

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

浅海域調査小型船用定点保持制御システムの開発

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-05-25 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 小柳, 摩純 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1422

修士学位論文

浅海域調査小型船用
定点保持制御システムの開発

平成 28 年度
(2017 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海洋システム工学専攻

小柳 摩純

修士学位論文

浅海域調査小型船用
定点保持制御システムの開発

平成 28 年度
(2017 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海洋システム工学専攻

小柳 摩純

目次

1. 緒言.....	1
1.1 研究の背景.....	1
1.2 研究の目的.....	7
1.3 本論文の構成.....	7
2. 電池推進船らいちょう I	8
2.1 主要目.....	8
2.2 システム構成.....	12
2.3 主要機器.....	14
3. 船体運動特性の解析.....	23
3.1 推進機による運動性能試験.....	23
3.2 バウスラスターによる旋回運動性能試験.....	27
3.3 並列運転旋回性能試験.....	34
4. 定点保持制御システム.....	35
4.1 概要.....	35
4.2 外乱推定.....	36
4.3 船首方位制御.....	37
4.4 船位保持制御.....	38
5. 定点保持制御システム検証実験.....	39
5.1 航行条件.....	39
5.2 実験結果.....	40
6. 結言.....	43
謝辞.....	44
参考文献.....	45
付録 I	エラー! ブックマークが定義されていません。

1. 緒言

1.1 研究の背景

面積世界 6 位の排他的経済水域を持つ日本では海洋資源の開発や海洋生物の利用のための海洋調査に力を入れている。中でも沿岸域や河川では地球温暖化や災害の影響を定期的に観測することや単なる食料資源という観点だけでなく、地球環境保護という視点からの海洋生物の利用が求められている。

地球温暖化の影響の例としては東京湾の赤潮調査があげられる。人口・産業が集中している東京湾流域の自治体では昭和 40 年代頃以降、水質汚濁防止法に基づく工場・事業場に対する排出濃度規制、COD 総量削減計画に基づく総量削減、窒素及びリンなどによる富栄養化(二次汚濁)対策を行っている。水質調査では東京湾内の河口や中央などの調査地点ごとで採水し各項目の分析を行う。東京湾の水質は改善方向に向かっているものの平成 28 年の夏季においても赤潮は観測され、今後も注意して監視していく必要がある(図 1.1) [1]。

一方、食料資源以外の海洋生物の利用例としてはアマモによる海のカーボン・オフセットがあげられる。水深およそ 20m の海域に生息するアマモは、沖からの波浪を弱くし海底基盤を安定させたり、温室効果ガスと言われる二酸化炭素を吸収し地球温暖化を防いだりする機能をもっている(図 1.2)。しかし、年々埋立や干拓等により消滅の危機にさらされていて藻場衰退の危機に瀕している。日本沿岸で海草や海藻が生育できる水深 20m 以浅の海域面積は約 300 万ヘクタールほどあるのに対し、実際に藻場になっているのは 17 万ヘクタールほどしかない(図 1.3)。これは全体の 6%にも満たない。その 6%も完全に自律しているわけではなく、ほとんどが維持及び保全活動を必要としている。この危機に平成 27 年度で 44 道府県が藻場の保護活動を含む水産保護に力を入れており、各沿岸域で再生活動が行われている。再生したアマモ場に影響を及ぼす育成環境状況を把握するため、透明度、水温、塩分、光量子量、濁度、流行・流速などの育成環境調査や簡易なレベル系による定期的な計測が必要である(図 1.4) [2][3]。

このような海洋に関連した諸現象は時間的に緩やかに変化するため、海洋に関する研究開発や計測は長期的、継続的に行う必要がある。



図 1.1 お台場のプランクトン採取の様子[4]

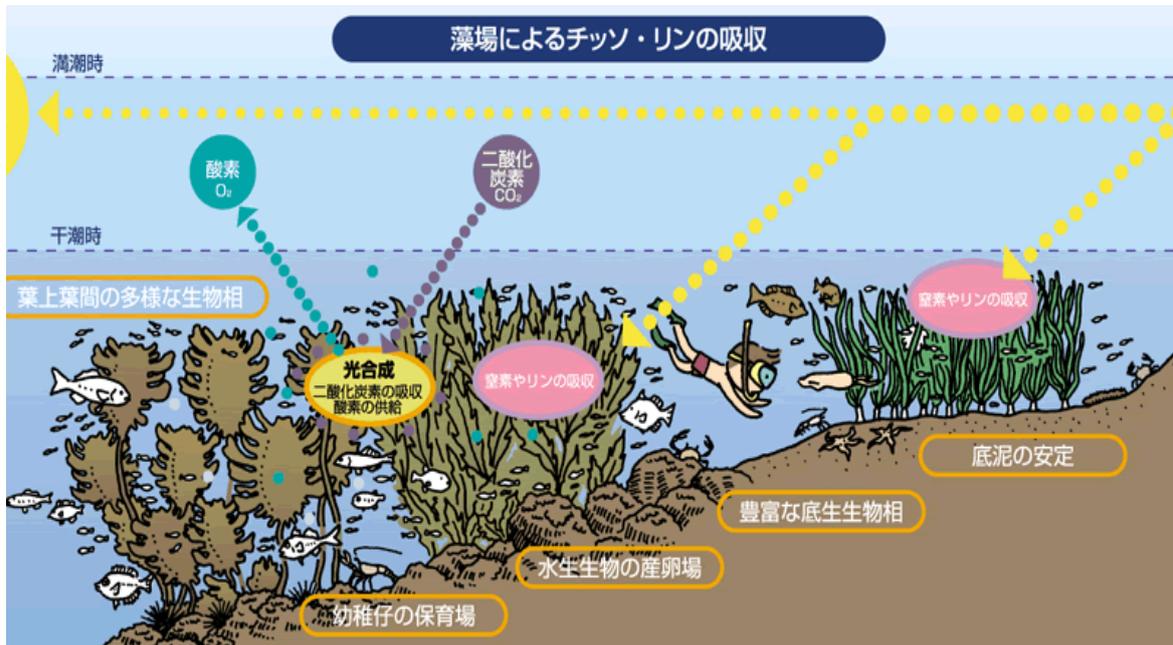


図 1.2 アマモの水質向上効果[5]

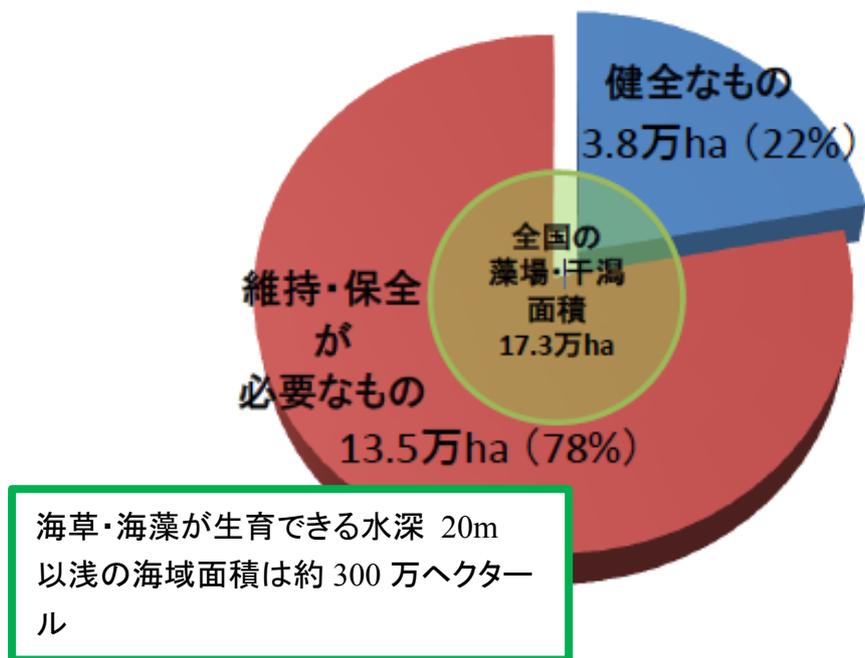


図 1.3 藻場の面積[6]

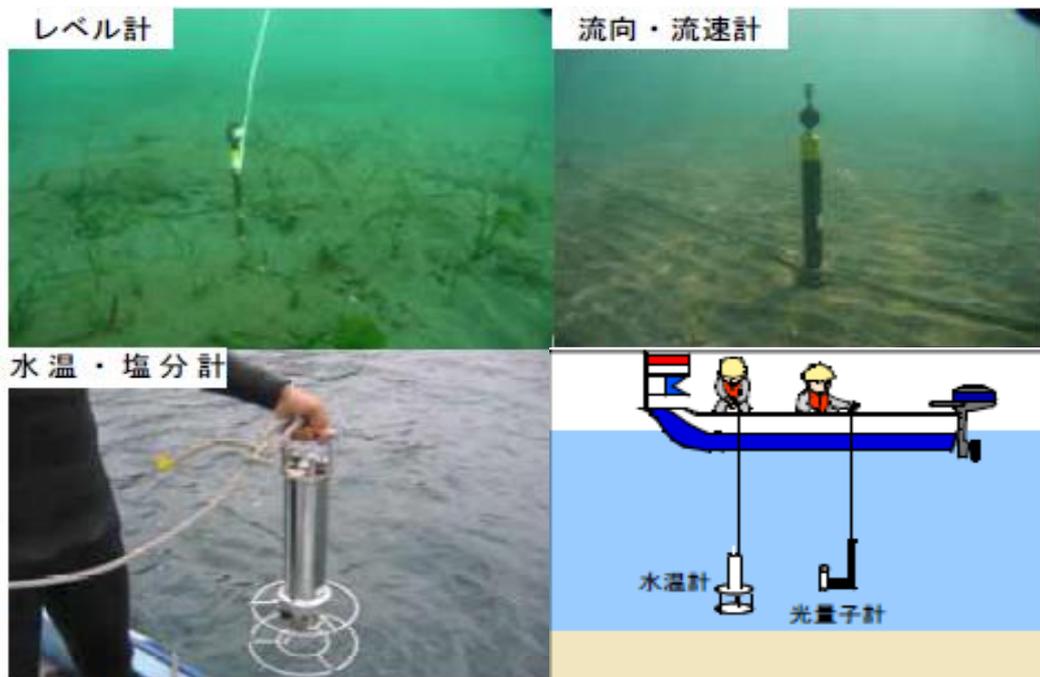


図 1.4 アマモ場での環境条件調査[7]

海洋調査は農林水産省，気象庁，海上保安庁などの機関が担っている。加えて、一般の調査依頼を受けている主な組織に東京大学大気海洋研究所と海洋研究開発機構の 2 つがあり，調査において大きなウェイトをしめている。しかし，大型船の老朽化による引退や燃料代の変動，運営費交付金の大幅な減少により，研究航海日数が減少し調査依頼の採択率が低下している(図 1.5，図 1.6[8])。

その一方で，東京海洋大学のように小型船をもつ大学や高等専門学校がある。これらの船舶を調査で使用できるようにすることで，海洋調査および海洋資源の開発に貢献できる。調査用でない船舶で正確で継続的な調査を行うために，調査能力の補足と作業の効率化が必要である。調査能力においては，持ち運び可能な計測機器を研究機関と共同で使うことで補うことができる。作業の効率化においては，操船を自動化し必要な乗組員を少なくすることで調査・運航の効率をあげられる。

自動操船技術には，無人船が基地から指示された航路に従って自律航行するシステムと，目標地点で停止して作業を行うシステムがある。前者のシステムは主に観光や海上輸送，軍事といった分野で着目されている。観光面では東京海洋大学が 2020 年の東京オリンピックにむけての水上交通システムとして，電池推進船を用いて少ない人数で多数の船舶の運航管理ができるような自動運航技術の開発を行っている。海上輸送面では高級ブランド車で有名な大手エンジンメーカーのロールスロイス・ホールディングスが貨物船の無人化で運航効率 20%アップを見込んで 2020 年までに実用化する計画を発表した[9]。海運業界も燃料費の上昇の打撃をうけ、貨物船は運航速度を落とし燃料費を抑えて運航していた。しかし，その分長旅になるため乗組員に余計なコストがかかるという悪循環が発生していた。余計なコスト

がかさみ、運航コストの44%が乗組員にさかれている。無人化することによって居住スペースや清水、食料などの設備が不要になり、排ガスも20%減少できると期待されている(図1.7[9])。後者のシステムである定点保持システム(図1.8[10])は海底掘削で欠かせない要素である。日本が建造した独立行政法人海洋研究開発機構の「地球深部探査船 ちきゅう」は現在掘削船として世界最高水準の性能を誇り、全長210mの船体を船の前方3機、後方3機の計6機のアジマススラスタを用いて制御している。アジマススラスタは360度推力方向を変えることができる推進機である。GPSと音響即位システムの二つを使って、位置情報の精度を1m以下にすることで正確な船位保持を実現している。定点保持制御技術は電動機を複数搭載することができる大型船が中心となって展開されているが、現在ではレジャーボート用に船外機2機以上を用いたシステムが開発されており、釣りのサポートを目的としたGARMINのGPSアンカーなどがある(図1.9)[11]。

このように、操船の自動化は幅広い業界で求められており、本研究では後者のシステムに着目した。

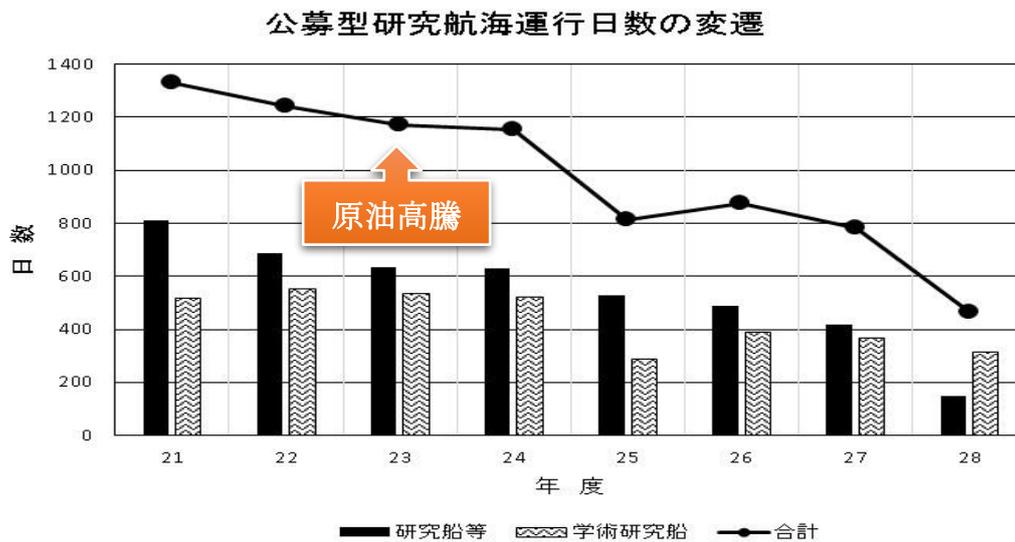


図 1.5 運航日数の変換

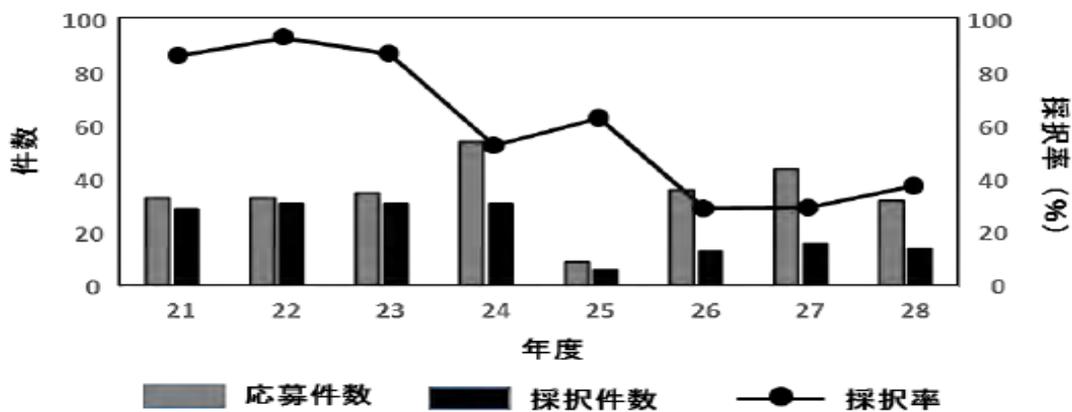


図 3 学術研究船淡青丸・新青丸の共同利用応募件数、採択件数、採択率

図 1.6 調査の採択率



図 1.7 上が無人貨物船、下が操船基地の構想図[9]

