

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

A STUDY OF EMERGENCY SURVEY USING UNMANNED AERIAL VEHICLE OF
LARGR-SCALE DISASTERS

荒木 義則¹・木下 篤彦²・秦 雅之¹・河井 恵美¹

小竹 利明³・山田 拓³・柴田 俊³・亀井 稔⁴・松岡 和行⁴・南口 由行⁴

Yoshinori ARAKI, Atsuhiko KINOSHITA, Masayuki HATA, Megumi KAWAI,

Toshiaki KOTAKE, Taku YAMADA, Suguru SHIBATA, Minoru KAMEI, Kazuyuki MATSUOKA
and Yoshiyuki MINAMIGUCHI

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

E-mail: araki@cecnet.co.jp

²国土交通省国土技術政策総合研究所 (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)

³国土交通省近畿地方整備局紀伊山系砂防事務所 (〒637-0002 奈良県五條市三在町1681)

⁴国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所 (〒573-0166 大阪府枚方市山田池北町11-1)

Key Words: Large-scale disaster, Landslide dams, Unmanned aerial vehicle, emergency survey

1. はじめに

近年、我が国では、豪雨や地震に伴う大規模な土砂災害が数多く発生している。中でも、平成23年9月の台風12号による紀伊半島大水害では、紀伊半島各地で大規模な深層崩壊等が発生し、崩壊土砂が河道を閉塞して17箇所天然ダムが形成¹⁾された。その一部は上流集落に段波が押し寄せ、あるいは降雨中に満水となり越流・決壊し下流集落が土石流等に見舞われるなどの被害が発生した。台風12号に伴う降雨後も決壊せず河道が完全に閉塞した箇所のうち、今後の降雨等で越流・決壊した場合に甚大な被害が生じるおそれのある大規模な天然ダムは、5箇所(赤谷地区、長殿地区、栗平地区、北股地区、熊野地区)であった¹⁾。この5箇所は、土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律の一部を改正する法律(平成23年5月1日施行)(以下、「改正土砂災害防止法」という)に基づいた緊急調査²⁾の対象となり、発災後直ちに緊急調査が行われた。

緊急調査の目的は、天然ダムが形成される等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、住民の避難行動に資するために、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である。そのため、情報として一定程度の精度を確保した上で、時間をかけずに結果を出し、逐次情報を更新することが重要となる。

緊急調査の実施手順等は、「緊急調査実施の手引き(河道閉塞による土砂災害対策編)平成23年4月」(以下、「本手引き³⁾」という)に基づいて行われる。本手引きには、区域や時期等の情報を提供するために最低限実施すべき内容が示されており、「Ⅰ. 緊急調査着手の判断」、「Ⅱ. 初期期における調査」、「Ⅲ. 継続監視期における調査」、「Ⅳ. 緊急調査終了の判断」の4つの段階で調査を行うこととなっている。

現在でも3箇所(赤谷地区、長殿地区、栗平地区)は、緊急調査が継続されている。

緊急調査の手法は、緊急災害対策派遣隊(以下、

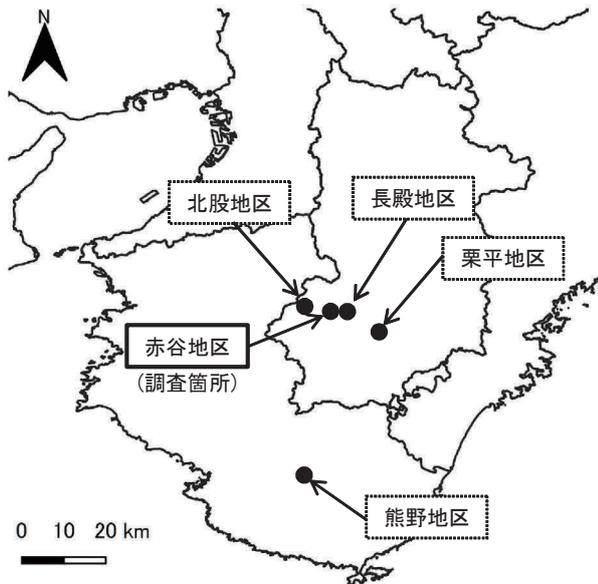


図-1 天然ダムの緊急調査実施箇所と調査箇所位置図

「TEC-FORCE」という)等による防災ヘリを活用した上空からの目視調査や現地での地上調査等である。

近年、無人航空機は、カメラやLP等の各種センサーを搭載できる様々な種類(固定翼、回転翼)の機体等の製品が実用化され、安価で高性能なものが普及し始めており、河川や土砂災害調査での利用が行われている。しかしながら、天然ダム等の大規模土砂災害への適用事例⁴⁾は少ない。

