

LiDARを用いた海岸モニタリング手法の提案

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⁴

¹ 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 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) 技術研究所 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)

沿岸高波浪による打ち上げ・越波越流・海岸変形は、海岸構造物被害を引き起こすだけでなく、防護施設後背地への浸水被害の大きな要因となる。高波浪などのイベント時には、発生する各種現象の迅速な把握が重要であるが、既往の観測技術では高波浪時にも対応できる堅牢性の確保が課題であった。本検討では、防水防塵性能を有する安価な LiDAR(Light Detection And Ranging)を用いて、沿岸の厳しい環境下でも長期運用可能な海岸モニタリング手法を構築し、日本海側で冬季の現地観測を行った。その結果、海岸構造物、地形、水面の同時観測が可能であり、遡上波、越流、後背地への浸水、地形変化を評価できた。そのため、海岸モニタリング手法として有効であり、今後の活用が期待される。

Key Words : LiDAR, field observation, wave overtopping, coastal facilities, coastal topography

1. はじめに

沿岸高波浪によって引き起こされる打ち上げ・越波・越流・地形変化は、海岸構造物被害を引き起こすほか、時に防護施設後背地の浸水被害の大きな要因となる。高波浪襲来時には海岸堤防前面の消波機能を有する海浜地形や、海浜の遡上波の形態が連続的に変化することで海岸堤防を越波する危険性が時系列的に変動するため、台風や冬季波浪等のイベント時に発生する各種現象の迅速な把握が極めて重要である。特に長い海岸線が厳しい外力にさらされている我が国においては、安価かつ頑健な海岸のモニタリング技術の確立が求められている。しかし、従来のモニタリングとして一般的な海底設置型波高計の場合、設置地点の1点のみの波浪観測となることや、地形変化が大きい海浜部に設置が困難なため、海浜上の遡上波の観測は難しい。そのため、設置が容易で低コストであるカメラを用いた手法^{1),2)}による遡上波の観測が広く用いられてきたが、光学カメラを用いた場合は視界不良の荒天時や夜間の運用に課題が残る。また、遡上波への影響が大きい地形変化や、越波の影響による海岸施設の被害状況把握については UAV を用いた写真測量、

レーザー測量が実用化されているものの、現状では強風などの荒天時やリアルタイムでの運用が困難である。

こうした課題を解決するモニタリングシステムとして、自動車の自動運転技術での需要から安価で入手が可能かつ、高い防水・防塵性能を有した LiDAR (Light Detection and Ranging) を用いることを検討した。LiDAR は、近赤外線光を発出し、物体までのパルスの往復時間を基に物体までの距離を計測し、LiDAR を基準座標とする XYZ を有する点群を取得する技術であるため、昼夜問わず計測が可能である。水野ら³⁾は面的に点群が取得できる LiDAR を室内平面波浪実験の波高計測に適用し、従来の容量式波高計と同程度の精度で計測が可能となる処理方法を提案している。また、松長ら⁴⁾は LiDAR を用いた遡上波などの現地観測への適用性を検討しているが、海岸モニタリングの観測を長期的に行った事例は少ない。

本検討では、LiDAR を用いた海岸モニタリングシステムを構築し、冬季に日本海側で観測を行うことで厳しい環境下での長期運用性を確認するとともに、高波浪襲来時の連続的な観測データによる打ち上げ・越波・越流・地形変化の評価方法と、現地観測の適用性について検討する。

2. 現地観測の概要

現地観測は、石川県片山津海岸の新堀川左岸側を対象とした。当該地点は沖合に消波施設がなく、高波浪時には波が直接入射するため、侵食および越波対策のための粒径 5 mm 程度の養浜が実施されるとともに、導流堤基部に海岸管理用の CCTV が設置されている。本検討では、CCTV 支柱を用い、海岸堤防天端から約 8m の高さに LiDAR と WEB カメラを俯角 50° 、南西方向に取り付け、制御用 PC を支柱下部に設置した（図-1、2）。

