

UAVを用いたレベル3飛行（目視外補助者無し飛行）による河道閉塞および砂防施設の点検・調査活用について

北本 楽¹・柴田 俊²

¹近畿地方整備局 大規模土砂災害対策技術センター (〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

²長野県 姫川砂防事務所 砂防課 (〒399-9422 小谷村大字千国乙10307-3)

2011年紀伊半島大水害で発生した複数の深層崩壊および河道閉塞は急峻な山奥にあり、出水直後は危険なため、人の立ち入りが困難である。これらの箇所での点検・調査はUAVの使用が有効であるが、現地は山奥で見通しも悪く制御電波も届かないため、UAVを安全に飛行させることが不可能であった。この課題を解決すべくレベル3飛行（目視外補助者無し飛行）下でのUAV自律飛行の現地検証を行った。本検証の特徴は撮影機と電波中継機の2機のUAVを併用して制御電波範囲を拡大することで、UAVの長距離飛行を可能としたことである。本稿はUAVを用いたレベル3飛行の現地検証および河道閉塞や砂防施設の点検・調査時の活用について報告するものである。

キーワード UAV, レベル3飛行（目視外補助者なし飛行）, 河道閉塞, 砂防施設, 点検・調査

1. はじめに

2011年に発生した紀伊半島大水害は、紀伊半島全体に記録的な豪雨をもたらし、3,000箇所以上の斜面崩壊および17箇所の河道閉塞を引き起こした。これを契機とし、紀伊山系砂防事務所では崩壊斜面や河道の残存土砂の流出を防ぐために直轄砂防事業を行っている。しかしながら災害後も、降雨・出水に伴う斜面の再崩壊および河道閉塞部の越流による土砂流出が観測されており、継続した点検・調査が必要である。このような崩壊地や砂防施設は急峻な山奥にあり、現場までのアクセスも悪く、点検・調査中の土砂移動による危険性も高いため、点検・調査を迅速かつ安全に行う際には、UAVの活用が有効であると考えられる。特に、レベル3飛行と呼ばれる無人地帯における目視外補助者なし飛行（図-1）は、監視員等の補助者なしでUAVの長距離飛行を可能とする。これまでもUAVを活用した点検・調査の事例は数多く存在するが、防災やインフラ管理を目的としたレベル3飛行によるUAVの活用は全国初の試みであった。本稿では、UAVによるレベル3飛行の現地検証を行い、安全にレベル3飛行が可能なUAV機体の選定段階や航空法などの法令申請手続きの上での留意点および、UAVによるレベル3飛行下での深層崩壊斜面、河道閉塞、砂防施設の点検・調査の有効性と今後の利活用について報告する。

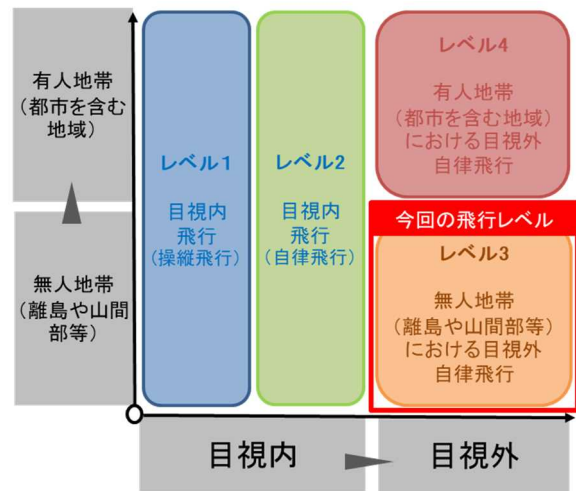


図-1 UAVのレベル飛行形態

2. 対象地区

現地検証は、紀伊半島大水害によって発生した複数の深層崩壊および河道閉塞箇所のうち奈良県十津川村栗平地区を対象とした。栗平地区では発災当時、幅600m、高さ450m、長さ650mの深層崩壊が発生し、約2,385万³mの崩壊土砂が河道を閉塞し、河道閉塞を形成した（令和3年3月湛水池埋め立てにより解消済み）。現在でも降雨による出水に伴い土砂流出が確認されており、崩壊斜面および河道に残った不安定土砂が下流域へ流出するのを防ぐために、砂防施設整備を行っているところである。

