

# 災害時におけるUAV(無人航空機)の活用について

尾無 雅実

近畿地方整備局 近畿技術事務所 防災・技術課 (〒573-0166 大阪府枚方市山田池北町11-1)

災害発生時において被災の情報を必要に応じて適切な時期に的確に取得することを目的として、UAV(無人航空機)の活用手法及び取得可能な情報(データ)を実証調査により検討した。

実証調査では、UAVによる撮影手法や搭載カメラの性能の違いによる成果の品質を確認し災害発生時において時系列的に必要な情報を踏まえ、活用方法を検討した。

その結果、発災初期段階では、迅速な画像取得を目的とした持ち運びや操作が容易な機種を利用して簡便な手法で活用することが効果的であり、緊急復旧等の段階では災害復旧の基礎資料の取得を目的として 測量成果を考慮した手法で活用することが有効であることが確認できた。

キーワード 被災状況調査, UAV, 三次元データ, 画像解析

## 1. はじめに

近年、災害時における緊急調査や構造物等の点検手法としてUAVの活用が広がっている。

一方、平成23年台風12号により近畿地整管内で発生した紀伊山地での大規模な土砂災害(深層崩壊)では、被災現場へのアクセスが困難であったことから従来の緊急調査による被災状況の全容把握に時間を要し、被災状況調査の初動期の課題も浮き彫りとなった。

また、近い将来に発生すると予測されている南海トラフ地震の地震災害、道路災害、河川災害へのより迅速で有効な災害対応を検討することが必要となっている。

このようなことから、迅速な災害対応を行うため、画像取得が可能で写真測量技術や画像解析技術による三次元データの迅速な取得が可能なUAVを活用し、災害発生後に迅速な情報収集を行うことが期待される。

本調査では、UAVを活用した被災状況調査を実施していくにあたり、被災状況調査における調査時期(災害対応フェーズ)、調査手法及び安全性に留意したUAVの活用方法について検証を行った。

## 2. 被災状況調査目的(災害対応)の時系列推移

災害対応では、表-1に示すとおり、まず第一に「何処で」、「何が」、「どのような状態で」被災しているかを把握することが重要である。次いで、災害規模の拡大防止や緊急復旧のための基礎資料を収集することが求められる。

表-1 災害対応の時系列推移

対応時期	対応内容	被災調査の目的
初期 (フェーズ1)	全体像を把握	被災箇所・種別の定性的把握
1~3日後 (フェーズ2)	被災箇所の安全確保 被害の拡大防止	被災箇所の規模、 範囲の概数把握
3日後~ (フェーズ3)	被災箇所の復旧 予防・保全対策	被災箇所の規模、 範囲の詳細把握 (測量成果)

## 3. 被災状況調査の品質

被災状況調査の成果は、調査時期の目的に応じて表-2に示す品質が求められる。なお、フェーズ1では、状況把握で十分であることから、迅速に画像データを提供することが重要であり、三次元データの取得は、必ずしも必要とはならない。

表-2 調査成果の品質

対応時期	品質
フェーズ1	被災の有無、種別が視認できる画像
フェーズ2	被災箇所の詳細な状態が視認できる画像
	地形がポール横断と同等精度で計測できる三次元データ
フェーズ3	1/500~1/1000レベル精度で図化(地形平面図作成)ができる画像
	1/500~1/1000レベル精度で地形が計測できる三次元データ

#### 4.検証方法及び検証結果

UAVによる被災状況調査は、写真測量の一環であり調査にあたって規定しておく条件は、①データの標定(補正)方法、②地上解像度、③撮影方法(垂直・斜め撮影)である。

現在、UAVに関する写真測量の基準を定めているものとしては、「UAVを用いた公共測量マニュアル(案)国土院」がある。この基準は、主にI-Constructionを念頭においているため、要求精度は三次元点群データで0.05m以下となっている。

