

平成 26 年度

# 卒業論文

## 自律型ボートとその利用に関する研究

学科名 :

海事システム工学科

情報システムコース

学籍番号 :

1121045

氏名 :

樋口志樹

指導教員 :

久保 信明准教授

## 目次

1 章 序論 .....	2
2 章 自律型移動体の利用 .....	3
2.1 移動体の自律化 .....	3
2.2 船舶の自律化 .....	3
2.3 自律型小型ボートの利用 .....	3
2.4 海上で用いられる自律機 .....	3
3 章 ボート及び制御装置 .....	5
3.1 ボート .....	5
3.2 制御装置 .....	6
3.3 センサ .....	6
3.4 GPS 受信機 .....	7
3.5 インターフェース .....	7
4 章 自律航行モデル .....	8
4.1 プログラム概要 .....	8
4.2 アルゴリズム .....	8
5 章 自動航行実験 .....	10
5.1 実験概要 .....	10
5.2 自律航行実験 1 .....	11
5.3 自律航行実験 2 .....	12
5.4 自律航行実験 3 .....	13
5.5 自律航行実験 4 .....	14
5.5 検証・考察 .....	15
6 章 観測実験 .....	16
6.1 実験概要 .....	16
6.2 観測実験 2 .....	19
6.3 観測実験 2 .....	23
6.4 観測実験 3 .....	29
6.5 考察 .....	36
7 章 総括 .....	37
参考文献等 .....	38

## 1章 序論

### 研究背景及び目的

近年は、マイコン、GPS受信機また各種センサの技術的發展により、UAV(unmanned Aerial Vehicle)といった無人移動型ロボットの發展が活発である。また、人が立ち入ることのできない危険地域、人員の削減を目的とした自律型移動体の利用が注目されている。本研究室では、平成24年度に早川氏によって自律型小型ボートの作成及び研究が行われた。この研究では小型ボートを決められた地点への誘導を行う自律航行プログラムの開発が行われた。本研究ではこの先行研究を用いて、自律型小型ボートの更なる開発研究を行った。特に今回は、航法と誘導の研究に注目した。航法は主にセンサ、GPS受信機から得られる情報を用いて行われる。より正確に自分の位置や状態をとらえ回りの状態を正確に把握できるならば、より精度の高い観測、誘導を行うことができると考えられる。無人の状態でも精度の高い観測データを収集できることは非常に有意なことである。そこで、先行研究では行われなかった測位方法の調査を行った。

誘導においては更なる実用化、より自律した動きに近づける為新たに自動で行われる項目の開発を行った。その中でも、環境観測を目的として小型ボートを使用すると想定した誘導を行った。環境観測において長期間の観測は当然求められる条件である。そこで、無駄の少ない誘導を行えばより駆動に使うエネルギーは少なくなり長期の運航が可能になり長期間の観測が行えると考えられる。よって長期運航を目的とした省エネルギーな誘導の開発を行った。

## 2章 自律型移動体の利用

### 2.1 移動体の自律化

本論文で扱う移動体は自動車や鉄道車両、船舶、航空機といった公共交通機関で利用される輸送用機械を指すとする。また、本実験で扱う小型自律ボートは上記で示した船舶を想定したものである。これら上記の輸送用機器を「移動体」と言葉でまとめたが運用される環境や機体の形状は様々である。また、目的も各々多種多様であるが、現在の位置を推定する「航法」、移動の軌道を算出する「誘導」、算出された軌道に沿って機体を運行させる「制御」、これら3つは望ましい移動体の運用に必要不可欠であり共通した理論・技術体系である。ゆえに、移動体の自律化を目指すにあたって、この理論・技術体系は重要な土台となる。

### 2.2 船舶の自律化

飛行機のオートパイロット、自動車の自動操縦やロボットカーと同様に、船舶でも自律航行の研究、開発が行われている。最近ではロールス・ロイス社による自律航行船「MUNIN」の開発がある。飛行機のオートパイロットにおいて自動着陸装置はいかなる悪天候でも安全確実に着陸できることを目的に作られている。つまり、安全の為に自動システムを導入している。現在海の事故はヒューマンエラーが原因によるものが多い。完全な無人ロボット船でなくても、一部を自律化、自動化し運航の支援となるシステムの開発は安全な航行をより確実なものにすると考えられる。また、自律化とは自動化された項目をあるルールに従い機体が判断し実行していくことを指すので、一部の機能が自動化されていくことは自律型船舶の開発に繋がる。



Figure 1 「プロジェクト MUNIN」ロボット船のイメージ図

### 2.3 自律型小型ボートの利用

UAV、UUVといった無人機の開発は近年注目されてきている。これら無人機の利用は貨物の運搬以外では情報の収集に用いる場合が多いと考えられる。自律型小型ボートでも同様に情報の収取が目的で使用されると考えられる。無人である利点は、過酷な環境や危険区域とされる場所で利用といった人員の削減である。よって自律型小型ボートにおいて貨物の運航、決められた航路の運航以外の誘導や、過酷な環境下でも安定した調査、観測を行うことが求められる。

### 2.4 海上で用いられる自律機

移動体において使用する動力源に関しては重要な問題点である。自律型の無人機においても同様である。人員の削減だけでなく、長期間の運用は自律機において非常に期待される点である。

海上で利用されている移動体は船舶以外にも存在し、中でもヨットは動力源として風を利用した移動体である。機体の動力に燃料を必要とせず、駆動や誘導計算のみにエネルギーを使用するこの移動体は長期間の運用を目的とした自律機として有効なモデルと考えられる。ここでヨットを移動体のモデルとした、自律機 **Sail drone** の開発を行っている **Sail drone** 社について述べる。**Sail drone** 開発の背景は、海洋と気候変動の中でも海洋の酸性化に関する調査が目的である。また、慣例上海洋の環境観測において大型の船舶を用いていたが、これらは非常に高価であり、環境汚染を調査する最中にも関わらず環境を汚染すると考えられるディーゼル燃料を使用している事に関しても開発に至った要因と述べられている。機体に関してだが、完全なクリーンエネルギーを利用したものとなっている。当然動力には風を利用し、駆動や誘導計算においては太陽光で得られるエネルギーを利用したものである。



Figure 2 Sail drone

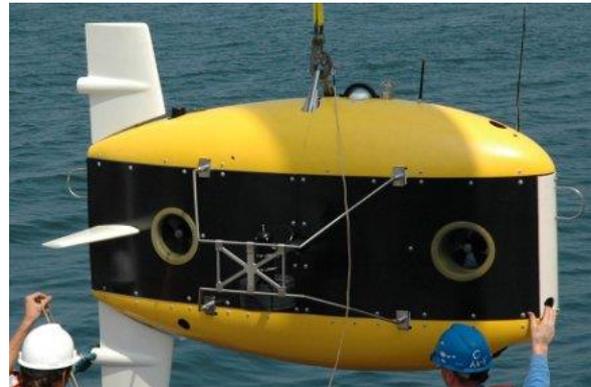


Figure 3 Sail drone 社 その他活動

### 3 章 ボート及び制御装置

#### 3.1 ボート

今回、研究に用いるボートは早川氏が製作したボートを使用する。

ボートの筐体は株式会社制「RC-S2」が使用され、制御装置は株式会社ゼノクロス製「AP-CUB DIY LITE」が搭載されている。この制御装置は制御プログラムが変更可能であるため誘導制御計算の変更が可能となっている。

筐体に対し船首部に制御装置を配置し、駆動部は船尾に位置する。また、中間部はバッテリー、バラスト用の重り、記録媒体が配置されている。

船首部の制御装置には CPU ボード A,C を 2 枚、GPS 受信機、GPS アンテナ、ラジコン用の ESC (スピードコントローラー)、加速度センサ、地上インターフェースとの通信用 ZigBee 通信モジュールが搭載されている。本機体はプロポを用いた制御も可能であるため、プロポからの通信を受ける受信機が搭載されている。

船尾の駆動部では、ラダーにサーボモーター1つ、プロペラにはブラシレスモーターを2つ使用している。サーボモーターは CPU ボード A からの PWM 信号を直接受けることにより制御を行っている。ブラシレスモーターは ESC を中継ぎし CPU ボード A に接続している。ESC が CPU ボード A から受ける信号を中継ぎすることにより出力の制御を行っている。

中間部は別の取り出し窓が用意されており、ねじ止めではない留め具で機密性を保っている。そのため中間部に配置された装置は取り外し取り換えが容易な構造となっている。バッテリーは制御システム用、駆動用の2種類用意されている。制御システム用バッテリーでは DC4.5~9.0V の電源を用いて制御部の装置全般に電力が供給される。本研究では単3型電池4本を格納できるスイッチ付電池ボックスを使用した。駆動用バッテリーはサーボモーター、ブラシレスモーターに電力が供給される。主にニカドバッテリー7.2V1300mAを2本または2300mAを2本使用する。航続可能時間は15分から30分ほどである。記録媒体は microSD カード2枚を用いた。1枚には GPS 受信機から取得した NMEA 情報が記録される。本研究での記録周期は 2Hz で行った。2枚目には主に自律航行で使用する船体に関する情報が記録される。主に舵角度やモーターの出力、GPS 受信機、センサから船体に伝えられるデータ等を記録することができる。またこれらのデータはプログラムの書き換えにより記録する項目、記録周期を変更することが可能である。本研究では、10Hz で記録を行った。



Figure 4 ボート全体



Figure 5 ボート内部

### 3.2 制御装置

「AP-CUB DIY LITE」は2枚のCPUボードを搭載している。CPUにはルネサスエレクトロニクス社製「H8S/2638F」、ARM社のワンボードマイコン「mbed NXP LPC1768」を使用している。CPUボードAでは、センサ、GPS受信機、RC受信機からの信号を読み込み、20HzでCPUボードCへ送信を行う。CPUボードCで制御計算を行い、結果を再びCPUボードAへ送信を行う。この際、送信周期はCPUボードCで指定が可能である。本研究では10Hzで行った。そして受信したサーボ指令を駆動部へ出力することにより、航行を行う。



Figure 6 CPUボード



Figure 7 制御装置

### 3.3 センサ

本機体には InvenSense 製 3 軸デジタルジャイロ ITG-3200 を搭載した。角速度センサの軸方向については X 軸を船首方向、Y 軸を右舷方向、Z 軸を機体の上部方向と定義した。

### 3.4 GPS 受信機

本研究では u-blox 社製の GPS 受信機を利用している。「u-blox 6 モジュール」シリーズの評価キットを使用し、NMEA 情報を 2Hz で流している。



Figure 8 GPS 受信機

### 3.5 インターフェース

ボートには 2 つの無線通信を利用している。1 つはプロポと機体の通信である。ホビー用ラジオコントロール機器として設計されている JRPROPO 社の「DSX 3」を使用し、ラダーとモーターのサーボ指令とマニュアル、自律航法の切り替えの送信を無線で行う。2 つ目は機体と PC との通信として組み込み Wi-Fi モジュールの XBee が搭載されている。このモジュールはボートの航行中、機体に関する情報を PC に送信を行う。PC 上に送信する情報は、CPU ボード C の制御プログラムを変更する際、変更が可能である。本研究では、主に送信周期は 2Hz で行った。またどちらも使用する周波数は 2.4GHz 帯である。

## 4章 自律航行モデル

### 4.1 プログラム概要

本研究は、機体のある指定したエリアの保持を目的としたプログラムである。ある指定した 1 点を目指し到着すると自律航行プログラムを停止させ、その定点から指定距離よりも離れると再度自律航行プログラムを起動させ、再び定点へ戻るものである。

自律航行プログラムは平成 24 年度に早川氏が作成したプログラムをもとに航行を行う。

### 4.2 アルゴリズム

プログラムが始まるとまず初めに目標地点 FP(final point)の設定を行う。プログラム内にあらかじめ FP の緯度経度を指定されており目的地として読み込む。次に自律航行プログラムにより、目的地へと航行を行う。目的地へ到達したと判断されると、ラダー、プロペラに与える舵角指令、モーター出力の値をニュートラルにする。FP からボートの距離がプログラム内に指定された距離より大きな値をとったとき再度自律航行プログラムを起動させ、FP を目的地として自律航行を行う。

