

LiDARの波浪うちあげ高計測への適用性検討

水野 辰哉¹・松長 悠太²・松葉 義直³・西 広人²・琴浦 毅²・
西畑 剛²・田島 芳満⁴

¹正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail: tatsuya.mizuno@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

²正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

³正会員 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻
(〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

⁴正会員 東京大学 大学院工学系研究科 社会基盤専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

越波による浸水発生時において、沿岸住民の避難等に活用するために堤防・護岸における波浪うちあげ高の把握が必要である。本研究では近赤外光を用いた測距技術であるLiDARによる波浪のうちあげ高計測手法の構築を目的とし、二次元造波水槽を用いた計測実験を行った。実験では縮尺1/25の直立型および緩傾斜型の護岸模型に対し規則波を作用させ、波高計で計測された水位との比較からLiDAR点群のノイズ特性・精度について検討を行った。実験の結果、砕波が発生する条件において砕波帯から護岸模型前面までの気泡を含んだ水面および越波飛沫において点群が取得され、点群から波浪先端位置を抽出することにより波浪うちあげ高の計測が可能となった。また、数値波動水槽による断面解析結果との比較から点群の取得条件の検討を行った。

Key Words : LiDAR, point clouds, wave run-up measurement, hydraulic experiment

1. はじめに

高潮・高波により大規模な越波が生じると堤防・護岸の後背地において人的被害や住家の浸水被害が発生する。越波による浸水被害発生時には水防警報が発令され、浸水拡大を抑制する目的の水門・陸こうの操作や沿岸住民の避難誘導などの水防活動が実施される。水防警報の発令基準としては、波浪や風況、潮位に加え堤防・護岸における波浪うちあげ高が指標として定められている¹⁾。波浪のうちあげ高の観測事例としてステップ式波高計を海岸堤防上に設置し、接触式で直接越波する際の海水面の観測を行った事例²⁾や、ビデオカメラから得られた静止画像から非接触方式でうちあげ高を計測した事例³⁾がある。いずれも現地観測において十分な精度の波浪うちあげ高が計測されているが、前者は海岸堤防上に観測機器を設置するため海岸利用者の安全性に影響しないように、機器設置方法を工夫する必要があり、設置条件が限られること、後者は夜間や荒天時の視界不良時の運用に課題が残る。

本研究ではこうした課題を解決する波浪うちあげ高の観測手法としてLiDAR(Light Detection and Ranging)を用いることを検討した。LiDARは近赤外光を照射し、物体まで

のパルスの往復時間をもとに物体までの距離を計測し、LiDARを基準座標とするXYZ座標や反射強度の情報を有する点群を生成する。LiDARから照射する近赤外光を用いるため、夜間でも点群を取得可能である。滑らかな水面において近赤外光は鏡面反射し、反射強度が低下するために欠測となり、LiDARによる水面検出は入射角が水面にほぼ垂直となっているときに限られる。一方で気泡や砂粒子を多量に含んだ白波部においては近赤外光が乱反射することで点群が線的・面的に取得できることから、遡上域の連続的な水面観測などへの活用が進んでいる。例えば、Blenkinsopp et al.(2010)⁴⁾は遡上域に2D-LiDARを設置し、岸沖方向延長10mの測線において、1m間隔で設置した10台の超音波式水位計と1台のLiDARの観測水位の比較を行い、LiDARの超音波式水位計に対するRMSEが0.04m以下となることを現地観測にて確認している。またBlenkinsopp et al.(2012)⁵⁾は水にカオリナイトを混ぜて懸濁させることで、砕波前の滑らかな水面においても2D-LiDARによって点群が取得され、容量式波高計と同等の精度を得られることを水槽実験にて確認した。また、松長ら(2023)⁶⁾は3D-LiDARを用い消波ブロック、鋼管杭などの構造物周辺の面的な水位変動を計測している。このように、白波部や懸濁した条件においてはLiDARを用い

