

港湾分野における 面的LiDARを用いた観測手法の検討

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

¹正会員 五洋建設(株) 土木技術開発部
(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

E-mail: yuuta.matsunaga@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

²正会員 五洋建設(株) 土木技術開発部
(〒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 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)

港湾分野での波浪観測は設計・施工・維持管理のいずれの段階においても重要であり、これまでも最先端の観測技術が現地に適用され、観測データ解析手法についての研究も多くなされてきた。また、近年、ICT技術の進展に伴いレーザーを活用して3次元形状把握が可能となる面的LiDAR(Light Detection and Ranging)が汎用化されつつあるが港湾分野での適用事例は少ない。そこで、本研究では面的LiDARを用いた現地観測を行い、波浪観測等への適用性、将来性を検討した。

汀線際や構造物周辺での計測では、複雑に変動する水面変化を面的に点群を取得できることを定性的に評価するとともに、取得した点群を評価するにあたり、格子分割寸法やサンプリング時間の検討により水位時系列を算出可能とする定量的な評価手法を構築できたことで、今後の波浪変形状況の研究への活用が期待される結果が得られた。

Key Words : LiDAR, wave observation method, data analysis, air bubbles, turbidity

1. はじめに

近年の気候変動に伴う気象擾乱の激甚化に対してインフラ設備の災害対策および強靱化が早急に求められており、港湾分野においても海面上昇や台風の強大化に伴う設計波の見直し検討が進められつつある。港湾施設における設計波の設定は、現地観測や波浪推算に基づき算定されるが、現地波浪観測技術は古くは目視から始まり、ブイ式、超音波式、レーダー式、衛星観測と技術の進歩に伴い観測手法が変化してきており¹⁾、今後も新技術の開発が期待される。

ところで、水面下の地形や水面形状を計測できる新技術としてグリーンレーザーの活用が河川や港湾で検討されつつあるが²⁾³⁾、赤外線レーザーを使用したLiDARでは水面形状の計測の取り組みは少なく⁴⁾⁵⁾、いずれも点または線の2次元計測データにとどまっている。これは、赤外線レーザーが水面で反射、逸散するため、データ取得に必要な反射強度が得られず、水面形状の取得は難しいことが課題となるためである。しかし、水野ら⁶⁾は3次元形状把握などに適用が進む赤外線を使用した面的

LiDAR(表-1)を室内平面水槽の造波時の水位観測に適用し、計測条件に依存するものの、面的LiDARで取得したデータから算出する水位時系列が容量式波高計で計測した水位時系列と同程度であることを示している。なお、このLiDARは、走査線が直線的である従来手法とは異なり、走査線が8の字を描きながら回転することで点群出力最小時間の0.1秒でも面的な点群の取得が可能である。

本研究では、この面的LiDARを表-2に示す複数の港湾施設周辺の水面観測に適用し、室内実験とは異なる水質、波形勾配などの条件下による取得点群の特性や取得データの評価分析をすることで、赤外線を使用した面的LiDARの波浪観測などへの適用性、将来性を検討した。

表-1 面的LiDAR 諸元

性能項目	
レーザーの種類	赤外線
計測精度	2cm/20m
計測距離	~450m
計測範囲	水平70.4° × 垂直77.2°
点群出力最小時間	0.1秒
最大計測点数	72万点/秒

2. 観測結果

(1) 地点A：汀線際

地点Aは砕け寄せ砕波が生じている汀線付近を対象とし、面的LiDARを水平に近い角度で照射面を沖側に向け観測した。図-1が1秒分の点群を出力した観測結果例であるが、上部写真と下部点群データを比較すると、陸側の石材、消波ブロックの点群が取得できているのに加え、砕け寄せ砕波部を含む沖方向20mの範囲の点群も取得できている。面的LiDARは、照射した赤外線レーザーが対象物で反射し、受光するまでの時間に基づき対象物までの距離を算出するが、水面入射角によっては鏡面反射による逸散欠測となることが想定される。しかし、水面付近に砕波による気泡の球体形状が多数存在し、LiDARへ正対する反射面を構成することで砕波部のデータを取得できたと考えられる。なお、中央右側付近の太陽光の反射範囲が欠測しているが、太陽光が面的LiDARのレーザーの受光に干渉し欠測したと考えられる。