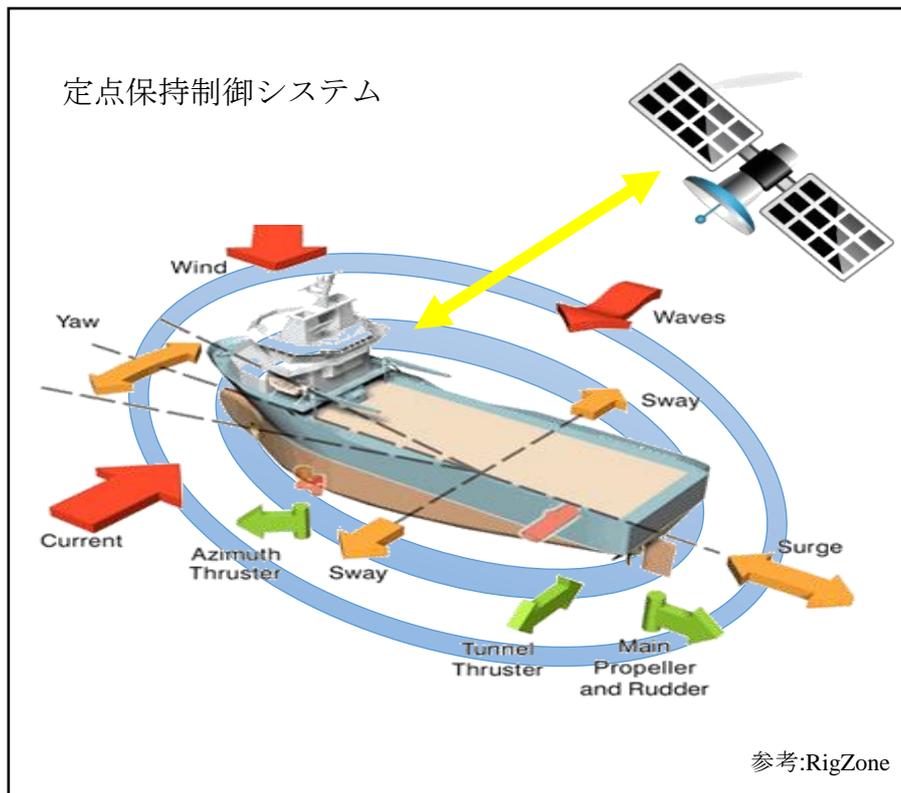


図 1.8 定点保持制御



図 1.9 GARMIN の GPS アンカー搭載の船舶例と構成機器

1.2 研究の目的

前節で述べたように、日本において海洋技術の発展や海洋環境の調査はこれからの新たな産業の創出や根絶につながる重要な事業である。海洋に関する事象は時間的に緩やかに変化するため、長期間、継続的な調査は必要である。しかし、研究開発費などが限られており、調査に十分な調査船や技術者を確保することが難しい。したがって一般的な小型船を、より人手をかけずに効率的に運航できるように改良し、調査のための操船の自動化をすすめる必要がある。

本研究では、できるだけ人の手が必要な作業を減らして運航・調査を行うために、小型調査船を自動で定点保持するシステムを開発する。提案する定点保持制御システムは、推進機1機と舵1台とバウスラスタ1機を使用する。推進機1機と舵1台とバウスラスタ1機という、レジャーボートに搭載されていることが多い一般的な機器での定点保持制御を可能とすることで、特別な調査船でない船舶を使って採水・採泥といった水質調査ができると期待される。

推進機1機と舵1台とバウスラスタ1機という限られた機器で定点保持制御を行うため、船の旋回運動性能の試験及び解析を行う。加えて、潮流や海風などの外乱を推定する機能とバウスラスタにより船首方向の制御をする機能、推進機により船位を制御開始位置に保つ機能を開発する。そして、これらの3つの機能を組み合わせて、船位を任意の範囲以内に保持する定点保持制御システムを開発する。その上で、これらの機器を搭載した東京海洋大学が所有する電池推進船らいちょうIを用いて実証実験を行う[12][13]。

1.3 本論文の構成

2章では電池推進船らいちょうIの要目の詳細を述べる。

3章ではバウスラスタと推進器を用いた船体運動特性の解析のための実験とその結果を述べる。

4章では定点保持制御システムの概要とシステムに含まれる機能の詳細を述べる。

5章では東京湾で行った定点保持制御システムの検証実験について述べる

6章では本論文のまとめを述べる。

2. 電池推進船らいちょう I

船舶による硫酸・硝酸ガス (SO_x, NO_x) などの排ガス汚染は特に湾岸区域で大きく、東京湾岸においては硫酸ガス汚染の半分近くが湾岸域の船舶に起因するものである [6]。また、小型船舶は排気ガスを水中排出しており水質汚染の大きな問題となっている。そのため欧米においては内燃機関船の運航を禁止している港沼区域もある。このような小型船舶に起因する大気・水質汚染を解消するために東京海洋大学は平成 22 年より、急速充電対応型電池推進船を開発している。らいちょうはモータを動力、リチウムイオン電池を動力源としているため、航行中に大気汚染物質の排出がなく騒音も小さい。電池を動力源とすることで、個々の船舶や自動車がそれぞれで排気ガスを出すのではなく発電所に排気ガスの発生を集中することができ、排気ガスの処理及び管理が容易となる。従来の鉛蓄電池を搭載した電池推進船に比べ高出力な航行、特に気象、海象の厳しい実海域における航行が可能である。また充電方式として、本船は電気自動車でも採用されている急速充電規格 CHAdeMO プロトコルが採用された船舶である。従来の鉛蓄電池を搭載した電池推進船が満充電までに 10 時間かかっていたのに比べ、本船では 20 分の 1 にあたる 30 分程度の充電で約 80 [%] の充電が可能である。 [14]

2.1 主要目

電池推進船らいちょう I を図 2.1 に示しその主な特徴を表 2.1 に示す。図 2.2 において、らいちょう I の船体構造を示す。らいちょう I は船尾にモータ、インバータ、電池が設置されている動力機器室が設けられており、動力室より船首側のエリアは操縦室及び客室となっている。らいちょう I に搭載されている機器は横河電機製の PLC (表 2.2, 図 2.3) から構成される各 ECU (表 2.3) に制御されている。そして横河電機製の ASTMAC というソフトウェアをインストールした PC を PLC につなぐことで、PC 上で PLC が取得する各データを 1 秒周期で記録し、PLC を通じて船体機器を制御することが可能となる。しかし、バウスラスタは運転席のジョイスティックでしか動かすことができなかつたので、新たな PLC を追加した。この PLC にバウスラスタ用のサーボモータを接続し、制御用 PC からバウスラスタの回転数を制御することを可能とした。



図 2.1 らいちょう I

表 2.1 主要目

項目	概要
製造	ニュージャパンマリン (株)
全長	10.0 [m]
全幅	2.3 [m]
全深さ	1.2 [m]
総トン数	2.5 [ton]
モータ出力	45 [kW]
最大船速	13 [knot]
リチウムイオン電池容量	26.5 [kWh]
充電方式	CHAdemo 規格準拠
定員	乗組員 2 名 旅客 10 名 計 12 名

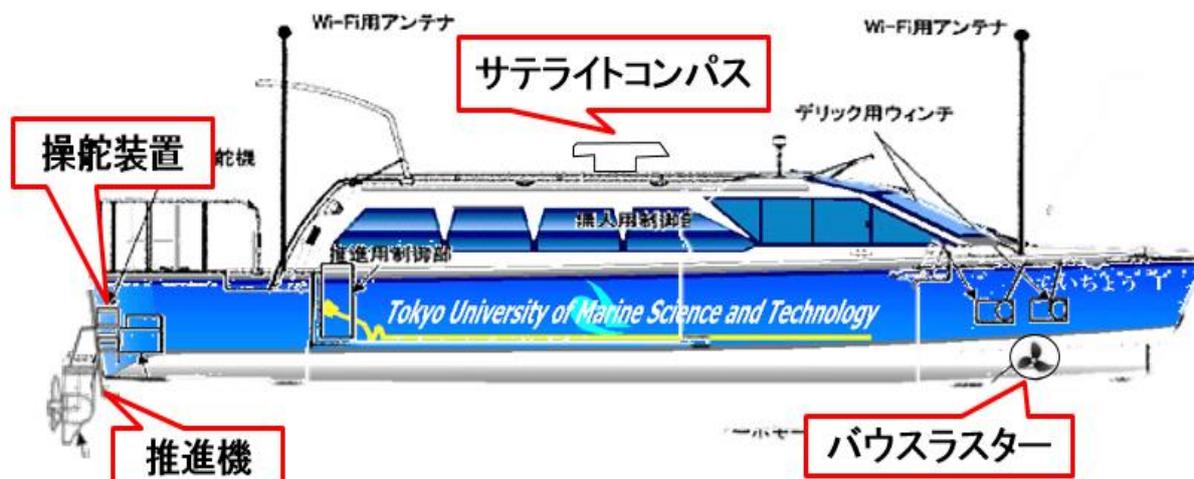


図 2.2 らいちょう I 船体構造

表 2.2 PLC 主要目

項目		概要
製造		横河電機 (株)
演算方式		ストアードプログラム, 折り返し演算
入出力方式		リフレッシュ方式/ダイレクト入出力命令
プログラム言語		オブジェクトラダー言語
命令数	基本命令	40 種
	応用命令	432 種
処理速度	基本命令	0.00375 μ s~命令
	応用命令	0.0075 μ s~命令
プログラム容量		最大 260K ステップ
プロジェクト容量		最大 520K ステップ
最大入出力点数		8192 点
デバイス容量	内部リレー	65535 点
	データレジスタ	65535 点
	ファイルレジスタ	262144 点
	キャッシュレジスタ	524288 点
通信ポート		USB2.0, Ethernet
メモリーカードスロット		SD メモリカード
消費電流		800 [mA] (5 [V] DC)
外形寸法		W 28.9, H 100, D83.2 [mm]
質量		150 [g]

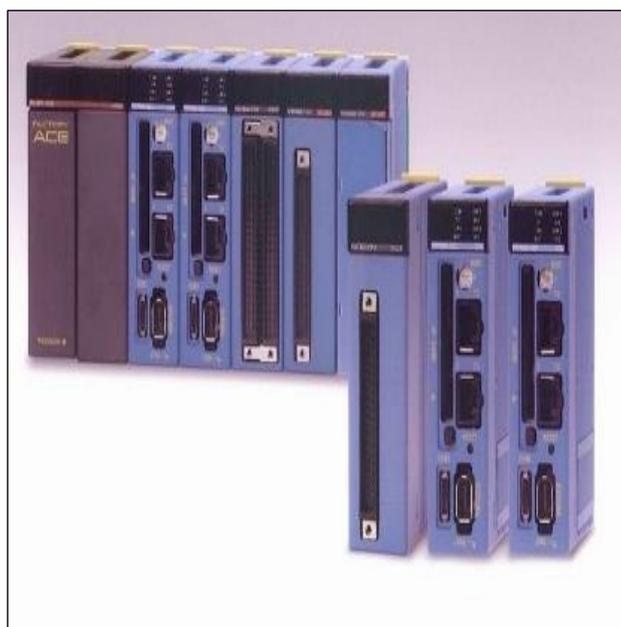


図 2.3 PLC 外観図

表 2.3 ECU 構成モジュール

構成モジュール	機能
電源モジュール	外部より電源を供給
RTOS-CPU モジュール	リアルタイム OS 搭載 CPU
シーケンス CPU モジュール	シーケンス制御を行う
CAN 通信モジュール	CAN 通信を行う
アナログ入力モジュール	4-20mA 出力を読み込む
デジタル接点入出力モジュール	各種接点入出力

2.2 システム構成

定点保持制御システムの構成を図 2.4 に示す。本システムでは、航海計器によるデータ収集と、定点保持制御を制御用 PC で行う。搭載機器のデータは PLC (E-ECU および A-ECU) を経由して取得する。PLC は制御管理のため 2 つに分かれている。E-ECU は主に推進機や航海計器、操作パネルやバッテリーなどの制御をして、A-ECU はバウスラスターや操舵装置の制御をしている。船位データは船上部に取り付けたサテライトコンパスから PC で直接取得する。データの取得及び制御用 PC のプログラム周期は 1 秒である。本システムで使用するデータを表 2.4 に示す。これらのデータをもとに PC で定点保持に必要な舵角や出力を計算し、PLC を通じてバウスラスター、推進機、舵を操作する。データの送受信を行う PC の操作画面を図 2.5 に示す。

