出する。そのために実海域において消費電力を段階的に変化させていった際の船速を計測する船速計測実験と、消費電力を一定に保った際の電池の放電曲線を計測する定出力電池消費実験をそれぞれ行い、船速と消費電力、消費電力と放電曲線の相互関係をそれぞれ数式化する。これらの 2 つの関係式を元に航続可能距離と目的地距離に応じた最適船速を推定するアルゴリズムを導出する^{(1), (4)}。

4.1 船速計測実験 らいちょう I ではモータ出力をスロットルレバーによって制御する構成になっているため、航続可能距離を計算するためには、モータ出力とそのモータ出力に対する船速の関係を明らかにしなければならない。そこで大学そばの運河にて、潮流、風などの影響をできるだけ少なくするために往復航行し、GPS にて船速を計測する実験を行った。また、乗員数による船速への影響を考慮するために計測は半載状態、満載状態それぞれ行った。計測値の往路、復路の平均をモータ出力ごとにプロットした結果を図 3 に示す。この図において三角は満載状態、丸は半載状態を表し、破線は近似曲線を表す。図より明らかなが、半載状態の場合も満載状態の場合もモータ出力を

増加させていくと船速も増加していくが、その増加割合はモータ出力の増加とともに減少している。このことにより、船速を減速させることによって航続可能距離を延すことができる。また一般に近似曲線は以下のべき乗近似式で表すことができる。

$$v = \alpha P^\beta \quad (1)$$

ここで、 v は船速 [knot]、 P はモータ出力 [kW]を表す。また α 、 β は実験により求められる係数であり、それぞれ以下ようになる。

満載状態： $\alpha=3.4518$ 、 $\beta=0.2942$

半載状態： $\alpha=2.9669$ 、 $\beta=0.3329$

4.2 定出力電池消費実験 電池充電状態に対して、どれだけの時間航行できるかを調査するために、モータを一定値で出力させた際、電池充電状態がどのように減少していくのか計測を行った。

一般的に、電池充電状態はSOC (State of Charge)と表現され、電池容量に対する充電状態の比率として定義されており、BCUが積算電流や、開放電圧等から算出する値である。しかしその演算アルゴリズムの詳細はメーカーから開示されておらず、らいちょうIに搭載されている電池のSOC減少特性が不明であるため、検証実験を行った。実験はSOCが80 [%]から5 [%]になるまでモータを一定で出力した際のSOCを計測した。また、モータ出力は10 [kW]、15 [kW]、20 [kW]、25 [kW]の4通りでそれぞれ実験を行った。ただし、1回の実験は開始から終了までモータを一定出力させて航行しなければならず、実験終了後はほぼ航行不能状態になってしまうため、安全面を考慮して学内の係船池にて図4のように係留しながらモータを出力させて行った。

実験結果を図5に示す。図中の破線はSOCがモータ出力と時間に比例して減少すると仮定してモータ出力ごとに求めた線、実線が計測値である。実線は破線とほぼ同じように減少しかつ破線よりも常に上にある、すなわちSOCの減少率が少ないという傾向を示しているため、本稿で開発を行う運航支援システムでは、SOCは次式のようにモータ出力と時間に比例して減少するとして開発を行う。

$$S(t) = -0.001543 Pt + S(0) \quad (2)$$

ここで P はモータ出力 [kW]、 t は時間 [sec]、 $S(t)$ は t 秒経過後の推定SOC [%]、 $S(0)$ は航行開始時のSOC [%]を表す。

図3 モータ出力と船速の関係

図4 実験環境

図5 モータ出力と電池容量の関係

4.3 推定式の導出 船速計測実験、定出力電池消費実験によって得られた関係式(1)、(2)式を用いて次式の航続可能距離推定式が得られる。

$$PCD = \alpha \frac{S(0) - S(t)}{5.55} P^{\beta-1} \quad (3)$$

ただし PCD は航続可能距離(Possible Cruising Distance) [mile]を表し、以下のように定義する。

$$PCD \equiv v \cdot t \quad (4)$$

さらに操船者によって、目的地までの距離 DD (Distance to Destination) [mile], 目的地到着時に残しておきたい SOC, $S(t_{Fin})$ [%] が与えられた場合、目的地まで航行可能な最大出力 P_{max} [kW] および船速 v_{max} [knot] はそれぞれ次式で与えられる。

$$P_{max} = \left(\frac{5.55 \cdot DD}{\alpha(S(0) - S(t_{Fin}))} \right)^{\frac{1}{\beta-1}} \quad (5)$$

$$v_{max} = \alpha P_{max}^{\beta} = \alpha \left(\frac{5.55 \cdot DD}{\alpha(S(0) - S(t_{Fin}))} \right)^{\frac{\beta}{\beta-1}} \quad (6)$$