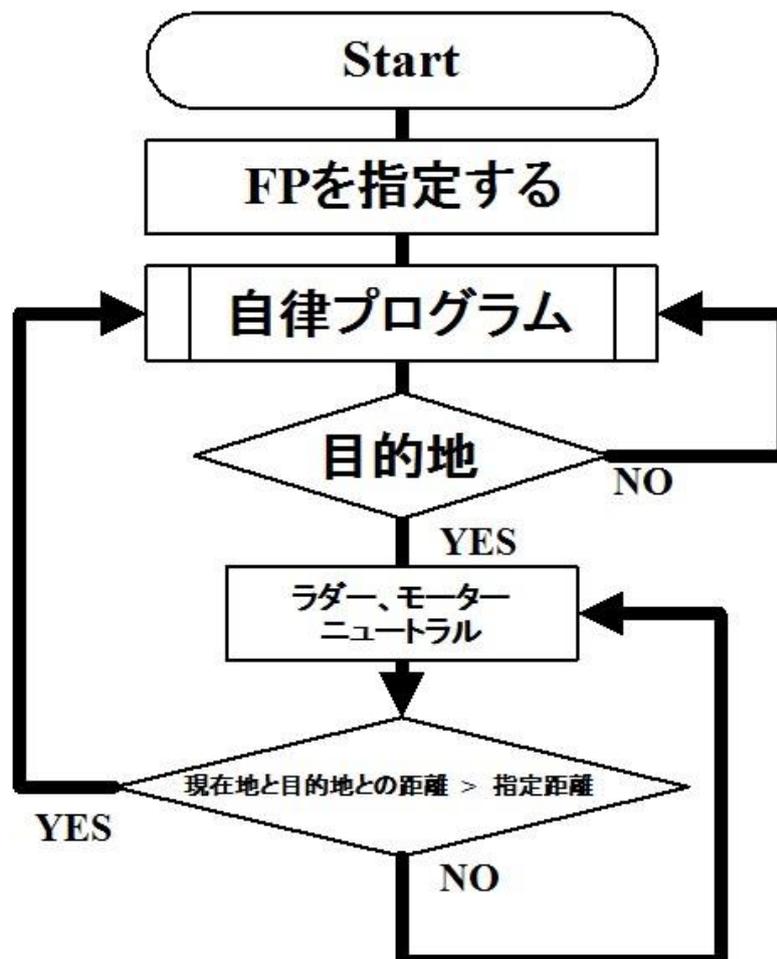


Figure 9 制御フローチャート

早川氏が作成した自律航行プログラムについて以下に述べる。

本プログラムは、プロペラのモーター出力は固定され、ラダーによる操舵の制御を主に行って

いる。プログラムが開始されると、現在のボートの位置と針路の計算を行う。位置情報また船首方位は、搭載された GPS 受信機から得られる NMEA 情報を用いる。これらを用いて、目的地と現在位置の差から目的地までの距離、及び目的地への方位を求める。求めた針路と目的地の偏差が指定値より大きな値をとる場合舵角の制御を行う。これは常に舵を取ると、船首方位が安定せず蛇行してしまうための「遊び設定」である。舵角は PID 制御を用いて決定している。PID 制御を用いた操舵の基本式は次式で表される、

$$* \text{pushCH1} = 1875 + \text{base} + K_P * \left( \frac{\text{dDeg}}{\pi} \right) + K_I * i_{\text{error}} - K_D * d_{\text{error}}$$

ここで、

*pushCH1	指令舵角
base	基本舵角
K <sub>P</sub>	比例ゲイン
K <sub>I</sub>	積分ゲイン
K <sub>D</sub>	微分ゲイン
dDeg	偏差
i_error	偏差の累積
d_error	前回偏差との差

\*pushCH1 = 1875 と舵角の中立に設定されている。また、針路と目的地の位置関係により舵角の向きが変わるため、符号等が変化する。上式は針路方位から目的地が右舷側に位置する場合である。一定以下の舵角では回頭が小さく、変針が遅い為、適当な値を用いることにより有意な回頭が得られる基本舵角を設定した。

## 5章 自動航行実験

### 5.1 実験概要

主に目的地への到達判断の性能、またエリア保持に関する船体の性能調査、アルゴリズムの検証を目的とした実験を行う。実験場所は東京海洋大学越中島キャンパス敷地内にあるポンド近辺で行う。