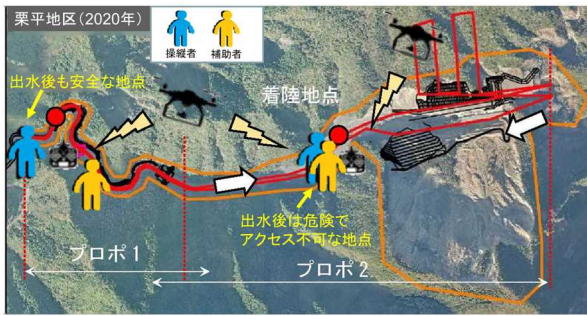


図-2 栗平地区におけるUAV目視内飛行時の調査員配置

3. これまでの取り組み

栗平地区では過年度より、目視内・自律飛行でのUAVによる崩壊斜面、河道の調査および砂防施設の点検を行っている。自律飛行とはあらかじめ設定した飛行ルートに従いUAVを自動で飛行させることで、手動操縦よりも正確かつ迅速に同一ルート・画角で撮影を可能とする手法である。栗平地区は、急峻な地形に囲まれて河道も湾曲しており見通しが悪く、携帯電話の電波も圏外である。こうした環境下では、UAV飛行中に地上の操縦リモコン（以下、プロポ）と空中の機体との通信電波強度が弱くなる場合があり、異常時に操縦者による飛行中の強制介入が難しいため、航空法に基づくレベル3飛行の許可を取得することができなかった。これを受けて目視内飛行による点検・調査を検討したが、対象地区でUAVを飛行させるためには、崩壊斜面下流の河道部に複数の操縦者およびUAVを直接目視する補助者を配置（図-2）する必要がある。この方法では出水時などの緊急的な調査の際に調査員の安全を確保することが困難であった。携帯電話の電波が圏外という条件下で通信電波強度の不安定化を解決し、二次災害の心配がない安全な地点から、目視外によるUAVの長距離飛行を用いた点検・調査を可能にすることが必要であった。

4. 現地検証

(1) 機体の選定

UAVによるレベル3飛行の現地検証を行うにあたり、UAV機体の選定を行った。選定ははじめに、対象地区の前提条件として、①対象地区の過去の被災状況や砂防施設状態を確認して、点検・調査項目を整理し、②対象地区の広さ、操縦者と機体の直線見通し条件、人工衛星や携帯電話の電波通信環境等を確認した。次に、UAVの性能・仕様条件として、③対象地区全体を網羅する長距離飛行が可能であり、地形や砂防施設の出水前後の変状を検知可能なカメラの解像度を有すること、④離着陸まで全自動飛行が可能かつ、レベル3飛行の承認実績がある産業用機体であり飛行の法令申請が可能な機体であることを確認した。これらに基づき、①～④の条件を満たす機体を選定した。なお、UAVには固定翼機、回転翼機があ



図-3 現地検証に際して選定されたUAV4機体



図-4 UAV飛行における主な関連法令

（ ）: UAVによるレベル3飛行下の自律飛行に関する法令）

るが、本検証では回転翼機（マルチローター）を対象とした。選定の結果、MATRICE300RTK（DJI社）、skydio2（skydio社）、ALTA X（FreeFly社）、ACSL-PF2（自律制御システム研究所）の4機体（図-3）を選定した。

(2) レベル3飛行における事前申請手続き

UAV飛行に関する法令は図4に示すように様々なものがあり、飛行前にレベル3飛行の使用機体や飛行ルート、高度150 m以上での飛行、離発着箇所の土地占用申請等の申請を行う必要があった。特に、航空法の申請では、レベル3飛行下で使用するUAV機体の安全性の確保について、根拠を添えて、航空局への申請が必要であった。申請先とのやりとりの中で得た、申請手続き上の重要な知見は、①レベル3飛行の申請は、ホビー用機体を想定しておらず、産業用機体を用いること、②自律飛行中に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飛行中に途切れないことを確認すること、③想定される運用に対して十分な飛行実績があり、実績は機体の初期故障期間を超えたものであること、であった。飛行計画の申請には立入管理区域の設定や初期故障期間についてメーカーからの情報提供を受ける必要があった。航空局へのレベル3飛行の申請状況及び要した日数は初回に申請したACSL-PF2は57日であったが、申請手順の整理により、その後のskydio2では23日まで短縮することができた。

(3) 検証概要

現地検証は、対象地区において2021年3月22日～23日に行った。UAVの離発着地点は、過去の出水実績より河道閉塞部から土砂流出した場合でも車でアクセス可能な安全な地点（河道閉塞部から下流約2 km）とした。離発着地点には地上局として、UAVの操縦者とUAVから伝送される機体制御情報や映像を監視する補助者を配置した。前述のとおり、栗平地区では、UAV飛行中にプロポと機体との通信電波強度が弱まることからレベル3飛行が困難であった。そこで、プロポと現地点検・調査用のUAV（以下、撮影機）との通信電波を中継するためのUAV



