

河川砂防技術研究開発【開発成果概要】

①開発事業者	組 織 名 (ふりがな)	開 発 代 表 者 名	役 職
	東京大学 (とうきょうだいがく)	松葉 義直	講師
②開発経費 (単位: 万円) ※端数切り捨て。	令和5年度	令和6年度	総 合 計
	999万円	995万円	1,994万円
③共同開発者氏名 (開発代表者以外の開発者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)			
氏 名	所属機関・役職 (※令和 7 年3月31日現在)		
西畑 剛	五洋建設株式会社・海岸海洋グループ長		
琴浦 毅	五洋建設株式会社・ICTグループ長		
西 広人	五洋建設株式会社・主任		
松長 悠太	五洋建設株式会社・主任		
水野 辰哉	五洋建設株式会社・主任		
田島 芳満	東京大学・教授		
④開発の目的・目標 (様式革新-2に記載した開発の目的・目標を簡潔に記入下さい。)			
<p>沖合で発達する高波浪は、沿岸部で砕波による減衰を経て、波浪うちあげとして陸域へと作用する。この波浪うちあげこそが高波による堤防後背地の浸水被害をもたらす直接的な要因である。沿岸住民の避難や迅速な水防活動のためには、波浪うちあげ高の観測技術の構築が求められる。</p> <p>本技術開発では、近年海岸工学分野で波浪・地形の計測に用いられている LiDAR を波浪うちあげ高観測へ適用する。LiDAR とは、Light Detection and Ranging の略称であり、レーザー光を用いた測距技術である。近年では交通の分野で自動運転を実現するためのセンサ群の一つとして LiDAR のニーズが高まっており、高い防水・防塵性能を有した LiDAR スキャナが比較的安価に入手可能になっている。市販で入手可能な LiDAR は主に近赤外光領域のレーザー光を用いており、それらを用いることで海岸地形のみならず水面の計測も条件によっては可能であることが知られている。また、センサ面に自然に入る光を取得することで撮像を行う受動的なセンサであるカメラとは異なり、LiDAR は自らレーザー光を発することで測距を行う能動的なセンサである。そのため、夜間においても屋外環境下で計測が可能になるため、常時の海岸モニタリング技術としてその活用が期待される。そこで本技術開発では、LiDAR を用いることで下に掲げる要件を満たす波浪うちあげ高の観測技術を構築することを目的とする。</p> <p>目的：波浪うちあげ時の飛沫ではなく、連続的な水塊によるうちあげ高を観測するとともに、波の不規則性を踏まえ、20分程度の観測値から上位2%、1/10、1/3等の平均した波浪うちあげ高を算出する処理までを実施する手法の構築</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 観測施設1基あたり100万円以下。 ● 堤防・護岸等の前面(海側)の波浪うちあげ高(天端を超過するものも含む)を定量的に観測できること。 ● 強風、高波浪、降雨、夜間、低温等の条件下において常時観測できること。 ● 波には周期があることや波浪のうちあげは瞬間的な現象であることを踏まえ、観測間隔を0.1s程度にするなど、波浪うちあげ高を捉える工夫が必要。 ● 一定の精度(±50cm程度)で波浪うちあげ高を観測できる技術であること。 			

⑤開発成果

1 五洋建設技術研究所保有の大型水槽を用いた波浪うちあげ高計測実験

LiDARによる水面部点群の取得条件の特定および精度検証のため、五洋建設技術研究所が保有する大型水槽において、波浪うちあげ高の計測実験を行った。

図1に実験断面図を示す。断面水槽は延長50 m、幅0.6 m、高さ1.2 mであり、沖側の水深を0.8 mとした。実験には中水を使用している。後述する現地実証試験地の石川県・片山津海岸を参考に1/30勾配模型を設置した。水深0.1 mの位置に水平床を設け、図2に示す① 2:1勾配の直立型護岸、② 消波ブロック被覆した直立型護岸および③ 緩傾斜型護岸を模した3種類の断面模型を設置した。LiDARは堤体模型上方約3 mの位置に設置した。本実験では2つのLiDARを用いた。一つは回転機構を有する3D-LiDARのHesai社製XT-32で、もう一つは回転機構を持たないソリッドステート式と呼ばれる3D-LiDARのLivox社製Aviaである。後述する現地への応用に際しては安価でかつ計測可能距離の長い後者を使用しているが、前者は計測精度が高いことから現地と比較してスケールの小さい水槽実験において有用であると判断し採用した。波浪条件としては規則波・不規則波について、波高・周期を変化させて実験を行っている。

