

## グリーンレーザドローンを使用した海岸侵食対策工の3次元モニタリング

岡山大学大学院 学生会員 ○坂本 奈温子

岡山大学大学院 正会員 西山 哲

国土交通省 近畿地方整備局 非会員 岡部 晃

## 1. 目的

島国である我が国は約35,000kmもの海岸に囲まれており、諸外国に比べても国土面積当たりの海岸線延長は非常に長い<sup>1)</sup>。沿岸域では災害が発生しており、特に地球温暖化に伴う海面上昇などによる海岸侵食が多く報告されている。年間約160haもの国土が失われており、海岸保全施設の効率的な点検が重要な課題となる<sup>2)</sup>。そのため、離岸堤や人工リーフをはじめとする海岸侵食対策工が全国に存在する。これら対策工の状態や効果を把握するためには、海底や沿岸構造物の形状・状態を効率的に把握することが重要である。現在は目視による点検が主であるが、昨今の建設DX推進により、図面の3次元管理や点検診断の無人化・省力化が求められている。目視によって確認することができない海底や水中構造物のモニタリング手法として、ナローマルチビーム音響測深や航空レーザ測深が使用されているが、計測が困難な場所があることやコスト面などの課題も多い。そこで本研究では、水中を透過するグリーンレーザを使ったドローン測量により、基本性能の把握とICPを活用した消波ブロックの2時期間の変状抽出を行い、活用方法並びに今後の課題について考察することを目的とする。

## 2. 海底地形計測手法

## 2.1 既存の改定地形計測手法

既存の海底地形測量手法のうち、代表的な手法である、ナローマルチビームによる音響測深とALB(Airborne Laser Bathymetry)について概説する。

## 2.1.1 ナローマルチビームによる音響測深

本手法は船舶を用いて、ソナーヘッドから音波を送信し、海底からの反射波を受信する。その時間から距離を計算し、反射面の3次元データを取得するシステムである。特徴として、水深7000mの深海も

地形計測が可能なることから、海底地形計測手法として最も広く使用されているが、浅瀬や岩礁などの入船できない箇所での計測は不可能である。

## 2.1.1 ALBによる測深

ALBによる測深は航空機から水面で反射する近赤外レーザと水中を透過するグリーンレーザを照射し、両者の反射時間の差から水深を求めるシステムである。人や船が侵入できない浅瀬や浅海部を測量できるが、低コスト化や高密度点群の取得が困難である。

## 2.2 グリーンレーザスキャナ搭載ドローンの概要

本研究では、グリーンレーザスキャナを搭載したドローンによって計測を行った。使用した計測機材を図2-1に示す。グリーンレーザはダイオードから発射される波長約800nmのレーザ光を変調したものであり、水中を透過し水面下の地形を面的にとらえ、海底の点群データを取得することが可能である。グリーンレーザを使用した海底の地形計測としては前述の有人航空機によるALBが一般的であるが、迅速かつ低コストで行うことが困難であることに加え、400m以上の計測高度を要するため、高密度な点群を取得し難い。一方ドローン測量では、計測高度を150m以下まで下げることで、より詳細な地形の把握が可能である。そのため、ALBに代わる新たな海底地形測量手法として期待されている<sup>3)</sup>。



図2-1 使用したグリーンレーザスキャナ搭載ドローン

キーワード レーザ測量, グリーンレーザドローン, 三次元点群, 海岸侵食対策工

連絡先 〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1 岡山大学 環境理工学部棟 TEL 086-251-8801

### 3. 計測対象概要

計測対象は、三重県の熊野市から紀宝町まで 22km におよぶ七里御浜海岸の一部であり、上空から撮影した現場写真を図 3-1 に示す。計測範囲は赤枠で囲んだ約 350m×400m の範囲であり、図中の四角形と三角形はそれぞれ調整点と検証点の位置を示している。計測は 2 時期に分けて実施しており、1 時期目が 2021 年 7 月 20 日、2 時期目が 2021 年 11 月 24 日である。ドローンの飛行時間は両時期とも約 1 時間 20 分で、対地高度は 60m、飛行速度は 3.0m/s である。また、研究で使用したグリーンレーザスキャナの性能を表 3-1 に示す。

