

# TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

Wi-Fiを用いた遠隔操船システムの開発

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: 高島, 京平 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1431">https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1431</a>

修士学位論文

Wi-Fi を用いた遠隔操船システムの開発

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

高畠京平



修士学位論文

Wi-Fi を用いた遠隔操船システムの開発

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

高畠京平

## 目次

1. 緒言 .....	1
1.1. 研究の背景.....	1
1.2. 研究の目的.....	2
1.3. 本論文の構成.....	4
2. 電池推進船らいちょうシリーズ.....	5
2.1. らいちょう I .....	6
2.2. らいちょう N.....	10
3. Wi-Fi システム.....	14
3.1. 電波の伝搬特性 .....	16
3.1.1. フレネルゾーン .....	16
3.1.2. 2波モデル.....	18
3.1.3. 海上での伝搬特性の検証–フレネルゾーン .....	21
3.1.4. 海上での伝搬特性の検証–2波モデル.....	22
4. 遠隔操船システム .....	24
4.1. 遠隔操船システムの開発.....	25
4.1.1. 操船システム .....	25
4.1.2. 通信システム .....	33
4.2. 実験.....	35
4.2.1. マニュアルモード実験・結果.....	35
4.2.2. オートパイロットモード実験・結果.....	37
4.2.3. オートトリブモード実験・結果.....	40
4.2.4. 二重化回線実験・結果.....	42
5. 結言 .....	44
謝辞.....	46
参考文献 .....	47

# 1. 緒言

## 1.1. 研究の背景

四方を海に囲まれた日本において、海運は非常に重要な役割を担っている。国際貨物輸送における海上輸送と航空輸送の割合は 99.7%が海上輸送となっており、日本での暮らしや産業を支えている。しかし、1974 年には 278,000 人いた船員の数は、2012 年には 66,000 人まで減少し、大きな問題となっている。また、海事における問題は船員の減少だけではない。公共交通関連の事故・トラブルにはヒューマンエラーとの関連が指摘されているが、海難事故においてヒューマンエラーによる事故の割合は全体の 75%以上である (図 1.1)。これは、他の公共交通の鉄道や自動車による事故と比較しても非常に大きい割合である (表 1.1)。さらには、環境への影響配慮し、排ガス規制が行なわれ、環境負荷低減対策や再生可能エネルギーの活用も喫緊の課題となっている。

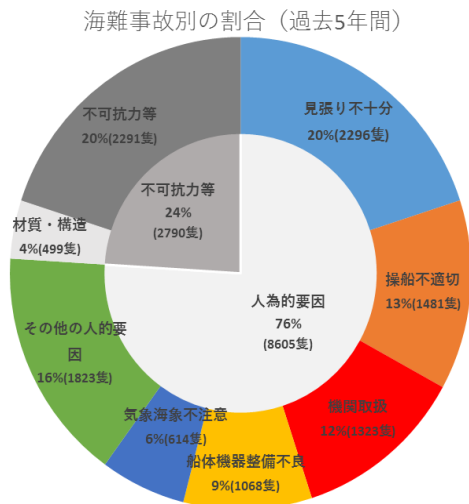


図 1.1. 海難事故別の割合  
(参考：海上保安庁)

表 1.1. 公共交通機関別  
ヒューマンエラーによる事故の割合

公共交通機関種類	ヒューマンエラーによる事故の割合[%]
鉄道	17.7
航空	22.6
專業自動車	58.1
船舶	85.5

(参考：国土交通省)

人的負担の削減やヒューマンエラーによる事故を減少させるために、ICT や自動化が様々なシステムに積極的に導入され、鉄道や自動車分野においては、無人運転に関する技術開発が活発的に行われている。たとえば、自動車では自動ブレーキシステムやレーンキープアシストといった運転支援システムが搭載された。鉄道では、日本の「ゆりかもめ」やデンマークの「コペンハーゲン地下鉄」が既に遠隔監視、指令システムを伴った無人運転を行なっている。このような、自動的に旅客を輸送するシステムは Autonomous People Mover あるいは Automated People Mover と呼ばれている [1]。

一方で船舶でも、無人化や自律化に関する研究が世界的に行なわれている [2]。特に、欧州やアメリカを中心に、「遠隔操船型自律航行船(Autonomous Ship)」を開発するプロジェクトが開始されている (図 1.2)。遠隔操船型自律航行船とは「ゆりかもめ」や「コペンハーゲン地下鉄」と同

様に、自律的に航行できる機能と、遠隔地からの指令を受け、それに従って運航することができる機能を持ち合わせた船舶である。

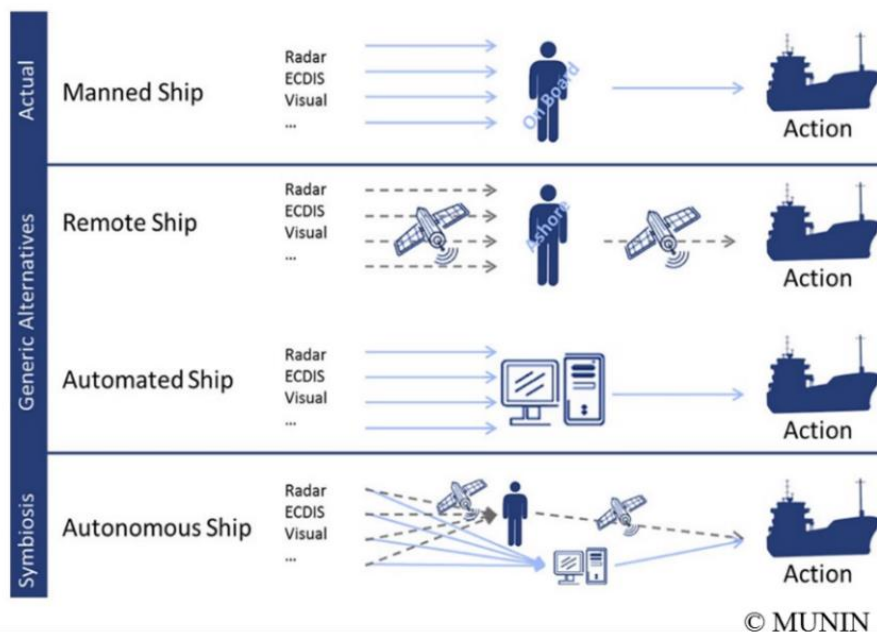


図 1.2. 遠隔操船型自律航行船 (Autonomous Ship)

日本では、これまで自動化船や M ゼロ船といった船を実現しているが、完全な無人船の開発は一度断念している。しかし、現状の海運がおかれている状況から、船舶の安全性や効率性の向上および、環境保全性確保のための研究開発は必要であると考えられている。

## 1.2. 研究の目的

このような、世界的な無人船の開発の流れを受け、本学では、次世代水上交通システムの開発を行っており、排気ガスを出さない電池で動く船を使った、無人水上バスによる都市交通システム、Autonomous Waterborne People Mover の実現を目指している。Autonomous Waterborne People Mover の構成は次の図 1.3 のようになる。このシステムは、基地局、遠洋エリア、近海・河川エリアの 3 つに分けられ、基地局、遠隔操船型自律航行船、調査用ブイ、港、棧橋、通信システムから成る。遠隔操船型自律航行船は自律的に航行を行なうが、それらは基地局から常に監視され、状況に応じて指令を受ける。さらに、調査用ブイや港、棧橋から風や潮流の情報を船舶にフィードバックし、より安全な航海を実現する。これらのシステムは船員の労働環境の改善や船員不足の解消、海難事故の防止に有効であると期待される。

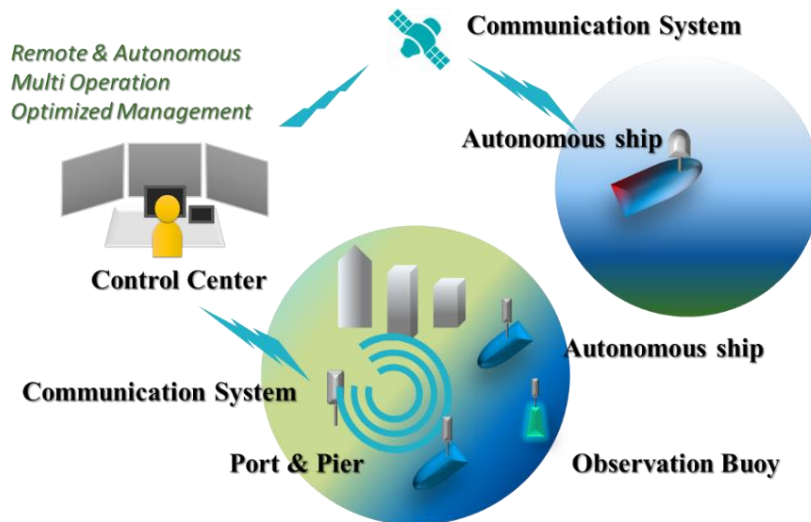


図 1.3. Autonomous Waterborne People Mover

Autonomous Waterborne People Mover の中で特に重要となるのは、基地局から船舶を操船する、遠隔操船システムである。本稿では、遠隔操船システムに必要な基地局、遠隔操船型自律航行船、通信システムを中心に開発を行なう。

しかし、遠隔操船システムにおいて、通信システムが一つの問題となっている。一般に遠隔からの監視や操作をするためには、オペレータのいる遠隔地との間で互いにデータを送受信する必要がある。現在の海上通信は主に衛星通信が使用されており、衛星通信では船舶から遠隔地へ数百 kbps 程度でしか通信できない。遠洋を航海する船舶は周りに他船や障害物が少ないため、少ないデータ量でも十分に遠隔からの操作ができるかもしれないが、近海や河川等、輻輳海域では周りに障害物が多くあり、船舶の周りの状況を映像で遠隔地に送り、オペレータは送られてきた映像をリアルタイムで見ながら操船することが必要になると考えられる。映像データを船舶から遠隔地へ送信する場合、数 Mbps 程度のビットレートが必要となるが、現在使用されている衛星通信では不十分である。

そこでこの問題を解決するために我々は Wi-Fi の利用を提案する。近年、数 km 離れていても数 Mbps のビットレートで通信のできる Wi-Fi アンテナが開発され、市販されている。衛星通信ほど長距離の通信はできないが、港や陸の近くの海域などでは十分に使用できる通信距離である。さらに、通信費が高い衛星通信システムに比べ、Wi-Fi 通信システムは安価に構築することができる。また、Wi-Fi は国際標準の無線規格であり、世界中どこでも使用できる。さらに、Wi-Fi アンテナ等の部品も簡単に手に入れることができるため、汎用性が非常に高いというメリットもある。

現在、都内では、隅田川や神田川等で水上バスが運航している。水上バスでは数 km の通信ができれば十分に遠隔操船システムを構築でき、より安全に、少人数の船員で運航できるようになることが期待される。また、2020 年にはオリンピック・パラリンピックが東京で開催され、選手村や多くの競技場はウォーターフロントに設置される。羽田空港から選手村や競技場を水上バスで接続することで、電車等の他の交通機関の混雑緩和ができ、選手村から競技場への選手の移送



等にも活用ができると考えられる。そこで、本稿では、遠隔操船システムの水上バスへの適用を見据え、研究を行なう。

### 1.3. 本論文の構成

2章では、電池推進船らいちょうシリーズについて述べる。3章では、長距離通信が可能な Wi-Fi アンテナについて述べ、Wi-Fi を海上で利用する上での電波伝搬の検証について述べる。4章では、Wi-Fi を用いた遠隔操船システムの開発について述べ、開発したシステムの検証実験結果についても述べる。5章で本論文のまとめを述べる。

## 2. 電池推進船らいちょうシリーズ

船舶からの大気汚染防止のための規制は、海洋汚染防止条約（MARPOL 条約）に基づき、オゾン層破壊物質、窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）、硫黄酸化物（SO<sub>x</sub>）、粒子状物質（PM）ならびに揮発性有機化合物（VOC）を対象物質とし、国際的に統一された放出規制が実施されている。このうち NO<sub>x</sub> および SO<sub>x</sub>、PM については、2008 年に開催された国際海事機関（IMO）の海洋環境保護委員会（MEPC58）において、段階的な規制強化とそれぞれについて一般海域より一層厳しい規制を行なう指定海域を設定することができる枠組みが合意された[3]。このように、船舶活動に伴う環境問題への対策は世界的に行なわれている。国内では、国土交通省が船舶における低炭素料の促進政策として、排出ガスの大きい従来船に代わるスーパーエコシップの建造を推進している[4]。

一方で、東京海洋大学では、モータを動力、リチウムイオン電池を動力源とし航行中に排気ガスを排出しない急速充電対応型電池推進船の開発を行なっている。これまでに開発された電池推進船は 3 隻あり、平成 22 年にらいちょう I（図 2.1）、平成 23 年にらいちょう S（図 2.2）、平成 26 年にらいちょう N（図 2.3）がそれぞれ建造された。本研究では、らいちょう I とらいちょう N の 2 隻を使用した。それぞれの概要を次項で示す。



図 2.1. らいちょう I



図 2.2. らいちょう S



図 2.3. らいちょう N

## 2.1. らいちょう I

平成 22 年に最初に建造された電池推進船がらいちょう I である。らいちょう I の外形図を図 2.4、主要目を表 2.1 に示す。らいちょう I は竣工後も適宜、電動機や電池を交換して性能向上を図っており、表 2.1 に示す主要目は 2017 年 1 月現在のものである。また、らいちょう I の主要機器の系統図を図 2.6 に示す。図 2.6 内の青線は信号線、赤線は強電線を示している。

らいちょう I は E-ECU (Engine – Electric Control Unit) と A-ECU (Actuator – Electric Control Unit) の 2 つのコントローラに制御されている。E-ECU は主に、リチウムイオン電池やモータ、インバータと接続されている。E-ECU を図 2.7 に示す。A-ECU は操舵ユニットやバスタスタ等に接続されている。それぞれの ECU の構成モジュールは次の表 2.3、表 2.4 のようになっている。A-ECU には 2 つの CPU モジュールがある。高速数値演算や通信処理を行う RTOS-CPU モジュールと、主に高速、大容量シーケンス処理を行なうシーケンス CPU モジュールの 2 つであるが、上述の各機器は主にシーケンス CPU モジュールによって管理されている。シーケンス CPU モジュールの詳細を表 2.5 に示す。

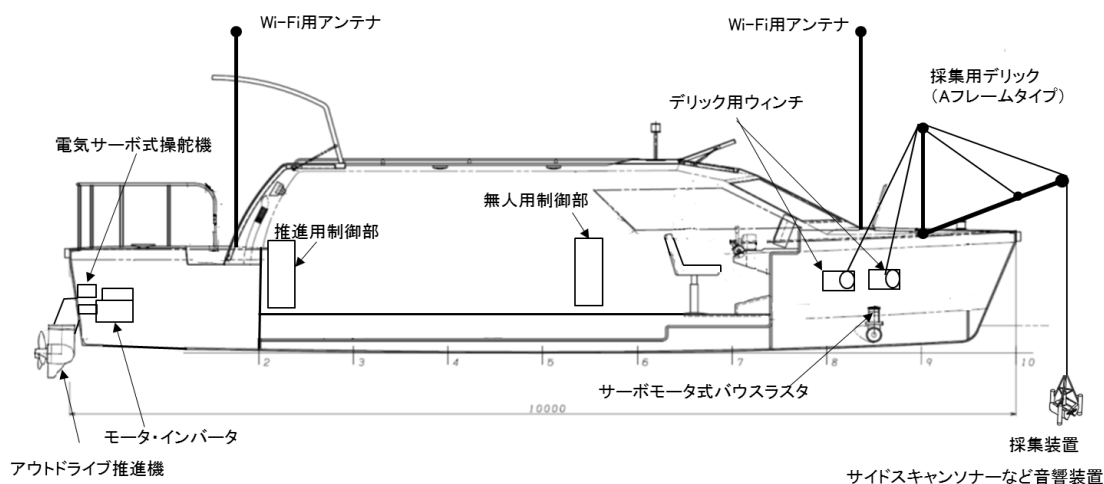


図 2.4. 船体外形図

表 2.1. 主要目

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]