WEB カメラは現地の状況を確認するために、視野が確保される日中の時間帯（06:00~18:00）に起動させ、5 fps での動画撮影を行った。LiDAR は、表-1 に示す面的に点群データの取得可能な機器を用い、20 分毎に 10 分間の観測を 24 時間連続で稼働させた。

観測機器を 2023 年 12 月 14 日に現地設置した後に 4 月上旬まで連続してデータ取得ができていた中で、本論文では 2023 年 12 月 16 日から 2023 年 12 月 18 日の高波浪時を対象とした。この時、近隣のナウファス福井港（速報値）では、有義波高 6 m 前後、有義波周期 11 秒前後、波向き NW を観測している（図-3）。



図-1 現地観測位置



図-2 現地観測機器設置状況

表-1 LiDAR 諸元

性能項目	
レーザーの種類	近赤外線
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

3. 現地観測の結果

(1) 取得データの評価方法

本モニタリングシステムで観測した WEB カメラの映像と LiDAR の点群を図-4 に示す。WEB カメラの映像の画像左側が岸方向、右側が沖方向であり、海岸堤防とその前面の消波ブロック、砂浜、遡上波と、多数の気泡が存在する海面が確認できる。LiDAR で取得した 10 分間（600 秒）の点群を、0.4 秒間に取得された点群ごとの 1500 データに分割した分割データを作成した。WEB カメラの映像と同じタイミングの 0.4 秒間の分割データの点群でも、 $x=0$ m 付近の海岸堤防、 $x=10$ m 付近の消波ブロックとその前面砂浜に加え、 $x=24$ m 以遠の遡上波帯が点群として同時に取得できている。通常、LiDAR や地上レーザースキャナで使用される近赤外線光は、地形や構

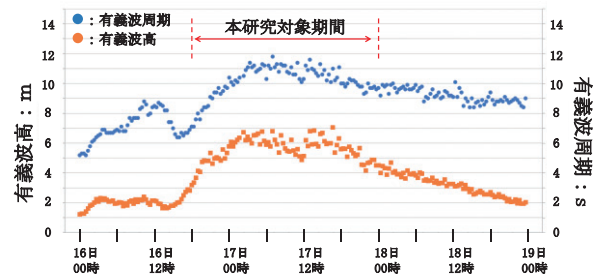
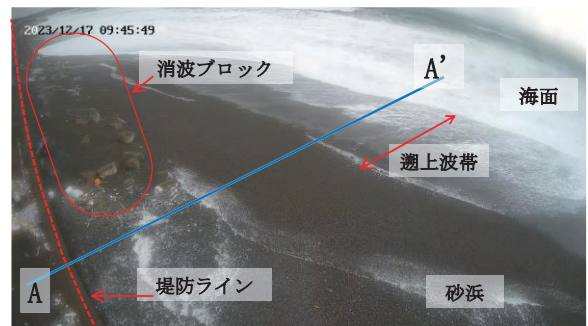
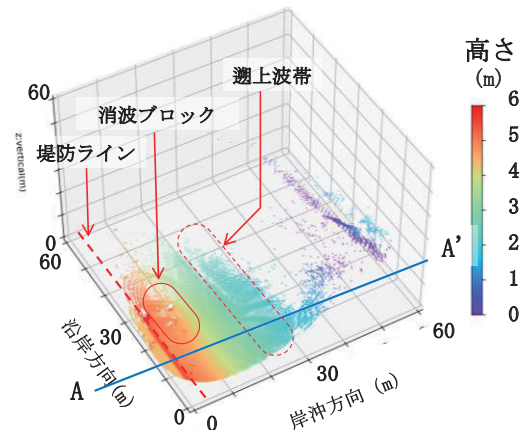


