

# 定期的な水底地形実測を導入した 陸水域の流れと水底地形変動の 予測手法の開発と実用化

赤穂良輔<sup>1</sup> , 渡辺雅二<sup>2</sup> , 神保秀司<sup>3</sup>

<sup>1</sup>岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域准教授

<sup>2</sup>岡山大学名誉教授, 岡山大学特命教授 (研究)

<sup>3</sup>岡山大学客員研究員

# 目次

- 概要
- 研究の背景
- 計測方法およびデータ解析
- 三角形メッシュと区分線形関数
- まとめ

# 1. 概要

河川や湖沼など陸水域の流れと地形変化に着目し，数値計算による流れと水底地形変化の解析と解析結果の検証に実測値を導入する手法の開発と実用化および応用に焦点をあてる。衛星測位システム受信機と超音波測深機を中心とする装備を用いた小型船舶による測位－測深では受信機に接続されたアンテナと音波測深機送受波器は船体に固定される。一方，船舶にはピッチ（縦揺れ）とロール（横揺れ）およびヨー（船首揺れ）など船体の動きによる動揺が発生し，測位－測深結果に発生する誤差の要因となる。実測に関する研究では，この誤差を補正するための手法に着目し，更に，この手法を発展させた計測手法について考察する。

## 2. 研究の背景

### 国内外で頻発する豪雨災害

- 平成30年7月豪雨：死者 119 名，負傷者 29 名，全壊 213 戸，半壊 340 戸 [1]
- 令和元年台風第 19 号と低気圧による大雨：死者 104 人，行方不明者 3 人，重傷者 43 人，軽傷者 341 人，全壊 3308 棟，半壊 30024 棟 [2]
- 令和2年7月豪雨：死者 84 人，行方不明者 2 人，重傷者 23 人，軽傷者 54 人，全壊 1621 棟，半壊 4504 棟 [3]
- 令和3年7月1日の大雨をはじめとする豪雨：死者 26 名，行方不明者 1 名，負傷者 7 名，全壊 56 戸，半壊 11 戸 [4]
- 令和5年9月10日に降り始めた雨がもたらしたリビア洪水：死者およそ8000 人 [5]
- 令和6年9月能登半島豪雨：死者 10 人，行方不明者 1 人 [6]
- 令和6年10月スペイン東部洪水：217 人死亡、行方不明者多数 [7]

# 気候変動と水域に関するデータの重要性

- 人為的な気候変動は、既に世界中の全ての地域において多くの気象と気候の極端現象に影響を及ぼしているとの指摘[8]。前述のような豪雨災害は益々頻繁に発生するとの危惧。
- 気候変動の進行にともなう地球表面と大気の間の水循環活発化。災害をもたらすような豪雨は益々頻繁に発生するようになるという懸念。
- 内水氾濫や堤防の決壊の未然防止を目的とする河川や湖沼および沿岸水域に関する適格な情報の取得と定期的なアップデートの重要性。
- 小型船舶を用いた測位と測深による狭小水域に対する機動的な水底地形データの計測手法と解析手法について、これまでの研究の更なる展開。

# 3. 計測方法およびデータ解析

## 計測機器

- VRS (Virtual Reference Station, 仮想基準点) 方式 (GNSS0, GNSS1) と PPP (Precise Point Positioning, 精密単独測位) 方式の (GNSS2) RTK-GNSS (Real Time Kinematic 衛星測位システム) 受信機
- 音響測深機 (200 kHz)

音響測深機の送受波器は舷側に取り付けられた支柱の下端に取り付けられ水中に設置される (写真1)。 GNSS受信機に接続されたアンテナは支柱の先端に取り付けられた。支柱は船舶の進行方向に対し直角の方向に角度を変化させる (写真2, 写真3)。



写真1 : 2024年11月 8 日

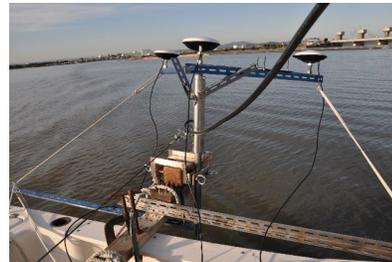


写真2 : 2024年11月 8 日



写真3 : 2024年11月 8 日

児島湾の一部を締切堤防で閉め切ってできた岡山県の児島湖で令和6年10月11日と11月8日に実施した計測結果を例示する。測位データの緯度-傾度成分は直交座標に変換され[9], GNSS受信機に接続された $xy$  平面上の軌跡と楕円体高が得られた。点 $(x_i, y_i)$  に付随するアンテナの楕円体高を $h_i$  とする。児島湖の外郭はオンラインソフトウェア[10]の出力結果を用いて作成された。

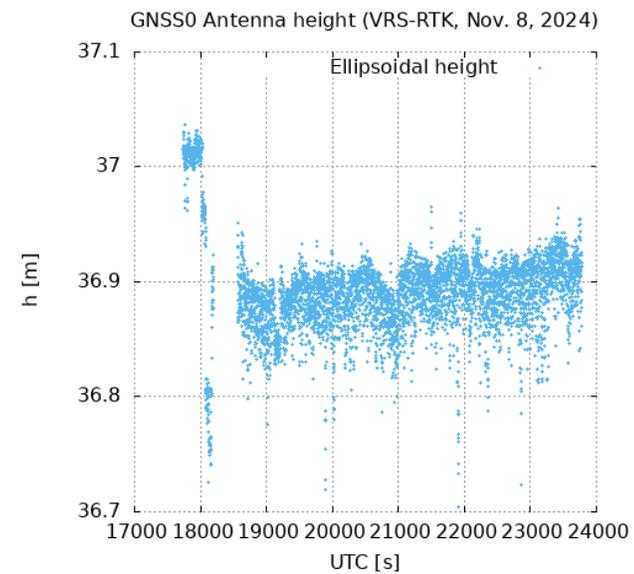
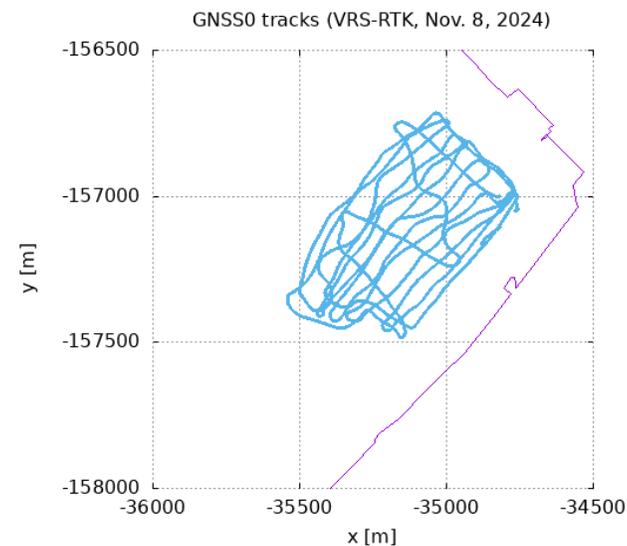
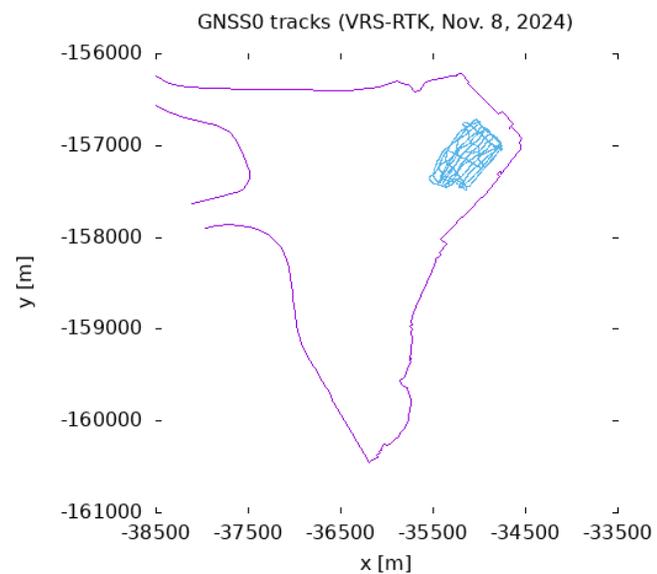
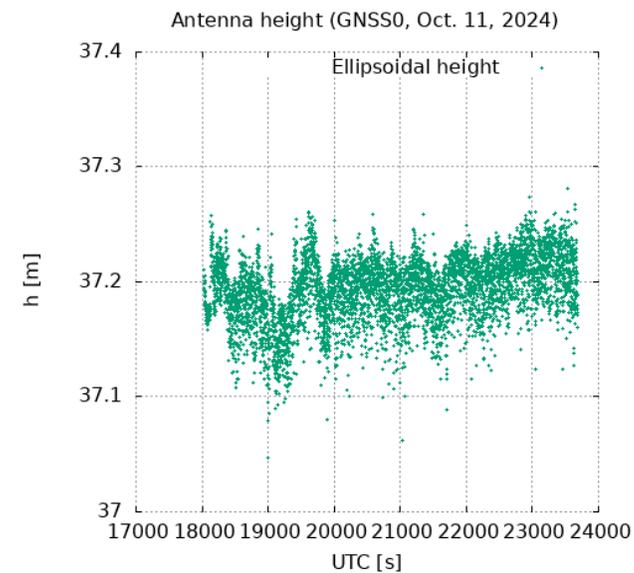
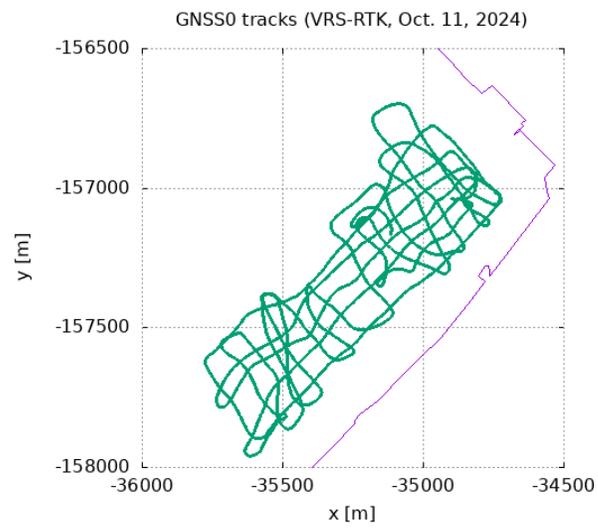
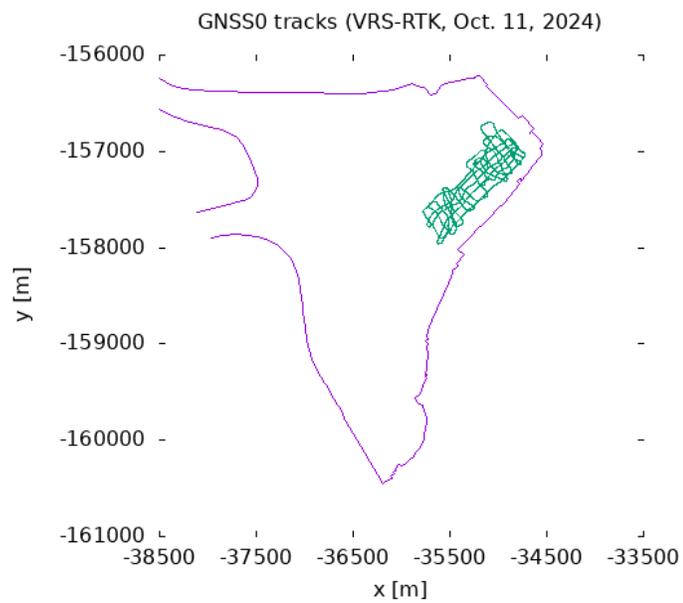