これらの式を用いることで、操船者から目的地までの距離 DD および目的地到着時に残しておきたい

SOC $S(t_{Fin})$ が与えられれば、目的地到着時に所望の SOC を残すことのできる最大船速、つまり最適船速を推定することができる。

5. 出力制限アルゴリズム

電池推進船においてガス欠ならぬ電欠状態を避けるために、(3) 式によって推定された航続可能距離と目的地までの距離を比較し、航続可能距離が目的地までの距離を下まわった場合に、操船者に対して警告を行い、自動的に最適な船速になるように出力に上限を設けることのできる出力制限機能の開発を行う。

図6 モータ出力とトルクの関係

5.1 モータ出力特性 らいちょう I ではインバータはトルク制御によってモータを動作させているため、モータの出力に上限値を設けるためには、トルク指令値に上限を設けなければならない。そこでモータの出力とトルクの関係を調べるために、実海域においてらいちょう I を航行し、モータ出力を約 0 [kW] から約 30 [kW] まで連続的にゆっくりと変化させていった際のモータ出力とトルクを計測する実験を行った。実験は越中島キャンパス係船池沖にて行い、計測中モータの負荷が定常となるように潮流や風が比較的穏やかであることを確認してから行った。さらに乗員人数によるモータ負荷の変化の影響を考慮して半載状態、満載状態においてそれぞれ実験を行った。計測結果を図 6 に示す。丸が半載状態、三角が満載状態の計測値を表す。モータ出力を増加させるとトルクが増加しているが、半載状態、満載状態ともにトルクに大きな差異は見られなかった。図中、計測値の近似線を点線で表し、近似式は以下のように表すことができる。

$$Trq = \gamma P^{\delta} \quad (7)$$

γ は 11.7, δ は 0.666 である。式(5), (7) より目的地まで航行可能な最大指令トルク Trq_{max} が次式で与えられる。

$$Trq_{max} = \gamma \left(\frac{5.55}{\alpha(S(0) - S(t_{Fin}))} \cdot DD \right)^{\frac{\delta}{\beta-1}} \quad (8)$$

5.2 自動出力制限 式(1) ~ (8) を元に自動出力制限アルゴリズムの開発を行い、らいちょう I のメインコントローラに実装した。開発したアルゴリズムのフローを図 7 に示し、その詳細を以下に示す。

- (i) 航続可能距離を推定する。
- (ii) 航続可能距離と目的地までの距離を比較する。
- (iii) (ii) において一定時間以上航続可能距離が目的地までの距離を下まわった場合、船内タッチモニタにて警告、もしくはモータ出力に上限値を設ける。
- (iv) 操船者によって自動出力制限の解除ボタンが押されていないかを確認する。

もし、解除ボタンが押されていたら自動出力制限を解除した後、処理を終了する。押されていない場合は (i) に戻る。

(i) から (iv) を設定した周期で繰り返し行う。

らいちよう I のタッチパネルモニタの参考図を図 8 に示す (図 8 はタッチパネルの画面作成ソフト GP-ProEX のキャプチャ画面である. そのため, 画面内の数値は参考値である.). この画面では図中右上に運行支援システムによって計算された航続可能距離と最適船速が表示される. また, 画面左端の縦方向に延びる線 (図中吹き出し A) がスロットルレバー信号の大きさを表し, さらにその線の右側にある小さな三角形 (図中吹き出し B) が, モータ出力の上限値を表す. つまり, 図中の場合, モータ出力に上限値が設けられている状態であり, A の線は B の三角形の位置以上は増加することができないことを表す. しかし, 画面右上にある出力制限解除ボタン (図中吹き出し C) を押すことで, モータ出力の上限値を解除することが可能である.

