

UAVの2機体同時飛行による 大規模崩壊地の調査・点検手法の高度化

おおもりたいが あらきよしのり かわいめぐみ くがまさはる のうじまゆうか
大盛泰我¹・荒木義則¹・河井恵美¹・久家政治¹・能島佑佳¹

¹中電技術コンサルタント(株) (〒734-8510 広島県広島市南区出汐二丁目3番30号)

平成23年紀伊半島大水害により発生した河道閉塞は、急峻な山間部にあり、出水直後は二次災害の危険性が高く、迅速な調査・点検を行うことができなかった。このような箇所調査・点検は、UAVの利用が有効と考えられるが、急峻な地形のため見通しが悪く、電波通信環境も悪いため、安全な場所から長距離・広範囲の調査・点検を行うためには技術的な課題があった。これらの課題を解決するために、レベル3飛行（目視外補助者無し飛行）により、UAVを2機体（撮影用・電波中継用）同時飛行させた現地実証を行った。また、新たに得られた課題を解決し、さらなる利活用を図るためのUAV利用の高度化について検討した結果について報告する。

Key Words : 大規模崩壊地, UAV, レベル3飛行（目視外補助者無し飛行）, 調査・点検

1. はじめに

平成23年に発生した紀伊半島大水害では、台風12号に伴う豪雨により、紀伊山地で大規模な河道閉塞が5箇所形成¹⁾された。現在は、崩壊斜面や残存土砂の流出防止を目的とした砂防事業が進められているが、災害後も降雨や出水等により、崩壊地の拡大や河道閉塞部の越流侵食等が繰り返し発生するため、継続的な調査・点検が必要となる。また、土石流による被害が生じる急迫性が高まった状況においては、被害のおそれのある区域等の情報を速やかに提供することが求められるため、逐次情報を更新することが重要となる。このような山間地域において、アクセスが悪く、立ち入り作業に危険を伴う大規模崩壊地や砂防施設に対する調査・点検を迅速に行うためには、UAVの利用が有効であると考えられる。

これまでにも、河道閉塞箇所において緊急調査が行われた4地区（赤谷，長殿，栗平，熊野）を対象に、地上，または防災ヘリによる監視の代替手段として、自律飛行によるUAV調査の試行実験が行われ、その有用性が確認されている²⁾。しかしながら、現地は急峻な地形で見通しが悪く電波通信環境も悪いため、安全な場所から長距離・広範囲の調査・点検を行うことが困難であった。この課題を解決するために、図-1に示すレベル3飛行（目視外補助者無し飛行）により、UAVを2機体（撮影用・電波中継用）同時飛行させることで、安全な場所から長距離・広範囲の調査・点検を行う現地実証を行った。レベル3飛行を行うことで、危険な場所に監視員等の補助

者の配置が不要となる。レベル3飛行は、技術面や法令面において、高いハードルをクリアする必要があり、防災やインフラ管理を目的としたレベル3飛行は全国初の取り組みであった。

本稿ではレベル3飛行による大規模崩壊地や砂防施設の調査・点検の現地実証の結果及びUAVを活用した調査・点検の高度化への試行結果について報告する。



図-1 UAVの飛行レベル

2. 事前準備

(1) 対象地区の概要

UAVを活用した調査・点検の現地実証は、平成23年の紀伊半島大水害により発生した河道閉塞箇所のうち、4地区（赤谷，長殿，栗平，熊野）を対象とした。レベル3飛行の現地実証は、最も崩壊規模の大きい河道閉塞箇所である栗平地区（崩壊幅：600m，長さ：960m，高さ：450m）で行った。現地は急峻な地形により、安全な場所からUAVの目視内飛行（レ

ベル2) ができないこと、さらに、機体の制御電波も届かないことから、UAVを安全に飛行させることが難しい地区である。

(2) 機体の選定

現地実証を行うにあたり、使用するUAV機体の選定を行った。機体の選定条件は、①対象地区の広さ、電波通信環境に対応可能な飛行距離・飛行時間・機体制御機能を有していること。②自律飛行が可能であり、対象地区の被災状況や砂防施設の状況を把握するためのカメラ性能（解像度）を有していることとした。レベル3飛行を行う場合はさらに、①、②の条件に加え、産業用機体である必要がある。以上を踏まえた結果、4地区の適用場面・適用条件により、本検証ではACSL-PF2（ACSL社、レベル3飛行実績：有）、MATRICE 300RTK（DJI社）、ALTA X（FreeFly社）、skydio2（skydio社）の4機体（図-2）を選定した。