図1：GNSS0からの出力（xy平面上の軌跡と楕円体高）

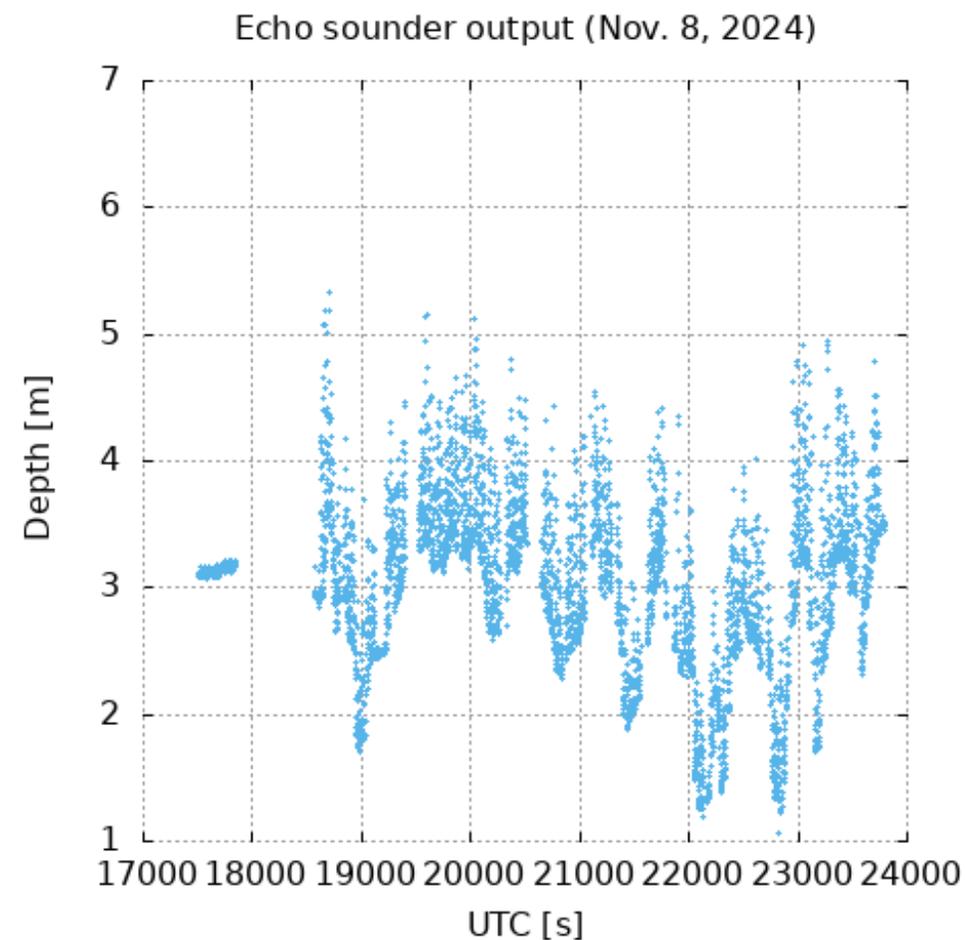
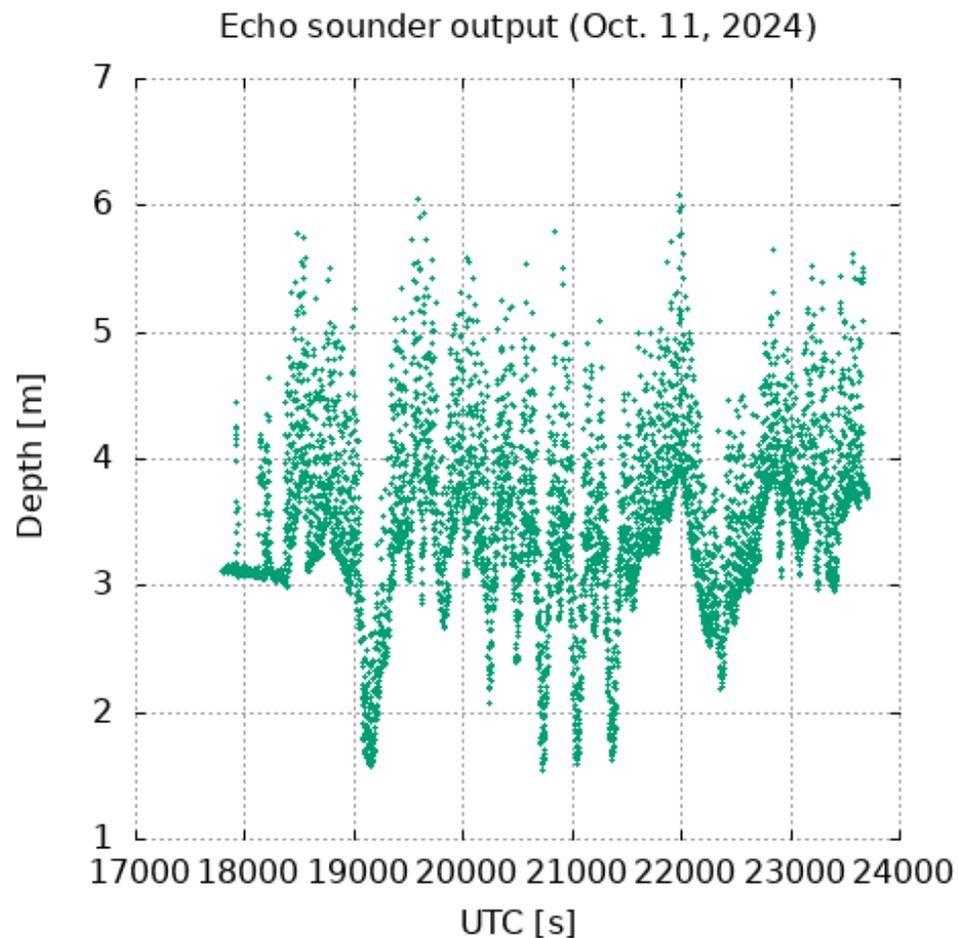
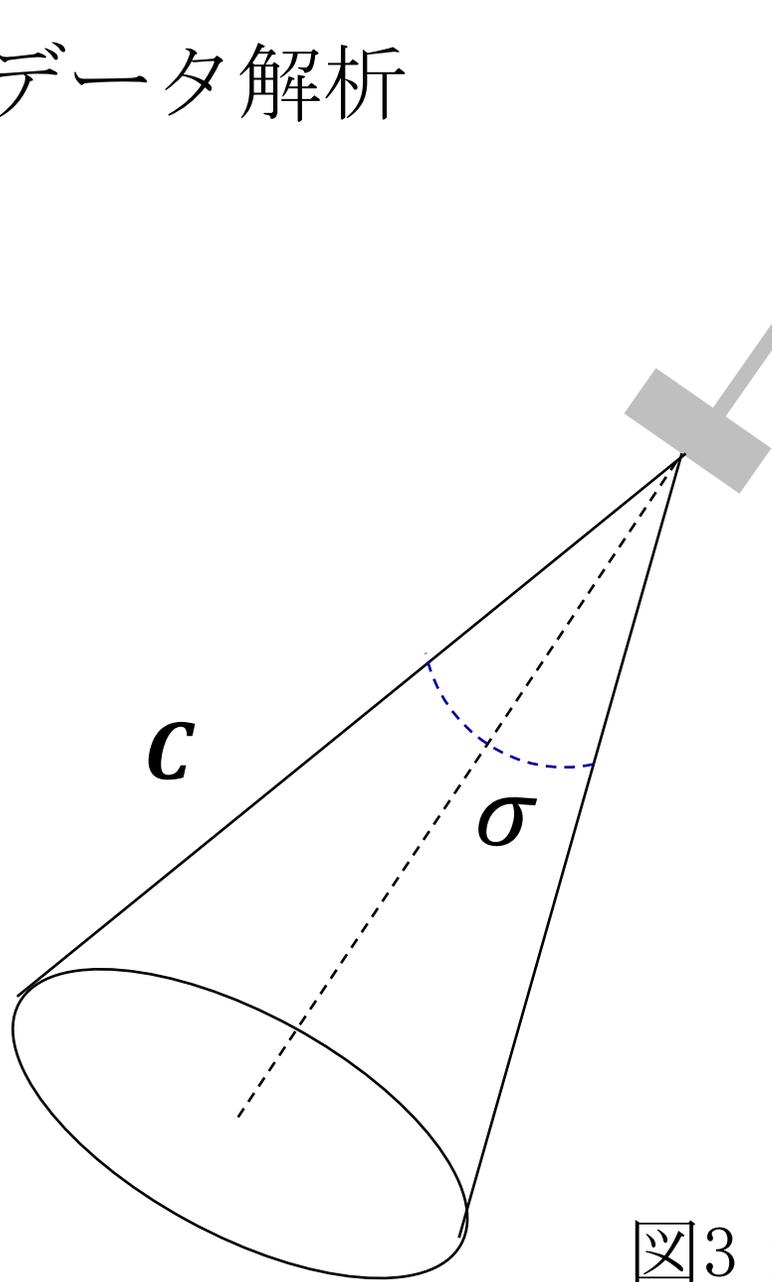
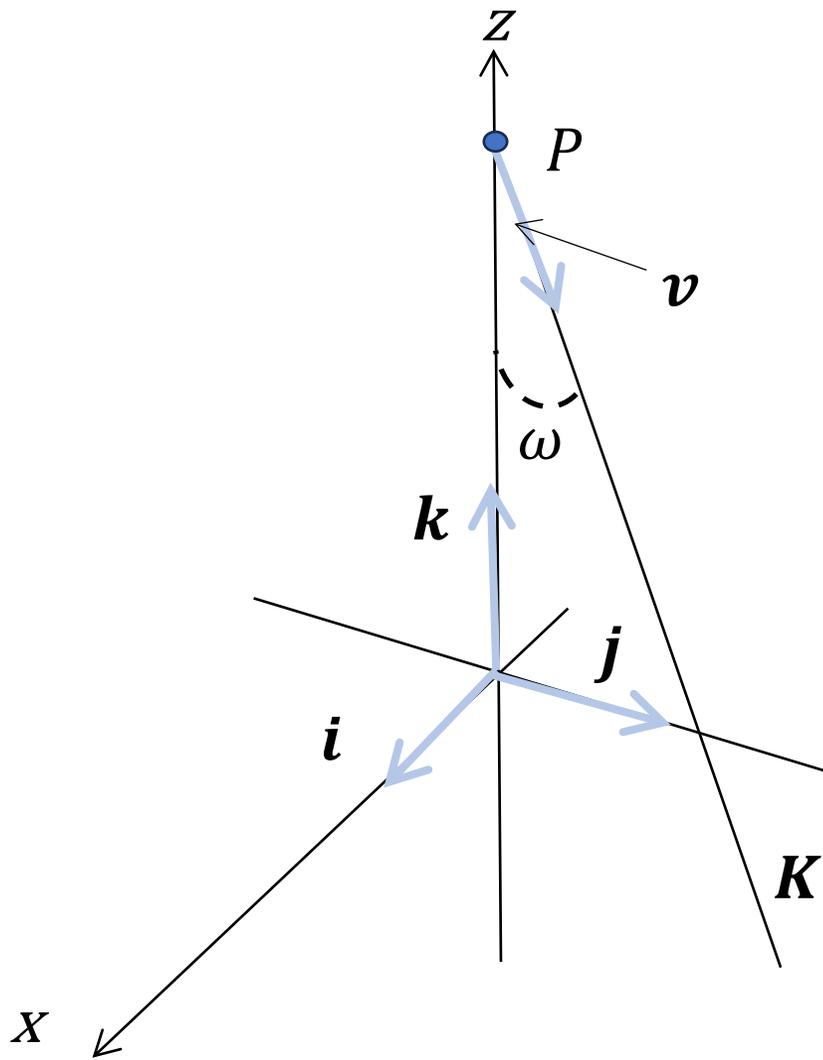