図3は砕波が生じる波浪条件において撮影された画像と点群を比較したものである。右に示す散布図がLiDAR(XT-32)に取得された点群であり0.1秒間に取得されたものである。点の色は反射強度を表す。図3のケースでは沖から堤体前面、越波水塊までの一連の水面において点群が取得されている。砕波により水中に連行された気泡によりレーザー光が乱反射し、点群が取得されていると考えられる。図4に砕波の生じない波浪条件における点群の取得状況を示す。緩傾斜護岸の天端まで遡上波が到達しているが水面部の点群はほとんど取得されていない。

本検討より、不純物の少ない中水を用いた実験では静水面や砕波の生じない穏やかな波浪条件においてLiDARによる水面計測が困難であることがわかった。一方、波浪のうちあげが問題となるような高波浪時には砕波により水中に気泡が連行されることで砕波帯より岸側の水面で点群が連続的に取得可能であり、LiDARの波浪うちあげ高の計測に対する適用性が示された。

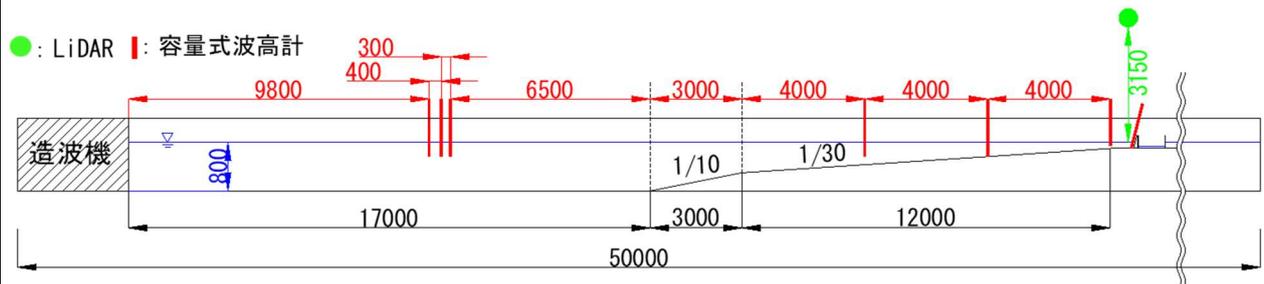


図1 実験断面図（縦横比2:1）単位：mm

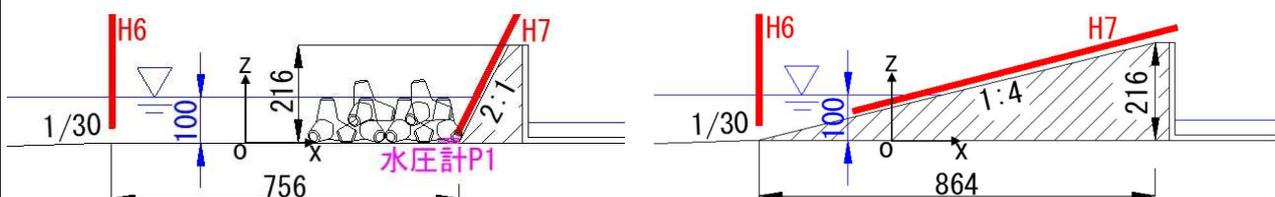


図2 堤体模型（縦横比1:1）単位：mm（左：直立型護岸（消波あり）、右：緩傾斜護岸）

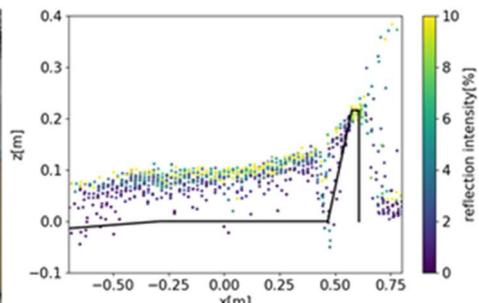


図3 越波発生時の点群の取得状況（直立型護岸、規則波、 $H=0.10$ m、 $T=2.0$ s）

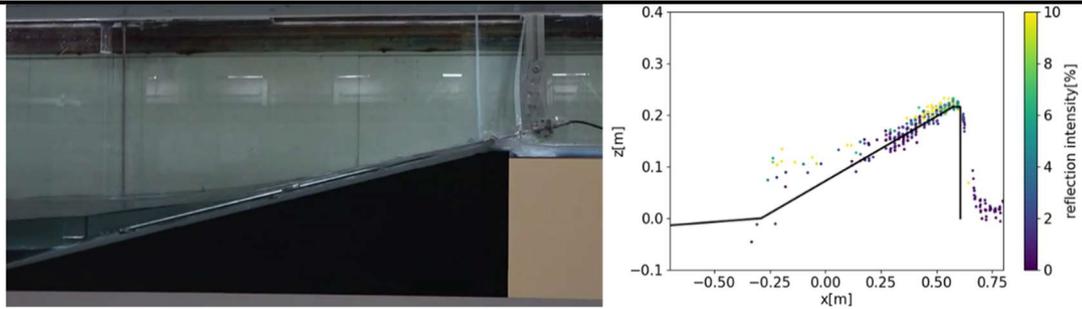


図 4 越波発生時の点群の取得状況（緩傾斜護岸、規則波、 $H=0.04$ m、 $T=2.4$ s）

2 北陸の冬季風浪を対象とした現地実証

2.1 LiDAR を用いた波浪うちあげ高観測方法