次に、0秒、2秒、4秒時の0.1秒分の取得点群断面を図-2に示す。0秒時では砕波のフロント部が明瞭であるが、2秒時では砕波に伴い水面勾配が緩やかになり、4秒時では砂浜を遡上して陸上構造物で飛沫が発生する様子も確認できる。飛沫が計測できるのは、気泡と同様に球

表-2 観測場所一覧

場所	対象
地点A	汀線
地点B	防波堤先端部
地点C	消波ブロック
地点D	鋼管杭

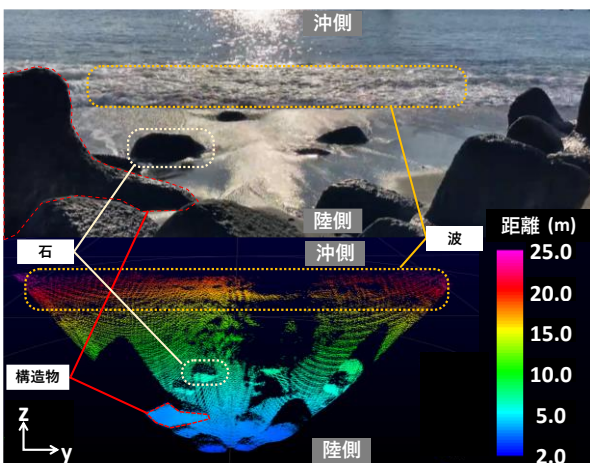


図-1 汀線際の観測結果（俯瞰）

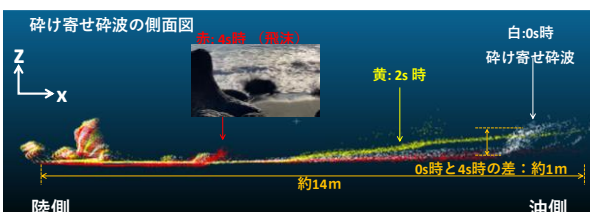


図-2 汀線際の観測結果（断面）

体形状が影響していると推察される。

以上より、地形、水面計測に加え、気泡や飛沫など従来計測手法では観測が困難であった対象物についても観測できることが明らかになった。

(2) 地点B：防波堤先端部

地点Bは防波堤先端部周辺を対象とし、水面から約6mの位置で、面的LiDARを水面に正対させて観測した結果、図-3に示す約4m程度の範囲で水面形状の点群を確認できた。観測時の波浪は有義波高0.4m、周期6秒程度と静穏であり、地点Aとは異なり、気泡や白波がほとんど存在しない条件であったにもかかわらず4m程度の範囲で水面が観測できている。図-4に示すように水面に正対させたLiDARから照射されたレーザーは水面付近で散乱するが、水面に対する入射がある角度範囲内であればLiDARで受光する散乱強度が閾値を上回り、点群として取得されると推察される。

取得した点群を用いて、0秒、1秒時の水面形状を図-5に断面表示した。0秒時は防波堤前面で波の峰が存在するのに対し、波の進行に伴い1秒時には波の谷部が観測されているように、構造物周辺の複雑な水面変動を取得可能であることが確認された。

