



USV(無人水上艇)による 深淺測量と自動操船技術

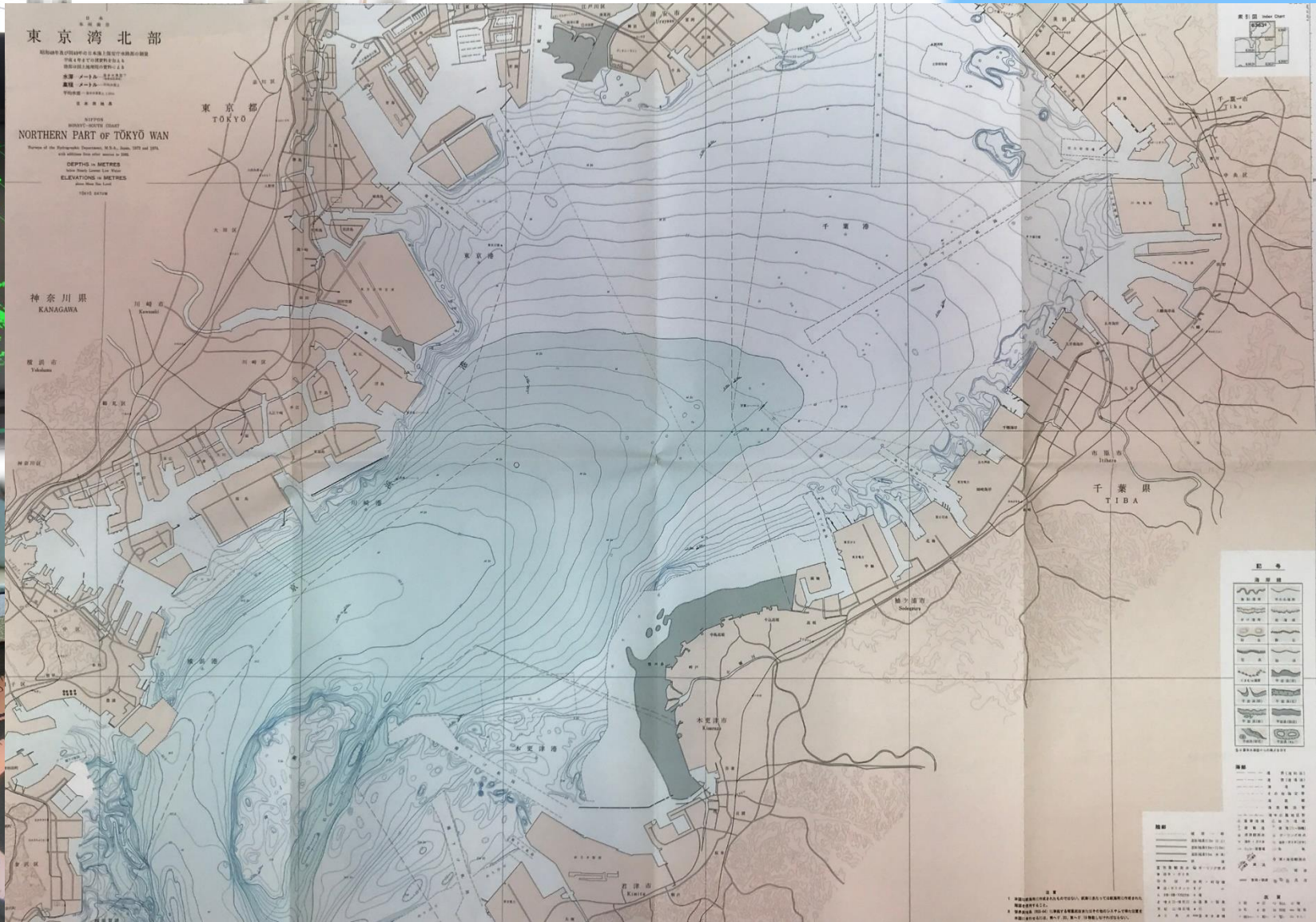
東京海洋大学 海洋工学部 海事システム工学科

細見 巧

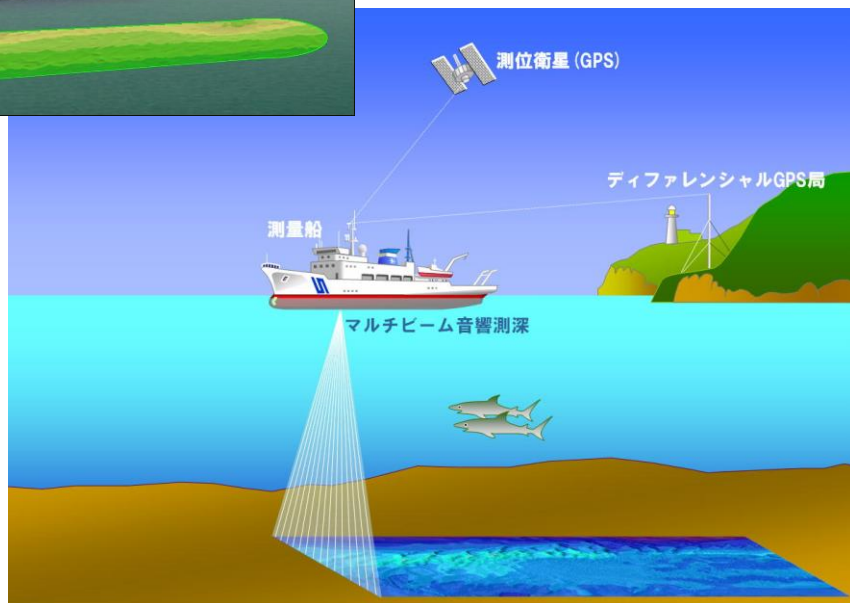
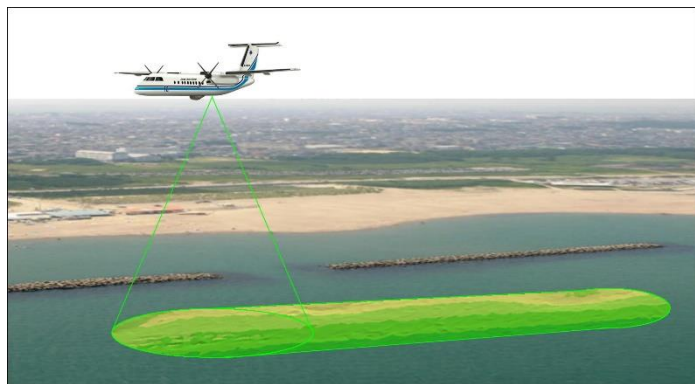
指導教員： 久保 信明 准教授



1. 背景



1. 背景 深浅測量



深浅測量イメージ図

海上保安庁海洋情報部



昭洋(3,000t)



拓洋(2,400t)



明洋(550t)



天洋(550t)



海洋(550t)



じんべい(5t)

東京港建設事務所



たんかい(32t)

千葉港港湾事務所



あいりす(18t)