LiDAR を用いたリアルタイム波浪うちあげ高観測システムの現地実証を実施した。地点としては電源確保の観点から国土交通省の運用する海岸監視用の CCTV 設置地点を対象とした（図 5）。一つは富山県の下新川海岸の生地であり、透過型防波堤によって守られる緩傾斜護岸上での観測に焦点を当てた。残りの三地点は石川県の CCTV 設置個所である。一つは片山津海岸の篠原であり、沖合には離岸堤等はなく外洋に面した磯浜での波浪うちあげを観測対象とした。残りの二地点は美川海岸の永代地区並びに鹿島地区である。ここは沖合に離岸堤を有しており三次元的な砂礫混合海浜が広がっている。

最初の現地実証試験は 2023 年 12 月 13, 14 日から生地ならびに篠原において開始した。その後二地点では夏季を除いて継続した観測を続け、2024 年の 12 月より観測を再開し、2025 年の 3 月初旬に観測機材の撤収を行った。美川海岸二地点での現地実証試験は 2024 年 11 月 19, 20 日より開始し、2025 年の 3 月初旬に終了している。初年度の現地実証試験では様々なコンディションを対象としたデータの取得を大きな目的として、ここから得られた膨大なデータをもとに波浪うちあげ高の計測手法の構築を進めた。次年度の現地実証では、LiDAR による計測結果のリアルタイム処理と可視化を含めた全体の試験を目的として試験を行った。

今回の現地実証で用いたシステム全体を図 5 に示す。本システムでは、LiDAR による波浪うちあげ高観測の精度検証のために用いることを目的として、市販の屋外用 Web カメラも同時に設置した。LiDAR には前述の Livox Avia を用いている。上記二つの観測機材はともに CCTV の設置されている支柱の上部に設置した。いずれの地点においても、LiDAR は護岸天端から海岸線までを視野にとらえるような画角として設置した。支柱下部には PoE スwitchングハブならびに機材の制御・通信用 PC を格納するキャビネットボックスと屋外用のモバイルルーターを据え付けた。主電源は国交省 CCTV の機側装置内の空きタップから引き込み供給している。ケーブル類は PF 管で保護の上、CCTV の点検業務に支障のない位置に支柱に添わせる形で据え付けた。