図2：音響測深機データ



音響測深機送受波器から発信される検知可能な音波は頂点と中心線を通る平面で切ったときに二つの半直線がなす角を $\sigma$ とする円錐を構成する。この円錐を**C**で表す。この円錐と水底面が交わってできる領域の中の点と送受波器の最短距離が音響測深機からの出力値となる。当該音響測深機に関しては $\sigma=6^\circ$ とする（千本電気株式会社からの情報提供）。

図3：音響測深機送受波器と指向角



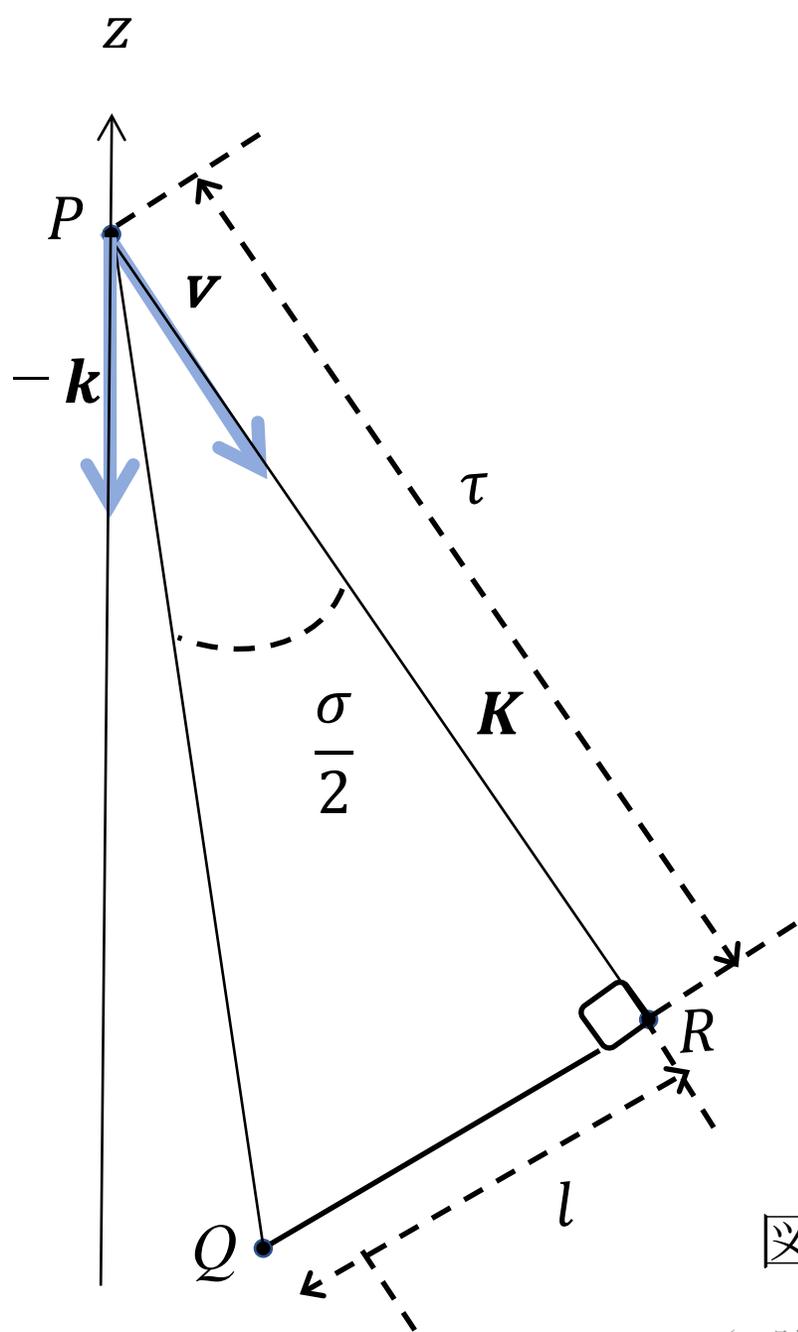
円錐の頂点の座標を  $P(0,0,r)$ ,円錐の中心線の単位方向ベクトルを  $\boldsymbol{v}$  とする。

$\boldsymbol{v} = \alpha\boldsymbol{i} + \beta\boldsymbol{j} + \gamma\boldsymbol{k}$  ( $\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 1$ ),  
ただし  $\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}, \boldsymbol{k}$  を, それぞれ  $x$  軸,  $y$  軸,  $z$  軸の  
単位座標ベクトルとする。ベクトル  $\boldsymbol{v}$   
と  $z$  軸のなす角を  $\omega$  とする [18] 。

$$\omega = \tan^{-1} \frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{|\gamma|} = \tan^{-1} \frac{\sqrt{1 - \gamma^2}}{|\gamma|}$$

$$= \cos^{-1} |\gamma| .$$

図4：円錐の中心線と  $z$  軸のなす角



点  $Q$  を円錐上の点とすると， $Q$  から中心線におろした垂線が中心線と交わる点を  $R$  とすると三角形  $PQR$  が，線分  $PQ$  と線分  $PR$  がなす角が  $\sigma / 2$  となる直角三角形となる。

円錐の式：  $l = \tau \tan \frac{\sigma}{2}$  ， ただし

$$l = \sqrt{(x - \tau\alpha)^2 + (y - \tau\beta)^2 + (z - r - \tau\gamma)^2} ,$$

$$\tau = \alpha x + \beta y + \gamma(z - r)$$

とする [18] 。

図5: 三角形  $PQR$

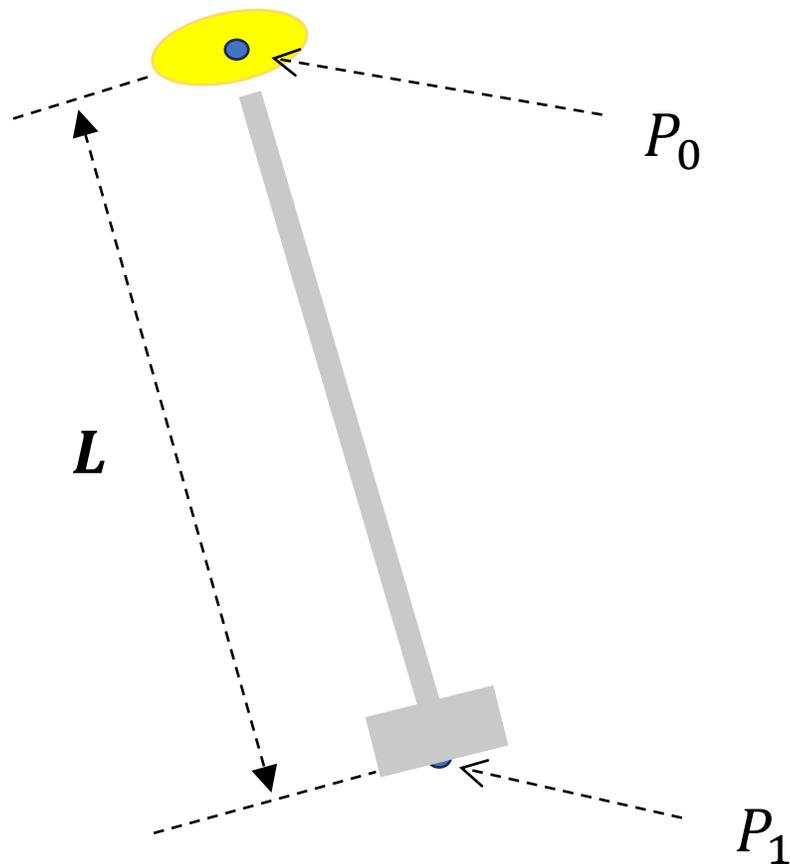
円錐  $\mathbf{C}$  の方程式[18] :

$$(1 - \alpha^2)x^2 + (1 - \beta^2)y^2 + (1 - \gamma^2)(z - r)^2 - 2\alpha\beta xy - 2\alpha\gamma x(z - r) - 2\beta\gamma y(z - r) - \left[\tan\left(\frac{\sigma}{2}\right)\right]^2 [\alpha x + \beta y + \gamma(z - r)]^2 = 0. \quad (1)$$

$\omega + \sigma/2 < \pi/2$  とすると  $\mathbf{C}$  と  $xy$  平面との交線は楕円である。この楕円を  $\mathbf{E}$  で表す。

楕円  $\mathbf{E}$  の方程式[18]:

$$(1 - \alpha^2)x^2 + (1 - \beta^2)y^2 + (1 - \gamma^2)r^2 - 2\alpha\beta xy + 2\alpha\gamma rx + 2\beta\gamma ry - \left[\tan\left(\frac{\sigma}{2}\right)\right]^2 (\alpha x + \beta y - \gamma r)^2 = 0. \quad (2)$$



$P_0(x_0, y_0, z_0)$ : アンテナ高  
 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ : 送受波器の先端  
 $L$ :  $P_0$  から  $P_1$  までの距離 (2.4356m)

[18].

$$x_1 = x_0 + L\alpha,$$

$$y_1 = y_0 + L\beta,$$

$$z_1 = z_0 + L\gamma.$$

図6: GNSS アンテナと音響測深機送受波器

$d$ : 音響測深機からの出力値

$P_2(x_2, y_2, z_2)$ : 音響測深機からの出力値を示す音波が反射される点

条件  $\sigma/2 \geq \omega$  が成り立つ場合 [18] :