河口部など海底地形が頻繁に変わる海域ほど水深データの逐次更新が必要

1. 背景 船舶の小型・自動化

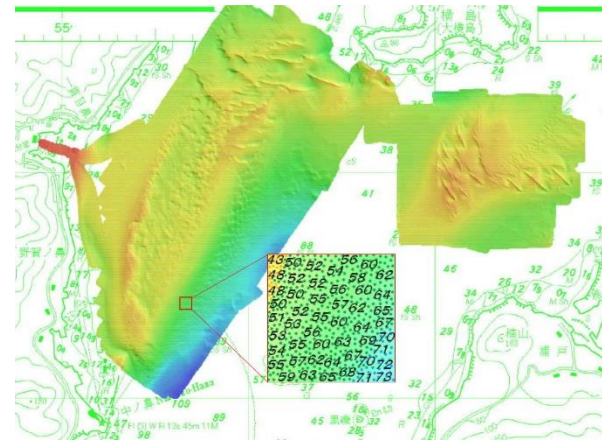


設備の大型化
人件費
乗組員の安全性



人件費削減
安全な場所からの操船
少人数運用

2. 目的

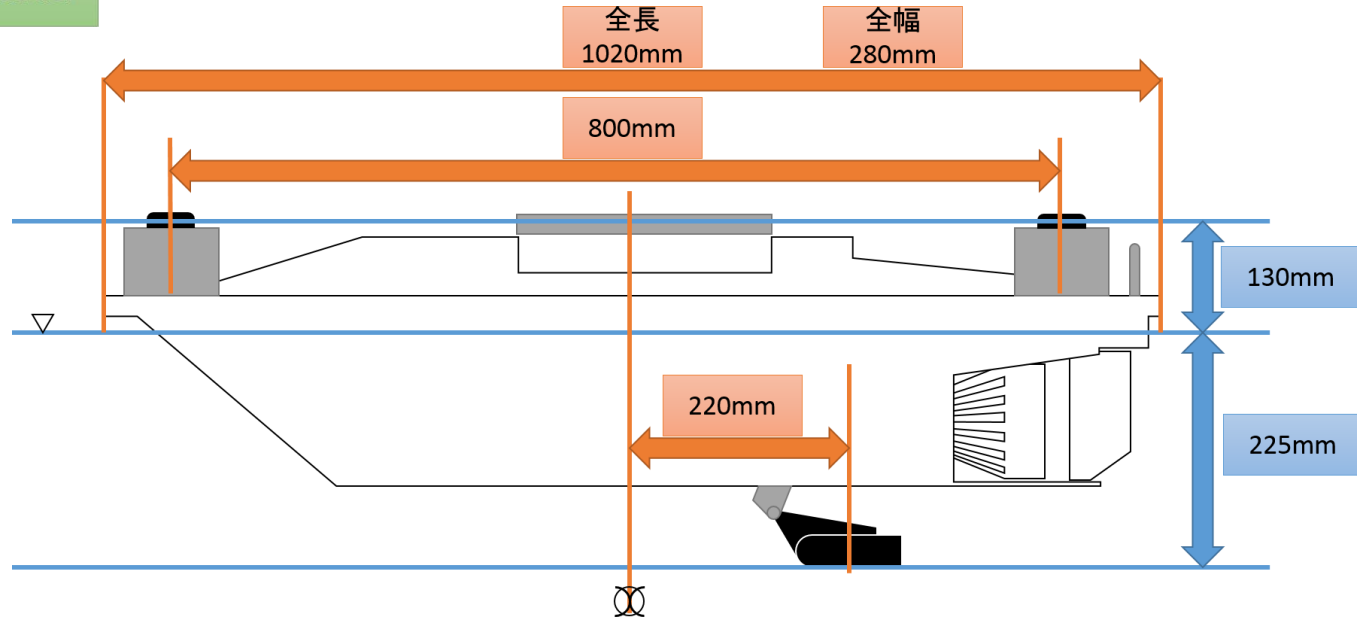
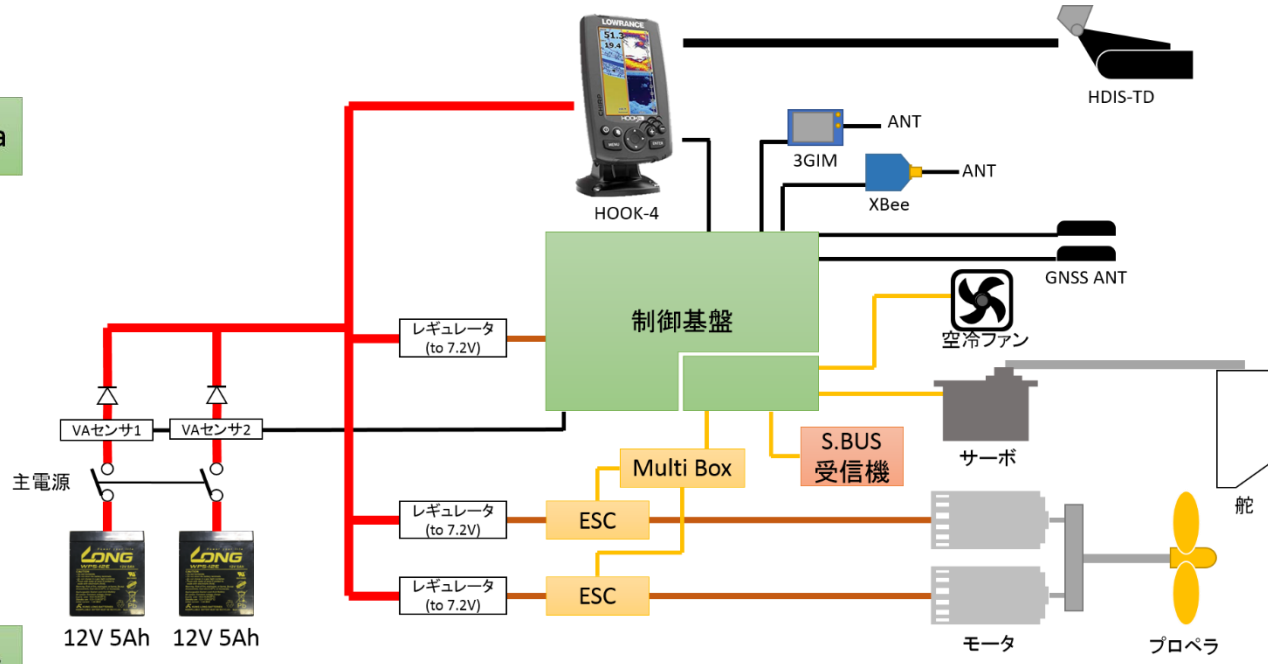
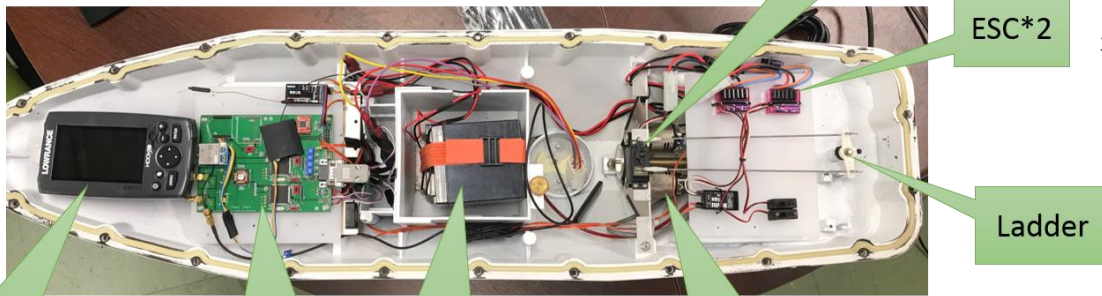


深淺測量の効率化
小型船の自動化・自律化



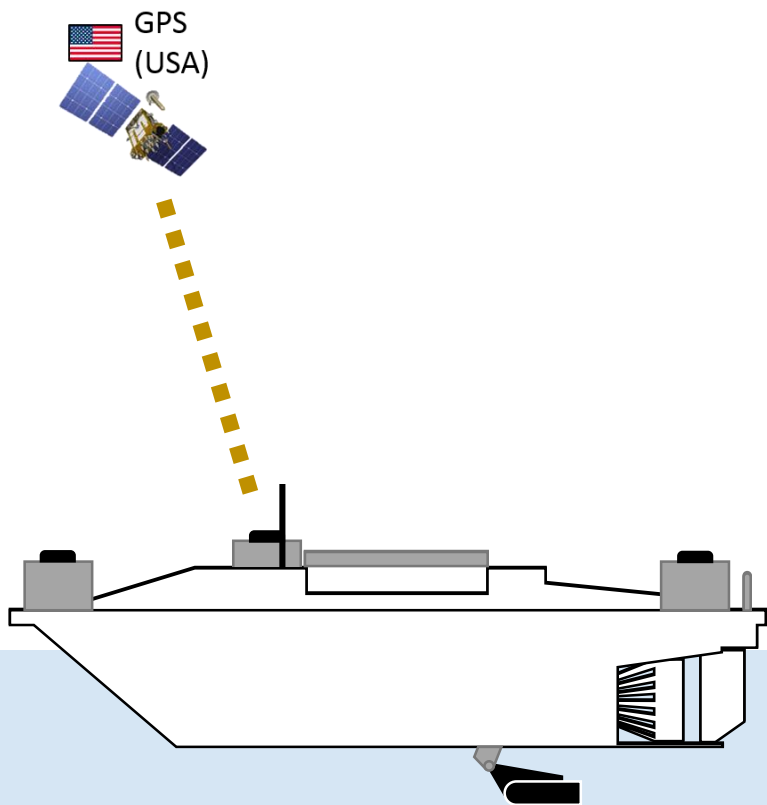
USVによる深淺測量

3. 筐体 RC-S2



| | |
|--------|------------|
| 巡航速力 | 2knots |
| 最大速力 | 3knots |
| 連続航行時間 | 1.5時間(巡航時) |
| 通信距離 | 800m |

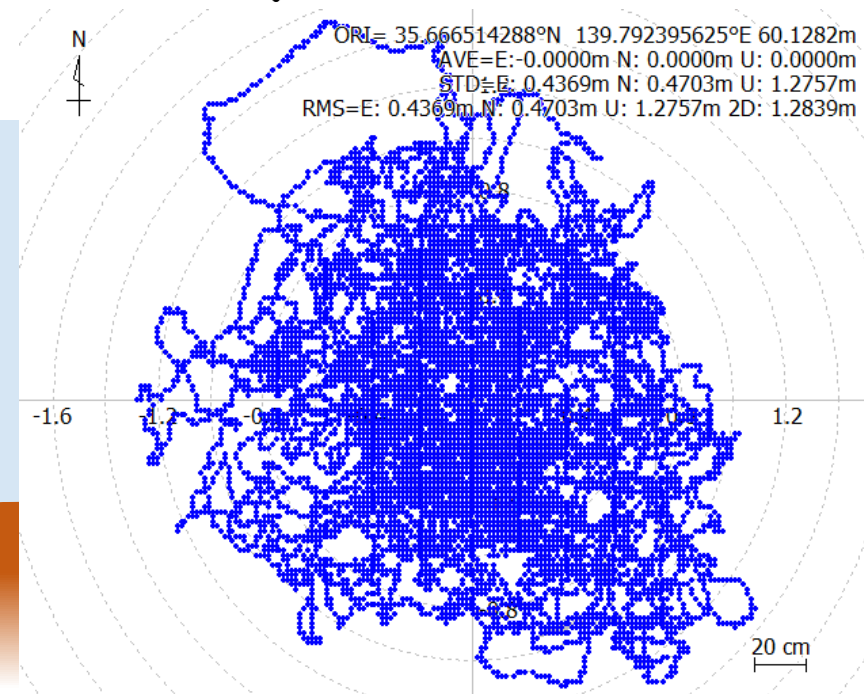
過去の研究



- GNSS受信機 ublox社EVK-M6H
- その他センサ なし
- CPU ルネサスエレクトロニクス社H8S/2638F
- 測位方式 SBAS測位
- 観測周期 2Hz