しかし、被災状況調査においては、迅速性・概要把握に主な目的を置くことから、ここまでの精度は要求しなくてもよいこととした。

##### (1) 検証に使用したUAVの機種

本検討に用いたUAVは、近畿技術事務所が保有している「α-UAV」及び「Phantom3」とした。

それぞれの機器仕様は、表-3に示すとおりである。

Phantom3は、機体が軽量で機体の運搬・機体組立が容易であり、機動力に優れている。

機器性能では、Phantom3の写真1枚の撮影範囲は、α-UAVと比べて広く、同一範囲を撮影する場合、写真枚数が少なくなる。また、同一ラップで撮影する場合、撮影速度が速く、コース間隔が広くなり撮影労力が少なくなる(時間短縮できる)。一方、同一高度で撮影した場合は、Phantom3の地上解像度(細密度)は、α-UAVに比べて粗くなることとなる。

表-3 検証に使用したUAVの機種

項目	α-UAV	Phantom3
機体重量	3,600g	1,280g
大きさ	99cm(最大幅)	35cm(最大幅)
機体準備	組立方式	組立済み
飛行方法	事前プログラミング	マニュアル操作
飛行制御	単独測位(GNSS)	単独測位(GNSS)
撮影位置計測	GNSS 2周波測位	単独測位(GNSS)
カメラ焦点距離	14mm(FOV=63°)	3.6mm(FOV=94°)
有効画素数	1600万画素	1200万画素

\*FOVはカメラレンズ中心からの両側撮影角度(幅)

##### (2) 垂直撮影の三次元位置精度の検証(検証機種: α-UAV)

撮影写真を図化・画像解析した結果の位置精度及び作業量は、標定(補正)の方法によって異なるため、利用目的に応じて次の手法を検証した。

○カメラ主点位置情報(撮影位置)で補正

○地上標定点をして補正

##### a) 検証方法

標定方法(補正方法)の違いによる三次元データの精度検証は、垂直撮影を行いα-UAVに搭載した撮影位置計測機器で計測(GNSS 2周波解析)したデータで補正した場合と、標定点を利用して補正した場合での結果を比較して行った。

##### b) 標定方法の違いによる三次元位置精度

検証結果は、表-4に示すとおり標定点を使用して補正した場合で、撮影高度100m、50mとも水平・高さ方向の誤差が1cm以下であるのに対し、撮影位置データで補正した場合は、水平・鉛直方向の誤差が数cm~数十cmとなった。なお、以下、誤差は真値からの標準偏差である。

このことから、標定点による補正を行うことで撮影高度に依存することなく高精度の成果が得られること、撮影位置データで補正する場合の精度は撮影高度に依存すること、が確認できた。

表-4 標定(補正)方法、撮影高度の違いによる誤差

撮影高度	標定点の数	X座標(cm)	Y座標(cm)	Z座標(cm)
100m	8点	0.35	0.44	0.27
	なし	32.25	63.81	29.54
50m	8点	0.26	0.41	0.13
	なし	14.69	4.97	3.91

##### (3) 垂直撮影の形状再現性の検証(検証機種: α-UAV)

地上解像度は、地形や地物等(被写体)の撮影可能な最小寸法で、地物・地形の再現精度に関連し解像度が小さいほど詳細な情報を取得でき、細密な三次元データを作成することができる。

地上解像度は、カメラの焦点距離と対地高度及びカメラの有効画素数に関連することから、撮影時には状況に応じて、カメラ性能や飛行高度等の設定を行う必要がある。被災調査では、複数の調査の同時進行が行われることが想定されることから、調査方法の汎用性を確保するため、地上解像度の規定のみとし、カメラ性能や飛行高度等は調査者が任意に設定することとする。なお、カメラの有効画素数が同じ場合のカメラ焦点距離と対地高度・地上解像度の関係は、図-1に示すとおりである。

