

港湾工事の計測を効率化するドローン 「Penta-Ocean Vanguard-Drone」の開発

三 宅 貴 大・西 広 人・琴 浦 豊

港湾工事は海上で施工されることが多いため、作業船による施工や船舶を使用した管理が一般的である。そのため、陸上から離れた海域での施工の場合、船舶での移動に多くの時間が必要となり、労働時間削減において課題となっている。そこで、本稿では近年の技術進歩が著しいドローンに着目し、従来の船舶を用いた施工管理の効率化を目的とした「Penta-Ocean Vanguard-Drone」の開発内容について報告する。新開発のドローンは2機種あり、それぞれ土量検収、海洋観測の効率化を目的としており、従来の施工管理と同等の機能を保有しつつ作業時間の短縮を実現した。

キーワード：港湾工事、ドローン、土量検収、深浅測量、波浪観測

1. はじめに

国土交通省は、建設現場の生産性向上の取り組みとして2016年度からi-Constructionの取り組みによりICT施工をはじめとした新技術の導入を進め、2024年度にはさらに一歩進んだ「i-Construction 2.0」を策定した¹⁾。この取り組みにより、施工、データ連携、施工管理のオートメーション化を3本柱として、建設現場の生産性を1.5倍向上させ、安全で快適な建設現場の実現を目指すことになる。これらの実現のために、従来技術のICT化、機械化、無人化にするなどの取り組みが必須となると考えられる。たとえばドローンはレベル4（有人地帯での補助者なし目視外飛行）導入のための法整備が進み、「空の産業革命」と呼ばれるように物流など幅広い分野で従来手法からの変革が進みつつある。ドローンは建設業界でも活用が進んでおり、陸上工事の大規模土工現場の管理、測量などに活用されているのに加え、港湾工事でも消波ブロックの気中部分に対する測量マニュアル²⁾が公表されるなど生産性向上に寄与しており、さらなる活用が期待されている。港湾工事では海上での作業が多く、施工海域の計測・確認をするには計測者に加えて船舶の手配、操船員が必要となることや、陸上から離れた箇所での施工の場合、交通船での移動は片道20分程度の時間が必要となることもあり、労働時間削減において課題となっている。これらの課題に対して、陸上の1人の操作者により広域を短時間で飛行できる特性を有するドローンは、港湾工事における課題解決

に寄与することが考えられる。また、人口密集地区などの制約がある陸上に対し、飛行に関する制約が比較的少ない海上ではドローンの活用の余地は大きい。そこで、筆者らは船舶を用いる従来の施工管理の効率化を目的とした港湾工事における計測用ドローンシリーズを2機種開発した。本稿では、開発した2機種のドローンの概要および従来手法との比較から、Penta-Ocean Vanguard-DroneLiDAR（以下、土量検収ドローン）とPenta-Ocean Vanguard-DroneAqua（以下、海洋観測ドローン）の導入効果について報告する。

2. 土量検収ドローン

(1) 開発背景

港湾工事において防波堤の基礎となる石材や地盤改良の材料として用いられる砂などは土砂運搬船で現場に搬入され、搬入時に積載数量の確認を行う検収が必要となる。土砂運搬船を検収する箇所が陸から離れている場合は、施工管理の職員が交通船での移動に片道20分程度の時間がかかることがある。土砂運搬船で材料を積載している船倉の大きさは長さ20m、幅10m程度であるため、スタッフやリボンを用いて形状を計測するのに6名程度の計測員で20分程度の時間がかかる。そのため、検収作業に関わる時間が1時間を上回ることもあり、検収作業の負荷軽減が求められていた。