目的地へ到達したと判断される座標からの距離と、保持すべき目的地からの範囲を指定した表を以下にまとめる。

Table 1 自律航行 実験項目

	実験 1	実験 2	実験 3	実験 4
ポンド内・外	内	内	外	外
到達判断半径 [m]	2	5	2	5
エリア範囲 [m]	10	10	20	20

目的地は、ポンド内と外でそれぞれ1点を使用した。以下に座標を示す。

Table 2 目的地

	緯度[°]	経度[°]
ポンド 内	35.66668055	139.79143055
ポンド 外	35.66621944	139.79104722

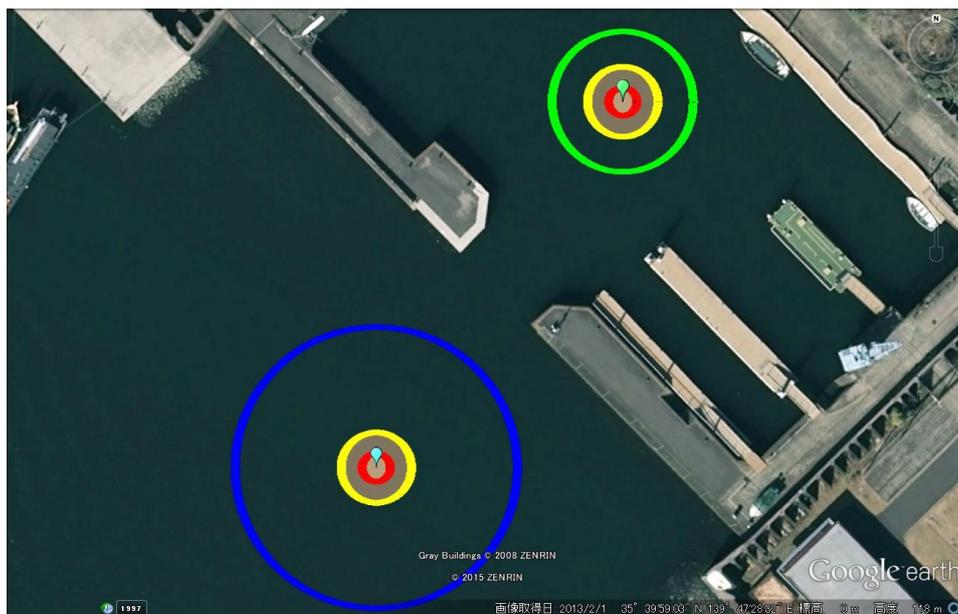


Figure 10 目的地

赤：半径 2m、黄：半径 5m、緑：半径 10m、青：半径 20m

## 5.2 自律航行実験 1

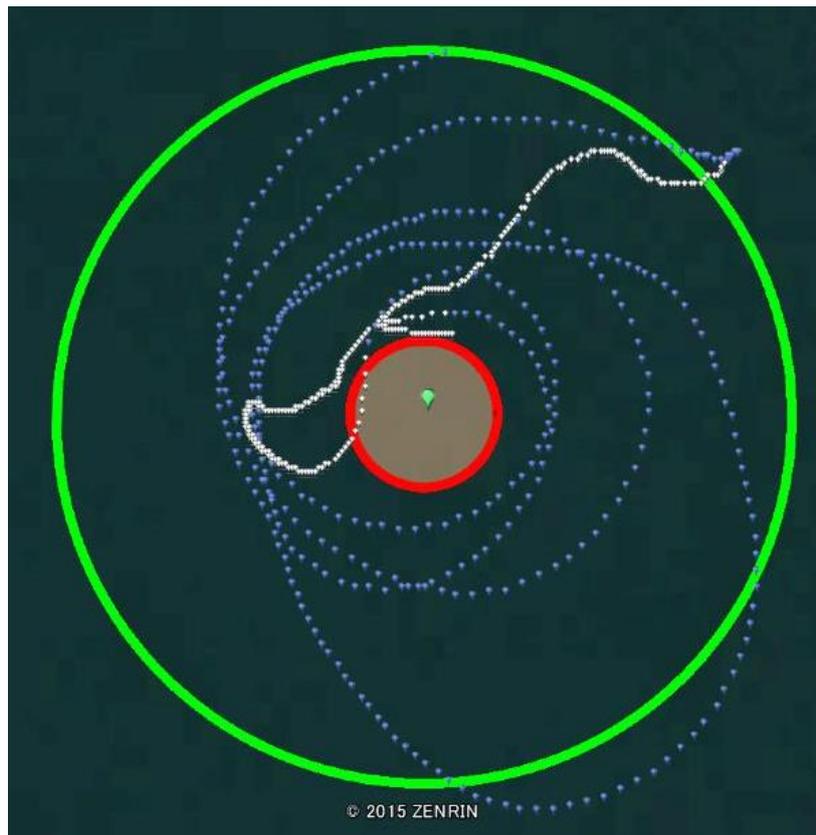


Figure 11 自律航行実験 1 航跡

青：自律走行、白：駆動部停止



Figure 12 左：自律走行時 右：制御停止時

### 5.3 自律航行実験 2



Figure 13 自律航行実験 2 航跡

青：自律走行、白：駆動部停止



Figure 14 左：自律走行時 右：制御停止時

## 5.4 自律航行実験 3



Figure 15 自律航行実験 3 航跡

青：自律走行、白：駆動部停止

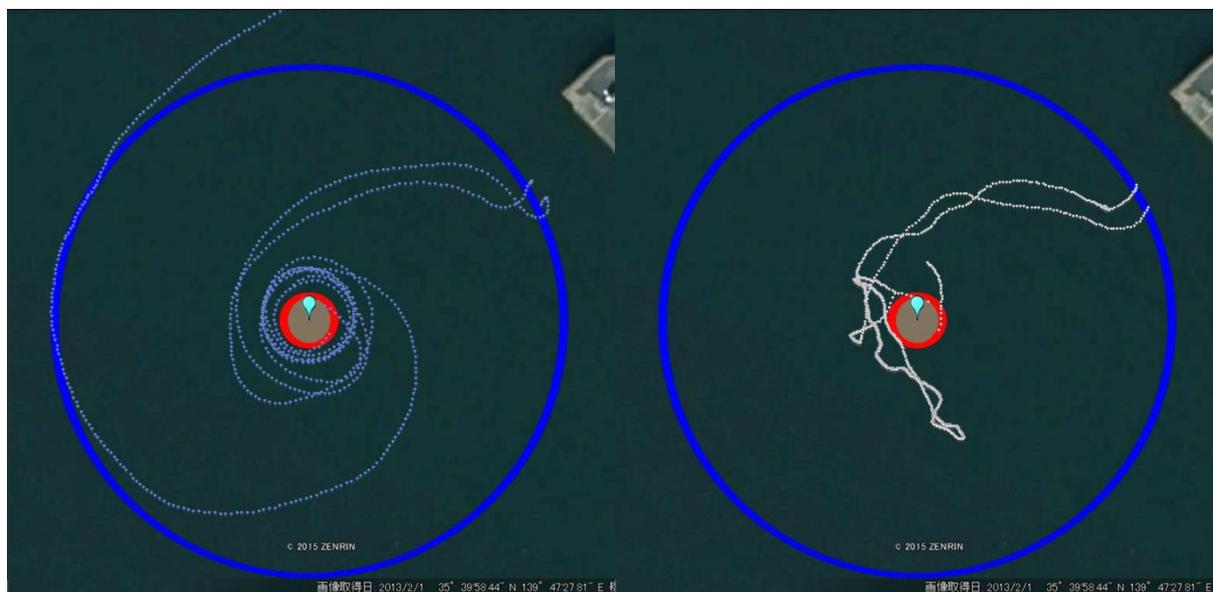


Figure 16 左：自律走行時 右：制御停止時

## 5.5 自律航行実験 4

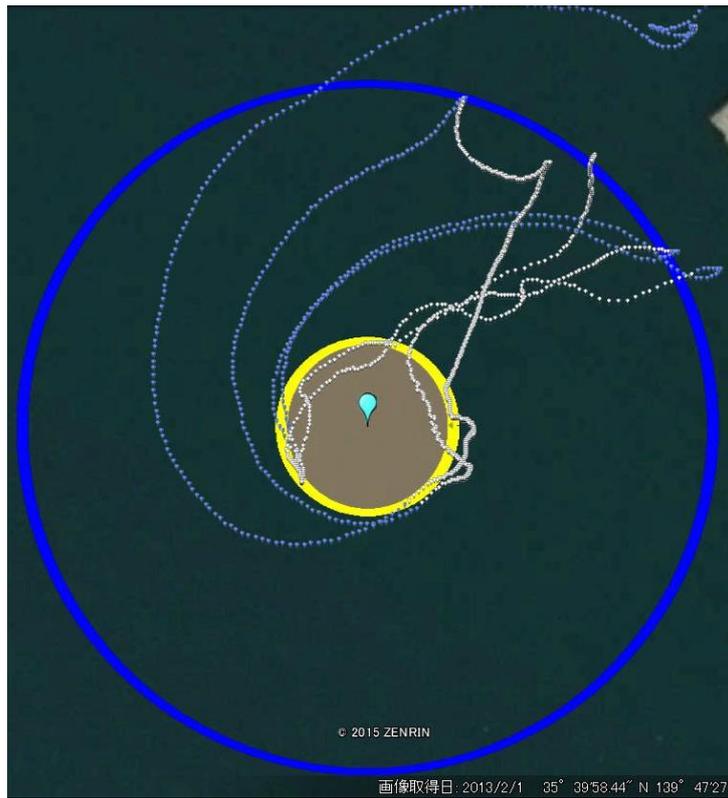


Figure 17 自律航行実験 4 航跡

青：自律走行、白：駆動部停止

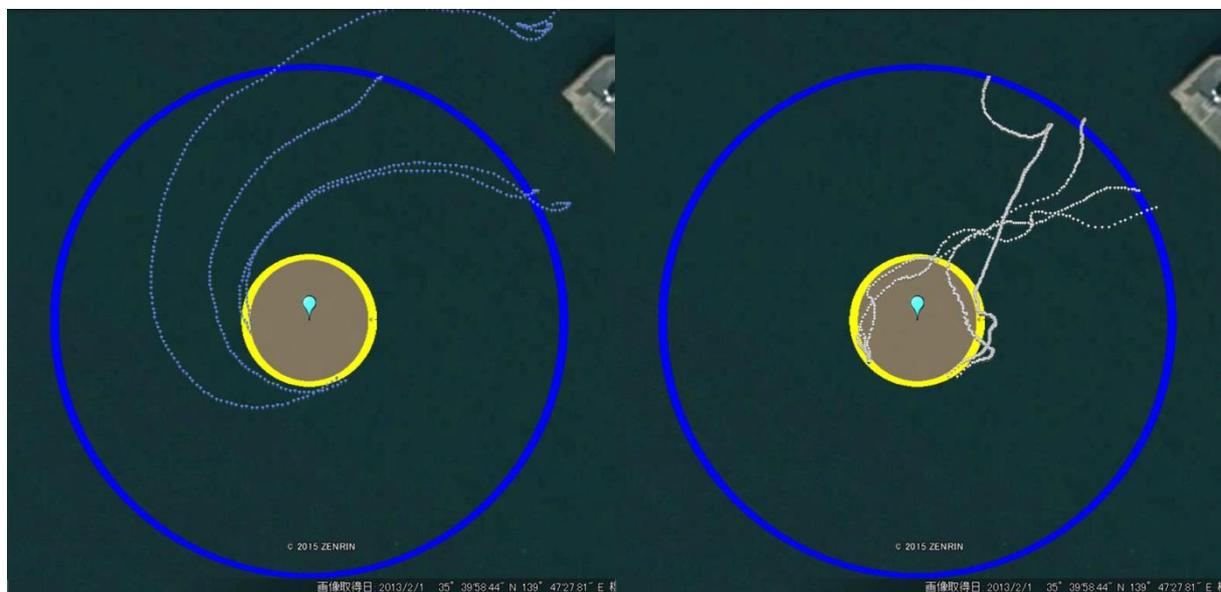


Figure 18 左：自律走行時 右：制御停止時

## 5.5 検証・考察

本実験で表記された航跡は受信機が得た測位結果によるものである。よって、実際にボートが航行を行った真値を示したものではない事に注意したい。

自律航行時と駆動停止時が切り替わるところを中心に航跡を示した。

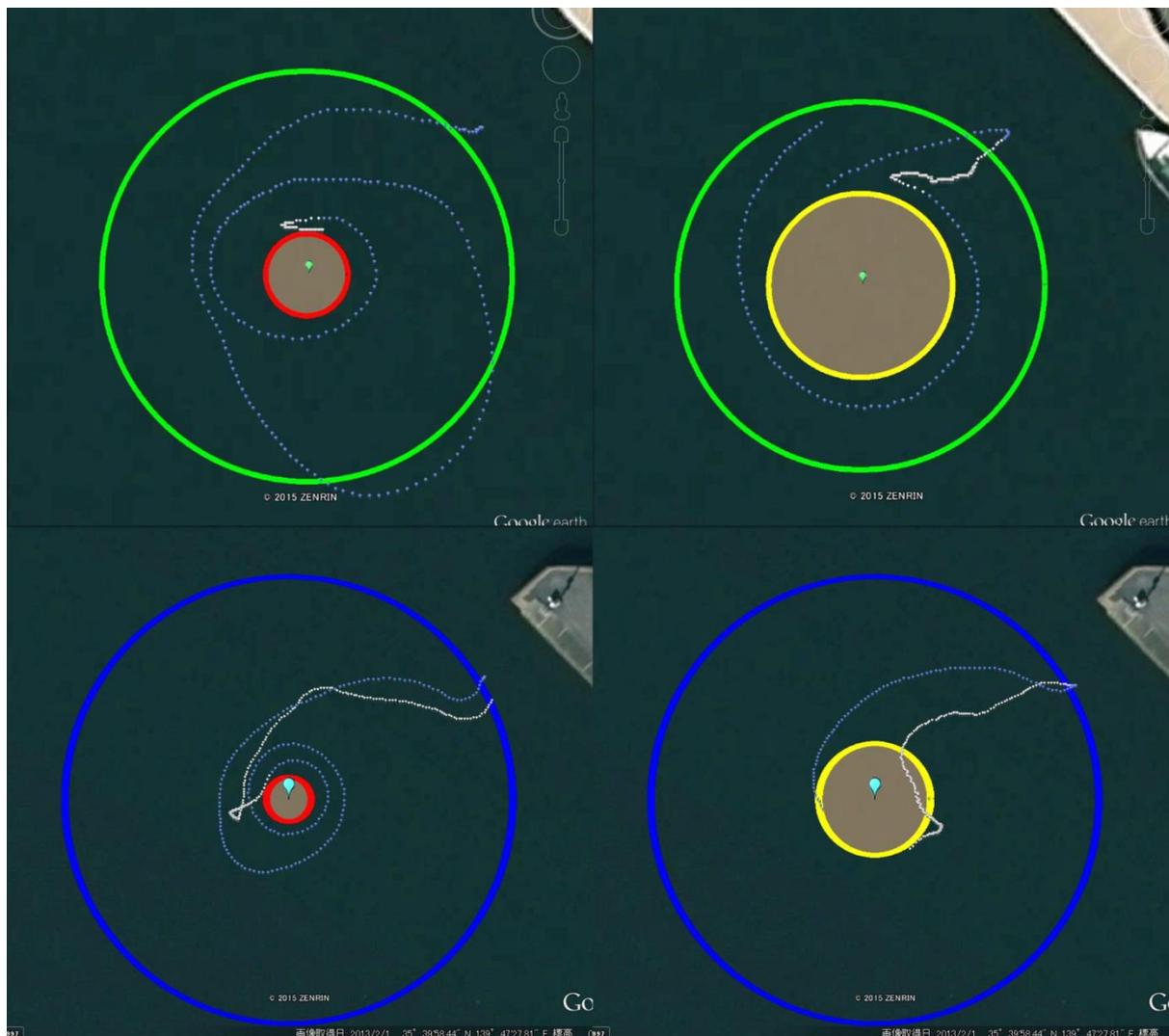


Figure 19 左上：実験 1、右上：実験 2、左下：実験 3、右下：実験 4

どの結果でも目的地に向かっていることは写真から視覚的に読み取れる。しかし、目的地に対して直線的に向かうのではなく、目的地を左手に見て旋回を行い収束していくかのような航跡であった。よって、自律航行に関して修正を行う必要がある。特に目的地への舵角調整が正しく行われていない様子から PID 制御に関しての修正が必要と考えられる。白で表記された航跡において、緑と青の円の外ではほとんど見られないので目的地と本機体の距離計算は比較的正しく行えているのが読み取れる。よって、到達判断による、駆動の制御は正しく行えたといえる。

以上より、航跡結果を見る限り今回の目的であったエリアの保持に関しては正しく実行されている結果となった。しかし、再度中心部へ誘導を行う際、無駄な航行が見られる結果となった。

## 6章 観測実験

本実験では、自律航行用の GPS 受信機とは別に観測用の受信機を用いて raw データを集め、収集された raw データの後処理解析を行うことにより、測位結果を求め小型ボートによる精密測位の有意性の調査を行う。現在用いている受信機は GPS のみの観測によりボートの制御を行っている。単独測位のみで行った結果の精度は数 m である。使用している小型ボートは約 1m であり、小型ボートに対してこの精度では、正確な位置を示しているといい難い結果となる。よって、他の衛星を使用した精度の高い測位によってよりボートの誘導はしやすいものと考えられる。また、このような小型の自律機は主に観測といった情報の収集に使用されることが多いと考えられる。航法で使用する受信機が環境観測として十分な情報も集めることができれば余分な機材を減らすことができる。

### 6.1 実験概要

新たに観測用として、普及型 1 周波受信機「u-blox M8 評価キット」を用いた。アンテナは付属のアンテナ ANN-MS を使用し船尾側に配置した。

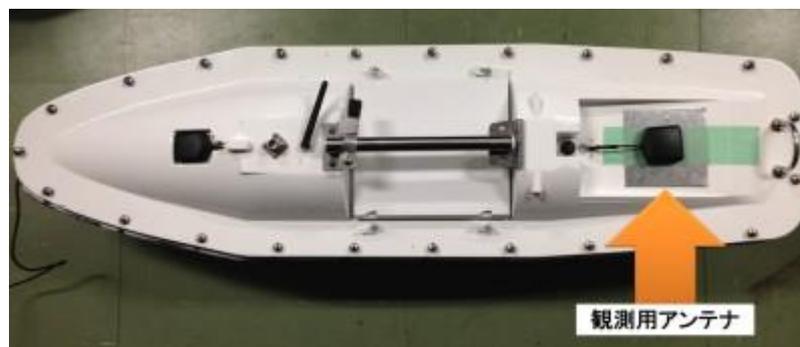


Figure 20 ボート上部

データの記録にはタブレット PC「thinkpad tablet 2」と u-blox 社より無償で配布されているソフトウェア「u-center」を使用した。ここで、本実験で行った観測手順、操作について述べる。まず、受信機にアンテナを接続し、PC とは USB ケーブルを用いてシリアル通信を行う。「u-center」を用いて記録したいデータについて設定を行い、GPS、SBAS、BeiDou、QZSS の観測データを 1Hz で記録した。今回行う測位方法は相対測位であるため、同様の観測を第四実験棟屋上に設置されたアンテナを基準局として行った。

基準局用アンテナの真値：  
緯度 35.666242980  
経度 139.792308593  
楕円体高 59.8924



Figure 21 観測用受信機

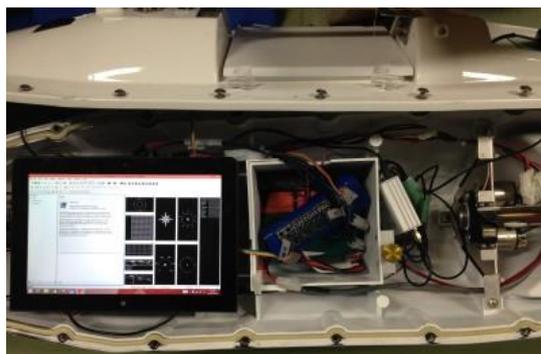


Figure 22 観測機器設置内部

後処理解析には解析ソフト RTKLIB(ver.2.4.2)を用いて DGPS と RTK 測位を行った。  
観測実験 1 における RTKLIB 内の主な設定値を下記に示す。

**Table 3 RTKLIB 設定値**

	Positioning Mode	Elevation Mask	Integer Ambiguity Resolution	Ratio テスト
DGPS	DGPS/DGNSS	15		
RTK	Kinematic	15	Continuous (実験 3 : instantaneous)	2