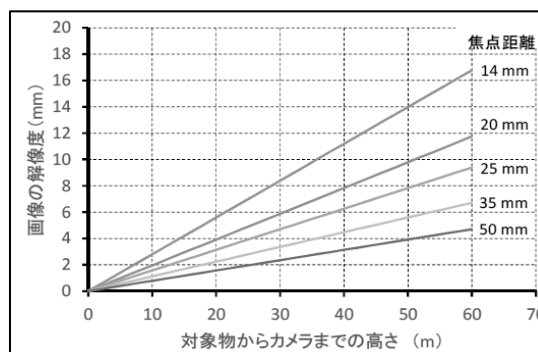


図-1 カメラ焦点距離と対地高度、地上解像度の関係

##### a) 検証方法

地上解像度の検証は、α-UAVの撮影高度を50m(地上解像度1.4cm)とした場合と、100m(地上解像度2.6cm)とした場合の地上解像度の異なる垂直撮影成果を用い、形状の再現精度を比較した。

**b) 撮影高度の違いによる形状再現精度**

検証結果は、図-2に示すとおり高度100mからの垂直撮影で標定点を使用しなかった場合で高さ方向に差がみられるものの、どのケースとも石積の崩壊した形状は再現している。このことから崩壊形状等は、撮影高度100mでも把握できることが確認できた。

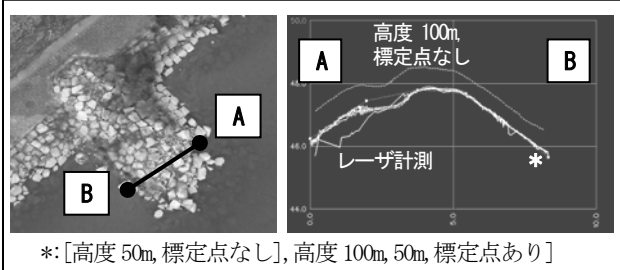


図-2 地上解像度の違いによる再現形状の比較

**(4) 斜め撮影の検証 (検証機種: α-UAV)**

撮影方法 (UAVの撮影方向) は、画像解析精度 (画像マッピング処理) に関連しており、安定した精度 (飛行) が得られるのは垂直撮影であるが、垂直に近い斜面や構造物側面を把握する必要がある場合は、斜め撮影を実施する必要がある。

本調査では、斜め撮影成果の精度を検証した。

**a) 検証方法**

撮影方法の違いによる三次元データの精度検証は、斜め撮影を行いα-UAVに搭載した撮影位置計測機器で計測 (GNSS 2周波解析) したデータで補正した場合と、標定点を利用して補正した場合の結果を比較して行った。

**b) 標定方法の違いによる三次元位置精度**

検証結果は、表-5に示すとおりである。なお、誤算に範囲があるのは、複数地区で検証したことによるものである。

標定点を使用して補正した場合は、水平・高さ方向の誤差が1cm以下であるのに対し、撮影位置データで補正した場合は、水平・鉛直方向の誤差が5cm~58cm程度となった。このことから、斜め撮影でも標定点による補正を行うことで高精度の成果が得られることが確認できた。また、撮影位置データで補正した場合でも、地図情報レベル 1/1,000 程度の成果が得られることが確認できた。

表-5 標定 (補正) 方法の違いによる誤差

撮影高度	標定点	X座標 (cm)	Y座標 (cm)	Z座標 (cm)
50m	32点	0.22-0.83	0.20-0.57	0.27-0.57
	なし	4.39-58.52	3.00-32.22	16.91-41.83

**c) 標定方法の違いによる形状再現精度**

地形の再現精度は、図-3に示すとおり標定点で補正した場合、撮影位置データで補正した場合とも地物形状に大きな違いはなく、地形の概要、定量的な概ねの損傷規模を把握することが可能であることを確認した。