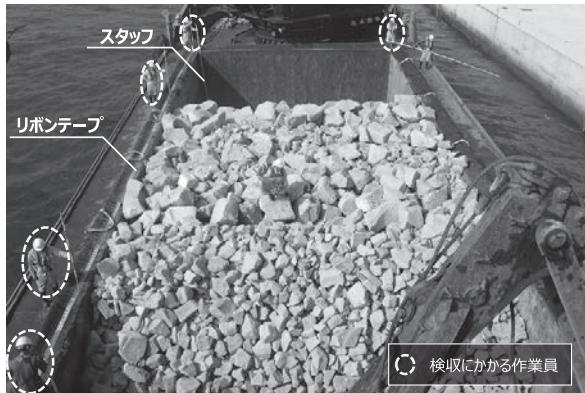


図-1 従来のガット船石材検収方法

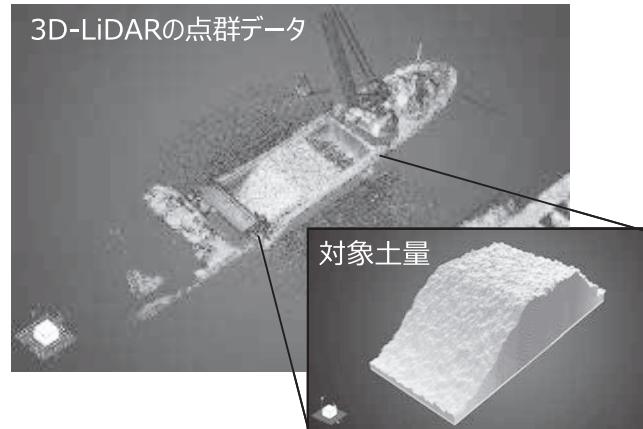


図-3 土量検収ドローンで取得した点群

(2) 機器概要と特徴

土量検収ドローンは土砂運搬船の検収作業の効率化を目的に開発したヘキサコプタータイプのドローンであり、図-2、表-1の機体スペックに示すように3D-LiDARとLTE通信機能を搭載していることが特徴である。陸上の1人の操作者により船舶の移動速度より圧倒的に速い速度で土運船上空まで飛行し、上空40 mから3D-LiDARで船体を5秒程度計測することで材料を積載している船倉を含む船体の形状の3次元点群が取得できる。なお、5秒間連続して計測をする場合、計測対象の土砂運搬船の動搖、移動や、土量検収ドローンの動搖、移動の影響により、計測点群のぶれが懸念されるため5秒間の計測データに後処理でSLAM技術を適用している。SLAMはSimultaneous Localization and Mappingの略であり、複数の点群

データの特徴点を用いて自己位置推定と周辺認識を同時にを行うことで、複数の点群の重ね合わせを可能とする技術である。この技術を用いることで、5秒間に取得した点群にぶれが生じている場合でも、それぞれの点群の特徴点を参考にして再合成することばらつきの少ない高密度な3次元点群の取得を可能としている。図-3は取得した点群の例を示しており、船倉に積載されている材料の形状はもちろん、クレーンブーム、ブリッジなどが高精度に取得できており、船舶・土量検収ドローンの動搖の影響が低減されていることが確認できる。また、本体下部の光学カメラで静止画を撮影することで、点群だけでは理解しにくい積載状況を把握可能としている。そして、取得した点群と静止画は、搭載されたLTE通信モジュールにより計測・撮影直後の飛行中に数量算出・帳票作成用クラウドに伝送・保存される。これは、2020年12月電波法の制度整備に伴い、高度150 m未満の空域において一定の条件に合致する携帯電話等の端末が無人航空機で利用可能となったために実現した機能であり、従来の着陸後にデータを回収する場合と比較して格段に早く計測データの確認が可能となった。

点群から土量を算出する手法は陸上工事の切盛土工などで標準的に使用されているが、数量算出用クラウドで土砂運搬船の積載土量を算出する場合は、事前に登録した土砂運搬船の船倉情報と、土量検収ドローンで取得した3次元点群との比較により算出し、搬入数量調書の作成を行うことで検収の一連の作業が終了する(図-4)。

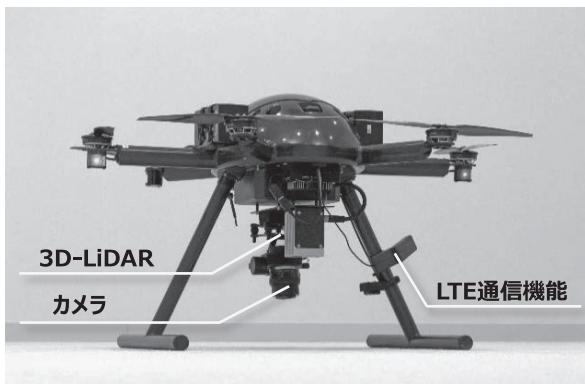


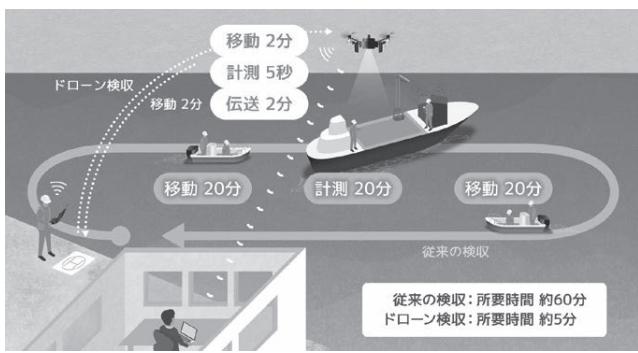
図-2 土量検収ドローン搭載機器

表-1 土量検収ドローン機体スペック

全長（プロペラ範囲）	1,173 mm
全高（アンテナ含む）	654 mm
機体重量（バッテリー含む）	7.07 kg (機体本体: 3.8kg)
最長飛行時間	約 35 分
飛行速度	10 m/s
LiDAR	Livox 社: Avia