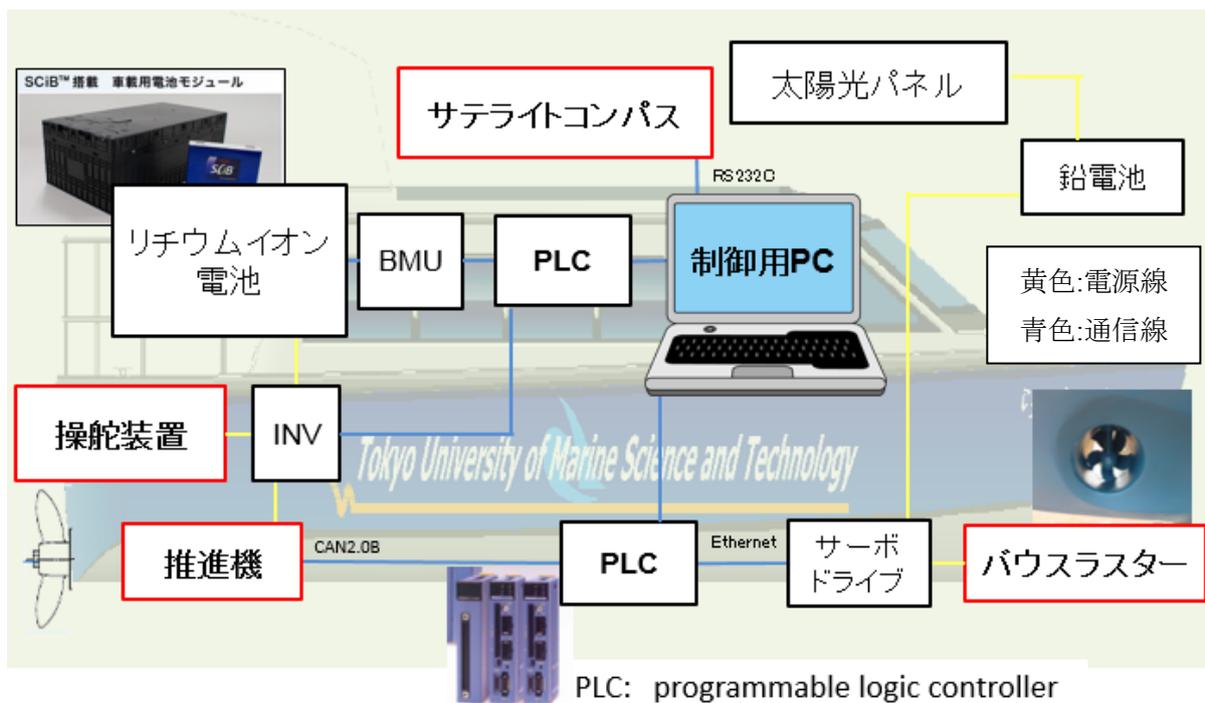


図 2.4 システム構成

表 2.4 制御に用いる取得データ

項目	単位(範囲)	分解能
船首方位	360 度	0.1 [度]
推進機制御モード	DPS/MANUAL	/
SOC	%	0.0001 [度]
パウスタスター回転数	rpm	1 [rpm]
移動方向	360 度	0.1 [度]
推進機出力	kW	1 [W]
推進機トルク	[Nm]	0.01 [Nm]
緯度 / 経度	360 度	0.001 [度]



図 2.5 操作画面

2.3 主要機器

本研究の主要機器であるらいちょう I の主要機能を表 2.5 に示し、操縦席を図 2.6 に記す。続いてらいちょう I の主要機器であるサテライトコンパス、推進機、モータ、バウスラスタ、インバータ、リチウムイオン 2 次電池の詳細をそれぞれ示す。

表 2.5 らいちょう I の主要機能

操船機能	<ul style="list-style-type: none"> ・スロットルレバーにより前進、中立、後進を制御 ・スロットルレバーの倒れ角によりモータの出力トルクを一定に制御 ・ジョイスティックによるバウスラスタの制御
表示機能	<ul style="list-style-type: none"> ・タッチパネルモニタを使用 ・主操船画面、電気系統画面、制御系統画面、充電画面等から成る
充電機能	<ul style="list-style-type: none"> ・CHAdEMO 規格に準拠した急速充電や CVCC、オンボードチャージャによる普通充電に対応
運航管理	<ul style="list-style-type: none"> ・GPS、魚群探知機（水深測定器）を搭載 ・パソコンを用いたアプリケーション <ul style="list-style-type: none"> ・遠隔操船システムによるオートパイロット <ul style="list-style-type: none"> －操船基地から船内の PC 及び PLC と同期して遠隔操船が可能 ・運航支援システムによる運航者への支援 <ul style="list-style-type: none"> －目的地までの距離と電池残量より最適な出力を提案する

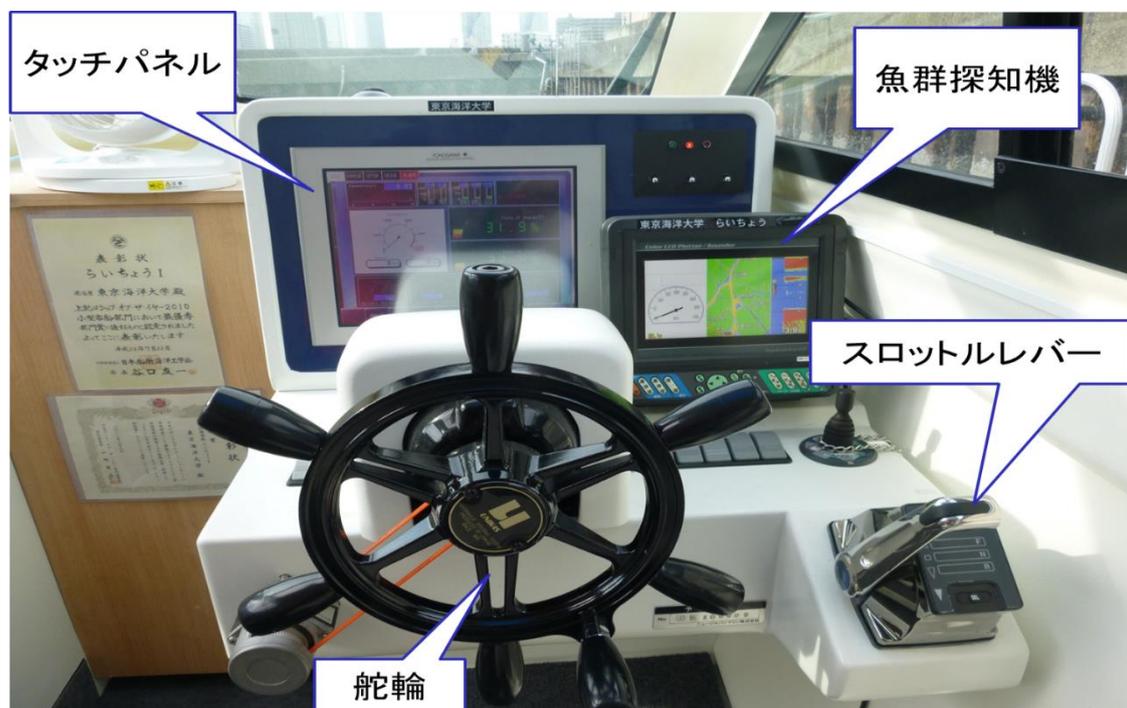


図 2.6 操縦席

サテライトコンパス

下記のサテライトコンパスにて定点保持制御に必要な船位情報や船首方位などのデータを取得する。その外観図と主要目を図 2.7 と表 2.6 に示す。表 2.6 より、このサテライトコンパスの精度は 10m 以下となっている。1 章の例で説明した地球探査船ちきゅうの位置精度が 1m 以下であるので、この差は定点保持の精度に大きく影響する。停泊中の写真をみても、ポイントがずれているのがわかる(図 2.8)。そこで、東京湾周辺の自治体がおこなっている水質調査の報告書より調査ポイントについてみると、近い調査ポイントでもおよそ 3km 離れている(図 2.9)。潮流による水質の変化という面を考慮しても、3000m のうちの 10m の誤差は十分小さいと考えられるため、今回はこのコンパスを使用する。

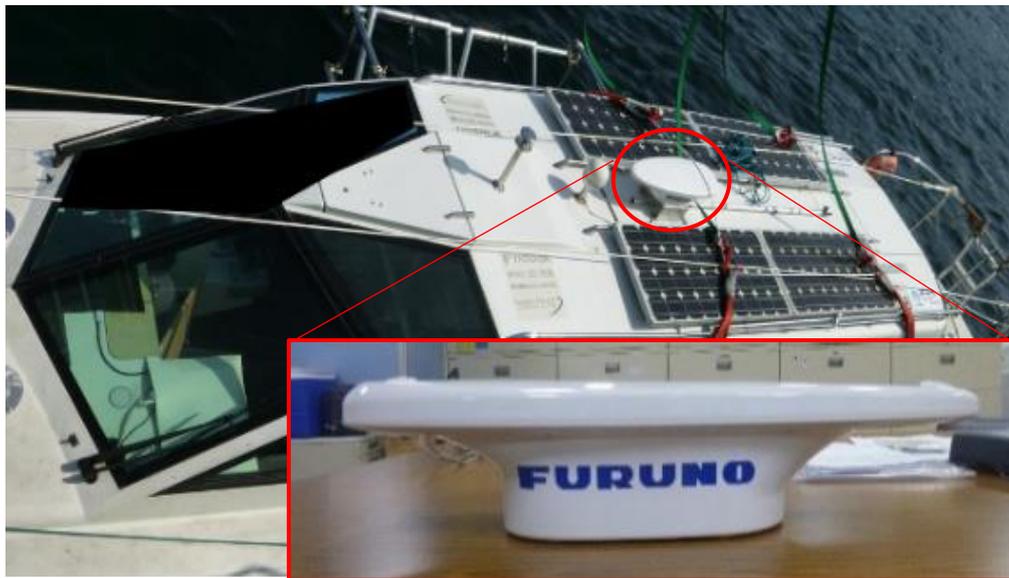


図 2.7 サテライトコンパス外観図

表 2.6 サテライトコンパス主要目

項目	概要
製造元	古野電気(株)
方位精度	0.5° RMS
方位分解能	0.1° (表示及び出力)
追従速度	45° /SEC(方位)
静定時間	約 3 分
測位精度(2drms)	GPS:10m 以下
防水性能	IP20(無保護)
電源	DC12-24[V], 0.4-0.23[A]
質量	センサーユニット 2.5[kg]

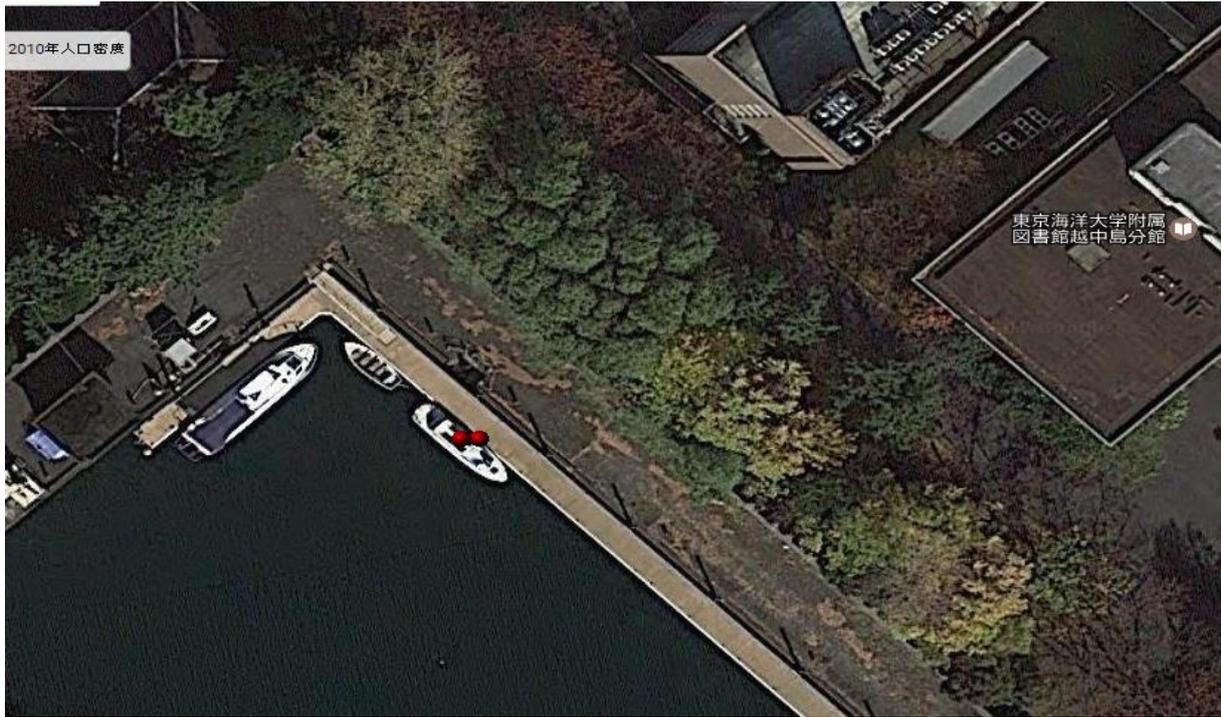


図 2.8 停泊中のサテライトコンパスによる位置情報



図 2.9 東京湾調査の例[15]

推進機

浅岸で運用できるアウトドライブ方式の推進器である。推進器の構造を図 2.7 に、推進器の主要目を表 2.10 に示す。

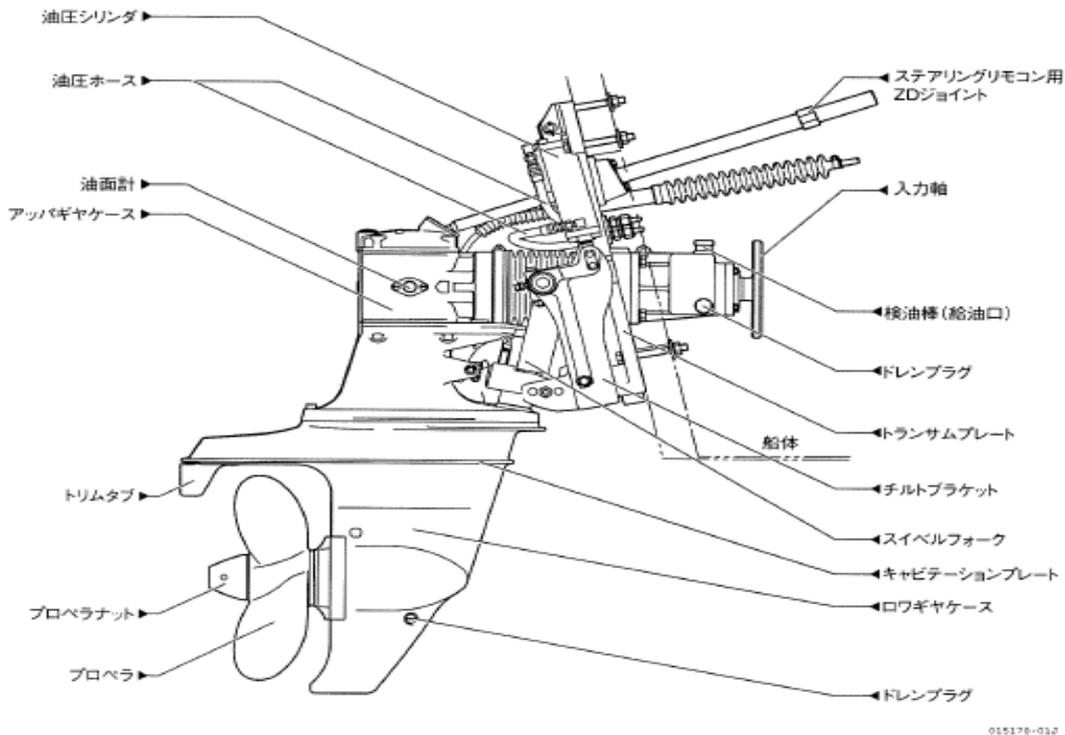


図 2.10 推進機の構造

表 2.7 推進機の主要目

項目	概要
製造	YANMAR
アウトドライブ名称	SZ163
許容伝達トルク	246[N・m]
減速比	1.61
定格回転数	3600[min^{-1}]
回転方向	左
質量	69[kg]
ステアリング角度	左右 各 45 度
チルト角度	72 度
プロペラ径	15[inch]
プロペラピッチ	13[inch]