本研究の目的は、図-1の位置図に示すように、天然ダムで緊急調査が行われ、現在も調査が継続している赤谷地区(奈良県五條市)を調査対象とし、前述したI～IIIの各段階における既往調査手法の課題と解決の方向性を整理すると共に、無人航空機を活用した実現場での実証実験を行い、上空からの調査の有効性を確認することである。また、無人航空機による調査結果を地上の現地調査に活用し、上空調査と地上調査を組み合わせることで、従来よりも迅速かつ安全な緊急調査が行える可能性を示した。

2. 天然ダム緊急調査の課題と解決の方向性

天然ダム発災時の緊急調査は、防災ヘリやTEC-FORCEによる地上調査等により、写真-1に示す赤谷地区のような場所において実施される。ここでは、緊急調査の課題を明らかにするために、紀伊半島大水害の災害対応の記録^{1),5)}や災害対応者へのヒアリング等から初動対応やその後の出水イベント等への対応に関する課題を抽出した結果を表-1に示す。

表-1より、防災ヘリは、曇り等の気象条件によっては飛行出来ない場合がある。また、ヘリ搭乗者による携行型レーザー測距儀やGPSを用いた河道閉塞の



写真-1 天然ダム発生直後の状況(赤谷地区)

表-1 天然ダムにおける緊急調査(初動対応等)の主な課題

項目	内容
防災ヘリ調査	<ul style="list-style-type: none"> ・気象条件(曇り等)によっては、出動出来ない。 ・防災ヘリからの調査では、天然ダムの越流開始点の判断が難しく、計測誤差が大きい(数mの誤差が生じる場合もある)
地上調査	<ul style="list-style-type: none"> ・TEC-FORCEによる地上調査は、危険が伴う。 ・地上調査では、調査場所・ルート把握、調査後の結果整理に時間を要する。
解析	<ul style="list-style-type: none"> ・災害直後の航空写真やLPデータがあると、緊急調査着手の判断(土石等の高さ20m以上)や土石流氾濫想定区域の解析(QUADモデル⁶⁾計算)の精度向上につながる。

計測は、越流開始点の判断が難しく、計測誤差が大きくなる場合もあり、操作訓練等の充実が課題となっている。また、発災直後の地上調査には、2次災害の危険が伴うこと等が指摘されており、緊急調査の迅速性・安全性・正確性の確保が課題と言える。

そこで、これらの課題を解決する方法として、無人航空機や最新のICT機器を活用することを試行する。具体的には、気象条件(低層曇等)の影響で防災ヘリが飛行出来ない場合の代替手段として、無人航空機を活用した広域の現地状況の把握、緊急調査着手の判断、土石流氾濫想定区域の解析のための地形計測、その後の出水イベント等における現場状況の変化の把握等が可能かどうかを確認する。

3. 実証実験の概要

2章の課題と解決の方向性を踏まえ、大規模な河道閉塞が発生した赤谷地区において、複数の機種・機体・センサーを組み合わせた無人航空機による上空からの調査やICT機器を活用した初動対応等の有効性を確認するための実証実験を行う。

図-2に実証実験の概要図を示す。図-2より、実証実験は、初動対応等の内容を大きく3つのステップに分けて、各ステップにおける調査目的、調査対象、調査項目に対して、調査結果の有効性を確認する。



図-4 固定翼を用いた災害箇所の全容把握 (Step1)

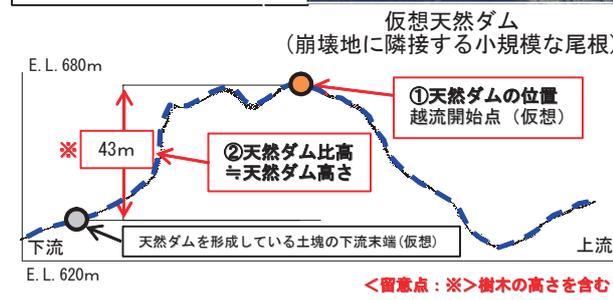
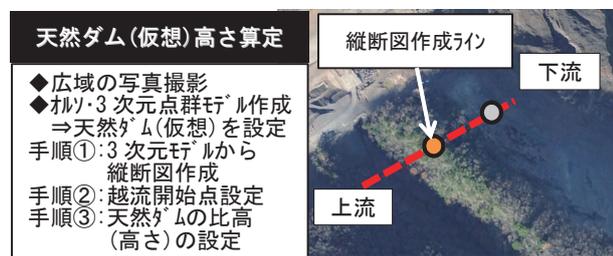