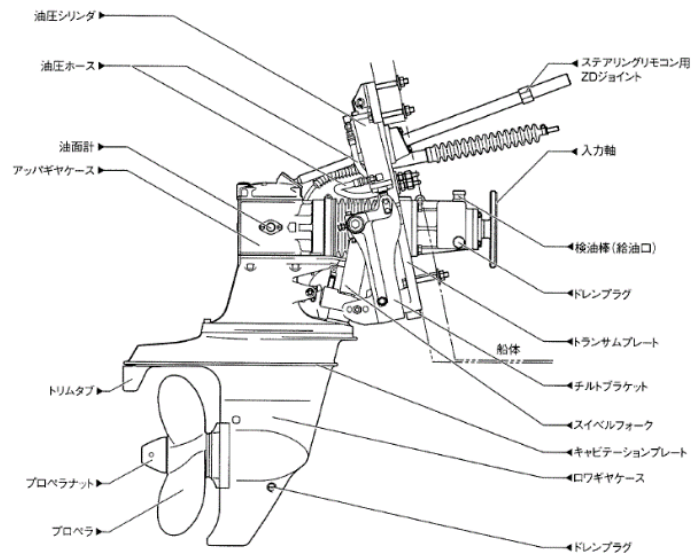


図 2.5. アウトドライブ推進器

表 2.2. アウトドライブ主要目

製造	YANMAR
アウトドライブ名称	SZ163
定格回転数	3600[ $\text{min}^{-1}$ ]
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

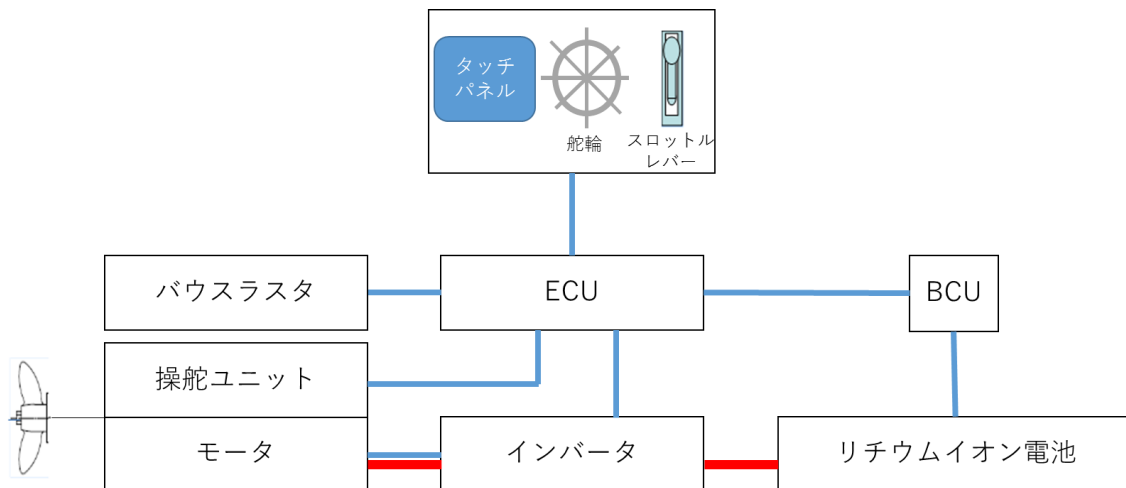


図 2.6. らいちよう I 主要機器系統図



図 2.7. E-ECU

表 2.3. E-ECU 構成モジュールの機能

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
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
温度入力モジュール	温度センサと接続
デジタル接点入出力モジュール	各種接点入出力の書き込み, 読み込み

表 2.4. A-ECU 構成モジュールの機能

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
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	各種接点入出力の書き込み, 読み込み

表 2.1.5. シーケンス CPU モジュール仕様

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 $\mu$ s~命令
	応用命令	0.0075 $\mu$ 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]

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パソコンと各 ECU を Ethernet ケーブル経由で接続することで、ECU と接続されたモータ、インバータ、リチウムイオン電池といった各機器の 1 秒毎のデータを取得し、パソコン内に保存することができる。らいちょう I に搭載したサテライトコンパスや水深計測用の魚群探知機から得られる緯度経度データや水深データは ECU を介さずに直接パソコンに USB ケーブルを接続し、受信データを変換するプログラムを介してパソコン内に保存する。らいちょう I の全体のシステム概要図を図 2.8 に示す。ここでは、ECU を一つにまとめて表している。

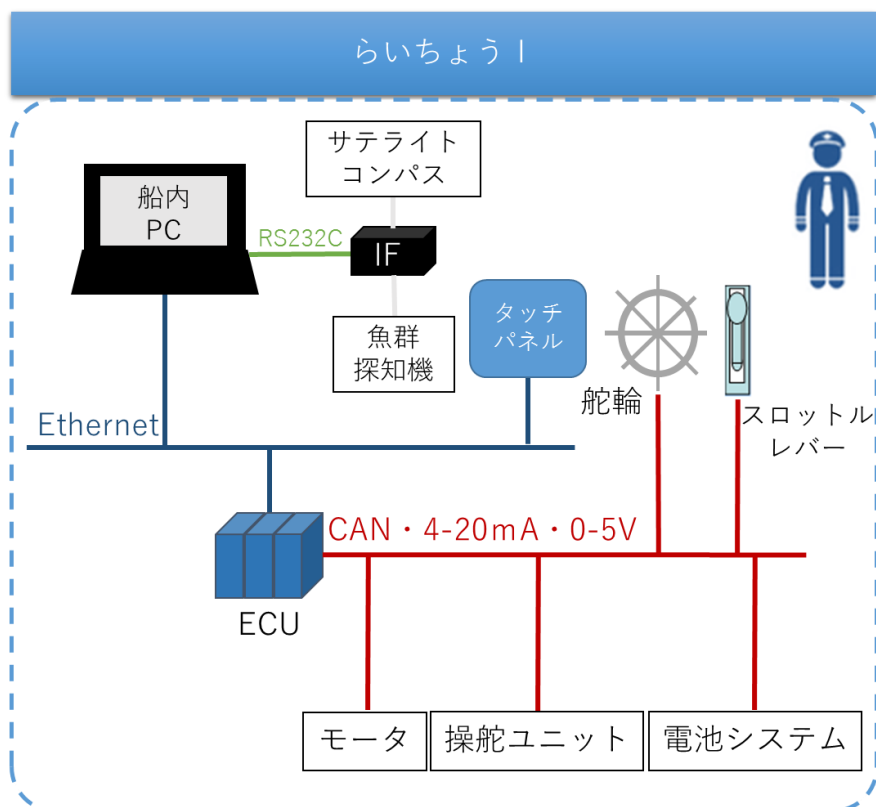


図 2.8. らいちょう I 全体のシステム構成図

## 2.2. らいちょう N

平成 24 年に建造された 3 隻目の電池推進船がらいちょう N である。図 2.9 に船体外形図，表 2.6 に主要目を示す。らいちょう N はこれまでに建造したらいちょう I，らいちょう S を使用しての研究成果を元に，環境負荷低減を図りつつ無人・省人化した定期運行する水上バスをイメージした低環境負荷次世代水上交通システムの研究開発を基盤として建造した電池推進船である。無人・省人運航を目指すため，操船に必要な機器は全てコンピュータ制御が可能である。また，これまでの電池推進船の課題であった，航続可能距離を伸ばすために非常用発電機を搭載し，ハイブリット電池推進船として研究が行なわれている。

船舶の大型化に伴い，エレクトリック推進システムは 2 組，左舷と右舷で分かれている。推進機はアウトドライブ方式の 2 機 2 軸システムとなっている。アウトドライブの外形を図 2.10，主要目を表 2.7 に示す。リチウムイオン電池の容量は両舷合わせて 145kWh である。

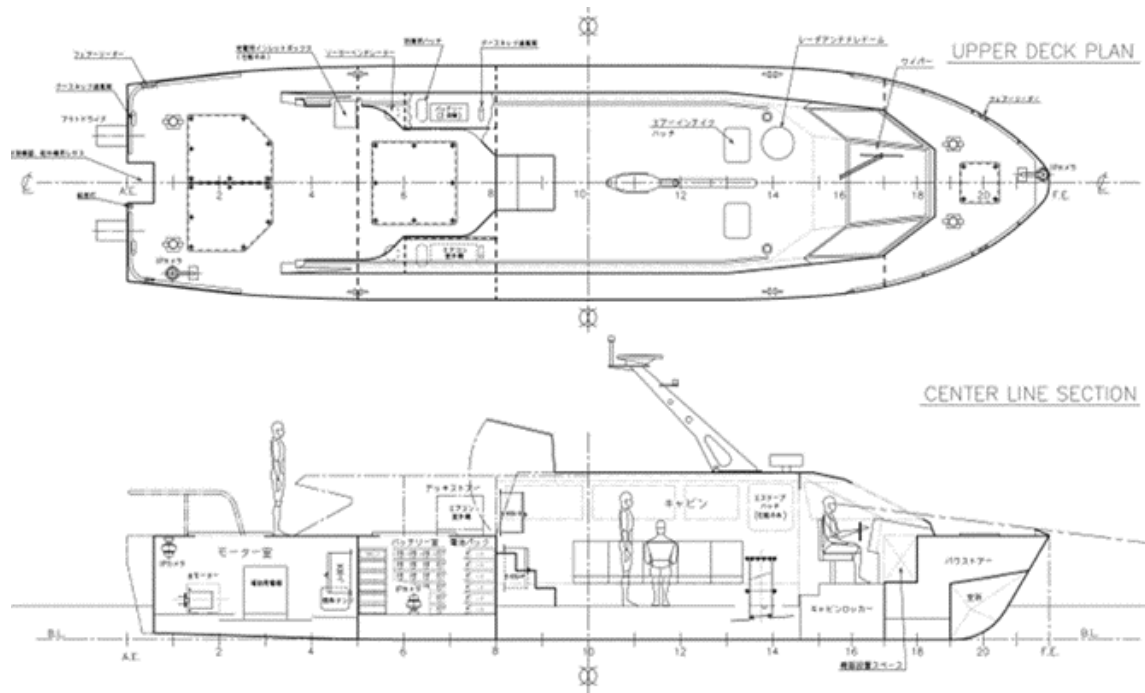


図 2.9. 船体外形図

表 2.6. らいちょう N 主要目

製造	隅田船舶工業 (株)
全長	14[m]
全幅	3.5[m]
深さ	1.5[m]
喫水	0.535[m]
総トン数	9.1[ton]
排水量	12[ton]
モータ出力	45[kW]×2 基
最大船速	10[knot]
リチウムイオン電池容量	145[kWh]



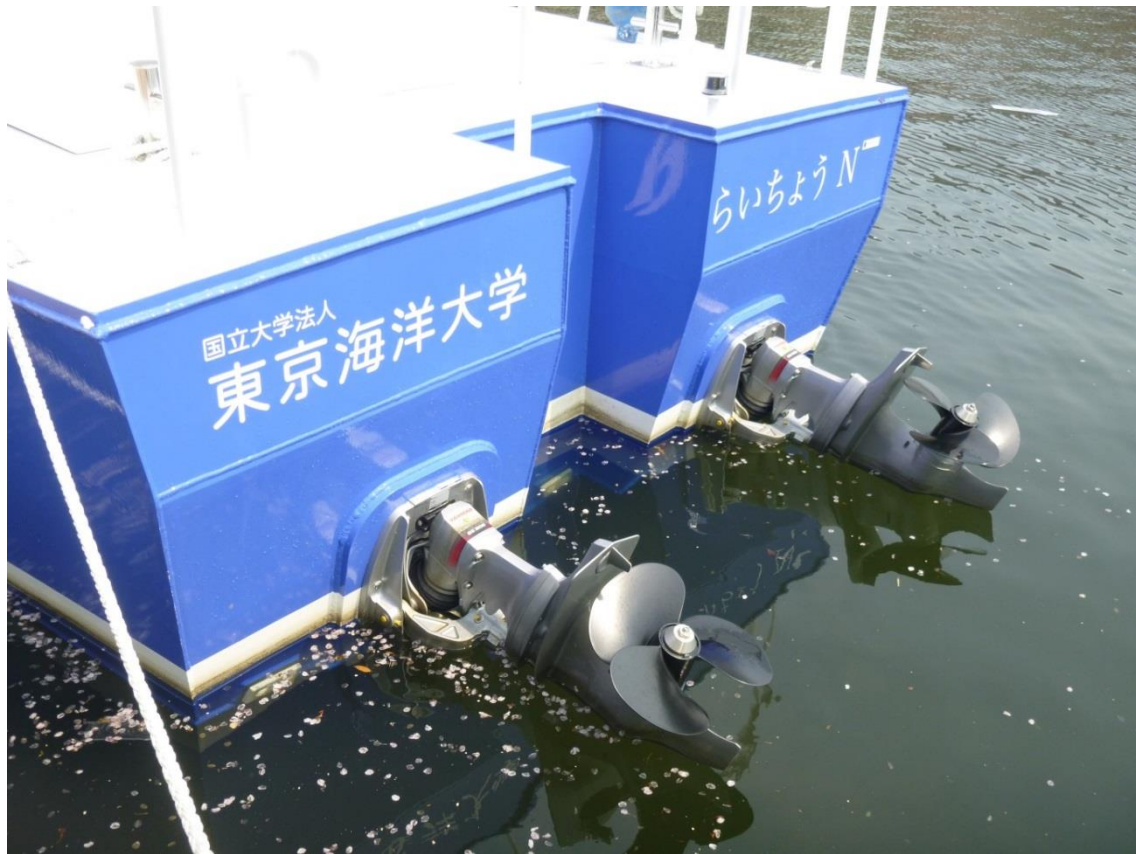


図 2.10. アウトドライブ

表 2.7. アウトドライブ主要目

製造	ヤンマー (株)
減速比	1.61
定格出力トルク	320[Nm]
乾燥重量	72 [kg]

らいちょう N では、らいちょう I と同様に ECU をコントローラとして、リチウムイオン電池やモータ、インバータと接続され各機器が制御されている。らいちょう N のシステム構成図を図 2.11 に示す。ECU は、N-ECU (Navigation – Electric Control Unit) と 2 つの E-ECU (Engine – Electric Control Unit), G-ECU (Generator – Electric Control Unit) の 4 つで構成されている。N-ECU はサテライトコンパスやレーダ、AIS、舵角等の操船システム部の管理を行なっている。また、らいちょう N は、エレクトリック推進システムが右舷と左舷でそれぞれ独立しており、それぞれが独自に駆動させることができる。そのため、E-ECU は 2 つあり、右舷、左舷それぞれのリチウムイオン電池や、インバータ、モータの管理を行っている。G-ECU は発電機の管理を行なう。らいちょう I と同様に ECU と Ethernet ケーブルを接続することで、各 ECU が管理している機器の情報を得ることができる。