出力情報

- 現在位置
- 対地方位
- 対地速度



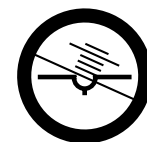
今回の研究



- GNSS受信機 ublox社NEO-M8P
- その他センサ Xsens社Mti-1, ROWLANCE社HOOK-4
- CPU ルネサスエレクトロニクス社SH2A7216
- 測位方式 RTK測位
- 観測周期 5Hz

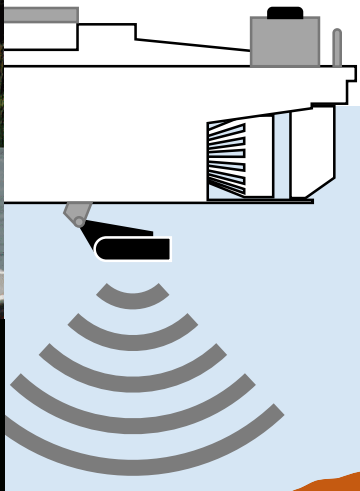
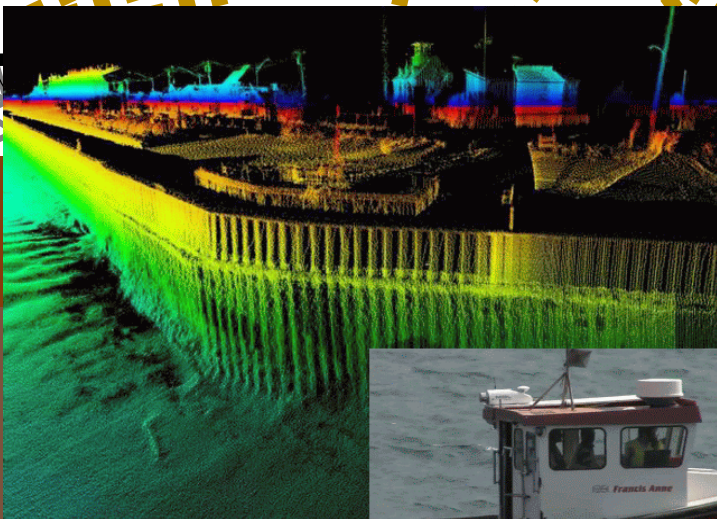
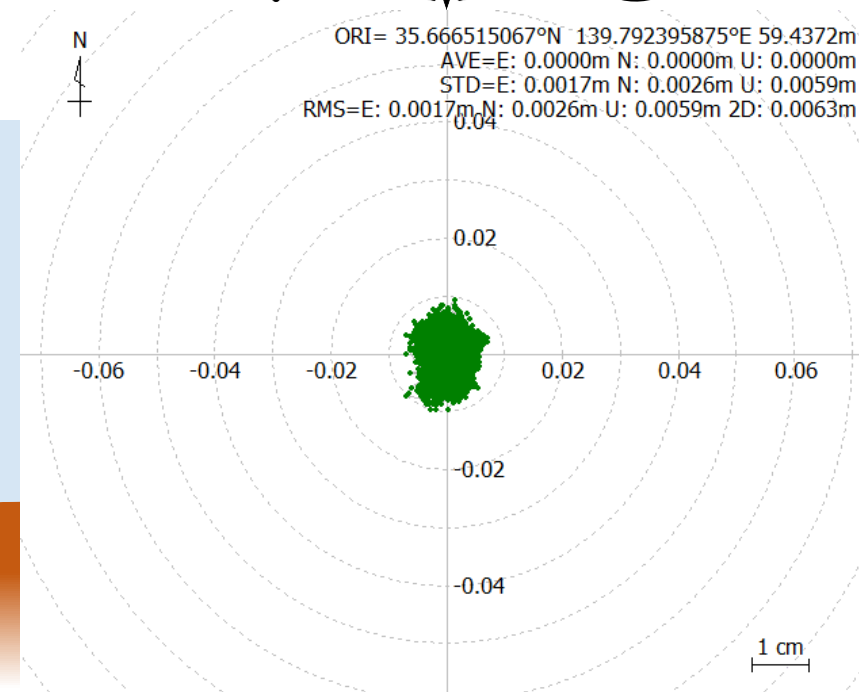
出力情報

- 現在位置
- 対地方位
- 対地速力
- 船首方位
- 水深
- 船体姿勢



N
4
+

ORI= 35.666515067°N 139.792395875°E 59.4372m
 AVE=E: 0.0000m N: 0.0000m U: 0.0000m
 STD=E: 0.0017m N: 0.0026m U: 0.0059m
 RMS=E: 0.0017m N: 0.0026m U: 0.0059m 2D: 0.0063m



WGS84(φ, λ, h) \Leftrightarrow ECEF(X, Y, Z) 座標変換

WGS84からECEFへの変換式

$$\begin{aligned} X &= (N + h) * \cos\varphi * \cos\lambda \\ Y &= (N + h) * \cos\varphi * \sin\lambda \\ Z &= \{N(1 - e^2) + h\} * \sin\varphi \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned} N &= \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 * \sin^2\varphi}} \\ e^2 &= 2f - f^2 \end{aligned}$$

赤道面平均半径

$$a = 6378137$$

扁平率

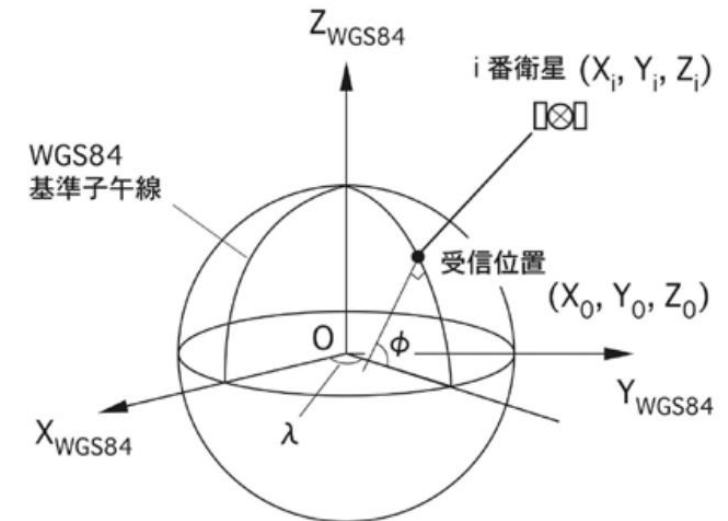
$$f = 1/298.257223563$$

ECEFからWGS84への変換式

$$\begin{aligned} \varphi &= \tan^{-1} \frac{Z + e'^2 * b * \sin^3\theta}{p - e^2 * a * \cos^3\theta} \\ \lambda &= \tan^{-1} \frac{Y}{X} \\ h &= \frac{p}{\cos\varphi} - N \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned} p &= \sqrt{X^2 + Y^2} \\ \theta &= \tan^{-1} \frac{Za}{pb} \\ e^2 &= \frac{a^2 - b^2}{a^2} \\ e'^2 &= \frac{a^2 - b^2}{b^2} \end{aligned}$$



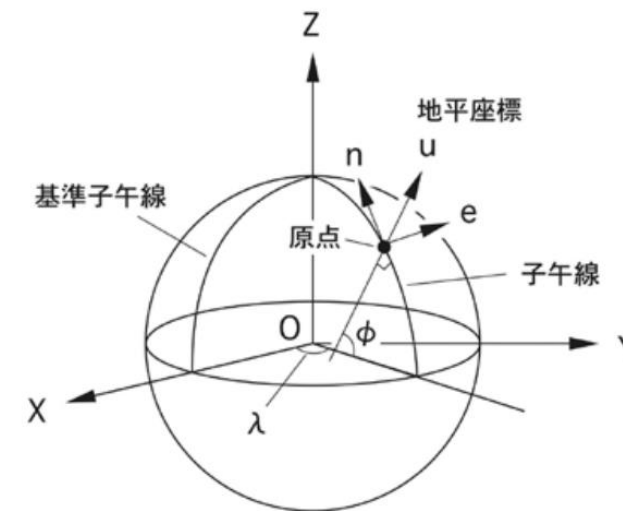


ECEF(X_0, Y_0, Z_0)(X_1, Y_1, Z_1)を使ったENU算出

(X_0, Y_0, Z_0)から見た(X_1, Y_1, Z_1)のENU(East, North, Up)は次式によって表すことができる。

$$\begin{pmatrix} E \\ N \\ U \end{pmatrix} = R(z, 90)R(y, 90 - \varphi)R(z, \lambda) \begin{pmatrix} X_1 - X_0 \\ Y_1 - Y_0 \\ Z_1 - Z_0 \end{pmatrix}$$