図-3 ナウファス福井港（速報値）



(a) WEB カメラで取得した映像



(b) LiDAR で取得した点群（0.4 秒間分）

図-4 モニタリングシステムで取得した映像と点群

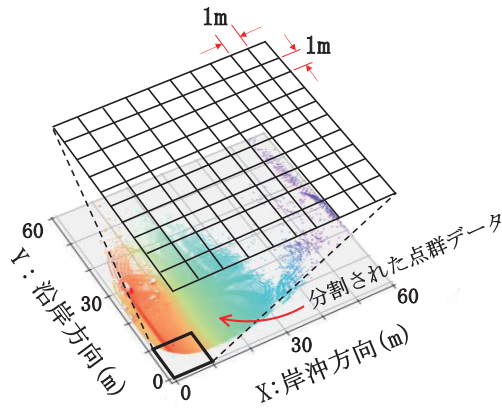


図-5 XY平面における1m格子

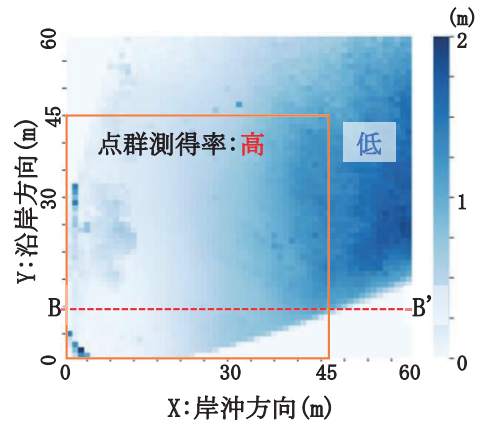
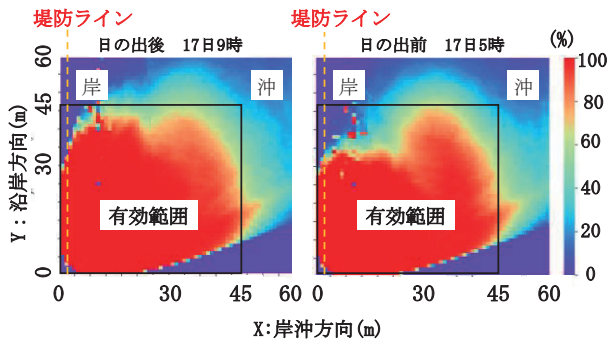
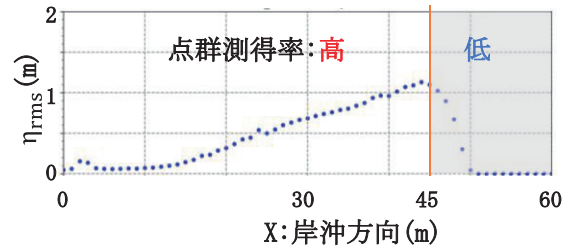