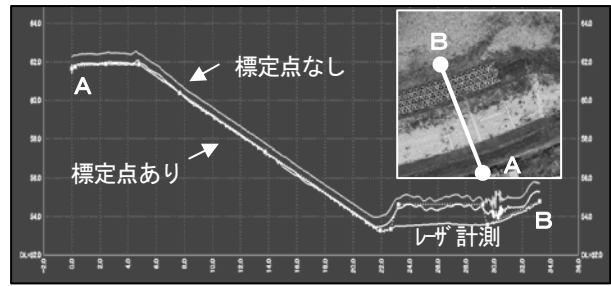


図-3 標定方法の違いによる地形の再現性

**(5) α-UAVとPhantom3の比較**

α-UAV及びPhantom3で垂直撮影した成果の計測精度の比較は、高度150mから撮影した画像を標定点により位置補正を行った場合について行った。

比較した結果は、表-6に示すとおりであり両機種とも概ね10cm以下の精度となった。

このことから、標定点を使用して補正する場合は両機種とも同等の精度が確保できることが確認できた。

表-6 α-UAVとPhantom3の計測精度比較

機種	X座標 (cm)	Y座標 (cm)	Z座標 (cm)
α-UAV	1.46-2.44	1.15-3.43	0.45-2.40
Phantom3	0.71-3.99	1.33-19.57	0.53-7.10

また、三次元データから地形の再現性を検証した結果は、図-4に示すとおり両機種とも斜面地形を同等な精度で再現している。このことから標定点を使用して補正する場合は、両機種とも同等の地形の再現性が得られることが確認できた。

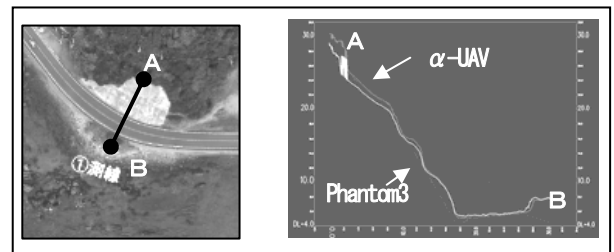


図-4 機種の違いによる再現形状の比較

**(6) Phantom3の単独測位による精度**

Phantom3は、α-UAVとは異なり上空での撮影位置を単独測位により計測し、画像データにその座標 (緯度、経度、高度) を記録している。

地上標定点による補正を行わないで、この記録された座標値を利用した場合の位置精度を検証した。

本調査による検証結果は、表-7に示すとおり水平位置は数m程度であるものの、高さ方向の誤差は30~50mと大きい。このことから、被災箇所を平面的に把握する場合は、支障がないが、標高が公共測量等と整合することが求められる場合は、解析した標高データの誤差計算す

るなどして補正する必要があることが確認できた。

表-7 Phantom3の単独測位による計測精度

X座標 (m)	Y座標 (m)	Z座標 (m)
1.50-8.68	0.42-6.44	27.5-49.40

また、Phantom3により撮影した結果は、高さ方向の誤差が本検証では30~50mと大きかったものの、相対位置関係（水平距離，比高）や形状の再現性は、 $\alpha$ -UAVと同等であり、崩壊形状等の把握は可能であることを確認した。

### 5.調査成果の活用方法

UAVにより撮影した写真は、主に図-6に示すフローで処理した成果が得られる。

これらの成果は、迅速性、必要な情報種別、成果の品質等が異なるため、災害対応時期に対応した活用を行う必要がある。

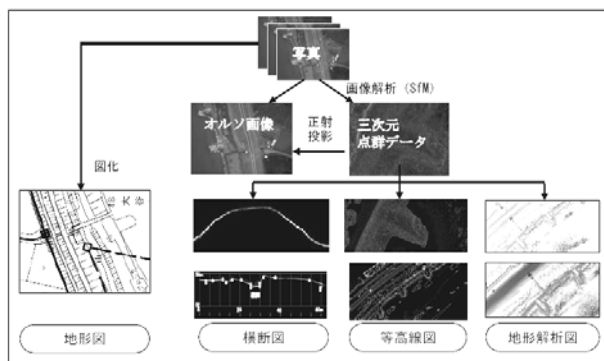


図-6 UAVの活用による成果

#### a) 対応フェーズ1 (初期段階)

この段階では、被災の有無や種別を確認することが重要であるため、撮影写真そのもの(単写真)又は撮影動画を活用する。低高度で撮影することから、航空機に比べて被災状況が詳細に把握することができる(写真-1参照)。