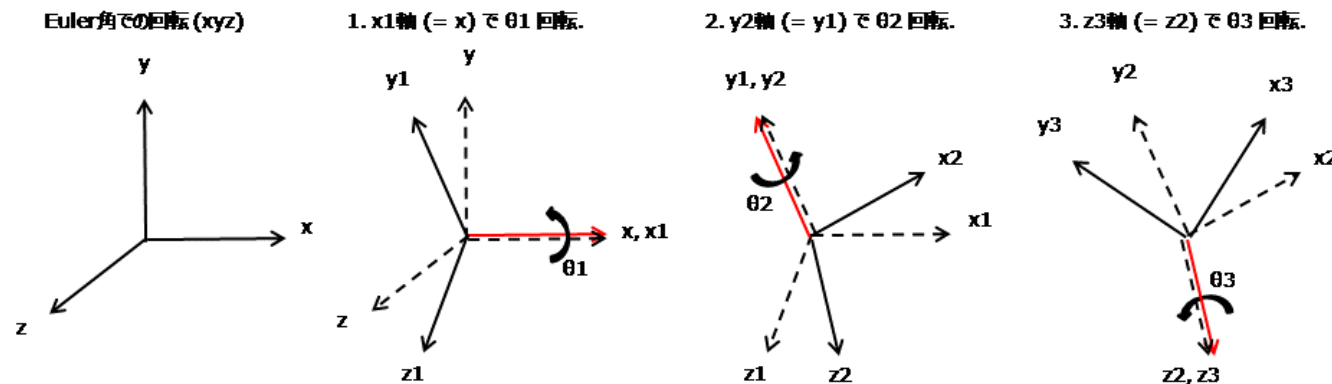
ここで、(φ, λ)は(X_0, Y_0, Z_0)の緯度及び経度である。



$$R(x, \theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$$

$$R(y, \theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix}$$

$$R(z, \theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



3. NMEAによる方位算出

GNSS1の $(\varphi_1, \lambda_1, h_1)$ からECEF (X_1, Y_1, Z_1) に変換

諸計算により導出(直交座標変換)

GNSS2の $(\varphi_2, \lambda_2, h_2)$ からECEF (X_2, Y_2, Z_2) に変換

諸計算により導出(直交座標変換)

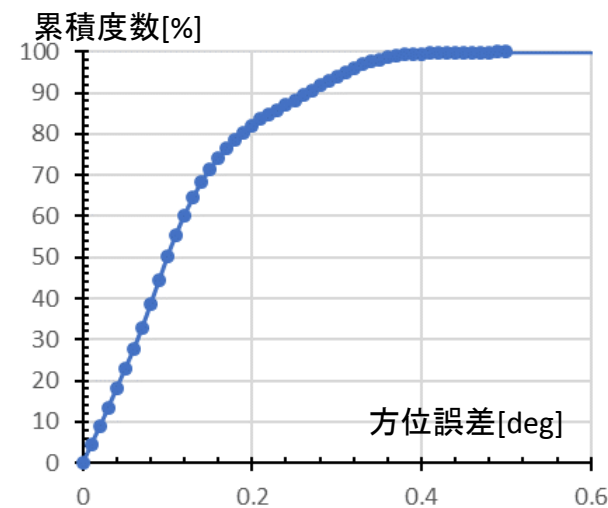
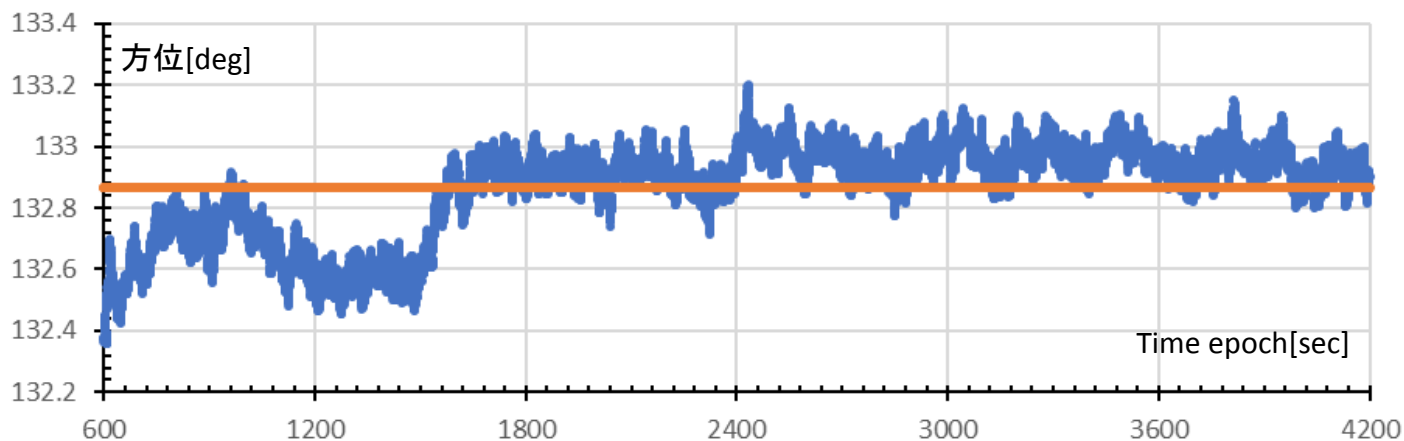
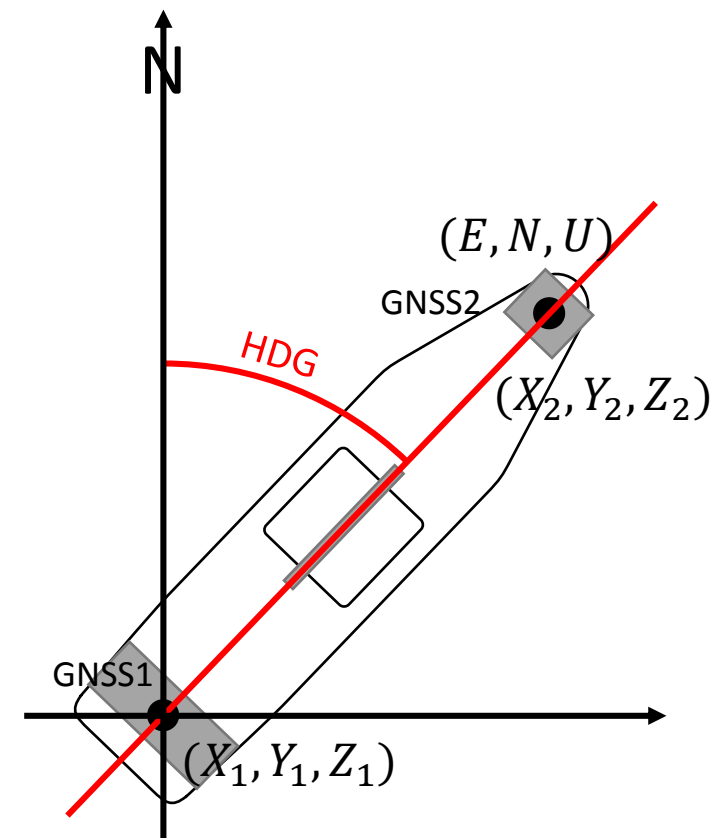
(X_1, Y_1, Z_1) から見た (X_2, Y_2, Z_2) の (E, N, U) を求める

諸計算により導出(地平座標変換)

• 方位算出

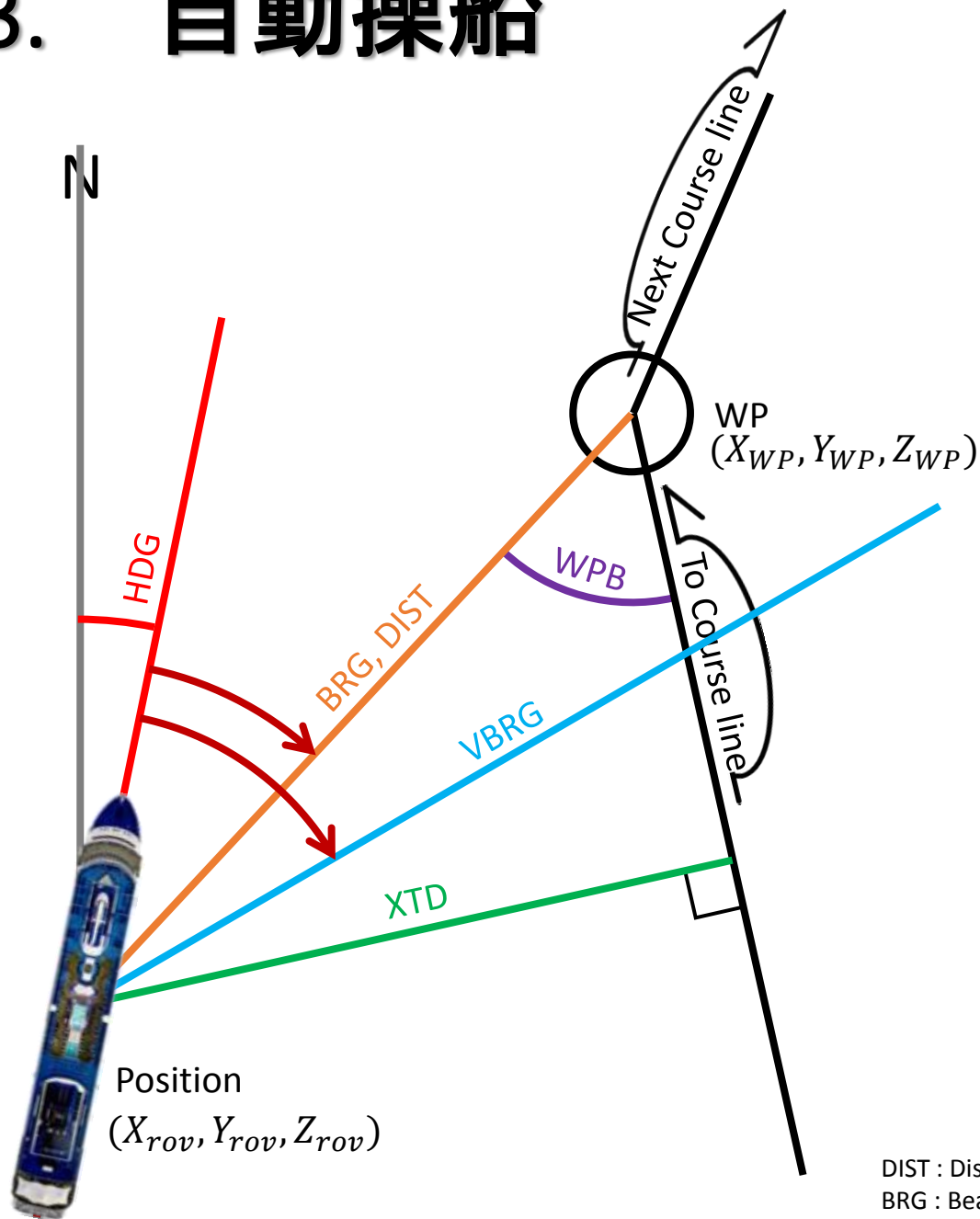
$$HDG = \text{atan2}(E, N)$$

$$(000.0 \leq HDG \leq 359.9)$$



| RMS | 単位[deg] |
|------------|---------|
| 1 σ | 0.14 |
| 2 σ | 0.31 |

3. 自動操船



$(X_{rov}, Y_{rov}, Z_{rov})$ を基準とした、 (X_{WP}, Y_{WP}, Z_{WP}) の関係式
 $DIST = \sqrt{E^2 + N^2}$ ($0.0 \leq DIST \leq 999.9$)