(a) η_{rms} の平面分布


図-6 点群測得率



(b) B-B'断面

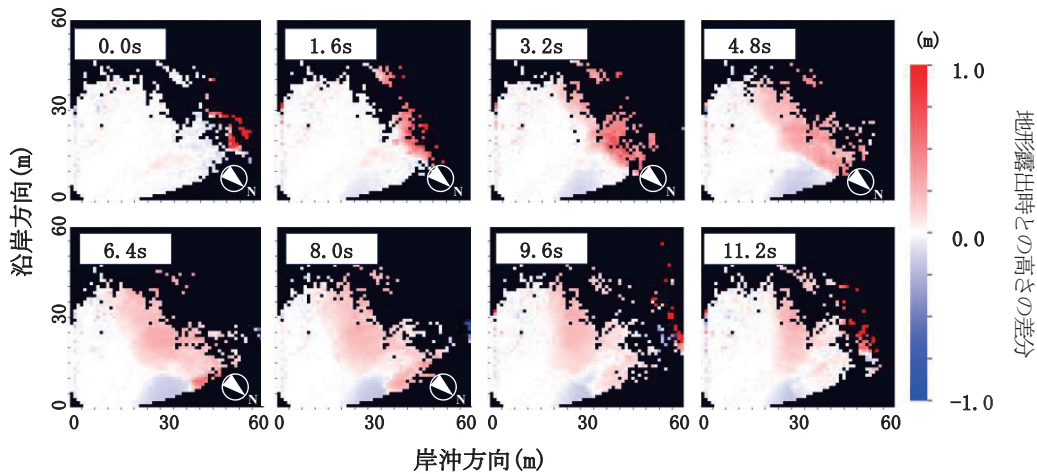
図-8 η_{rms} の平面分布および断面


図-7 遡上波による水位変動分布の時系列

造物などの計測には有効であるのに対し、水面では鏡面反射により観測機器への反射が小さくなり、欠測となることが多い。しかし、松長らは現地観測の結果から気泡や水滴のような球体が LiDAR で観測可能なことを確認している⁴⁾。つまり、沿岸部に高波浪が来襲する場合、砕波帯で多数の気泡が発生することで、LiDAR を用いた水面計測に適した条件となり、その結果、海岸構造物、砂浜、水面の同時計測が可能であることを明らかにした。

次に、1500 個に分割した分割データの点群を、LiDAR 座標系から Z を鉛直上向き、X を岸沖方向に持つ直角座

標系に変換し、XY 平面 1.0m 格子に区切り、各格子内に含まれる点群の Z 値の平均を格子内の代表高さとするこ
とで、0.4 秒ごとの XYZ の格子データを作成した(図-5)。この時の 10 分間 1500 個の格子データにおいて XYZ が存在する回数の割合を点群測得率として、光学カメラでも視認が可能な日の出後の時間帯と、光学カメラでは視認が困難な日の出前の時間帯における点群測得率を図-6に示した。LiDAR 照射範囲外の箇所は測得率 0%の紫色となっているが、LiDAR 設置位置に近い箇所では測得率の高い赤色となっている。本観測においては観測環境の

照度に関係なく岸沖方向、沿岸方向の約 45 m 以内の範囲で、点群測得率が 80%以上の格子が多いため、この範囲が計測有効範囲と考えられる。また、沿岸方向 $x=24$ m 付近までが砂浜の範囲であることを考慮すると、 $x=24\sim 45$ m の約 20 m 範囲における水面部を点群として取得できている。

(2) 波の伝播および遡上

LiDAR で取得した点群のうち、大部分で砂浜表面が露出した時刻を基準として、波の伝搬・遡上が WEB カメラで確認された時間帯の 1.6 秒ごとの各格子の高さ方向の変化をヒートマップで示した (図-7)。白色は基準となる地形露出時と高さに変化がないことを示しており、0 秒～4.8 秒にかけて図面右上の北西方向から赤色で示された波の峰が伝搬してきており、6.4 秒以降では砕波しながら砂浜を遡上している様子が確認できることに加え、11.2 秒の沖合に次の波の峰が存在していることが分かる。このことは、NOWPHAS 福井で観測された有義波周期 11

秒の波を、1 波毎に平面的に捉えることが可能であることを示している。また、3.2 秒以降の右下部では、大部分で砂浜表面が露出した時刻を基準とした点群に存在していた一部の波が、引いたことにより高さが減少した。以上から押し波に加えて引き波の状況も平面的に取得可能であることが分かった。

次に、10 分間に来襲した遡上波の波高の統計値を検討する。各格子内の 0.4 秒ごとの 10 分間 1500 個の格子データに対して、1500 データの高さ平均を算出し、その平均値と 0.4 秒ごとの鉛直方向成分の変動 η を用いて η_{ms} を算出した。図-8(a)が η_{ms} の平面分布を示しており、計測有効範囲内では、沖側 $x=45$ m で 1 m 程度の波が伝搬するに従い砕波が進行し、 $x=10$ m 付近でほぼ 0 m になっている。また、 $x=0$ m 付近の海岸堤防、 $x=5$ m 付近の消波ブロックでは値が大きくなっているが、これは後述する高波浪の遡上時に、構造物に衝突して発生した飛沫により瞬間的に鉛直方向成分の変動 η が大きくなったことが影響していると考えられる。また、(b)の B-B'断面図においても η_{ms} が岸側に伝搬するにつれて減少している様子を確認でき、LiDAR による観測装置を用いることで、従来の波高計観測では困難であった海浜部の複数点での波の伝播が評価できることを確認した。