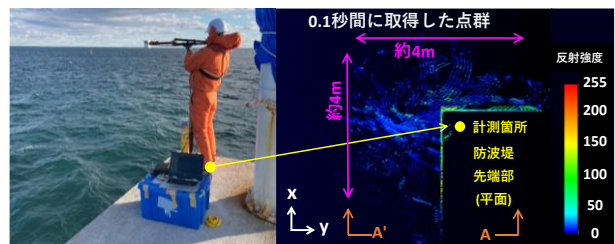


図-3 地点Bにおける現地観測状況及び取得データ

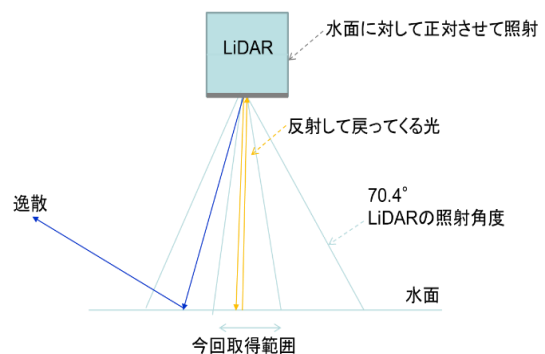


図-4 LiDAR照射の反射のイメージ

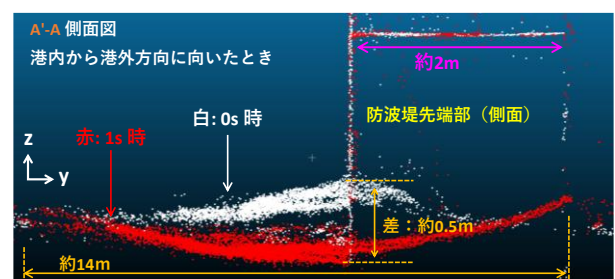


図-5 地点Bでの取得データ断面図

(3) 地点C：消波ブロック

地点Cでは水面上6mの防波堤上から仰角30°で消波ブロック周辺を観測し、図-6に示す点群が取得できた。観測時の波浪条件は地点Bと同様の有義波高0.4m, 周期6秒程度と静穏であったが、地点Bとは異なり水面に対しての角度がある状態においても消波ブロック周辺の水面は反射強度が弱いながらも取得できた。これは、消波ブロック付近の海水表面上に消波に伴う微細な気泡が混合し、LiDARへの反射面が形成されたためと推測する。

また、消波ブロックの干出部に着目すると、波による水位変動により干出部の露出が変化していることが確認できる。これはLiDARのレーザーが干出部のブロックからは反射して観測され、入射角度が浅い水面部は散乱の受光強度が弱いため欠測となることで、干出部判別が容易になっているためである。つまり、水面形状を直接計測できないとしても、干出部に着目することで構造物周辺の水位変動の把握が可能となると考えられ、消波ブロック、護岸・防波堤、海岸堤防への打ち上げ高など干出、没水が繰り返される構造物周辺の水面観測への活用が期待される。

(4) 地点D：鋼管杭

地点Dは外洋に面した栈橋の鋼管杭を対象に、水面から約10mの位置で、地点Bの防波堤端部と同様に水面に面的LiDARを正対させて観測した。地点Dでは2時期について観測を行い、観測時の波浪条件は1回目が有義波高0.7m, 周期6秒程度、2回目が有義波高1.2m, 周期7秒程度である。取得した点群の平面分布と対象水面の写真を図-7に示すが、1回目、2回目の計測ともに杭周辺では気泡の存在は確認できない状態で、1回目の計測範囲は杭周辺での計測範囲となっており、地点Bの防波堤端部の観測結果と類似しているのに対し、2回目の観測は面的LiDARの計測範囲端部までデータが取得できて

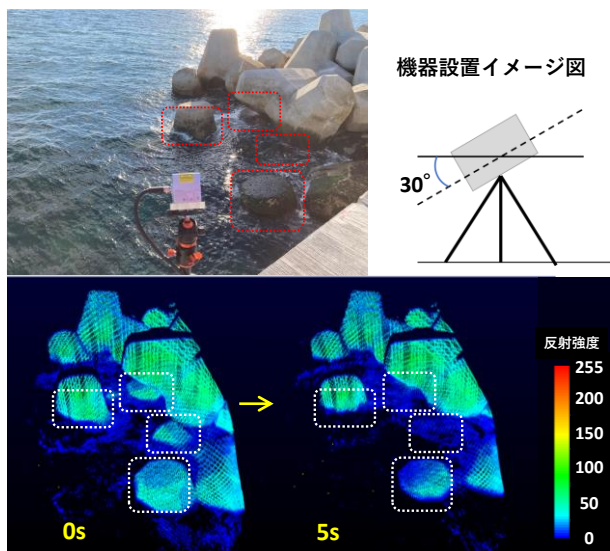


図-6 消波ブロック照射時の様子と取得点群

いる。2回目の観測前にはまとまった降雨があり、近くの川から流出した濁質が海水中に多く含まれていた可能性があり、2回目の計測ではこの濁質でレーザー反射強度が増加することで観測範囲が拡大したと考えられる。なお、赤外線レーザーは水中での減衰率が非常に高いことを鑑みると、水中の濁質にレーザーが反射していることは考えにくく、水面付近の濁質、もしくは浮遊物に反射していることが推察され、水質によって観測範囲が変動することを示唆している。