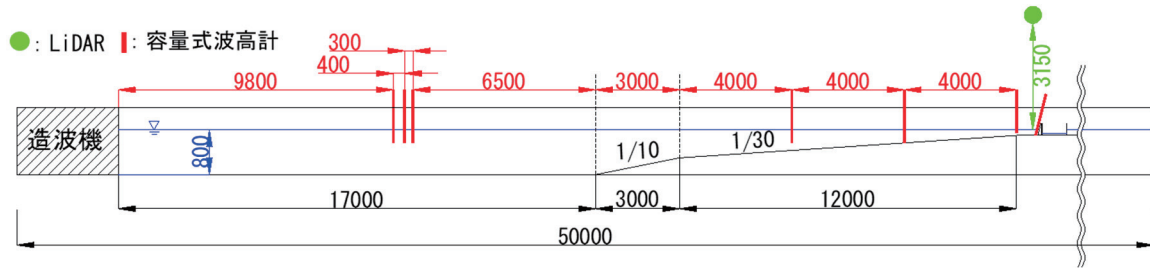


図-1 実験断面図 (縦横比2:1) 単位: mm

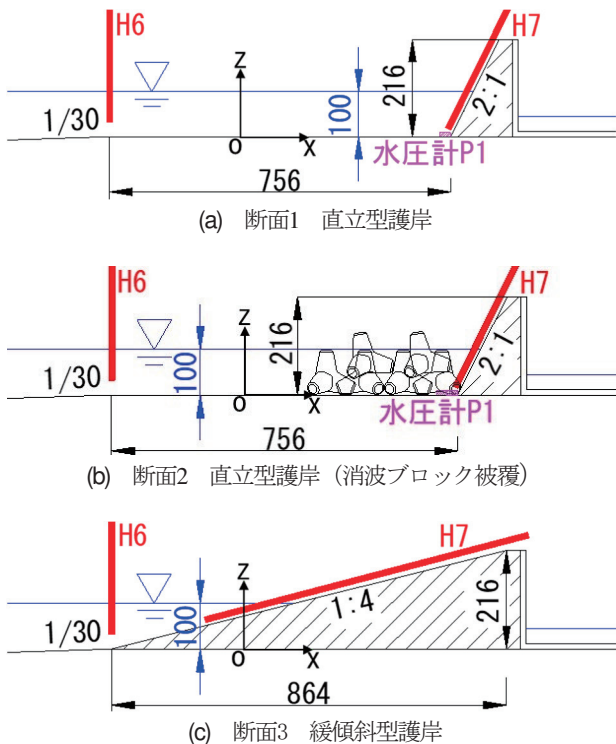


図-2 堤体断面 (縦横比1:1) 単位: mm

て従来の水面観測手法と同等精度の水面観測が可能である。また、LiDARは線的・面的に計測を行うため、従来の点での水面観測手法では困難である汀線や構造物周辺における水面と地形の同時計測が可能である。以上の特性は海岸構造物の維持管理上重要な地形のモニタリングや高波浪時の波浪のうちあげ・越波の観測に活用できるものと期待されるが、LiDARによる波浪のうちあげ・越波の観測に関する研究は少ない。そこで本研究では、LiDARによる波浪のうちあげ高観測手法構築を目的とし、水槽実験においてLiDARによる波浪うちあげ高観測精度の検証を行った。

2. 実験概要

実験には図-1に示す延長50m, 幅0.6m, 高さ1.2mの二次元造波水槽を用いた。水深は造波板前面で0.8mとした。実験縮尺は1/25である。造波板前面から17mの位置から1/10, 1/30の勾配模型を設置し、水深0.1mの位置に水平

表-1 造波ケース

(a) 断面1, 断面2		(b) 断面3	
H_0 (m)	T_0 (s)	H_0 (m)	T_0 (s)
0.04	2.4	0.04	2.4
0.05	1.0	0.05	1.0
0.05	1.6	0.05	1.6
0.10	2.0	0.10	1.4
0.15	2.0	0.15	1.4

表-2 使用LiDAR諸元

項目	
機種	HESAI社製 XT32
Range Accuracy	±2cm
Range Precision	2cm
計測距離	0.05~120m
計測範囲	水平360° × 鉛直31°
モーター回転速度	20Hz

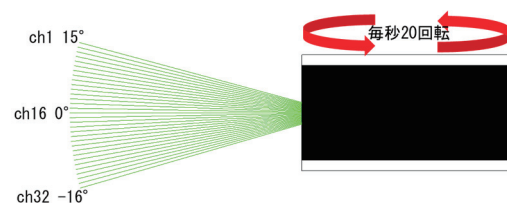


図-3 LiDAR概要図

床を設け、図-2に示す2:1勾配の直立型護岸、消波ブロック被覆した直立型護岸および緩傾斜型護岸を模した3種類の断面模型を設置した。表-1に示す規則波を造波し、沖合で浅水変形・砕波した波が護岸に衝突しうちあがり、越波する一連の過程を容量式波高計、水圧計、LiDARを用いて計測した。造波ケースは砕波の有無や越波の状況から設定した。緩傾斜護岸の $H_0=0.10$ m, 0.15 mのケースにおいて直立型護岸と同じく $T_0=2.0$ sとすると越波量が過剰となるため $T_0=1.4$ sとしている。使用したLiDARの諸元を表-2に示す。使用したLiDARはモータによりレーザー照射部が回転することで水平方向に360°、32本のレーザーを1°ずつ角度をつけて照射することで鉛直方向に31°の計測範囲を有する(図-3)。LiDARは堤体法肩から0.58m沖側、静水面上3.15mの位置に設置した。座標は図-2に示すように岸沖方向にx軸、鉛直方向にz軸、それ

