

# 面的LiDARの室内実験観測への適用性検討

水野 辰哉<sup>1</sup>・松長 悠太<sup>2</sup>・西 広人<sup>3</sup>・琴浦 毅<sup>4</sup>・  
西畑 剛<sup>5</sup>・松葉 義直<sup>6</sup>・田島 芳満<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 正会員 五洋建設(株) 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)

<sup>2</sup> 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)  
E-mail: yuuta.matsunaga@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>3</sup> 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)  
E-mail: hirohito.nishi@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>4</sup> 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)  
E-mail: tsuyoshi.kotoura@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>5</sup> 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)  
E-mail: takeshi.nishihata@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>6</sup> 正会員 東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

面的 LiDAR では UAV を使用せずとも容易に広範囲の点群を取得できる。近赤外線を用いる LiDAR では水面の点群取得は困難であるが、白波が立つなどの条件下では点群が取得される。面的 LiDAR で水面計測が可能になれば面的な水面計測や波打ち際の水面と底質のような固液の同時計測への活用が期待できる。そこで本研究では水槽実験により面的 LiDAR の水面計測への適用性を検討した。

規則波計測実験の結果、水面に正対するように面的 LiDAR を設置することで直下の水面を計測出来ることを確認した。水面計測精度は取得点群数の影響をうけ、積分時間を入射波周期の 5 分の 1 未満の範囲で大きくすることで観測精度を向上出来ることが分かった。加えて、水面で鏡面反射したレーザーをスクリーンに投影することで間接的に水面の点群を取得する手法を開発した。

**Key Words :** 3d-lidar, time of flight, water surface measurement, hydraulic experiment

## 1. はじめに

港湾構造物の設計上、波浪は最も支配的な自然条件であり、港湾構造物等の性能を評価するために実施する水理実験においても主要な計測項目である。水位の計測手法は容量式やサーボ式等の固定点での観測が主流である。

i-Constructionの推進に伴い建設分野において点群データを取得できる測定機器の導入が進んでいる。港湾工事においてはナローマルチビームによる深淺測量が実用化されている<sup>1)</sup>ほか、UAVにLiDARやグリーンレーザーを搭載し消波ブロック被覆堤の形状を計測する試みがなされている<sup>2)</sup>。近年では面的にレーザーを照射し広範囲の点群を取得することが可能な面的LiDARの小型化・低コスト化が進み、UAVを使用せずとも容易に広域の観測が可能となった。LiDARに用いられる近赤外線レーザーは水面で鏡面反射し後方散乱強度が小さくなるため、LiDARでの水面検出は困難である。一方で波打ち際の白波が立っている箇所など一部の水面では点群の取得が可能である(図-1)。LiDARを用いた水面形状の計測事例は少なく、

いずれも点または線の計測にとどまっている<sup>3)4)</sup>。面的LiDARを水面計測に適用できれば広範囲の水面計測が可能になるほか、波打ち際の水面と底質のような固液の同時計測等、多様なデータ取得に活用できるものとする。そこで、本研究では水槽実験により面的LiDARの水面計測への適用性を検討する。