$$BRG = \tan^{-2} \frac{E}{N} \quad (000.0 \leq BRG \leq 359.9)$$

$$WPB = BRG - ToCourseLine$$

($-180.0 < WPB \leq 180.0$)

$$XTD = DIST * \sin(WPB)$$

($-999.9 \leq XTD \leq 999.9$)

$$VBRG = 0.5 * XTD^3 + 0.35 * XTD$$

($-80.0 \leq VBRG \leq 80.0$)
($-90.0 - WPB \leq VBRG \leq 90.0 - WPB$)

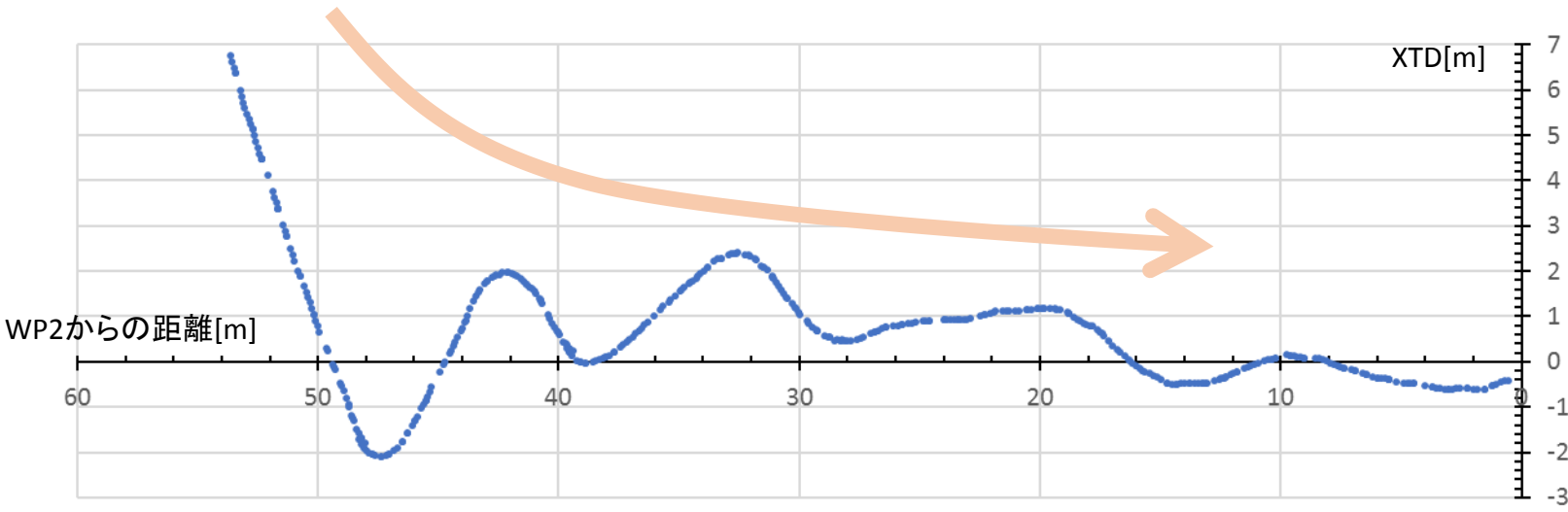
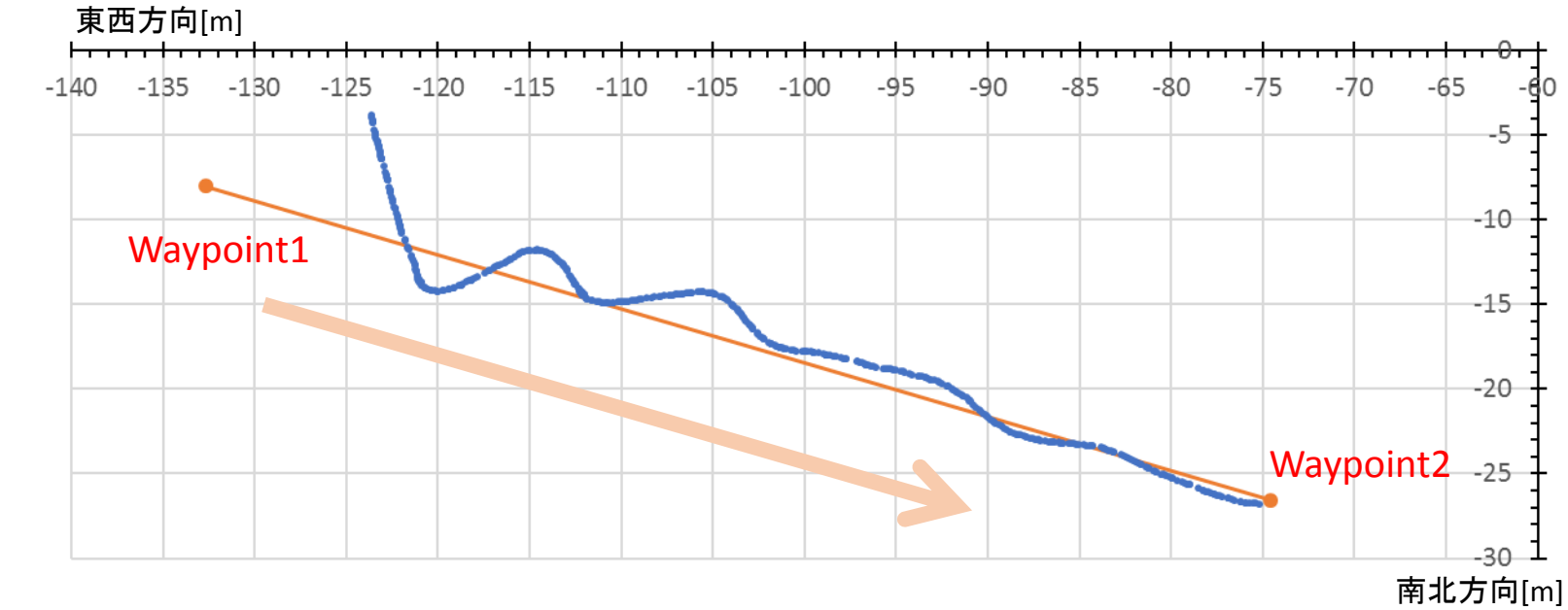
$$VBRG = VBRG + BRG$$

($000.0 \leq VBRG \leq 359.9$)

DIST : Distance
BRG : Bearing
VBRG : Virtual Bearing

WPB : Way Point Bearing
XTD : Cross(X) Tracking Distance

自動操船

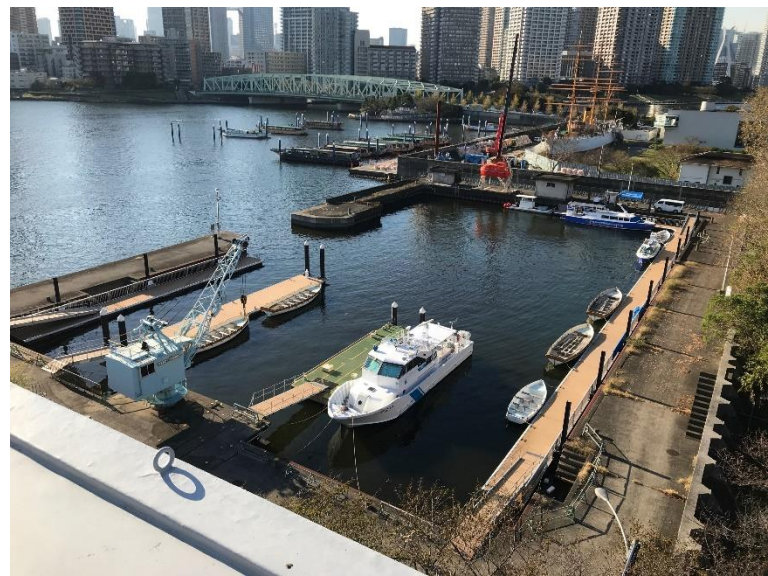


- WP1からWP2に向けて航行した航跡図



4. 深浅測量

- 実験場所
 - 東京海洋大学ポンド
- 試験内容/日時
 - 定点観測 2018/07/12 – 14:00~15:10(JST)
同一地点を長時間観測することにより、時間変化に伴う潮汐の変化及び測深影響を調べる。
 - ポンド内航行 2018/08/30, 11/27, 11/28
ポンド内及び周辺海域を航行することにより、海底図を作成する。