図-5 固定翼を用いた天然ダム (仮想) 高さの算定 (Step1)

次に、前述の解析で作成した3次元点群モデルを用いて、仮想天然ダム（本実験では崩壊地に隣接する小規模な尾根部）を設定し、天然ダムの概略形状（天然ダムの高さ等）を推定した結果を図-5に示す。図-5より、仮想天然ダムの位置（越流開始点）、高さ（約43m）を推定することができた。

無人航空機（固定翼）を用いた広域調査は、調査開始から緊急調査着手の判断に必要な計測結果の算出までを1日以内で迅速に対応できることから、防災ヘリによる調査が出来ない場合の代替案として、「I. 緊急調査着手の判断」に利用可能と考えられる。ただし、撮影写真から作成した3次元点群データは樹木の高さを含む形状データであり、地表面データではないことに留意が必要である。また、固定翼の離発着（離陸：手投げ方式、着陸：胴体着陸_直線約200m）は、本実験では天然ダム内の工事用道路を利



図-6 回転翼を用いた天然ダムの詳細調査 (Step2-1)

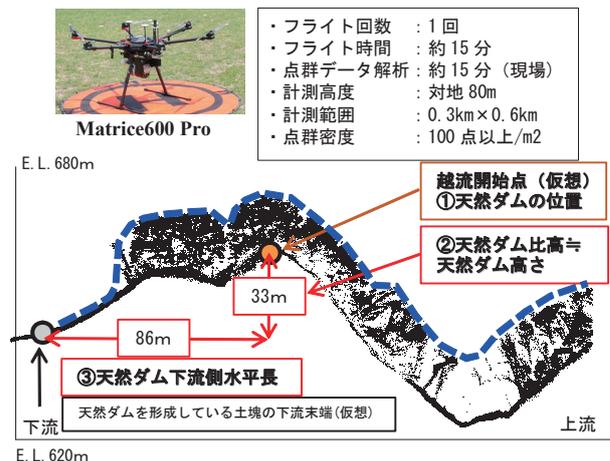


図-7 固定翼を用いた天然ダム (仮想) 高さの算定 (Step2-1)

用したが、状況に応じて安全な離発着スペースを確保する必要がある。

(2) 初動期における調査

Step2-1（初動期）の回転翼（Phantom4 RTK）を用いた天然ダムの詳細調査（撮影高度一定：離発着地点から対地高度500m、撮影範囲：1.8km x 2.2km）は、天然ダムの2次災害の影響を受けにくい安全な場所を離発着地点として選定し、自律飛行により静止画撮影を行った。調査結果を図-6に示す。図-6は、2回のフライトで約500枚の撮影した写真を使用し、sfm解析により約240分の短時間で作成したオルソ画像を示したものであり、天然ダムの湛水長（約63m）を計測することができた。