(3) 越波および堤防後背地への越流

図-9(a)は、2023 年 12 月 17 日の 09 時 47 分に発生した越波を WEB カメラで取得した映像であり、砂浜から海岸堤防まで気泡交じりの水面に覆われていることが確認できる。この瞬間に LiDAR で取得した点群を格子データに変換し、大部分で砂浜表面が露出した時刻を基準とした鉛直方向の変動を算出した平面分布を図-9(b)に示す。計測範囲が気泡に覆われていることにより、LiDAR で全体のデータ取得ができていたことが分かり、砂浜全体に加え、堤防上、堤防後背地においても 0.5 m 程度の水位上昇が面的に捉えられている。この時の C-C 断面を図-9(c)に示すが、海岸堤防基部から天端までは約 1 m の高さがあるが、海岸堤防の前面で遡上波の水位が上昇し、越流して後背地の浸水を引き起こしている様子が確認できる。

ここで、堤防上に 0.2 m 格子の検査平面を設定し、その検査格子内において越波前から越波後の間に取得された点群について、鉛直方向 10 cm 毎に存在する点群個数を図-10に示す。0.0 s は、越波前の状態で、堤防天端を取得しており、LiDAR の計測精度上ばらつきはあるものの堤防天端高は 5.4 m であるのに対し、0.4 秒時点では 5.6～5.7 m 程度の点群が多く、6.0 m、6.5 m にも点群が 1 個観測されている。この状況について WEB カメラの映像と比較すると、5.6～5.7 m の点群は越流を観測し、6.0 m、6.5 m の点群は飛沫を観測していると考えられる。したがっ