図-5 上; UAVの飛行ルート、下; 離発着地点と地上局

(以下、中継機)を飛行させることで通信強度を安定させ、レベル3飛行下での自律飛行の実施を試みた。

撮影機と中継機は、レベル3飛行の法令申請状況や現地での試運転結果を踏まえ、図-3で選定した機体のうちACSL-PF2を使用することとした。撮影機の自律飛行ルートを図-5に示す。飛行ルートは過年度までに実施した目視内飛行のルートを用いた。撮影機は栗平地区の崩壊斜面や斜面直下の河道の危険箇所および1号砂防堰堤等の砂防施設の撮影を行うために、対地高度149 m以下とし、対地高度150 m以上の飛行に必要な航空法の申請を省略した。なお、堰堤等の施設付近は出水前後の変状の判別を想定し、対地高度100mまで近接した。飛行は動画撮影1回と静止画撮影(インターバル2秒/枚)1回とし、計2回、往復約6kmの区間を自律飛行させた。中継機は離着陸地点では携帯電話の電波が圏外であり、操縦者と撮影機の直線見通しが悪いため、中継機を介して通信電波の伝送が可能な対地高度300 mまで離着陸地点からほぼ垂直に上昇させた。これにより撮影機から中継機を介して地上局に対して機体制御情報や撮影映像の伝送を試みた。なお、離発着地点は、左右岸が急峻な狭窄地形となっており、GNSS捕捉数が自動離着陸を行うために十分な数を下回ったため、撮影機は離着陸時のみ手動で操作し、離陸後に上空でGNSS捕捉数が十分になった地点から自律飛行に切り替えた。

(4) 検証結果

撮影機と中継機を2機同時に併用することで、飛行中にプロポと撮影機の通信強度が弱くなることなくレベル3飛行下での自律飛行を行うことができた。1回の飛行は約15分であった。撮影した映像や機体制御情報は中継機を経由してリアルタイムに地上に伝送され、離発着地点に設置したモニター画面で確認することができた(図-5)。撮影した動画から崩壊斜面、斜面直下の河道、1号砂防堰堤の状況や堆砂域の土砂堆積状況を迅速に確認することができた。また、撮影した静止画は2,000万画素と高解像度であり、出水前後の砂防施設の変状等を識別できる解像度を有することが確認された。以上より、急峻

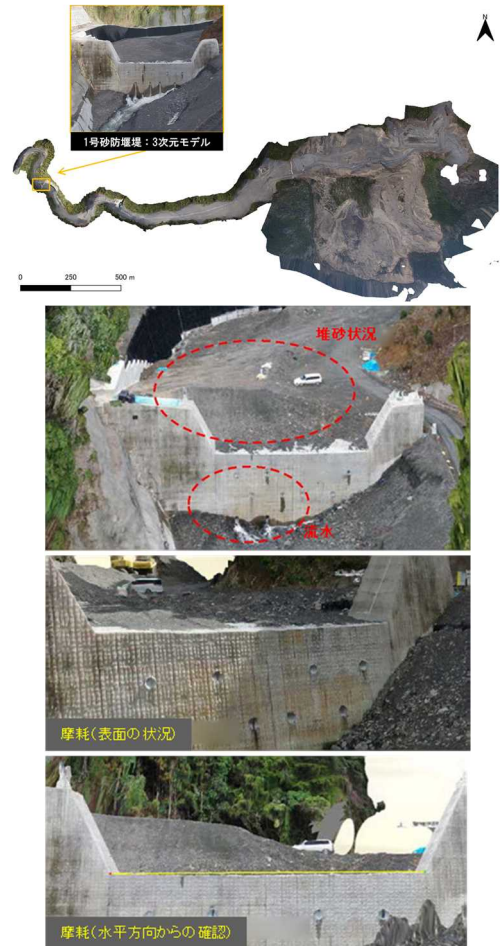


図-6 上) SfM解析で作成したオルソ画像
中・下) 3次元モデルによる堰堤の変状推定

な地形に囲まれてアクセスも悪く、携帯電話の電波が圏外かつ、危険で人の立ち入りが困難な箇所において、安全な地点から2機のUAVを同時に自律飛行させることで中継機による電波経路を利用し、崩壊斜面や河道、砂防施設の状況を迅速に把握することが可能であり、出水時における緊急的な点検・調査においてUAVによるレベル3飛行が有効であることが示された。

(5) 撮影データの解析

インターバル撮影した静止画はオーバーラップ85%以上になるよう設定しており、計208枚の連続した静止画とSfM (Structure from Motion) 解析により、栗平地区全体のオルソ画像と3次元モデルの作成を行った。使用したSfM解析ソフトはMetashape (Agisoft社)であり、解析時間は約2時間であった。オルソ画像(図-6)からは対象地区全体の土砂堆積侵食を迅速に確認することができた。また、砂防施設の3次元モデルから、堰堤の洗掘による破損や摩耗について確認できた。3次元モデルは静止画に比べてテクスチャが粗くなるため、ひび割れ等の細かい変状を把握するのは困難であったが、地区の全容を視覚的にわかりやすく俯瞰できることから、点検・調査において地区全体の変状や土砂流出・堆積状況を判断する際に活用できることが示された。