$$x_2 = x_1 = x_0 + L\alpha,$$

$$y_2 = y_1 = y_0 + L\beta,$$

$$z_2 = z_1 - d = z_0 + L\gamma - d.$$

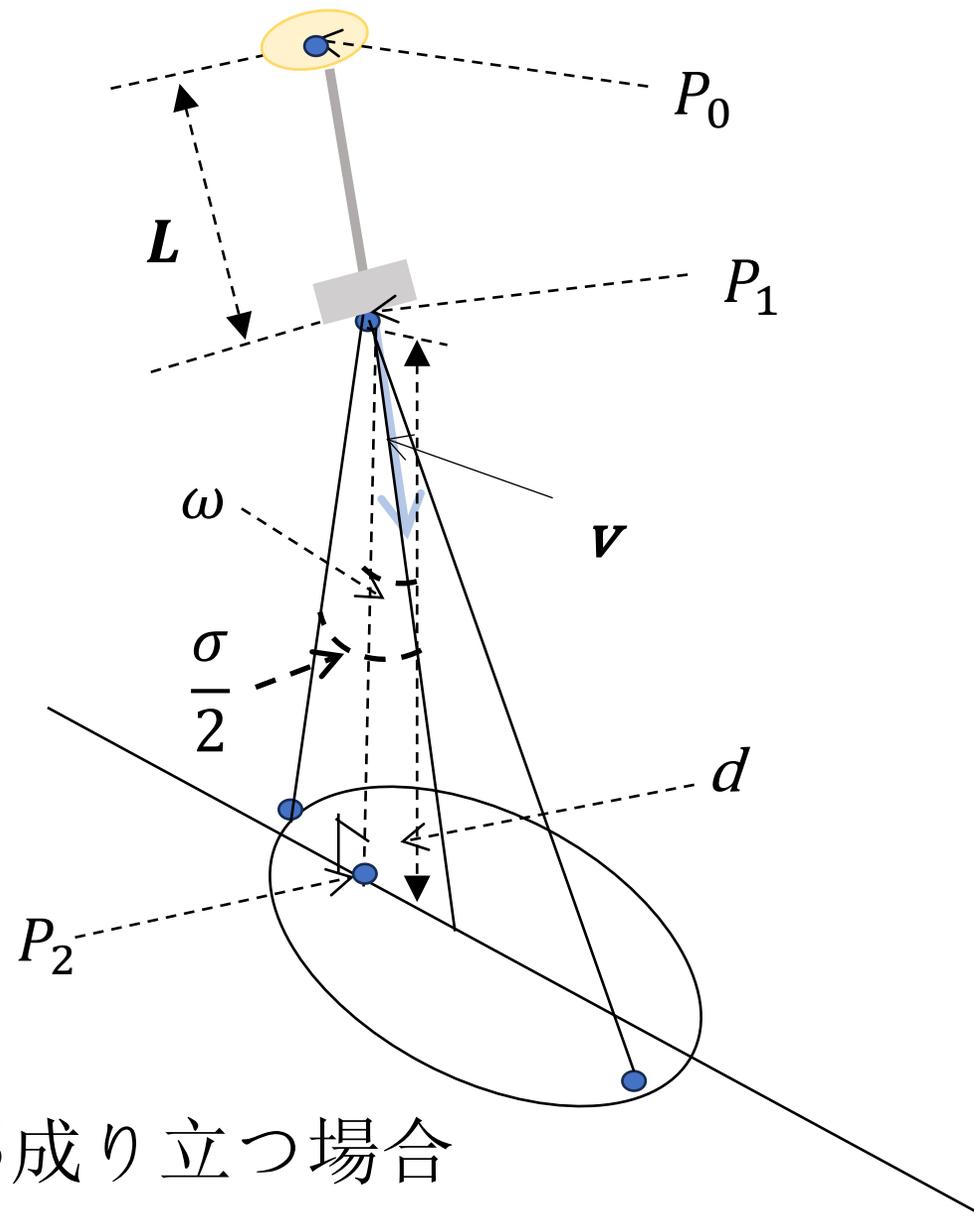


図7: 条件  $\sigma/2 \geq \omega$  が成り立つ場合

条件  $\sigma/2 < \omega$  が成り立つ場合 [18]

$$x_2 = x_1 + x_- = x_0 + L\alpha + x_-,$$

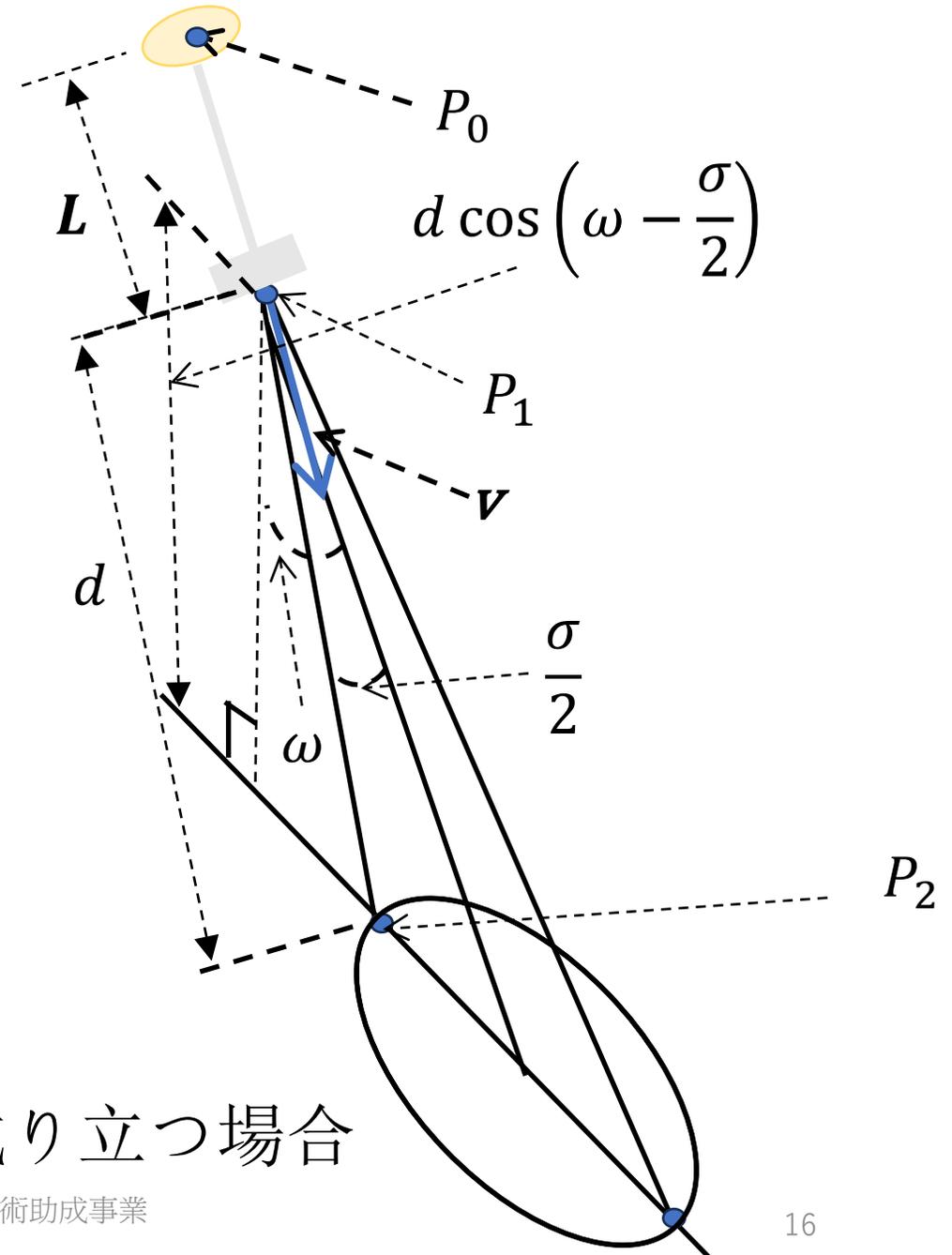
$$y_2 = y_1 + y_- = y_0 + L\beta + y_-,$$

$$\begin{aligned} z_2 &= z_1 - d \cos\left(\omega - \frac{\sigma}{2}\right) \\ &= z_0 + L\gamma - d \cos\left(\omega - \frac{\sigma}{2}\right). \end{aligned}$$

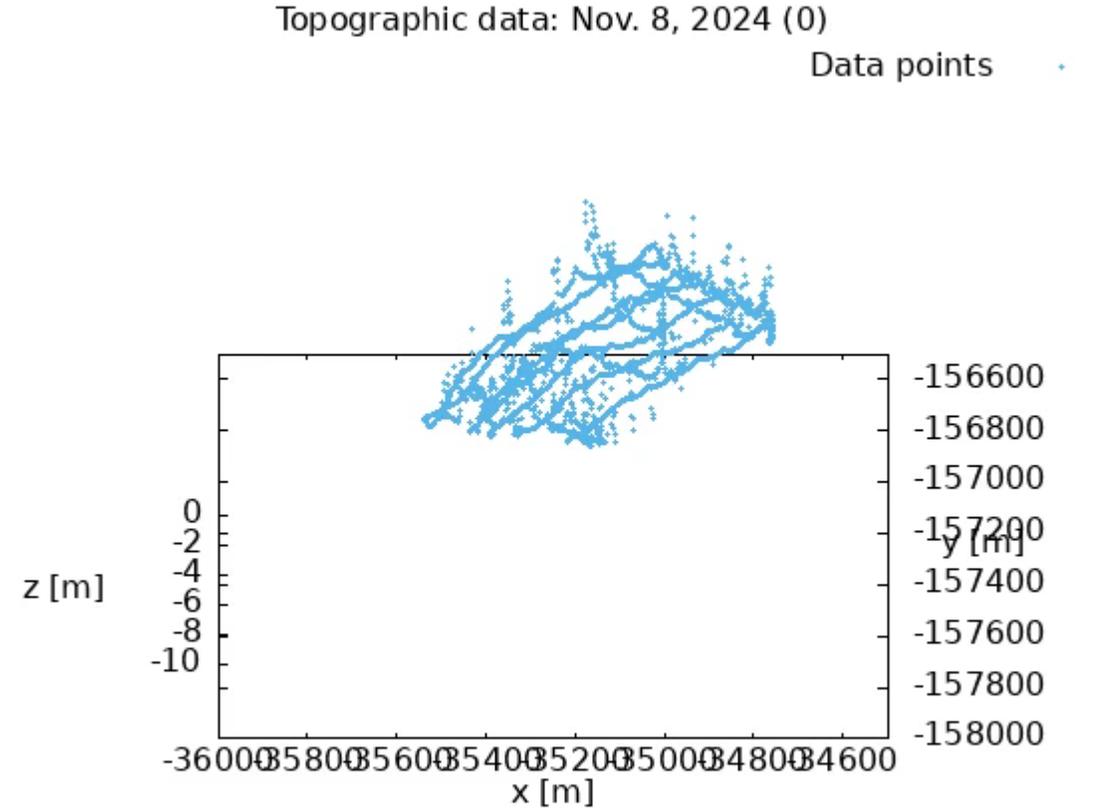
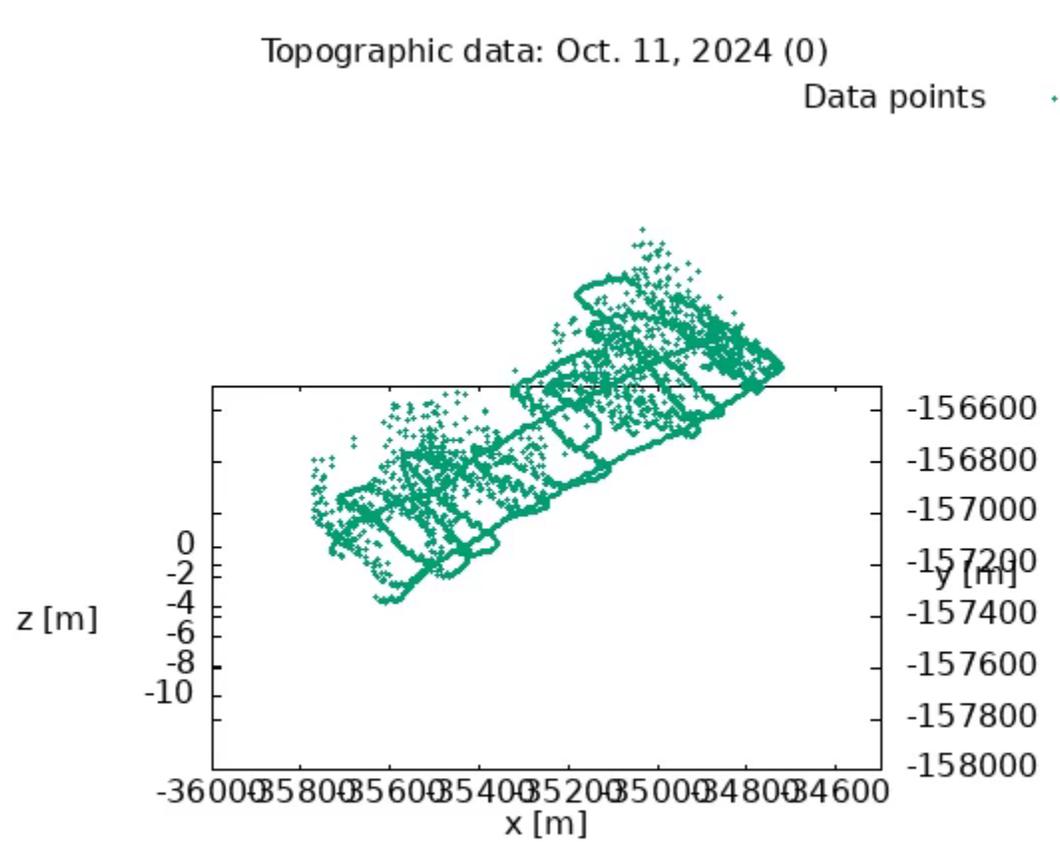
$$x_- = \frac{\alpha d}{\sqrt{1 - \gamma^2}} \sin\left(\omega - \frac{\sigma}{2}\right),$$

$$y_- = \frac{\beta d}{\sqrt{1 - \gamma^2}} \sin\left(\omega - \frac{\sigma}{2}\right).$$