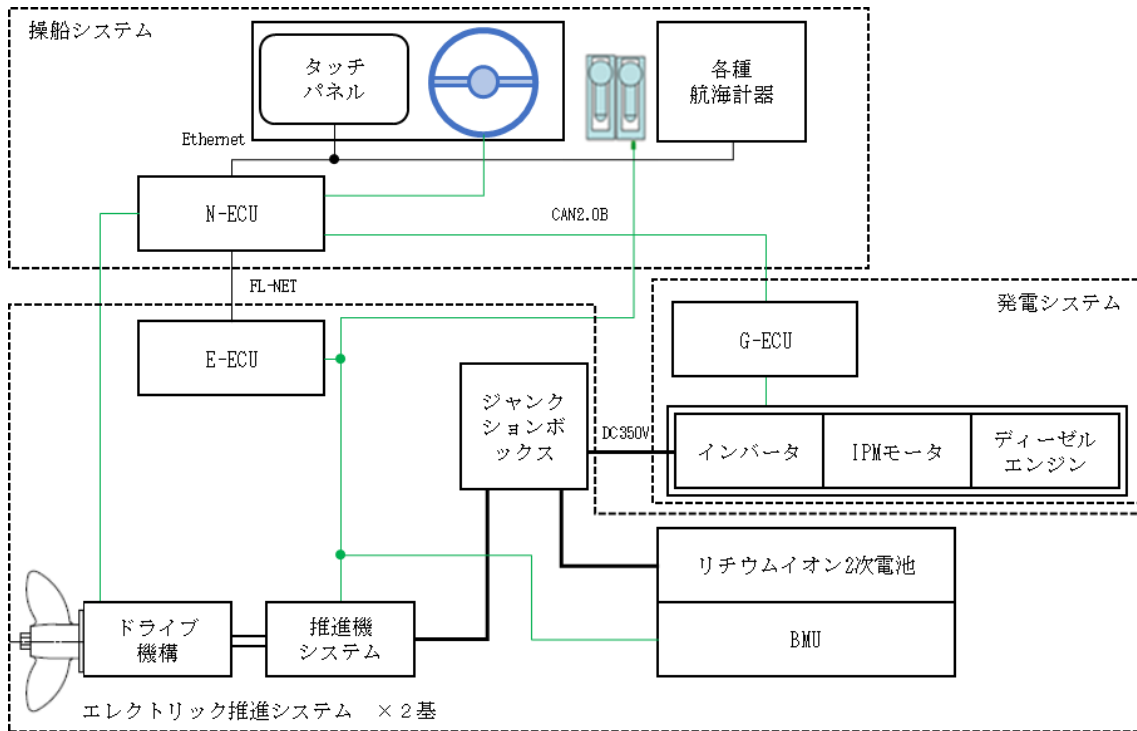


図 2.11. らいちょう N システム

### 3. Wi-Fi システム

現在の海上での通信には、主に衛星通信が使用されている。衛星通信は世界中どこでも通信ができるが、現在気軽に利用できるものは数百 kbps 程度でしか通信できない。遠隔操船を行なうためには、遠隔地と船舶の通信は不可欠であり、特に映像データといった容量の大きなデータが必要である。そのため、現状の衛星通信では不十分である。そこで本研究では、距離は限定されるが Wi-Fi を利用することを考える。

近年、長距離通信が可能な Wi-Fi アンテナが開発されている。通信可能距離は数 km と、衛星通信に比べると短い距離であるが、水上バスへの適用を考えると、対岸までの通信等、数 km の通信でも十分であると考えられる。Wi-Fi はアンテナを設置してしまえば、通信料はかからないため、衛星通信よりも安価にシステムを構築することができる。また、船舶と基地局間で通信をする際には、セキュリティ面の配慮も必要であるが、Wi-Fi には WPA や WPA2 といったセキュリティ方式が採用されており安全性が高いというメリットもある。

本研究で利用しているそれらのアンテナを図 3.1, 図 3.2, 図 3.3 に示し、それぞれの主要目を表 3.1, 表 3.2 に示す。図 3.1 の Wi-Fi アンテナは日本無線株式会社 (JRC) 製のアンテナである。図左はハイゲインパッチアンテナ (NZA-661) であり、指向性がある。指向角は 30 度であり、指向性を持たせることで、長距離の通信を可能とする。アンテナ 1 台では 30 度の範囲しかカバーできないが、複数台設置することで、広範囲をカバーできるようになる。図中央はコリニアアンテナ (NZA-657) であり、360 度方向通信が可能である。図右は無線 LAN ブリッジ (JRL-710AP3) である。JRC のカタログ上、本システムを利用することで、36Mbps で最長距離 10km が通信可能である[5]。

図 3.2, 図 3.3 のアンテナは GoNet Systems 製の GoBeam8000 と MikroTik 製の G-Access500 である。GoBeam8000 は指向性アンテナであり、指向角は 120 度である。G-Access500 はコリニアアンテナである。GoBeam8000 と G-Access500 を利用すると、1.5km 先でも 90Mbps のビットレートで通信ができる[6]。



図 3.1. JRC 製 Wi-Fi アンテナ

表 3.1. JRC 製 Wi-Fi アンテナ主要目

	NZA-661		NZA-655	
	2.4GHz	5GHz	2.4GHz	5GHz
周波数帯	2.4GHz	5GHz	2.4GHz	5GHz
利得	15dBi	15dBi	5dBi	5dBi
指向角度	水平面：27° 垂直面：27°	水平面：27° 垂直面：27°	水平面：360° 垂直面：30°	水平面：360° 垂直面：30°



図 3.2. GoBeam8000



図 3.3. G-Access500

表 3.2. GoBeam8000, G-Access500 主要目

	GoBeam8000		G-Access500	
周波数帯	2.4GHz	5GHz	2.4GHz	5GHz
利得	13dBi	14dBi	6dBi	6dBi
指向角度	水平面：120° 垂直面：44°	水平面：120° 垂直面：26°	水平面：360° 垂直面：5°	水平面：360° 垂直面：5°

### 3.1. 電波の伝搬特性

前述の長距離 Wi-Fi アンテナを海上で利用するにあたって、電波の海面反射等、陸上とは違う環境による影響がある可能性がある。また、本研究で使用する Wi-Fi アンテナはフェーズドアレイ・ビームフォーミング技術や MIMO (Multiple Input Multiple Output) といった技術を利用している。特に MIMO は反射波も利用することで、通信速度を向上させているが、反射波が利用できないとなると通信速度が低下することとなる。そのため、海上での電波の伝播特性について調査・検証を行なう必要がある。

そこで、遠隔操船システム開発の前に、前述の Wi-Fi アンテナを使って、基本的な電波伝搬理論をもとに、陸上と海上で通信実験を行い、海上における Wi-Fi の伝搬特性を調査する。ここでの、基本的な電波伝搬理論とは、フレネルゾーンと 2 波モデルである[7]。

#### 3.1.1. フレネルゾーン

無線通信を行う上で、電力損失をすることなく電波を到達させるためには、フレネルゾーン内に遮蔽物があってはならない。フレネルゾーンとは、アンテナ間の最短距離を中心とした回転楕円体の空間である。図 3.4 に概略図を示す。主にエネルギー伝達に寄与するのは第 1 フレネルゾーンである。第 1 フレネルゾーンは電波が最短経路で到達する場合と、迂回経路の場合との経路差が  $\lambda/2$  ( $\lambda$ : 波長) 以内となる経路の軌跡内に作られる回転楕円体空間である。第 1 フレネルゾーン半径の 60% 以内に障害物がなければ、自由空間と同等の伝搬特性が得られる。第 1 フレネルゾーン半径  $r_1$  は次の式で得られる。

$$r_1 = \sqrt{\lambda \frac{d_1 \times d_2}{d_1 + d_2}} \quad \lambda = \frac{c}{f}$$

$c$ : 光の速さ ( $3 \times 10^8$  [m/s])     $f$ : 周波数[Hz]

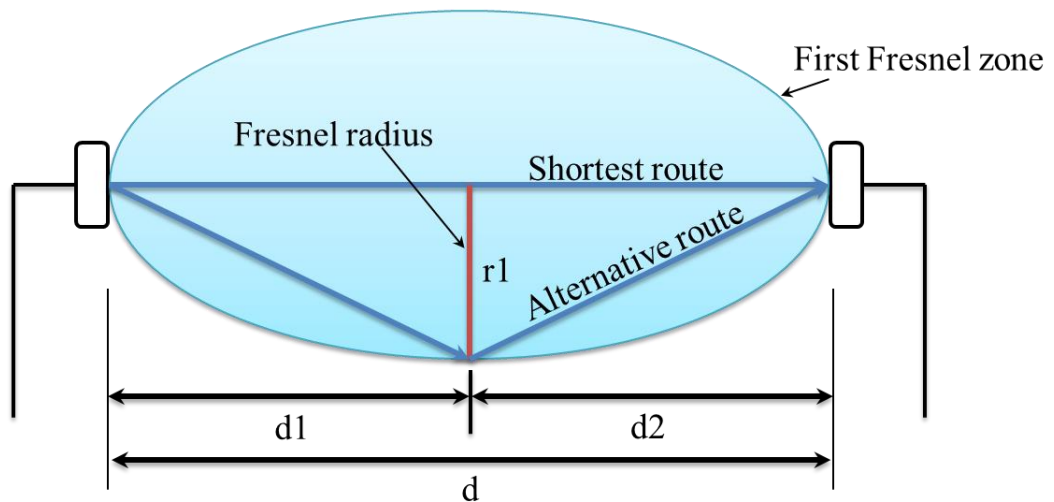


図 3.4. フレネルゾーン

実際にいくつかの条件の下，GoBeam8000 と無線 LAN アダプタを用いて通信速度を，計測する．計測に使用するソフトウェアは iperf である．条件は以下の通りである．

① 実験場所

実験場所は地面による電波の反射の影響を調査するため，反射しやすいアスファルト上で行なう．

② アンテナ間の距離

アンテナ間の距離は 100m とする．

③ 使用周波数帯

2.4GHz と 5GHz を使用する．

④ アンテナの高さ

第一フレネルゾーンの半径の 60% を上述の式から求めると，2.4GHz では約 1 m，5GHz では，約 0.7m であった．この結果からアンテナの高さを 1.5m，1.0m，0.8m，0.5m の 4 点で計測する．

⑤ 計測回数

計測時間は 60 秒を 1 回とし，各条件 10 回ずつ行なう．

計測結果を以下の図 3.5，図 3.6 に示す．グラフは各計測の平均値を表している．2.4GHz，5GHz どちらの条件でも，第一フレネルゾーン半径の 60% を下回ると，通信速度が大きく低下していることがわかる．また，5GHz を使用したときには，第一フレネルゾーンが確保されている 1.5m のアンテナ高さでも通信低下が見られており，フレネルゾーン以外の要因に原因があると考えられる．

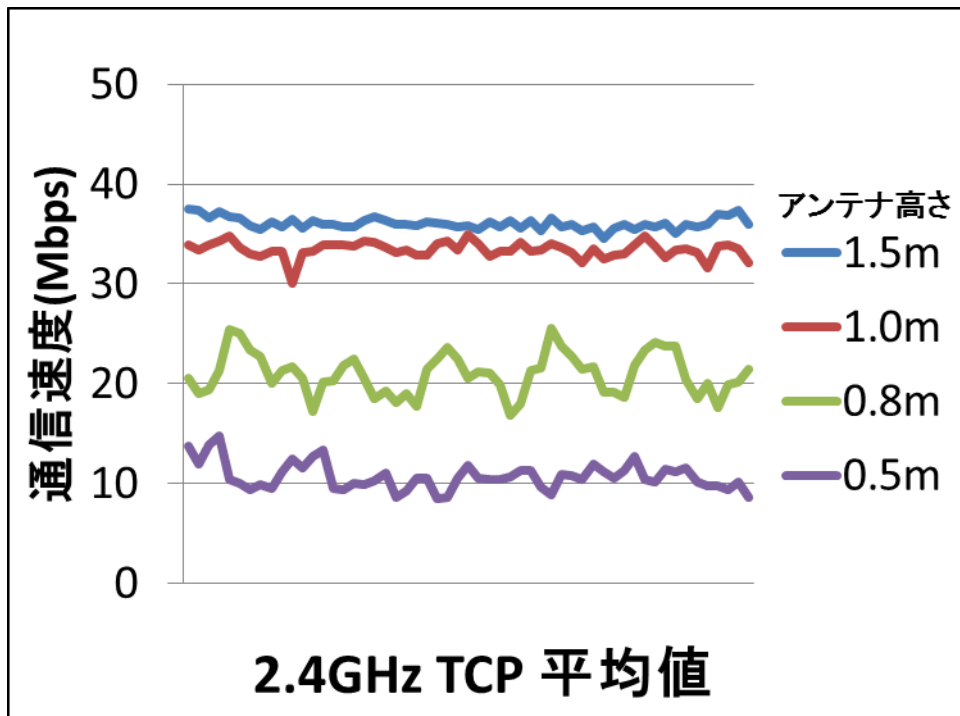


図 3.5 各アンテナ高さの通信速度計測結果 (2.4GHz)

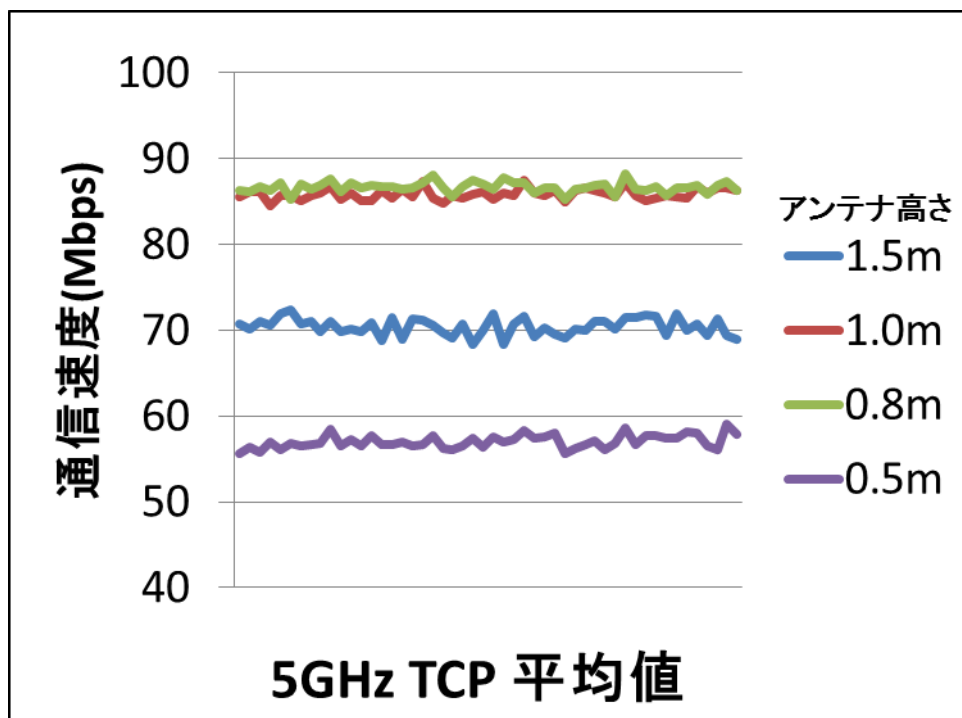


図 3.6 各アンテナ高さの通信速度計測結果 (5GHz)

### 3.1.2. 2 波モデル

図 3.7 のように平面大地から高さ  $h_1$ 、および  $h_2$  の位置に水平距離  $d$  の間隔でアンテナを置くと、受信アンテナには直接波と反射波の 2 波が到達し、互いに干渉を起こす。そのため、アンテ