東京海洋大学ポンド

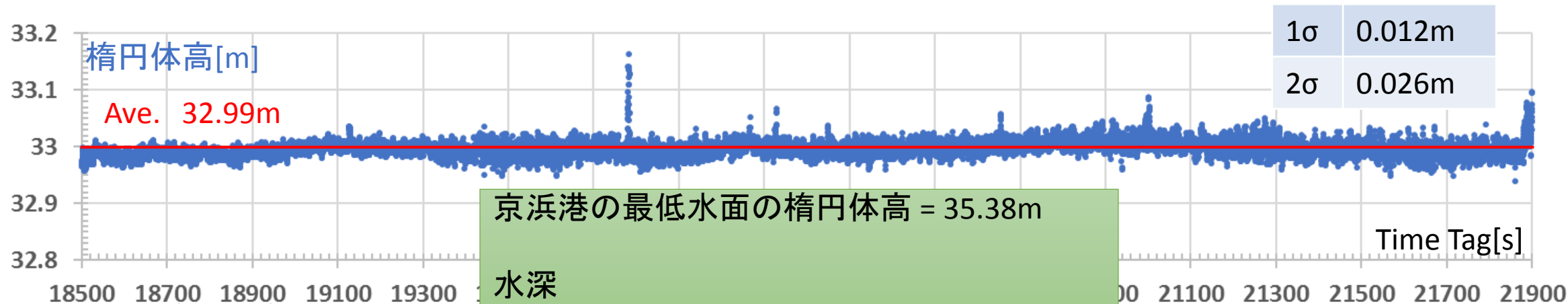
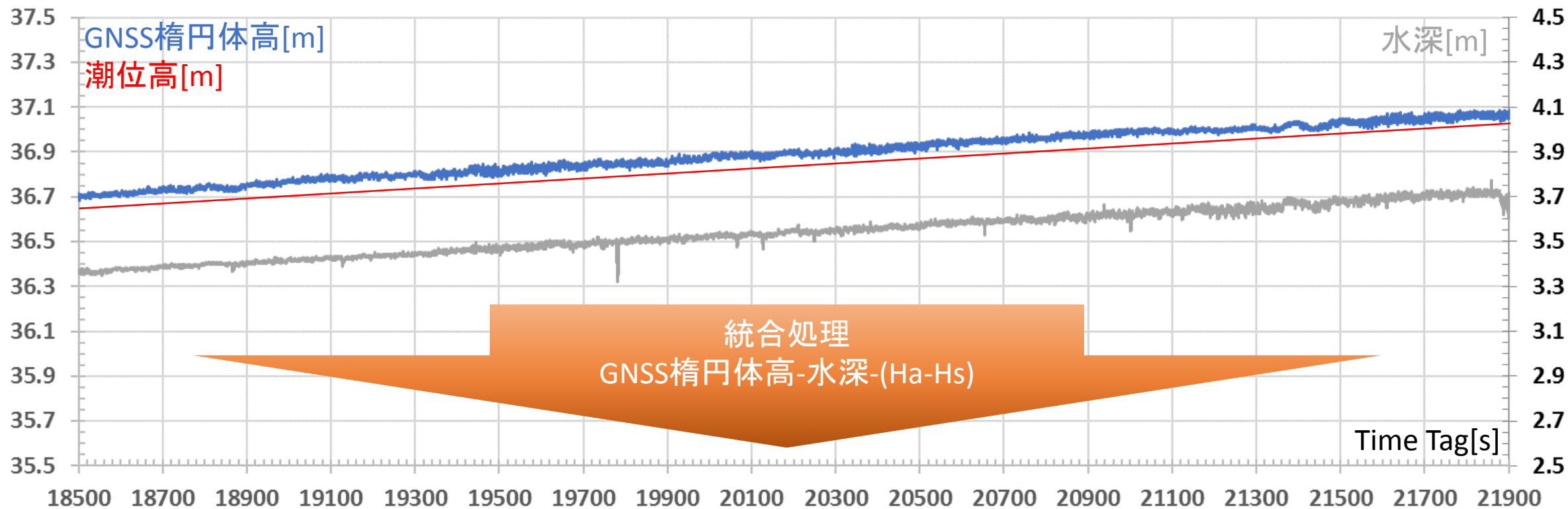


定点観測実験の様子



ポンド内航行の様子

4. 楕円体高と水深の関係



H_a : Height to Antenna (Free Board) = 0.13m
 H_s : Height to Sonar (Draft) = 0.225m

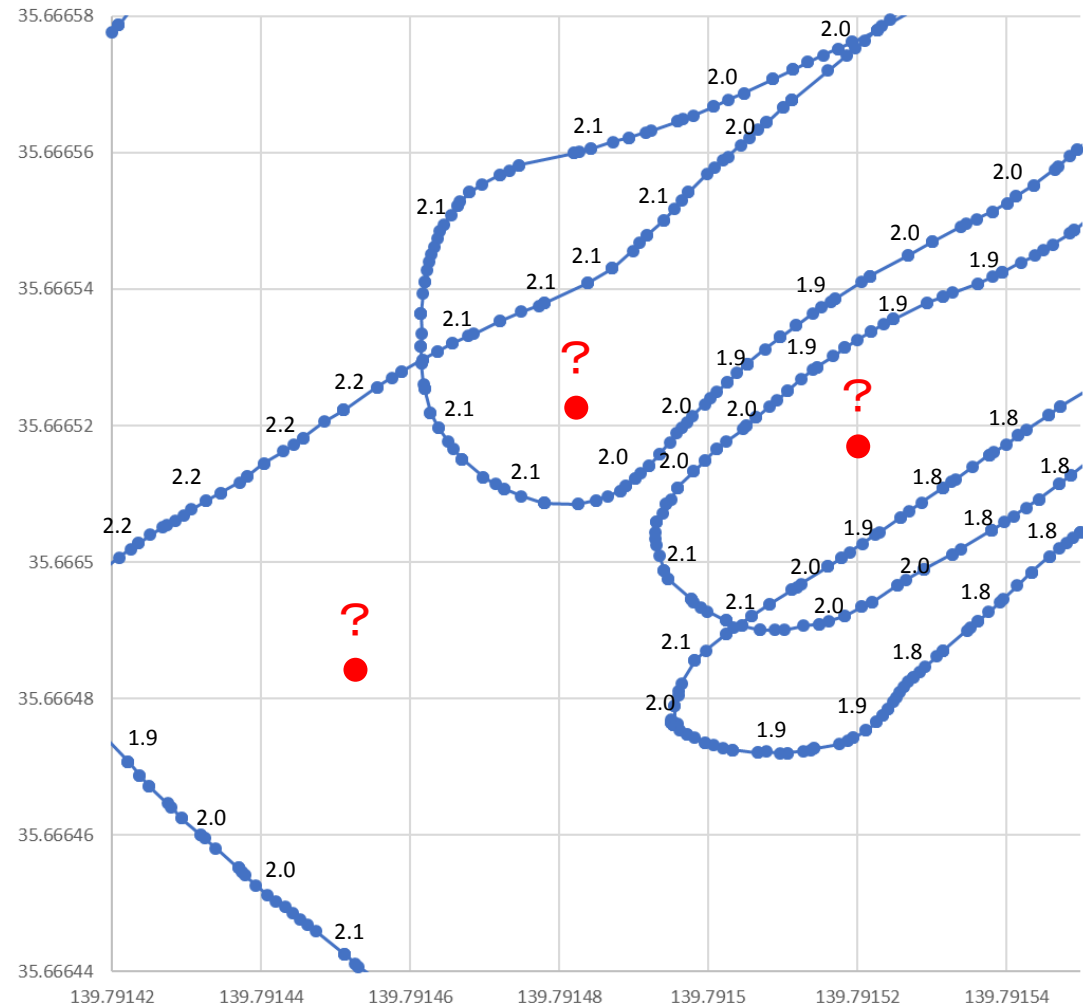
5. 空間補間(空間内挿)