取得した点群を用いて、0.5秒、2秒の時の水面形状を図-8に断面表示した。0.5秒時の水面形状に対し、2秒後には水面が0.35m低下していることが確認できるように、構造物周辺の複雑な水面変動を取得可能であることが確認された。

3. 点群による時系列評価手法

波浪観測では前述してきた定性的な評価だけではなく、時系列情報としての定量的な評価が求められる。しかし、点群を用いた水位時系列の評価手法は、数値解析では粒子法などでは事例があるものの、現地観測で得られた面的な点群に対しての事例が無い。

そこで、本章では地点Dの2回目に得られたデータを分析・検討することで、面的な点群を用いる場合の水位時系列評価手法を構築する。面的に分布する点群データを評価するにあたり、対象範囲を格子に分割し、格子内に含まれる点群の値を解析することで、格子毎の水位とする手法を検討する。

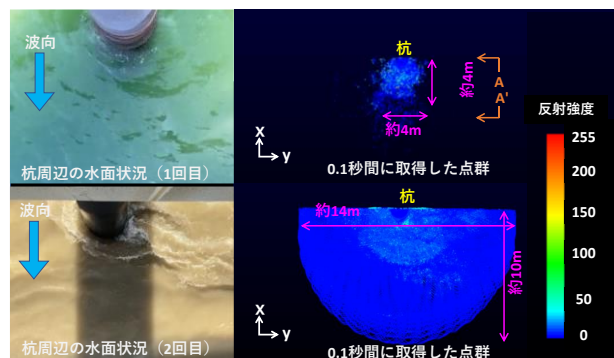


図-7 取得点群イメージ

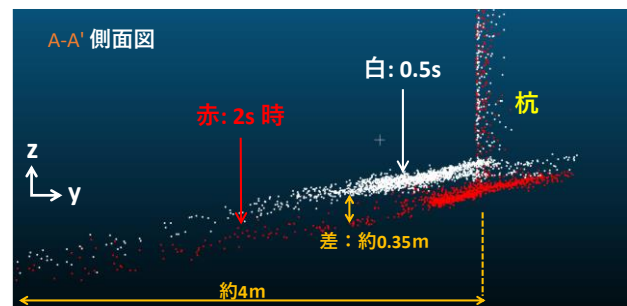


図-8 鋼管杭周辺の水面形状 (1回目)

(1) サンプリング時間の点群個数への影響

従来の現地観測データのサンプリング時間は 0.5 秒が主流となっているが、LiDAR による点群データの点群出力最小時間は 0.1 秒である。そこで、90 秒間の観測データを用い、図-9 に示す範囲 a, b, c において、格子サイズ 10cm に含まれる点群数を評価した。この時、サンプリング時間は 0.1, 0.5, 1.0 秒とし、例えばサンプリング時間が 0.5 秒の場合は 0.0~0.5 秒までの点群を用いる。

図-10 は 3 範囲の 10cm 格子内の 90 秒間の点群個数推移であり、0.1 秒の場合では LiDAR にほぼ正対する範囲 a に平均 6 個程度の点群が存在しているが、範囲 b, c では点群個数が 0 である回数も多い。これは、LiDAR の走査線の特性に加え、水面に対する入射角度が正対すると観測データが得られやすいのに対し、入射角度が正対より外れることで欠測していることが影響している。しかし、サンプリング時間を 0.5 秒以上とすると範囲 b, c においても概ね 1 個以上の点群が取得されている。