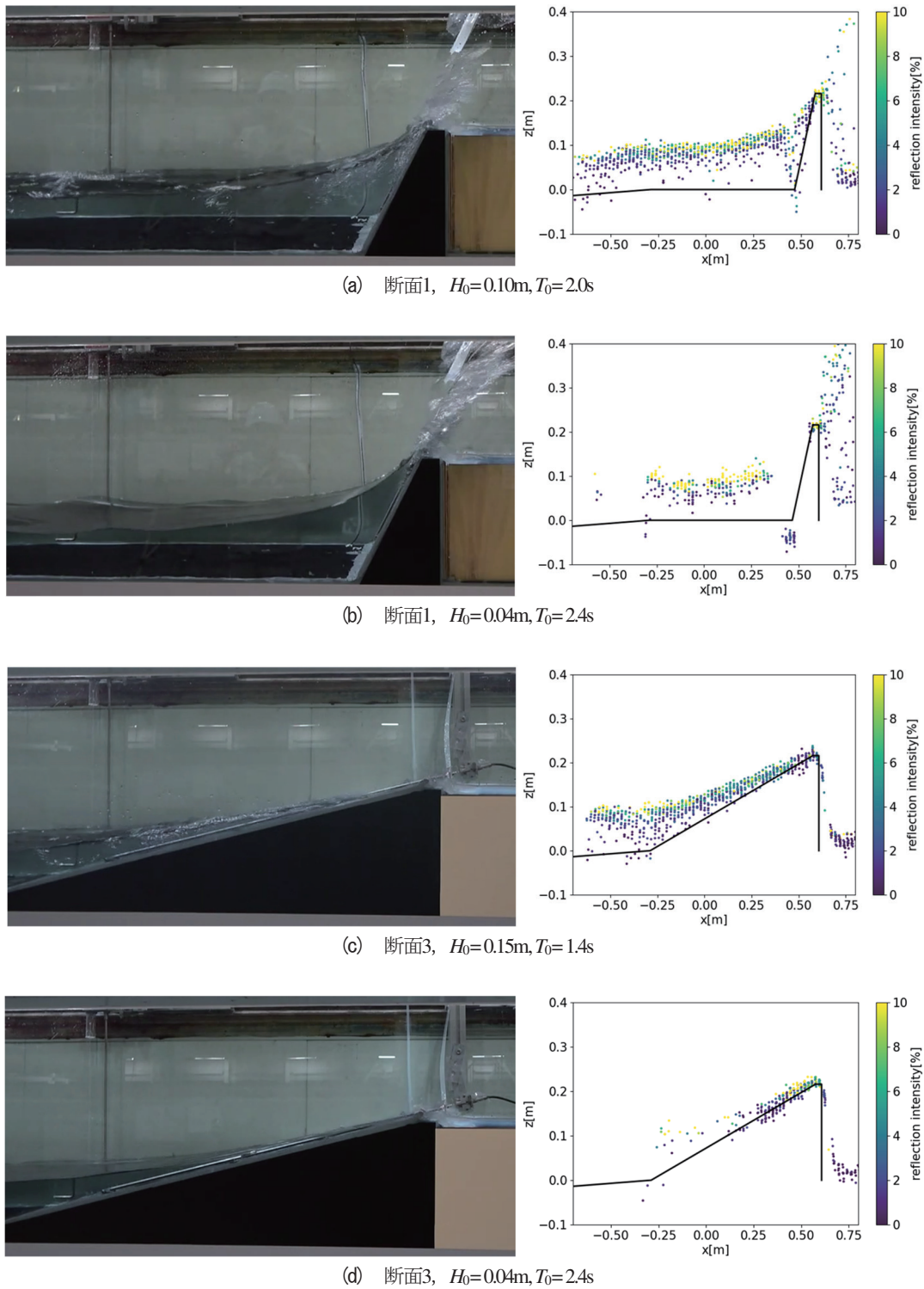


図-4 越波発生時および遡上波における点群の取得状況

らと直交してy軸をとった。LiDARはモータの回転軸とy軸が一致するように、すなわちレーザーがx軸方向に走査する角度で設置した。モータは1秒間に20回転するため、0.05sに1回水槽の延長方向にレーザーが走査する。水平方向の角分解能は 0.36° であり、LiDAR直下の静水面におけるx軸方向の解像度は約0.02mである。表-2中のRange Accuracyは測定値が真値にどれだけ近い値かを定義し、Range Precisionは平均値回りにおける点群のばらつ