図 7: 条件  $\sigma/2 \geq \omega$  が成り立つ場合



# RTK-GNSSデータと音響測深機データから構成される三次元水底地形データ



動画 1 : 三次元水底地形データ (2024年10月11日, 2024年11月 8 日)

# 4. 三角形メッシュと区分線形関数

## メッシュ列の生成

水域の地形は三角形メッシュ上の区分線形関数で近似的に表される。初期メッシュ  $M_0$  から要素分割により三角形メッシュ列  $M_1, M_2, \dots$  が生成された。三角形メッシュ  $M_{j-1}$  の各要素を四分分割することによって三角形メッシュ  $M_j$  が求められた。

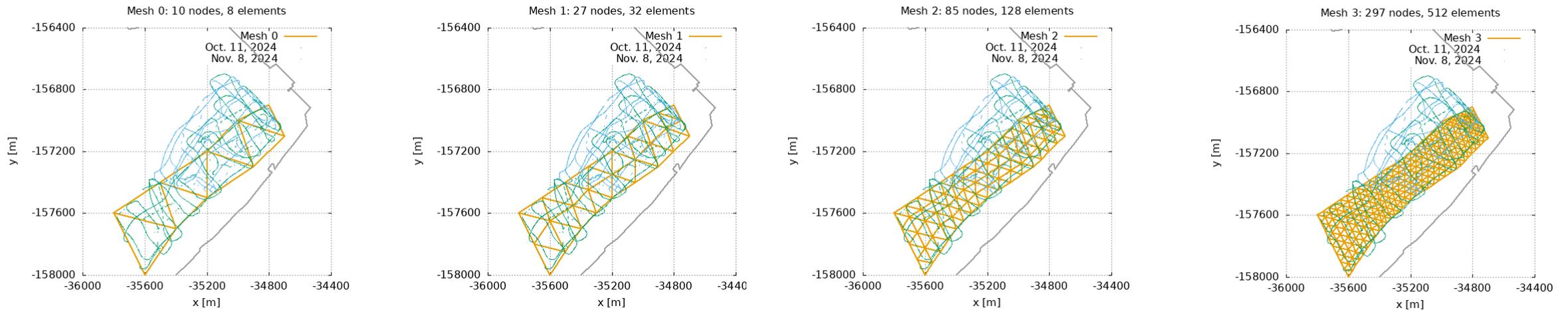


図 8: メッシュ  $M_0 \sim M_3$

# 最小二乗近似の適用

三角形メッシュの各要素に定義された一次関数を， $xy$  成分が 要素内に存在する水底地形データに基づく最小二乗近似によって求める方法が提案された [15]。図9と動画2は前述の三角形メッシュ $M_3$ に対し得られた地形を表す区分線形関数の例を表す。

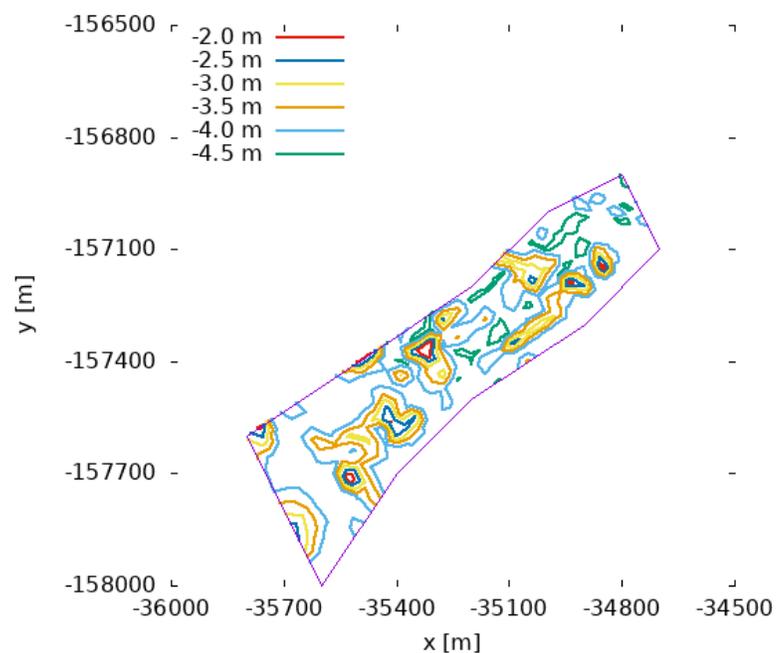
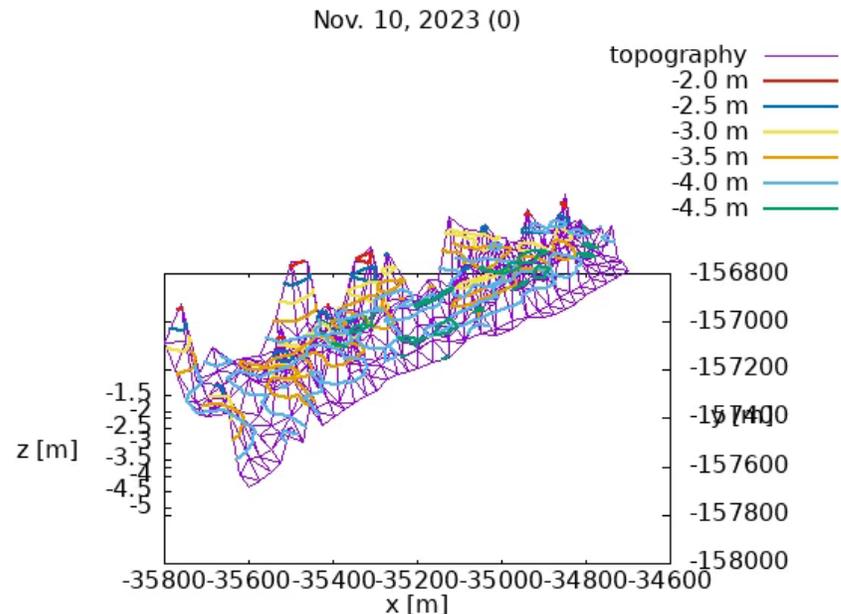


図9:  $xy$ 平面上の等深線



動画2：水底地形を表す区分線形関数

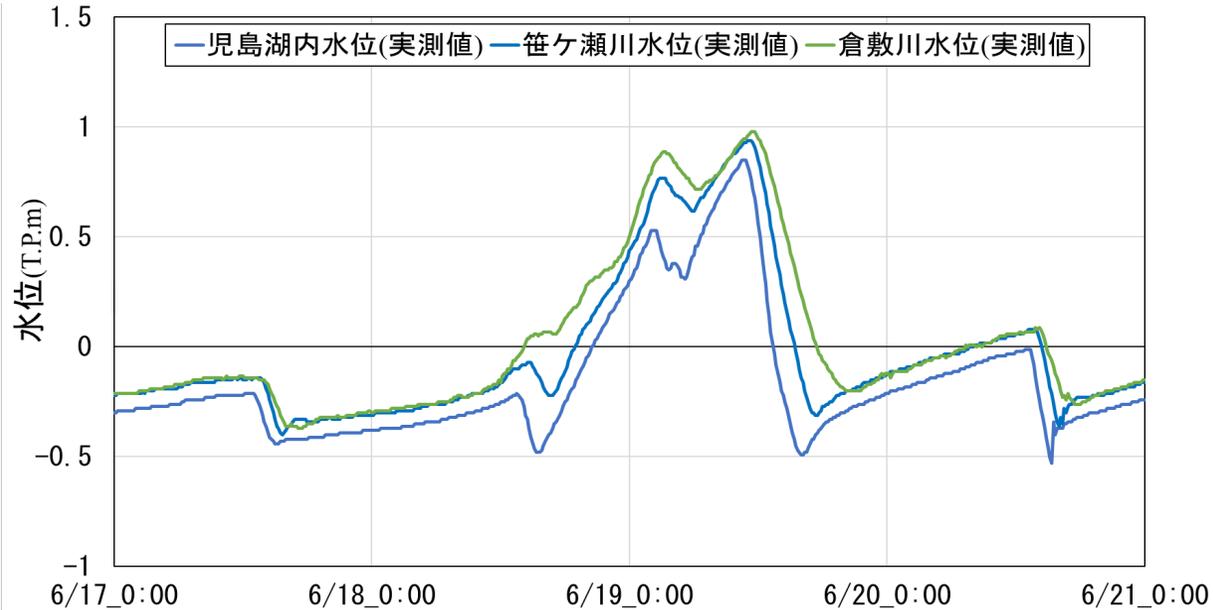
## 5. まとめ

### これまでの考察と今後の課題

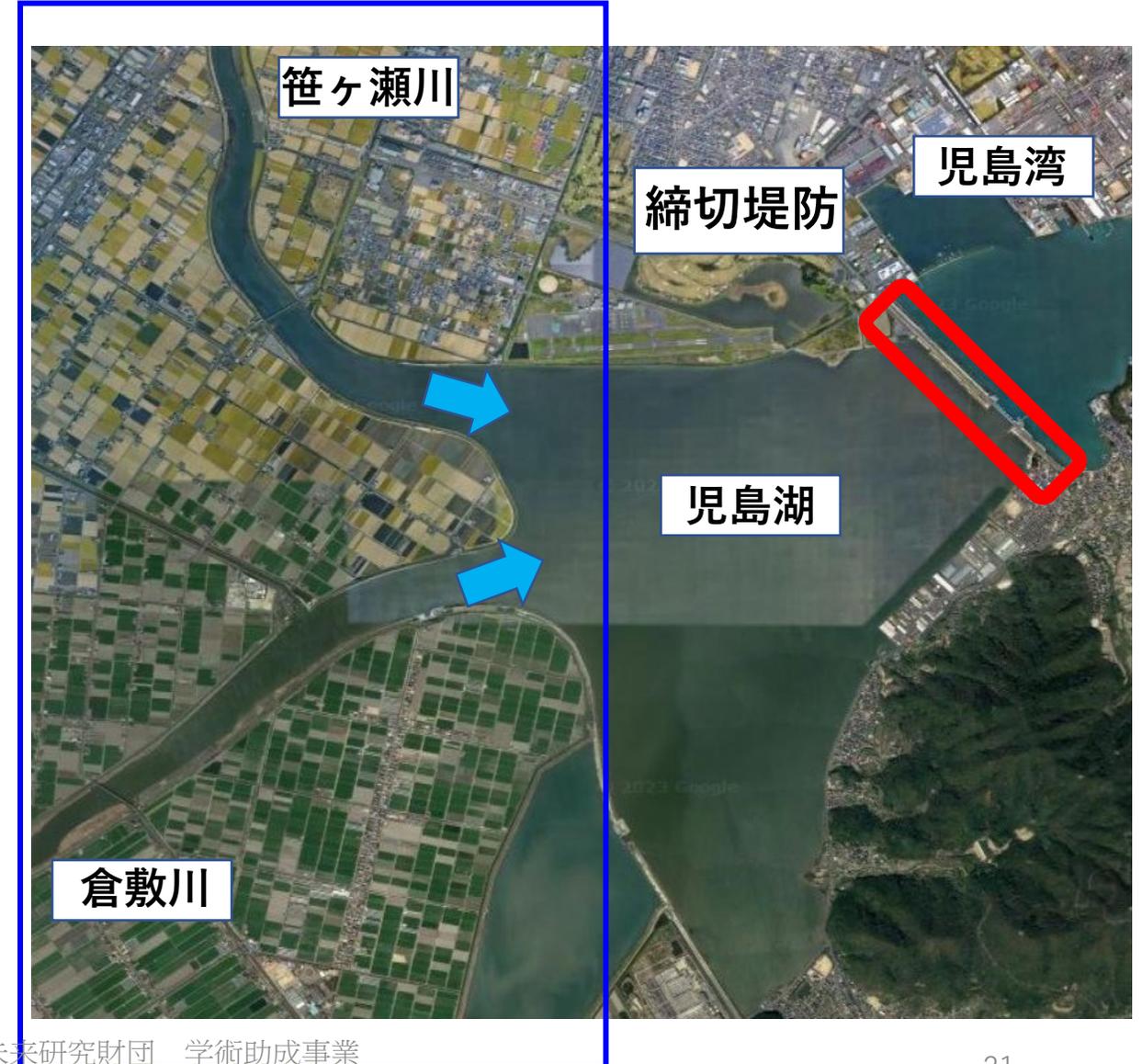
本考察では複数のGNSS受信機を用いて音響測深機送受波器が指す方向を求め。送受波器の指す方向を船舶の進行方向に対し直角の方向に変化させることによってより広範囲の計測が可能となる。今後はこの手法を含めた一連の手法の妥当性の検証し、また定期的な計測による地形変化の考察を行うことを目標とする。