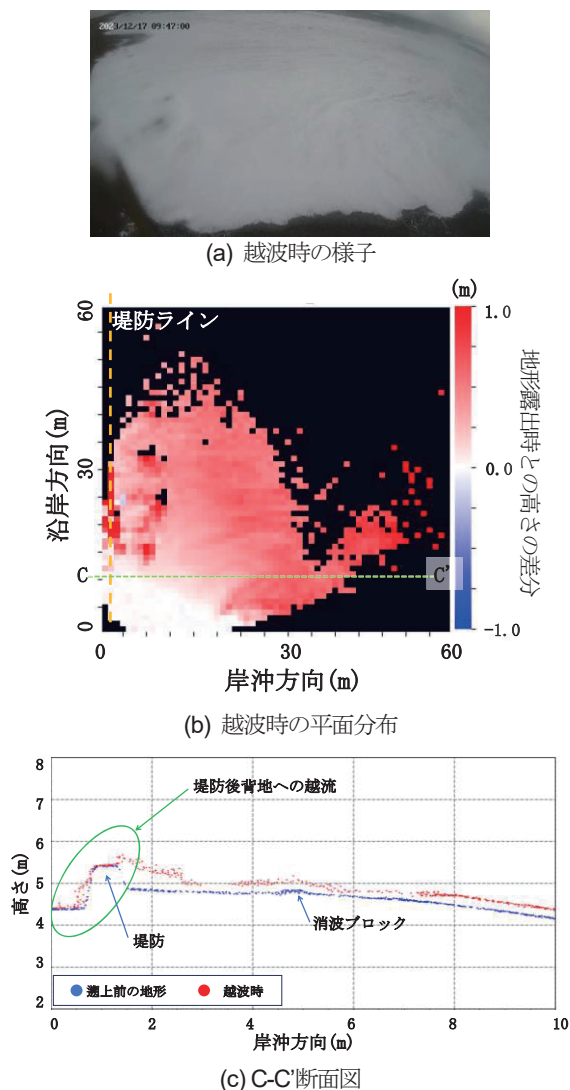


図-9 堤防後背地への浸水

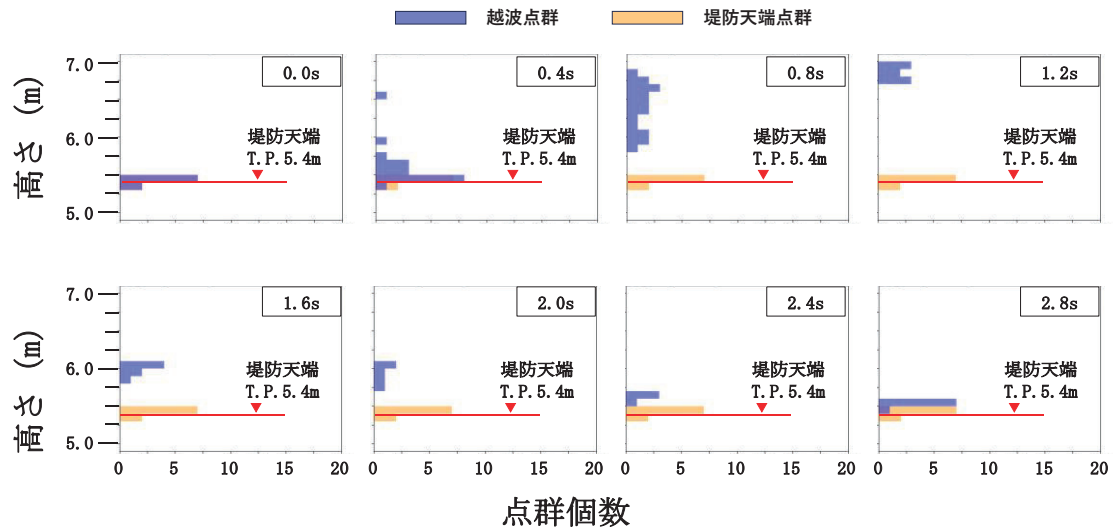
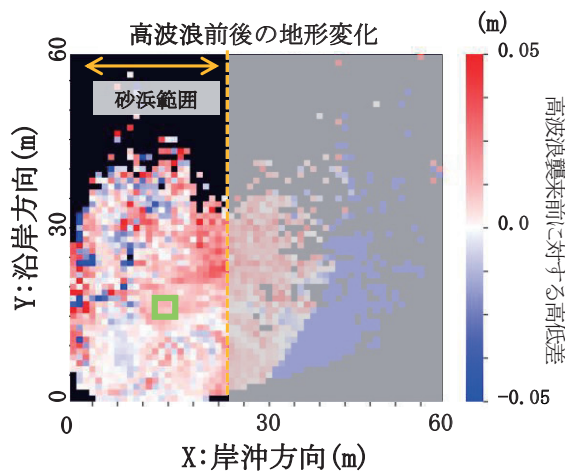
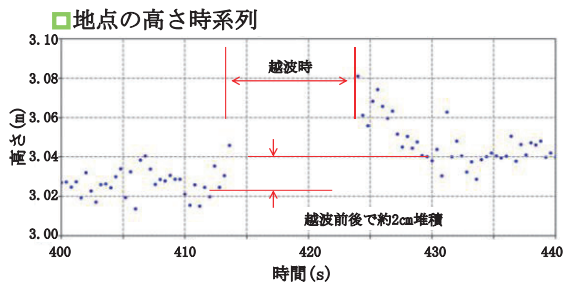


図-10 越波時における堤防上 (20 cm四方) の点群個数



(a) 17 日 09 時に発生した越波時の平面的な地形変化



(b) 上図(a)における $x=18$, $y=18$ 地点の高さの時系列

図-11 1 回の越波前後における地形変化

て、0.4 秒間は水深 0.1~0.2 m の越流が発生していたと推察される。また、0.8 秒では点群の高さの中心が 6.4 m 程度になり、1.2 秒では最高の 7.0 m 程度が観測されたのちに、点群の高さが減少していることから、飛沫が上昇して下降する状況を観測できていると考えられる。