(3) 従来検収手法と土量検収ドローンによる検収の比較

土量検収ドローンによる検収を横浜港本牧地区防波堤建築工事に石材を搬入する土砂運搬船を対象に実施



図一4 土量検収ドローンの導入イメージ

し、従来の検収手法と必要人員や所要時間について比較した。従来の検収手法では、施工管理の職員が土砂運搬船到着の連絡を受けてから、職員が操船員に依頼して交通船で20分程度の時間で移動して土砂運搬船に乗り移ったのに対し、土量検収ドローンでは2分程度の飛行で土砂運搬船の上空に到着した。この移動における比較では、操船員の1名削減と9割の時間削減効果が得られたことに加え、船舶移動によるCO₂排出の削減や危険の伴う乗下船動作の削減による安全性が向上する効果も得られた。土砂運搬船上での検収は、従来手法では船倉内に台形形状で積載された石材の法肩、法尻の高さ、幅や延長を6名の人員でスタッフ、リボンテープを用いて計測し、状況写真を撮影した後に、船上で電卓を用いて積載数量を算出するのに20分を超える時間が必要であった。それに対し土量検収ドローンは計測、撮影は5秒程度で終了し、取得したデータは即座に数量算出・帳票作成用クラウドに転送し、データ内容の確認、数量算出まで5分程度であった。つまり、この検収作業における比較では、土砂運搬船上の6名の人員削減と大幅な時間短縮が可能であったことに加え、短縮された時間は、土砂運搬船の待機時間削減につながり、工事全体の効率化に寄与した。さらに、土量検収ドローンの3D-LiDARを用いた非接触の計測により、動搖する船舶船倉内の不安定な石材上の移動が不要となるため、検収作業の安全性も向上した。なお、土量検収ドローンを用いた検収数量は、従来手法による1,720 m³に対して約10%程度の差となり、実用的な精度を有していることが確認された。

以上より、土量検収ドローンを用いることで、移動・計測で1時間以上を必要としていた従来の検収手法と比較すると、所要時間と人員を大幅に削減することに加え、CO₂の削減や安全性向上を可能とし、生産性や安全性が工事の実現に寄与することが確認できた。

3. 海洋観測ドローン

(1) 開発背景

防波堤の基礎となる石材の投入や海底地盤を掘削する浚渫など、港湾工事では海中での施工が主体となることが多く、不可視部分となる海中の工事進捗を直接確認することが難しい。そこで、船上からレッドと呼ばれる鉛を付けたロープを海底に向けて投下してロープに記載されている目盛から水深を測深する方法や、船舶に音響探査機器を取り付けて航行しながら連続的に水深を測定する方法等の深浅測量を実施することで施工管理を行ってきた。しかし、これら従来の施工管理では船舶の準備や移動が必要となるため、施工管理の職員が手軽に水深を計測することが困難であった。また、作業船や交通船を利用する港湾工事は、波高や周期などの海象条件に施工可否が大きく左右される。これはいわば陸上工事で重機が稼働している地面自体が動くようなものであるため、施工の進捗や安全性に与える影響は非常に大きい。そのため、施工当日の朝に対象海域の波浪状況を目視で確認することや、場合によっては施工箇所に海底設置型の波高計を潜水士により設置し、日々の波浪状況を加味しながら施工を進めている。しかし、目視での波浪状況の確認は船舶での移動が必要なことや波高計の設置は特殊技能を持つ潜水士が必要であること等、現場海域の海象条件を手軽に把握することが困難であった。

(2) 機器概要と特徴

海洋観測ドローンは現場海域の調査の効率化を目的に開発したクワッドタイプのドローンである。図一5、6、表一2に機体スペックを示すように本体下部の2つのフロートにより水面上での離着水を可能にするとともに、2基のスラスターを搭載することで水上航行を実現した。また、本体下部の単素子ソナーで機体直下の水深を計測できるのに加え、本体内部のRTK-GNSSの計測結果と合わせることで海洋観測ドローンの現位置(X, Y, Z)および水深のリアルタイム取得・確認を可能にした。さらに、操作画面から平面位置を複数指定することで水上航行の航路を指定することや、指定した位置に定点保持することも可能なため、波や流れのある環境下において、連続的な水深データや位置データの取得を実現した。