## 岡山県児島湖

- ・ 笹ヶ瀬川，倉敷川からの流入
- ・ 締切堤防の樋門操作



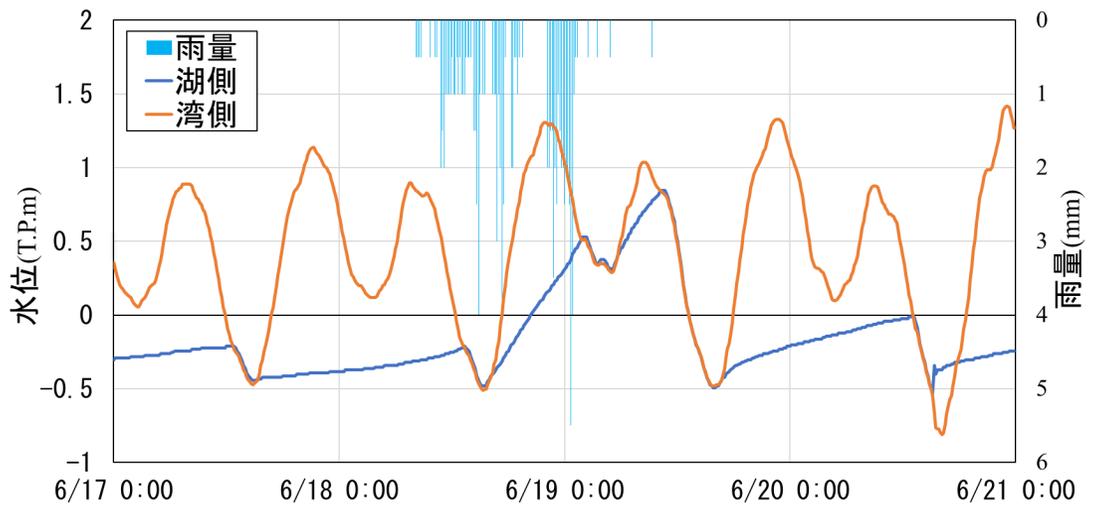
- ・ 県管理であるため水理及び地形データが乏しい
- ・ 児島湖のゲート操作が観測水位に影響



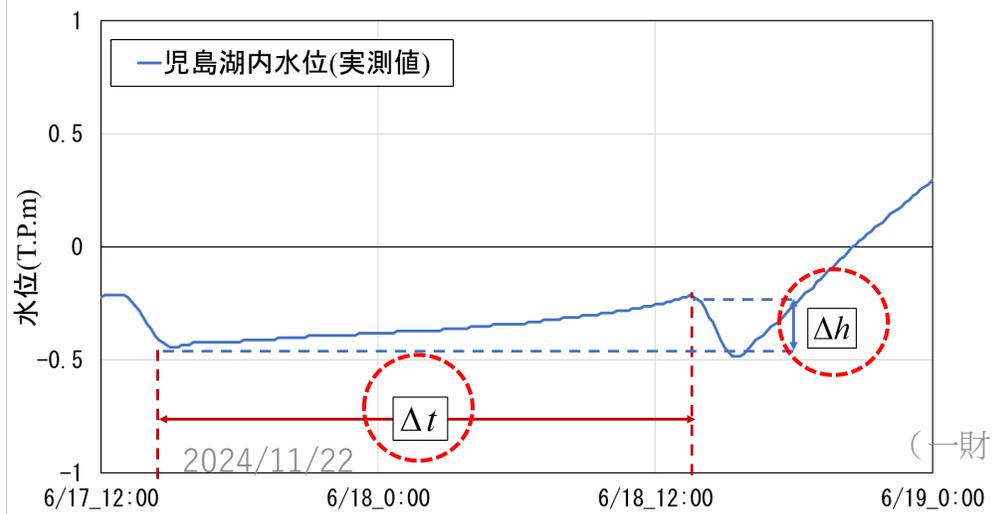
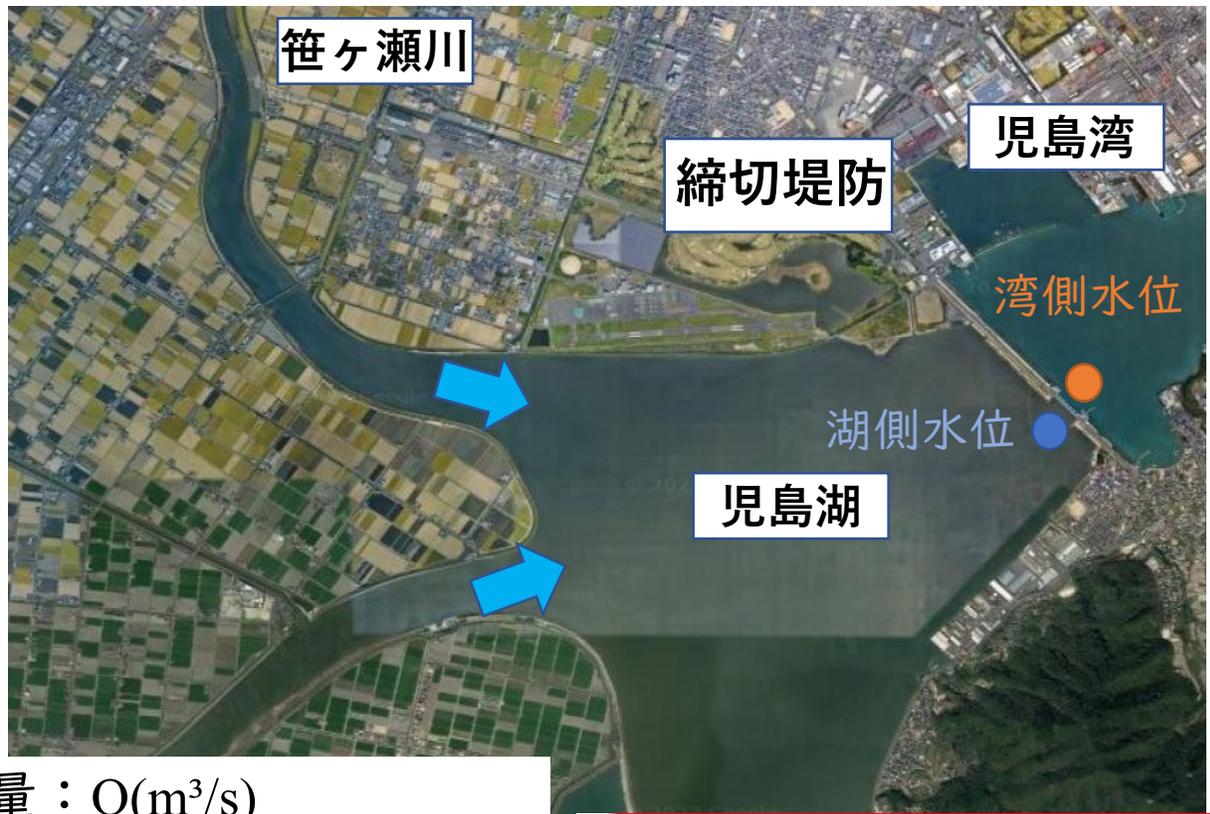
2024/11/22