ナ間の距離や高さなどの設置条件によって、受信電力が下がる点が存在する（図 3.8）。

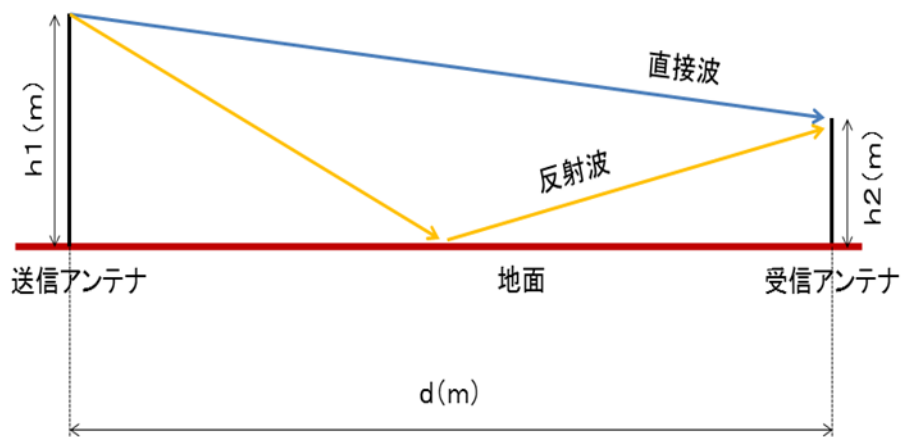


図 3.7 大地反射の 2 波モデル

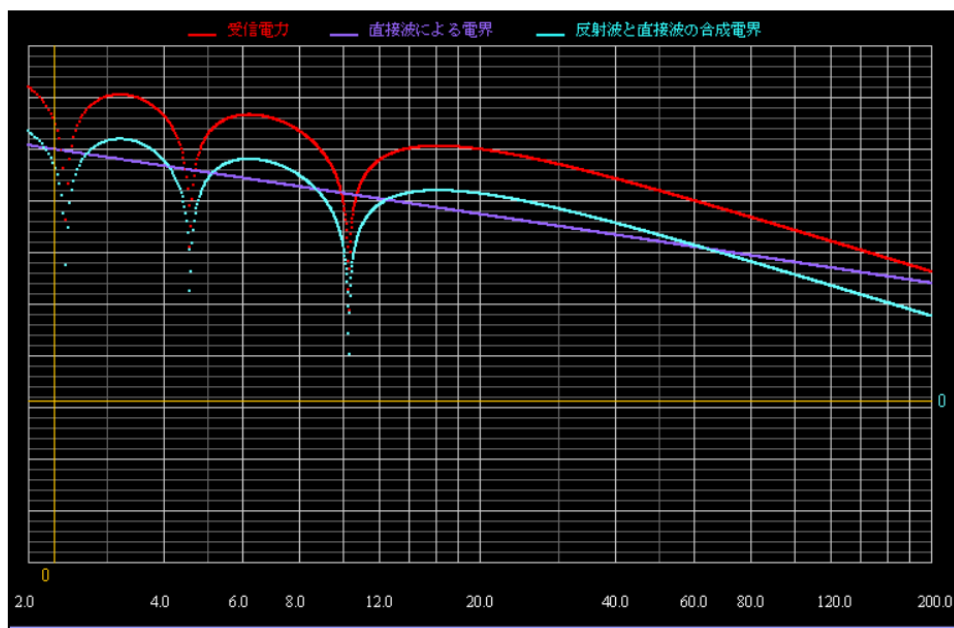


図 3.8 電波の干渉

2 波モデルを検証するためにアンテナの高さを変化させ、GoBeam8000 と無線 LAN アダプタの間の通信速度を iperf によって計測する。実験条件は以下の通りである。

① 実験場所

実験場所は地面による電波の反射の影響を調査するため、反射しやすいアスファルトで行なう。

② アンテナ間の距離

アンテナ間の距離は 100m とする。



- ③ 使用周波数帯  
5GHz を使用する.
- ④ アンテナの高さ  
1.0m から 0.1m ずつアンテナの位置を高くする.
- ⑤ 計測回数  
計測時間は 60 秒を 1 回とし, 各条件 10 回ずつ行なう.

また実験を行う前に, 株式会社サーキットデザインのウェブページにて提供されている計算ツールにより理論値を求めた[8]. 計算ツールの結果を図 3.9 に示す. 送信アンテナの高さを 1.7m と設定し, グラフは横軸が受信アンテナの高さ, 縦軸が RSSI (受信信号強度) を表している. 理論値としては受信アンテナの高さが 1.6m のときに受信電力が大きく下がっている.

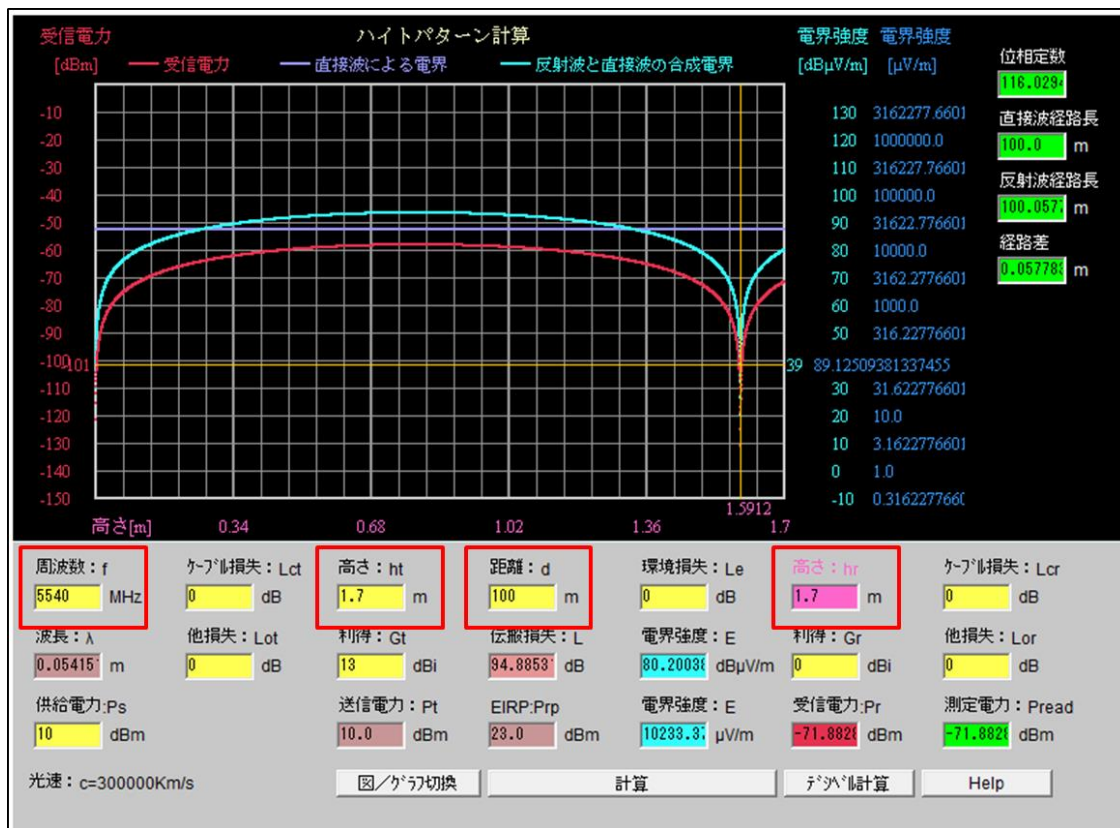


図 3.9 RSSI 理論値

実験結果を以下の図 3.10 に示す. 図 3.10 は各アンテナ高さでの通信速度をグラフ化したものである. 1.0m の高さでは 85Mbps 程度の通信速度であるが, アンテナを高くしていくと, 1.4m あたりから徐々に通信速度が落ち始め, 1.6m, 1.7m の高さでは通信速度が大きく下がっている. そして, 高さが 1.8m になると通信速度は元に戻っていることが分かる. 上述した計算ツールによる理論値に近い条件で通信速度が下がっており, 陸上では反射波の影響が顕著に表れるということが分かる.

前述した 5GHz 時のフレネルゾーンの実験でフレネルゾーンが十分に確保されているにも関わ

らず、1.5m のアンテナ高さで通信速度が低下した原因は反射波との干渉が考えられる。

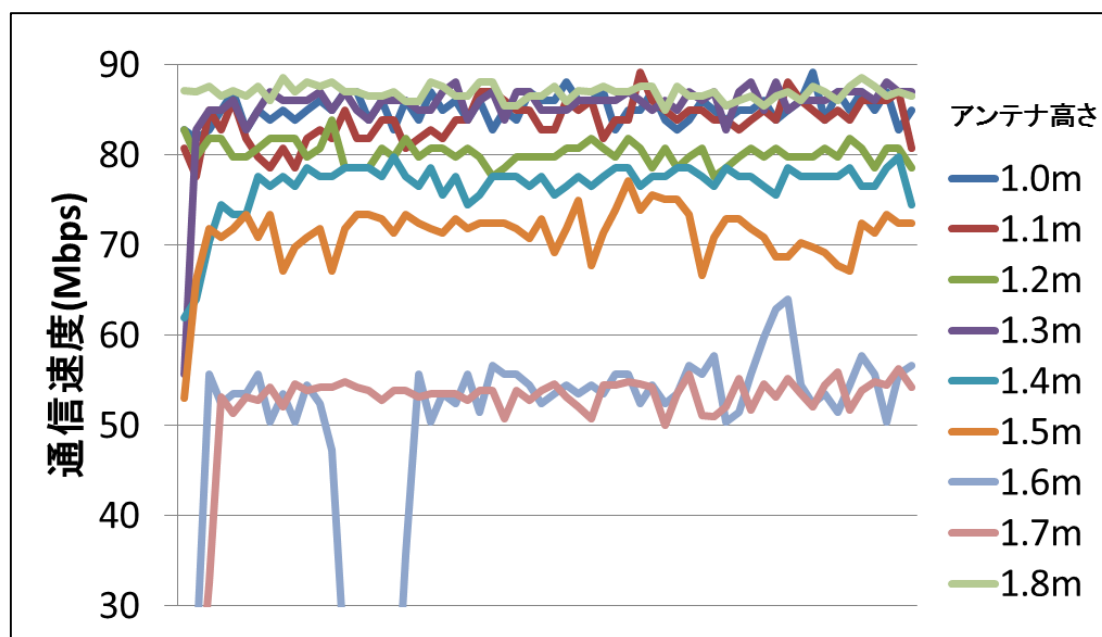


図 3.10 各アンテナ高さの通信速度結果比較 (5GHz)

### 3.1.3. 海上での伝搬特性の検証—フレネルゾーン

海上でのフレネルゾーンの検証実験は晴海沖で行った。らいちょう I とらいちょう N を使用し、らいちょう I に JRC 製のコリニアアンテナ、らいちょう N に JRC 製の指向性アンテナを設置した (図 3.11)。使用周波数帯は 2.4GHz である。通信速度の計測には iperf を用いて、通信が可能な限り計測を行った。また、2 隻の GPS 情報を用いて通信可能距離を測定した。本実験のアンテナの高さはらいちょう N 側が水面から約 5.7m、らいちょう I 側が水面から約 3.5m である。このアンテナの高さから確保できるフレネルゾーンを、その結果から通信可能距離を求めると、約 1570m であった。

iperf を用いて通信速度を計測した結果が図 3.12 である。グラフ横軸は距離、縦軸は通信速度を示す。図中の赤線が理論上の通信可能距離であった 1570m を示している。グラフを見ると、理論通信可能距離を越え、約 1700m 離れていても 3Mbps 程度の通信速度が出ていることがわかる。このことから本システムでは海上で使用しても海面反射や船舶の動揺の影響をあまり受けないことがわかった。



図 3.11 らいちょう I とらいちょう N

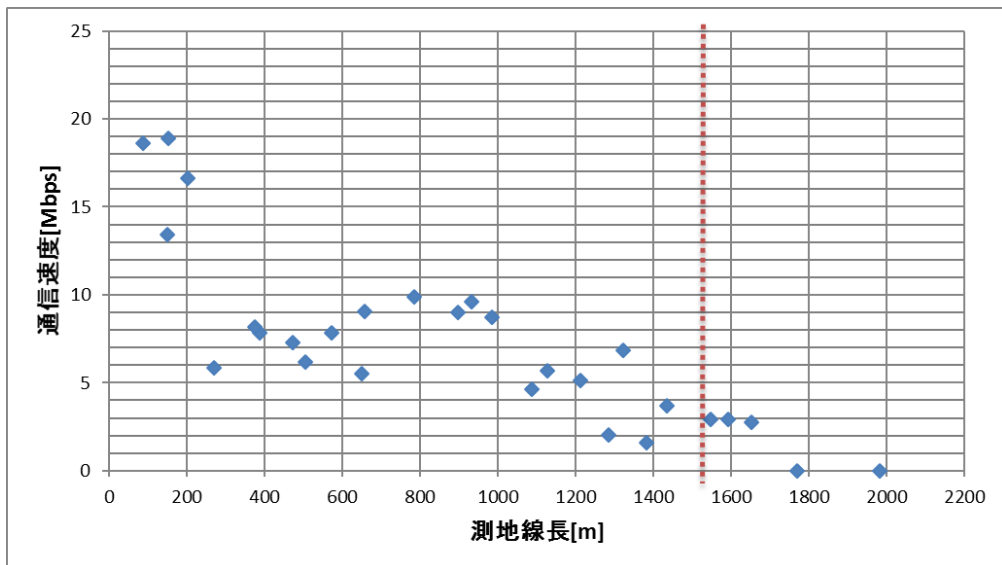


図 3.12 通信可能距離測定結果

### 3.1.4. 海上での伝搬特性の検証—2 波モデル

海上での電波伝搬において 2 波モデルを適用する必要があるのかを検証する。本実験ではらいちょう I に無線 LAN アダプタを設置し、本学第三実験棟 7 階に GoBeam8000 を設置した。らいちょう I でポンド前とポンド正面の水門の間をゆっくりと往復し、RSSI を計測する。使用周波数帯は 2.4GHz である。アンテナの高さは GoBeam8000 が地上約 30m、らいちょう I 側が水面から約 2m であった。あらかじめ、3.1.2 章でも使用した計算モデルによって RSSI が下がる位置を求めた。そのおおよその位置を図 3.13 に示す。

結果は次の図 3.14 のようになった。アンテナの位置が船尾にあるため、入港時はアンテナが船体に隠れるようになり、出港時と比較すると RSSI の数値が低くなった。RSSI 値は安定していないが理論上の減衰位置やその近辺で大きく低下するといったことはないことが分かる。この

ことから Wi-Fi 通信は海上で使用しても海面反射の影響を受けにくいことが分かった。これは、反射面となる海面が揺れていることや船舶自体が動揺していることによってモデル通りの結果が得られないためと考えられる。