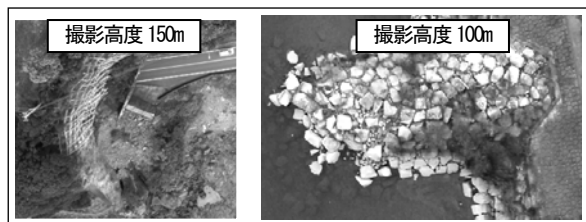


写真-1 UAVで取得した単写真

#### b) 対応フェーズ2 (2~3日後)

この段階では、災害の拡大や人の立ち入りの安全性を確認することが求められるため、被災状況の詳細な状態を平面的に把握するとともに、ポール横断程度の形状、規模等を把握する必要がある。このため、調査成果とし

ては、正射投影したオルソ画像(写真-2参照)や三次元データを用いた縦横断面図(図-7参照)が求められる。

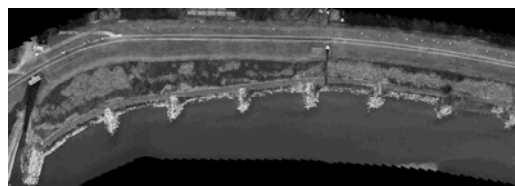


写真-2 オルソ画像

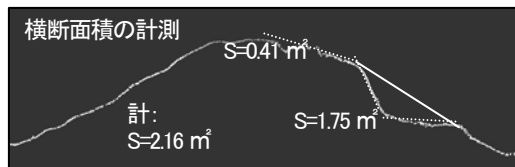


図-7 三次元データから作成した横断面図

#### c) 対応フェーズ3 (3日後以降)

この段階では、災害復旧設計・施工の基礎資料とするため、精度が担保できる平面地形、三次元データが必要である。このため、測量業務として調査を実施し、標定点を用いた補正により精度が確保された成果の作成が求められる。成果例を図-8~図-10に示す。