モータ

推進機を動かすモータの主要目を表 2.8, 外観を図 2.11 に示す. らいちょう I に搭載されているモータは安川電機製 IPM (埋込磁石型:Interior Permanent Magnet) モータである. 一般的に IPM モータは, 直線状の磁石をロータに埋め込むことでリラクタンストルクの作用を受け, 同サイズのモータに比較して高効率大出力を発生できるモータである. そのため, 小型で大出力の性能が必要とされるハイブリッド電気自動車や電気自動車, 空調機器, 風力発電装置等で利用されている. 全長 10 [m]の小型船舶らいちょう I においても, IPM モータを用いることで可能な限り省スペースな動力室で大出力を得ることができる



図 2.11 モータの外観図

表 2.8 モータの主要目

項目	概要
製造	(株) 安川電機
構造	IPM (埋込磁石型)
最高回転数	12000 [rpm]
連続定格出力	45 [kW]
最大出力	80 [kW]
最大トルク	200 [Nm]

バウスラスター

無人化，自動操船化に伴い上位コントローラ (PLC) からの制御を可能とした．また正確に回転数制御及びトルク制御を行うためサーボパック (サーボモータ及びサーボドライブ) をバウスラスターに接続している．バウスラスターと，サーボモータとサーボドライブを含むサーボパックの外観とその主要目をそれぞれ図 2.12，図 2.13，表 2.9 に示す．



図 2.12 バウスラスターの外観



図 2.13 サーボパックの外観

表 2.9 バウスラスタター及びサーボモータの主要目

項目	概要
サーボモータ 製造	(株) 安川電機
制御方式	IGBT PWM 制御 正弦波電流駆動方式
速度制御範囲 rpm	1~5000
最大出力 kW	1.5
連続出力電流 Arms	11.6
瞬時最大出力電流 Arms	28
制御電源	三相 AC200 V ~ 240 V, -15 % ~ +10 %, 50/60 Hz
電源容量 kVA	3.2
電力損失 W	97.6
速度変動率	定格速度の± 0.01 % 以下 (負荷変動 : 0 % ~ 100 % 時)
トルク制御精度(再現性)	±1 %
指令電圧	最大入力電圧 : ±12 V(正電圧指令でモータ正回転) DC6 V で定格速度 [出荷時設定] 入力ゲイン設定の変更が可能

インバータ (INV)

インバータはメインエネルギー源であるリチウムイオン2次電池から推進機に電力を変換して送る役目を担っている。インバータは、操縦席のコントロールヘッドからの入力で推進機に送る電力を調整する。コントロールヘッドはポテンショメータが内部に組み込まれ、レバーの角度に応じた電圧を発生する。外観を図 2.14、インバータの主要目を表 2.10 に示す。



図 2.14 インバータの外観

表 2.10 インバータの主要目

項目	概要
製造	(株) 安川電機
最高出力周波数	800 [Hz]
連続定格電力	45 [kW]
最大定格電力	80 [kW]
連続定格電流	150 [Arms]
最大定格電流	330 [Arms]
電圧出力方式	正弦波 PWM 方式
制御方式	トルク制御

リチウムイオン2次電池

電池の外観を図 2.15、主要目を表 2.11 に示す。らいちょう I に搭載されているリチウムイオン電池は 12 個のモジュールの電極端子を直列につないだものを 1 パックとし、そのパックを 2 個並列につないだ構造となっている。1 モジュールが 27.6V であるため、インバータの使用電圧範囲内(230~430V)になるよう電池を直列つなぎにして電圧を確保している。



図 2.15 リチウムイオン2次電池の外観

表 2.11 リチウムイオン2次電池の主要目

項目	概要
製造	(株) 東芝 社会インフラシステム社
形態	リチウムイオン電池
適用セル	SCiB™20Ah セル
モジュール	
セル構成	12 直列 2 並列
公称電圧	27.6 [V]
公称容量	40.0 [Ah]
最大電流	120[A]
重量	14kg
パック	
モジュール構成	12 モジュール直列
全体	
パック構成	2 パック並列
公称電圧	DC331.2[V]
公称容量	80[Ah] 26.5[kWh]
最大電流	240[A]

3. 船体運動特性の解析

定点保持制御システムでは船首方位と船位を制御するために、バウスラスターと推進機の出力に対してPID制御を行う(制御の詳細は4章で示す)。このPID制御のゲインや制御モードの切り替えとなる境界値及び、外乱推定の運動モデルを決めるために船の運動特性を調べる必要がある。らいちょうIにおいて、実海域において定出力運転時の速度を計測する速度計測実験と旋回時の回頭速度を計測する旋回性能実験を行う。速度計測実験における船外機の出力・速度の時間推移とバウスラスターの出力・回頭速度の時間推移を3.1節と3.2節に示す。3.3節ではバウスラスターと船外機の並列運転時の船の回頭速度を示す。

3.1 推進機による運動性能試験

推進機は、操縦席のタッチパネルで定出力(電力[kW])の設定をすることで、コントロールヘッドをスイッチとしてコントロールヘッドを中立にするまで定出力での制御航行が可能である。実海域にて推進機のモータ出力を一定に保った場合の対地速度を計測する速度計測実験を行った。計測データより、トルク・速度の時間経過に対する変動を調べ、出力と船速の関係を数式化することにより運動モデルを作成する。

定点保持制御では推進機は低出力(およそ0~1.0kW)で使用するため、試験は0.3kW, 0.5kW, 0.8kW, 1.0kWの出力で豊洲沖にて行った。実験は、船が停止状態になってから操縦席のタッチパネル及びコントロールヘッドを用いて一気に推進機出力(kW)を入力し、一定船速になるまで航行しその過程を記録した。入力した推進機出力は一回の実験では潮流の向きによって船速に違いが出てしまうため、一度目と同じ航路を往復したときの船速の平均値を算出し実験結果とした。実験経路を図3.1に示す。

らいちょうIが通常航行で使う推進機の出力が10kW~40kWであるため、実験で用いた出力範囲は非常に小さいと言える。また実験結果より、低出力範囲内では最高で2knot程度であったため、時間による変化がわかりにくい。そこで速度計測実験における実験中の時間経過は、1kW出力時のみの時間に対するトルク、回転数、速度のグラフを図3.2に示す。そして各出力と船速の関係をまとめグラフを図3.3に示す。



図 3.1 実験経路

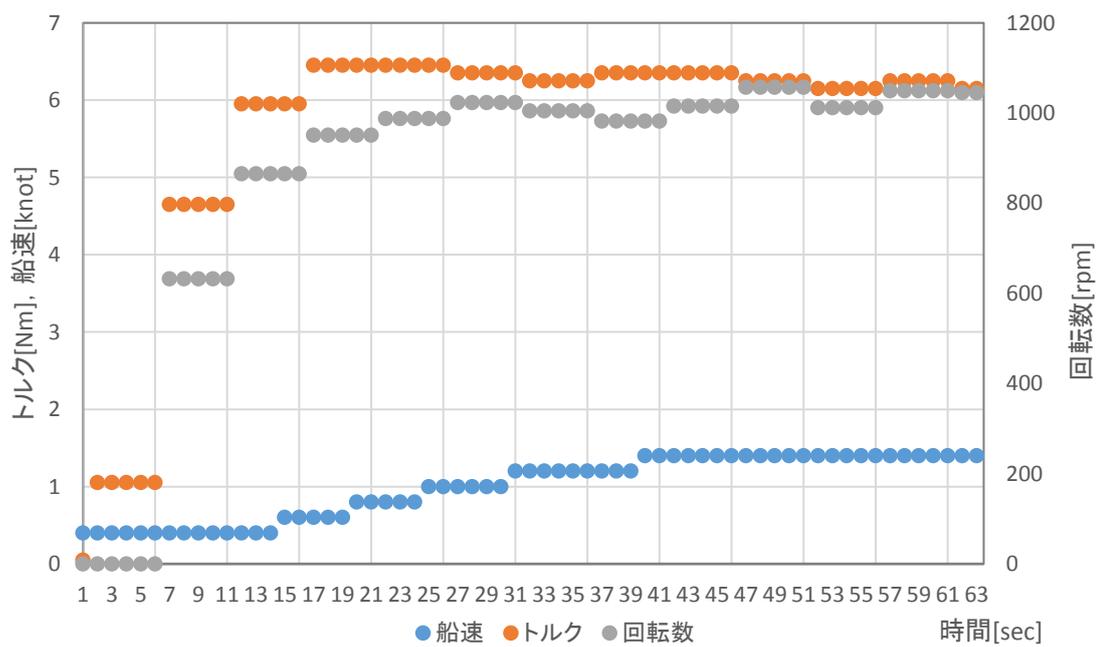


図 3.2 1.0kW 出力時の速度・トルク・回転数の推移

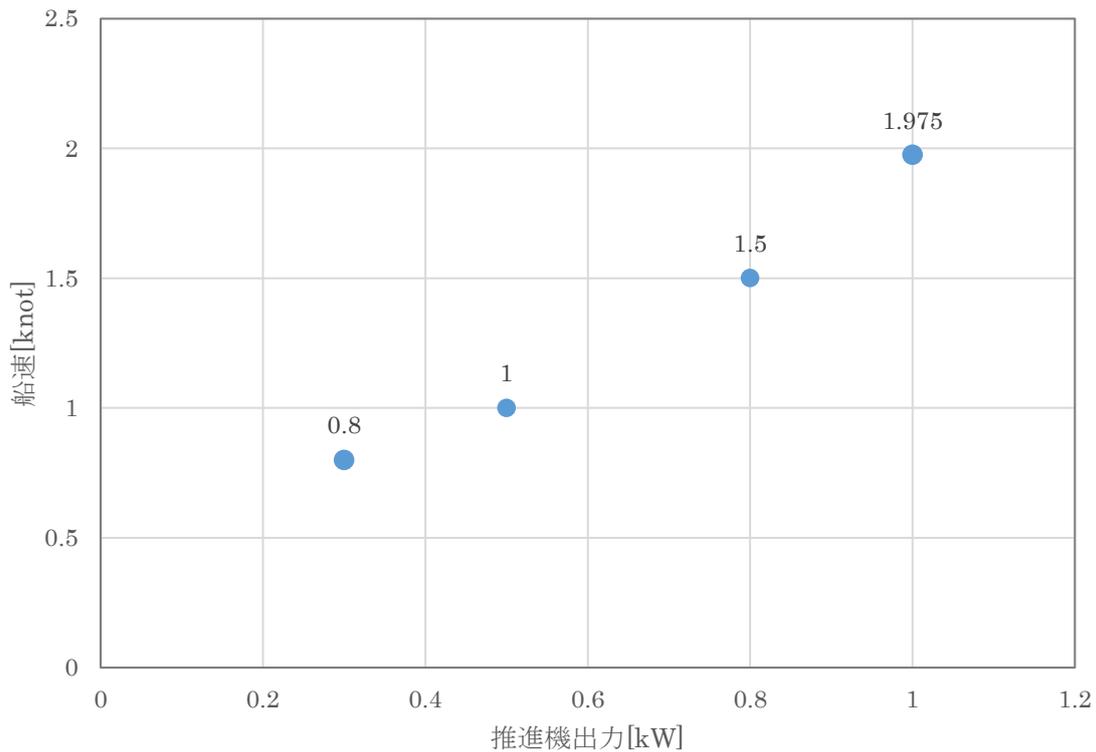


図 3.3 出力と速度の関係

図 3.2 を速度の入力(トルク)に対する一次遅れ系のグラフとみなすと，一般的な一次遅れ系の微分方程式の解($y(t)=K(1-e^{-t/T})$)と定常値(図 3.3)より時定数 T と無駄時間 L が求められる．定常値を出力で割り得られる K これらの定数 T , L より PID 制御の各ゲイン K_p , K_i , K_d のおよその値を以下の式から求めることができる．

$$K_p=0.6\sim 0.95T/KL$$

$$K_i=0.6\sim 0.7/KL$$

$$K_d=0.3\sim 0.45T/K \quad \cdots (1)$$

推進器の出力ごとに時定数や定常値が異なるので式(1)からおよそのゲインを算出し，実験を経てゲインの値調整を行う．しかし，推進器の出力が小さいとき，船速の定常値は実験域の潮流の速度と大きな差が出ずに，船速の変化が緩やかになってしまう．そうすると，無駄時間と時定数の境が不明確になり正確な値が導出できない．従ってある程度船速が得られる 1.0kW での試験での結果を用いる．推進器出力 1.0kW で運転したときの，トルクに対する速度のステップ応答の時定数と無駄時間をもとめるグラフを図 3.4，もとめた数学モデルとして使用した数値を表 3.1 に示す．

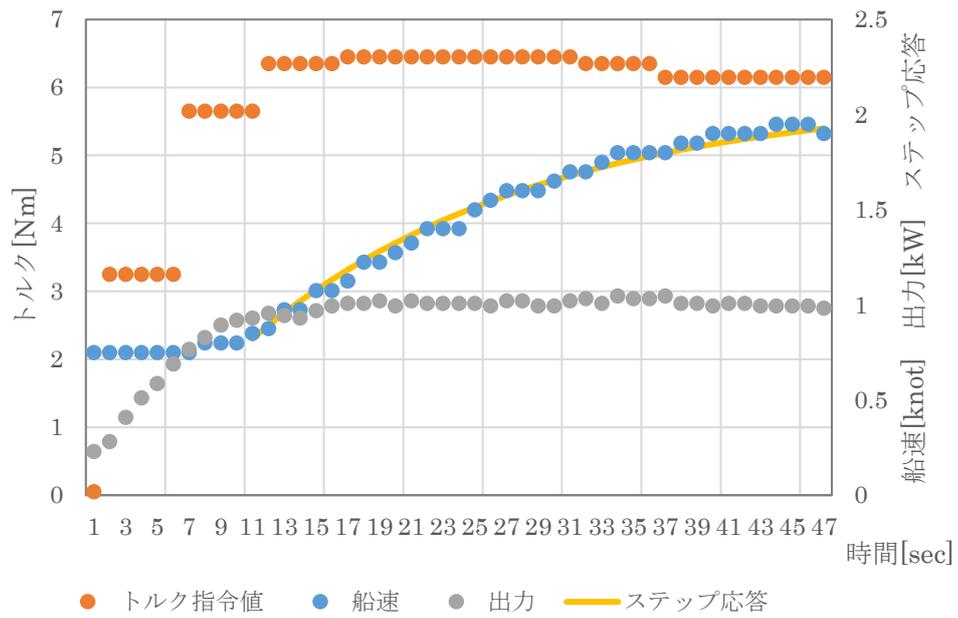


図 3.4 ステップ応答

表 3.1 数学モデルで使した数値

定常値	1.95
時定数 T	18
無駄時間 L	10 [sec]