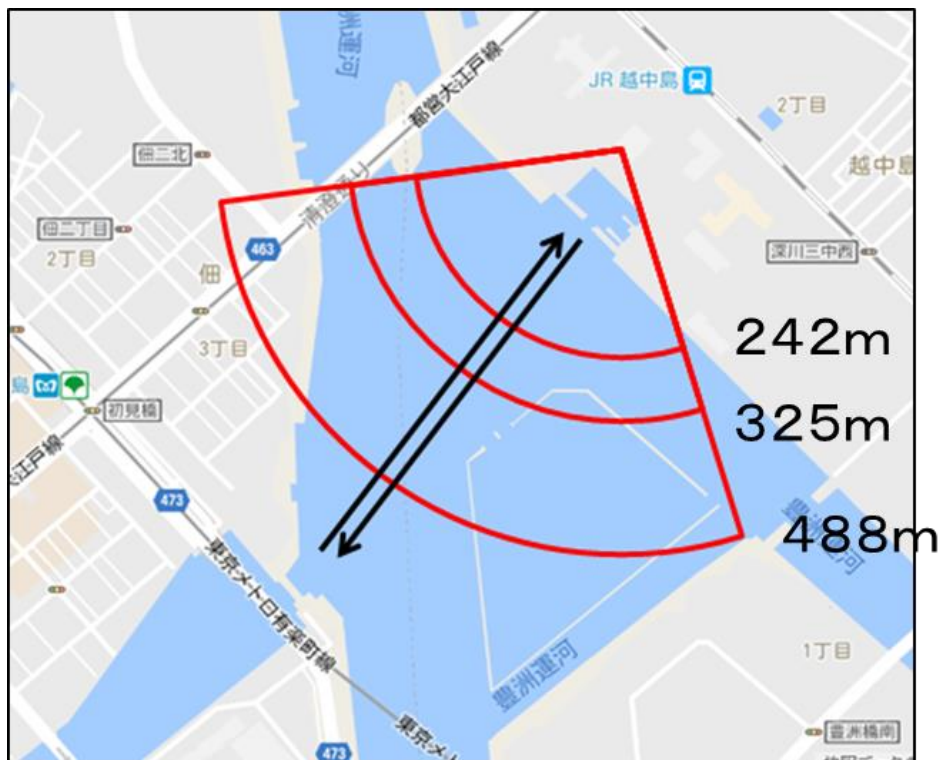


図 3.13 計算モデルによって求めた RSSI が下がる地点

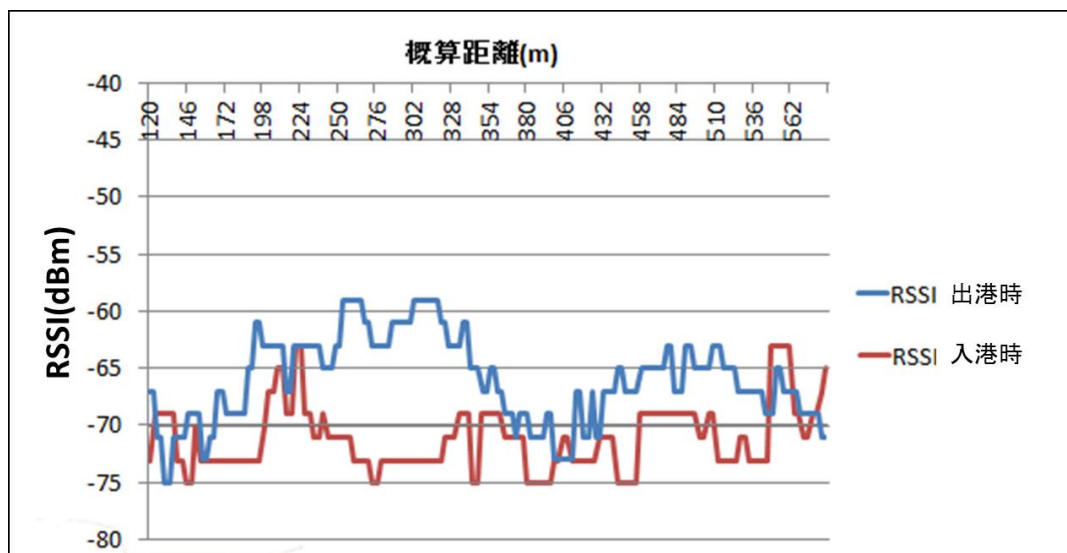


図 3.14 海上における 2 波モデルの検証結果

## 4. 遠隔操船システム

本遠隔操船システムは、水上バスへの適用を考慮し、開発を行う。水上バス等、旅客を輸送するには安全が第一となる。そこで、遠隔操船を行なう基地局と、船舶にそれぞれ必要と考えられる機能を図 4.1 に示す。

基地局側には遠隔操船機能と、遠隔監視機能が必要であると考え。船舶の状況や船舶周辺の様子を監視し、状況に応じて船舶を遠隔操作する。特に本システムの通信システムは Wi-Fi を利用するため、映像データを見ながら操船することも可能となる。

また、船舶側には、遠隔操船用の操船モードと、基地局との通信状態を監視する機能が必要であると考え。遠隔操船は、常に通常の乗船しての操船のように、舵角と出力を直接指令し操船することは好ましくない。基地局との通信が途切れてしまうと、全く操船ができなくなり、事故に繋がる可能性もあるためである。そのため、オートパイロット機能を搭載する必要がある。オートパイロットの機能を持たせることで、通信が途切れてもある程度、自律的に航行できる。しかし、舵角や出力を直接指令する方法も着桟時等の細かい位置の調整等で必要となる機能であると考えられるため、マニュアルモードとして操船モードに加える。一方で、通信異常を判断する機能は、基地局にいるオペレータや乗船している船員に通信異常状態であることを伝えるために必要である。さらに、通信異常状態が続き、基地局からの操作が不可能となった場合に備え、通信異常時用の操船モードも必要であると考えられる。これは、通信が正常な時にあらかじめ目標船首方向や目標位置、出力を設定することで、通信異常が発生した際に自動的にその方向へ航行する操船モードである。このようにしておくことで完全に制御不能になることを防ぐ。

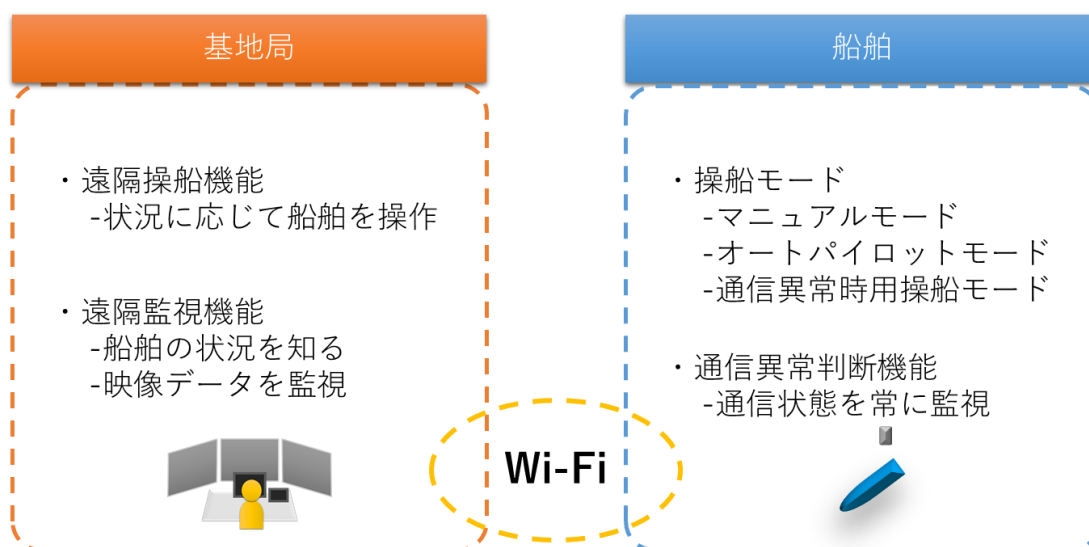


図 4.1. システム構成

また、本遠隔操船システムでは基地局と船舶間の通信システムには Wi-Fi を利用する。基地局側の Wi-Fi アンテナを指向性のあるアンテナにし、船舶側のアンテナを 360 度方向通信のできるアンテナにすることで、基地局側のアンテナがカバーしている範囲では、船舶がどの方向に向い

ていても長距離の通信ができるようになる。しかし、都市部での通信は、橋や建物など遮蔽物が多くあり、Wi-Fiのみで通信エリアをカバーすることは難しい。そこで、モバイル回線の利用を提案する。現在、都内で運航している水上バスは隅田川や神田川を航行しているが、船上でもスマートフォンや携帯電話は利用できる。そのため、Wi-Fiだけではなく、モバイル回線を利用し、通信を二重化させることで冗長性を持たせ、常に基地局との通信が途切れないシステムを構築する。

#### 4.1. 遠隔操船システムの開発

前述した構成の元、遠隔操船システムの開発を行う。ここでは、操船システムの開発と、通信システムの開発の2つに分け、それぞれについて述べる。操船システムに使用したのはらいちょう I である。基地局は本学第三実験棟7階やらいちょう N を利用し、そこから遠隔操船を行なう。また、通信システムの開発には先端ナビゲートシステムとらいちょう N を使用する。本学では、陸上からの船舶運航支援を目的として構築された先端ナビゲートシステム (Advanced Navigation System) [9]があり、この先端ナビゲートシステムを基地局とし、船舶と接続することで学内から船舶の操作や監視をすることができる。



図 4.2 先端ナビゲートシステム

##### 4.1.1. 操船システム

らいちょう I を用いて操船システムの開発を行う。

らいちょう I では、2章で説明したとおり、通常操船時ではタッチパネル、舵輪、スロットルレバーを操船者が操作し、操船者からの指令は ECU を介してそれぞれの機器に伝えられる。簡易的なシステム図を図 2.3 に示す。

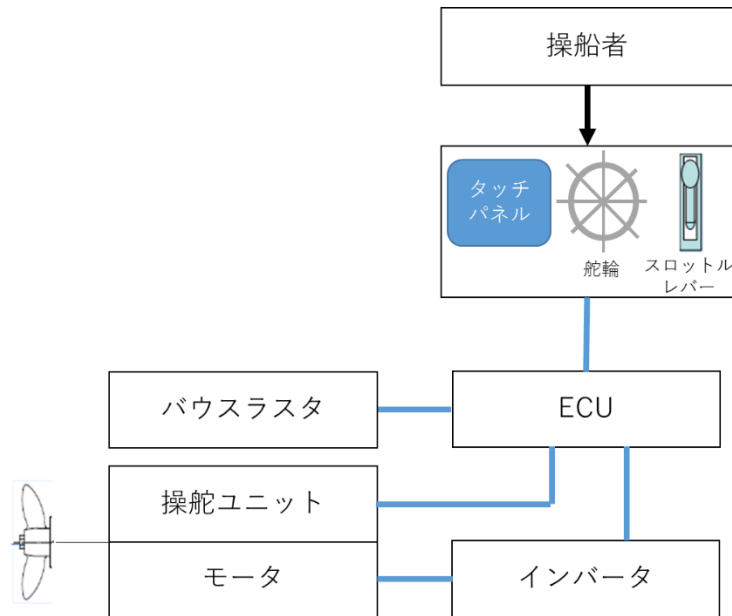


図 4.3 通常操船時システム構成

船内 PC にインストールされている ASTMAC には、各 ECU が持つデータを収集するだけでなく、ECU に指令を与える機能も備わっている。通常の操船をするときにスロットルレバーや舵輪から ECU に与えられる指令をパソコンから与えることができるため、操船者はパソコンからもそれぞれの機器の操作が可能である。(図 4.4 参照)

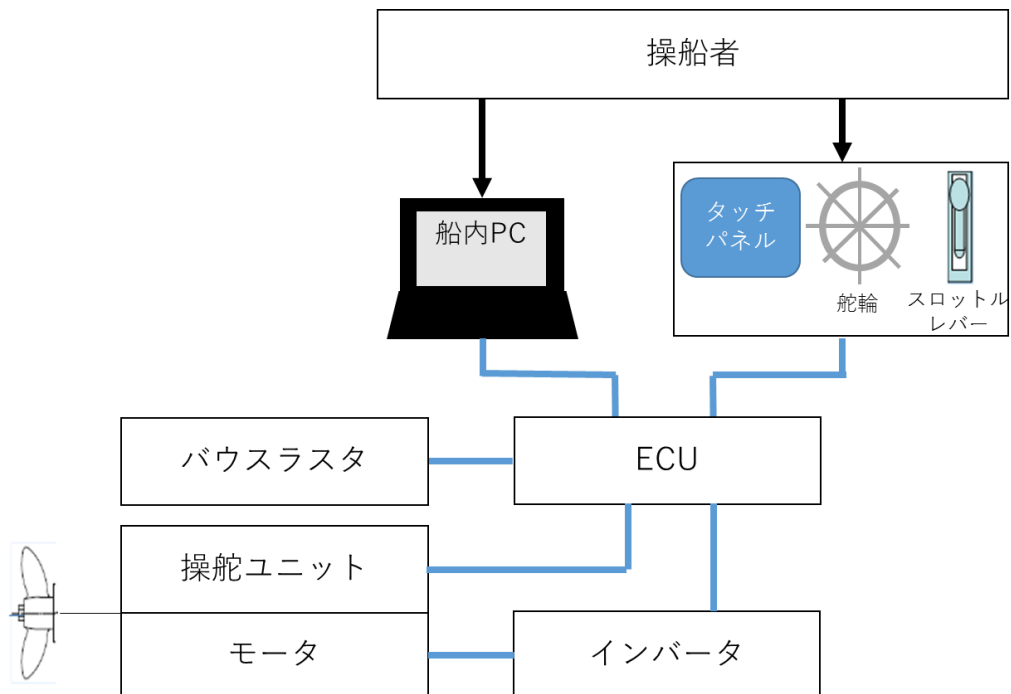


図 4.4 パソコンから指令

さらに、ASTMAC には OPC サーバの機能が搭載されており、ASMTAC がインストールされ

たパソコン同士のデータを同期することができる。そのため、Wi-Fi で基地局とらいちょう I を接続すれば、基地局かららいちょう I 側のパソコンが取得したデータを監視することができ、基地局側で操船者から与えられた指令がらいちょう I 側のパソコンに同期され、それぞれの機器を操作することができる。（図 4.5 参照）

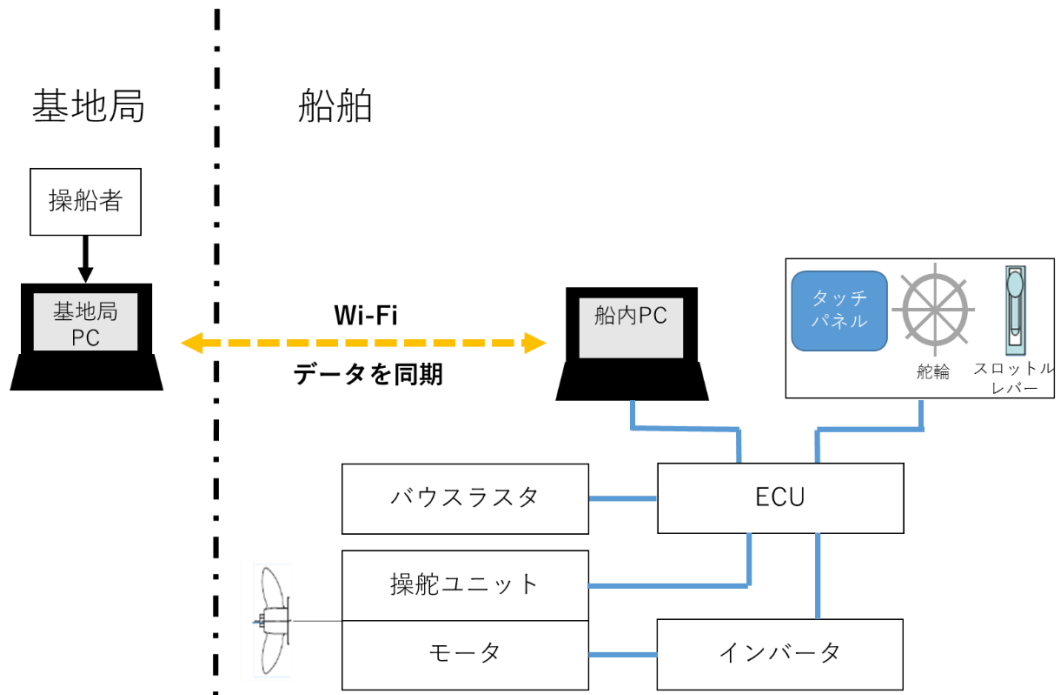


図 4.5 基地局から指令

また、船舶周辺の映像をリアルタイムで見ながら操船ができるように、IP カメラをらいちょう I に設置する。

以上のように遠隔操船システムを開発し、最終的に完成した全体のシステム図が次の図 4.6 ある。らいちょう I 側に設置するコリニアアンテナは 2 つ設置することでダイバーシティ効果を得ることができ、より安定した通信が期待できる。これらのネットワーク上にある全ての機器にはクラス C の IP アドレスが振られている。そのため、らいちょう I 設置した IP カメラの映像は、基地局のパソコンでブラウザ上から IP カメラの IP アドレスを入力するだけで見ることができる。また、新たに機器を増やしたいときも、IP アドレスを設定するだけで簡単に機器を追加することができる。らいちょう I に設置した各機器を図 4.7 から図 4.9 に示す。