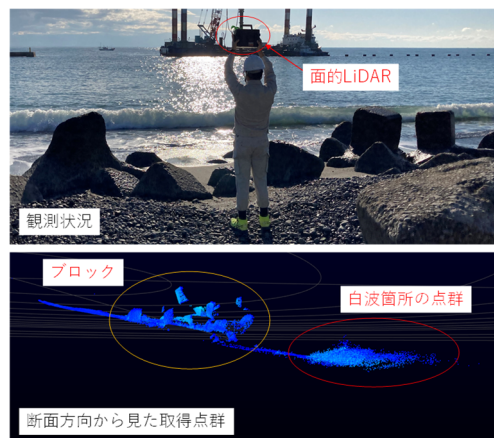


図-1 現地観測例

## 2. 水槽実験

### (1) 平面水槽実験概要

平面水槽(L=30 m, B=20 m, H=1.5 m)の直上約 12 m の位置に、水面に対して正対するように面的 LiDAR を設置し規則波の観測実験を行った。平面水槽実験の概況を図-2に、造波ケースを表-1に示す。水面に入射したレーザーの反射方向は局所的な水面勾配に応じて変化する。レーザーに対して水面が平行に近づくほど、すなわち波形勾配が急なほど LiDAR に戻る光が少なくなり、取得点群数が減少すると考えられる。そこで、波形勾配の違いによる取得点群数や水位観測精度への影響を明らかにするために波高・周期を 3 パターン設定した。水深は 60 cm, 造波時間を 30 秒とした。図-3 に示す位置に容量式波高計を設置し、面的 LiDAR による観測水位との比較を行った。容量式波高計のサンプリング周波数は 20Hz とした。中央の波高計の設置位置が面的 LiDAR の視準軸と一致するように配置した。実験に使用した面的 LiDAR の諸元を表-2 に示す。ここで範囲精度の 2 cm @20 m は 20 m 先のターゲットを計測した際に平均値の±2 cm の範囲に点群が分布することを表す。

### (2) 平面水槽実験結果

図-4 に面的 LiDAR で静水面を 1 秒間計測した際に取得された点群データを示す。平面水槽両端の造波機・消波材が確認できる一方で水面の大部分は欠測しており、

面的 LiDAR の直下直径 8 m 程度の円形範囲の点群のみ取得できている。取得範囲の外側では水面の鏡面反射により反射強度が低下し欠測したものと考えられる。

図-4 中赤枠で示す 6 m × 6 m の範囲の取得点群を 10 cm 格子で分割し、各格子において取得点群の鉛直座標から面的 LiDAR による観測水位を算定した。観測水位の算定方法は点群の鉛直座標の平均値をとる方法と中央値をとる方法の 2 種とし、波高計観測水位との比較によりどちらの算定方法が水位の算定に適しているか検証した。図-5 は波高計設置位置に対応する格子において 0.1 秒毎に面的 LiDAR 観測水位を算定し、波高計観測水位と比較したものである。実験ケースごとに波高計観測水位を真値として面的 LiDAR 観測水位の絶対平均誤差 MAE および二乗平均平方誤差 RMSE を評価した結果を表-3 に示す。いずれのケースにおいても MAE と RMSE は平均値を用

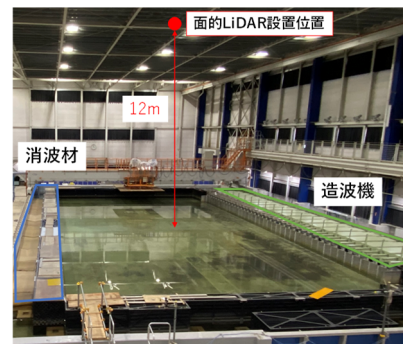


図-2 平面水槽実験概況

表-1 造波ケース一覧 (平面水槽実験)

	波高H(cm)	周期T(s)	波向D(度)
case1	16	1.5	15
case2	16	1.5	0
case3	10	2.2	15
case4	10	2.2	0
case5	5	3.0	15
case6	5	3.0	0

表-2 面的 LiDAR 諸元

性能項目	
型式	LIVOX AVIA
範囲精度	2cm@20m
最大計測距離	450m
計測範囲	水平70.4° × 垂直77.2°
最大計測点数	72万点/秒

表-3 面的 LiDAR 観測水位の誤差評価

	MAE(m)		RMSE(m)	
	平均値	中央値	平均値	中央値
case1	0.017	0.019	0.024	0.044
case2	0.019	0.020	0.027	0.047
case3	0.009	0.010	0.012	0.026
case4	0.013	0.015	0.019	0.029
case5	0.013	0.014	0.018	0.023
case6	0.012	0.013	0.017	0.020