3.2 バウスラスタによる旋回運動性能試験

バウスラスタはサーボモータパックを用いて速度制御(回転数)が可能である。実海域にてバウスラスタの回転数を一定に保った場合の船首方位の回頭速度[rad/sec]を計測する回頭速度計測実験を行った。回頭速度はサテライトコンパスにより 1 秒周期で計測される現船首方位から求めた。実験地点で停止したのち、バウスラスタの運転を開始し船が 1~2 周する間計測を行った。計測データより、回頭速度の時間経過に対する変動を調べ、バウスラスタ一回転数との関係を明らかにする。バウスラスタの旋回能力として各回転数時の定常値や時定数を表 3.2 に示し、実験結果として時間に対する回頭速度とステップ応答の近似グラフを図 3.5~図 3.10 に示す。表 3.2 において負の回転数のときはバウスラスタの回転が反対になるため船は左旋回する。

表 3.2 バウスラスタの旋回能力

回転数[rpm]	-1500	1500	-2000	2000	-3000	3000
回頭速度[deg/s]	-2.006	2.217	-2.688	2.569	-4.181	4.058
時定数	11	7	7	6	5	7

バウスラスター指令値 -1500rpm

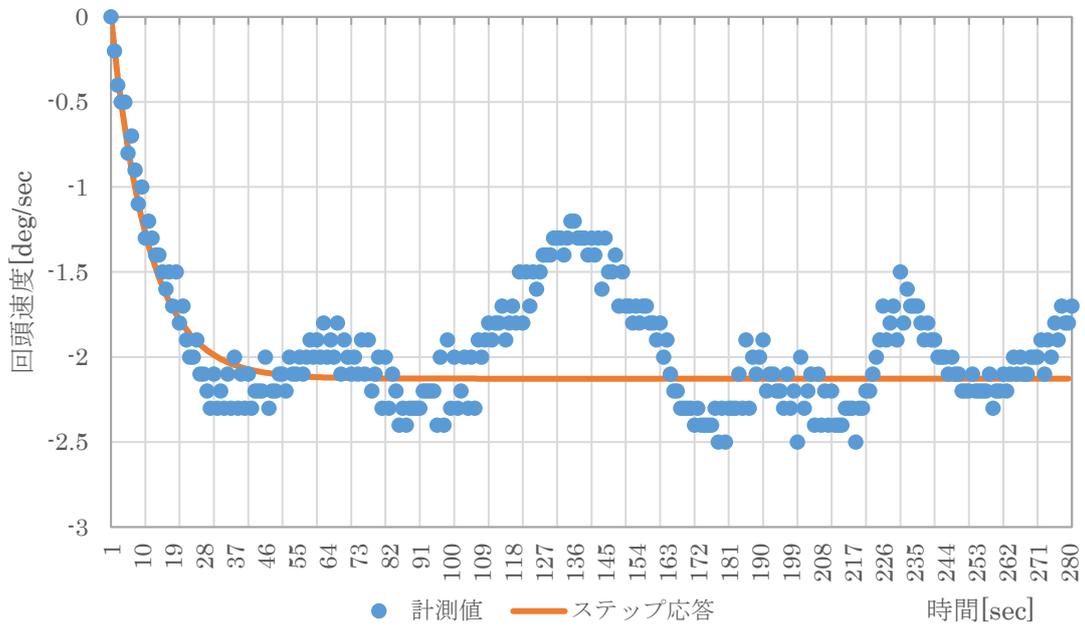


図 3.5 バウスラスター実験結果(指令値:-1500rpm)

バウスラスター指令値 1500rpm

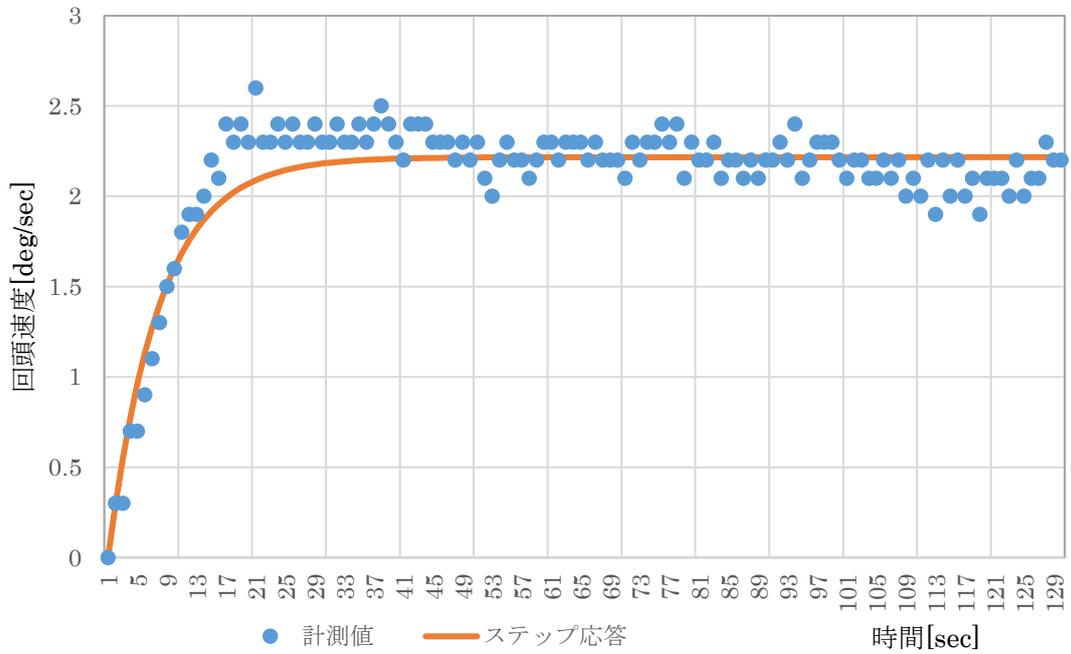


図 3.6 バウスラスター実験結果(指令値:1500rpm)

バウスラスター指令値 -2000rpm

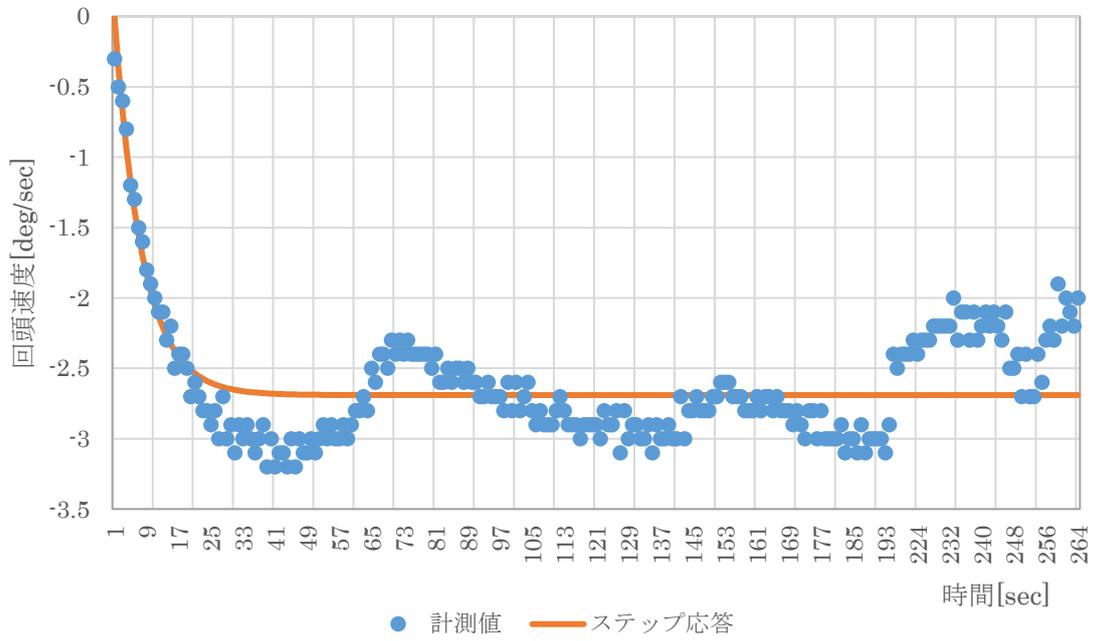


図 3.7 バウスラスター実験結果(指令値:-2000rpm)

バウスラスター指令値 2000rpm

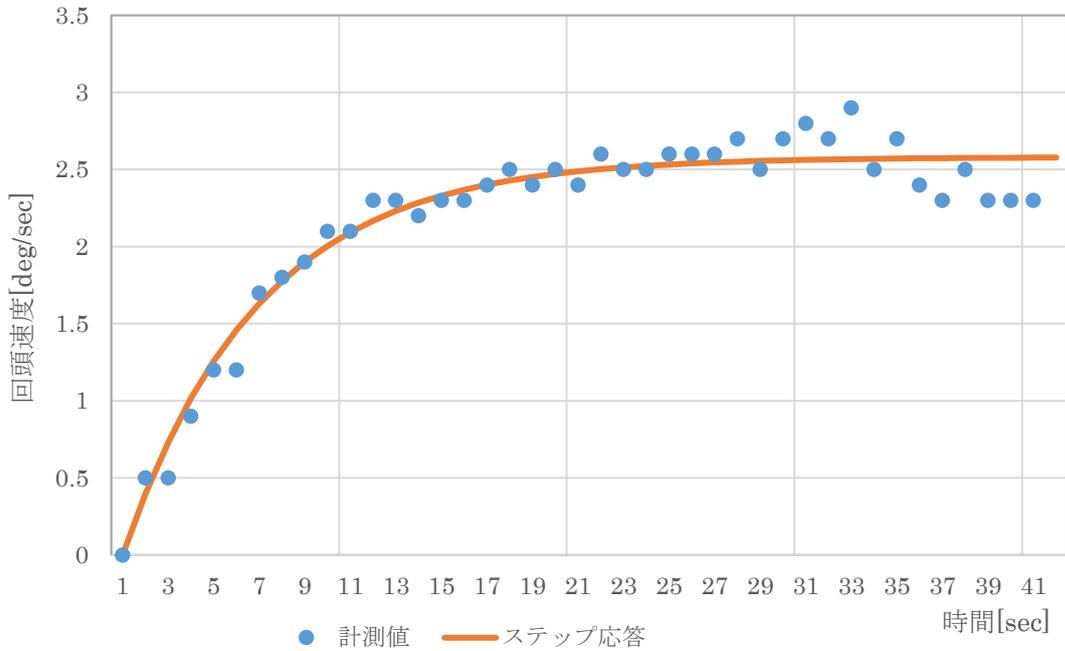


図 3.8 バウスラスター実験結果(指令値:2000rpm)

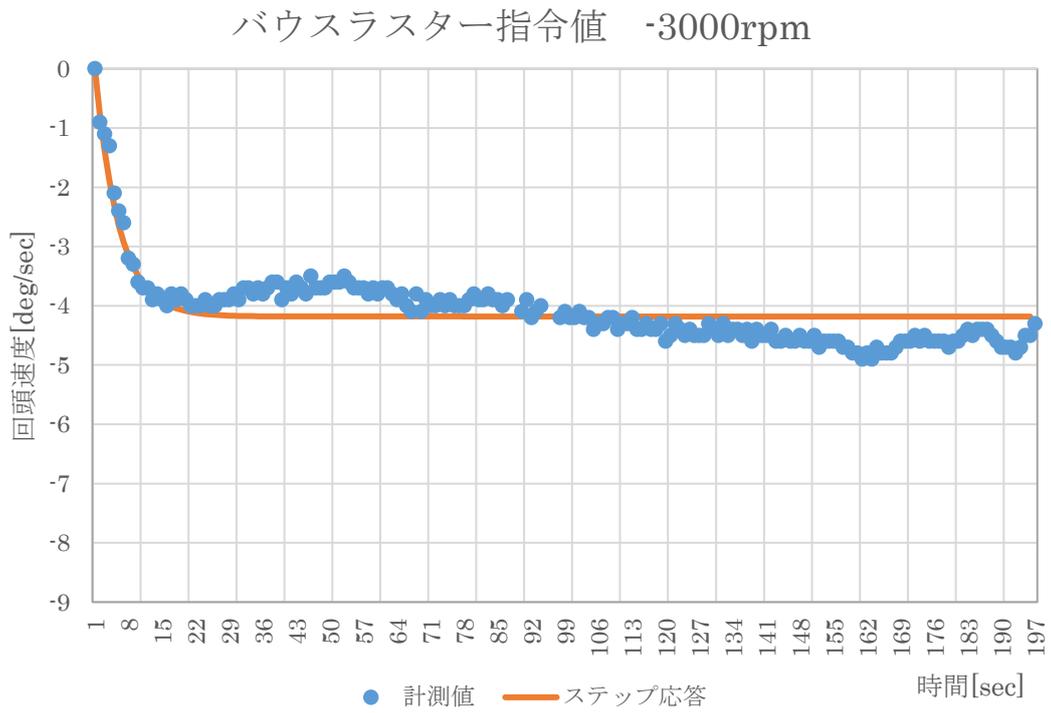


図 3.9 バウスラスター実験結果(指令値:-3000rpm)

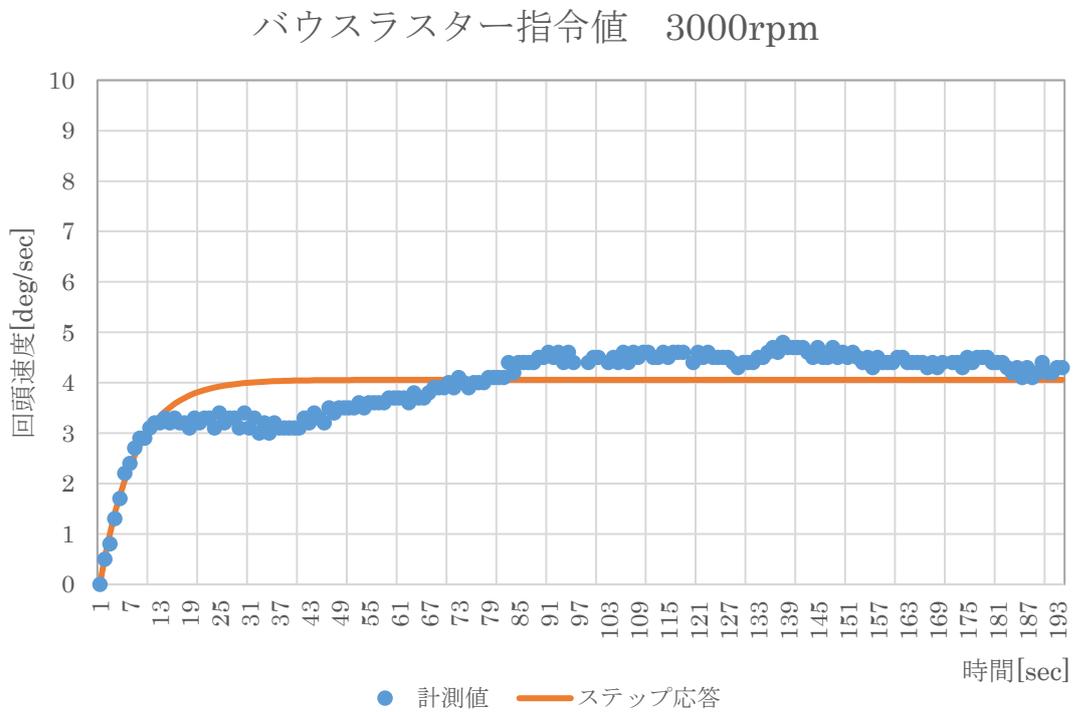


図 3.10 バウスラスター実験結果(指令値:3000rpm)