きを表す。

本実験において、現地の観測状況に縮尺をあわせるとLiDARが水面まで近く、水深が小さくなるため、一部のパルスが水面を透過し、水槽底面に対応する点群が計測されるケースがあった。水槽底面での反射光を抑え相対的に水面からの反射強度を大きくするため、堤体と水槽底面を黒色に着色した。

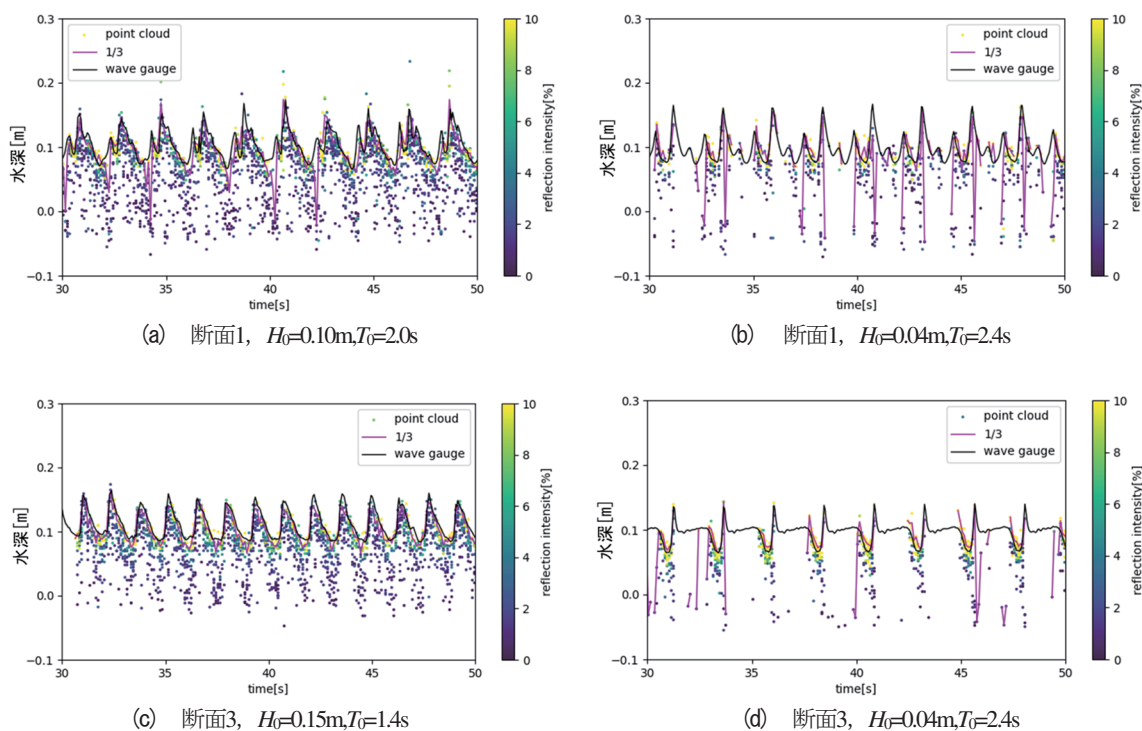


図-5 LiDAR点群と波高計水位の時系列比較

3. 実験結果

図-4に点群取得状況の一例として、越波および遡上波における取得点群を示す。右列に示す散布図がLiDARによって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。反射強度はLiDARから照射されるレーザーの強度を100%とした値である。可視光と同様に黒色の面においては近赤外光は吸収されやすく、反射強度が小さくなる他、水中においても一部吸収されるため、水中の気泡や水槽底面からの反射によって生成される点群においては反射強度が小さくなる。直立型護岸 $H_0=0.10\text{m}$, $T_0=2.0\text{s}$ のケースにおいては、沖側で碎波が発生することで水面が乱れ、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。碎波が発生しない $H_0=0.04\text{m}$, $T_0=2.4\text{s}$ においては一部の水面では点群が取得されず欠測しているが、越波水塊では点群が取得されている。緩傾斜型護岸においても、沖合で碎波する $H_0=0.15\text{m}$, $T_0=1.4\text{s}$ のケースでは沖合から波浪先端まで点群が取得されており、遡上する波の形状がとらえられている。一方で碎波の生じない $H_0=0.04\text{m}$, $T_0=2.4\text{s}$ のケースでは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。