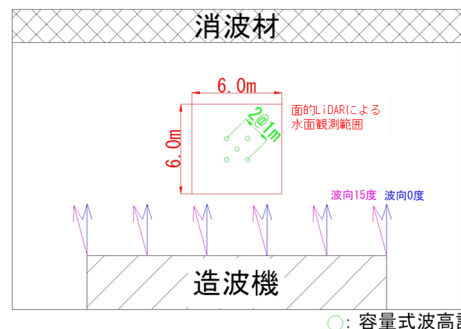


図-3 実験平面図

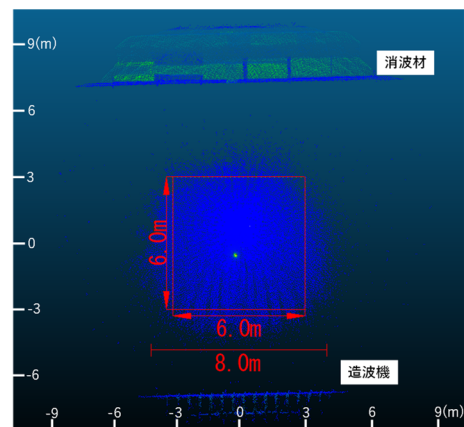
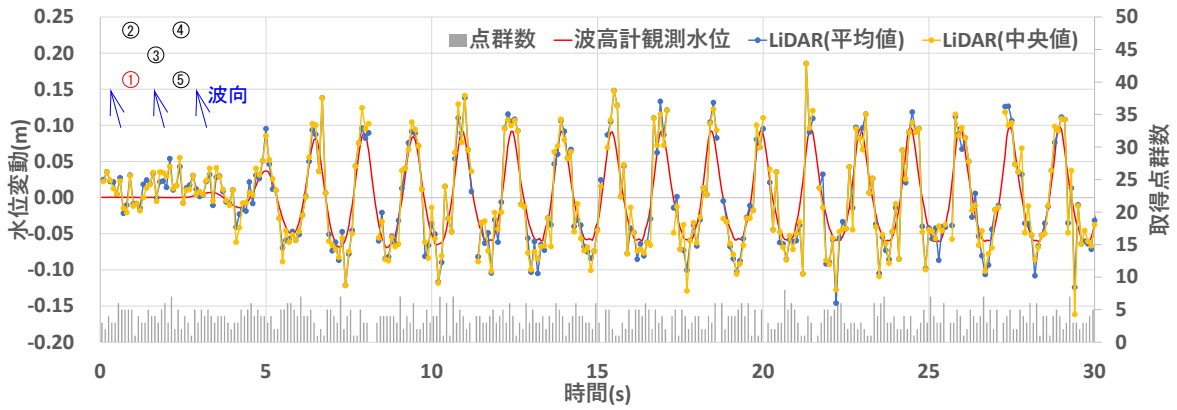
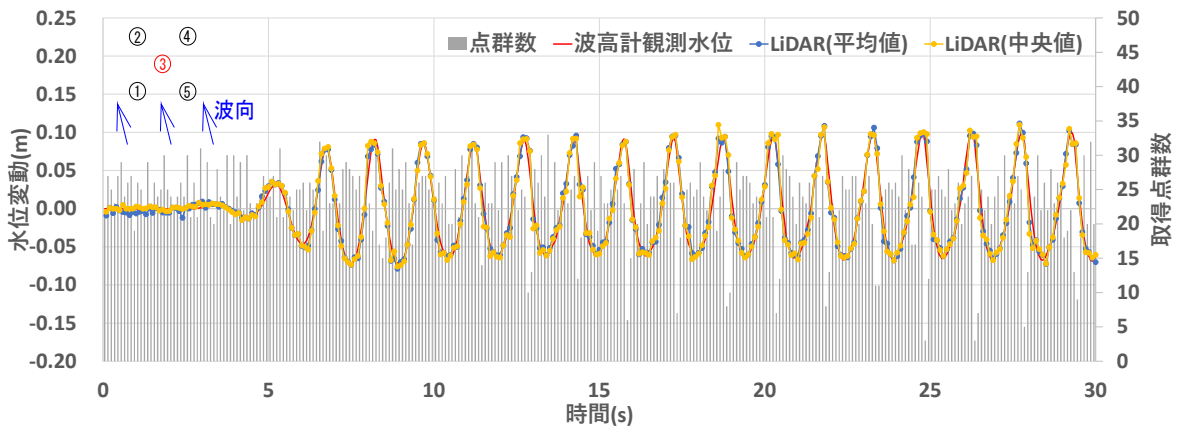


図-4 静水面の点群取得状況 (積分時間: 1 秒)



(a) 波高計①



(b) 波高計③

図-5 面的LiDAR 観測水位と波高計観測水位の比較(case1)