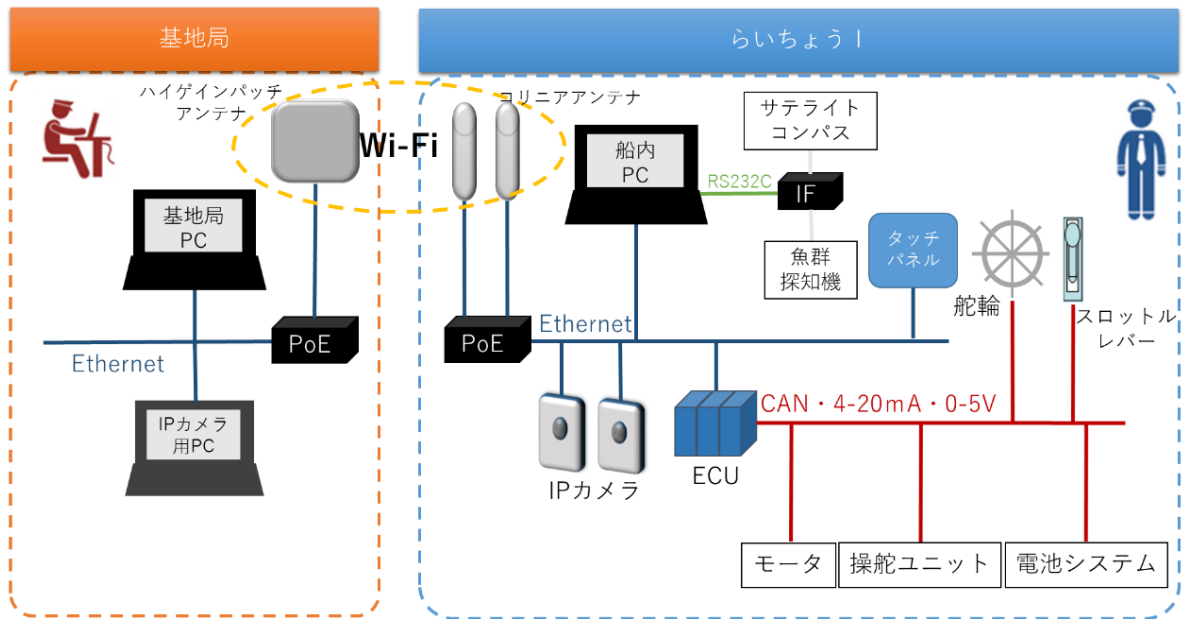


図 4.6 遠隔操船システム構成図

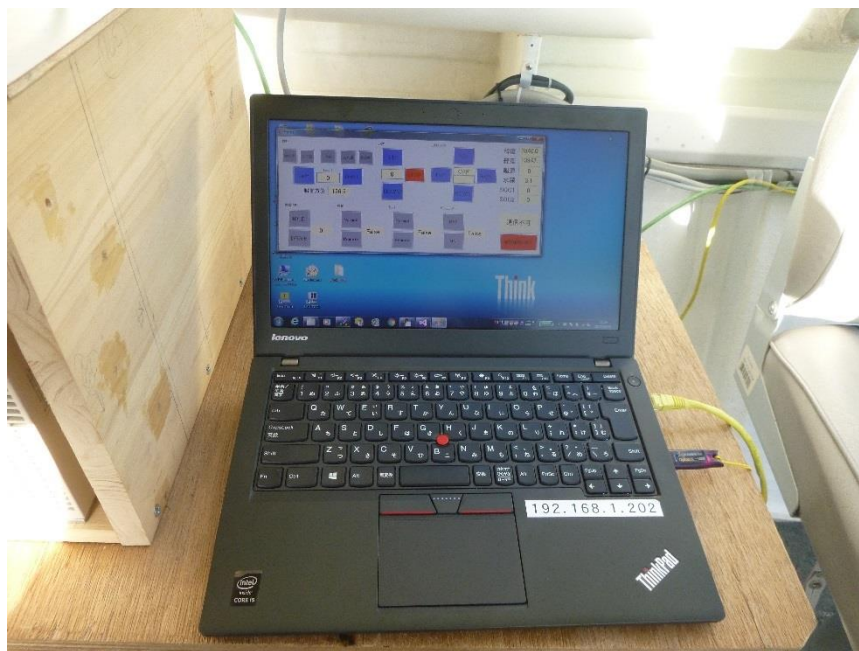


図 4.7 船内 PC



図 4.8 Wi-Fi アンテナ



図 4.9 IP カメラ

基地局で監視ができるらいちょう I のデータ一覧を表 4.1, 基地局かららいちょう I に指令できるデータを表 4.2 に示す.

表 4.1 監視データ

機能	出力範囲
現在舵角	-100~100
目標舵角	-100~100
現在船首方向	0~360[度]
目標船首方向	0~360[度]
出力	-50~100[%]
操船モード	マニュアル/オートパイロット
電池残量	0~100[%]
緯度・経度	-
船速	[knot]
水深	[m]
カメラ映像	-

表 4.2 指令可能データ

機能	出力範囲
船舶状態	ドライブ/アイドル
操船モード	マニュアル/オートパイロット
出力モード	ノーマル/リモート
舵角指令 (ON・OFF)	-
舵角指令 (数値指令)	-100~100
目標船首方向	0~360[度]
出力指令	-50~100[%]
オートリトリブ用目標船首方向	0~360[度]
オートリトリブ用出力	-50~100[%]
オートリトリブ用タイムアウト時間	[sec]
バウスラスト出力	0~4000
バウスラスト方向	右・左

次に遠隔操船のための操船モードの開発を行う。前述したように、3種類の操船モードを使用できるようにする。操船の方法は、操作画面をクリックする方法と、ゲームパッドから入力を行う方法の2種類を作成した。操作画面の一例を図 4.10, ゲームパッドを図 4.11 に示す。操作可

能な項目は適宜変更が加えられる。ゲームパッドからの指令は現状では、舵を切ることと、出力のアップダウンだけである。

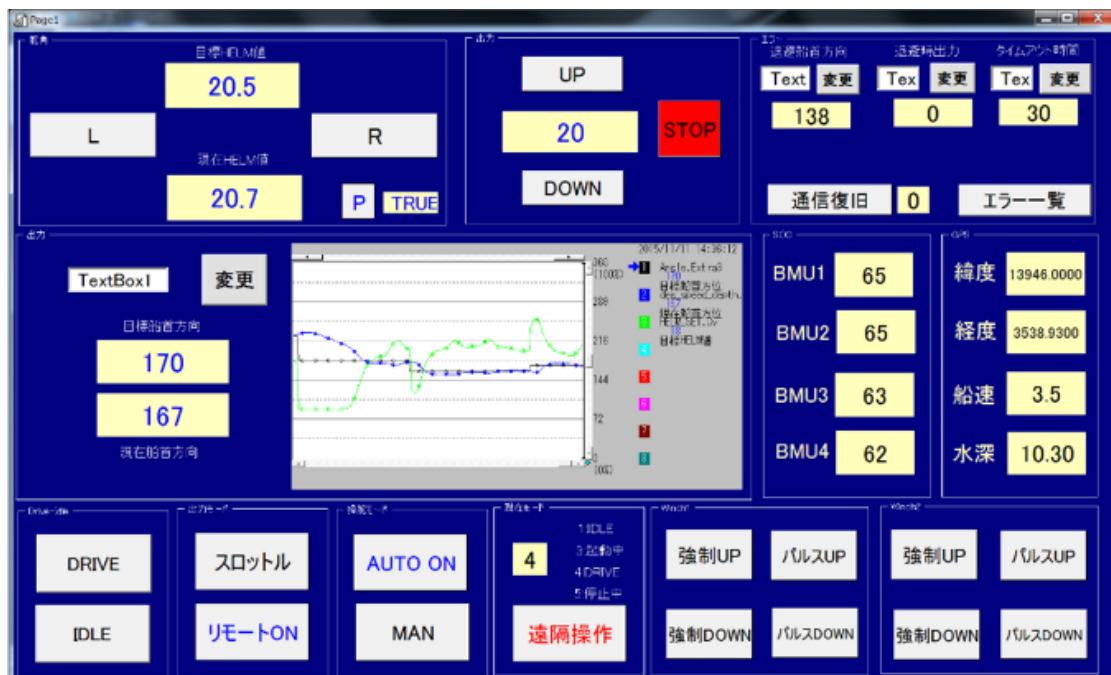


図 4.10 操作画面



図 4.11 ゲームパッド

開発した1つ目の操船モードはマニュアルモードである。マニュアルモードは通常の操船と同じように、遠隔地から舵角と出力を直接操作する方法である。舵角は-100~100の数値で指令する方法と、モータのON/OFFによる指令を可能とした。プラス値が右方向、マイナス値が左方向に舵を切っている状態である。また、出力は-50~100%の指令ができる。プラス値は前進、マイナス値は後進である。基地局側から舵角、出力を指令すると、らいちょうI側のパソコンに同期され、その値が直接ECUに伝えられ、操船者の意図通りに操船ができる。

2つ目はオートパイロットモードである。オートパイロットモードは、目標船首方向と出力を

指令するだけで、その船首方向を保持するように自動的に舵を切る。オートパイロットのプログラムはらいちょう I 側のパソコンの ASTMAC 内に書き込む。基地局から目標船首方向の指令を送る。らいちょう I 側のパソコンは衛星コンパスから取得した現在の船首方向と基地局から指令された目標船首方向を比較し、PID 制御によって指令舵角を決定する。船舶側のパソコンにオートパイロットのプログラムを持たせることで、基地局との通信が途切れても、船舶は自律的に航行することができる。出力の指令はマニュアルモードと同様である。オートパイロットのフローを図 4.12 に示す。

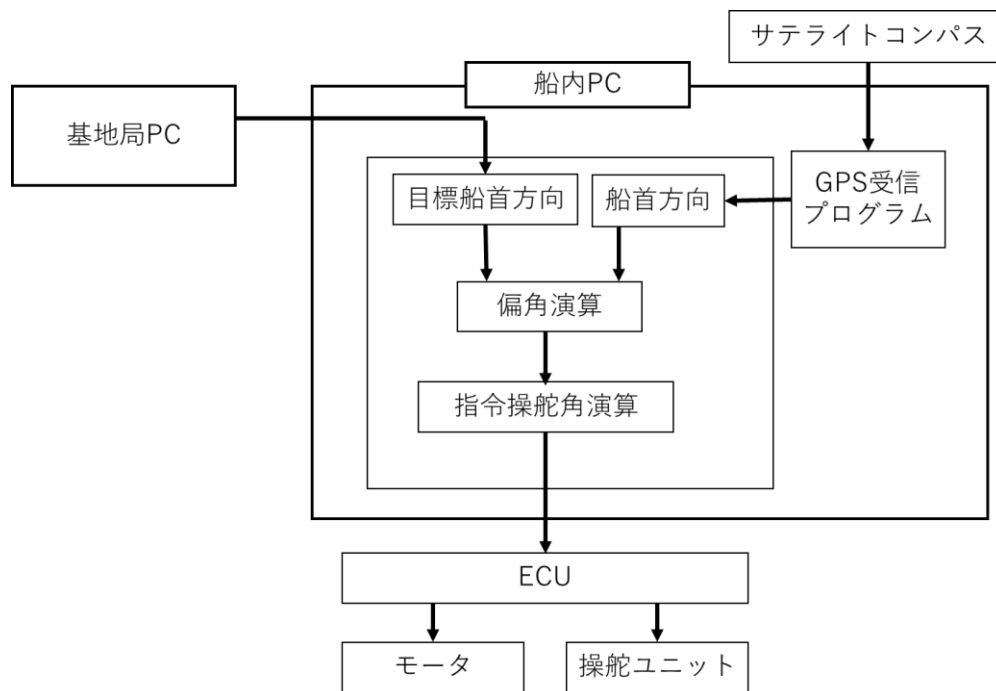


図 4.12 オートパイロットフロー

3 つ目はオートリトリーブモードである。これは、通信異常時に向かってほしい方向と、出力を通信が正常なときにあらかじめ設定しておき、通信異常が発生すると、設定した方向へと自動的に航行する操船モードである。通信異常を判断するプログラムを次の図 4.13 のように作成した。基地局側のパソコンかららいちょう I 側のパソコンに毎秒変わるデータ（図 4.13 内青線）を送る。らいちょう I 側のパソコンは、1 秒前に取得したデータと現在取得したデータを比較する。それらのデータが異なるものであれば、通信は正常、データに変化がなければ、通信異常が発生したと判断する。そこから通信異常状態が一定の時間継続すると、オートリトリーブモードに切り替わる。通信異常発生から操船モードが切り替わるまでの時間をタイムアウト時間とし、タイムアウト時間もあらかじめ設定しておくことができる。

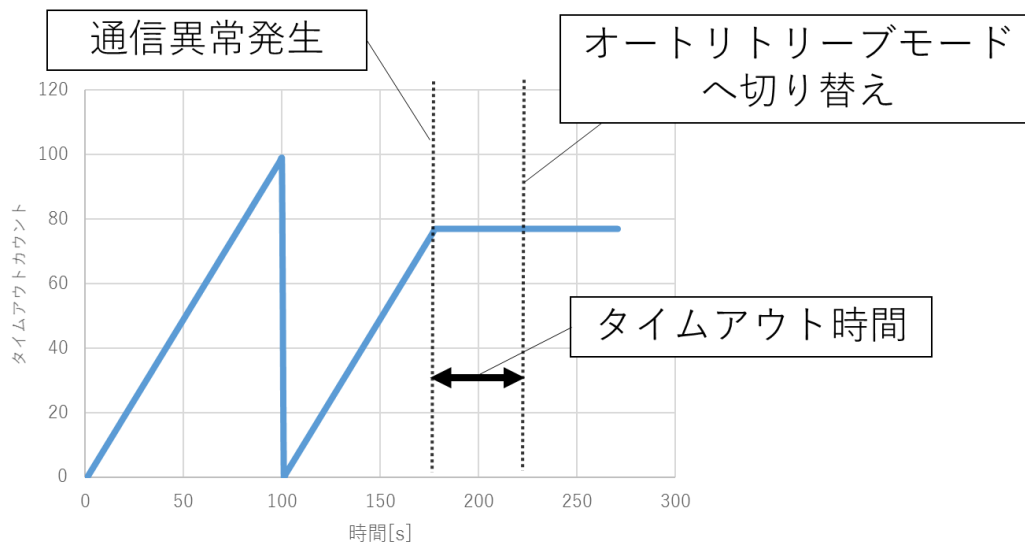


図 4.13 通信異常判断プログラム

また、通信異常が発生すると、基地局側のパソコンには“通信異常”と警告が出る。船舶との通信が復旧すると、通信異常の警告は消える。しかし、操船モードはオートリトリブモードのままである。基地局側から通信復旧のボタンを押すことでマニュアルモードに切り替わり、再び遠隔操船が可能となる。

#### 4.1.2. 通信システム

Wi-Fi とモバイル回線を用いて通信の二重化を行なう。らいちょう N と先端ナビゲートシステムをこれらのネットワークを使用して接続する。簡易的なシステム図を図 4.14 に示す。本学第三実験棟の屋上に GoBeam8000 を設置し、らいちょう N には G-Access500 とモバイルルータを設置する。使用したモバイルルータを図 4.15 に示す。Wi-Fi の通信が可能なときは、学内 LAN を経由して先端ナビゲートシステムに接続される。また、船内に設置したルータが Wi-Fi の通信状況を監視しており、Wi-Fi が通じなくなった場合にはモバイル回線へと自動的に切り替わり Internet を介して先端ナビゲートシステムに接続される。船内に設置したルータを図 4.16 に示す。このルータは 10 秒に 1 回、先端ナビゲートシステムへ Wi-Fi を経由して、ping を送信している。3 回連続で ping が通らなくなったら自動的にモバイル回線へ切り替わる。この ping を送信するタイミングは変更が可能である。Wi-Fi での通信が復旧すると、自動的にモバイル回線から Wi-Fi 通信に切り替わる。セキュリティ対策として、Wi-Fi、モバイル回線、どちらでも先端ナビゲートシステムとは VPN 接続される。