図-4(b)の $x=0.500\text{m}$ 付近において堤体位置より下に点群が取得されている。これは堤体と水槽底面の境目に塗布された白色系の止水剤部で取得されたものである。光速は媒質に依存し、水中においては空気中の約75%の速度となり、空気と水との境界面においては屈折が生じ光

表-3 容量式波高計観測水位に対するLiDAR観測水位の誤差

(a) 断面1				
	MAE (m)		RMSE (m)	
	最大値	上位1/3	最大値	上位1/3
$H_0=0.04\text{m}$, $T_0=2.4\text{s}$	0.027	0.027	0.055	0.056
$H_0=0.05\text{m}$, $T_0=1.0\text{s}$	0.040	0.040	0.058	0.058
$H_0=0.05\text{m}$, $T_0=1.6\text{s}$	0.016	0.017	0.040	0.040
$H_0=0.10\text{m}$, $T_0=2.0\text{s}$	0.016	0.015	0.029	0.024
$H_0=0.15\text{m}$, $T_0=2.0\text{s}$	0.016	0.015	0.031	0.030

(b) 断面2				
	MAE (m)		RMSE (m)	
	最大値	上位1/3	最大値	上位1/3
$H_0=0.04\text{m}$, $T_0=2.4\text{s}$	0.040	0.038	0.067	0.067
$H_0=0.05\text{m}$, $T_0=1.0\text{s}$	0.018	0.016	0.034	0.034
$H_0=0.05\text{m}$, $T_0=1.6\text{s}$	0.043	0.043	0.038	0.069
$H_0=0.10\text{m}$, $T_0=2.0\text{s}$	0.010	0.008	0.013	0.011
$H_0=0.15\text{m}$, $T_0=2.0\text{s}$	0.012	0.012	0.016	0.017

(c) 断面3				
	MAE (m)		RMSE (m)	
	最大値	上位1/3	最大値	上位1/3
$H_0=0.04\text{m}$, $T_0=2.4\text{s}$	0.043	0.039	0.069	0.068
$H_0=0.05\text{m}$, $T_0=1.0\text{s}$	0.029	0.027	0.048	0.047
$H_0=0.05\text{m}$, $T_0=1.6\text{s}$	0.047	0.047	0.069	0.069
$H_0=0.10\text{m}$, $T_0=1.4\text{s}$	0.008	0.010	0.010	0.012
$H_0=0.15\text{m}$, $T_0=1.4\text{s}$	0.011	0.012	0.014	0.015

路長が変化する。そのため水中部で取得された点群は空気中と比較して距離が過大に推定され、実際の堤体位置より下で点群が取得されたものと考えられる。

図-5は図-4に示したケースにおいて容量式波高計H6の

設置位置($x = -0.290\text{m}$)でLiDAR点群と容量式波高計の計測水位を比較したものである。今回の設置条件におけるLiDARの x 軸方向解像度が約 0.02m であることを考慮し、 $x = -0.290 \pm 0.01\text{m}$ の範囲で点群を抽出した。砕波が生じる図-5(a)(c)では水面部に反射強度の大きい点群が取得されるが、同時に水中部において反射強度の小さい点群が多数取得されている。これは水面を透過したレーザーが水中に連行された気泡で反射することで取得されるものと考えられる。また図-5(a)では波峰部において水面より上部で点群が取得されており、砕波に伴う飛沫にレーザーが反射したものと考えられる。表-3は各ケースで波浪場が定常となつてから5波において容量式波高計H6の値を真値としてLiDAR観測水位の誤差を評価した結果である。LiDAR点群から代表水位の算定にあたって水中で取得される点群の影響の小さい手法として、各時刻で取得された複数の点群のうち z 座標が最大の点群を用いるものと z 座標が上位1/3の点群の平均値を用いるものと2つの手法を比較した。砕波が生じ、LiDAR観測水位の精度が高い波高 0.10m , 0.15m のケースではわずかではあるが上位1/3点群の平均値を用いたほうが飛沫の影響を軽減することができ、MAE, RMSEともに小さくなる結果となった。以降の検討ではLiDAR観測水位の算定には上位1/3点群の平均値を用いる。MAEで最大 4.7cm 程度の誤差での観測が想定される。