図 7 自動出力制限フロー図

図 8 タッチパネルモニタ (プロトタイプ版)

Harumi pier head — 2.2 [mile] — Etchujima campus

図 9 電池残量 SOC, 航続可能距離 PCD, 目的地までの距離 DD の時系列

図 10 出力制限の設けられた際のモータ出力とスロットルレバー信号

6. 実海域における実証実験

開発した運行支援システムの出力制限機能によって航続可能距離および電池 SOC がどの程度変化するか, また, 本システムが実運行に支障がないかを検証するために, らいちよう I による実証実験を実海域にて行う. 実験はらいちよう I で晴海埠頭から越中島キャンパスにかけて約 2.2 [mile] を航行する. その際, 航続可能距離が目的地までの距離を下まわるように, 航行途中で意図的にモータ出力を増加させ, 出力制限がかけられる条件を満たすように航行する. ただし, 実験開始時の SOC, $S(0)$ は 50 [%], 目的地到着時に残しておきたい SOC, $S(t_{Fin})$ を 30 [%] に設定する. 実験結果を図 9 に示す. 図 9 は実験開始から終了までのらいちよう I の SOC [%], 航続可能距離 PCD [mile], 目的地までの距離 DD [mile] を表す. 実験開始から 2.7 分後近傍にてモータの出力を増加させたところ, 航続可能距離が目的地までの距離を下まわり (図中 A), 出力制限域に達した. そのためモータ出力の指令値に上限がかかり, システムによって計算された最適船速, 約 5 [knot] で航行した. ここで, 本実験のモータ出力とスロットルレバー信号の関係を図 10 に示す. 図

10 において実線はモータ出力 [kW]を表し、破線はスロットルレバー信号 [%]を表す。実験開始後 2.7 分後近傍(図 9 と同じく図中 A)にてモータ出力を約 8 [kW]から約 13.8 [kW]にまで増加させ、スロットルレバー信号に制限がかかったことがわかる。図中 B においてスロットルレバー信号は約 85 [%]から 90 [%]まで増加させているのに対して、モータ出力は約 5.5 [kW]を維持しており、スロットルレバー信号に上限がかかり、それに伴いモータ出力が制限されていることがわかる。図 9 において、図中 A にてモータ出力に制限がかかった結果、SOC の傾きが減少し、航続可能距離 PCD が約 2 [mile]から約 3.5 [mile]まで増加した。破線は、出力制限がかからなかった場合の SOC の傾きを、式(2)を用いて推定した値を表す。

本実験により、本稿で導出した航続可能距離及び最適船速の推定式が有効であることが明らかとなった。また、出力制限機能についても、システム上で正常に機能し、らいちょう I の目的地到着時の SOC は推定値を下まわることではなく、実際の到着時 SOC の方が 10 [%]程度余裕をもって到着することができた。

7. おわりに

本稿では、電池推進船の航続可能距離や最適船速の計算を自動で行うことによって操船者の負担を軽減し安全な運航を実現するために、操船者に航続可能距離や目的地までの距離に応じた最適船速などの航海情報を提示し、さらに航続可能距離が目的地までの距離を下回った場合に操船者に対して警告を行い、自動的に最適な船速になるように出力に上限をかけることのできる出力制限機能をもつ運航支援システムの開発を目的とした。運航支援システムの開発の第一段階として、らいちょう I をモデルとし、実験によって、らいちょう I の船速とモータ出力、モータ出力と電池容量の関係を明らかにし、それらを数式化することで航続可能距離や最適船速などの推定式を導いた。導かれた推定式を元に出力制限機能をもつ運航支援システムの開発が行い、実海域にて検証実験を行った結果、航行中らいちょう I はモータ出力の指令値に上限がかかった。そのためシステムによって計算された最適なモータ出力値で航行し、SOC を十分に残したまま目的地に到着することができた。航行距離や電池残量等の実験条件が異なる場合においても検証する必要があるが、本実験においては出力制限機能の効果を検証することができた。

参考文献

1) 清水悦郎, 日本マリンエンジニアリング学会誌,

47-1, 34-37

2) 賞雅寛而, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 47-1, 9-16

3) 大出剛, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 47-1, 23-27

4) E. Shimizu, et al, ESTS2011, 2011