以上より、LiDAR を用いた観測機器は、従来困難であった越波、越流、飛沫の平面的な現地観測を可能にする技術であることが確認できた。

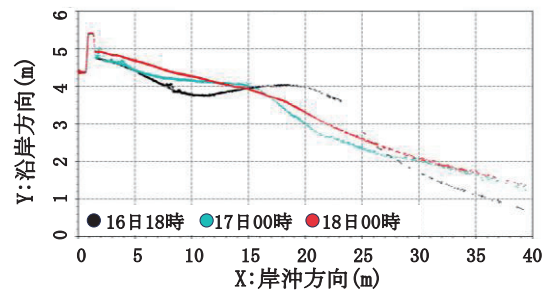


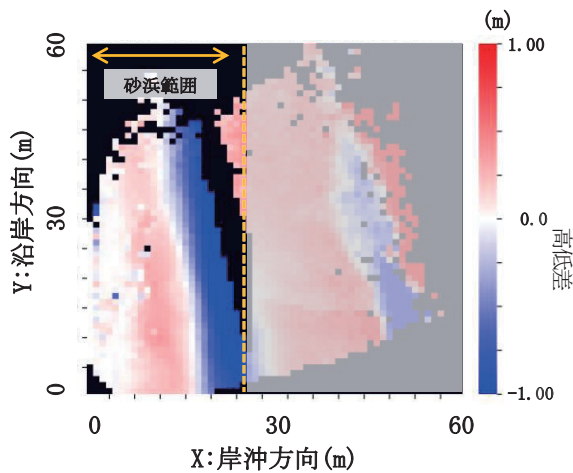
図-12 観測開始時からの断面的な地形変化

(4) 地形変化

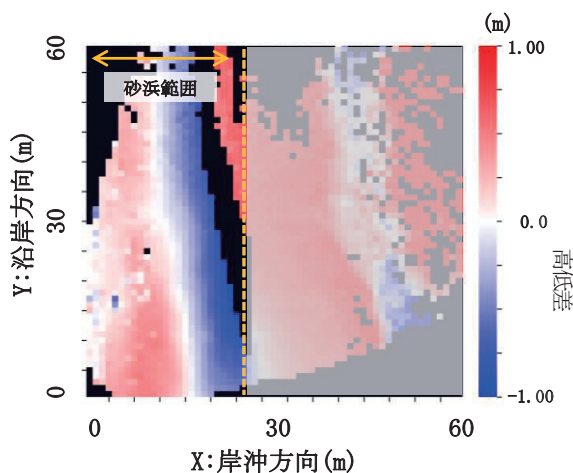
現場海域に来襲した高波浪の 1 波前後での地形変化を評価するにあたり、高波浪前後の格子データの差分を算出した。図-11(a)は格子データの高さ方向の平面変化を示しており、砂浜範囲においては赤色の堆積傾向であることが分かる。この図中の $x=18$, $y=18$ 地点の緑色の 1 m 格子内の格子データについて、高波浪前後の高さ方向の時系列を示したものが図-11(b)である。図中から越波前後の平均周りのばらつきは 1 cm 程度に収まっており、平均値でみると高波浪の来襲前後で、約 2 cm の堆積が確認された。

次に、本検討対象期間の初期地形 (2023 年 12 月 16 日 18 時) と、6 時間後 (12 月 17 日 0 時)、30 時間後 (12 月 18 日 0 時) の地形変化を図-12 に断面で示した。初期地形では $x=10$ m 付近がくぼみ、 $x=15\sim24$ m 範囲にバームが形成されているが、6 時間後にはバームが侵食され、 $x=10$ m 付近では堆積が進行している。さらに 24 時間後にはバームは消滅し、海岸堤防前面から一様勾配の海浜へと変化している。