図-6はLiDAR点群から波の先端位置を抽出し、護岸模型のり面に沿わせて設置した波高計H7と比較したものである。実線はLiDAR、容量式波高計それぞれから取得した波先端位置の x 軸方向の時系列変位を表しており、コンターはLiDARから取得した波先端位置より沖側において x 方向に 0.02m ごとに算定したLiDAR観測水位を表す。点群から波先端位置を抽出する際には水面部の点群のうち x の値が最大となる位置を波先端位置と定義し抽出したが、前述のように実験縮尺に対してLiDARが持つ誤差が大きく、水面部と堤体部の点群の識別が困難であることから次の2つ処理を行った。1つは反射強度によるフィルターであり、黒色に塗装した堤体部において点群の反射強度が小さくなることを利用し、反射強度に閾値を設け、閾値を下回る反射強度の点群を除去した。反射強度の閾値は10%とした。2つ目は点群のばらつきを考慮し、堤体位置から設定した閾値より上方に存在する点群を水面部とする方法である。閾値はRange Precisionから 2cm とした。図-6(a)では容量式波高計から取得した波先端位置よりもLiDAR点群から取得された波先端位置が岸側に表れている。これは堤体のり面の延長線上の水位を計測する容量式波高計に対し、空間的に連続して水位を計測するLiDARがより岸側の越波水塊をとらえているためと考えられる。図-6(b)のように大きく越波しないケースにおいては波先端位置を概ねとらえられているが40s付近で

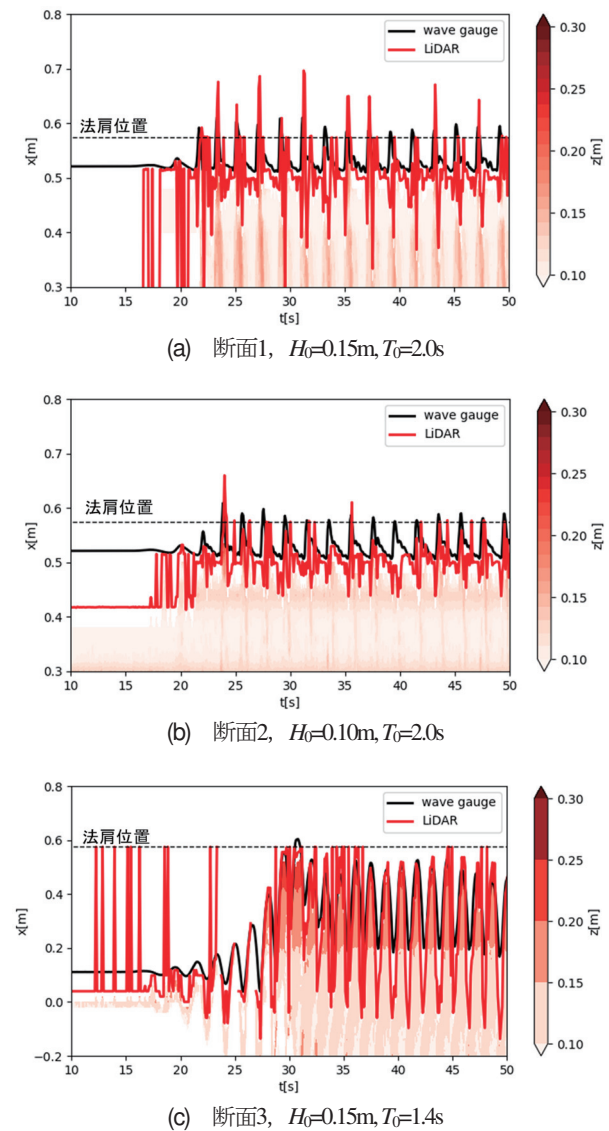


図-6 波高計とLiDARによる波先端位置の比較

容量式波高計と比較して過小となっている。これは堤体部と水面部の識別に用いた 2cm の閾値設定によるものと考えられる。図-6(c)では緩傾斜護岸を遡上する波の遡上端を精度よく追従できている。

4. 数値解析による点群取得条件の検討

図-5や表-3に示されるように、砕波が生じる条件においては安定して水面部で点群が取得され、比較的精度良くLiDARによる水面計測が可能であることが明らかになった。一方で図-4(b)の実験画像では砕波時と比較して水面形状は滑らかであり、気泡の連行も少ないことが見て取れるが、 $x = -0.250 \sim 0.250\text{m}$ の水面位置で点群が取得されている。そこで、数値シミュレーションによる再現解析を実施し、実験時の点群取得状況との比較により、水面部における点群取得条件の検討を行った。シミュレーションにはVOF法により自由水面の運動を追跡可能であ

