

UAVの自律飛行による河道閉塞や砂防施設の調査・点検

小杉 恵・北本 楽・柴田 俊

1. はじめに

近年多発する異常な集中豪雨により、全国各地で土砂災害が頻発している。ひとたび土砂災害が発生すると、その規模や周囲の荒廃状況などの情報を取得し、土砂災害が発生した周辺地域における警戒避難体制を適切に確保する必要がある。しかし土砂災害が発生する現場は山間地であることが多く、また災害発生直後は斜面が不安定化していることから、災害発生直後に現地調査を行う際には多くの労力と危険が伴う。

また、これまでに整備されてきた砂防施設の老朽化対策を計画的に進めるためには、施設の状況を的確に把握する施設点検が必要であるが、砂防施設は山間の狭隘かつアクセスの悪い場所に設置されることが多く、点検作業にかかる労力が非常に大きい。

近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センターでは、大規模な河道閉塞箇所の調査や砂防施設の点検におけるUAV（Unmanned Aerial Vehicles、以下「UAV」という。）の自律飛行の有用性について検討を進めてきた。本稿では、防災・公物管理（インフラ管理）を目的としたものとしては全国初となる目視外補助者なし飛行（以下「レベル3飛行」という。図-1）の取組ならびに紀伊山系砂防事務所管内におけるUAVのさらなる活用に関する取組について報告する。

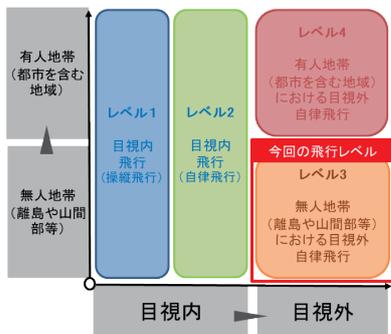


図-1 UAVのレベル飛行区分

2. レベル3飛行の現場検証実施箇所の概要

2.1 栗平地区の概要

レベル3飛行を実施したのは奈良県吉野郡十津川村栗平地区である。本地区は、2011年9月の紀伊半島大水害により幅600m、高さ450m、長さ650mの深層崩壊が発生し、これによって発生した約2,385万m³もの土砂によって河道閉塞が生じた地区である（図-2）。本地区においては河道閉塞により湛水池が生じ、湛水を原因とする土石流が発生するおそれがあったことから、土砂災害防止法に基づく緊急調査で継続監視となっていた（湛水地が解消したため緊急調査は令和3年3月に終了¹⁾）。



図-2 被災当時の栗平地区（2011年9月6日撮影）

2.2 栗平地区における現地調査の課題

国土交通省では防災後より緊急的に対策を実施し、砂防堰堤等の施設整備を進めているが、斜面や溪床には不安定な土砂が未だ残存しており、降雨時には水とともに大量の土砂が移動・流出している（図-3）。



図-3 栗平地区における出水前後の土砂の移動状況

現地へは無舗装かつ急勾配の工事用道路でしかアクセスができないうえ、降雨時には急激に水位が上昇するため、水位が下がるまで現地に立ち入ることができない。また、急峻な山の谷底という地形であるため、携帯電話の電波も圏外となってしまう。緊急調査は「調査を行う者の安全確保を図りながら迅速に調査を行う」（土砂災害防止対策基本指針）こととなっているが、栗平地区においては上述のとおり、調査の迅速性や円滑な連絡体制、安全確保に課題を抱えていた。

2.3 栗平地区におけるこれまでの取組

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じルート・画角で撮影を可能とする手法である。前述の通り、栗平地区は急峻な地形に囲まれて河道も湾曲していることから見通しが悪く、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」という。）と空中の機体との通信電波が途切れる場合があり、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飛行の許可を得ることができなかった。これを受けて目視内飛行を検討したが、対象地区でUAVを飛行させるためには、崩壊斜面直下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する必要があるが、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（図-4）。

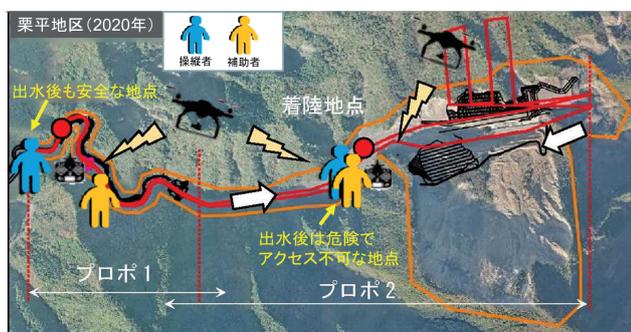


図-4 栗平地区におけるUAV目視内飛行時の調査員配置

このため、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。

3. UAVの自律飛行による点検・調査の検証

3.1 機体の選定

まず、過去の被災状況から適用場面を整理したうえで、現場適用条件を設定した。設定に当たっては、離着陸地点として設定する立ち入り可能箇所から調査地点・調査範囲までの距離・定点ポイント・解像度等を整理するとともに、離着陸地点および撮影範囲内の障害物の有無について確認を行った。栗平地区においては、架空線等の上空の障害物はないものの河道閉塞部であることから急峻かつ複雑な地形を呈しており、離着陸地点においては携帯電話の電波が圏外となるうえ、離着陸地点から最遠の調査地点まで直線での見通しが確保できないという現場条件であった。