H-Q曲線を用いた流量算出が困難

# 数値解析②流量算出方法



児島湖の水位上昇速度と表面積により  
河川流入量を算出する



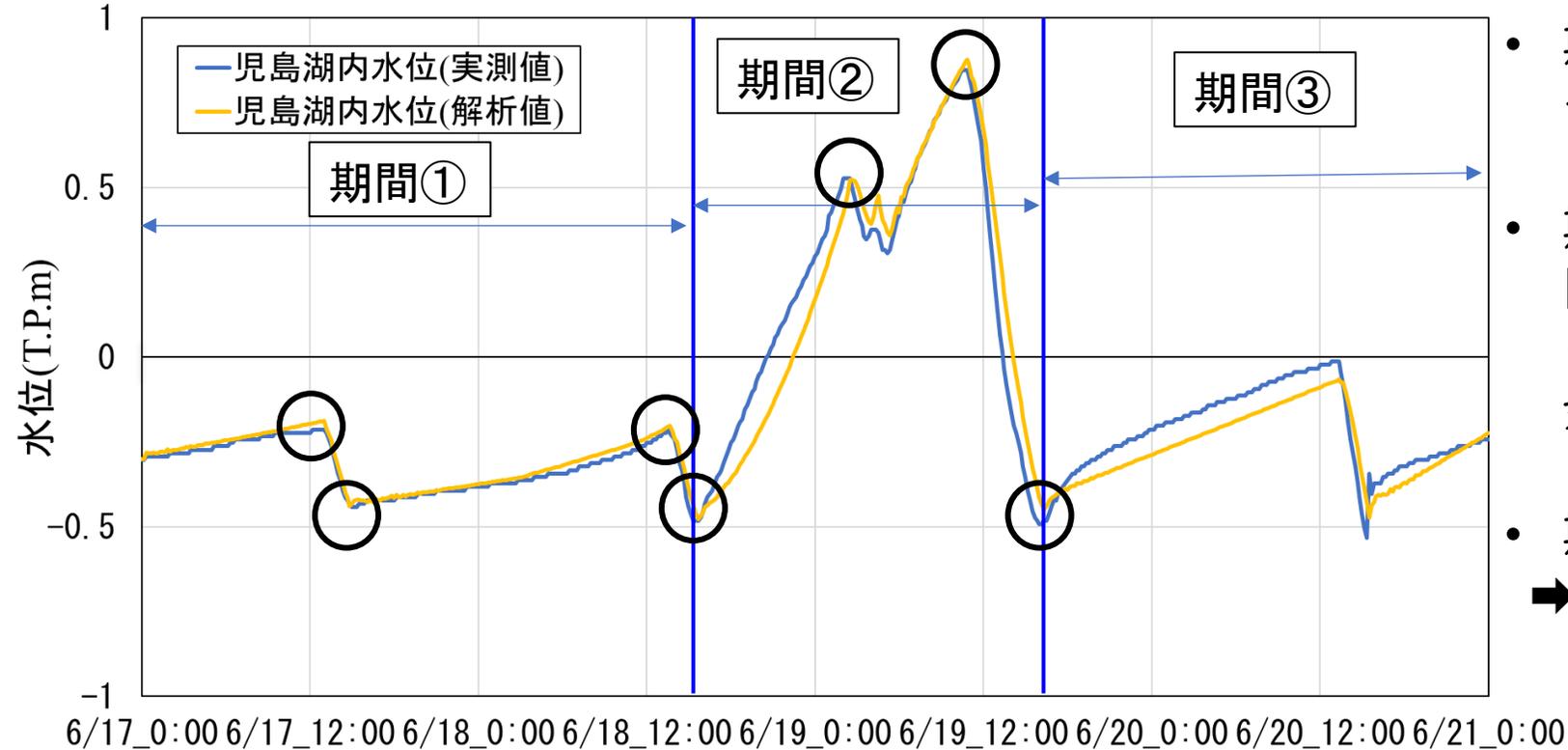
河川流入量： $Q(\text{m}^3/\text{s})$

児島湖水位上昇速度： $\frac{\Delta h}{\Delta t} (\text{m/s})$

児島湖表面積： $A(\text{km}^2)$

$$Q = \frac{\Delta h \times A \times 10^6}{\Delta t}$$

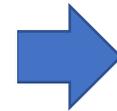
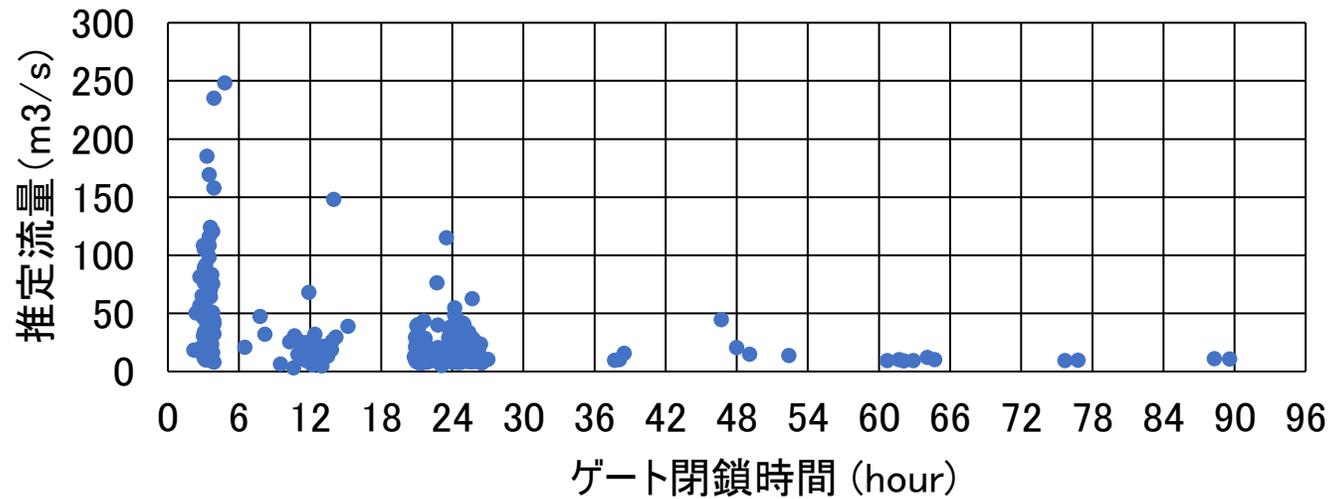
# 数値解析－③解析結果 推定流量の妥当性の検証



- 期間①において実測値と解析値は概ね一致
- 期間②において開始から約10時間の期間では解析値がやや小さい。しかし、その他期間では、各ピーク値を含め良好に再現できている
- 期間③においては、解析値が過小  
➡笹ヶ瀬川倉敷川以外からの排水が原因か

したがって、期間①②において簡易的な流量算出方法は有効であると判断する  
期間③の降雨イベント後の算出方法については今後改善の必要

# 数値解析－④推定流入流量の分析



年間のゲート操作回数：413回

最大流量：248.117 (m³/s)

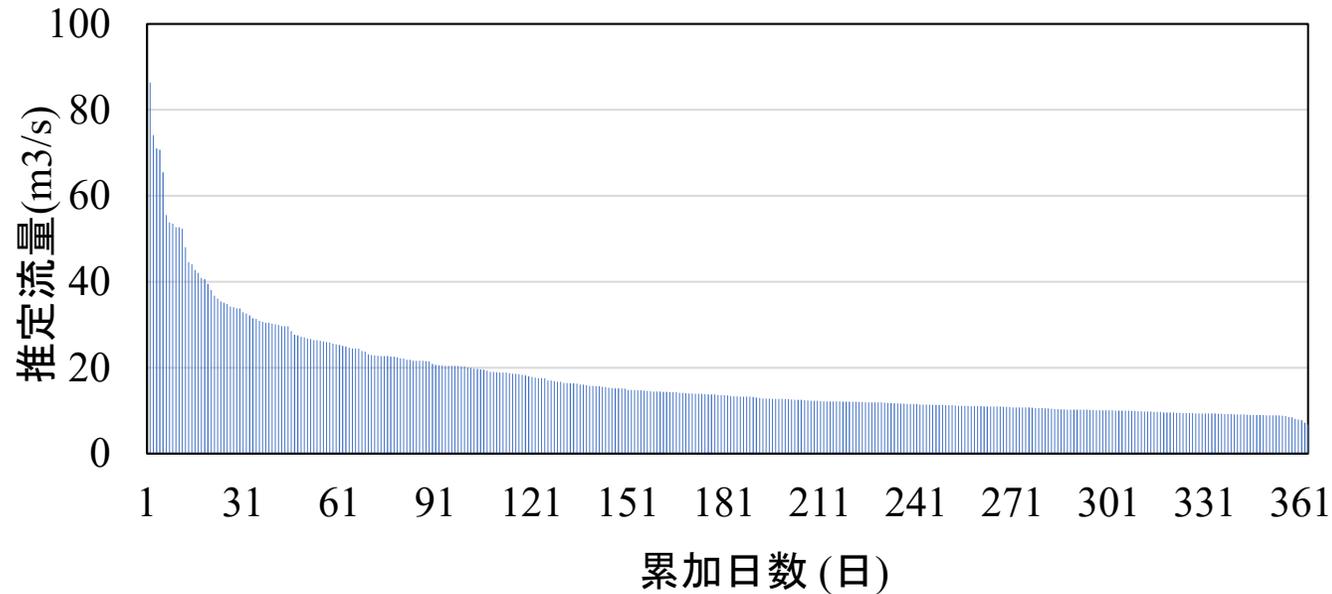
## 1年間(2019年)のゲート閉鎖時間に基づいたクラス分け

クラス	ゲート閉鎖区分	ゲート操作回数(回)	ゲート平均閉鎖時間(hour)	平均流量(m³/s)
1	0-6時間	66	3.3	64.1
2	6-12時間	18	10.6	22.1
3	12-24時間	106	20.3	20.2
4	24-36時間	206	24.9	15.9
5	36-48時間	4	40.3	20.0
6	48-72時間	9	58.4	12.1
7	72-96時間	4	82.6	10.2

約 75 %

# 数値解析－⑤日毎の推定流量

得られたゲート閉鎖期間の流量より日毎の流量を算出し、流量順に整理



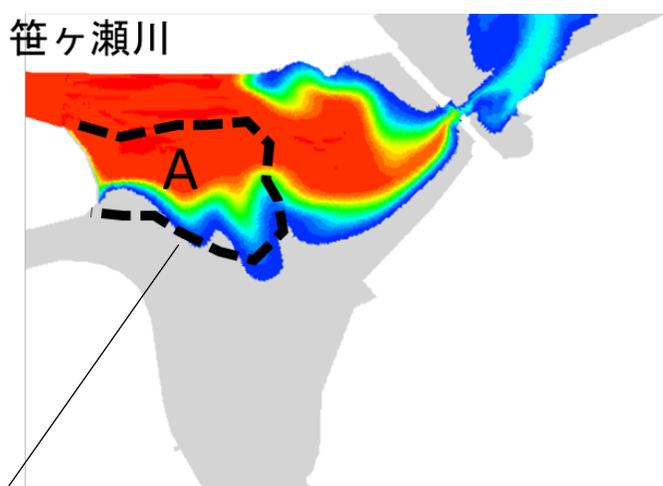
	累加日数	流量(m <sup>3</sup> /s)
豊水流量	95	20.4
平水流量	185	13.3
低水流量	275	10.8
渇水流量	355	8.8
年平均流量	—	17.9
最大流量	—	100.3