表-4 計算条件

項目	解析条件
時刻幅	自動(安全率0.1)
波浪条件	0.04m2.4s, 0.05m1.0s, 0.05m1.6s
解析時間	50s
格子サイズ	$\Delta x=8\text{mm}$, $\Delta y=4\text{mm}$
造波モデル	造波ソース (流れ関数法B:次数19)
差分スキーム	Donorパラメータ: 0.2
表面セルの流速	変動勾配外挿 ⁷⁾

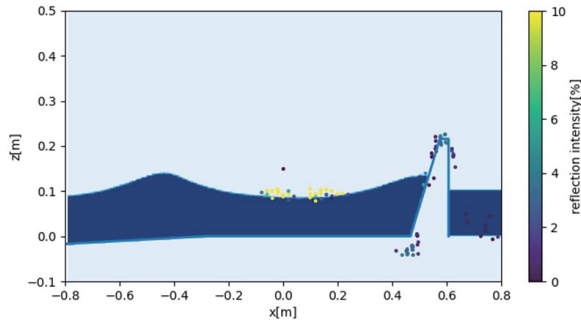


図-7 水面形状と点群取得状況
($H_0=0.05\text{m}$, $T_0=1.0\text{s}$, 造波開始から43.6s時点)

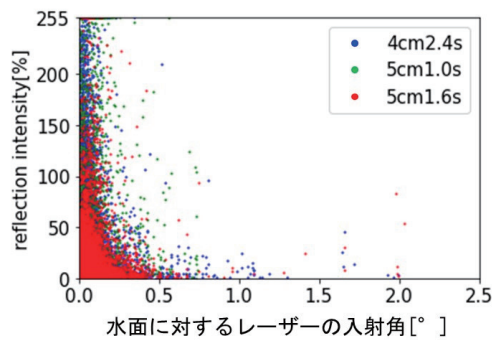


図-8 水面に対するレーザーの入射角と反射強度の関係

る数値波動水路CADMAS-SURF/3Dを用いた。再現解析は断面1を対象とした。砕波が生じるケースにおいては安定して点群が取得され、点群取得の限界条件の推定が困難であると考えられるため、波浪条件は砕波が生じない3ケースとした。計算領域は図-1の実験断面に準ずるが、造波ソースより沖側に2波長分のエネルギー減衰帯を設けた。また、沖の一樣水深部分を1.5波長を目安に短縮し計算時間の削減を図った。主要な解析条件を表-4に示す。波浪場が定常となつてから5波において容量式波高計H6の設置位置で観測水位に対する解析水位の誤差を評価したところ、MAEは $H_0=0.04\text{m}$, $T_0=2.4\text{s}$ のケースで0.003m, $H_0=0.05\text{m}$, $T_0=1.0\text{s}$ のケースで0.004m, $H_0=0.05\text{m}$, $T_0=1.6\text{s}$ のケースで0.011mであった。

図-7にLiDARによる水面点群の取得状況とCADMAS-SURF/3Dで解析した水面形状を示す。LiDARの設置位置($x=0\text{m}$)直下に波谷が位置する際に点群が取得されており、水面に対するレーザーの入射角が小さくなることで鏡面反射により点群が取得されたものと考えられる。図-8は

点群が取得された水面位置において、数値解析によって得られた局所的な水面勾配とレーザーの角度から算定した水面に対するレーザーの入射角と反射強度の関係を示したものである。各ケース波浪場が定常となつてから5波において算定した。いずれのケースにおいても入射角が 0° に近づくことで点群が取得され、反射強度も大きくなることが確認できる。以上より、水面に対するレーザーの入射角を小さくするようにLiDARを設置することで静穏時における点群取得状況改善の可能性が示唆された。

5. 結論

LiDARの波浪うちあげ高計測への適用性検討を目的として二次元造波水槽を用いて直立型護岸および緩傾斜護岸に対する波浪うちあげ高計測実験を行った。その結果、以下の主要な結論が得られた。

砕波時には砕波帯から堤体前面までの水面および越波水塊において点群が取得された。砕波帯において水面を透過したレーザーが水中に連行された気泡に反射することで水面部だけでなく水中部においても多数の点群が取得された。また、水面より上部においても砕波飛沫に反射したと思われる点群が取得された。こうした水槽実験の条件の下でLiDAR点群から代表水位を算定するにあたっては、これらの点群の影響を小さくする必要があり、上位1/3の点群の平均値を用いることが有効であった。水面部の点群から波先端位置を抽出することで波浪のうちあげ高の計測が可能となった。本実験ではMAEが最大で4.7cmであり、現地での観測を想定した場合には十分な精度を有する。砕波の生じない静穏な条件においては水面部で点群が取得されずらくなるが、水面に対するレーザーの入射角を小さくすることで、点群取得状況が改善する可能性が示唆された。