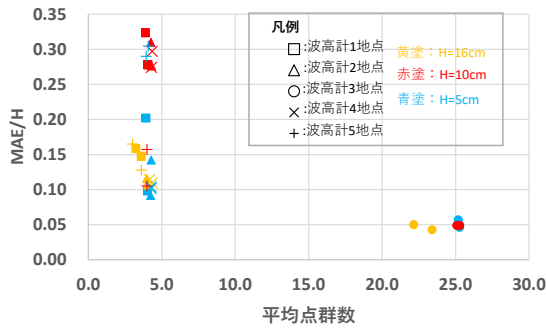


図-6 点群数と無次元MAEの関係

いた観測水位のほうが小さくなっており、面的LiDARで観測した点群から水位を算定する際には平均値を用いたほうがより妥当な値が得られることを示す結果となった。以降では面的LiDARの観測水位の算定には平均値を用いる。図-5の第2軸は水位の算定に使用した点群数を示している。取得点群数が少ない波高計1地点では波高計3地点と比較して誤差が大きい。各波高計設置位置において入射波高Hで無次元化したMAEと平均取得点群数の関係を図-6に示す。平均取得点群数が20点を超える波高計③の地点ではMAEが入射波高に対して4.3~5.7%と非接触でありながら高い精度を有していると言える。

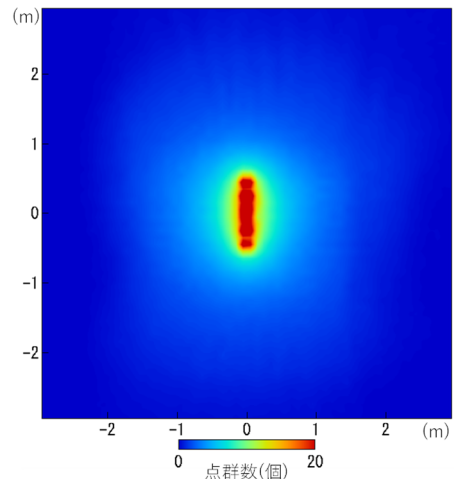


図-7 0.1秒間の平均取得点群数(case1)

一方で取得点群数が少ない地点では入射波高に対する誤差が最大32.3%と大きく、面的LiDAR観測水位の精度は取得点群数の影響を大きく受けることが分かった。図-7にcase1における0.1秒間の平均取得点群数の平面分布を示す。case1において0.1秒間の取得点群数が20点を超えたのは16格子であった。この数は波高や周期、波向によって大きく変動することはなく、case1~case6の平