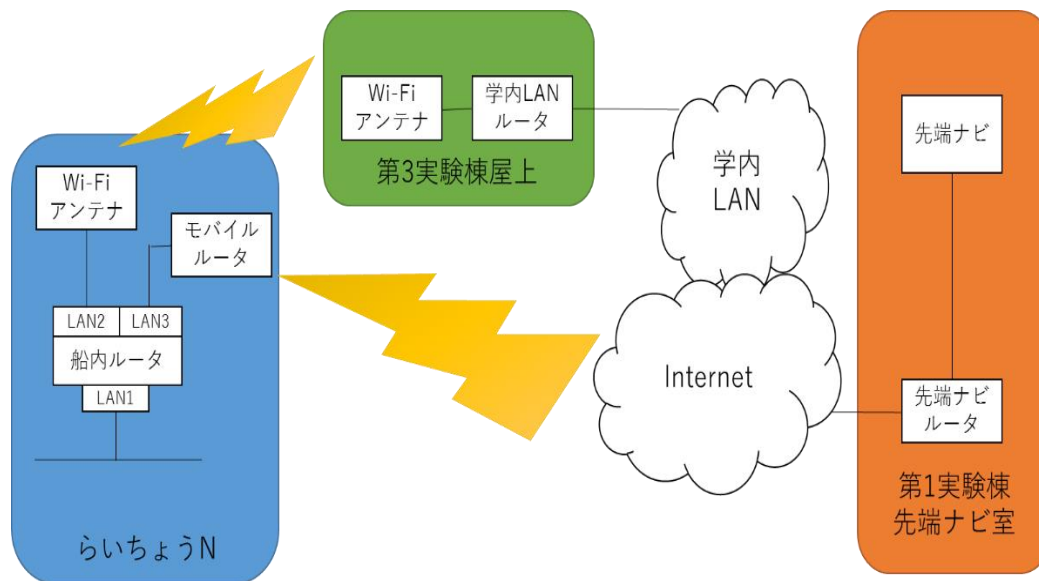


図 4.14 通信システム構成図



図 4.15 モバイルルータ

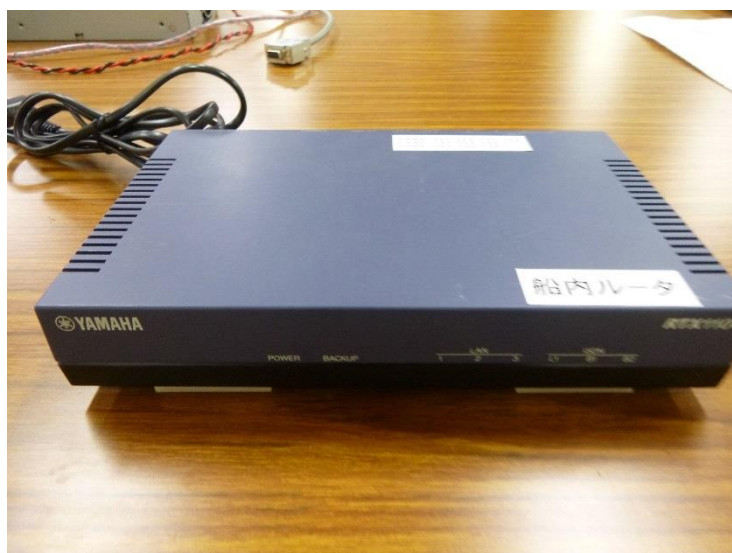


図 4.16 通信経路自動切換えルータ

## 4.2. 実験

開発したシステムの検証を行なった。実験はそれぞれの操船モードの検証をする。また、Wi-Fiとモバイル回線を自動的に切り替える検証を行なった。

### 4.2.1. マニュアルモード実験・結果

マニュアルモードによる実験は、基地局を東京海洋大学第3実験棟7階とし、パソコンやWi-Fiアンテナを設置した。実験中の第3実験棟7階の様子を図4.17に示す。通信が可能な限り、目視とIPカメラの映像を見ながら遠隔操船を行なった。図4.18に実験中の様子を示す。



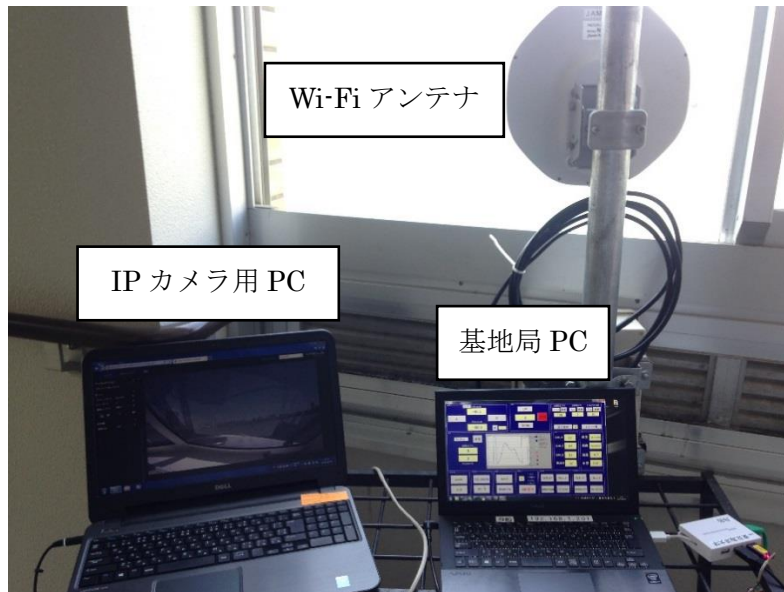


図 4.17 マニュアルモード実験時基地局



図 4.18 マニュアルモード実験中

マニュアルモードによる実験の結果は以下ようになった。図 4.19 に航跡を示す。通信は約 1km 先まで可能であった。通信が途切れた原因はらいちょう I が橋をくぐり、その橋が遮蔽物と

なったためであると考えられる。しかし、通信が途切れるまでは、IPカメラで撮影した映像を見ながら、操船者の意図通りの操船が可能であった。図 4.20 は基地局の IP カメラ用パソコンから見た映像である。



図 4.19 マニュアルモード実験時航跡

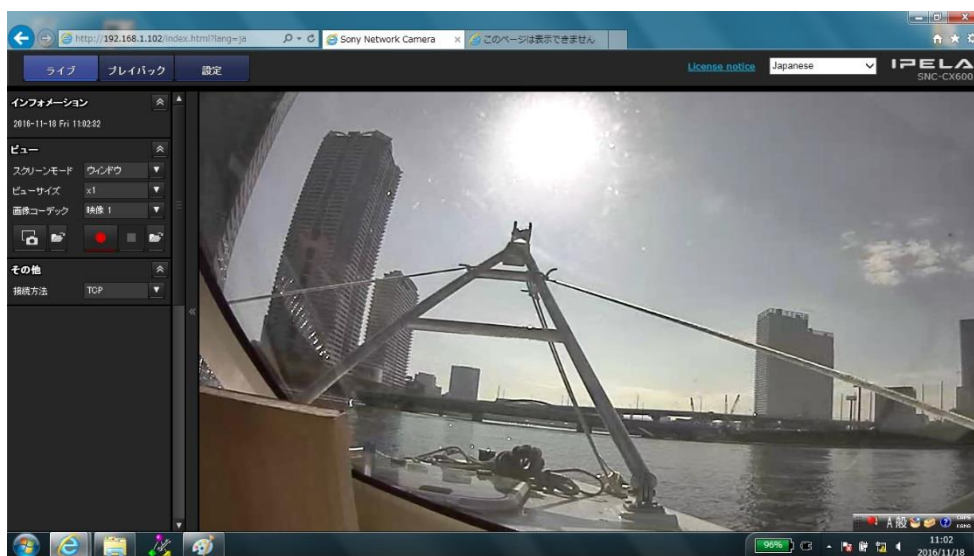


図 4.20 IP カメラ映像

#### 4.2.2. オートパイロットモード実験・結果

オートパイロットモードの実験は、晴海沖にて行った。基地局としたのはらいちょう N である。らいちょう N から、らいちょう I の操船を行った。実験時の基地局の様子を図 4.21 に示す。本

実験は 3.1.3 章で行なった通信可能距離実験と条件は同じであり、アンテナの高さは基地局側が水面から約 5.7m、らいちょう I 側が約 3.5m であった。基地局側の Wi-Fi アンテナを図 4.22 に示す。これらの Wi-Fi アンテナの高さは、3.1.3 章でフレネルゾーンの検証した際と同じ高さである。そのため、このアンテナ高さで理論的に通信ができる距離は約 1570m である。

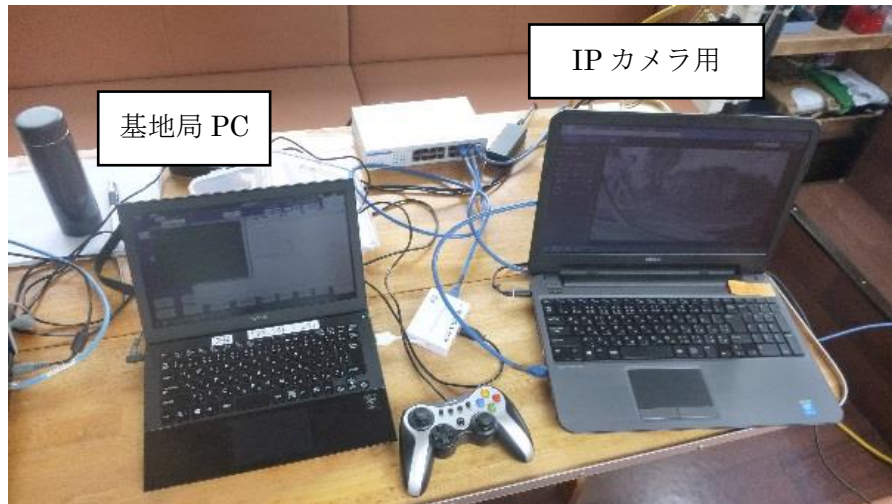


図 4.21 オートパイロット実験時基地局



図 4.22 オートパイロット実験時基地局側 Wi-Fi アンテナ

オートパイロットモードの実験結果は以下ようになった。図 4.23、図 4.24 は目標船首方向を一定とし実験を行なったときの航跡と結果である。図 4.24 のグラフを見ると、船速があがると船首方向にばらつきが見えるが、図 4.23 の航跡を見るとほとんど直進していることがわかる。このばらつきは PID のゲインの設計が 4knots を想定して設計したためであると考えられる。また、図 4.25、図 4.26 はらいちょう N から目標船首方向を随時変更し、らいちょう I が追従するかを見た結果である。図 4.26 のグラフかららいちょう I が指令どおりに、目標船首方向を追従していることがわかる。また、図 4.25 のグラフ内から、出力の指令もらいちょう N から行なえたこと

がわかる。本実験で遠隔操船は約 1.7km 先まで可能であったが、確保できているフレネルゾーンから求められる通信可能距離は約 1.5km であったため、約 1.7km で通信が途切れてしまったと考えられる。



図 4.23 オートパイロット航跡（直進性）

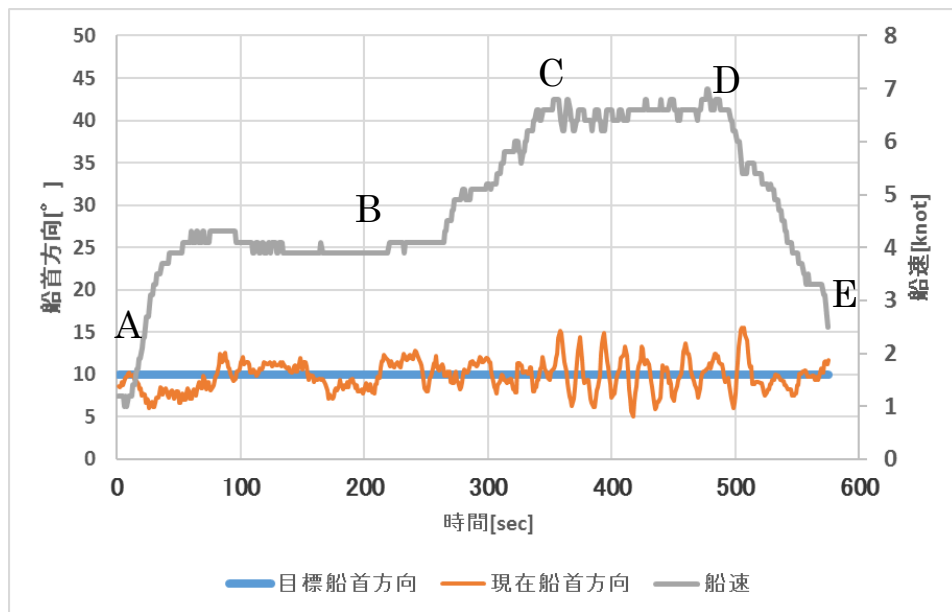


図 4.24 オートパイロット実験結果（直進性）



図 4.25 オートパイロット航跡（追従性）

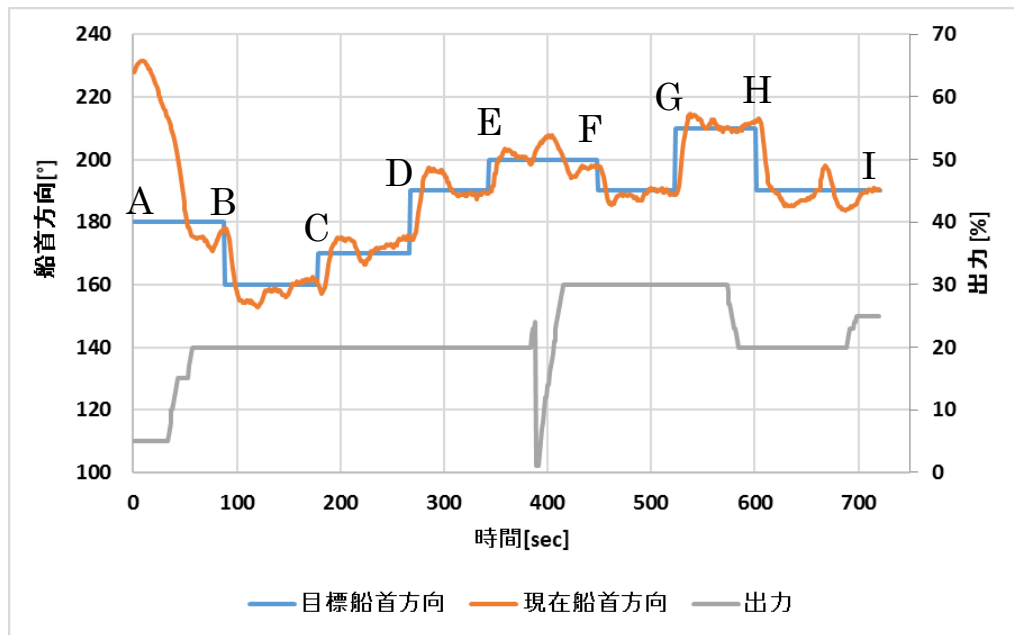


図 4.26 オートパイロット実験結果（追従性）

### 4.2.3. オートリトリブモード実験・結果

オートリトリブモードの実験は横須賀沖で行った。基地局側の Wi-Fi アンテナも、らいちょう I に乗せ、船内で故意的に通信を切断し、通信異常状態を発生させ応答を確認した。

実験結果は以下のようになった。事前に、タイムアウト時間は 10 秒とし、オートリトリブ

モードになったら、目標船首方向は 120 度，出力は 30% で航行するように設定した．図 4.28 のグラフの緑線を見ると，170 秒あたりから通信異常が発生している．そこから 10 秒後に自動的に目標船首方向が 120 度，出力が 30% に変化しており，あらかじめ設定していた通りとなっていたことがわかる．