実験結果より求めた時定数を用いて、PID 制御をするためのゲインをシミュレーションによって求める。シミュレーション設計には MATLAB を使用した。

次にシミュレーション②として、シミュレーション①の結果を用いて船首方位の制御をシミュレートする。シミュレーション②の入力は角度の差で、PID 制御によりバウスラスタの回転数を制御し、最終的に角度の変化を計算結果として返す。旋回運動性能実験で得たステップ応答のゲインは速度制御(角速度)であるので、角度を導出するため角速度を積分する必要がある。ブロック図①に積分器と PID 制御器を追加したブロック図②を図 3.13, シミュレーション結果を図 3.14, シミュレーションの初期条件と PID 制御の各ゲインを表 3.3 に示す。シミュレーション②の結果で得られた PID 制御のゲインを定点保持制御システムのプログラムに利用し、実験を通じてゲイン値の調整を行う。



図 3.11 ブロック図①

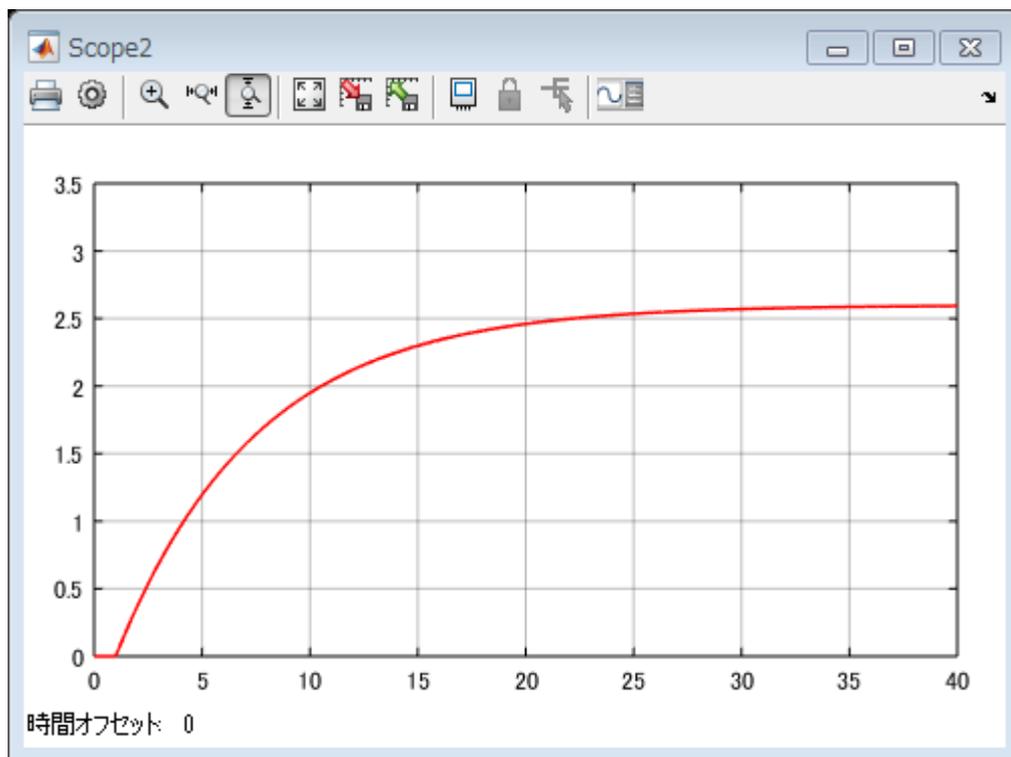


図 3.12 シミュレーション①結果

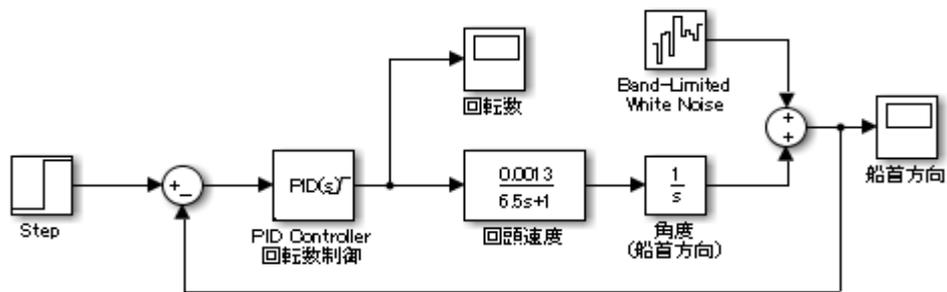


図 3.13 ブロック図②

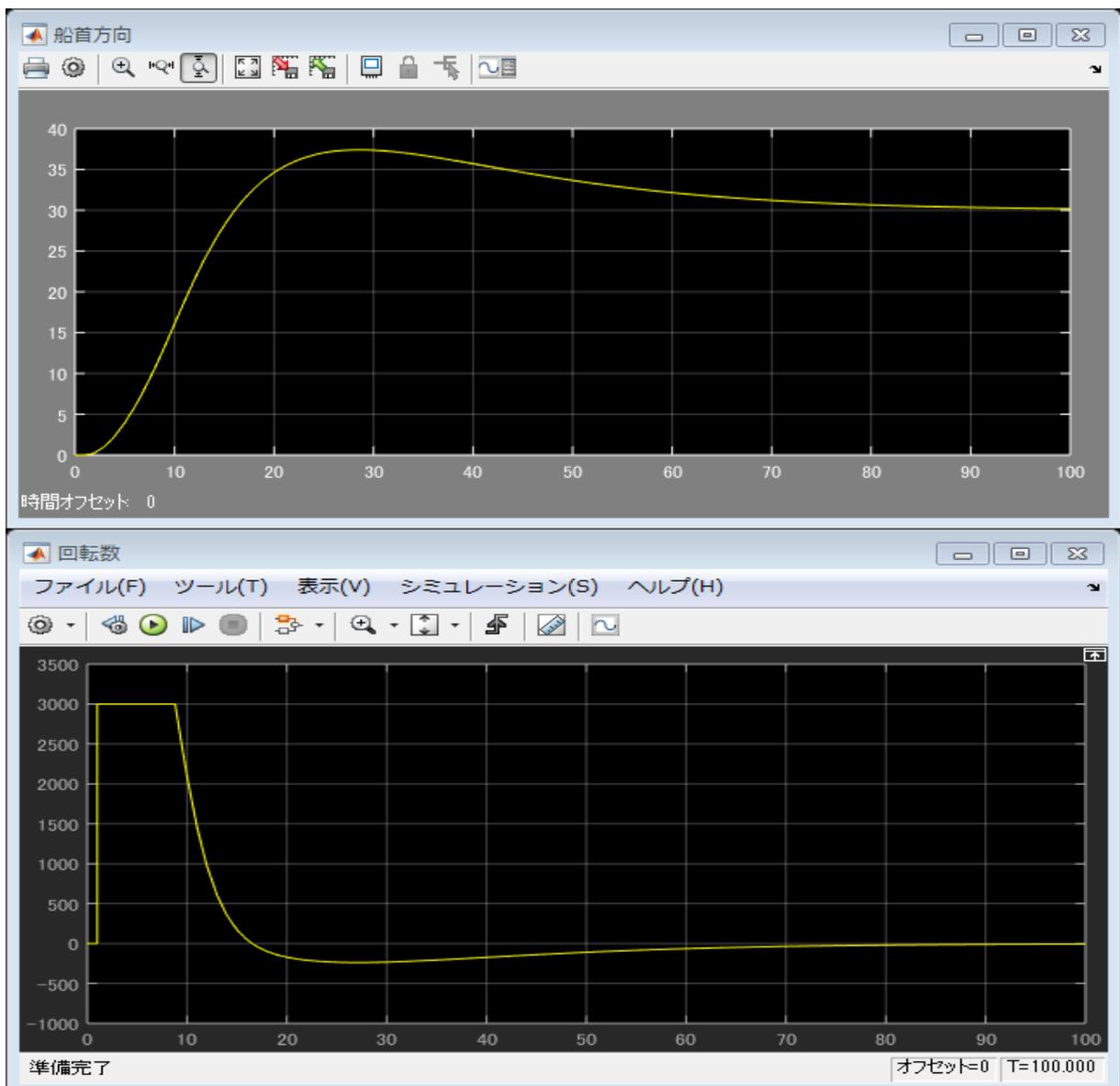


図 3.14 シミュレーション②の結果

表 3.3 シミュレーション②の条件

項目	値
K	0.0013
T	6.5
L	1
ステップ入力(角度)	0→30
ステップ入力時間	1[sec]
バウスラスタータン範囲	-1000～3000[rpm]
シミュレーション値	
Kp	247.097800141482
Ki	8.83671681096552
Kd	1205.2404842906

3.3 並列運転旋回性能試験

実海域において推進機を 0.3~1.0kW で運転中にバウスラスターを 3000rpm で運転したときの旋回性能計測実験を行った。前節で述べたとおり制御方式が異なるため推進機は電力、バウスラスターは回転数の指令値を設定する。バウスラスターは船速が増加するとその性能が低下してしまうことが知られている[8]。よって定点保持制御を行うためには推進機とバウスラスターの並列運転時でもバウスラスターの旋回性能が確保できるかどうかを確認しなければならない。推進機による船速を悪天候時の外乱とみなし、天候により外乱が大きい場合でもバウスラスターでの旋回が可能かどうかということも合わせて検証する必要がある。従って、この実験では最大 2knot ほど船速が出ているときの旋回運動特性を明らかにすることが目的である。船速が 2knot ほどになるのは推進機出力が 1.0kW だということが 3.1 の実験でわかっているため、推進機出力の上限を 1.0kW として設定した。推進機出力の上限はバウスラスターとの並列運転時のみであり、推進機を単体で運転する場合は 1.0kW 以上の出力で運転する場合もある。バウスラスターの出力が最大で 1.5kW(5000rpm)であるのに対して推進機出力は最大で 40kW であるので、船位保持はより高出力な推進機を中心に行うほうが良い。図 3.15 に船速に対する回頭速度を示す。実験はバウスラスター単体運転時の実験と同様に船が 2 周するまで続けた。

前節の図 3.8 と図 3.15 より、定常時でおよそ 4[rad/sec]の回頭速度であったのに対し、推進機出力が 1.0kW のときの回頭速度は左右それぞれ 2.3[rad/sec]と 3.1[rad/sec]と低下傾向にある。3.2 バウスラスター単体運転時の実験結果と比較しても、定常時のバウスラスター 2000rpm 運転時と大差がないことが確認できた。旋回性能は低下するものの、大きく旋回する場合は舵や推進機を使用しバウスラスターでは微調整ができればよいので、バウスラスターの旋回性能は十分であると判断した。

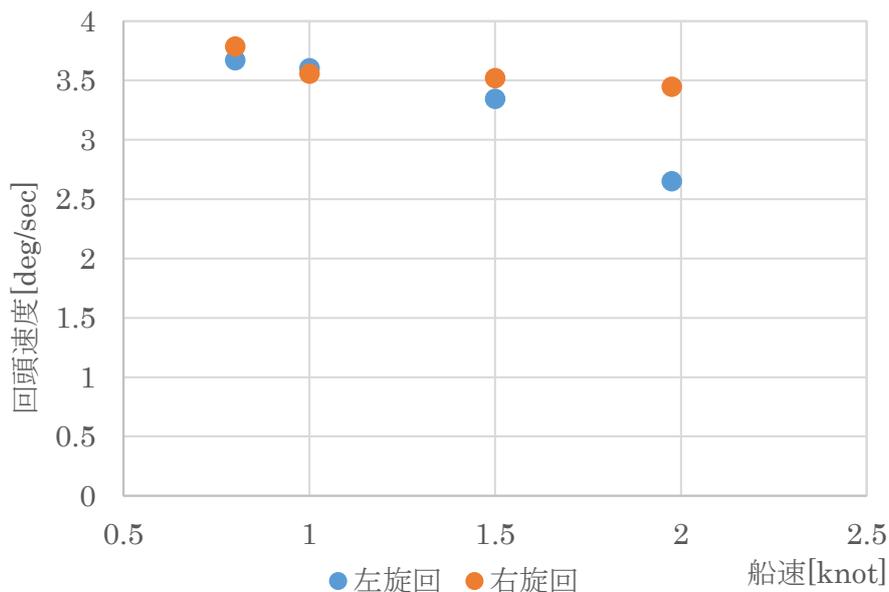


図 3.15 推進機出力時の旋回性能と船速の関係

4. 定点保持制御システム

4.1 概要

本稿の定点保持制御システムは外乱推定と船首方位制御と船位保持制御の3つの機能で構成されている。システムの概要図を図4.1に示す。

定点保持制御システムでは始めに外乱推定による制御方位の演算を行い(図4.1-1)外乱推定から得た周囲の外乱ベクトルの上流を目標船首方位に設定する。その後リアルタイムで計算される現在地と制御開始地点の距離をもとに船首方位制御(図4.1-2)と船位保持制御(図4.1-3)のモード切替を行い、許容範囲内に船位を保持する。4.2節から4.4節ではこれらの機能の詳細を述べる。