LiDAR による点群の計測・保存はすべて現地に設置した PC によって行った。LiDAR の制御には公式の Software Development Kit である Livox-SDK をベースとしたプログラムを用いている。観測データは 10 分とし、20 分に 1 度のペースで観測を実施した。LiDAR によって取得された点群からの波浪うちあげ高の算出においては、各海岸で設定した岸沖方向測線近傍の点群データをもとにして計算を行った。LiDAR 点群からの波浪うちあげ高の算出のためには、地表面と水表面の判別が重要な課題となる。今回新たに構築した手法では、現地で確認された霧や降雪の影響に対処するため、各点群それぞれに対して水表面もしくはそれ以外、の判定を行うことにした。本技術開発で構築した波浪うちあげ高算出の手順は以下のとおりである。

- Step 0 座標設定と岸沖方向測線近傍の点群の抽出
- Step 1 地表面の算出：LiDAR から得られた点群をもとに、岸沖方向測線上の海浜地形を算出
- Step 2 地上構造物の算出：海浜地形より高所に存在する地上構造物（例：消波構造物）位置の判定
- Step 3 水表面上の点群の判定：同じ水平座標上における地表面もしくは地上構造物との高さの違いにもとづいて水表面上の点群を判定する
- Step 4 汀線の判読：水表面上の点群の連続性を加味し、各時刻の汀線位置・高さを判読する
- Step 5 波浪うちあげ高パラメータの計算：得られた汀線変動をもとに、波浪うちあげ高パラメータ（ $R_{2\%}$ など）を算出する

また、本現地実証では一般的なクラウドサービスを用いることで、上記のプロセスを経て得られた波浪うちあげ高観測値をリアルタイムに確認できるシステムを構築した。ここでは、Google の提供する Google スプレッドシートおよび Looker Studio を用いた。前者は一般的な表計算用のツールであり、後者はそうしたデータの可視化ツール（BI ツール）である。算出された波浪うちあげ高および地形情報は、データの記録用に作成したスプレッドシートに現地の PC から随時アップロードされる。そのうえで、Looker Studio において対象のスプレッドシートを参照して自動的にグラフ化することで、観測データの可視化を可能にした。LiDAR を用いた波浪うちあげ高算出に要する処理時間は対象領域の広さにも依存するが、10 分の観測データに対して今回対象とした 4 地点においておおむね 5 分前後であり、計算終了後は直ちにその結果を Web 上で確認することができる。