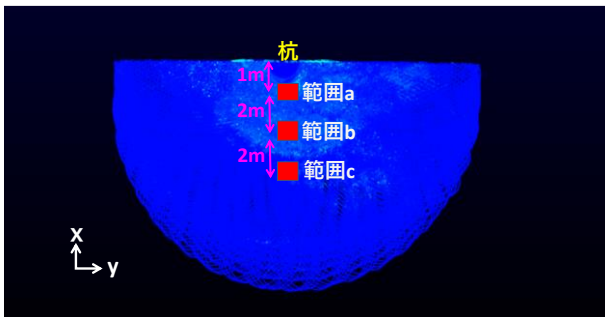


図-9 点群数の評価格子位置

(2) 格子サイズの点群個数への影響

格子内に点群が存在しない場合は欠測となるため、なるべく広い格子サイズとすることで格子内に点群が存在する可能性は高くなる。しかし、格子サイズを大きくすると格子内で水面勾配が発生し、正確な水面の評価ができない可能性がある。そこで、図-9 に示す 3 範囲において、サンプリング時間 0.1 秒における格子サイズ 10cm, 25cm, 100cm 内に含まれる点群数を評価した。

図-11 は 3 範囲の各格子サイズの 90 秒間の点群個数推移であり、格子サイズ 25cm の範囲 b, c では点群数が 0 である回数が存在するが、格子サイズ 100cm になると範囲 b, c でも点群は 1 個以上存在することが確認できる。

(3) 格子内点群の評価値の検討

サンプリング時間、格子サイズの設定により分割格子内の点群個数が変動することが確認されたが、サンプリング時間 0.5 秒、格子サイズ 25cm した場合の格子内の 90 秒間の点群個数推移を図-12 に示す。範囲 a では 70 個程度、範囲 b, c では 20~30 個程度の点群が安定して取得されており、ある時間の範囲 a における取得点群 70 個のそれぞれの水位は図-13 に示す頻度分布となっている。この格子における水位時系列を評価するためには、各時間の 70 個の点群の水位から 1 つの水位を決める必要がある。格子内に含まれるすべての点群の水位の平均を評価値とすることは、25cm 格子の空間的かつ 0.5 秒間の時間的な平均を評価値とすることになるが、取得点群にノ

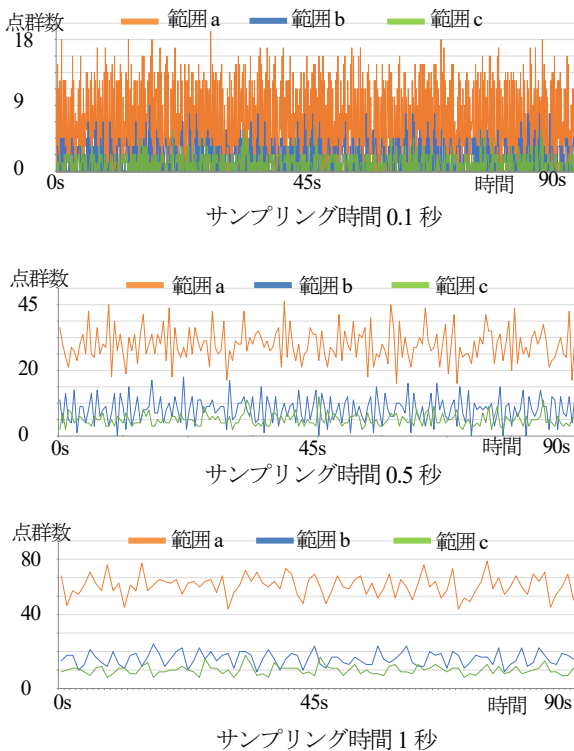


図-10 サンプリング秒数ごとの点群個数推移 (格子サイズ 10 cm)