この結果を平面的に評価するために、初期地形の格子データを基準として、6 時間後、30 時間後の格子データ



(a) 16日18時と17日00時の地形変化



(b) 16日18時と18日00時の地形変化

図-13 観測開始時からの面的な地形変化

の差分を算出し、図-13に示した。初期地形では $x=15\sim 24\text{ m}$ の範囲にバームが形成されていたため、6時間後、30時間後では当該範囲が大きく侵食し、それ以外の地点では堆積傾向であることが平面的に確認できた。

以上の結果より、LiDARを用いた観測装置は、1波毎の海浜地形変化の面的評価が可能であることに加え、高波浪中も連続して観測可能である利点を生かし、高波浪期間中の任意のタイミングでの地形変化について、空間的かつ時間的にも高解像度で評価できることを確認した。

4. まとめ

本検討では、LiDARを用いた海岸モニタリングシステムを構築し、石川県片山津海岸において冬期間の現地観測を行った。観測データのうち、2023年12月16日から12月18日の高波浪時を対象に観測データの評価・分析を行った結果、冬季波浪等の荒天時において、これまで観

測が困難であった波浪、越波、越流現象および地形変化などの海岸管理に重要な各種現象を同時に、空間的および時間的に解像度の高い観測が可能なることを明らかにした。また、本観測では従来手法と比較して安価な計測機器しか用いていないが、2023年12月14日から開始し、日本海側の厳しい環境である冬期間を超えた2024年4月でも継続して観測ができている。本観測手法により厳しい環境においても高い時空間解像度の面的な地形・水位のデータを長期にわたり取得できていることが示された。

今後は、本観測手法で取得できる観測データのリアルタイム処理システムを構築し、実運用に向けた海岸モニタリングシステムの開発を行うと同時に、常時波浪を含めた取得データの評価方法の高度化を進め、精度検証、信頼性や適用範囲について検討を進める予定である。

NOTES

注1) 国立検討開発法人港湾空港技術検討所：NOWPHAS 福井波浪観測地点、速報値、2023。
<https://nowphas.mlit.go.jp/pastdata/>

REFERENCES

- 1) 島田良, 石川仁憲, 戸口陽生, 小峰力: 画像解析を用いた波の遡上高の調査手法の提案, 土木学会論文集, B3 (海洋開発), Vol.79, No.18, pp. 23-18183, 2023. [Shimada, R., Ishikawa, T., Toguchi, H. and Komine, T. : Proposal of a method for investigating wave run-up height using image analysis, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Vol.79, No.18, pp. 23-18183, 2023.]
- 2) 鳥居大和, 菊雅美: 水理模型実験中の礫浜の地形変化を経時的に捉えるための3次元地形計測手法の構築と有用性の検討, 土木学会論文集, B3 (海洋開発), Vol.79, No.18, pp. 23-18023, 2023. [Torii, Y. and Kiku, M. : Development of 3D topographic measurement method to capture topographic changes of gravel beach over time during hydraulic model experiments and investigation of its usefulness, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Vol.79, No.18, pp. 23-18023, 2023.]
- 3) 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), Vol. 79, No.18, pp. 23-18121, 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, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Vol.79, No.18, pp. 23-18121, 2023.]
- 4) 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, B3 (海洋開発), Vol. 79, No.18, pp. 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, pp. 23-18115, 2023.]

(Received February 6, 2024)

(Accepted May 13, 2024)

PROPOSAL FOR A COASTAL MONITORING METHOD USING LIDAR

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

Nearshore high waves induce wave runup, overtopping and beach deformation, and cause not only damages of coastal structures but also severe coastal flooding. Although it is important to quickly assess such damage induced by high waves, it has been a challenge to assure reliable and robust nearshore monitoring system of such high wave events. In this study, we developed a coastal monitoring method using an inexpensive waterproof and dust-proof LiDAR (Light Detection And Ranging) system that enables us to monitor nearshore geometry for long period of time even under severe coastal environments. The developed monitoring system was tested at the winter coast on Japan Sea. Through the field test, we confirmed that the developed system can obtain synchronized geometric data of structures, beach deformation, wave runups and overtoppings. The method is robust and has a promising potential to be a future nearshore monitoring system.