理想



平行・等間隔に航行する

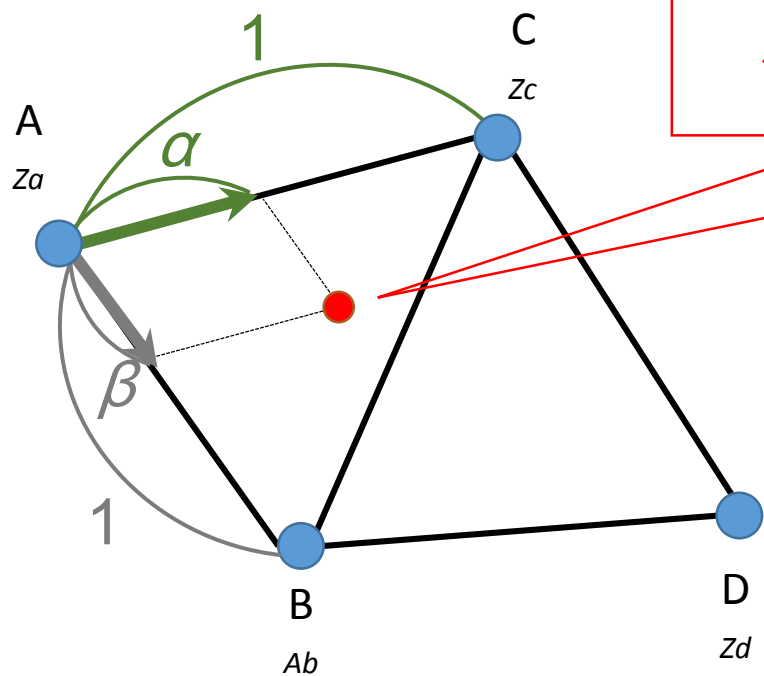
現実



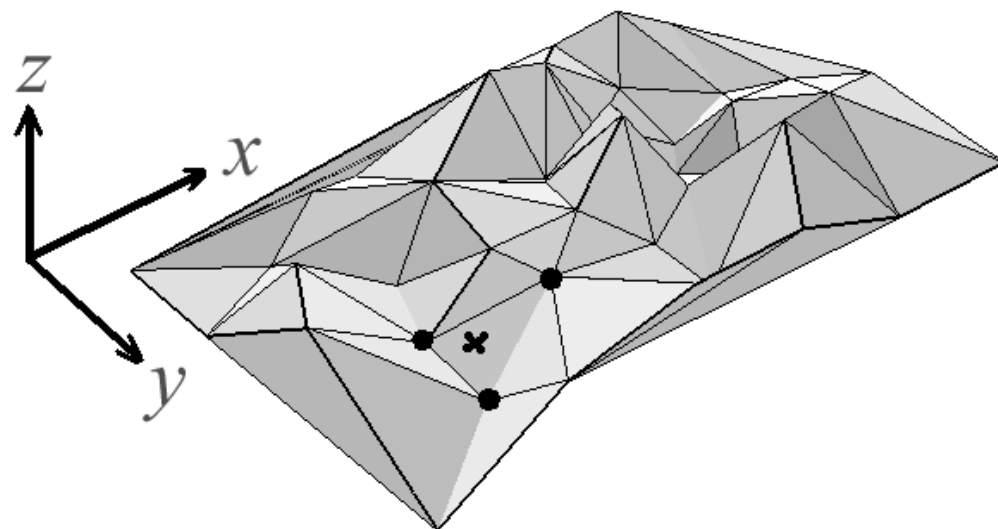
5. 三角網分割を用いた加重平均

補間点の「近隣」の3観測点を用いて線形補間を行う。

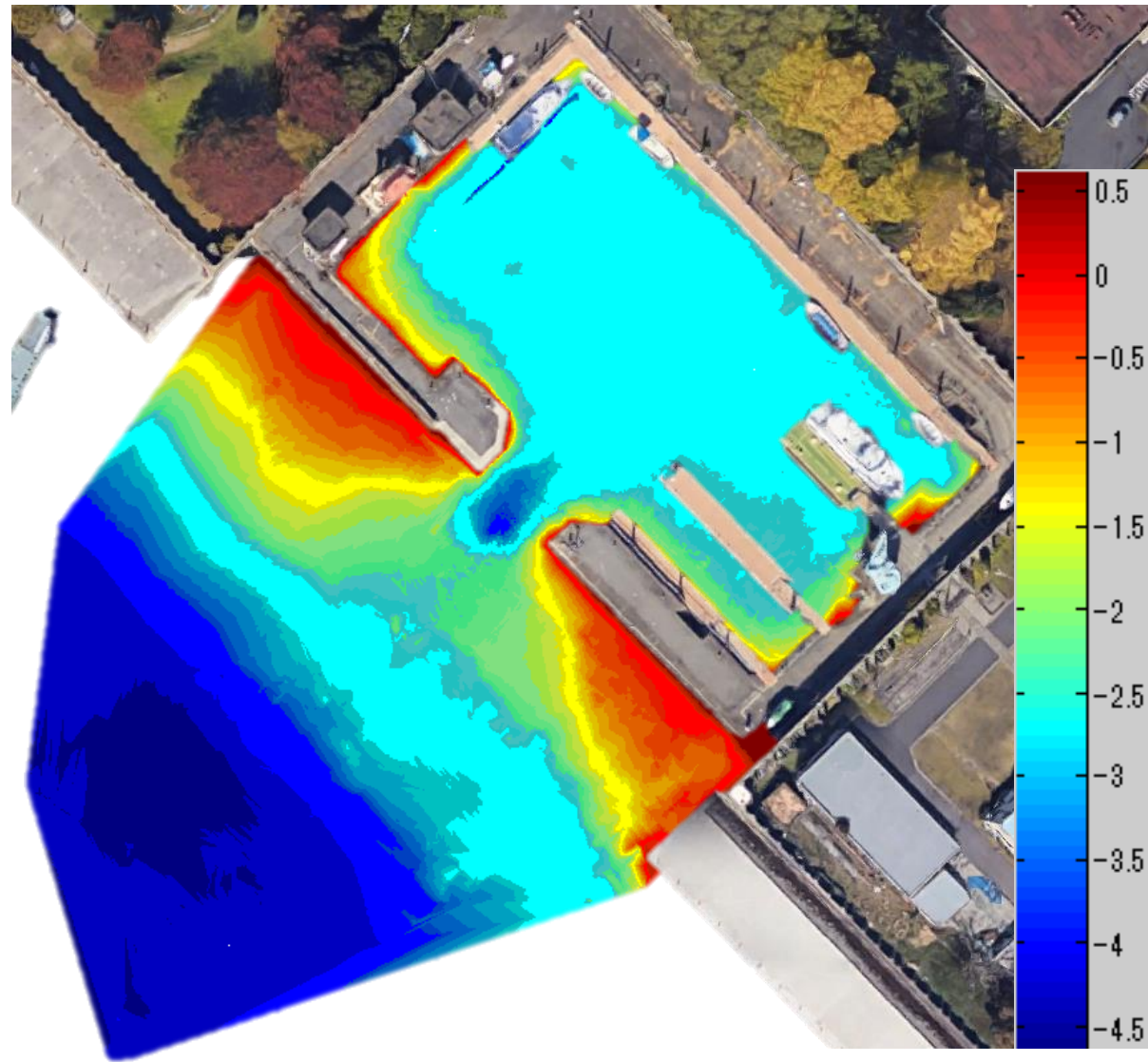
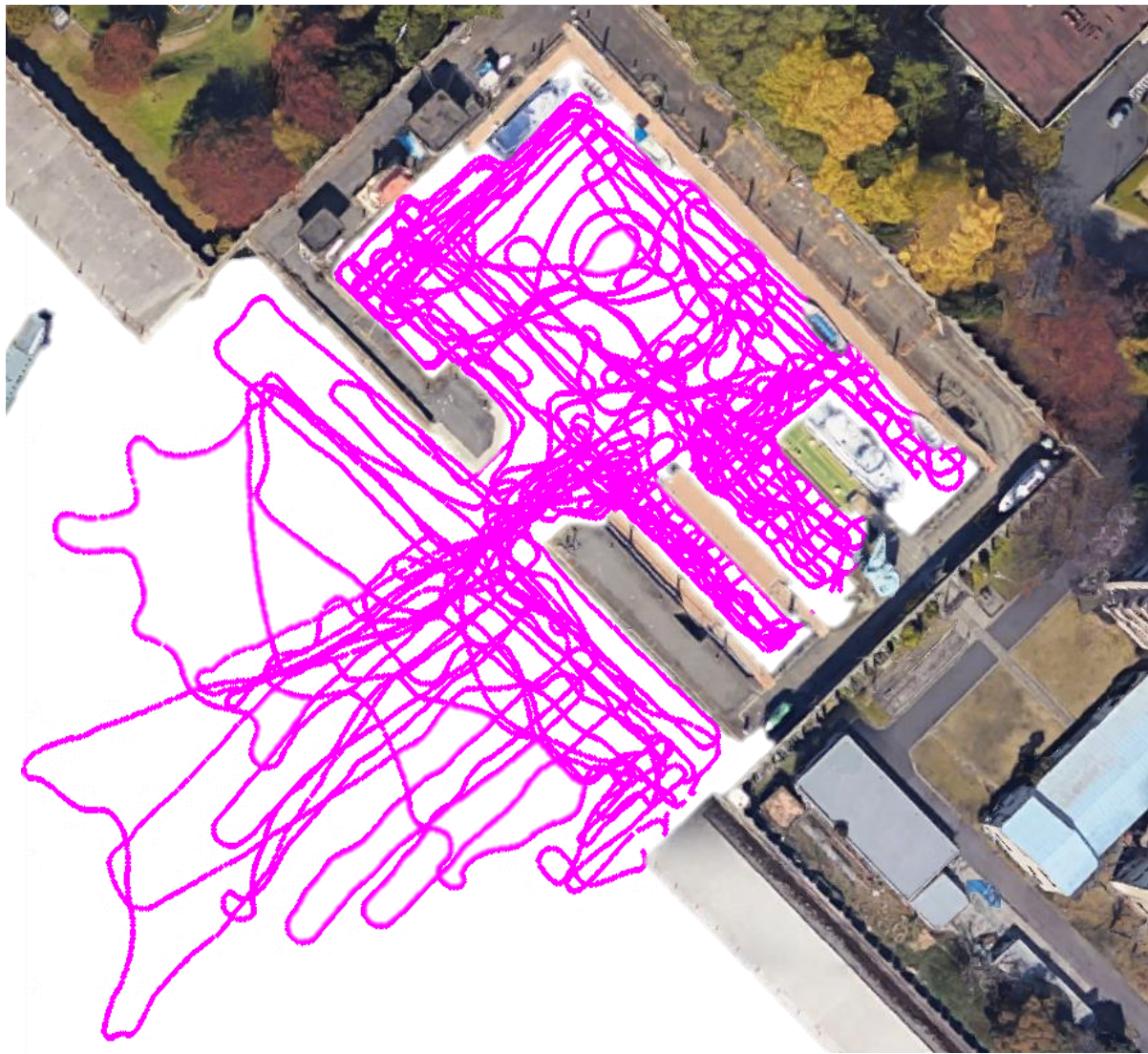
観測点を母点として作成された**不整形三角網(TIN: Triangular Irregular Network)**で領域を分割し、三角形毎に異なる線形の式で補間する。