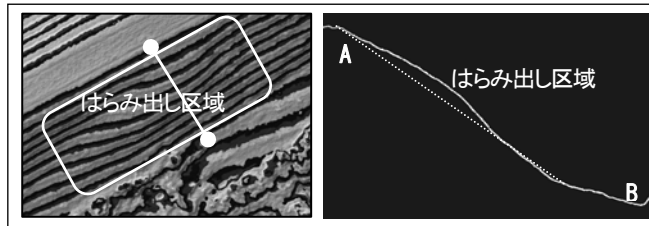


図-8 斜面のはらみ出しを再現した調査成果

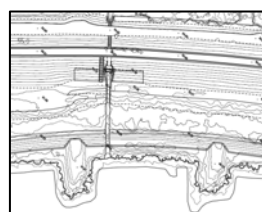


図-9 地形図

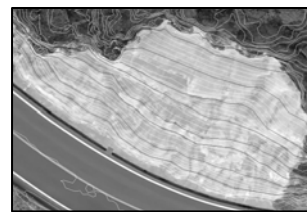


図-10 オルソ/等高線図

#### d) 斜め撮影の活用

斜め撮影は、垂直撮影では撮影できない直立に近い斜面(写真-3参照)や橋梁下部(図-11参照)等の場所において有効であることを確認した。

橋梁下部の地形については、橋梁の両側から斜め撮影を行いこれらの撮影成果を接合することで上部工下の三次元データが作成できる。

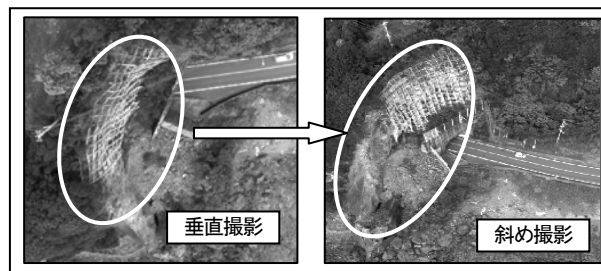


写真-3 斜面における垂直・斜め撮影の違い

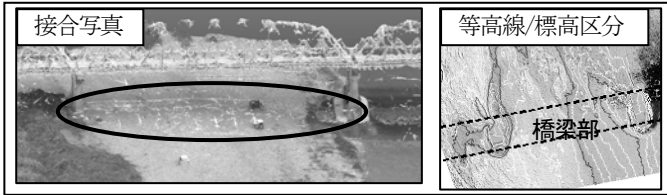


図-11 橋梁下部の状況を把握 (画像及び地形)

## 6.UAVの活用効果

災害対応フェーズ毎にUAVの活用効果を安全面、労力・時間、調査精度、成果の高度化について、従来調査手法、航空機による調査と比較すると表-8に示すとおりである。

表-8 被災状況調査におけるUAVの活用効果

	活用効果
フェーズ1	広域にわたる被災状況を迅速に把握することについては、従来の航空機による調査が効果的であるが、範囲を限定して航空機による調査を補完する調査としての活用は効果的である。
フェーズ2	UAVの主な活用目的は、被災直後に構造物や地形変化を迅速に把握し、応急復旧や二次災害を防止する資料を取得することとなる。この場合、区間も限定した調査となることから、従来の航空機による調査や目視調査に比べ、労力・時間及び成果品質面で活用効果は大きい。 また、人が立ち入れない場所での調査が可能であり、安全面での活用効果は大きい。
フェーズ3	成果の計測精度は、従来の現地測量に比べて劣るものの、地図情報レベルとしては高い精度(1/500等)で取得が可能であり、かつ面的なデータとなる。このため、現地測量を補完する設計資料の取得や工事箇所、その周辺区域の安全監視として、活用効果は大きい。 また、UAVを活用することで、従来の作業労力・時間を軽減することが可能で、労力面においても活用効果は大きい。

## 7.UAVの運用計画案

撮影諸元の違いによる比較・検証、解析手法の検討を踏まえ、災害対応フェーズに対応したUAVの運用計画案を表-9~表-11に示すとおり作成した。

なお、使用するUAV機種については、次の事項に留意し状況に応じた選定を行う必要がある。

UAVの主な違いは、風等に対する対応力、撮影位置の精度、機動性、操作性である。

小型機は、機動性・操作性に優れており、局所的な範囲(区間)を短時間で数多く対応する場合に適応性が高い。一方、中型・大型機は、風への対応力が高いこと、有視界で遠距離まで飛行できることから、広範囲(区間)を対象とした概略調査や精度を要求する調査を行う場合に適応性が高い。

表-9 災害対応フェーズ1のUAV運用計画案

項目	内 容	
目的	対象範囲内における地形、構造物の変状箇所及びその種別について判読し、災害における被災状況の概要を把握することを目的とする。	
調査内容	空中写真撮影	
現地調査	標定(補正)	標定しない。
	撮影方法	地上解像度: 5cm以内 オーバーラップ率: 規定しない(未撮区域がない)。 サイドラップ率: 規定しない(未撮区域がない)。
整理・解析方法	データ処理	・単写真処理 ・被災箇所抽出 被災箇所の単写真に撮影位置を付与したExifデータを作成する。
	成果	・飛行コース図: Jpg, Tif, Pdfのいずれかの形式 ・単写真: Jpg, Tifのいずれかの形式
留意事項	・広範囲にわたる調査が想定されるが、UAVでは有人航空機の補充調査とする。 ・飛行中の機体を視認できないコース設定を行う場合は、事前コース設定が可能な機種選定を行う。	