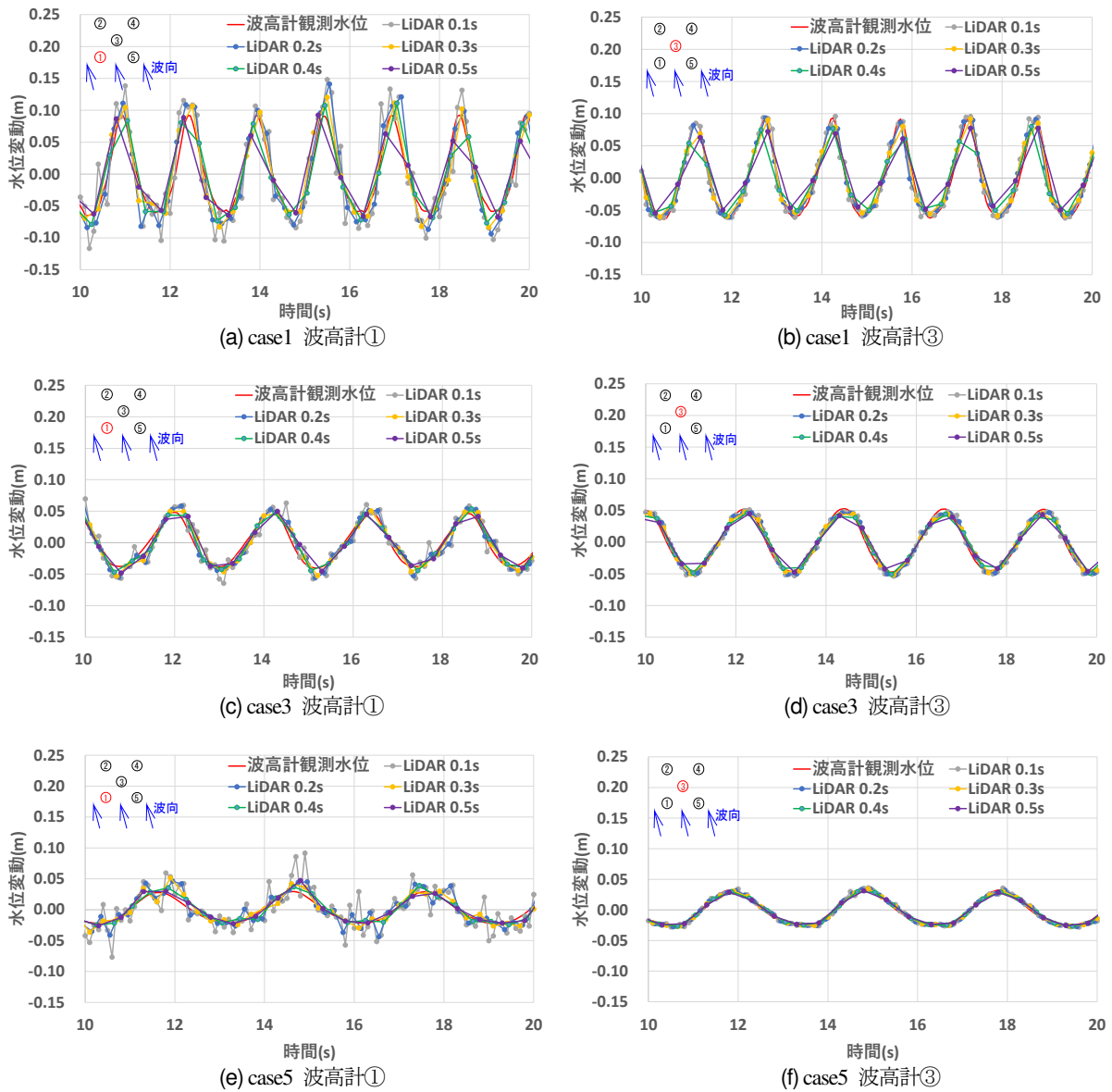


図-8 面的 LiDAR 観測水位の時系列波形と積分時間  $T_i$  の関係

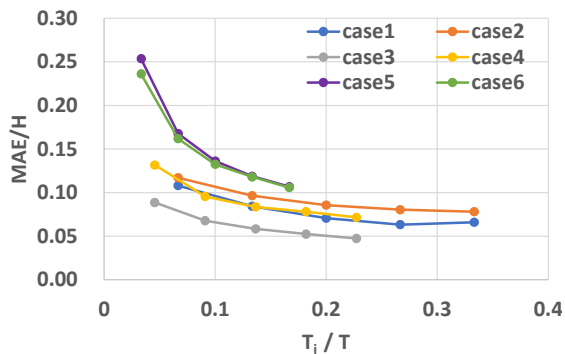


図-9 無次元積分時間と無次元 MAE の関係

均で 15.5 格子であった。いずれのケースでも図-7 と同様に視準軸( $x=0.0, y=0.0$ )の回りで取得点群数は多くなっており、これは使用した面的 LiDAR のレーザー走査パターンに起因するものである。

サンプリング間隔ごとにその瞬間の水位を計測する波高計と異なり、面的 LiDAR では積分時間  $T_i$  の間に取得された水位の平均値を計測している。そのため、積分時間  $T_i$  を長くすることで時間解像度が粗くなる代わりに取得点群数が増加し観測精度が向上することが期待される。図-8 に case1, case3, case5 において積分時間  $T_i$  を 0.1 秒から 0.5 秒まで 0.1 秒刻みに変化させたときの時系列水位の変化を示す。積分時間を大きくすることで積分時間 0.1 秒の時にみられるスパイク状のノイズが消え、誤差が小さくなる。一方で図-8(b)では積分時間を 0.3 秒以上とすると時間解像度が低下し波峰部などの波の形状をとらえられなくなっている。造波ケースごとに MAE を入射波高  $H$  で無次元化した無次元 MAE と積分時間  $T_i$  を入射波周期  $T$  で無次元化した無次元積分時間の関係を図-9 に示す。いずれのケースにおいても周期に対する積分時間が大きくなるにつれて MAE/H が減少するが、 $T_i/T$  がおお