図-2 選定したUAV4機体

(3) 法令に関する事前申請手続き

UAV飛行に関連する法令は、図-3に示すように様々なものがある。ここでは、航空法のレベル3申請手続きの主な留意事項について説明する。レベル3飛行の申請では、機体の性能や安全性の確保が重視され、①産業用機体を使用すること、②機体は自律飛行中でも常時強制的に操作介入ができるように機体とプロポの通信が途切れないこと、③想定される運用に対して、十分な飛行実績があり、かつ、機体の初期故障期間を超えたものであること等に関する資料作成が求められた。後述する3. 現地実証では、申請から許可取得まで約3週間必要であった。



図-3 UAV飛行に関連する主な法令
(●：本検証で該当する法令)

3. 現地実証の概要

レベル3飛行の現地実証では、調査の迅速性の観点から、調査・点検の飛行（フライト）は、動画または静止画撮影を各1回で実施することを前提とした飛行計画とした。調査目的は、大規模崩壊地や下流域の土砂流出状況の把握と、大規模崩壊地や砂防施設の変状等の着目箇所の確認を行うことである。

離着陸地点は、河道閉塞箇所から土砂流出が発生

した場合であっても車でのアクセスが可能な安全な地点（河道閉塞箇所から下流側2km）とし、2機体（撮影用、中継用）の操縦者と補助者（地上局システム：機体制御情報・画像情報等の監視者）を配置した。2機体同時飛行による飛行ルートを図-4に、使用機体の諸元と電波中継の概念図を図-5に示す。

飛行計画は、撮影用機体と中継用機体のそれぞれの役割に応じた計画を立案した。撮影用機体では、動画、静止画を撮影しながら往復約6kmの自律飛行を行った。地区全体の土砂移動や崩壊地の状況を調査するため、対地高度149mで動画撮影及び静止画撮影を行った。また、砂防施設（1号砂防堰堤）の点検のため、対地高度100mで静止画撮影を行った。

離着陸地点は、左右岸が急峻な狭窄地形であることから、操縦者が撮影用機体を直ぐに目視できなくなるため、中継用機体を同時に飛行させ、撮影用機体と直接見通しが取れる高度（離着陸地点からの対地高度300m）まで機体を上昇させる計画とした。地上局・中継機・撮影機が相互に見通しできる位置に最適配置することで、撮影機の機体制御情報（位置、姿勢等）及び撮影映像を離着陸地点の地上局まで伝送した。

なお、離着陸地点は、狭窄地形のためGNSSの受信電波が弱く、安全に自動離着陸を行うために必要な地上でのGNSS捕捉数（捕捉GNSS数：8基以上）を下回っていたため、離着陸時のみ手動操作とし、GNSSを十分に確保できる地点まで上空に移動させた後、自律飛行に切り替えることとした。