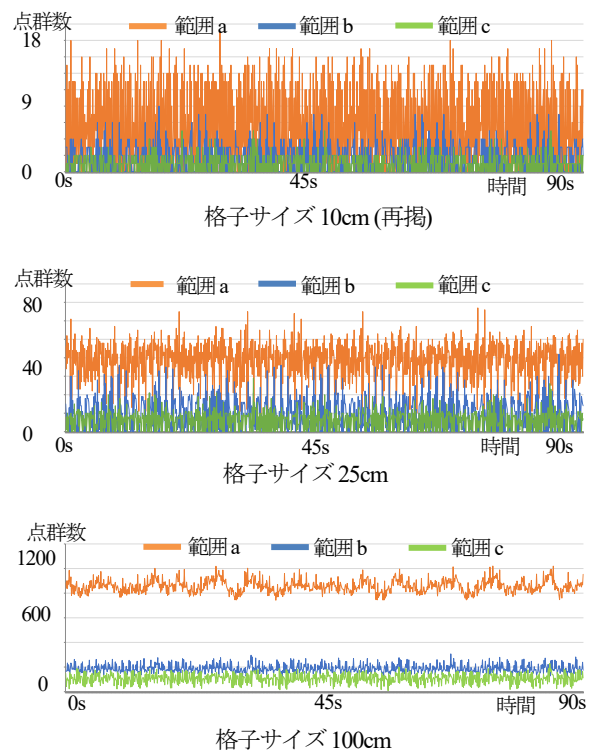


図-11 格子サイズごとの点群個数推移 (サンプリング時間 0.1 秒)

イズが含まれると、点群個数が少ない場合はその影響が大きく、平均値が大きく変動することが懸念されるため、水位値を昇順で並べたときの中央値も候補として考えられる。図-14は範囲aの格子内平均値、中央値を採用した場合の水位時系列であるが、お互いの時系列は短周期成分が含まれる不規則波の時系列においてほぼ一致しており、図-15に示すように高い相関があることから、今回の計測結果においては両値に有意な差は無いと判断できる。

(4) 水位時系列への影響

サンプリング時間による水位時系列への影響を確認する。図-16は範囲aの格子サイズ10cmの場合のサンプリング時間毎の時系列図である。サンプリング0.1秒のデータでは図-10に示す通り点群が存在しないため欠測により破線状になっているが、サンプリング0.5秒、1秒の時系列では欠測が無く、連続した水位時系列となっている。また、サンプリング時間1.0秒の時系列は0.1秒の時系列と比較して短周期の波の評価ができていない一方で、サンプリング時間0.5秒の時系列は短周期成分の波も含めて連続的にデータの取得ができており、サンプリング時間は0.5秒以下が適していると考えられる。

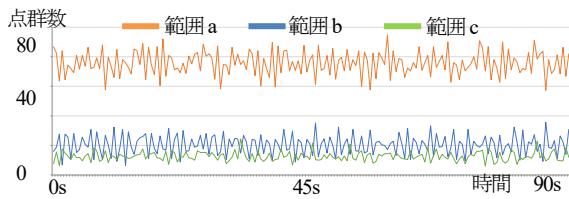


図-12 点群個数推移
サンプリング時間0.5秒点 格子サイズ25cm

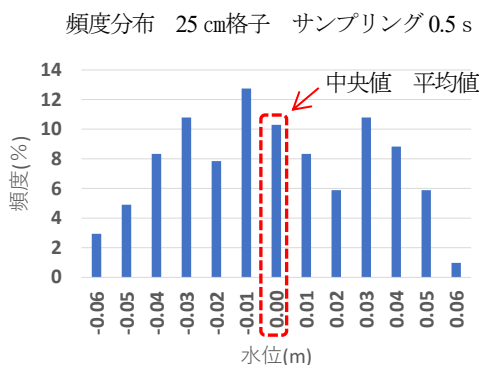


図-13 範囲aの点群水位頻度分布

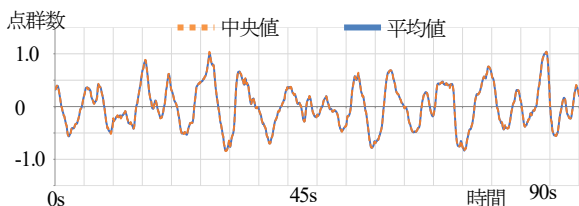


図-14 範囲aの水位時系列 (平均値, 中央値)