表-10 災害対応フェーズ2のUAV運用計画案

作業項目	内 容	
目的	対象範囲内における地形、構造物の変状箇所及びその種別について判読し、災害における被災状況の概要を把握することを目的とする。	
調査内容	空中写真撮影、画像解析による三次元地形データ作成	
現地調査	標定(補正)	標定しないが、撮影時のカメラ主点位置座標を記録する。
	撮影方法	地上解像度: 3cm以内 オーバーラップ率: 80%以内。 サイドラップ率: 60%以内。
整理・解析方法	データ処理	・単写真処理 撮影した単写真に撮影位置の座標を付与してExifを作成する。 ・三次元データ作成 解析ソフトを利用して三次元地形データを作成する。 ・デジタルオルソ作成 撮影位置の座標、単写真、三次元データをもとにデジタルオルソ画像を作成する。 ・被災箇所抽出 デジタルオルソから被災箇所を抽出し、被災箇所の延長、幅等の規模を計測する。 ・被災箇所の代表測線の縦横断面を作成する。
	成果	・飛行コース図: Jpg, Tif, pdfのいずれかの形式 ・単写真: Jpg, Tifのいずれかの形式 ・被災箇所位置図: Jpg, Tifのいずれかの形式(背景はオルソ画像) ・三次元データ: Las形式 ・デジタルオルソ画像: Tif形式 ・測線配置図及び縦横断面(ポール横断程度): Dxf形式
留意事項	・被災箇所の位置特定にあたり、カメラ主点位置座標の記録ができない場合は、標定点を設置する(距離標等の利用、位置が判明している既知地物の利用が可能)必要がある。 ・標定点を設置した場合、フェーズ3の手法と同様になるが、撮影高度が高くなるため、撮影時間、撮影枚数が少なく、成果作成までの時間がフェーズ3に比べて短時間となる。 但し、成果の精度は低下する。	

表-11 災害対応フェーズ3のUAV運用計画案

作業項目	内 容	
目的	対象範囲内における地形、構造物の変状箇所及びその種別について判読し、災害における被災状況の詳細を把握することを目的とする。	
調査内容	空中写真撮影、画像解析による三次元地形データ作成	
現地調査	標定(補正)	標定する(既存地物、物標の利用も可能)。
	撮影方法	地上解像度: 1.5cm以内 オーバーラップ率: 80%以内。 サイドラップ率: 60%以内。
整理・解析方法	データ処理	・単写真処理 撮影した単写真に撮影位置の座標を付与してExifを作成する。 ・三次元データ作成 解析ソフトを利用して三次元地形データを作成する。 ・デジタルオルソ作成 撮影位置の座標、単写真、三次元データをもとにデジタルオルソ画像を作成する。 ・被災箇所抽出 デジタルオルソから被災箇所を抽出し、被災箇所の地形図(1/500)を作成する。 ・被災箇所において一定間隔毎の縦横断面を作成する。 ・被災箇所において等高線図を作成する。
	成果	・飛行コース図: Jpg, Tif, pdfのいずれかの形式 ・単写真: Jpg, Tifのいずれかの形式 ・被災箇所位置図: Jpg, Tifのいずれかの形式(背景はオルソ画像) ・三次元データ: Las形式 ・デジタルオルソ画像: Tif形式 ・測線配置図及び縦横断面: Dxf形式 ・地形図(1/500): Dxf形式
留意事項	・標定点の配置は、区域4隅及び区域中央付近に配置するなど、設置点が偏らないようにする。(区域内にバランス良く、少なくとも5点の配置が望ましい) ・標定点設置は、VRS測量(GPS測量)により行うことで、時間短縮が可能である。	