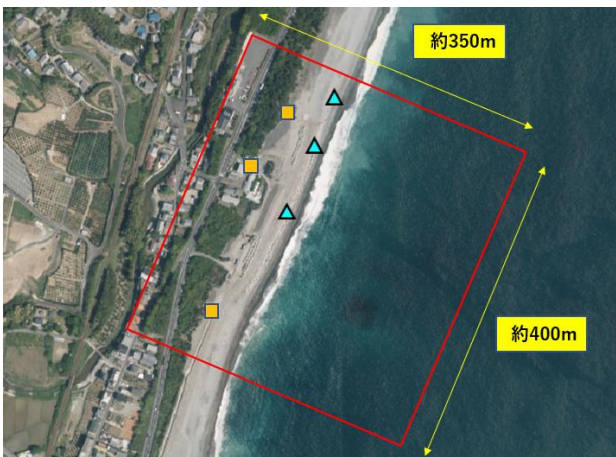


図 3-1 計測範囲と標準点の位置

表 3-1 グリーンレーザスキャナの性能

機器名	TDOT GREEN
レーザ波長 (Hz)	532±1nm
レーザ照射角 (度)	30
パルスレート (Hz)	60,000
スキャン回数 (走線/秒)	30

### 4. 計測結果

図 4-1 に測量によって得られた点群データの標高段彩図を示す。図中の水色部の変動から、約 4 か月間で地形が大きく変形していることが分かる。2 時期目のデータからは、本現場海岸線上に設置された消波ブロックにより、背後で海岸の侵食が抑制されて

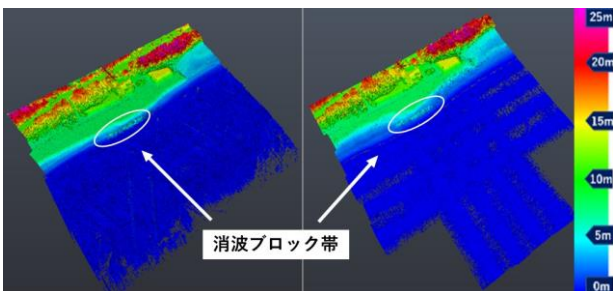


図 4-1 1 時期目(左)と 2 時期目(右)の計測結果

いることも確認された。また、調整点と検証点を用いたドローン測量の精度検証において、陸部での点群取得精度は調整点・検証点ともに±50mm 以下であり、良好な精度であった。

### 5. 点群データ解析

#### 5.1 断面図による解析

図 5-1 に両時期における同一箇所での断面を抽出した図を示す。1 時期目は海底地形データを取得できず、汀線位置を断面図から判別するのは困難な結果となった。これは、海岸特有の白波の発生により、グリーンレーザが遮断されたためであると考えられる。一方、2 時期目は汀線から平均約 35m、最大水深約 6.3m の海底地形データを取得でき、段(ステップ)などの微地形を断面図から確認することができた。一方で、汀線付近ではどの位置でも共通して欠測が発生しており、これも海岸線付近に発生していた白波の影響であると考えられる。

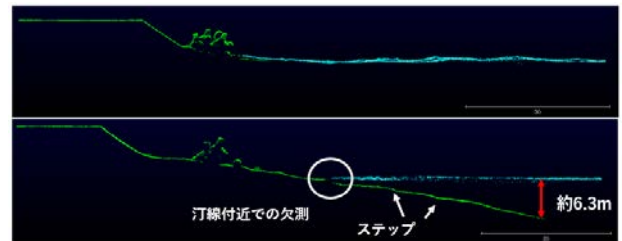


図 5-1 1 時期目(上)と 2 時期目(下)における海岸断面図

#### 5.2 水中構造物の形状把握

図 5-2 に 2 時期目の点群データからフィルタリングによって海面のデータを取り除いた 3 次元モデルを示す。作成した 3 次元モデルから、海底の形状の一部と沖合約 125m、水深 3m の位置に潜堤を確認することができた。図 5-3 に潜堤の天端被覆ブロックを抽出した図と潜堤の 3 次元モデルを示す。この図から、赤枠で囲んだ部分にて、周囲と比較して約 50cm のくぼんだ箇所を発見することができた。また、3 次元モデルによって、ブロックの移動やくぼみのような状態を把握することができる。この結果を踏まえると、潜堤のように水深の浅い位置にある広域な構造物の形状を把握することはマルチビームでは不可能であるため、ドローン測量による効率的なモニタリングが期待できる。また、潜堤は設置により背後で海底の洗堀が生じ、海岸に近い潜堤では汀線付近の海底形状に直接影響を与えることがある<sup>4)</sup>。そ