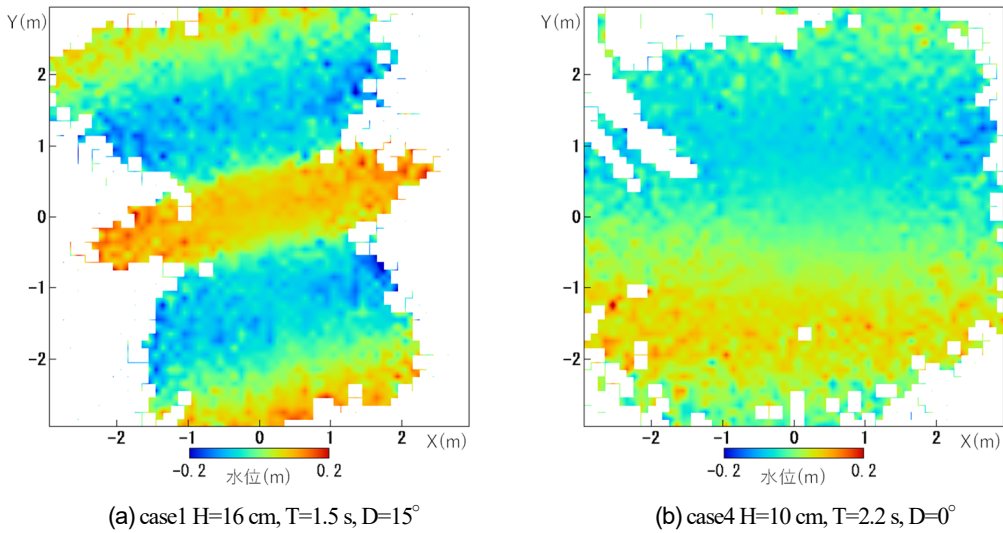


図-10 水位の平面分布 (積分時間 0.3 秒)

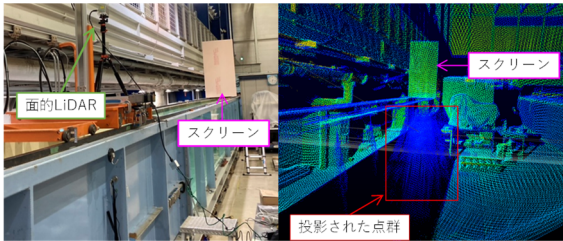


図-11 断面実験概況

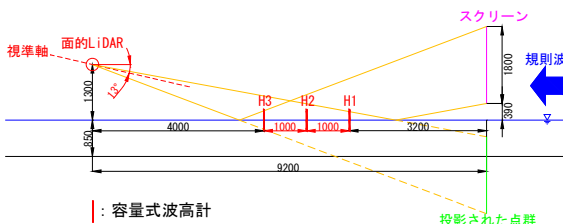


図-12 実験断面図

よそ 0.2 を超えると誤差は横ばいあるいは微増する結果となった。これは前述のように時間解像度が低下し、波形を正しくとらえられなくなるためと考えられる。図-10 に case1 および case4 において積分時間を 0.3 秒としたときの水位の平面分布を示す。点群数の少ない領域端部においては精度の低下や欠測が生じるが、波の山や谷の分布、波長や波向の差を確認出来る結果となっている。

(3) 断面水槽実験概要

LiDAR で水面を計測した際に欠測するのは鏡面反射の影響である。鏡面反射するとレーザーは入射角と同じ大きさの反射角で入射時と反対方向に反射するため欠測が生じる。そこでレーザーが鏡面反射した先にスクリーンを設置し、レーザーを再反射させ点群を取得することを試みた。

実験には 2 次元断面水槽(L=50 m, B=0.6 m, H=1.2 m)

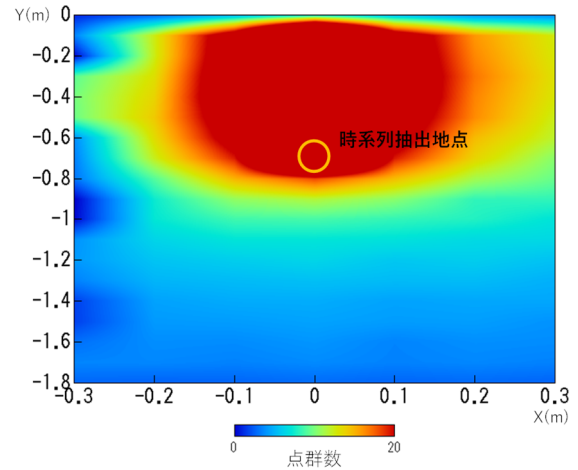


図-13 0.1 秒間の投影点群数 (縦横比 1:4)