現地での観測においては強風による飛沫の増加や降雨、降雪などに起因し、ノイズが発生することが想定される。今後、本技術の現地での試行を通じてノイズの要因特定およびノイズ除去手法を構築することが課題として挙げられる。

謝辞: この研究は、令和5年度革新的河川技術部門公募テーマ(国土交通省)海岸堤防・護岸におけるリアルタイム波浪うちあげ高観測手法の開発の一環として実施した。関係者に謝意を表する。

REFERENCES

- 1) 国土交通省 河川局：海岸における水防警報の手引き，2010。[MILT Rever Breau : Coastal flood warning guide, 2010.]

- 2) 加藤史訓, 笹岡信吾, 諏訪義雄, 松藤絵里子, 上原謙太郎, 富田雄一郎, 北村康司, 田向順光: うちあげ高観測システムの開発, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.67, No.2, pp. I_738-I_743, 2011. [Kato, H., Sasaoka, S., Suwa, Y., Matufuji, E., Uehara, K., Tomita, Y., Kitamura, K., Tamukai, Y.: Development of a wave runup observation system, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)*, Vol. 67, Issue 2, pp. I_738-I_743, 2011.]
- 3) 福原直樹, 竹下哲也, 加藤史訓, 寺西琢矢, 秋田雄大, 橋本孝治: 画像処理技術を用いたうちあげ高計測手法に関する検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.75, No.2, I_1267-I_1272, 2019. [Fukuhara, N., Takeshita, T., Kato, F., Teranishi, T., Akita, T. and Hashimoto, K. Measurement method for wave runup height using image processing technology, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol.75, No.2, I_1267-I_1272, 2019.]
- 4) C.E. Blenkinsopp, M.A. Mole, I.L. Turner and W.L. Peirson: Measurements of the time-varying free-surface profile across the swash zone obtained using an industrial LIDAR, *Coastal Engineering* 57, 1059-1065, 2010.
- 5) C.E. Blenkinsopp, I.L. Turner, M.J. Allis, W.L. Peirson and L.E. Garden: Application of LiDAR technology for measurement of time-varying free-surface profiles in a laboratory wave flume, *Coastal Engineering* 68, 1-5, 2012.
- 6) 松長悠太, 西広人, 水野辰哉, 琴浦毅, 西畑剛, 松葉義直, 田島芳満: 港湾分野における面的 LiDAR を用いた観測手法の検討, 土木学会論文集, Vol.79, No.18, 23-18115, 2023. [Matsunaga, Y., Nishi, H., Mizuno, T., Kotoura, T., Nishihata, T., Matsuba, Y. and Tajima, Y.: Study of observation method using LiDAR in the port field, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Vol.79, No.18, 23-18115, 2023.]
- 7) 高橋武志, 鈴木高二朗: CADMAS-SURF3D における自由表面境界流速の外挿手法の改善とその効果について, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.78, No.2, I_13-I_18, 2022. [Takahashi, T. and Suzuki, K., Improvement and the effect of the extrapolation methods for free surface boundary velocities in CADMAS-SURF3D, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol.78, No.2, I_13-I_18, 2022.]

(Received March 14, 2024)

(Accepted July 18, 2024)

EXAMINATION OF APPLICABILITY OF LiDAR TO WAVE RUN-UP MEASUREMENT

Tatsuya MIZUNO, Yuta MATSUNAGA, Yoshinao MATSUBA, Hirohito NISHI,
Tsuyoshi KOTOURA, Takeshi NISHIHATA and Yoshimitsu TAJIMA

When inundation occurs due to wave overtopping, it is necessary to measure wave run-up heights at the seawall and levee for the evacuation of coastal residents. In this study, the authors conducted wave generating experiment in order to develop a method to measure wave run-up heights using LiDAR. The characteristics of measuring noise and accuracy of LiDAR were examined by comparing the LiDAR data with wave gauge data in the experiment employing 1/25 scale seawall models in which regular waves were generated. As a result of the experiment, point clouds were obtained at the water surface containing bubbles from a surf zone to the seawall under breaking wave conditions. Furthermore, the wave run-up heights could be measured by extracting shoreline locations from point clouds. In addition, point cloud acquisition conditions were examined in comparison with modeled water level data by CADMAS-SURF/3D.