図-17はサンプリング時間を0.5秒とし、格子サイズを10cm, 25cm, 50cmとした場合の時系列比較図であり、いずれの時系列においても有意な差は存在していないため、サンプリング時間を0.5秒、格子サイズが10~50cmであれば得られる水位時系列は有効なデータであると判断できる。

(5) 水面分布形状の評価

これまでの検討を踏まえ、サンプリング時間を0.5秒、格子サイズが25cmとし、0秒、1秒における各格子の平均値を算出することで作成した水位の平面分布を図-18に示す。

観測時は平面図の右上からの波が入射しているため、波峰線が左上から右下に存在し、また、0秒から1秒にかけて波が左下に伝播する様子が確認できる。この結果は面的LiDARを用いることで非接触でありながら25cm間隔の高密度の水面計測ができていていることを示している。

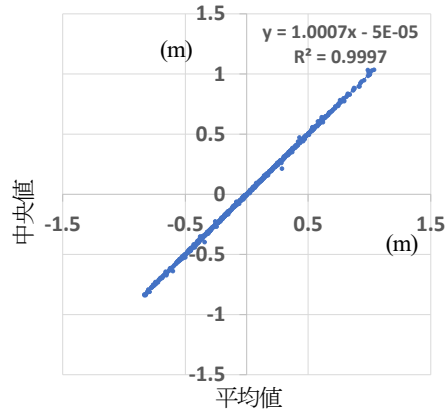


図-15 範囲aの平均値, 中央値の相関

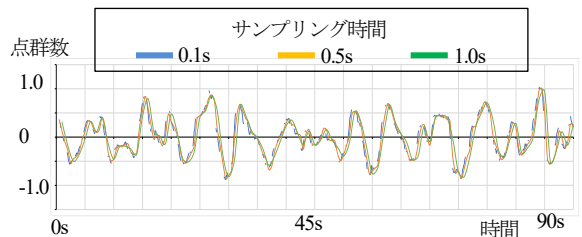


図-16 範囲a 格子サイズ10cm

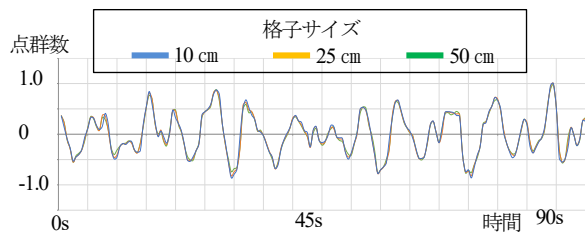


図-17 範囲a サンプリング時間0.5秒

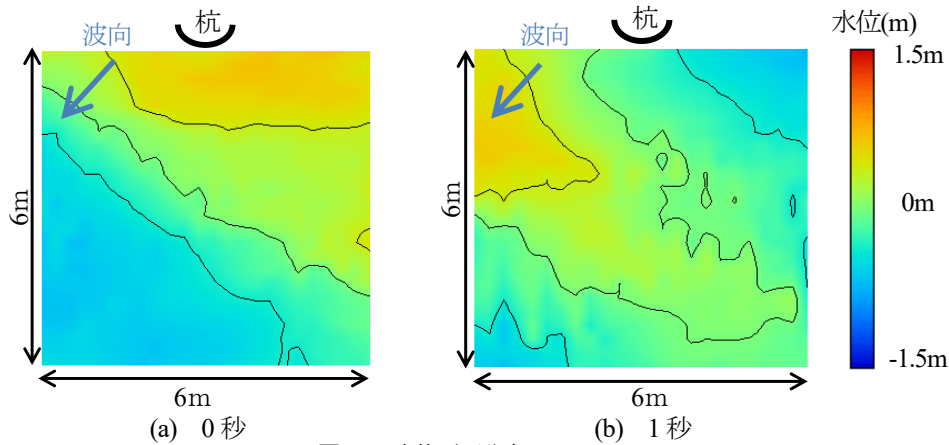


図-18 水位平面分布

(サンプリング時間0.5秒, 分割格子25cm)