上記の現場条件を踏まえ、河道閉塞の緊急調査に用いるためのUAVの性能仕様条件を①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、②離着陸まで全自動飛行が可能かつ、産業用機体もしくはレベル3飛行の承認実績がある機体であることと定めて機体を選定し、この結果、MATRICE 300RTK (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-5)を一次選定した。

なお、UAVには固定翼機、回転翼機があるが、本検証では砂防事業における実運用を見据えて機種が豊富な回転翼機（マルチローター）を対象とした。



図-5 現地検証に際して選定されたUAV4機体

3.2 航空法等各種法令のクリア

UAV飛行に関する法令は図-6に示すように様々なものがあり、飛行前にレベル3飛行、高度150m以上での飛行、離発着箇所の土地占用申請等の申請を事前に行う必要があった。特に、航空法に関する申請では、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航空局への申請が必要である。今回の申請手続き過程で得た重要な知見は、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、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。飛行計画の申請に必要な立入管理区域の設定や初期故障期間についてはメーカーからの情報提供を元に算定する必要があった。航空局へのレベル3飛行の許可申請に要した日数は、初回に申請した機体は57日であったが、申請手順を整理したことにより、その後に申請した機体では23日と、手続き期間を短くすることができた。



図-6 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)

3.3 栗平地区における機体・プロポ間の通信途絶の課題の解消

栗平地区においてUAVのレベル3飛行を行う上での最大の課題は、UAV飛行中にプロポと機体との通信電波が途切れるおそれがあることであった。そこで、プロポと現地点検・調査用のUAV(以下「撮影機」という。)との通信電波を中継するためのUAV(以下「中継機」という。)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ることにした。なお、本検証では、一次選定した4機体の中からACSL-PF2を使用することとした。

3.4 現場検証の実施

UAVの離発着地点は、過去の出水実績を踏まえて、河道閉塞箇所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(河道閉塞箇所から下流約2kmの地点)とした。離発着地点には地上局としてUAVの操縦者およびUAVから伝送される機体制御情報や画像の監視者を配置した。

撮影機の自律飛行ルートを図-7に示す。飛行ルートは前年度までに実施した目視内飛行のルートを用いた。なお、離発着地点で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ることから、撮

影機は離着陸時のみ手動で操作し、上空の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。

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、対地高度の上限を149mとして飛行計画を作成し、対地高度150m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まで近接して飛行した。飛行は往復約6kmの区間を動画撮影1回と静止画撮影(インターバル2秒/枚)1回の計2回自律飛行させた。中継機は、離着陸地点での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300mまで離着陸地点からほぼ垂直に上昇させ、撮影機から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。



図-7 UAVの飛行ルート、

左下: UAVの位置関係、右下: 地上局

3.5 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を安定させレベル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-7)。また、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。さらに、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。

3.6 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-8) 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 (図-9) からは洗掘による破損や摩耗についても確認することができた。



図-8 SfM解析で作成したオルソ画像



図-9 3次元モデルによる堰堤の変状推定

3次元モデルは静止画に比べてテクスチャが荒くなるため、ひび割れ等の細かな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分かりやすく俯瞰できることから、調査・点検におい

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。

3.7 今後の課題

栗平地区における現地検証では、中継機との通信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のような数mmの変状まで識別するためには、より対地高度を下げ、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の使用まで発展させていきたいと考える。

4. 高機能なUAVを活用した取り組み

4.1 離発着を含む完全自律飛行の検証

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、砂防施設の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を追加で検証した (図-10)。なお、本検証は一次選定した4機体 (図-5) のうちSkydio2を用いた。

本検証では、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するVisual SLAM技術を搭載したUAVを用いることで、機体自らが障害物を回避して飛行するようにした。本検証により、将来的には、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、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。



図-10 離発着を含む完全自律飛行の検証

今後は、UAV格納庫の設置箇所の検討やVisual SLAM技術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。

4.2 公共BBを搭載したUAVによる映像伝送

携帯電話の電波受信が不可能な箇所において、

公共BBを搭載したUAVを活用することでUAVによる調査映像の伝送を行い、迅速な情報提供への適応性を検証した。なお、本検証では一次選定した4機体（図-5）のうちALTA Xを用いた。

本検証では、撮影機と公共BBを搭載した中継機の同時飛行を行い、撮影機のプロポが受信する撮影映像を、公共BBを介して携帯電話の受信範囲まで伝送させ（図-11）、インターネット経由で事務所への映像伝送を行うとともに、衛星電話による通話ができない撮影機の離着陸地点においては、公共BBを利用したIP電話による通話を行った。