5. UAVレベル3飛行の利活用

(1) UAV2機の併用によるレベル3飛行の課題

現地検証では、中継機との電波強度を安定させるために、撮影機の高度を最低でも対地高度100mとした。しかし、砂防施設のひび割れといった数mmの変状まで識別するためには、より対地高度を下げて、砂防施設に近接する必要がある。今後は中継機と撮影機の位置関係を試行錯誤的に試験し、相互位置の自動補正機能などを検討するとともに、撮影機への中継機追尾技術や複数台のUAVの使用による電波強度の安定化を目指す。

(2) UAVレベル3飛行の活用

レベル3飛行は目視外においてUAVを飛行させることによって、目視内では制限される長距離の飛行を可能とするものである。本検証は電波状況の改善のために中継機を併用したが、携帯電話の電波等が届く環境であれば電波中継はUAVでなくても可能であり、たとえば事務所と現場といった遠隔地から、地上の電波局を經由してUAVのレベル3飛行の運用が可能になると考えられる。また、本検証では離着陸地点に設置したモニター画面にてUAVの撮影画像を確認していたが、これらの映像も同様に遠隔地に伝送して、UAVの映像をリアルタイムで共有可能であり、出水直後の緊急調査着手の判断の際にも活用が期待される。近年では、伝送される動画や静止画から同時並行でSiM解析を行うことで、リアルタイムにオルソ画像や3次元モデルの作成し、より詳細な情報を取得することができる(図-7)。

本検証では、点検・調査を想定して事前に飛行ルート・画角を設定して自動飛行を行ったが、出水後などの別時期においても飛行ルート等を同一に設定して運用すれば、同一アングルで繰り返し撮影が可能であるため、出水前後の変状をより効率的に抽出することができる。これに、AI等を活用した画像解析技術を用いることで、二時期の画像から変状を自動検知することも可能であると考えられる。また出水前後の3次元モデル同士の差分解析などにより土砂流出状況の定量的な解析も可能になり、堰堤の堆砂状況の把握や除石管理の計画検討にも利用できる。今後は、同一アングルで撮影される定点画像を用いて自動で変状抽出から施設点検台帳作成まで行うような定期点検へのあり方が考えられる。

(3) 離発着を含む完全自律飛行の活用

レベル3飛行による施設点検のさらなる有効性を確認するために、スイッチ1つのみで現場に設置した格納庫からUAVが離陸し、砂防施設点検ルートを飛行したのち格納庫に収納されるまでを自動で行う完全自律飛行について、追加で検証した(図-8)。この検証ではVisual SLAM技術を搭載したUAVを用いることでUAVに搭載されたカメラ画像を用いて周辺環境と機体位置を推定し、



図-7 UAVと遠隔地間での映像共有



図-8 格納庫を用いた完全自律飛行の検証

機体自らが障害物を回避して飛行するようにした。この検証により、あらかじめ現地に格納庫を設置してUAVをスタンバイしておけば、将来的には、作業員が現場に行かずとも、安全かつ効率的な施設点検の実施に活用できることが示唆された。今後は、UAV格納庫の設置箇所の検討やVisual SLAM技術の活用を前提とした施設点検計画などの運用条件の整理を行う必要がある。

6. おわりに

今回の現地検証では、2機のUAVを併用したレベル3飛行下における自律飛行によって崩壊斜面や砂防施設等の点検・調査に関する検証および有効性や利活用について報告した。砂防堰堤の定期点検は、これまで作業員が両岸の尾根を超えて現場まで徒歩で移動し直接目視によって砂防施設の変状の有無や土砂堆積状況を確認する必要があったが、UAVによるレベル3飛行の活用により、これまでの作業を飛躍的に効率化し、作業の安全性確保にも繋がると考える。レベル3飛行の実用化に向けては、使用可能機体に制約があること、飛行ルートを事前に作成した上で許可申請が必要であること、申請が複雑で実績も少ないことから導入へのハードルが高いといった課題が残っている。今後は許可申請の体系化・簡略化について関係機関と協議して、とりまとめを進める。また、国産UAVを含むUAV市場の動向にも注目し、新技術の利活用を積極的に検証しながら、レベル3飛行を用いた点検・調査の実用化に向けて課題解決に取り組んでいく。

参考文献

- 1) 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, 令和2年3月, 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