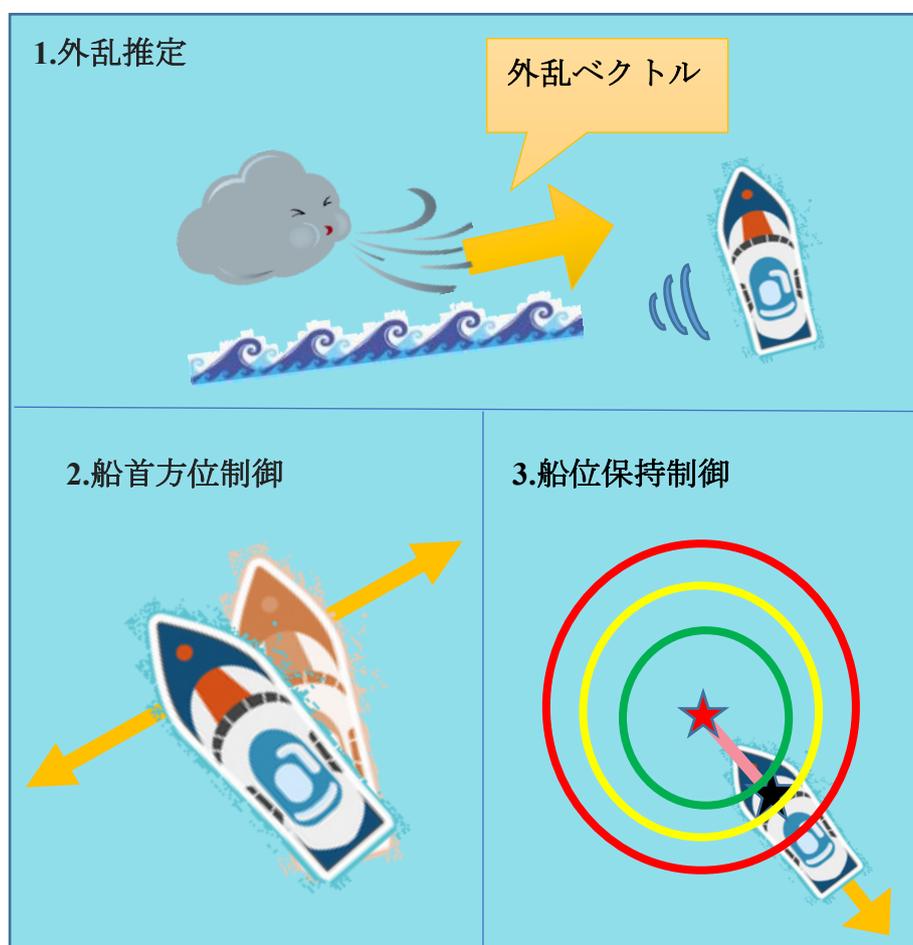


図4.1 定点保持制御システムの概略

4.2 外乱推定による制御方位の演算

外乱推定では、動力以外の船を移動させる潮流や海風といった自然界の力や、他の船からの影響などをまとめて外乱とする。推定を開始した地点を制御用 PC で記録して制御開始地点とし、制御開始地点から数秒ほど漂流して制御用 PC で外乱ベクトルを算出する。漂流によって外乱ベクトルを算出することで、風速計や潮流計などの計器を省略することができ、船体に対する総合的な外乱の影響を計ることができる。漂流する時間や距離は船の全長や許容範囲の半径によって制御者が判断する。この外乱推定は最初の一回だけ行われる。その後の外乱ベクトルの変更や外乱以外の方向に移動しても船首方位制御や船位保持制御のアルゴリズムによって補うことができる。

外乱推定中は操作パネルに「外乱推定中」と表示され、十分に外乱ベクトルが計測できたと判断されると「外乱推定終了」という表示にかわり、操作パネルの右側ステータス画面で外乱方向が確認できる(図 4.2)。



図 4.2 操作パネル 外乱推定画面

外乱推定の計算は以下のとおりである。

- (1). 制御パネルの「開始」ボタンを押すとソフトが起動し、ボタンを押したときの現地点情報として緯度経度記録する。この地点が制御開始地点である。
- (2). 毎秒ごとに現地点から制御開始地点までの距離と、現地点からみた制御開始地点の方角を計算する。
- (3). 距離がある程度の大きさになったとき、最後に計算した方角を外乱方向、距離を推定時間で割ったものを外乱速度として外乱ベクトルを作成する。

4.3 船首方位制御

船首方位制御では、バウスラスタを主に使用し船首方位を目標方向に変位する(図 4.1-2)。船首方位を大幅に変位する場合は、バウスラスタのみの推力では外乱と拮抗して旋回できない場合があるため、舵と推進機を低出力にて使用する。制御中は制御用 PC では現在地から制御開始地点の方向と現在船首方位の偏差をリアルタイムで毎秒ごとに計算し、偏差と前章で求めたゲインを用いてバウスラスタの回転数を PID 制御する。

定点保持制御システムの始めでは、外乱ベクトルの上流を目標方位に設定する。そうすることで船位保持制御において、最大出力 1.5kW のバウスラスタより最大出力が 40.0kW である推進機を有効に使うことができる[9]。その後船位が制御開始地点から一定距離以上離れた場合、制御開始地点へ戻るための目標船首方位を決定する。

この定点保持制御システムは採水・採泥などの装置をつけての調査を前提としている。らいちょう I ではそういった装置をつけるために船首に A フレームが取り付けられ、船首から調査装置を着水することが想定されている。よって船首方位を大きく回頭してしまうと装置をつるしているロープに推進機がからまる危険性が高まる。よってこのシステムの目標船首方位は、外乱ベクトルの上流方向から±90度以上旋回しないように3つに場合分けされたなかで決定される。この場合分けのための境界角は船の旋回性能などを考慮して設定する。目標船首方位の三つの場合分けを図 4.3 に示す。

- (1). 制御開始地点が船首方位のほぼ延長線上にある場合、目標船首方位は設定せず船首方位の変位は行わない。
- (2). 制御開始地点が船位の斜め前方にある場合、目標船首方位は制御開始地点の方向とし旋回する。
- (3). 制御開始地点が船位の斜め後方にある場合、制御開始地点の反対方向を目標船首方位とし旋回する。

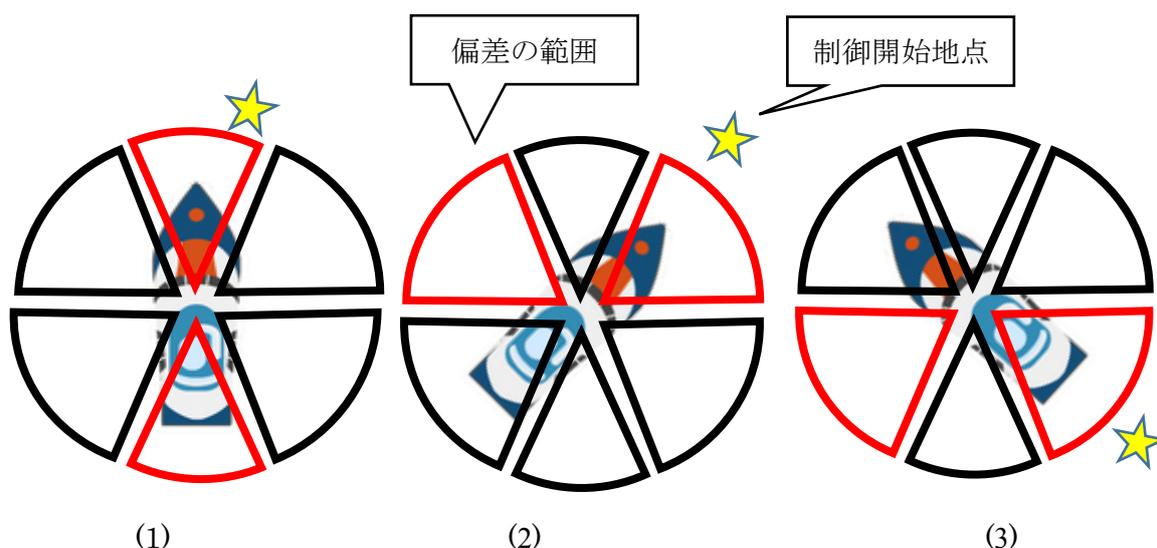


図 4.3 目標方位の場合分け

4.4 船位保持制御

船位保持制御では、推進機を用いて船舶の前後方向の調整を行う(図 4.1-3)。制御中は制御用 PC で制御開始地点から現在地までの距離をリアルタイムで計算する。船位を保持する方法は、制御開始地点からの距離が一定以上大きくなったら前進(または後進)し、距離がある程度縮まったら推進機を止めて、円の中心に留まるという方法である。このときの推進機の前後進は前節の船首方位制御の場合わけにより決定し、出力は距離と船速をもとに PID 制御される。そして船位保持制御の中でバウスラスタや推進機といった動力機器の ON/OFF のモードを切り替える境界線及び制御目標となる 3 つの任意の円を設定する。

半径の小さい順に説明する。一つ目は不感帯である(図 4.4-緑)。この範囲内に現在地(サテライトコンパス)がある場合、動力機器は運転を停止する。二つ目は推進機を ON にするスイッチとなる制御範囲である(図 4.4-黄)。そして三つ目は定点保持制御システムにおいて船位を保持する範囲である(図 4.4-赤)。この赤い円の範囲内に船位が留まるように各機能のゲインや境界が決定される。

これらの範囲円の半径は、求める定点保持の精度や船の運動特性により決定する。船から制御開始地点の距離が制御用の設定距離(黄色の円)以上になったら推進器を起動し、船位が安定距離(緑色の円)内になるまで推進機運転を続ける(図 4.5)。

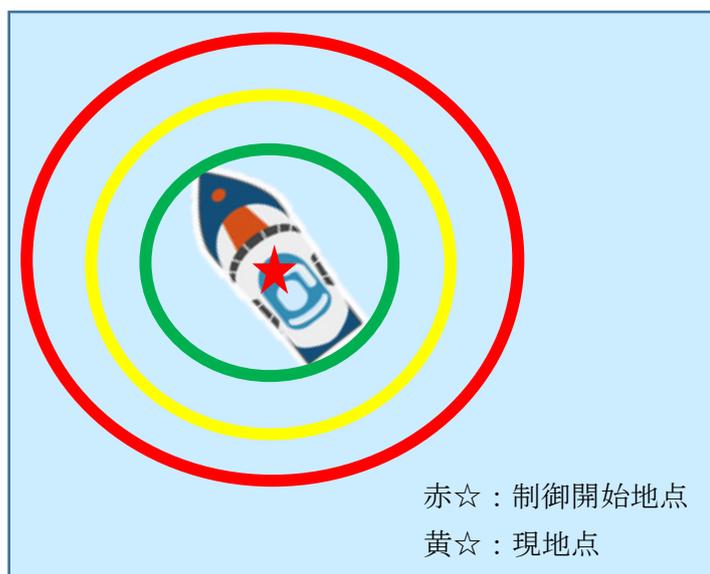


図 4.4 範囲円

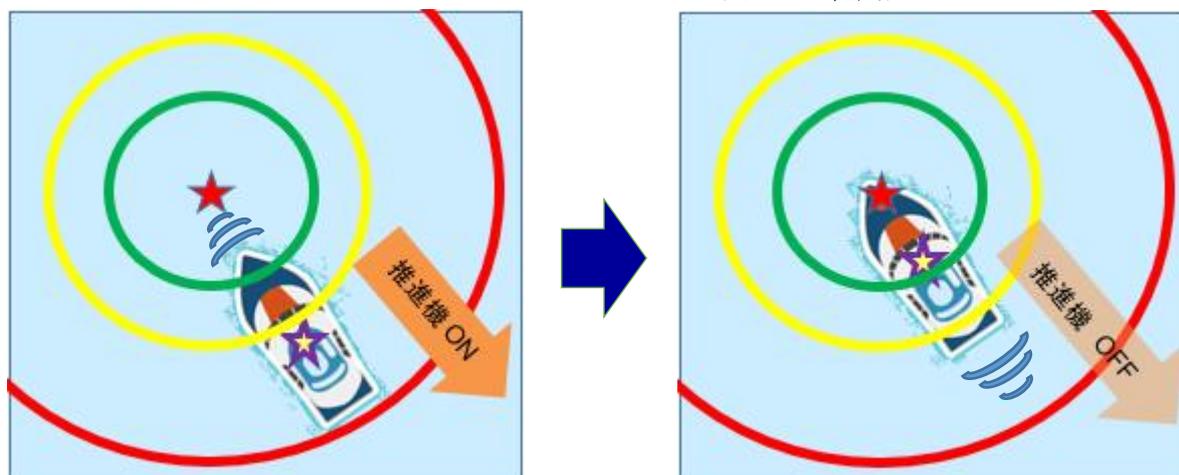


図 4.5 船位保持制御の推進機 ON/OFF

5. 定点保持制御システム検証実験

実海域にて、定点保持制御システムを実装したらichou I を使ってシステムの検証実験を行った。定点保持地点で外乱推定を開始し、その後定点保持制御システムを開始する。5分間実験を行ったあと制御を停止し、そのまま5分間ほど漂流する。定点保持制御後に漂流することで、定点保持制御のときの軌跡と漂流中の軌跡を比較してシステムの有効性を示す。定点保持中の位置データと漂流中の位置データを比較し、本システムの有効性を示す。

5.1 航行条件

実験域を図 5.1 に示す。



図 5.1 実験海域

この実験で船位保持制御のために設定した円の半径を表 5.1 に示す。

表 5.1 制御用円の半径の設定

項目	半径 [m]
不感帯(緑色の円)	5
モード切り替えライン(黄色の円)	7
保持範囲(赤色の円)	10

5.2 実験結果

実験結果の全体図を図 5.2, 軌跡を拡大したものを図 5.3, 定点保持制御時の船首方位の統計を図 5.4 に示す。この実験時は、東南東から南南東にかけて平均風速 2.1[m/s]の風が吹き比較のおだやかな気候であった。図 5.2 は地図上に実験中に取得した緯度・経度の船位データをプロットして、前節で設定した円と半径 15m の白い円を同じ地図上にプロットしたものである。円内にある赤い点が定点保持制御システム起動時の軌跡で、緑色の点が漂流時の軌跡を示している。図 5.3 の赤い点は図 5.2 と同様で、黄色い点はスタート地点を示している。加えて外乱推定によって得た外乱ベクトルと定点保持制御後の漂流により船が流された方向をそれぞれ黄色と緑色の矢印で表している。

図 5.4 は 360 度のうち定点保持制御中に船首方位が向いてた回数である。一番回数が多く、頻繁に船首方位が向いていたのが 270 度である。赤線が外乱ベクトルの上流にあたる角度で 296.565 度、青色が制御開始時の船首方位で 17.4 度である。目標船首方位が外乱ベクトルの上流である 296 度に設定されているのに対して 270 度を向いている回数が多いことに対して考察する。図 5.2 の漂流時の軌跡と図 5.4 の外乱推定による外乱方向を比較すると、実験中に外乱ベクトルが変化していることがわかる。制御始めの外乱推定では 116 度方向に流されていると計測されたが、漂流ではおよそ 170 度方向に流れている。船は基本的に、外乱に船首方向をたてて推進機を有効的に使用するため、外乱推定で得た 116 度の反対である 296 度(外乱ベクトルの上流)に船首方位を保つように設定されている。従って 170 度の外乱に対しては船が側面から流れを受けることになり、船首が回頭したと考えられる。

図 5.2, 5.3 より、他船の引き波などにより外乱推定で得た外乱ベクトル以外の方向に流されたが、制御がはたらいて円の中心に戻っていることがわかる。そして図 5.4 より、船首に採水装置などをつけたときを想定しての「外乱ベクトルから 90 度以上旋回しない」という制約が守られているのがわかる。