## 6.2 観測実験 1

小型ボートに受信機を設置し、地上においた状態で小型ボート、プロポ等の電源を全て入れ操船している状態と同じ環境を想定して観測を行った。

観測時間：1時間



Figure 23 周辺環境 2-1



Figure 24 周辺環境 2-2

今結果は、以下の座標(Point2)を基準とした値をプロットした。

よって、高さ方向は Point2 のジオイド高をジオイド面とした標高の値(H)が出力されている。

$$\text{標高(H)} = \text{楕円体高(h)} - \text{ジオイド高(N)}$$

Point2	緯度	35.666346693
	経度	139.791367935
	ジオイド高	36.4660

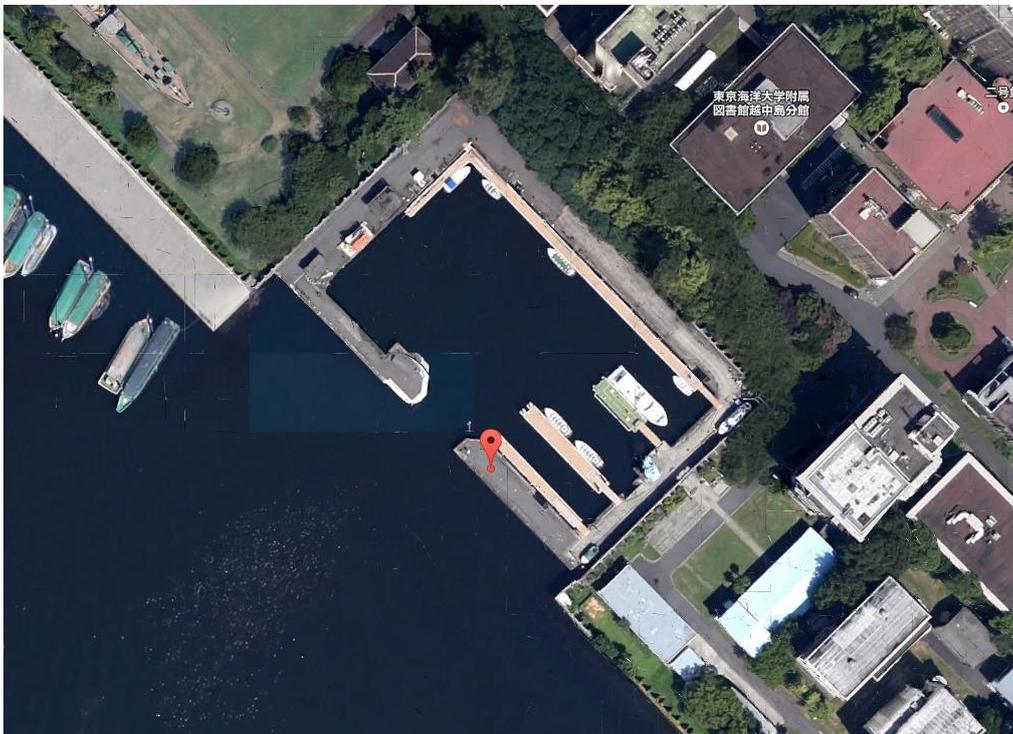


Figure 25 Point2 航空写真

<解析結果>

・DGPSによる測位結果

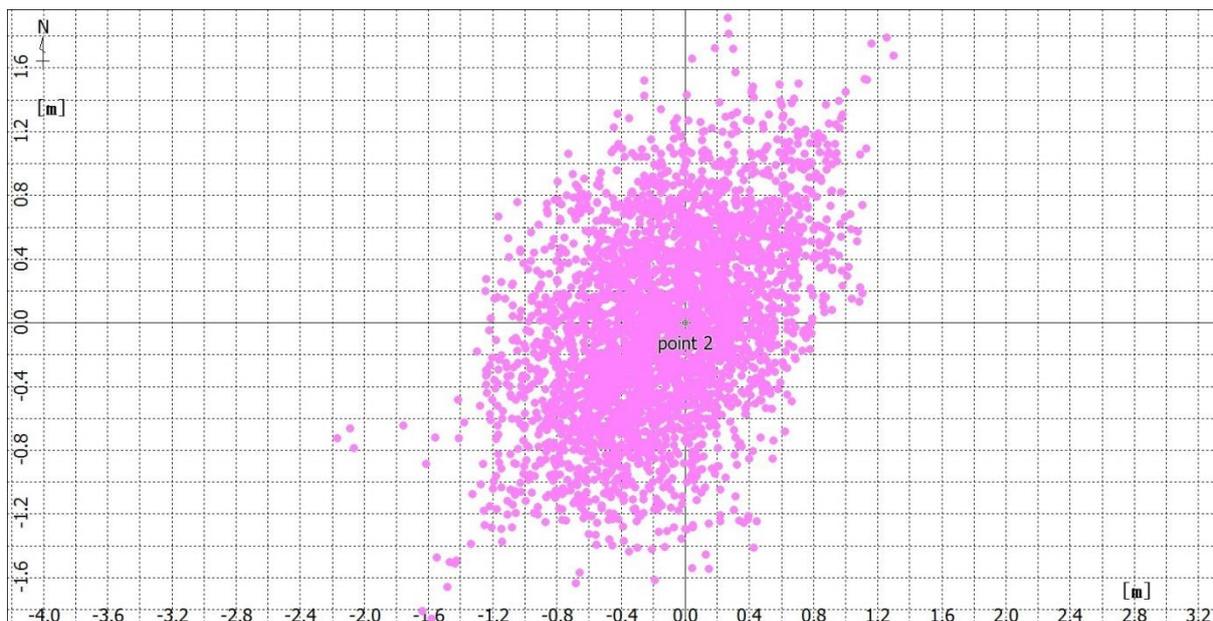


Figure 26 水平方向分布

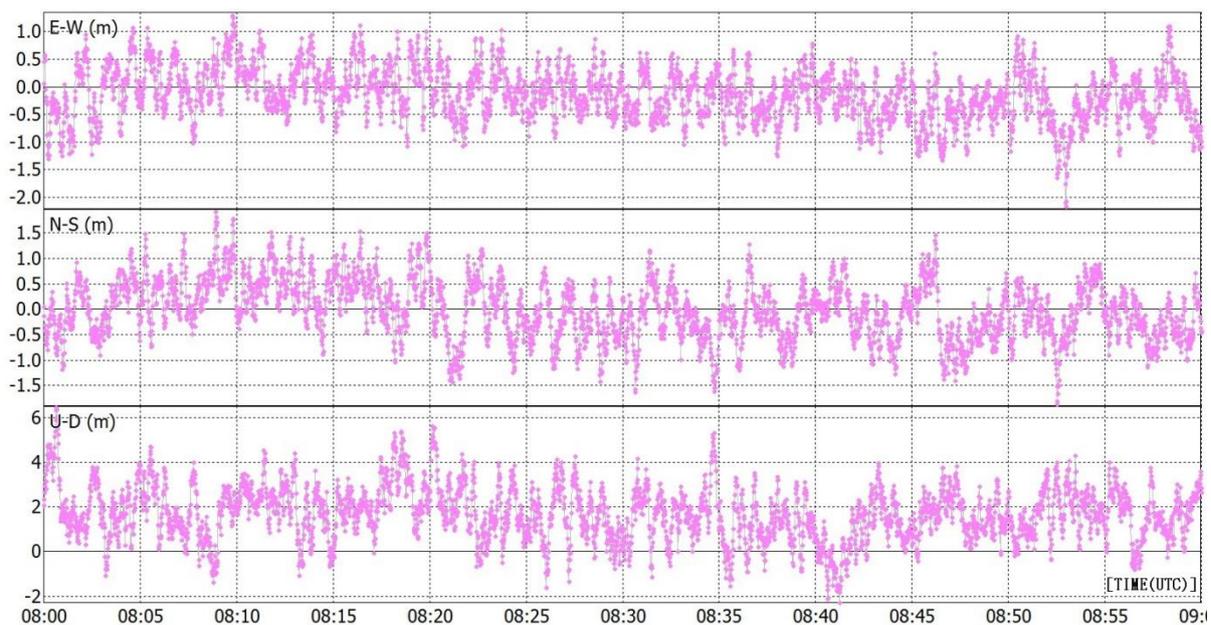


Figure 27 各方向を分けて時系列でプロット 上：東西方向 中：南北方向 下：高さ方向

Point2：観測地

・ RTK 測位による測位結果

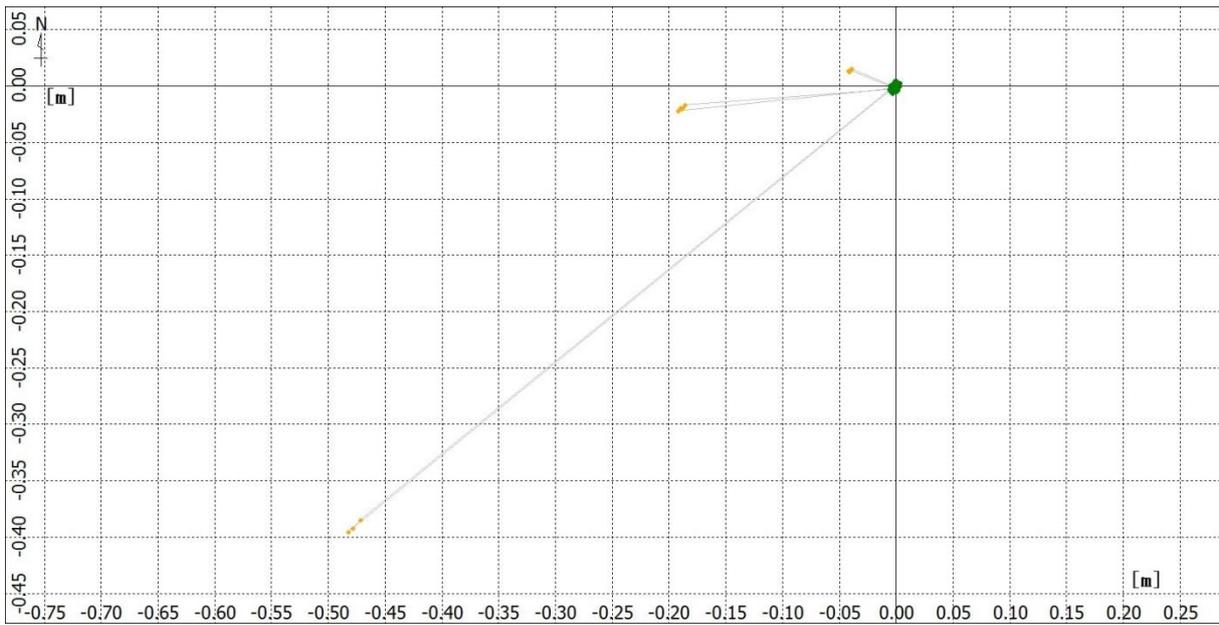


Figure 28 水平方向分布

Point2 : 基準地点、緑 : Fix 解、黄色 : FLOAT 解

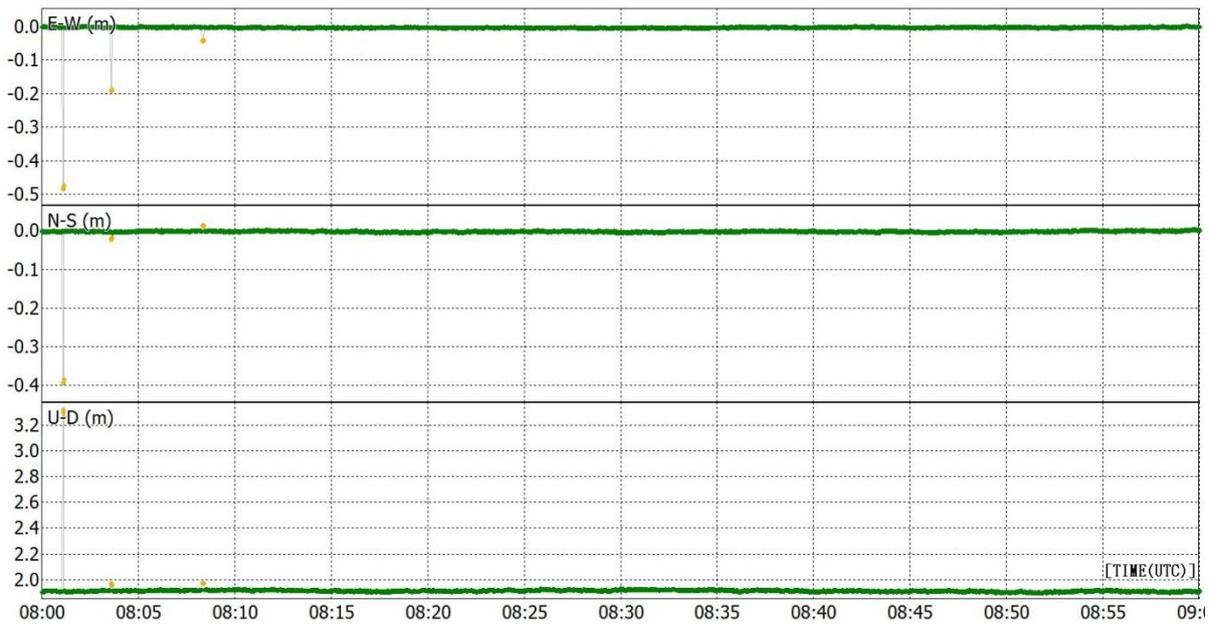


Figure 29 方向別に時系列でプロット 上 : 東西方向 中 : 南北方向 下 : 高さ方向

Point2 : 基準地点、緑 : Fix 解、黄色 : FLOAT 解

< 検証・考察 >

一般に、Fix 解で求められた測位解の精度は 5mm~20mm 程度であり、Float 解での精度は 10cm ~数 m 程度といわれている。よって Fix 率の高さは、精度を表す指標と考えられる。

測位の精度を示す指標の一つとして RMS(Root Mean Square, 二乗の平均の平方根)値があるが、今回観測した場所の真値が未知点であるので精度評価に標準偏差を用いた。

**Table 4 測位精度比較**

	標準偏差			Fix 率
	E-W[cm]	N-S[cm]	U-D[cm]	
DGPS	47.4	57.8	123.0	-----
RTK	1.5	1.1	4.0	99.6(%)

付属のアンテナを使用し操船を行ったと仮定した状態でも、Fix 率 99.6%であった為、小型ボートでも RTK 測位によって精度の高い観測データを集めることができると考えられる。