図-4 2機体同時飛行による飛行ルート

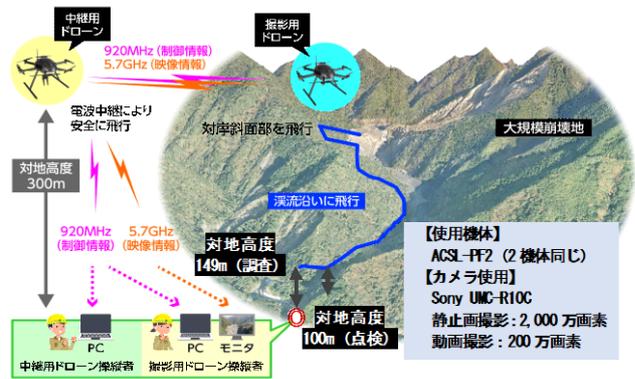


図-5 使用機体の諸元と電波中継の概念図

4. 現地実証の結果

(1) 調査・点検結果

UAVの2機体同時飛行による自律飛行では、1回のフライトによる飛行時間は約15分、飛行距離は約6kmであった。飛行中の2機体の機体制御情報や撮影用の機体の映像情報は、通信強度が弱くなることなく電波中継され、地上局のモニター画面でリアルタイムに確認することができた。撮影した動画からは、土砂の流出状況、1号砂防堰堤の状況（異常なし）や河道閉塞部、崩壊斜面部の異常の有無を把握することができた。また、撮影した静止画データは、高精細画像（2,000万画素）であるため、拡大表示することで砂防堰堤の水通し天端の状況等を詳細に確認することができた。以上より、急峻な地形で電波状況が悪く、立ち入り作業に危険を伴う箇所においても、UAVを2機体同時に飛行させ電波中継を行うことで、安全かつ迅速に大規模崩壊地や砂防施設の状況を把握することが可能となり、本手法は大規模土砂災害や出水後の調査・点検に有効な手段であることを確認した。

今後、本実証で設定した飛行ルートや撮影方法等を用いることで、同一アングルでの繰り返し撮影ができるため、出水前後等の2時期の画像を比較すれば、土砂移動状況を早期に検知することができると考えられる。



図-6 2機体同時飛行による現地状況確認結果

(2) 撮影データの解析

撮影データの解析では、オーバーラップ率85%以上で連続して撮影した静止画（208枚）を使って、SfM (Structure from Motion) 解析により栗平地区全体のオルソ画像（図-6）と3次元モデルを作成した。解析ソフトには、Metashapeを用いて、解析時

間は約2時間であった。図-6のオルソ画像より、地区全体の土砂流出状況を詳細に確認することができた。また、図-7に示す砂防堰堤の3次元モデルは、モデル上で視点場を自由に設定することができるため、危険な場所に立ち入り調査を行わなくても砂防堰堤の洗堀や摩耗による変状を確認することができた。しかしながら、3次元モデルは静止画像に比べてテクスチャーが荒くなるため、ひび割れ等の細かな変状の確認には不向きであったが、施設全体を視覚的にわかりやすく俯瞰することができるため、外観損傷の把握には適していることが確認できた。



図-7 3次元モデルによる堰堤の変状確認（例）

5. 調査・点検の高度化への取り組み

現地実証により、1回のフライトで河道閉塞およびその周辺を含む地区全体の映像情報を迅速に確認することができた。しかしながら、離着陸地点は携帯電波圏外であり、映像情報をインターネット等を使って外部へ伝送することが出来なかった。また、離着陸は手動操作であったことから、全自動飛行に対する課題等も確認した。そこで、現地実証で確認された新たな課題の解決と調査・点検のさらなる高度化に向けて、表-1に示す取り組みを行った結果について報告する。

表-1 新たな課題への取り組み事例

新たな課題	対応手法・技術	使用した機体
携帯電波圏外からの映像伝送	公共BB搭載のUAVによる電波中継・映像伝送	MATRICE 300RTK ALTA X
離着陸を含む全自動点検	Visual SLAM技術搭載UAVを用いたゼロオペレーション（無人自律飛行）による点検	skydio2
撮影データの解析・評価の自動化	AI技術を用いた変状（クラック等）の自動抽出	MATRICE 300RTK
UAV点検データの活用	CIMモデルを活用したUAV点検データの一元管理	—

(1) 携帯電波圏外からの映像伝送

UAVで撮影した映像をより遠くまで自動伝送させるために、公共BB（ブロードバンド）をUAVに搭載し、上空電波中継を行うことで、リアルタイムで遠方まで調査・点検情報を伝達させる取り組みを試行³⁾した。図-8に、試行時の概要図を示す。



図-8 公共BB搭載UAVによる映像情報の自動伝送

公共BBを使った災害時の情報伝達手段は、現在、国土交通省のTEC調査において公共BBを利用する環境整備が実装されており、公共BBをUAVに搭載することで通信可能範囲が広がる等、携帯電波圏外での利用において、この技術を応用することで、より迅速かつ効率的な災害調査が期待できる。