4. おわりに

本研究では非接触で対象物までの距離計測が可能な赤外線面的 LiDAR を用いた水面観測について検討を行った。その結果、従来の計測手法では空間的に高密度な計測が困難であった汀線部、構造物周辺の気泡を含む水面変動や飛沫などに対して有効な観測データを取得でき、この結果は、碎波、消波、遡上などの複雑な現象の研究の一助になることが期待できる。また、観測で得られた点群データから水位時系列を評価する手法として格子分割による手法を提案し、格子分割数、サンプリング時間により影響を評価したことで、水面変動を詳細に把握可能となった。今回の観測により、LiDAR と水面の入射角度や現場海域の水質が影響する可能性が示唆されたが、今後も種々の観測条件、構造物などにおける適用性検討を継続し、新規観測手法として活用を目指したい。

REFERENCES

1) 小舟浩治：わが国沿岸海域における波浪観測手法と出現波浪の特性に関する研究，港湾技研資料，No.668，1990。[Kobune, K: A Study on Wave Observation Methods and Characteristics of Emerging Waves in Coastal Areas of Japan, Harbor Technology Research Information, No.668, 1990.]
 2) 琴浦毅, Sivaranjani JAYAPRASAD, 今野洋幸, 宮作尚宏, 堺浩一, 間野耕司：港湾事業における航空機測深技術 ALB 活用に関する検討，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，75 巻 2 号， pp. I_109-I_114, 2019。

[Kotoura,T., Sivaranjani JAYAPRASAD., Konno,H., Miyasaku,N., Sakai,K. and Mano,K :Investigation On Utilizing ALB In Port And Harbor Projects, Transaction of the Japan Society of Civil Engineers B3 Ocean engineering,Vol.77, Issue 2, pp. I_109-I_114, 2019.]
 3) 西広人, 琴浦毅, 堺浩一, 今野洋幸：UAV を用いた消波ブロックの測量手法に関する検討，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，76 巻 2 号 p.I_690-I_695, 2020。[Nishi,H.,Kotoura,T., Sakai,K.and Konno.,H. :Investigation on The Surveying Method of Wave Dissipating Blocks Using UAV, Transaction of the Japan Society of Civil Engineers B3 Ocean engineering,Vol.76, Issue 2, pp. I_690-I_695, 2020.]
 4) Thomas Kabel, Christos Thomas Georgakis: *Mapping Ocean Waves using New LIDAR Equipment*, ISBN978-1 880653 85-2;ISSN 1098-6189
 5) 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.]
 6) 水野辰哉, 松長悠太, 西広人, 琴浦毅, 西畑剛, 松葉義直, 田島芳満：面的 LiDAR の室内実験観測への適用性検討，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，79 巻 2 号，(投稿中)，2023。[Mizuno, T., Matsunaga, Y., Nishi, H., Kotoura, T., Nishihata, T., Matsuba, Y. and Tajima, Y. :Examination Of The Applicability Of 3D-Lidar To Experimental Observation, Transaction of the Japan Society of Civil Engineers B3 Ocean engineering,Vol.79, Issue 2, under submission, 2023.]

(Received February 9, 2023)

(Accepted May 4, 2023)

STUDY OF OBSERVATION METHOD USING LIDAR IN THE PORT FIELD

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

Wave observation in the port and harbor field is important in all phases of design, construction, and maintenance, and many cutting-edge observation techniques have been applied in the field, and many studies have been conducted on observation data analysis methods. In recent years, with the development of ICT technology, LiDAR (Light Detection and Ranging), which enables us to grasp three-dimensional shapes by using lasers, has been widely used, but there are few observation cases in the port field. In this study, we conducted field observations using the areal LiDAR and investigated its applicability and future potential for wave observation.

Measurements taken at the shoreline show that when the waves break and run up the beach, there is a lot of water splashing on the structures and around structures such as caisson tips, steel pipe piles, and dissipating blocks, complex changes in the water surface could be acquired as an areal point cloud. In addition, in order to evaluate the acquired point clouds, we developed an evaluation method for the acquired point clouds by considering the grid partitioning dimensions and time division Δt . Wave observation methods based on non-contact surface LiDAR technology are expected to be used for future wave deformation research because they can measure wave breaking conditions in the field and complex water level fluctuations around structures at high densities, which have been difficult to measure in the past.