### 6.3 観測実験 2

実験 1,2 の精度結果から GPS 受信機によって、潮汐の様子が捉えられると仮定し、実験 3 を行う。東京海洋大学のポンド内にて小型ボートを糸で係留した状態で計測を行った。糸の張り具合は数十 cm 動ける程度とし、常に両岸壁の間に船が位置する状態で行った。観測実験 2 と同様に全ての機材は電源が入っている状態で行った。また基準局は前実験と同様のアンテナを使用する。観測時間：2 時間

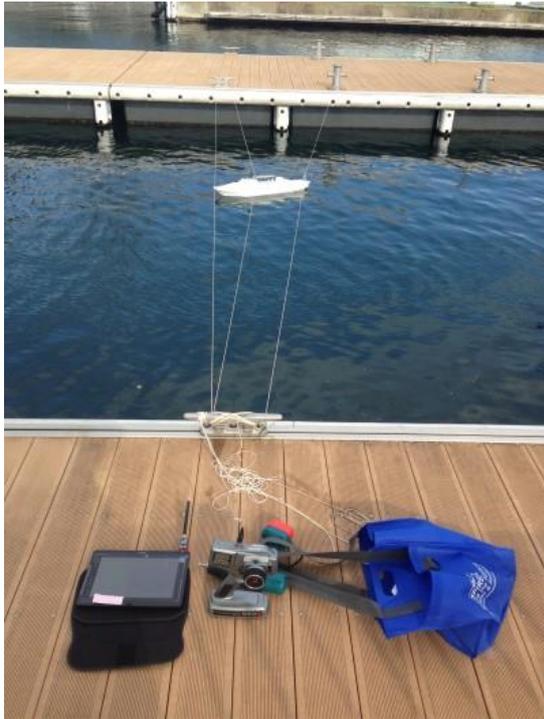


Figure 30 周囲環境 3-1

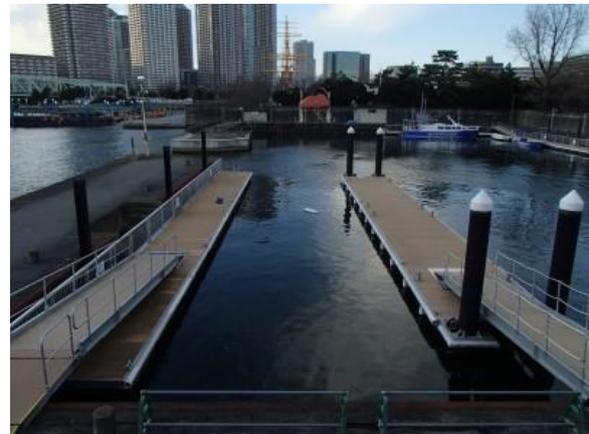


Figure 31 周囲環境 3-2

<解析結果>

グラフの値は観測実験 2 と同様に Point2 が基準となる値を表記することとした。

・ DGPS による測位結果

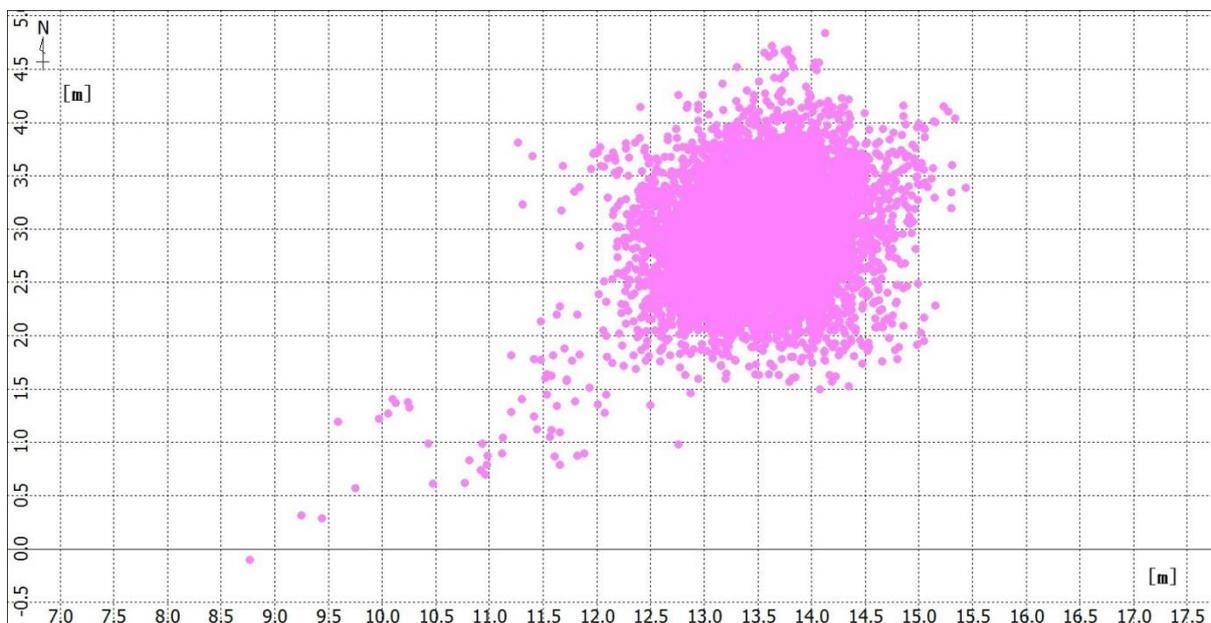


Figure 32 水平方向分布

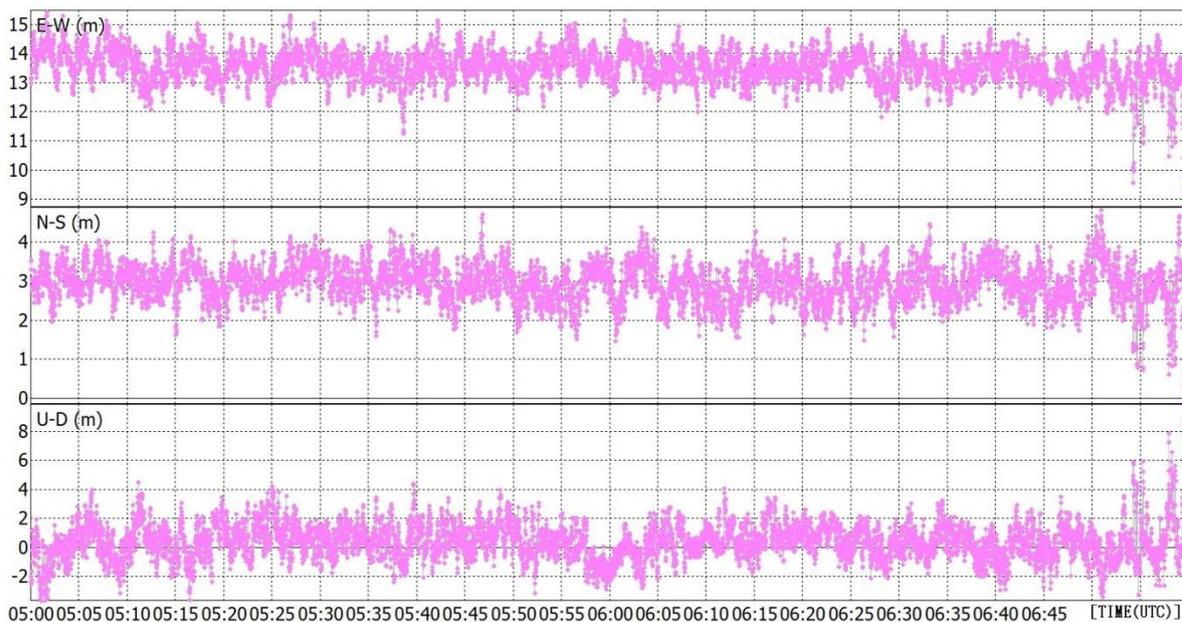


Figure 33 各方向を分けて時系列でプロット 上：東西方向 中：南北方向 下：高さ方向

・ RTK 測位による測位結果

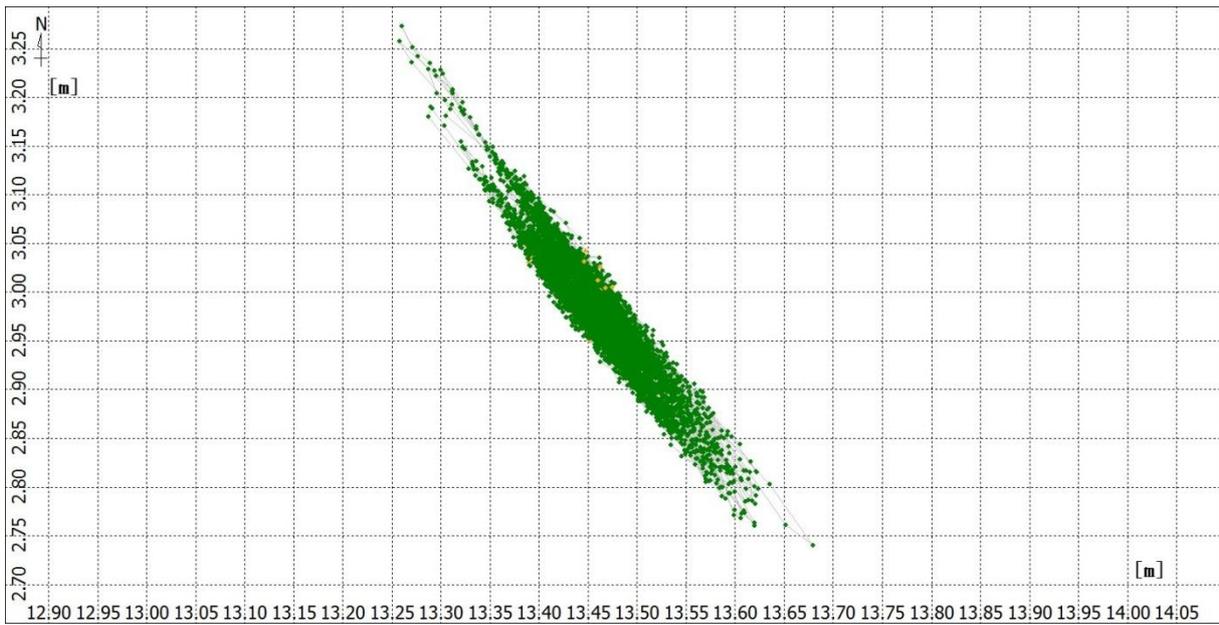


Figure 34 水平方向分布

緑 : Fix 解、黄色 : FLOAT 解

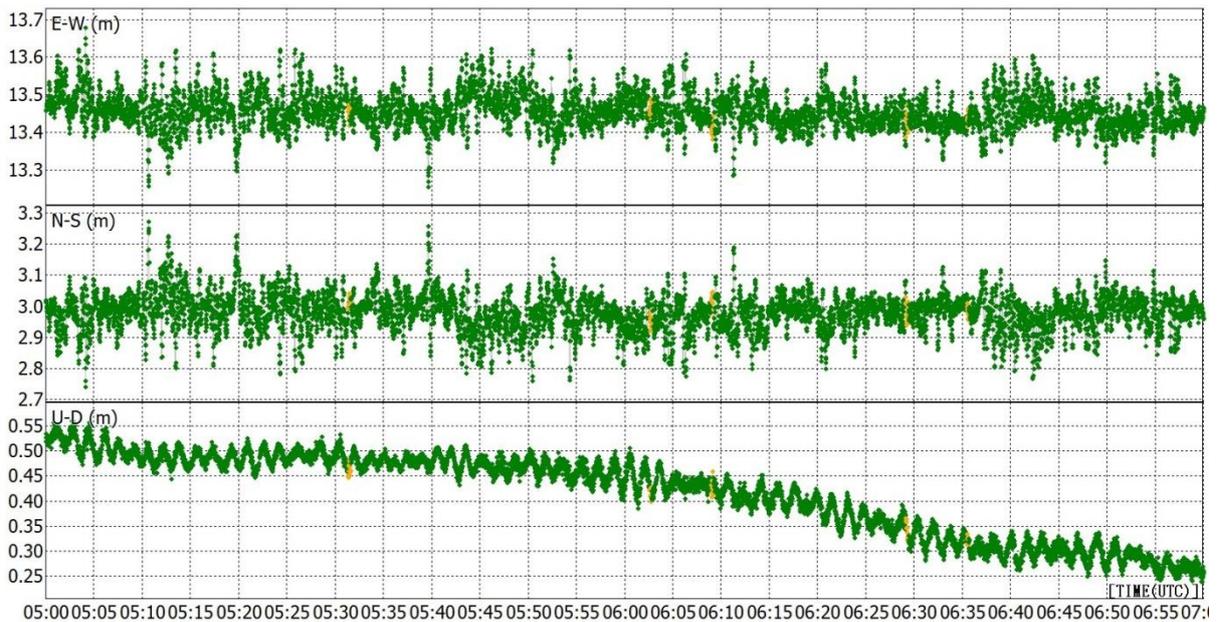


Figure 35 方向別に時系列でプロット 上 : 東西方向 中 : 南北方向 下 : 高さ方向

緑 : Fix 解、黄色 : FLOAT 解

< 検証・考察 >

DGPS と RTK 測位の結果を航空写真上にプロットした。



Figure 36 観測実験 3 航空写真

赤 : DGPS、 黄色 : RTK 測位

対岸の距離は約 7m ある。ボートは両舷を糸で固定している為、船着き場までボートが移動することはない。静止の状態に比べ DGPS の精度が向上することはない、上写真からも視覚的に明らかである。次に、RTK 測位の精度変化について調査を行う。