(2) 離着陸を含む全自動点検

障害物を回避しながら機体を構造物に近接させることができるVisual SLAM技術が搭載されたUAVを用いて、機体がDock（箱型格納庫）から自動で飛び出して撮影を行い、自動で収納される操縦者なしの完全自律飛行による砂防堰堤の点検⁴⁾を行った。図-9に点検時の状況や変状を把握した結果を示す。その結果、Visual SLAM技術を用いることで、安全で近接した詳細撮影が可能であることが示された。



図-9 全自動飛行による砂防施設の点検の例

(3) 撮影データ解析・評価の自動化

撮影した写真から、クラックの自動抽出ソフトを用いて損傷状況を把握した結果を図-10に示す。地上調査において確認した砂防堰堤袖天端の1cmのクラックに対して、UAV写真から自動抽出を行った結果、5mm～10mmのクラックとして抽出された。この技術とAI技術を搭載したUAVにより、繰り返し同じ地点の撮影を行うことで、クラック等の経年変化を自動で確認することが可能であると考えられる。

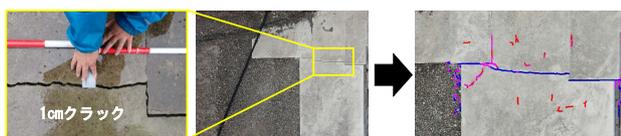


図-10 砂防堰堤天端のクラック抽出の例

(4) UAV点検データの活用

UAVによる調査・点検の結果及び得られた3次元点群データや3次元モデル、オルソ画像を維持管理に活用するために、CIMモデルとの連携方法について提案⁵⁾した。図-11より、UAVを活用した維持管理CIMモデルは、UAV計測データや点検個票とのリンク付けを行うことで、3次元モデルを用いた変状箇所等を確認を踏まえた点検計画の立案や既存資料の検索等の効率化が期待できる。また、点検結果より変状レベルb（要経過観察箇所）と判断した箇所は、CIMモデルの部材（袖部）を着色して表示し、損傷箇所の写真をリンクさせることで点検結果を視覚的にわかりやすくした。このようにUAV点検データとCIMモデルを連携して、点検データを一元管理すれば、維持管理の効率化につながる事が期待できる。



図-11 UAVを活用した維持管理CIMモデルの例

6. おわりに

本実証では、2機体同時飛行によるレベル3飛行により安全かつ迅速に調査・点検を行えることを確認した。また、撮影データを用いたSfM解析を行うことにより作成した3次元モデルは、視覚的にわかりやすく土砂流出・堆積状況を把握することができた。

現地検証等により得られた様々な知見は、国土交通省のUAV活用手引き^{6),7)}として取りまとめを行った。また、UAV関連技術は、日進月歩で技術が進歩することから、最新の技術動向に注視すると共に、2機体同時飛行による電波中継や全自動点検、解析・評価の自動化、CIMモデルとの連携等の高度な取り組みを展開していくことにより、安全性の向上とさらなる効率化・省力化が期待される。

謝辞：本稿は、国土交通省近畿地方整備局紀伊山系砂防事務所からの受託業務により検討したものであり、検討にあたっては、当事務所調査課および大規模土砂災害対策技術センターからご指導・ご支援を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省近畿地方整備局企画部企画課：2011年紀伊半島大水害（国土交通省近畿地方整備局災害対応の記録），pp. 49-52, 2014.
- 2) 大規模土砂災害における無人航空機を活用した緊急調査の試行的研究，第10回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp. 73-78, 2020.
- 3) R3年度砂防学会研究発表概要集：栗平地区における公共BB搭載UAVによる映像伝送の実証実験について，p447.
- 4) R3年度砂防学会研究発表概要集：UAVを用いたゼロオペレーション（無人自律飛行）による砂防施設点検の実証実験について，p345.
- 5) R3年度砂防学会研究発表概要集：UAVを活用した砂防施設維持管理CIMモデルの一提案について，p371.
- 6) 国土交通省近畿地方整備局，大規模土砂災害対策技術センター：UAVの自律飛行による天然ダムの緊急調査及び被災状況把握に関する手引き，2021.7.
- 7) 国土交通省近畿地方整備局，大規模土砂災害対策技術センター：UAVの自律飛行による砂防関係施設の自動巡視・点検に関する手引き，2021.7.