次に、回転翼（Matrice600 Pro）を用いた天然ダ

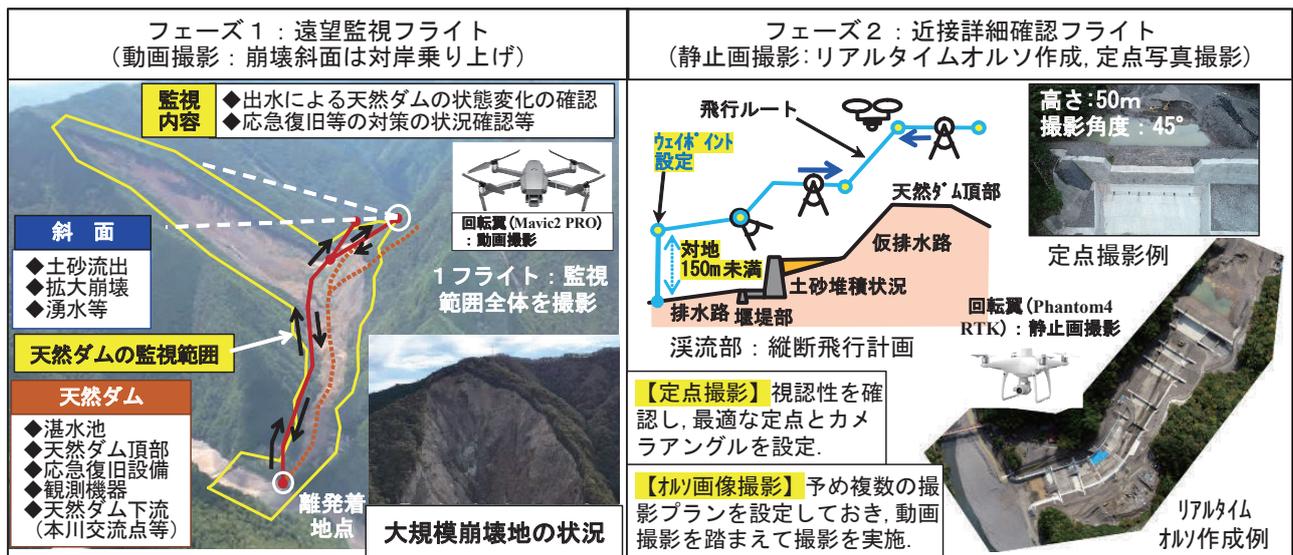


図-8 継続監視期における固定翼を用いた実証実験（概念図と実験結果）

ムのレーザ計測（対地高度：80m，計測範囲：0.3 km × 0.6 km，計測誤差：30cm 未満，GCP（調整用基準点）：設置無し）を行った。離発着地点は、前述と同一地点とし、自律飛行により1回のフライトで計測範囲のデータを取得した。取得データを用いて前述した図-5と同じ位置の断面を表示した結果を図-7に示す。図-7より、QUADモデルによる天然ダムの決壊シミュレーションに必要な主な数値データ（①天然ダムの位置・②天然ダムの比高・③天然ダム下流側水平長）を計測することができた。

無人航空機（回転翼）を用いた天然ダムの詳細調査（写真による状況把握、氾濫想定解析のための地形計測）は、調査から計測までを約1日以内に迅速に対応できることが確認できた。また、従来手法であるヘリ搭乗者による携行型レーザ測距儀やGPSを用いた河道閉塞の計測手法は、ヘリ搭乗者の状況判断に基づくピンポイント的な調査であるのに対して、無人航空機によるレーザ測量は、面的に天然ダムの形状を計測することができるため、氾濫計算に必要な入力データの計測精度の向上につながることを期待できる。

(3) 継続監視期における調査

継続監視期の無人航空機（回転翼）を使った調査は、天然ダムの監視範囲内の状態変化を迅速かつ安全に把握する必要があるため、3つの実現すべき目標（①安全な場所から自律航行（全自動）により飛行できること、②1回のフライトで地区全体の概略状態が把握できること、③概略状態の把握を踏まえた着目箇所について詳細にその変化が把握できること）と2つの監視シナリオ（フェーズ1：遠望監視

フライトによる動画撮影、フェーズ2：近傍詳細確認フライトによる静止画撮影）を組み合わせた実証実験を行った。実証実験の概念図及び実験結果を図-8に示す。

図-8より、フェーズ1の遠望監視フライト（使用機体：回転翼 Mavic2 PRO，対地高度：149m，飛行速度：8.3m/s，総飛行距離：約5.9 km，フライト時間：約20分）では、1回のフライトで天然ダムの監視範囲全体を動画撮影し、大規模崩壊地や天然ダム等の状態を確認することができた。特に、大規模崩壊地の撮影は、崩壊地に近づくと画角が狭くなり崩壊地全体が撮影できないため、崩壊地の対岸斜面側から撮影することで画角が広くなり、崩壊地全体を概略把握することが可能となった。

次に、動画撮影の結果を踏まえて、着目すべき箇所に対する近傍詳細確認フライトを行った。砂防堰堤に着目した定点撮影フライト（使用機体：回転翼 Phantom4 RTK，対地高度：149m，飛行速度：8.3m/s，総飛行距離：約3.8 km，フライト時間：約15分）では、高さ（149m，100m，50m）と撮影角度（垂直，斜め45°）を変化させた試行実験を行い、最適な飛行コースとカメラアングルを設定した。図-8には、砂防堰堤の定点写真の事例（高さ：50m，撮影角度：斜め45°）を示している。