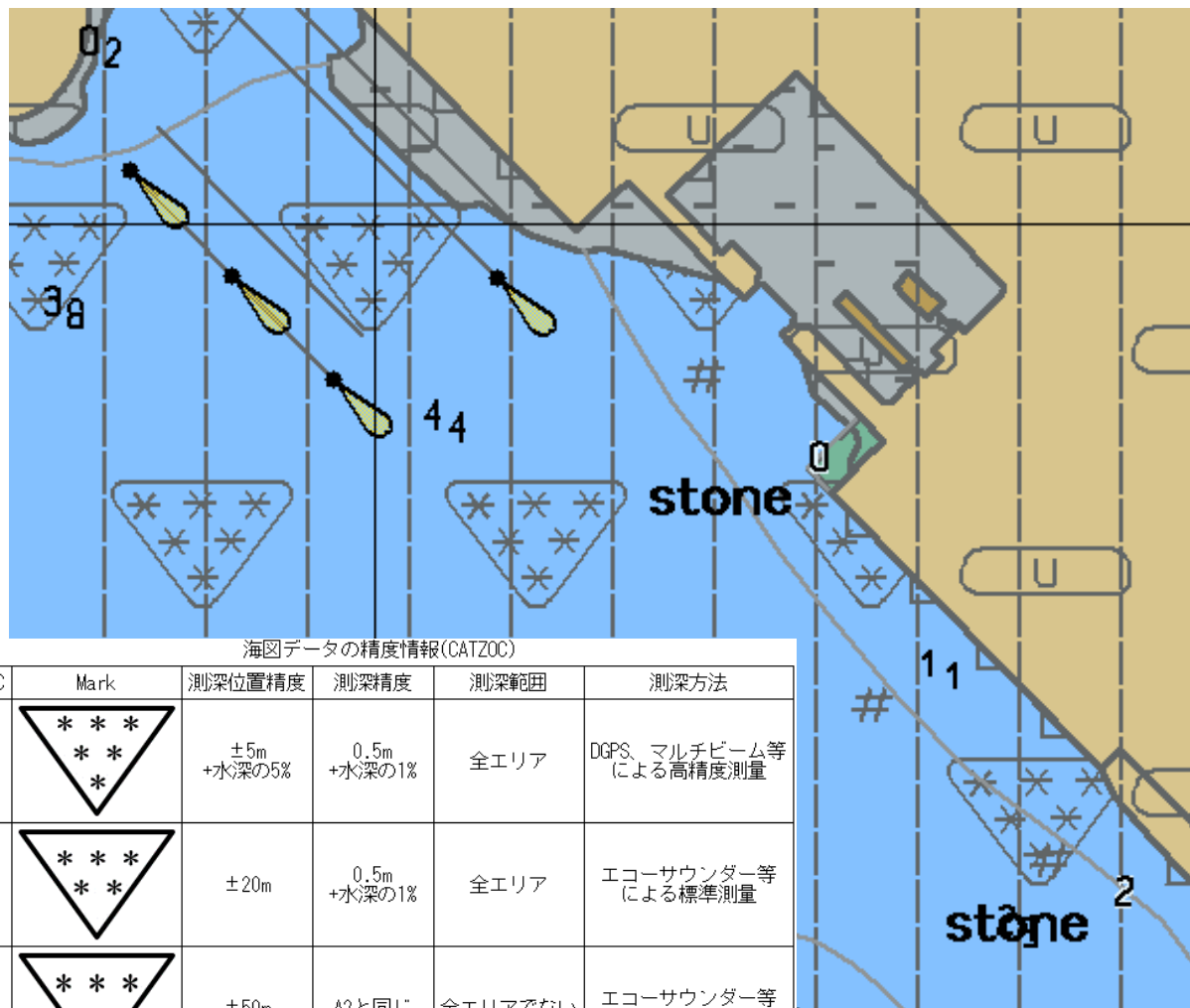
$$\text{補間値 } z^* = z_a + \alpha(z_c - z_a) + \beta(z_b - z_a)$$



4. 航跡図 水深図 2018/08/30, 11/27, 11/28

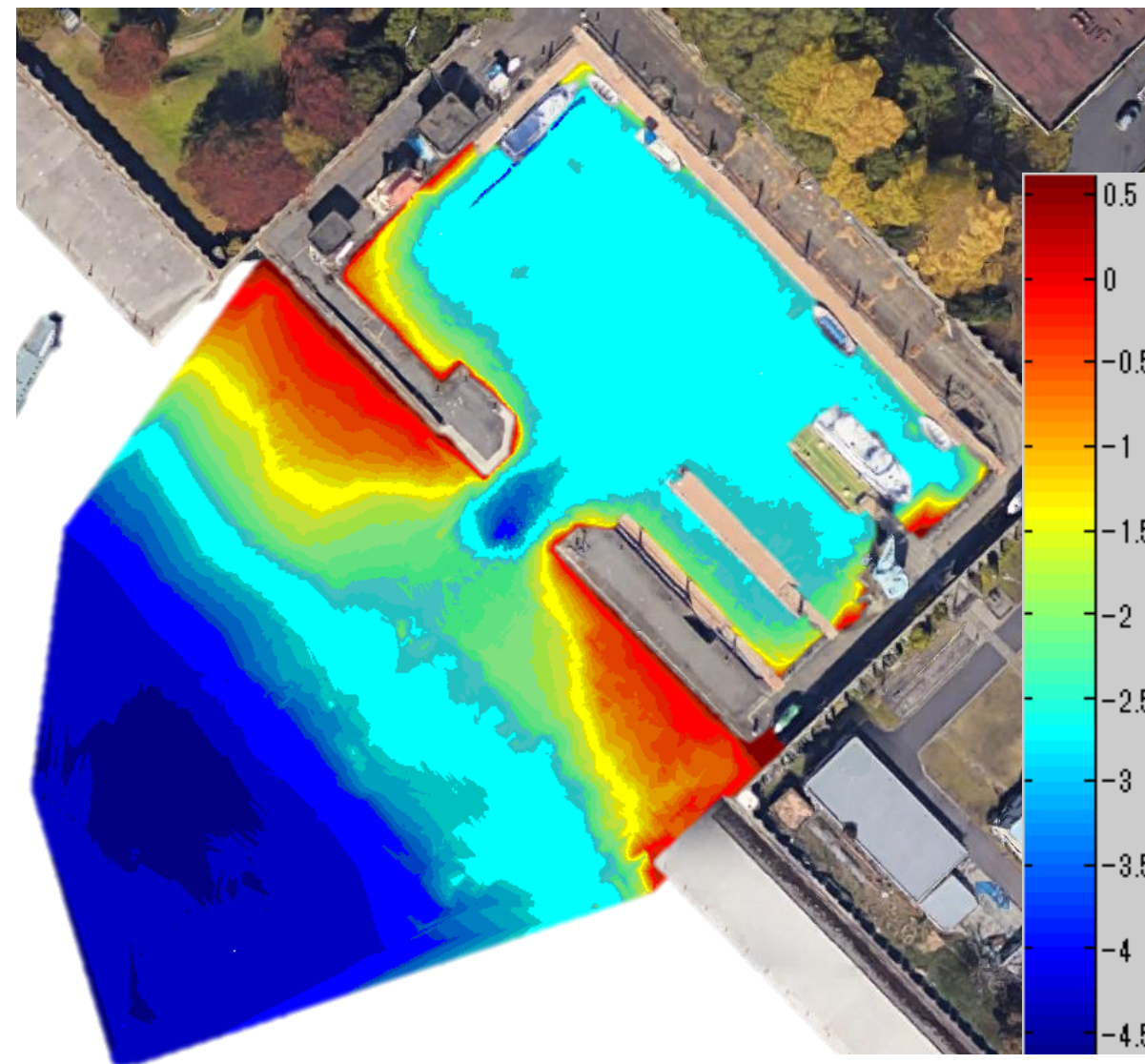


ECDISによるポンド周辺の測深精度



海図データの精度情報(CATZOC)

| ZOC | Mark | 測深位置精度 | 測深精度 | 測深範囲 | 測深方法 |
|-----|------|---------------|----------------|---------|----------------------|
| A1 | | ±5m +水深の5% | 0.5m +水深の1% | 全エリア | DGPS、マルチビーム等による高精度測量 |
| A2 | | ±20m | 0.5m +水深の1% | 全エリア | エコーサウンダー等による標準測量 |
| B | | ±50m | A2と同じ | 全エリアでない | エコーサウンダー等による標準測量 |
| C | | ±500m | 2.0m +水深の5% | 全エリアでない | 精度の低い測量 |
| D | | Cより低精度 | Cより低精度 | 全エリアでない | Cより精度の低い測量 |
| U | | | | 未評価 | |



まとめ

- 比較的低コストで、深淺測量ができる筐体を開発した
- 観測したデータを使ってポンドの海底図を作成することができた
- GNSSコンパスにより、小型ながらも船首方位を算出でき、停船時においても方位を把握することが可能となった
- 誘導制御の調整を行い、無駄の少ない誘導を行う必要がある
- 実運用するためには、1m筐体では、波浪の影響が大きすぎるため、もう少し大型の船を用いる必要がある

- 今後の課題
 - GNSS測位が出来なくなった時(橋梁下など)にIMUを利用してD.R.を行う
(madgwick filter利用)