を使用した。実験概況を図-11 に、面的 LiDAR とスクリーンおよび波高計の設置位置を図-12 の実験断面図に示す。面的 LiDAR は静水面から 1.3m の高さに水平面から 13° 下を向けて設置し、9.2m 離れた位置にスクリーン (H=1.8m, B=0.9m) を設置した。造波条件は、波高 10 cm 周期 2.0 秒の規則波とした。

(4) 断面水槽実験結果

静水面に対しレーザーを投射したところ、図-11 に示すように水面を挟んでスクリーンの下側に点群が投影された。点群が投影された 1.8 m×0.6 m の範囲を平面水槽の際と同様に 10 cm 格子で分割し、積分時間 0.1 秒としたときに取得された点群数の分布を図-13 に示す。取得点群数が 20 点を超える格子は 18 格子であり、平面水槽実験を踏まえると水位の推定に十分な点群数が取得されているといえる。規則波を造波すると時々刻々の水面変

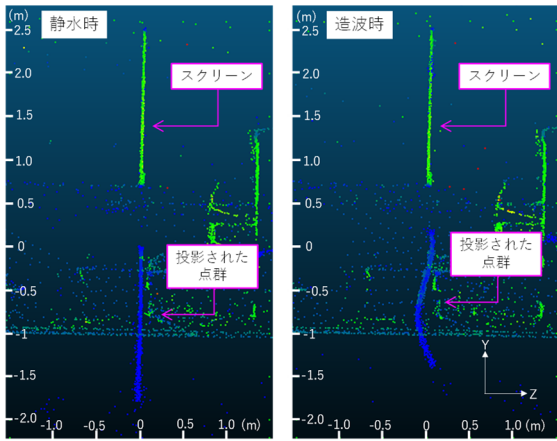


図-14 規則波造波時の投影点群

動に応じて投影された点群も変動することが確認された(図-14). LiDAR ではレーザーを投射し反射して戻ってくるまでの時間とその際のレーザーの角度をもとに点群を形成する. レーザーが入射時と反射時で同じ経路をたどるものと仮定すれば, 波高計位置の水面の点群は面的LiDAR と波高計を結ぶ線の延長線上に投影されるものと考えられる. そこで, 面的LiDAR と波高計H2を結ぶ線の延長線上に位置する図-13 中丸印で示した抽出点において積分時間 0.1 秒でz軸方向の点群変動を抽出し, 波高計H2の観測水位を比較したものが図-15である. 点群の変動は周期2秒程度で規則的な変動を繰り返しているが, 振幅は観測波高と一致しない. また, 位相にも1/4周期程度のずれが見られる. 水面に入射したレーザーの反射方向は局所的な水面勾配の影響を受ける. 反射方向が変化することでスクリーンまでの光路長が変化し, 点群位置が変化するものと考えられる. この考えに基づくと鉛直スクリーンに投影された点群の変動は水面の振幅ではなく水面勾配を反映したものとなり, 水面勾配が水平となる波の山と谷で静水時と同位置に点群が形成される(図-16). 今回のケースのように1波に波峰・波谷が1つずつである正弦波に近い形状の規則波においては, 点群変動から周期を評価することが可能であるが, 1波中に複数の波峰・波谷が存在する不規則波の場合では同様の方法で周期を評価することは困難であると考えられる. 以上より, 鉛直スクリーンに投影された点群より波高や周期を定量的に評価するには, 投影された点群からレーザー投射位置の水面形を復元する手法の確立が必要であるが, 現状では解析手法の確立に至っておらず今後の課題である.