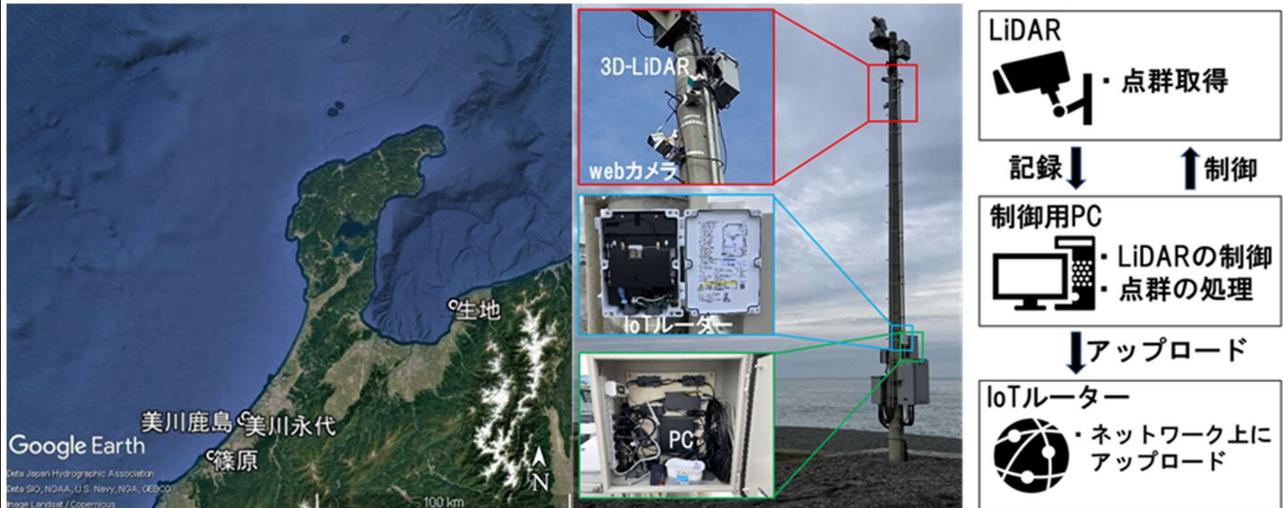


図 5 観測地点と観測システムの概要

2.2 観測結果と精度検証

2023-2024 年冬季の波浪うちあげ高の観測結果を図 6 に示す。図の上段には石川県松任海岸に位置する徳光波浪観測所で観測された有義波高を参考のため示している。2023-2024 年においては、篠原 CCTV 地点において 5 m ほどに達する波浪うちあげ高（ここでは上位 2% うちあげ高 $R_{2\%}$ ）が数回計測された。また、波高の時系列変化におおむね相関する形の波浪うちあげ高が観測されている。一方、高波浪時では $R_{2\%}$ のばらつきが大きく、特に深夜から朝方に海水温と気温の差が大きくなる時間帯に生じる濃霧によりそうした傾向が顕著になるように見受けられた。

また、2024-2025 年冬季の観測結果についても同様の傾向がみられている（図 7）。ここでは篠原 CCTV 地点に加え、生地および美川鹿島 CCTV 地点での結果も合わせて示す。篠原 CCTV 地点では全体的に 2023-2024 年冬季と同様に、波高変化に追従して増減する波浪うちあげ高が観測された。一方、2 月後半の通常時に大きい波浪うちあげ高が観測された。これは、積雪等の誤差要因の影響である。生地については、冬季の観測再開以降、1 月 31 日に外付け HDD の容量の問題が生じたことに加え、長期にわたり安定して計測できていたことから連続観測を終了とした。1 月 10-11 日に見える異常な $R_{2\%}$ の増大は、夜間（20-21 時）および早朝（翌 4-5 時）に生じており、激しい降雪の影響が考えられる。また、美川鹿島においては、12 月 1 日の波浪うちあげ高観測開始から順調に計測を行えたが、翌年 1 月 25 日以降、LiDAR の不具合により欠測となっている。波浪うちあげ高の観測結果については、全体を通じておおむね良好に計測できたが、一部異常に大きい波浪うちあげ高が観測された。主な原因としては、海浜部に形成される潮だまりやセンサ面に付着した塩分の影響があげられる。

定量的な計測精度を議論するため、Web カメラによる撮影動画を用いた精度検証を実施した。精度検証の対象は 2023-2024 年冬季の篠原 CCTV 地点のデータとし、視野の確保できる朝から夕方にかけての撮影動画を検証に用いた。この精度検証においては、波浪うちあげ高算出の際に取得した沿岸方向座標 $y = y_t$ における岸沖方向断面地形 $z_b(x)$ をもとに、地表面上の点、 $(x_i, y_t, z_b(x_i))$ に対応する色情報を撮影動画の各フレームより抽出した。それらを縦軸に岸沖方向座標、横軸に時間方向に並べた時空間画像を作成した。この時空間画像からエッジ検出により汀線の水平位置 $r_x(t)$ を求め、地形データを用いて汀線の高さ変動 $r_z(t)$ とした。検証用データは合計 966 であり、精度担保のため時空間画像のエッジ検出結果はすべて目視で確認の上、誤差があるものは手動で修正を行った。こうして撮影動画から得られた $r_z(t)$ をもとに、前述 Step 5 と同様の形で波浪うちあげ高を算出した。