のため、ドローンによって海底の点群も同時に取得することができれば、潜堤の状態とともにそれらの設置に伴う悪影響の評価も効率的に行うことができると考えられる。

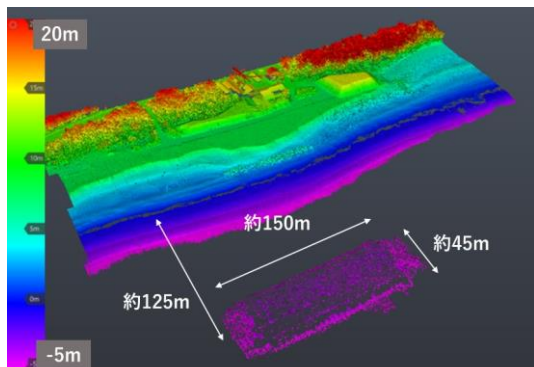


図 5-2 海面データを取り除いた 3 次元モデル

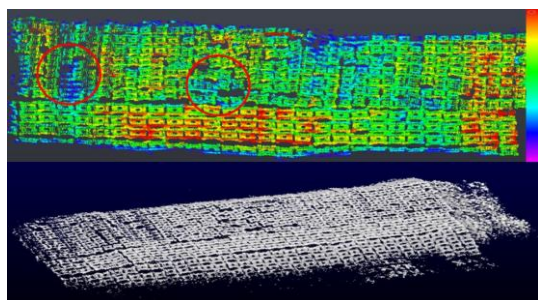


図 5-3 潜堤天端ブロック抽出図(上)と潜堤上部の三次元図(下)

### 5.3 測深深度と点密度の関係

沿岸域におけるドローン測定の測深能力を把握するために、測深深度と取得した点密度の関係について検証を行った。海底のデータを水深 1m ごとのエリアに分割し、それぞれのエリアごとに点密度の計算を行った。その結果を図 5-4 に示す。水深 3~4m のエリアで点密度が最大となり、水深 0~3m では浅いほど、水深 4~6m では深いほど点密度が低くなった。一般には水深が深いほどグリーンレーザが遮断され、点密度が低くなるが、海岸の場合白波や海底の砂の巻き上げ等により、浅瀬での点密度が低くなったと考えられる。

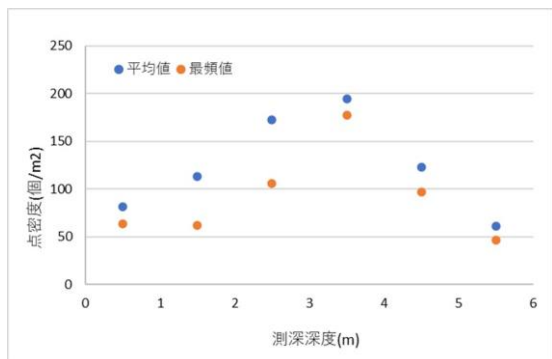


図 5-4 測深深度と点密度の関係

## 6. ICP による消波ブロックの変状抽出

### 6.1 検証の概要

本検証では、ICP(Iterative Closest Points)と呼ばれるアルゴリズムを応用し、七里御浜海岸で得られた 2 時期のデータを対象として、消波ブロックの変状抽出を試みた。ICP とは 2 つのスキャン(現在スキャンと参照スキャン)の間でスキャン点の対応付けと位置の最適化を交互に繰り返すことで点群のマッチングを行う方法である<sup>5)</sup>。消波ブロックは砂地盤の洗堀による沈下や、高波によるブロックの移動によって海岸侵食や越水などの被害をもたらす。消波ブロックは現在、目視によって沈下・移動・損傷等の点検が実施してされているが、調査期間の長期化や危険性が伴ううえ、全体の沈下量を把握するのは困難である。点検診断の効率化や省力化に向けてドローンを活用するために、本検証を実施した。

### 6.2 位置合わせと精度検証

ドローン測量で得られた点群データには測量による系統誤差が含まれていることから、ICP を用いて変状を抽出する際に位置調整を行った。約 4 か月の測量スパンで座標変動がないと思われる点を 5 点抽出し、それらを重ね合わせることで点群の位置を調整した。その後、消波ブロックと変状がないと考えられる面を同時に ICP による変状抽出を行うことによって、どれほどの精度で変状を抽出できるか検証を行った。図 6-1 に精度検証に用いた面を示す。また、表 6-1 に変状抽出の結果を示す。結果はどの基準面でも変状量が 5cm 未満となった。以上の結果から、変状量抽出に対する許容誤差を 5cm 未満とし、ICP によって得られる 5cm 以上の変状を消波ブロックの変状であるとみなした。

1)民家の屋根その1 2)民家の屋根その2 3)道路



図 6-1 精度検証に用いた面

表 6-1 基準面変状抽出結果(単位: m)