RTK 測位による Fix 率は 99.1%であったため、ほとんどの観測データは精度の高いものであると考えられる。操船を行わず糸でボートを固定しているので静止状態に近い状態であるが、ボートは海面上にありアンテナ部は動きのある状態である。そのため収集した観測データの精度は、mm 単位ではなく cm 単位で得られると予想される。

今回の観測時間は 2 時間である為潮汐の変動を観測することができたはずである。よって気象庁で観測された潮汐結果と本実験の垂直方向に関する観測データの比較を行う。

今回使用する気象庁の潮汐データは気象庁のホームページから取得したものである。主な詳細を下記に記載する。

所在地	東京都中央区晴海 5 丁目
緯度	35° 39' N
経度	139° 46' E
観測方式	電波式検潮儀
年月日	2015 年 1 月 17 日

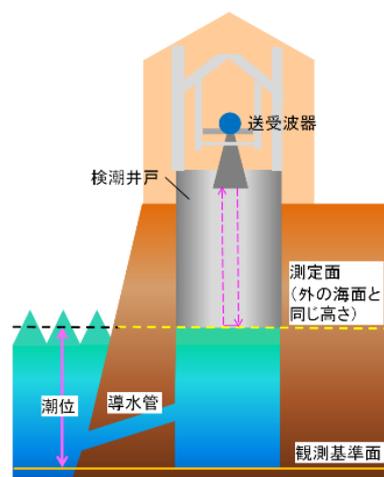


Figure 37 検潮儀

(出典 : 気象庁 HP)

また、今回行った観測地と気象庁が行った観測地の直線距離は約 3km である。

気象庁より公開されている毎時の潮汐データをもとに近似曲線で潮汐の変動を表した。

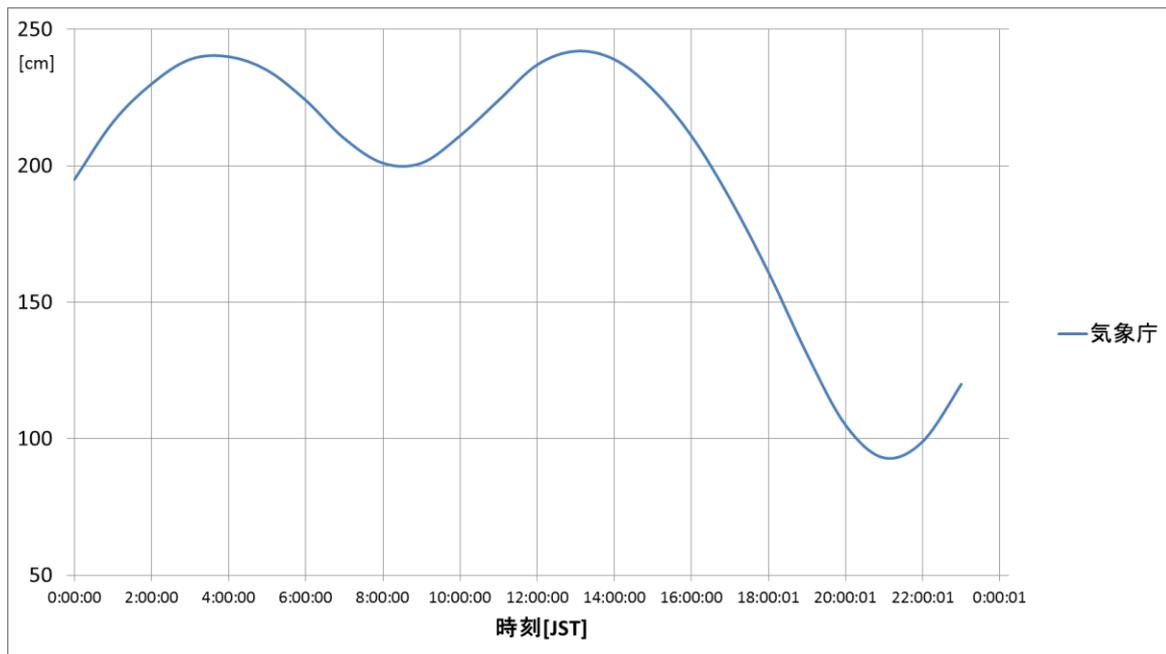


Figure 38 気象庁潮汐

この近似曲線を潮汐の変動のモデルとして、今回計測した垂直方向のデータと比較を行う。

今回計測を行った時刻は日本時 14 時から 16 時である。

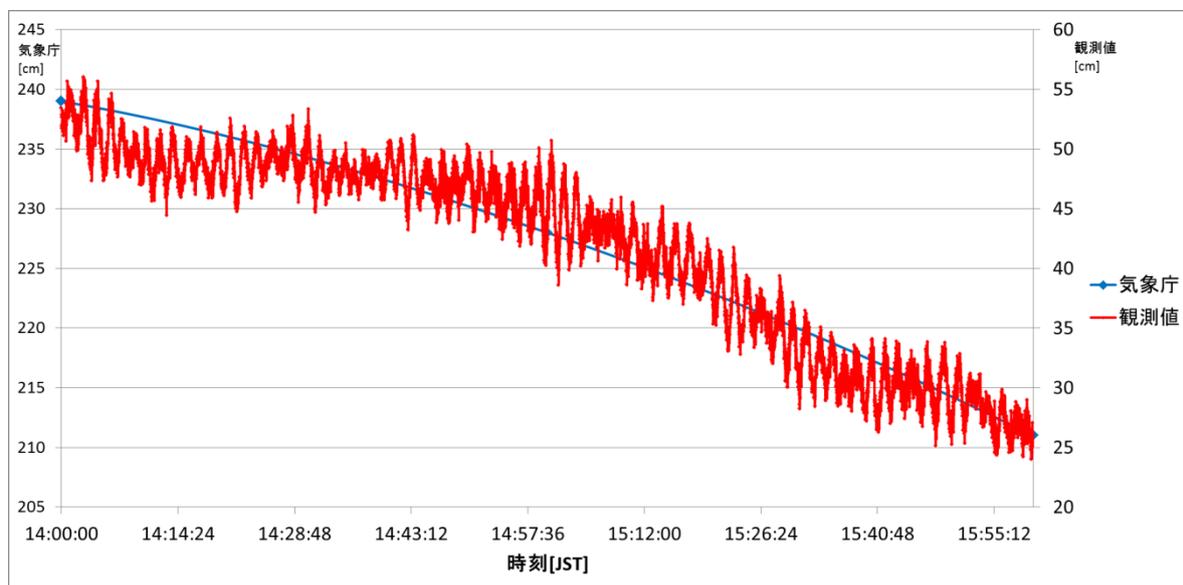


Figure 39 潮汐比較

また、観測開始時刻と終了時刻の差をそれぞれ算出した。

気象庁データ -28[cm]

観測データ -27.42[cm]

上記検証結果より、RTK 測位を用いた解析によって cm 単位で真値が表せていると示された。

僅かであるが動きのある観測点でも RTK 測位は精度を維持した結果が得られた。

本実験の RTK 測位は、GPS、QZSS、BeiDou を用いた。一般に、衛星数が増えれば、測位の精度は良くなるといわれている。GPS のみで RTK 測位を行った場合と比較を行った。

	Fix 率	衛星数
GPS+QZSS+BeiDou	99.1 %	14 ~16
GPS	95.5 %	6 ~7

Fix 率の低下は確実に表れる結果となった。

特に測位開始から約 5 分間に FLOAT 解は集中し、アンビギュイティの決定に時間がかかった様子が表れた。今回の RTKLIB の設定は Continuous を用いている、実験 3 では Instantaneous を用いるので Fix 率の低下が顕著に表れると考えられる。