(3) 従来手法と海洋観測ドローンによる深浅測量の比較

海洋観測ドローンを用いることで、陸上の操縦者1



図一5 海洋観測ドローン飛行状況と搭載機器



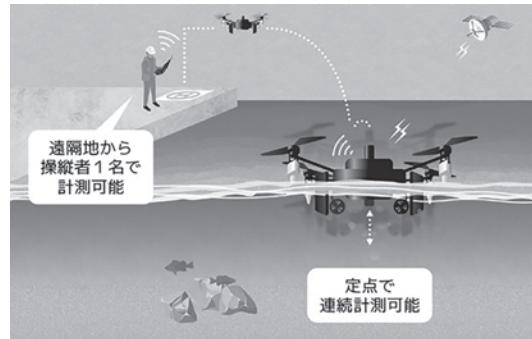
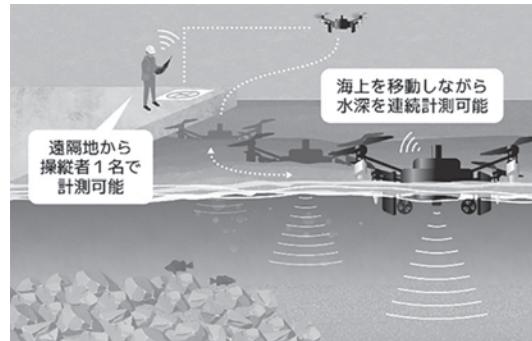
図一6 海洋観測ドローン着水状況

表一2 海洋観測ドローン機体スペック

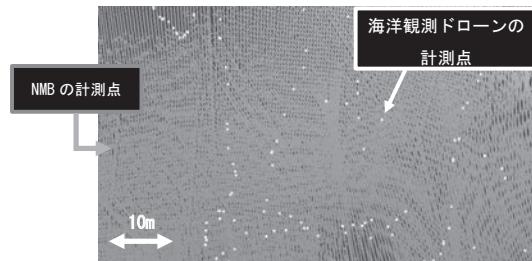
全長（プロペラ範囲）	1,280 mm
全高（アンテナ含む）	600 mm
機体重量（バッテリー含む）	13 kg
最長飛行時間	約 20 分
飛行速度	10 m/s
最長航行時間	約 60 分
最高航行速度	4 ノット
離着水可能最大波高	約 2 m

名が飛行・着水後に航行させながら GNSS 端末で現在位置を記録し、単素子ソナーで水深を計測することで空間的に連続的な水深データの取得が可能となり、従来のレッド測量や音響探査機による深浅測量の代替として利用可能である（図一7上）。また、対象海域へ海洋観測ドローンが飛行するため、船舶による現地への移動時間の大幅な削減が可能であることに加え、出力した測深結果はデジタルデータとして遠隔地と共有でき、施工進捗の確認をリアルタイムに行うことができるため、施工完了の判断や次工程への推移の迅速化にも寄与する。

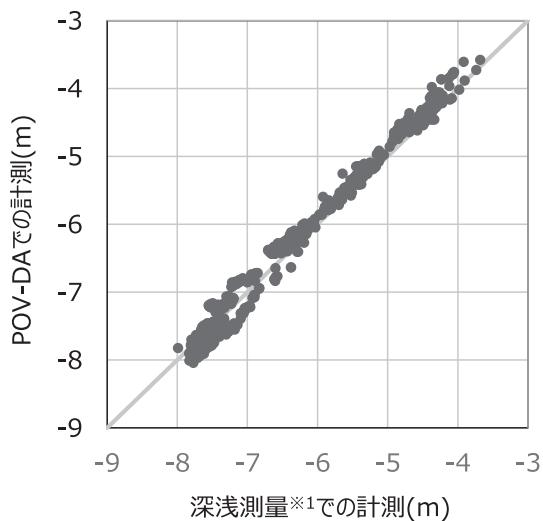
静穏な水域において実施したナローマルチビーム（以下、NMB）の水深 8 m 付近の測深結果に、海洋観測ドローンの測深点を重ねた平面図を図一8 に示す。NMB は扇形の超音波を高頻度に発しながら移動して