図-11 公共BBを搭載したUAVの飛行ルート

本検証により、公共BBを搭載したUAVを活用することで、IP電話による通話と映像伝送が可能となり、携帯電話の電波の受信ができない箇所においても調査結果を現場外と迅速に共有することが可能となることが示唆された（図-12）。



図-12 映像受信状況

なお、本検証では映像の遅延や停止が発生しており、中継機のホバリング地点と撮影機の飛行ルート等の位置関係やアンテナ方向の調整を適切に実施するなど、携帯電話の電波が遮断されるような事前調整が困難な地点において、受信感度を保つための調整方法に課題を残している。

4.3 UAVを用いた砂防施設の定期点検手法の検討及び検証

本検証では、対象施設の現地条件からUAVに

よる施設点検の適用性や優位性を整理の上、対象施設を選定し、機体を周辺状況に応じて使い分けてUAV空撮を行い、砂防関係施設点検要領に準拠した点検を実施した。なお、本検証では自律飛行が可能な機体として、phantom4RTK（DJI社）ならびにSPIDER6（ルーチェサーチ社）を用いた。

本検証によって、施設に接近して撮影可能な箇所については詳細な変状の評価が可能であり、樹木の被覆等により接近が困難な箇所でも堆砂変動等の顕著な変状を検知できることを確認できた。

さらに、新技术を活用した詳細点検手法として、上記2機体以外も用いて、UAVに搭載したレーザによる樹木被覆下の状況把握、マルチスペクトルカメラでのNDVI計測による堆砂敷植生の活性度把握、赤外線カメラ画像による漏水箇所の検出、AIによる変状箇所の自動抽出、長距離飛行対応のVTOL機やマルチコプターの狭隘地形下での適用性も確認できた（図-13）。

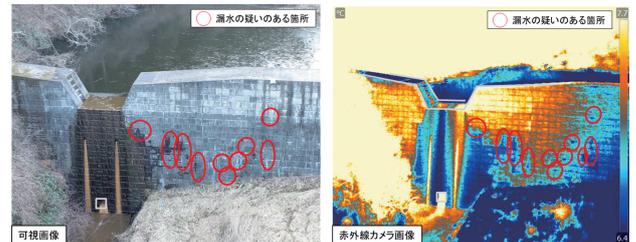


図-13 熱赤外画像による漏水の疑いのある箇所の判別例

今後は、砂防施設の長寿命化や土砂災害による被害の軽減のため、上記の多様な点検手法の活用も含めて場面ごとの最適な点検手法の組み合わせを検討し、UAVによる砂防施設点検計画を策定するうえ運用していきたいと考えている。

5. おわりに

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。栗平地区における検証は、電波状況の改善のためにUAVによる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、地上の電波局を経由して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、本稿で述べたとおり、UAVの撮影画像を伝送することにより離着陸地点に設置したモニ

ター画面だけでなく遠隔地でもリアルタイムで画像を確認することができ、出水直後の土砂災害防止法に基づく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SfM解析を行うことで、リアルタイムにオルソ画像や3次元モデルを作成し、より詳細な情報を取得することが可能となっている(図-14)。



図-14 UAVと遠隔地間での映像共有

自律飛行はあらかじめ飛行ルート・画角を設定することで繰り返し同一ルート・画角での撮影が可能であることから、例えば出水前後など、複数期間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する。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。

UAVはヘリコプターよりも低コストかつ高頻度で飛行可能であり、その普及のしやすさも利点である。UAVによるレベル3飛行は、調査・点検作業を飛躍的に効率化・迅速化し、地域における

警戒避難体制の早急な確保や砂防施設の計画的な老朽化対策に資するとともに、作業自体の安全性の向上にも寄与するものと考えている。

大規模土砂災害対策技術センターでは、これまでの取組で得た知見を「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」として2020年3月に作成・公表²⁾しており、2021年7月に本手引きを改定・公表すると同時に、「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」についても公表したので、これらの手引きについてもぜひ参考とされたい。

UAVをはじめとした新技術は日進月歩である。今後も技術開発の動向を踏まえ、新技術を活用しながら、地域の安全・安心はもちろんのこと、砂防事業に携わる全ての人々の安全・安心も確保できる砂防事業を展開していきたい。

謝 辞

UAVに関する各種取組において、指導・助言・協力いただいた皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省近畿地方整備局：紀伊半島大水害による河道閉塞箇所の湛水池埋め立てが一部完了しました、2021、
<https://www.kkr.mlit.go.jp/news/top/press/20210331-1.html>
- 2) 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」、2020
https://www.kkr.mlit.go.jp/kiisankei/center/img/uav_guidance.pdf

小杉 恵



国土交通省近畿地方整備局紀伊山系砂防事務所調査課長(併)大規模土砂災害対策技術センター
KOSUGI Megumi

北本 楽



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
KITAMOTO Gaku

柴田 俊



研究当時 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 現 長野県姫川砂防事務所砂防課
SHIBATA Suguru