#### 6.4 観測実験3

ポンド内で小型ボートをマニュアル操船による航行で観測を行った。

走行時間は約8分間である。ポンド内を時計回りに始め走行し、スタートの位置に戻ってきた後反時計回りに走行しスタート位置に戻る。

今結果は、以下の座標(Point3)を基準とした値をプロットした。Point3はボートの操船開始位置である。

上記実験と同様に高さ方向は、Point3のジオイド高を基準とした標高の値が出力される。

Point3	緯度	35.666439595
	経度	139.791393900
	ジオイド高	36.4666

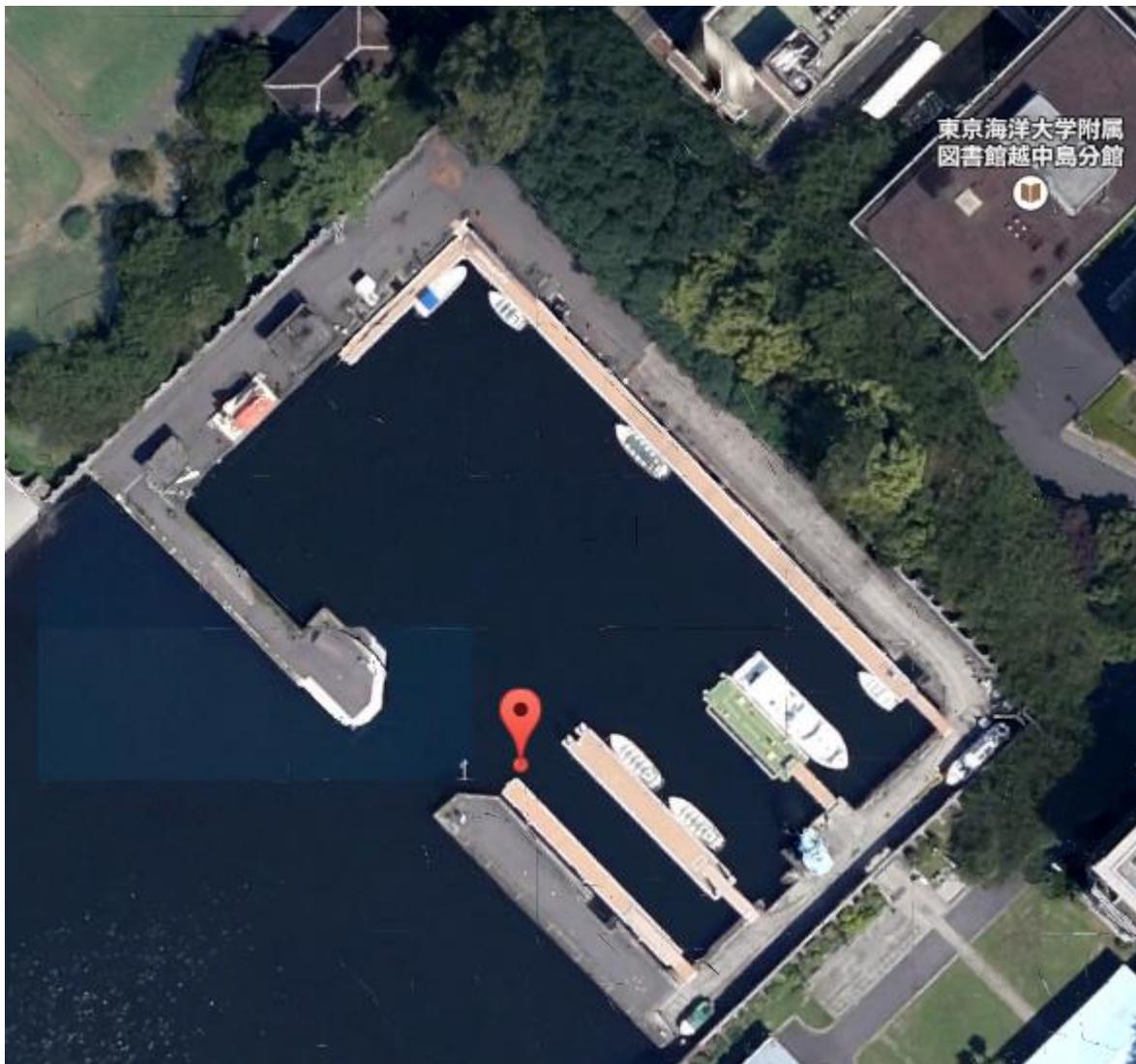


Figure 40 Point3 航空写真

<解析結果>

・DGPSによる測位結果

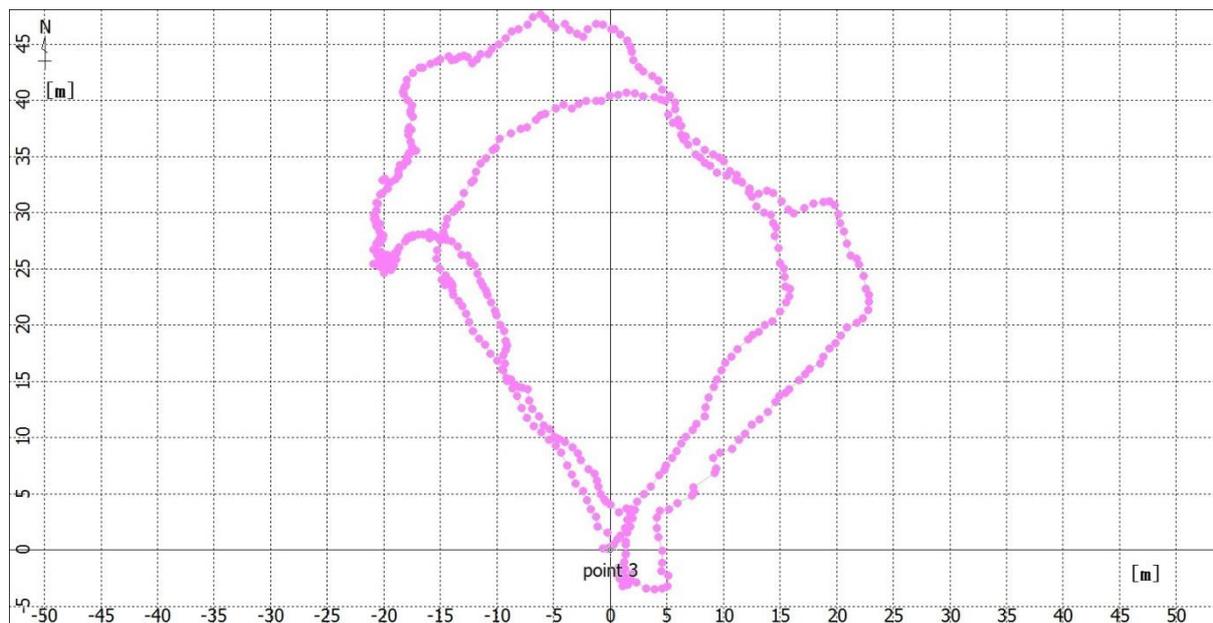


Figure 41 水平方向分布

Point3 : 基準地点

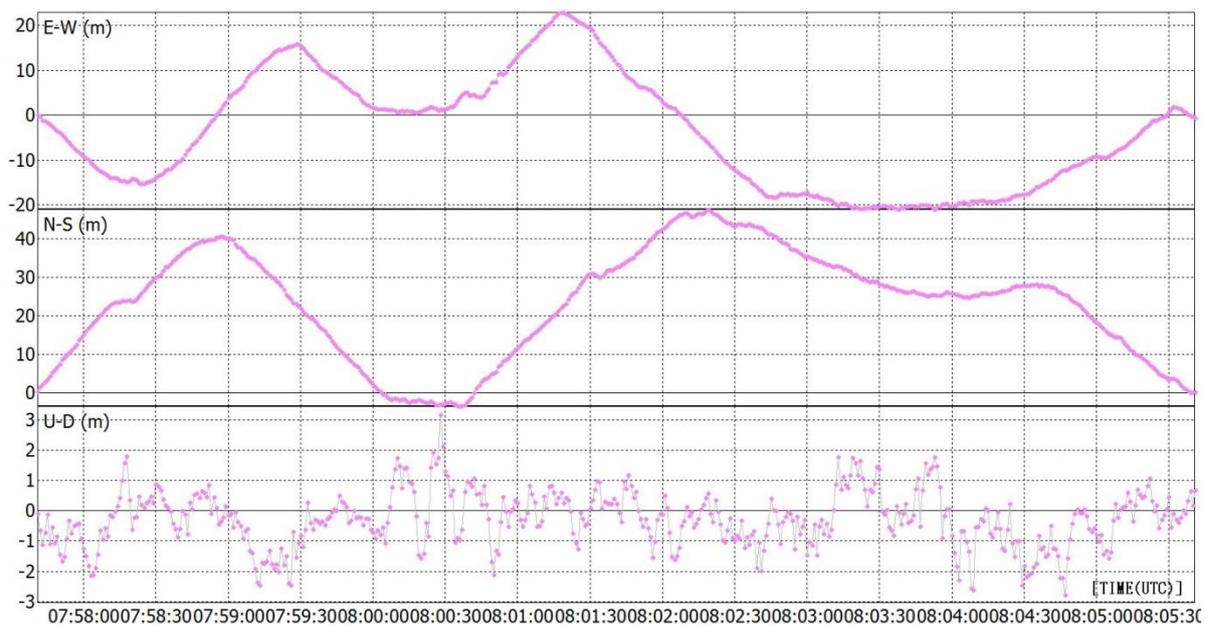


Figure 42 方向別に時系列でプロット 上：東西方向 中：南北方向 下：高さ方向

Point3 : 基準地点

・ RTK 測位による測位結果

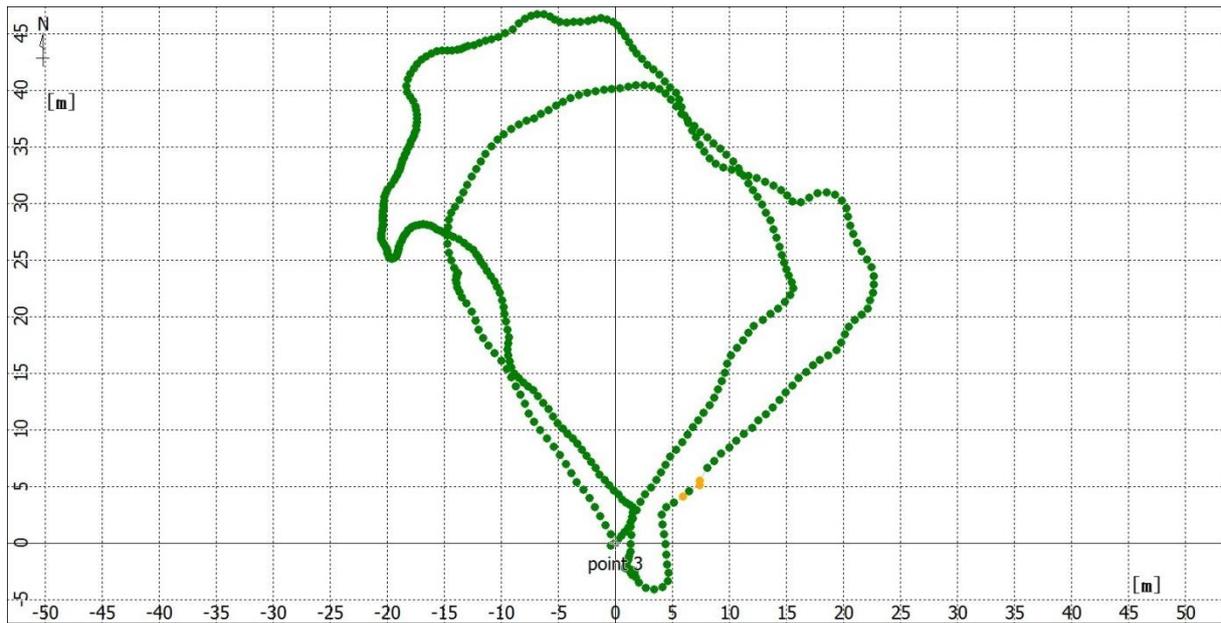


Figure 43 水平方向分布

Point3 : 基準地点、緑 : Fix 解、黄色 : FLOAT 解

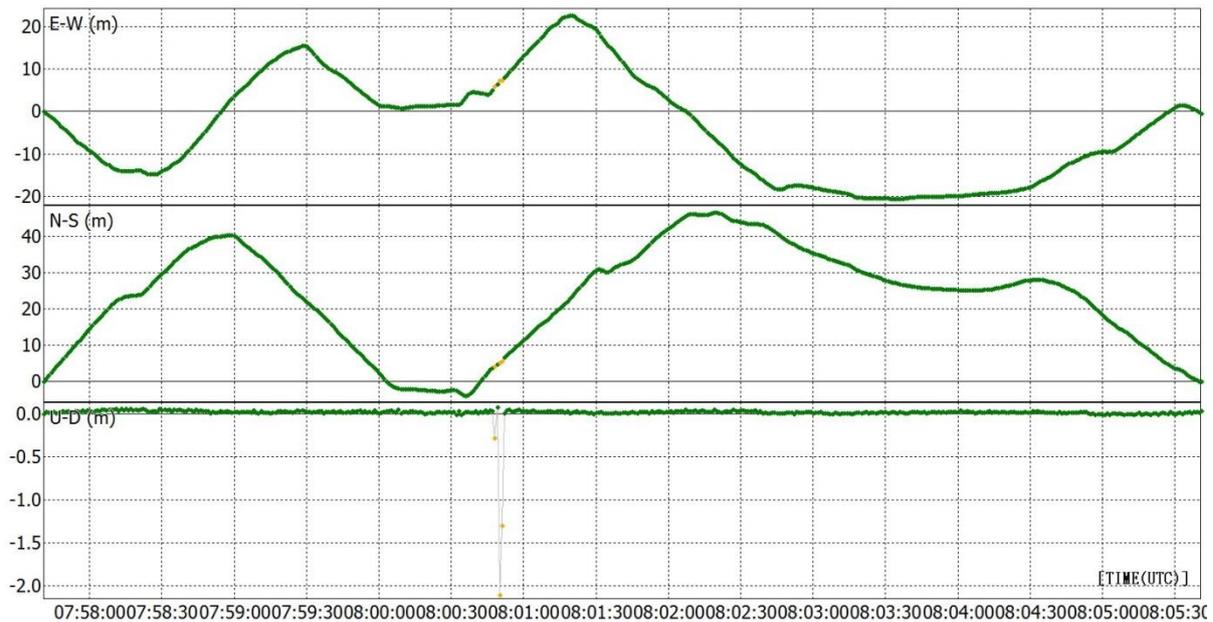


Figure 44 方向別に時系列でプロット 上 : 東西方向 中 : 南北方向 下 : 高さ方向

Point3 : 基準地点、緑 : Fix 解、黄色 : FLOAT 解

・ DGPS と RTK 測位の結果を重ね合わせた

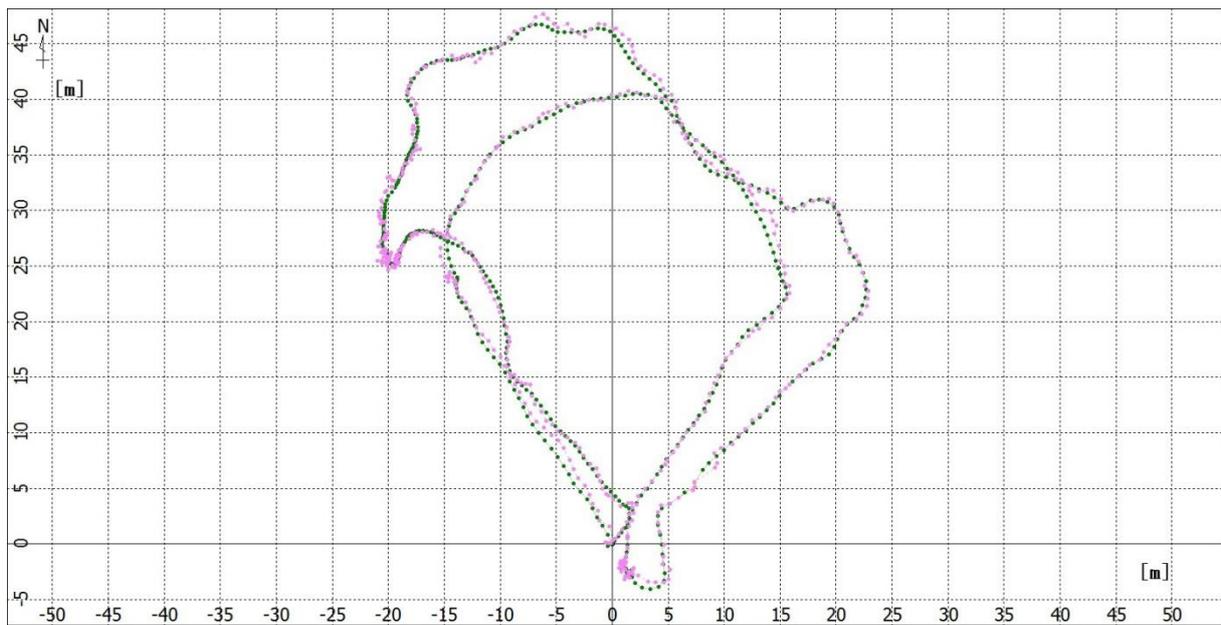


Figure 45 水平方向分布

Point3 : 基準地点、緑 : Fix 解、黄色 : FLOAT 解、ピンク : DGPS

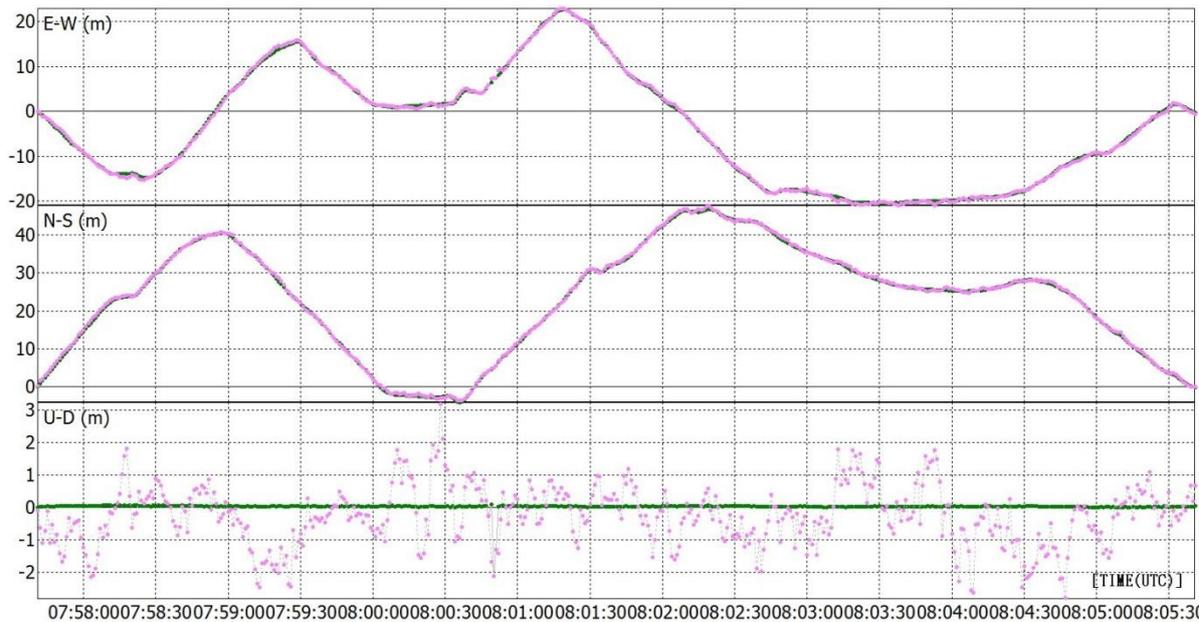


Figure 46 方向別に時系列でプロット 上 : 東西方向 中 : 南北方向 下 : 高さ方向

Point3 : 基準地点、緑 : Fix 解、黄色 : FLOAT 解、ピンク : DGPS



Figure 47 写真上での水平方向分布

黄色 : RTK 測位、 赤 : DGPS

< 検証・考察 >

RTK 測位の Fix 率は 99.4%であった。また今までの観測実験から RTK 測位によって得られた測位結果は非常に精度の高いものであった為、RTK 測位の結果をボートが実際に航行を行った真値として扱う。

[A]と[B]の位置について拡大を行う。

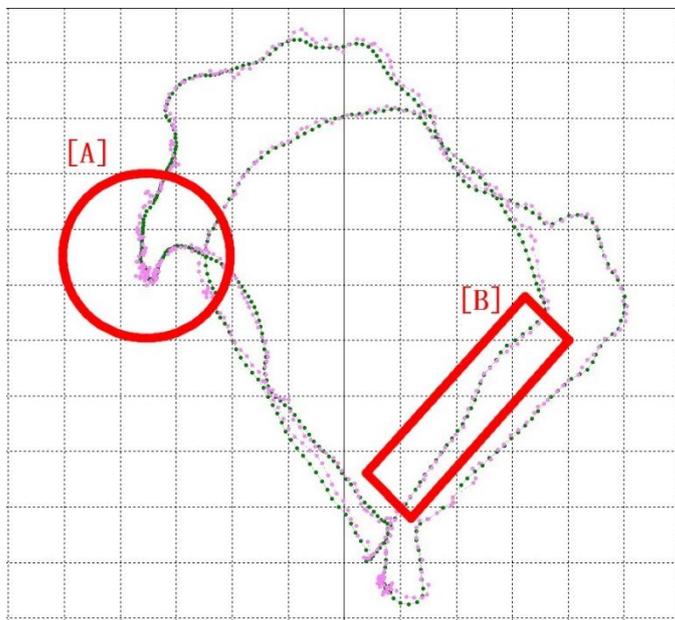


Figure 48 検証 4

緑 : RTK 測位、 ピンク : DGPS

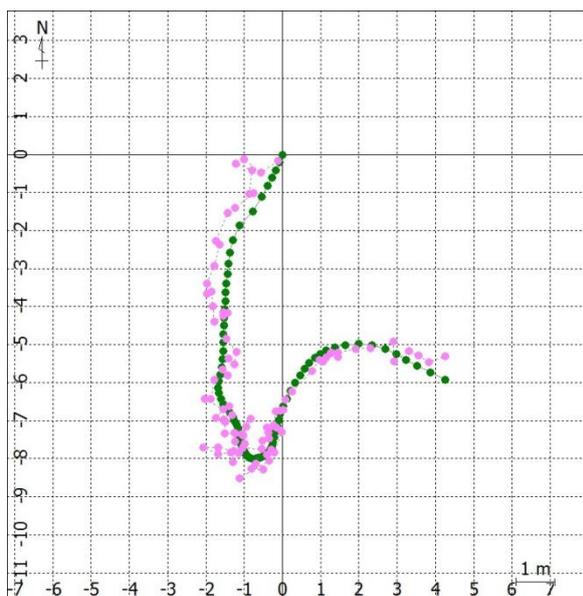


Figure 49 検証 4-A

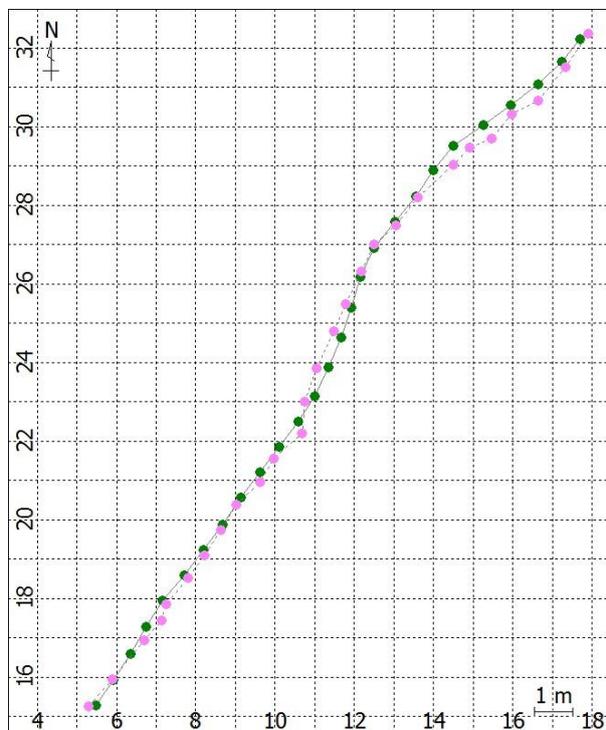


Figure 50 検証 4-B

緑 : RTK 測位、 ピンク : DGPS

[A]はボートが減速や進路変更を行い、[B]では主に直線的な走行のときである。[B]においては、測位精度に差があるが、ボートが安定して一定方向に進んでいる事がどちらの測位結果でも読み取ることができる。

下図は時系列ごとに[A]の測位結果をつなぎ合わせたものである。

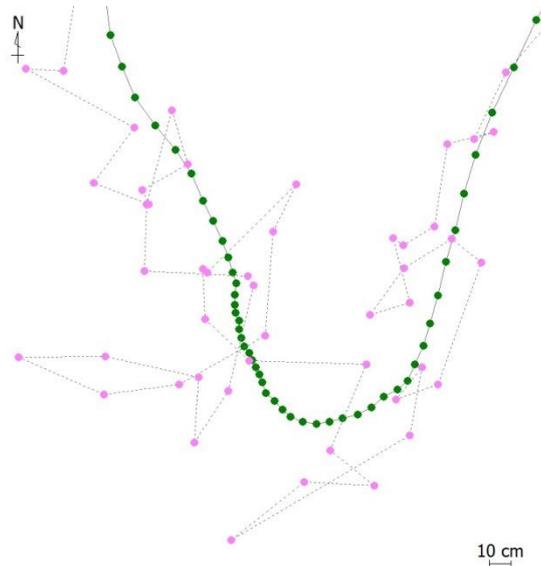


Figure 51 検証 4-A 細部

緑 : RTK 測位、 ピンク : DGPS

RTK 測位による結果はなめらかな 1 本の曲線を描いたが、DGPS では、直線をつなぎ合わせた折れ線状であった。よって、DGPS では変針の様子がわかり辛く、RTK 測位は DGPS と比較すると明らかに変針の様子がわかりやすい。RTK 測位の結果を用いれば加速度センサの役割に近い、向きの変化を利用できると考えられる。今回はボートという移動体を利用した為、向きの変化を測位位置の変化から視覚的にとらえることができた。しかし、その場で回頭を行う移動体に対しては、向きの変化をとらえることは難しいと予想される。