上記により得られた波浪うちあげ高 $R_{2\%}$ について時系列で比較した結果を図 6 下段に示す。撮影動画から得られた波浪うちあげ高に対し、LiDAR によって計測した波浪うちあげ高が整合していることが分かる。誤差が生じた時刻の多くは高波浪時で比較的過大評価となっている。これは先述の濃霧や降雪の影響であると考えられる。また、他の波浪うちあげ高パラメータを含め LiDAR による計測とカメラによる計測を比較した結果を図 8 に示す。計測時間内での最大うちあげ高 R_{max} については、多くのデータは互いに整合している一方、ノイズの影響を顕著に受けるために誤差が大きくなっている。 $R_{2\%}$ については、全体としては LiDAR が過小評価傾向であるが 0.1 m 程度であり、汀線の抽出方法の違いによるものと考えられる。多くのデータは互いに整合している一方、一部のノイズの影響を受けた時間帯の影響もあり、Root mean squared error (RMSE)については 0.34 m となった。一方、 $R_{1/3}$ についてはより LiDAR も安定した計測となっており、RMSE は 0.25 m 程度である。Wave setup については、全体として LiDAR データが過少となっており、bias は -0.19 m となったが、RMSE はより小さく、0.25 m となった。

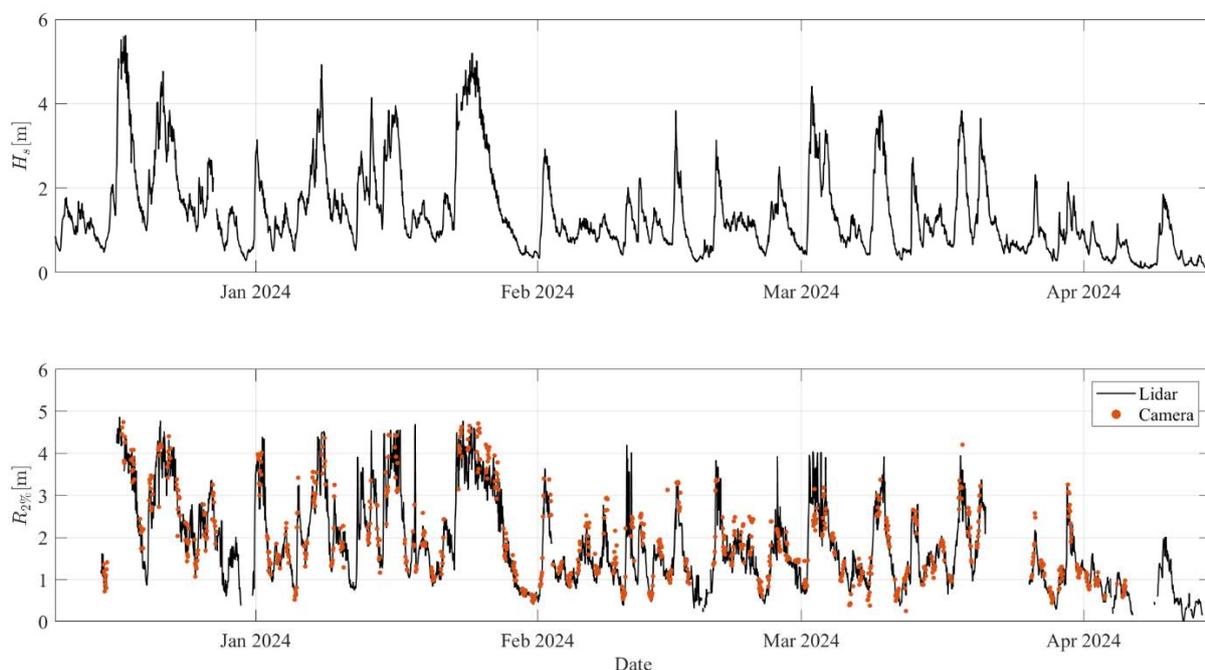


図 6 2023-2024 年冬季の篠原 CCTV 地点での観測結果（上段）有義波高、（下段）波浪うちあげ高

3 技術開発成果のまとめ

本技術開発では、LiDAR を用いた波浪うちあげ高のリアルタイム観測システムを構築した。本技術により、10 分間程度の計測データから、波浪うちあげ高の統計量を算出することが可能になった。なお、技術開発開始当初において設定していた目標については、下記の通り達成することができた。