1)民家の屋根1	0.032243
2)民家の屋根2	0.04628
3)道路	0.049767

### 6.3 位置合わせと精度検証

図 6-2 に ICP によって得られた沖側から見た消波ブロック全体の変状を示す。変状抽出の結果、平均 33.8cm の全体的な消波ブロックの沈下が確認された。また、変状の大きさごとに配色をした図を図 6-3 に示す。図中において赤く囲んだ部分では周辺よりも大きい 118.3cm の変状が見られた。この部分を抽出した図を図 6-4 に示す。1つのブロックのみが大きな変状を示していることから、ブロックが移動した可能性があると考えられた。上空のオルソ画像からも同様の現象が確認されたことから、ドローンと ICP によって、全体的な消波ブロックの沈下と局所的なブロックの移動が把握可能であるといえる。

海岸の場合、海に調整点を置くことができないため位置調整の精度が陸上に比べて低くなる。そのため全体の沈下に関しては、計測の系統誤差を取り除くことができなかった可能性も考えられる。しかし、2 時期の計測の間に三重県内で記録的大雨が発生しており、海岸の形状も大きく変化していることから、消波ブロックの全体的な沈下が実際に発生している可能性は高いと考えられる。

以上の結果から、特に変状量の大きい消波ブロックを特定するためのスクリーニング手法としてドローンの活用が期待できる。

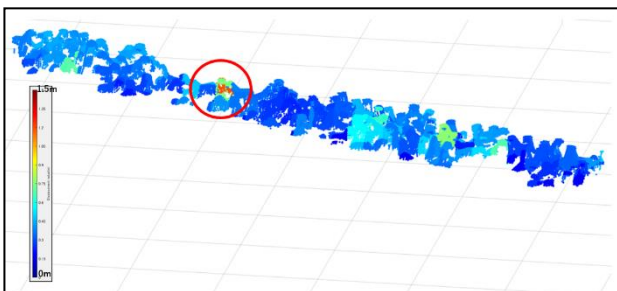


図 6-3 全体の変状量段彩図

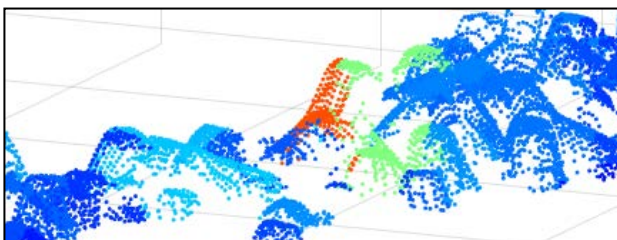


図 6-4 消波ブロック抽出図



図 6-2 沖側から見た消波ブロック全体の変状

### 7. 結論と今後の課題

本研究では、新たな手法としてドローン測量による沿岸域のモニタリングを実施するために、基本性能の把握と消波ブロックの変状抽出を試みた。断面図から最大水深 6.3m の海底点群データを取得することができたが、測量時期によって大きな差が発生した。また、測深深度と点密度の検証では、水深 3~4m の範囲で平均点密度が最大となった。3次元モデルからは水深 3m に位置する潜堤天端ブロックの約 50cm のくぼみとブロックの移動を確認することができた。このことから、マルチビームによる点群データ取得が難しい構造物の効率的なモニタリング手法としてドローン測量が活用できると考えられる。また、ICP による消波ブロックの変状抽出では、平均 33.8cm の沈下が確認され、局所的なブロックの移動も抽出することができた。ドローンは ALB よりも高密度な点群を取得可能であり、複雑な形状である消波ブロックの沈下状況や異常箇所を把握するための手法として活用が期待できる。今後は、様々な条件でデータを取得することによって、基本性能を確立していく必要があるとともに、正確な変状の真値が分かった条件での ICP による変状抽出等によって、沿岸域における変状抽出量の精度検証を行う必要がある。また、これらを海中の構造物に応用させることで、沿岸域における様々な構造物のモニタリングに活用できると考える。

#### 参考文献

- ・平山秀夫, 辻本剛三, 島田富美男, 本田尚正: 海岸工学, pp. 6-7, コロナ社, 2017.
- ・国土交通省: 沿岸部における気候変動の影響及び適応の方向性, pp. 8, 2015.
- ・富井隆春: ドローン搭載型グリーンレーザーの活用, 別刷 計測と制御, Vol. 60, No. 10, 2021.
- ・(一社)港湾技術コンサルタント協会: 改訂新版 港湾工学, pp194-195, 朝倉書店, 2021.
- ・友納正裕: SLAM 入門ロボットの自己位置推定と地図構築の技術, pp80 オーム社, 2018.