図一7 海洋観測ドローンの導入イメージ（上：測深、下：波浪観測）



図一8 NMB と海洋観測ドローンの点密度比較平面図



図一9 水深計測精度の比較

測深を行うことで隣接する点間距離が 0.1 m 程度と高い点密度の面的な計測結果となっているのに対し、海洋観測ドローンは直下の水深を移動しながら計測するため隣接する点間距離が 1.0 m 程度と低い点密度の線的な計測結果となっているが、海洋観測ドローンによ

る計測水深と、近傍のNMBの計測結果を図-9に示す相関図で比較したところ、海洋観測ドローンの測深結果は-3mから-8mのいずれの水深でもNMBの結果との差が±10cm程度で分布していた。したがって、海洋観測ドローンの測深精度は従来手法と同程度であり、施工管理上、実用的な精度を有していることが確認できた。

(4) 従来手法と海洋観測ドローンによる波浪観測の比較

海洋観測ドローンに搭載されたRTK-GNSSにより取得した高度情報を水位変動として統計処理を行い、有義波高や有義波周期を算出することで波浪観測が可能である。陸上の操縦者1名が海洋観測ドローンを観測対象地点まで飛行・着水させ、搭載しているGNSSから取得できる平面位置座標を基にスラスターを使用して定点保持させ、同位置での時系列的な水位変動にともなうGNSSの高度情報の取得を行うことができる(図-7下)。取得した高度情報はネットワーク経由でクラウドサーバーに伝送し、サーバー内で統計処理を行うことで、遠隔地からリアルタイムに波浪観測結果の確認が可能となるため、現場海域の海象上限の把握のための船舶での移動や潜水士による波高計設置などの作業手間の軽減が可能である。また、従来に加えて手軽に波浪観測を行うことができるため、観測頻度の増加による波浪状況把握の高度化も期待できる。

海底設置型の超音波式波高計で取得した有義波高・有義波周期と、海洋観測ドローンで得られた有義波高・有義波周期の比較を図-10に示す。今回対象としたのは、超音波式波高計で有義波高0.8m程度、有義波周期8秒程度の観測結果が得られた時間帯であったが、いずれの時間においても海洋観測ドローンでは超音波式波高計の±5~10%以内の精度で計測できている。したがって、海洋観測ドローンで観測した有義波高、有義波周期は現場管理における実用的な精度を有

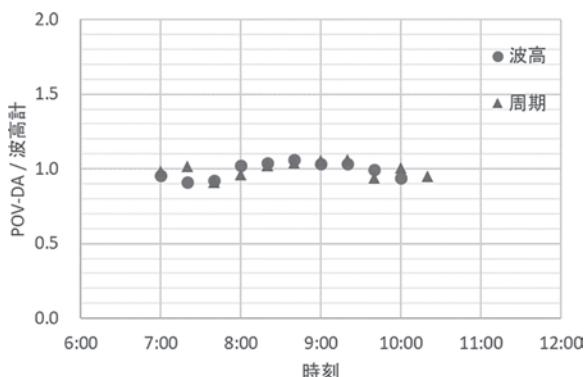


図-10 波浪観測(波高・周期)精度の比較

していることが確認できた。

4. おわりに

本稿では開発した「Penta-Ocean Vanguard-Drone」の2機種の機器概要と機能、従来計測手法との比較について報告した。

土量検収ドローンを用いた土量運搬船の積載量検収は、操縦者1人の約5分間の計測で数量の算出を可能にすることで、従来の計測手法と比較して計測に関わる人員と計測時間を大幅に削減できた。

海洋観測ドローンを用いた深浅測量は、従来の深浅測量技術では必要であった測量船への計測機器への取付時間や、船舶移動の時間を不要としつつも従来手法と同程度の精度を有しており、また、波浪観測においても従来観測手法と比較して簡単に波高と周期を把握できるため、施工可否の判断の迅速化を図ることが可能となった。

「Penta-Ocean Vanguard-Drone」のような機能を要するドローンは今までなく、港湾工事における計測や施工管理の効率化の実現が期待されるとともに、今後もさらなる生産性向上に寄与する開発を継続する予定である。

J C M A

《参考文献》

- 1) 国土交通省
HP : https://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_001085.html
- 2) 国土交通省 HP:ICT機器を用いた測量マニュアル(ブロック据付工編)
(令和4年4月版)
<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001475817.pdf>

[筆者紹介]



三宅 貴大 (みやけ たかひろ)
五洋建設㈱
技術研究所 土木技術開発部
係員



西 広人 (にし ひろひと)
五洋建設㈱
技術研究所 土木技術開発部
主任



琴浦 毅 (ことうら つよし)
五洋建設㈱
技術研究所 土木技術開発部
グループ長