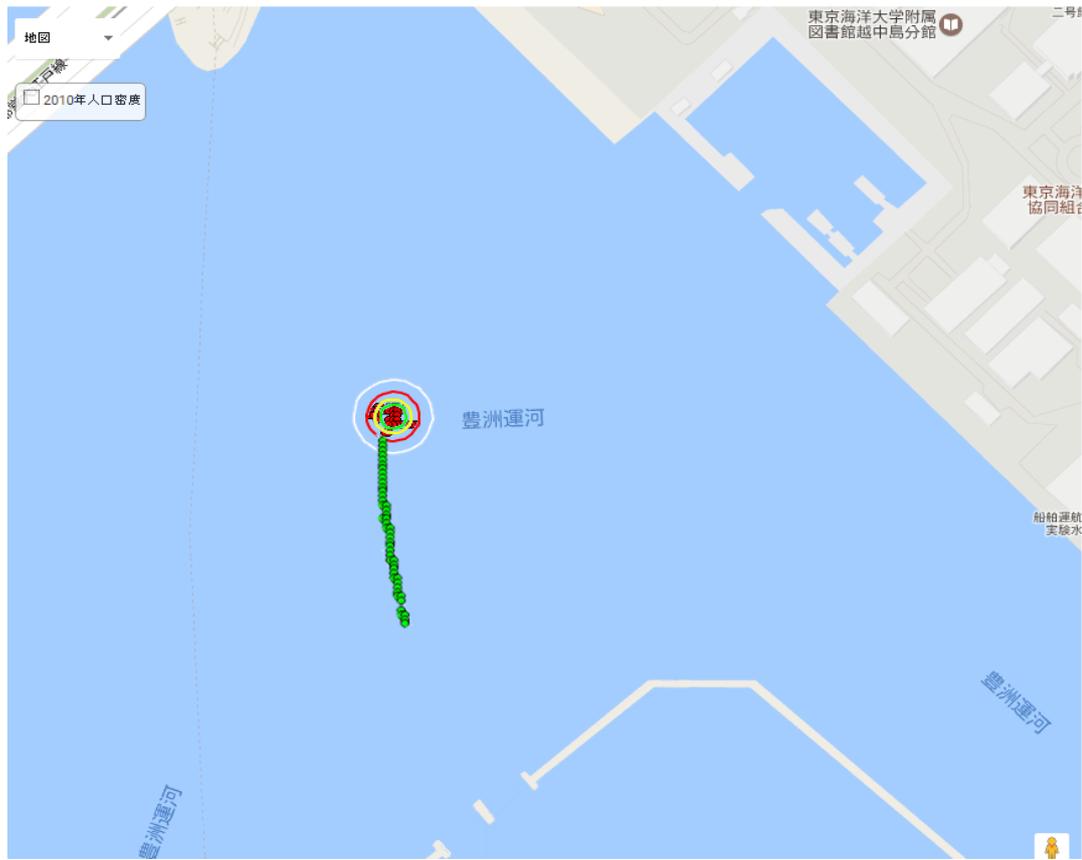


図 5.2 実験結果—全体

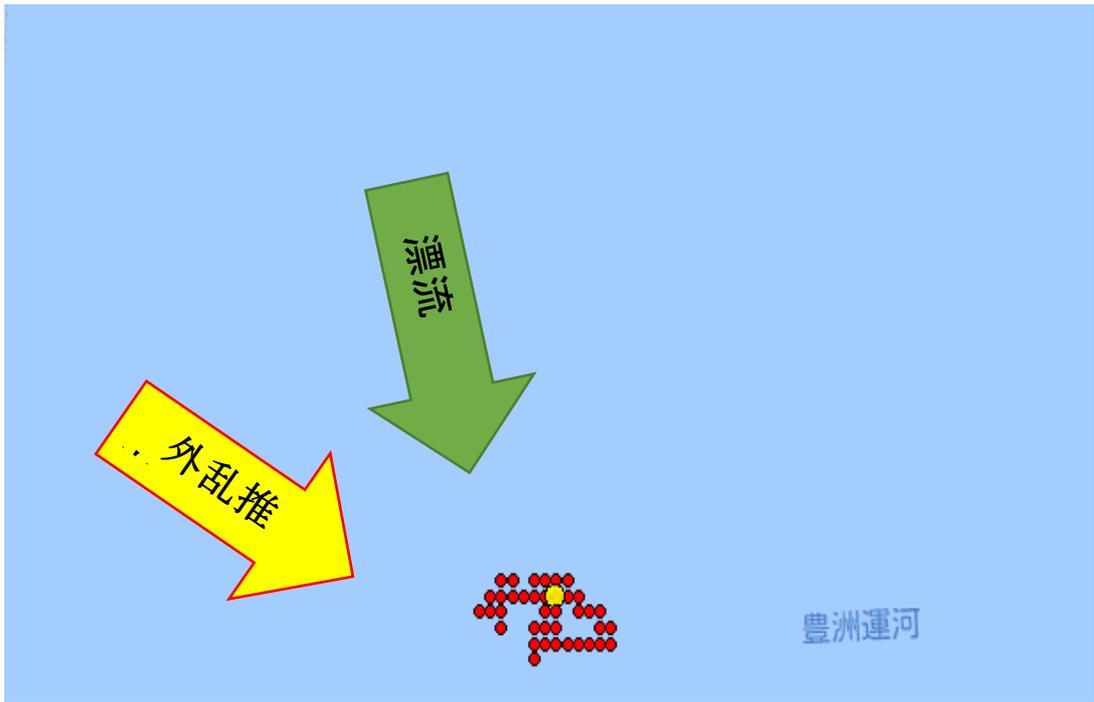


図 5.3 実験結果—拡大

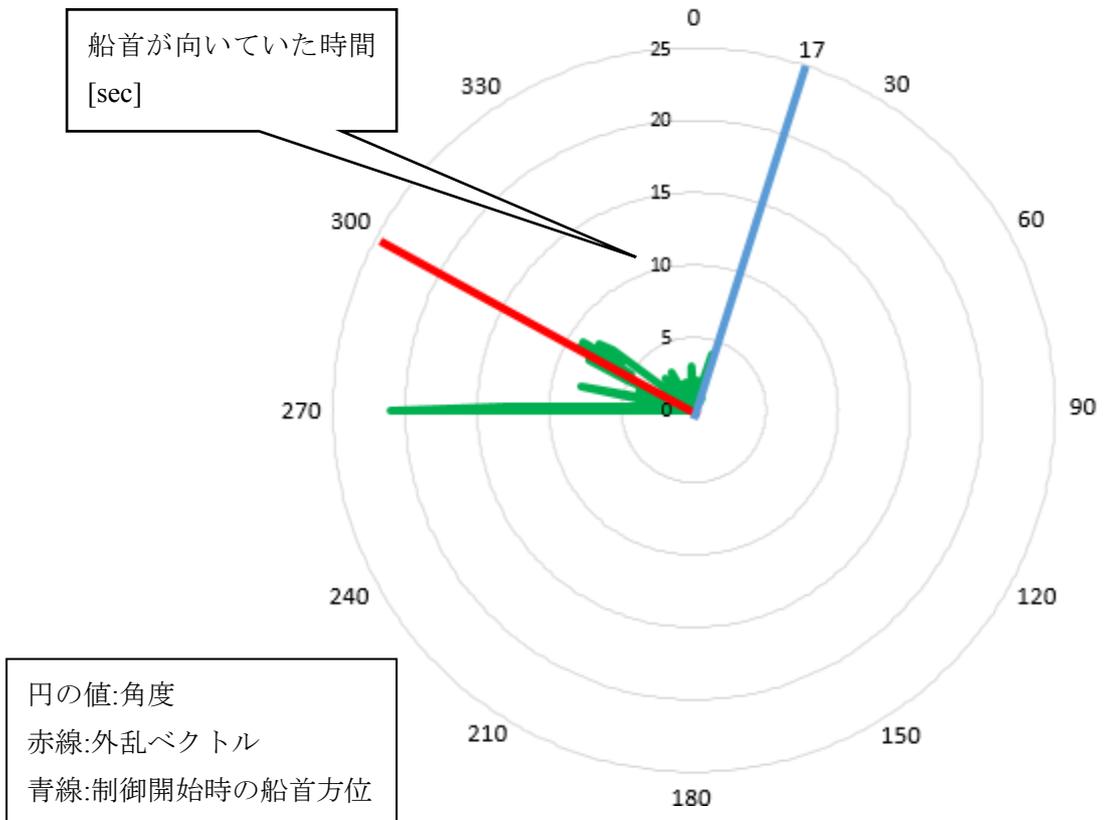


図 5.4 定点保持制御中の船首方位の統計

6. 結言

近年日本では海洋資源の開発や海洋生物の利用といった海洋調査に力を入れており、中でも浅海域では地球温暖化や災害の影響を定期的に観測することが求められている。定期観測や定点での観測は海洋調査船が担っている。海洋調査船では、固定・漂流ブイではできないような、採水・採泥計測を行うことができる。採水計測や海洋生物学的な調査は水深 2~25m の海域が多く、主に小型船で行われている。定点保持を行う機能も開発されているが、その多くは新造船への搭載を想定したものであり、既存のアクチュエータの数が限られる小型船で定点保持するには熟練の技術が必要である。より精度の高い調査を行うためには、海洋調査技術の開発や操船技術の発展が不可欠である。

しかし海洋技術の開発費用は少なく、調査船や調査のために定点保持などの手動操船ができる技術者が減少している。そのため操船を最低限の改造で自動化して、効率的に調査を行い少ない人員や無人で船を運航することが求められている。自動操船技術は無人船が遠隔で指示された航路に従って航行するシステムと、目標地点で定点保持などの作業を行うシステムとに分けることができる。

本研究では、後者うち小型船を自動で定点保持するシステムを開発した。提案する定点保持制御システムは、推進機 1 機と舵 1 台とバウスラスター 1 機を使用した。調査機器や航海計器によるデータ収集と定点保持のためのフィードバック制御を制御用 PC でおこない、PLC(programmable logic controller)を通じてバウスラスターや推進機を操作した。

定点保持制御システムは外乱推定と船首方位保持と船位保持制御の三つの機能から構成されている。始めに外乱推定を行い、船が流される方向を外乱としてベクトル化する。外乱ベクトルの上流に船首をたてることで、推力の大きい推進機を効果的に使用することが出来る。その後、制御開始地点と現地点の距離や現地点からみた制御開始地点の方向などをリアルタイムで算出し、算出したデータをもとに船首方位制御と船位保持制御を効果的なタイミングで行う。船首方位制御や船位保持制御においてバウスラスターや推進機の PID 制御を行い、船位を制御開始地点の周辺で保持する。

本研究ではバウスラスターと推進機を保有する研究船らいちょう I を用いて定点調査のための定点保持制御システムを開発し東京湾で検証実験を行った。そして開発した定点保持制御システムを用いて小型船を半径 10m 以内に保持できることが確認できた。

今後の課題としては、本研究の要である外乱推定の精度向上および外乱推定以外での方法で船首方位を立てる方法の開発が挙げられる。今回は定点保持制御の前に外乱推定を行ったが、制御中も外乱を常に算出できるとさらに定点保持の精度が向上すると考える。このとき外乱を算出するのではなく、帆を用いて自然と船首を外乱に向ける方法や、風向風速計の計測値を外乱方向としても使用する方法も視野に入れる必要がある。しかし、船が受ける外乱は風の影響ばかりではなく、調査装置をつければ曳航索に加わる潮流も無視できないため、船の特性を考慮した研究が必要である。

謝辞

まず始めに，本研究を行うにあたり，多大なるご指導やご助言を頂いた東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科 清水悦郎准教授，木船弘康准教授ならびに産学・地域連携推進機構 大出剛客員教授に深く感謝いたします。また，研究室生活においては，様々なサポートをしていただいた福原豊助手，土屋和行研究員，高宮敏通氏をはじめロボット工学研究室の皆様及び，産学・地域連携推進機構電池推進船プロジェクトの皆様にご感謝いたします。

参考文献

- 1) 東京湾岸自治体環境保全会議(H24.3)「東京湾水質調査報告書(平成 22 年度)」
<http://www.tokyowangan.jp/database/pdf/h22hokoku.pdf>
- 2) 国土交通省(H18.8)「持続可能な海洋・沿岸域の管理に向けて」
<http://www.mlit.go.jp/singikai/kokudosin/keikaku/11/07.pdf>
- 3) 三重県農水商工部水産基盤室(H20.3)「アマモ場再生ガイドブック」
http://www.jfa.maff.go.jp/j/study/keikaku/pdf/7-moba-siryu3_3.pdf
- 4) 平成 21 年度東京都内湾 赤潮速報 - 東京都環境局
http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/water/tokyo_bay/H28_akasiwo_HP1122.pdf
- 5) 水産庁/藻場の働きと現状 - 農林水産省
http://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/tamenteki/kaisetu/moba/moba_genjou/
- 6) 藻場・干潟の現状及び効果的な藻場・干潟の保全・創造に向けた課題について
<http://www.jfa.maff.go.jp/j/study/keikaku/pdf/4-moba-siryu2.pdf>
- 7) アマモ場再生ガイドブック - 水産庁
http://www.jfa.maff.go.jp/j/study/keikaku/pdf/7-moba-siryu3_3.pdf
- 8) 我が国の海洋科学推進に不可欠な海洋研究船の航日数確保について
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-h160609.pdf>
- 9) Newsweek(H26.10)「船も遠隔操作で動かす時代」
http://www.newsweekjapan.jp/stories/world/2014/10/post-3429_1.php
- 10) How Does Dynamic Positioning Work? -RIGZONE
http://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=342
- 11) GARMIN MARINE 「自動操船で簡単ポートポジショニング GARMIN エンジン GPS アンカー TR-1 Gold」
<http://www.g-fishing.com/blog/portfolio-items/tr-1/>
- 12) 清水悦郎, 西村真佐人, 大出剛(2011), Navigation Support System for electric boat, Electric Ship Tech Symp, IEEE, pp12-24
- 13) 山岸雅, 清水悦郎, 大出剛 (2014), Development of Navigation Support System for Electric Boat considering Influence of Disturbance, THE JAPAN INSTITUTE OF MARINE ENGINEERING, JIME
- 14) 電池推進船プロジェクト - 東京海洋大学
<http://www2.kaiyodai.ac.jp/~takamasa/kaiyodai-ees-project/>
- 15) 東京湾水質調査報告書 (平成 22 年度) - 東京湾岸自治体環境保全会議
<http://www.tokyowangan.jp/database/pdf/h22hokoku.pdf>

- 16) 前川和義, 貴島勝郎, 鳥野慶一(H11.11) 「漁船に装備されたバウスラスターの性能に及ぼす前進速度影響の推定」

http://ci.nii.ac.jp/els/110007627813.pdf?id=ART0009447090&type=pdf&lang=jp&host=cinii&order_no=&ppv_type=0&lang_sw=&no=1485846838&cp=

- 17) Akasaka N, Yamamoto M, et al (2003), Design Method of Ship's Position Keeping Control System and Verification by Field Tests, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 69, No.693