また、同様に砂防施設の整備区間（砂防堰堤，溪流保全工）と本川合流点付近に着目した範囲に対して、オルソ画像の撮影を行った。ここで、オルソ画像の作成は、Phantom4 RTKに付属する機能（撮影と同時にオルソ画像を作成する）を用いることで、リアルタイムでオルソ画像が作成できることを確認した。リアルタイムオルソは、通常のsfm解析による処理

時間の短縮につながるため、災害対応において有効な手法になると考えられる。しかしながら、この機能は、機体とプロポ（操縦装置）との電波通信環境やプロポ（操縦装置）位置でのネット通信環境が整っていることに留意する必要がある。

(4) ICT 機器（「SMART SABO」：砂防調査・管理効率化ツール）を用いた現地調査

Step3 では、Step2 による無人航空機による上空からの調査結果を有効活用するために、ICT 機器を用いた TEC-FORCE による現地調査を試行実施した。

実証実験では、(2) で作成したオルソ画像を携帯端末に取り込み、初動対応を想定した現地調査を行った。調査結果を図-9 に示す。図-9 より、天然ダムの発災前後では、地形が大きく変化することから、既存の地形図や航空写真よりも、発災後の最新のオルソ画像が利用できることの有効性（情報の新鮮度）が確認できた。また、天然ダムは調査範囲が広いので、複数班・複数日にまたがる調査となることが想定される。通常、調査の引継ぎは、調査範囲や内容等を書面等で行う場合が多いが、本アプリを利用すれば、調査ルート（移動軌跡）や撮影写真等が位置情報付きで自動記録され、災害対策本部との情報共有も図れることから、天然ダムの緊急調査において迅速性、効率性、安全性の向上につながる等が確認できた。

5. おわりに

本研究では、天然ダムの緊急調査の各段階（Ⅰ. 調査着手の判断、Ⅱ. 初動期、Ⅲ. 継続監視期）において複数の種類（固定翼、回転翼）からなる無人航空機を活用した実証実験を行い、その有効性を確認した。

具体的には、実証実験結果より、従来手法である防災ヘリの代替え手段として利用できる場面や調査精度の向上につながることを確認できた。また、TEC-FORCE による現地調査と無人航空機による上空からの調査を組み合わせることで迅速性、効率性、調査の安全性の向上につながる可能性が高いことが分かった。このことから、今後の天然ダムにおける緊急調査では、無人航空機を積極的に活用することが望まれる。無人航空機等の技術は、日進月歩であることから、飛行の安全性・信頼性・自動化等の今後の技術開発等により、さらなる機能・性能の向上を期待したい。

最後に、本研究の成果は、実務的な運用に関して「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」⁸⁾としてとりまとめられているため、詳細等については別途



図-9 ICT 機器 (SMARTSABO) を用いた現地調査の例 (Step3)

参照されたい。

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) 国土交通省砂防部：土砂災害防止法の一部改正について（平成 23 年 5 月施行）パンフレット，
<https://www.mlit.go.jp/river/sabo/sinpoupdf/H23kaisei.pdf>.
- 3) 土木技術資料：「土砂災害防止法の改正」に基づく緊急調査の手引き，53-12，pp. 60-61，2011.
- 4) 木下篤彦，島田徹，笠原拓造，林栄明，名草一成，小山内良人，村木広和：回転翼型マイクロ UAV を用いた深層崩壊箇所の災害調査，砂防学会誌，Vol. 66，No. 3，pp. 51-54，2013.
- 5) 中込淳：平成 23 年台風 12 号による紀伊山地河道閉塞（土砂ダム）対応について，河川，No. 2，pp. 29-38，2012.
- 6) 清水武志，内田太郎，山越隆雄，石塚忠範：天然ダムによる土石流想定範囲計算システム（QUAD-L）の開発と 2011 年台風 12 号災害における適用，土木技術資料，54-10，pp. 14-17，2012.
- 7) 河口幸広，吉村元吾，江角信良，和田紘希，國時正博：土砂災害発生後の緊急点検における SMART SABO の活用，砂防学会誌，Vol. 73，No. 1，pp. 58-61，2020.
- 8) 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. 3.

(2020. 7. 1 受付)