## 8.今後の課題

本調査では、現有する機種や解析手法をもとに、被災状況調査におけるUAVの活用（運用）手法を検討した。その結果、多くの災害対応フェーズにおいて活用効果が確認され、災害対応フェーズ毎に対応目的と機器の特性を踏まえたUAVの運用計画案を立案した。

今後、この運用計画案に沿った活用を進めることで、円滑かつ迅速な被災状況調査の実施が可能となると考えるが、さらに活用効果や効率性を向上させるための課題として、下記の事項があげられる。

### a) 標定点の設置手法

UAVで撮影した写真により、写真測量技術や画像解析技術を用いて地形図や三次元地形データを作成するためには、解析成果に位置情報を付与するための基準が必要である。このためには、撮影カメラの主点位置座標をGNSS衛星から計測して、その座標を利用する場合と地上に標定点を設置してその座標を利用する場合がある。

近畿技術事務所が保有するUAVには、カメラの主点位置を計測して記録する装置が装備されているため、成果に座標を付与することはできるものの、高精度な測量成果が必要となるものには利用できない。特に、Phantom3については、ある基準地点からの相対位置関係（比高等）を把握する場合は大きな差は生じないが、公共座標と関連付けて利用する場合は、高さ方向の誤差が大きい。また、カメラ主点位置を計測、記録することができない機種を利用した場合は、単なる写真撮影となり測量や解析には利用することができない。

より効率的にUAVを活用するためには、初期段階で撮影した成果の精度を高め、以降の測量成果として利用することが望ましい。この対応としては、地上に標定点を設置することとなるが、現状では初期の被災状況調査において標定点を設置することは、労力・設置場所の面で困難であり、対応策を検討していく必要がある。

### b) レーザ計測の活用

UAVは、地物表面を撮影した写真を利用するため、植生の下面の計測は不可能である。本調査においても、植生のある箇所での地盤面のデータは取得できていない。

被災状況調査を行う場合、特にフェーズ2以降の調査においては、現地調査の安全性を確認することで活用する場面が多く発生すると想定されるが、山地災害や道路

斜面、法面の崩壊境界部には植生がある場合が多く、UAVの成果では危険性を判断するには不十分となる。こうした場所では、レーザ計測を併用して調査を行うことが有効である。近年、UAVにレーザを搭載した機種もあり、今後は汎用的に利用されていくものと推測され、被災状況調査での活用方法を検討することも望まれる。

### c) 運用計画の見直し

本運用計画は、平常時での現地検証により検討したものであり、実際の災害時には予期できない事態が発生することも考えられる。また、近年のUAVに関する技術進歩は加速しており、新たな機能や、高性能な機材が実用化されることも考えられる。従って、本調査において立案した運用計画は、今後の技術動向に留意しつつ防災訓練等の中で試行し、適宜、見直しを行って、より充実した計画とすることが必要である。

### d) 調査の安全

UAVは、比較的容易かつ安価に空中写真撮影などを行うことができ、三次元地形モデルの作成等を効率的に整備することができることから、多くの調査・測量の場面で活用されることとなる。しかし、現時点でUAVを使用する場合の安全対策は、絶対的な安全確保は難しいことから、UAVを活用した調査・測量では、公衆の安全を優先させて作業を実施する必要がある。特に、被災状況調査においては、調査・測量時における二次災害の防止のためにも安全管理計画を十分に検討する必要がある。

**謝辞：**本調査は、赤谷、紀ノ川、国道42号において実施しており、調査においてご協力頂いた関係各機関各位に対して感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 国土地理院：UAVを用いた公共測量マニュアル（案），2016年3月
- 2) 国土交通省：空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）（案），2016年3月
- 3) 国土交通省：国土交通省南海トラフ巨大地震対策計画（近畿地方対策計画）（案），2014年3月
- 4) 国土交通省近畿地方整備局：大規模土砂災害発生時の対応力向上基礎資料作成業務報告書，2014年3月