Float 解による測位結果が表れた周囲の状況について調査を行ったところ、船着き場に非常に近い場所で高さのある障害物があった。



Figure 52 Float 解周辺

GPS 受信機は衛星を用いた航法センサであり、当然ながら受信部付近また上空は開けた環境が望

ましい。よって今回のこの結果はこの障害物の影響が大きいと予想される。今回用いた小型ボートは他の小型船舶にくらべ非常に背丈が低いものである。そのため、対岸付近や防波堤付近での観測は、正確な観測を行えない可能性が考えられる。

実験 2 と同様に GPS のみで行った RTK 測位との Fix 率を比較する。

	Fix 率	衛星数 (障害物下以外)
GPS+QZSS+BeiDou	99.4 %	15,16
GPS	29.7 %	7

実験 2 に比べ Fix 率の差がはっきりと表れた。

## 6.5 考察

普及型 1 周波受信機間で RTK 測位を行い、cm 単位で観測を行うことができると実験から結果が得られた。陸地では、安定した足場があるため、アンテナを固定し長時間の観測結果によって真値を得ることができた。しかし、海洋環境では当然ながら海の上である為安定した足場がない。そのため真値を得ることが難しかった。本実験から、RTK 測位を用いることによって、海洋環境でも容易に真値を得ることができると示された。また同時に観測実験 4 の結果から問題も発見された。都市部では、トンネルや屋根のある環境、ビルといった高さのある構造物が多数存在するのに対し、海洋環境では上空を遮る環境が少ない。ただし全くないわけではなく、例えば橋の下といった一時的に上空を遮る環境が存在する。観測実験 4 でも述べたが今回用いたボートは受信部の位置が非常に海面に近い。調査や観測では海岸付近で使用されることも考えられ、防波堤付近での観測結果では Fix 率が低下し精度が悪くなると予想される。よって防波堤付近、海岸付近での調査が新たに必要と考えられる結果であった。

## 7章 総括

今回行った自律航行は、長期間の自動運航を目的とした誘導プログラムである。そのため、この誘導制御が長期運航にどう影響してくるかを評価する必要がある。長期の運航を実現するため考えられる点の1つとして動力の影響がある。例えば、無駄な軌道を描く誘導は、運航時間が増え消費されるエネルギーも増える。本実験で使用したボートの動力源は電池であった。そのため誘導プログラムごとに消費電力を示すことで、プログラムの改善を考えることができると考えられる。よって、今後は電源と制御装置間の回路に電力計モジュールを組み込み、得られた計測結果を用いた誘導プログラムの検証方法が必要と予想される。

海上における普及型1周波受信機を用いたRTK測位の精度を今回の実験で示すことができた。これにより、真値を得ることが難しい環境でも真値を得る手段を示せたと考えられる。今回は海上行ったが、例えば空中での真値を得る方法の1つに応用ができないかと考えられる。使用している小型ボートでは、航法の情報としてDGPSによる測位結果を用いて行ってきたが、より精度の高いRTK測位で自律航行を行えばより良い誘導が行えると考えられる。本実験では、後処理による測位であるがこれをリアルタイムで行い、この測位結果を用いたシステムを小型ボートに組み込むことが今後の課題としてあげられる。

## 参考文献等

GPS のための実用プログラミング 著 坂井丈泰

気象庁ホームページ(<http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/suisan/> /2015/01/24 アクセス)

高須 知二 RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning

(<http://www.rtklib.com/> /2015/01/18 アクセス)

MUNIN Project web page(<http://www.unmanned-ship.org/munin/> /2015/01/24 アクセス)

Sail drone Inc. web page(<http://www.saildrone.com/> /2015/01/24 アクセス)