計画高水流量比で  
笹が瀬川と倉敷川に配分

平面二次元解析の境界条件に設定し、流量規模ごとの流況特性を検討

# 数値解析－⑥解析結果 豊水流量規模

## 河川からの流入水塊の分布（75時間後）

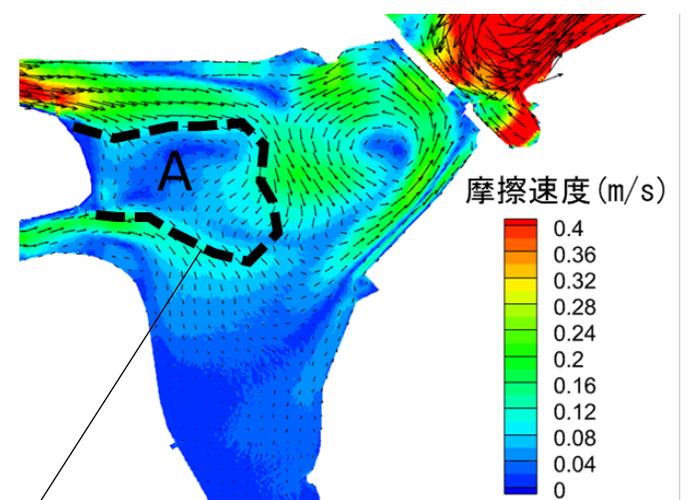


両河川からの流入水塊が侵入

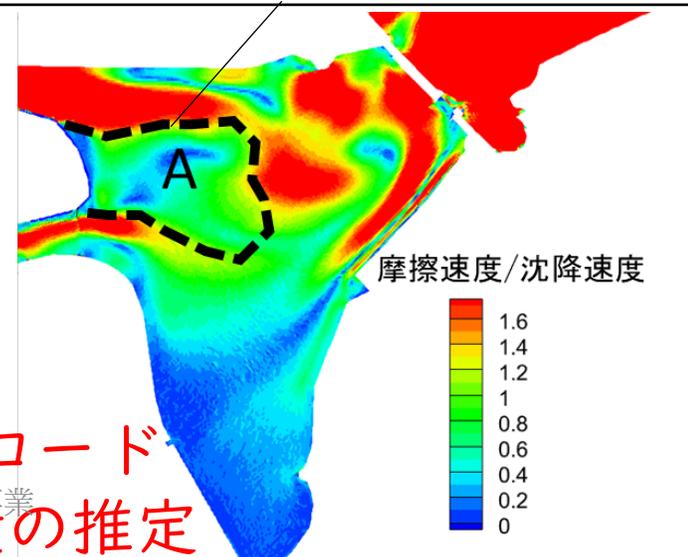
堆積傾向が大きい領域



## 粒径0.01mmの沈降速度と摩擦速度の比較

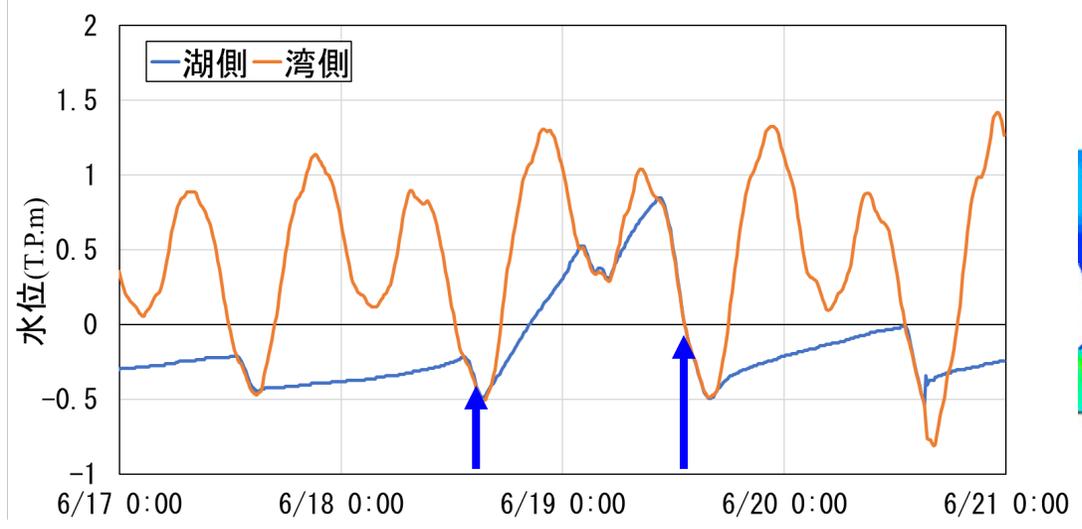


摩擦速度が推定沈降速度を下回る

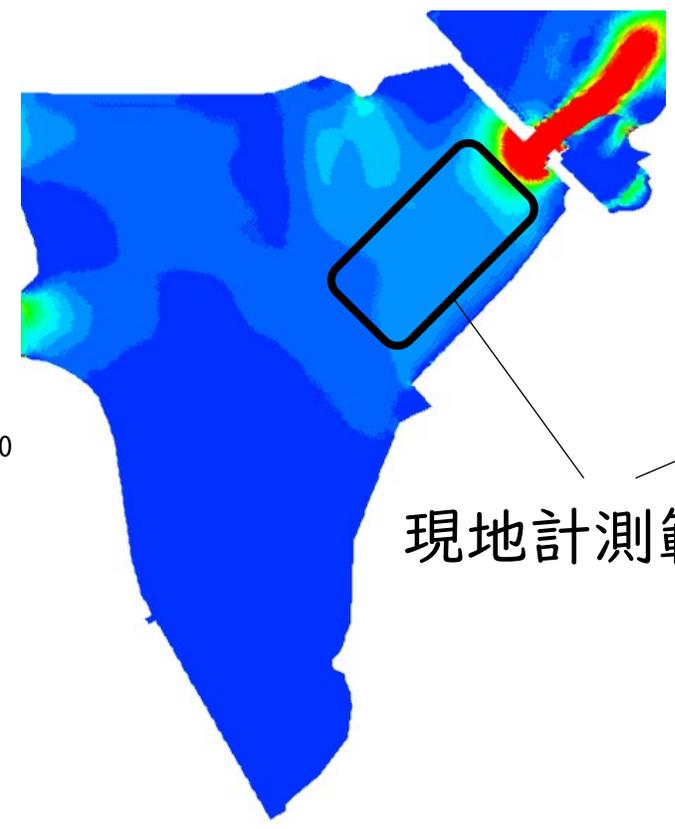


- 流量規模ごとの特徴
- 累加日数より年間のウォッシュロードによる土砂堆積量の推定

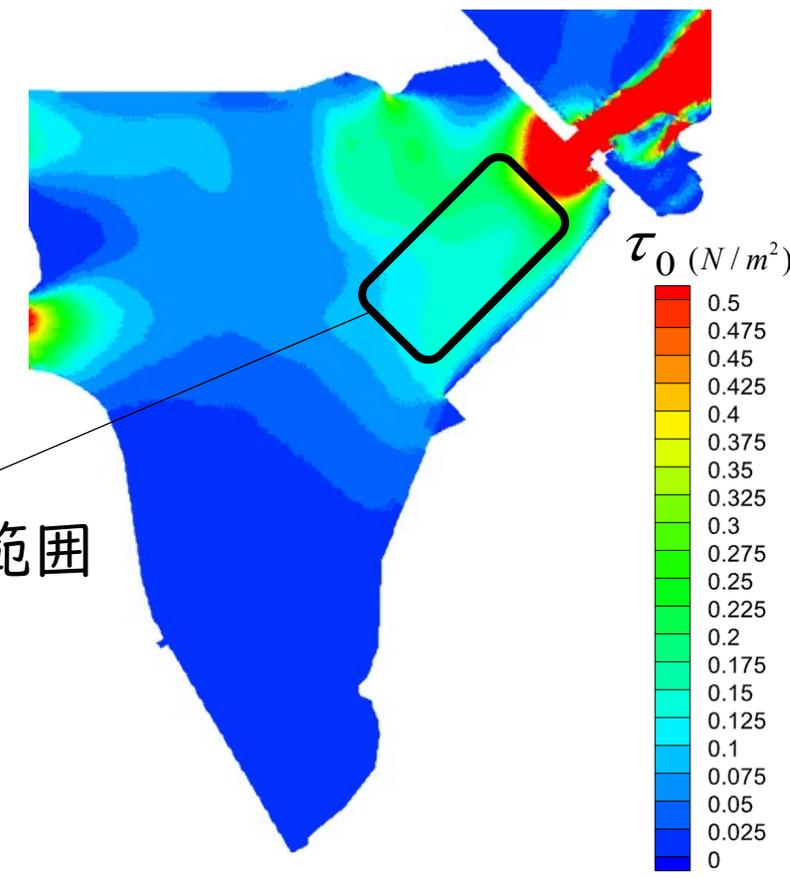
# 数値解析－⑦解析結果 ゲート操作による湖床せん断力



平水時



降雨イベント時



現地計測範囲

- 河床変動解析の実施
- 計測結果との比較

# 謝辞

本研究は，令和2年度および令和3年度（公財）ウエスコ学術振興財団研究活動費助成事業と（公財）八雲環境科学振興財団令和4年度環境研究助成および（一財）日本国土開発未来研究財団2022年度，2023年度学術研究助成と（一財）国土技術研究センター2023年度（第25回）研究開発助成事業による支援を受けた。これらの支援に対し深く感謝する。

# 参考文献

- [1] 平成30年7月豪雨災害の概要と被害の特徴，資料2-1，国土交通省  
[https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/hazard\\_risk/dai01kai/dai01kai\\_siryou2-1.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/hazard_risk/dai01kai/dai01kai_siryou2-1.pdf)
- [2] 令和元年台風第19号等に係る被害状況等について，令和2年4月10日9時00分現在，内閣府  
[https://www.bousai.go.jp/updates/r1typhoon19/pdf/r1typhoon19\\_45.pdf](https://www.bousai.go.jp/updates/r1typhoon19/pdf/r1typhoon19_45.pdf)
- [3] 令和2年7月豪雨による被害状況等について，令和3年1月7日14:00分現在，内閣府  
[http://www.bousai.go.jp/updates/r2\\_07ooame/pdf/r20703\\_ooame\\_40.pdf](http://www.bousai.go.jp/updates/r2_07ooame/pdf/r20703_ooame_40.pdf)
- [4] 国土交通省，令和3年7月1日からの大雨による被害状況等について（第25報），災害情報  
令和3年12月2日17:00現在  
<https://www.mlit.go.jp/common/001444234.pdf>
- [5] リビア洪水で8000人死亡 いったい何が？なぜ被害拡大？，NHK国際ニュースナビ  
[https://www3.nhk.or.jp/news/special/international\\_news\\_navi/articles/qa/2023/09/15/34502.html](https://www3.nhk.or.jp/news/special/international_news_navi/articles/qa/2023/09/15/34502.html)
- [6] 令和6年奥能登豪雨による非該当の状況について（危機管理室）【第24報 令和6年10月18日（金）14:00分現在】  
[https://www.pref.ishikawa.lg.jp/saigai/documents/higaihou\\_24.pdf](https://www.pref.ishikawa.lg.jp/saigai/documents/higaihou_24.pdf)
- [7] NHK，2024年11月5日6時19分 <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20241105/k10014629181000.html>
- [8] 環境省，報道発表資料，気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第6次評価報告書統合報告書の公表について，添付資料：AR6 統合報告書 政策決定者向け要約  
<https://www.env.go.jp/content/000121451.pdf>

[9] 国土地理院, 平面直角座標への換算

<https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/surveycalc/bl2xyf.html>

[10] 緯度経度地図, <https://fukuno.jig.jp/app/map/latlng/>

[11] Satoshi Iwakami, Masahiko Tamega, Shuji Jimbo, Masaji Watanabe, Numerical Techniques for Underwater Topographic Measurement with GPS and Echo Sounder, International Journal of Information Science & Technology, Vol. 3, No. 1, (2019), pp. 81–85.

<http://ijistech.org/ijistech/index.php/ijistech/article/view/37>

<http://ijistech.org/ijistech/index.php/ijistech/article/view/37>

[12] Satoshi Iwakami, Masahiko Tamega, Masahide Sanada, Michiaki Mohri, Yoshitaka Iwakami, Shuji Jimbo, Masaji Watanabe, Study of underwater topography change with measurement and analysis,

International Conference on Advanced Information Scientific Development (ICAISD), Journal of Physics: Conference Series, 1641 (2020) 012003,

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1641/1/012003/pdf>

[13] Satoshi Iwakami, Masahiko Tamega, Masahide Sanada, Michiaki Mohri, Yoshitaka Iwakami, Naoki Okayamoto, Shuji Jimbo, Masaji Watanabe, Study on Change of Topography in Water Area with Field Measurement, Journal of Geoscience and Environment Protection, Vol. 9 No. 4, April 2021.

<https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=109431>

[14] Satoshi Iwakami, Masahiko Tamega, Masahide Sanada, Michiaki Mohri, Yoshitaka Iwakami, Naoki Okamoto, Ryoussuke Asou, Shuji Jimbo, Masaji Watanabe, Mathematical modeling and computational analysis of underwater topography with global positioning and echo sounder data, Journal of Applied Mathematics and Physics, Vol. 9 No. 5, May 2021.

<https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=109663>

[15] 岩上 聡, 爲賀 雅彦, 真田 将英, 毛利 道明, 岩上 義隆, 岡本 尚己, 光井 英視, 神保 秀司, 渡辺 雅二, 水面下の地形の形状推定に伴う問題点と計測結果の解析手法の提案, インダストリアルマテリアルズ, 応用数理, 第33巻・第1号, 32 - 39, 2023年3月 (依頼執筆)

[16] Satoshi Iwakami, Masahiko Tamega, Masahide Sanada, Michiaki Mohri, Yoshitaka Iwakami, Naoki Okamoto, Ryoussuke Asou, Shuji Jimbo, Masaji Watanabe, Numerical study of underwater topography with measurement data, AIP Conference Proceedings Volume 2714 Issue 1, 030014 (2023) <https://pubs.aip.org/aip/acp/issue/2714/1>

[17] Satoshi Iwakami, Masahiko Tamega, Masahide Sanada, Michiaki Mohri, Yoshitaka Iwakami, Naoki Okamoto, Eishi Mitsui, Hidetaka Chikamori, Ryosuke Akoh, Shuji Jimbo, Masaji Watanabe, Measurement and Computational Study of Underwater Topography, Journal of Geoscience and Environment Protection, Vol. 11 No. 4, April 2023.

DOI: 10.4236/gep.2023.114012

<https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=124959>

[18] Satoshi Iwakami, Masahiko Tamega, Masahide Sanada, Michiaki Mohri, Yoshitaka Iwakami, Naoki Okamoto, Eishi Mitsui, Hidetaka Chikamori, Ryosuke Akoh, Shuji Jimbo, Masaji Watanabe, Correction of Error due to Vessel Movement in Underwater Topographic Data Measurement, Journal of Geoscience and Environment Protection, Vol. 12, No. 4, April 2024. DOI: 10.4236/gep.2024.124010 <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=133202>