### 3. まとめ

面的 LiDAR の水面計測への適応性検討を目的として平面水槽における規則波観測実験と断面水槽における点

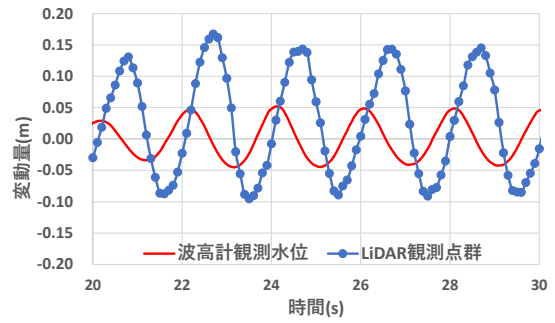


図-15 点群の時系列変動と波高計観測水位の比較

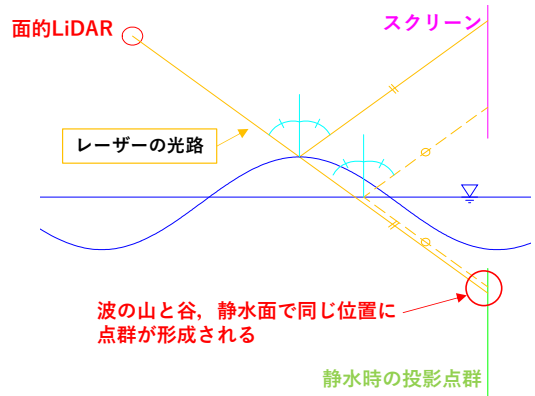


図-16 鉛直スクリーンによる投影点群の形成

群の投影実験を行った. その結果, 以下の主要な結論と課題が得られた.

平面水槽において水面に対して正対するように面的LiDARを設置することで, 直下の限られた範囲であるが面的な水面形が取得された. 面的LiDARの水位観測精度は水位算定に用いる点群数の影響を受け, 積分時間0.1秒あたりの取得点群数が20以上の地点においてはMAEが入射波高に対して約5%の精度となった. また, 規則波においては積分時間を入射波周期の5分の1未満の範囲で大きくすることで, 観測精度を向上出来ることが明らかになった. 今回の実験では積分時間0.1秒の条件においては視準軸付近を除けば誤差の大きい結果となった. 一方で, 面的LiDARの観測精度が取得点群数に依存することから, 水面に対する設置位置や角度などの最適な観測条件の検討により, 高精度に観測可能な領域を拡大できるものとする. 今後は観測条件の検討により面的LiDARの観測精度向上を図り, 従来複数台の波高計を用いて実施していた多方向不規則波の面的観測への適用を目指したい.

鏡面反射の影響で取得できない点群をスクリーンに投影する手法を開発した. 鉛直スクリーンに投影された点群の変動はレーザー入射位置の局所的な水面勾配を反映したものと考えられるが, 投影された点群から水面形を復元し波高や周期を定量的に評価するには至っておらず, 解析手法の確立が今後の課題である.

## REFERENCES

- 1) 国土交通省港湾局：マルチビームを用いた深浅測量マニュアル（浚渫工編）（令和4年4月改定版），2022 [MILT Ports and Harbours Bureau.: *Multi-beam surveying manual for dredging work(April 2022 revision)*, 2022.]
- 2) 西広人，琴浦毅：消波ブロックを対象とした点群データの評価手法の検討，土木学会論文集(B3)，78巻2号，pp.163-168,2022[Nishi, H. and Kotoura, T: Targeting wave-dissipating blocks examination of point cloud data evaluation method, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers(B3)*, Vol.78, No.2, pp163-168, 2022]
- 3) C.E. Blenkinsopp, M.A.Mole, Tuner, W.L. Peirson :Measurements of the time-varying free-surface profile across the swash zone obtained an industrial LIDAR, *Coastal Engineering*, Vol.57, Issues11-12, pp1059-1065, 2010
- 4) 椎名達夫，中川和也：LEDライダーによる水面観測に関する検討，第31回レーザーセンシングシンポジウムプログラム，予稿集 pp.44-45,2013[Shina, T. Kazuya, N. :Consideration of water surface observation by LED mini-lidar, 31st Japanese Laser Radar Symposium proceedings pp.44-45,2013.]

(Received February 9, 2023)

(Accepted May 11, 2023)

## EXAMINATION OF THE APPLICABILITY OF 3D-LIDAR TO EXPERIMENTAL OBSERVATION

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

3d-LiDAR enable to get wide range point cloud data without UAV. It is difficult to get water surface by using LiDAR that use near infrared rays. But can get a part of the surface like whitecap. If it becomes possible to measure water surface by using LiDAR, it can be used for wide range wave measurement and solid-liquid measurement such as wave and sand on the coast. Therefore, in this study we examined the applicability of water surface measurement using 3d-LiDAR by water tank experiment.

As a result of regular wave experiment, it became clear that LiDAR provide water surface data right under them. Measurement accuracy of LiDAR is affected the number of point cloud data and by increasing integral time within one-fifth of the wave period, accuracy is improved. In addition, we developed a method that get point cloud data indirectly by projecting a laser reflected on the water surface onto the screen.