- 観測施設 1 基あたり 100 万円以下を目標とする。
 - 観測システム一式で 50 万円程度+取り付け費用（現地実証実績では約 50 万円）程度であるが、電力や高所の準備については別途検討が必要である。
- 堤防・護岸等の前面（海側）の波浪うちあげ高（天端を超過するものも含む）を定量的に観測できること。
 - 十分な精度で計測可能である。
- 強風、高波浪、降雨、夜間、低温等の条件下において常時観測できること。
 - 激しい降雪時や濃い霧の条件下で精度低下は生じるが、常時観測可能である。
- 波には周期があることや波浪のうちあげは瞬間的な現象であることを踏まえ、観測間隔を 0.1 s 程度にするなど、波浪うちあげ高を捉える工夫が必要。
 - 0.6 s ごとの汀線変動を取得できており、十分な時間解像度で現地の波浪うちあげ現象を観測できる。
- 一定の精度（±50 cm 程度）で波浪うちあげ高を観測できる技術であること。
 - 上位 2%波浪うちあげ高については RMSE で 0.34 m という結果であり達成されている。

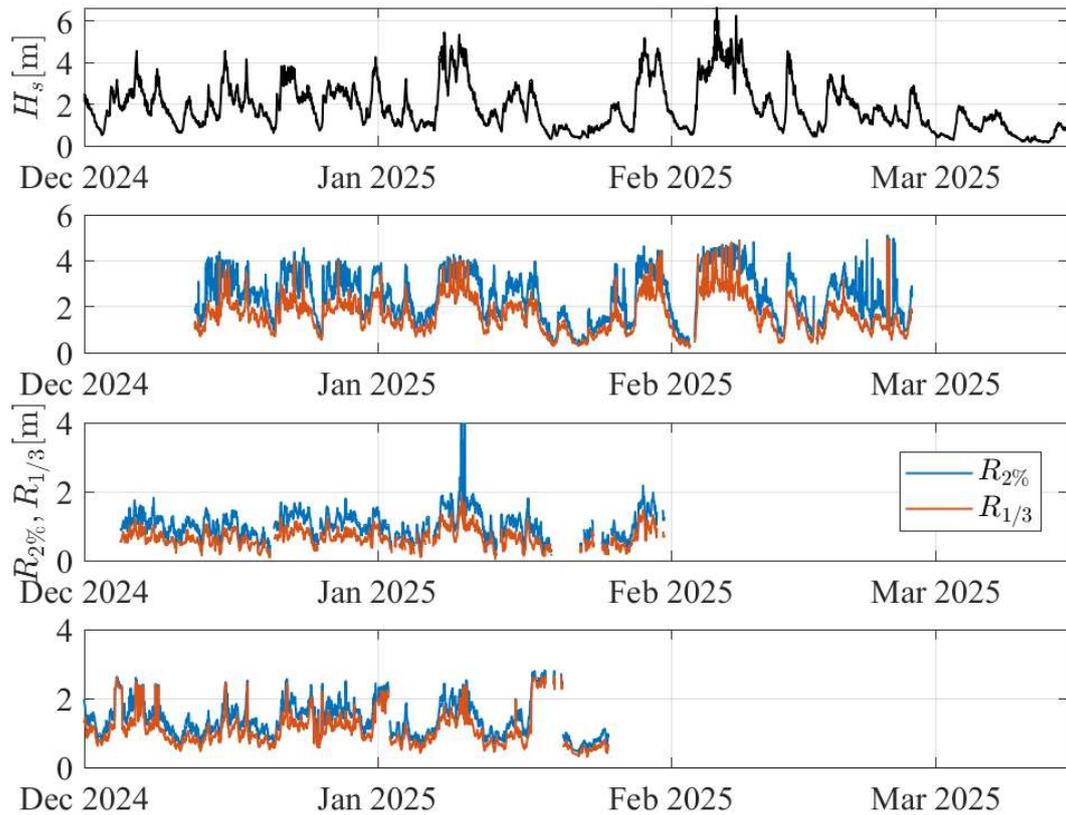


図7 2024-2025年冬季の観測結果（上段）有義波高、（2-4段目）篠原、生地、美川鹿島での波浪うちあげ高

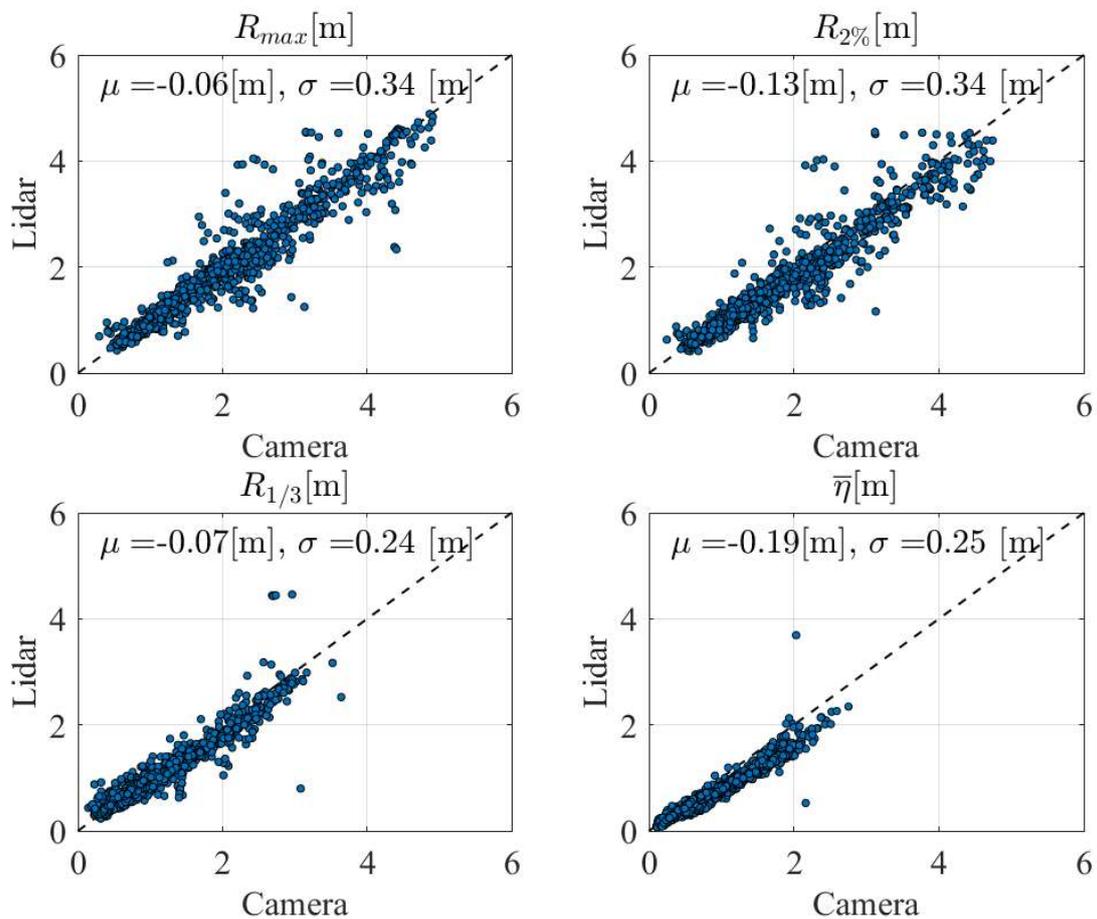


図8 2023-2024年冬季の篠原 CCTV 地点での精度検証結果（図内 μ : bias, σ : RMSE)