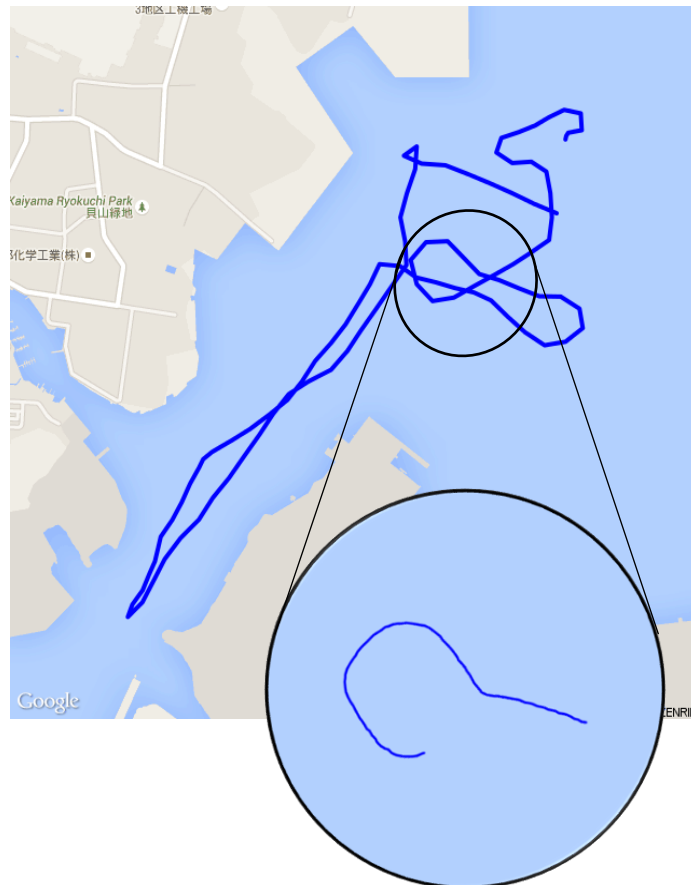


図 4.27 オートリトリーブ実験時航跡

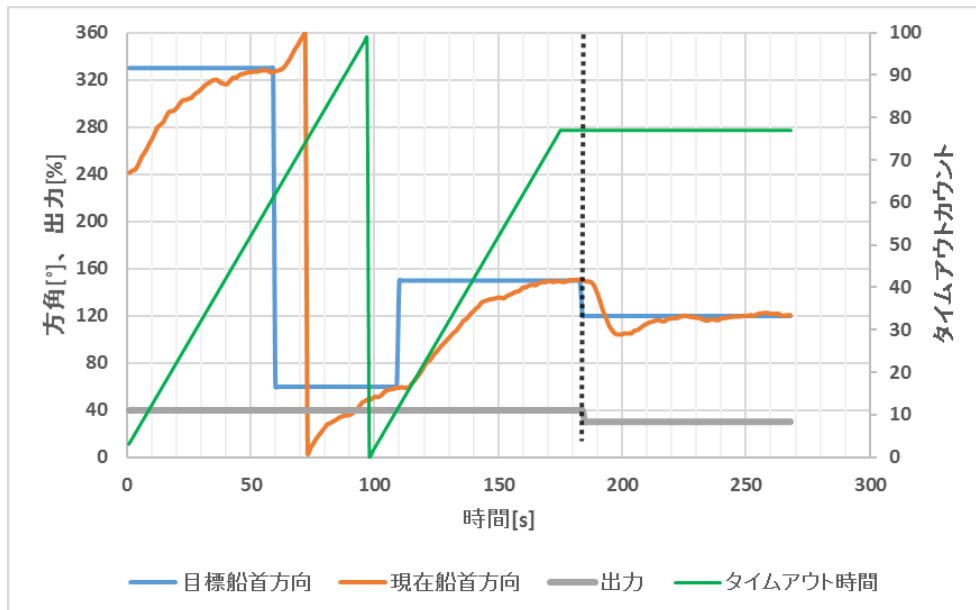


図 4.28 オートリトリブ実験結果

#### 4.2.4. 二重化回線実験・結果

Wi-Fi とモバイル回線の二重化回線実験を行なった。実験の様子を図 4.29 に示す。らいちよう N に設置したパソコンからコマンドプロンプトを利用し、ネットワーク経路を見ることで、それぞれの通信方法で先端ナビゲートシステムと接続ができているかを確認できる。実験は本学ポンドに係留したらいちよう N の船内で、故意的に G-Access500 に接続されている Ethernet ケーブルをはずし、Wi-Fi による通信を不能にさせ、モバイル回線に自動的に切り替わるかを検証した。また、はずした Ethernet ケーブルを再度接続し、モバイル回線から Wi-Fi へと通信が切り替わるかを検証した。

実験を行なった結果、Wi-Fi、モバイル回線それぞれの通信方法で先端ナビゲートシステムと接続ができていることがわかり、それぞれ、自動的に切り替わることを確認された。

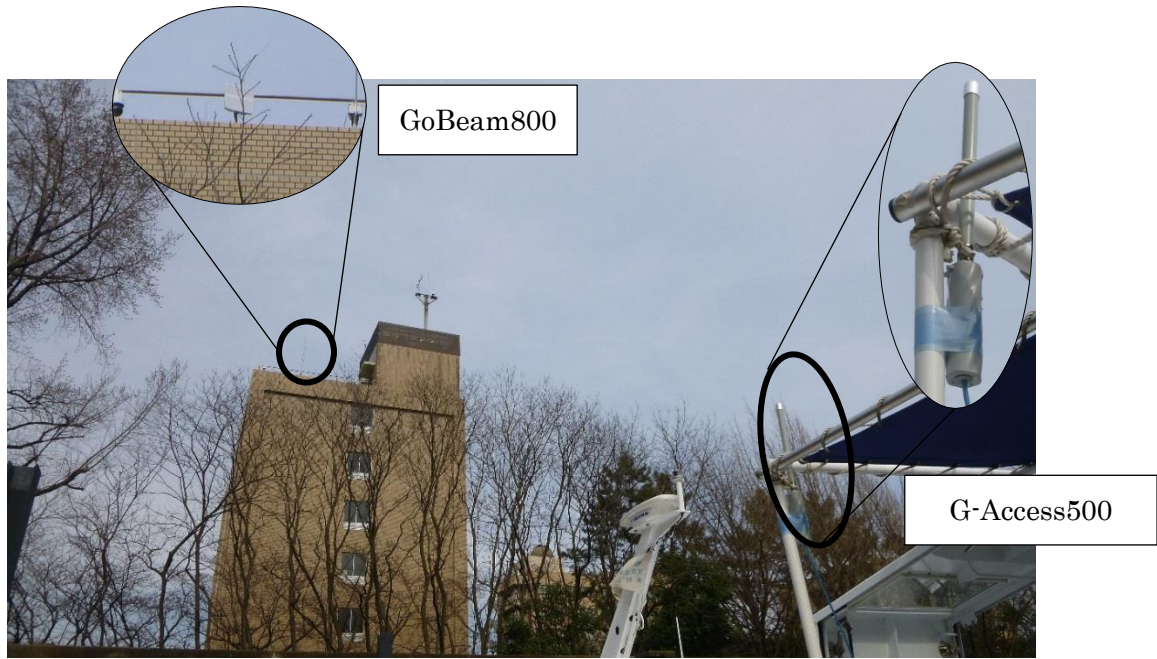


図 4.29 実験時 Wi-Fi アンテナ

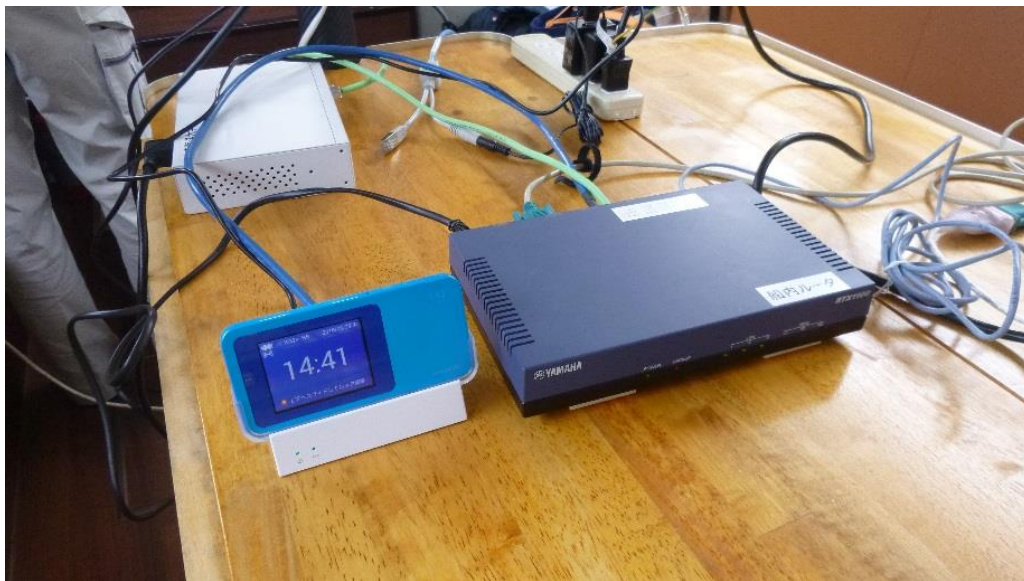


図 4.30 船内のルータとモバイルルータ



## 5. 結言

世界的に船舶の無人化や自律化に関する研究が行なわれている中、東京海洋大学では、排気ガスを出さない電池で動く船を使った、無人水上バスによる都市交通システム、Autonomous Waterborne People Mover (AWPM) の実現を目指している。本研究では AWPM の構成の中の、基地局、遠隔操船型自律航行船、通信システムの開発を中心に行った。一般に遠隔からの監視や操作をするためには、オペレータのいる遠隔地との間で互いにデータを送受信する必要がある。現在の海上通信は主に衛星通信が使用されており、利用しやすい価格帯における衛星通信では船舶から遠隔地へ数百 kbps 程度でしか通信できない。しかし、近海や河川等、輻輳海域では周りに障害物が多くあり、船舶の周りの状況を映像で遠隔地に送り、オペレータは送られてきた映像をリアルタイムで見ながら操船することが必要になると考えられる。映像データを船舶から遠隔地へ送信する場合、数 Mbps 程度のビットレートが必要となるため、現在使用されている衛星通信では、不十分である。そこで我々は Wi-Fi の利用を提案した。近年、数 km 離れていても数 Mbps のビットレートで通信のできる Wi-Fi アンテナが開発された。衛星通信ほど長距離の通信はできないが、港や陸の近くの海域などを航行する水上バスへ適用するには、十分に使用できる通信距離である。そこで、本稿では長距離の通信が可能な Wi-Fi アンテナと本学が所有する電池推進船を用いて、遠隔操船システムを開発することを目的とした。

開発した遠隔操船システムは、基地局と船舶に設置したパソコンのデータを同期させることによって行なう。遠隔操船に必要な操船モードをマニュアルモード、オートパイロットモード、オートリトリブモードの 3 つを用意し、それぞれの操船モードの検証を行ない、全ての操船モードで意図したとおりの挙動を示した。本実験では、最長で 1.7km 先までの遠隔操船が可能であった。通信が不能となった原因は、アンテナの高さが不十分であり、フレネルゾーンが確保できなかったことである。本実験内で海上での Wi-Fi システムを使用しても、海面反射等の影響は受けなかったことがわかったので、より高い位置にアンテナを設置し、フレネルゾーン内に遮蔽物がなければより長距離の遠隔操船が可能になると考えられる。また、本稿では遠隔操船用に操船モードを 3 つのみ搭載したが、定点保持やウェイポイント制御等、他の操船モードはソフトウェアを追加するのみで可能なため、今後必要な機能に応じて簡単に操船モードを増やすことができる。

都市部で遠隔操船システムを利用する場合、橋や建物等の障害物が多くあり、Wi-Fi のみで基地局と船舶の通信を行うのは難しい。そこで、本稿では、Wi-Fi とモバイル回線を利用し、通信の二重化を行った。これにより、Wi-Fi が通信不能となっても、自動的にモバイル回線に切り替わり、常に基地局と船舶の通信を保つことができるようになった。本稿では、水上バスへの適用を見据えた Wi-Fi を用いた遠隔操船システムの開発を行った。それぞれの操船モードの検証や、Wi-Fi の海上での使用、通信の二重化といった検証を行い、実際に本システムが実海域でも使用できることを示した。しかし、実際に水上バスで本システムを利用する際には課題はまだある。自律航行機能は目標船首方向に航行するのみでは不十分であり、あらかじめ設定した航路通りに航行するルートトラッキング機能等が必要になると考えられる。また、通信システムでも、本研究では通信の二重化を行ったが、通信を Wi-Fi からモバイル回線へ切り替えるタイミングやどれだけの通信量があれば遠隔操船が可能なのか、といった課題が残っている。さらには、遠隔地との通

信をする上ではセキュリティ面についても考慮する必要があり、本稿では VPN 接続を行なったが、今後の通信技術の進歩にあわせ、セキュリティ面にも改良を加えていく必要があると考えられる。一方で、本遠隔操船システムは、海洋調査への利用も期待できる。Wi-Fi アンテナを調査拠点となる母船と調査機器に設置することで、洋上で大容量の通信が行えるネットワークを構築することができる。そのため、1 隻の母船から複数隻の調査船を操船でき、海洋調査の効率化に繋がると考えられる。

このように本稿で開発した遠隔操船システムは、課題はまだ残ってはいるものの、活用方法は水上バスのみというわけではない。本遠隔操船システムをさらに研究していくことで、水上バスや海洋調査、また、大型船の出入港のサポート等、様々な利用方法があると考えられる。本稿で開発した遠隔操船システムはそれらのベースとなる部分を開発したにすぎないが、今後も研究を重ねることで多くのシステムへ利用されることが期待される。

## 謝辞

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 清水悦郎准教授ならびに産学・地域連携推進機構 大出剛特任教授に深く感謝いたします。本研究にご協力いただいた、横河商事株式会社 永井宣光氏，日本無線株式会社 梶雅英氏に感謝いたします。また，日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂いた土屋和行氏，高宮敏通氏をはじめとする産学・地域連携推進機構電池推進船プロジェクトメンバーの方々やロボット工学研究室の方々に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 増川正久, 「全自動無人運転交通システム (APM)」, 日本機会学会誌, Vol. 115, pp44-51, 2012.1
- 2) MUNIN Project, <http://www.unmanned-ship.org/munin/>
- 3) 国土交通省, 「環境行動計画 (別冊: 施策集 1. 地球温暖化対策・緩和策の推進)」
- 4) 国土交通省, 「海事レポート 2016 地域から, 世界へ 第 I 部 海事行政の重要課題 第 6 章 環境にやさしい海上交通の実現」, <http://www.mlit.go.jp/common/001141664.pdf>
- 5) 日本無線株式会社, 「無線 LAN ブリッジ JRL-710 シリーズ」, <http://www.jrc.co.jp/product/discontinued/jrl710su/pdf/JRL-710ser.pdf>
- 6) iLand6, 「G-Access500 日本語製品紹介」, [http://media.wix.com/ugd/e80bdd\\_d55463b96e2b43d789ac1d6ad0a67b21.pdf](http://media.wix.com/ugd/e80bdd_d55463b96e2b43d789ac1d6ad0a67b21.pdf)
- 7) 高田純一, 「電波伝搬の基礎理論」, <http://www.apmc-mwe.org/mwe2005/src/TL/TL05-01.pdf>
- 8) 株式会社サーキットデザイン 技術情報 テクニカルツール , <http://www.circuitdesign.jp/jp/technical/TechnicalTool/tTool8.asp>
- 9) 庄司るり, 「運転支援と先端ナビゲートシステム」, 日本船舶海洋工学会誌, 第 47 号, pp12-17, 2013.3