

小型無人航空機 (UAV) の利用方法 と地質調査業務への展開

宿輪 隆太¹⁾

キーワード：小型無人航空機, ドローン, UAV,
マルチコプター, 費用, 操縦技術, SfM,
安全運用

1. はじめに

一般的にドローンと呼ばれる小型無人航空機 (小型 UAV) の中でも電動マルチローターヘリコプター (マルチコプター) の性能は目覚ましく向上した。これにより特段の操縦技術がなくとも高画質でブレの少ない、空中における静止画や動画が撮影できるようになった。

ドローンで撮影した高画質な画像は、Structure from Motion (SfM) と呼ばれる三次元プリンターの出力データや 3 次元 CG の作成に用いる技術と組み合わせることが可能である。この技術を組合せれば、空中静止画から高精細のオルソ画像、高分解能 (数 10cm ~ 1m のコンター間隔) の地形図を作成することができる。これら技術は、地すべり調査や豪雨災害調査など自然災害対策だけでなく、メガソーラーや風力発電施設といった大規模な施設点検の分野で注目されている。特に災害発生時における迅速運用に向けては試験的な研究や調査が進められている (例えば、井上ほか, 2014; 内山ほか, 2014a; 内山ほか, 2014b)。

筆者は 2014 年 4 月にドローンを導入した新規のサービスを提供すべく検討をはじめた。その後、機体の選定から操縦のトレーニングを経て同年 9 月から試験運用をはじめ、2014 年 12 月より地すべり地形調査、斜面对策施設の点検業務などの現地業務へ順次導入を開始した。

検討当初、筆者はドローンについて知識・経験はまったくない状態だった。しかしながら現場業務に対する有用性や顧客へのアピールになることが強く期待できたため導入に踏み切った。

現在、多くの事業者ではドローンの有用性を認めつつも、導入に向けたアクションを実際には起こしづらい状況ではないだろうか。本稿では導入の背景、機体の選定方法、操縦技術の習得方法、フライトの安全運用、今後の業務への展開といった点について筆者の経験をもとに順を追って報告する。本稿がドローン導入を検討している事業者の一助となれば幸いである。



図 1 神津島多幸湾からみた天上山。
こつしまたこうわん てんじょうさん

2. 導入の背景

2014 年 3 月、筆者は斜面防災施設の点検業務で伊豆諸島の神津島こつしまにいた。神津島は流紋岩質の溶岩と火砕岩類で構成され、急峻な地形を形成している (図 1)。急崖斜面は崩落も多く、島の至るところで大規模な斜面对策工が建設されている。高さ 200m はあるかという急崖の中腹部にも規模の大きい対策工がいくつも建設されているが、それらの点検には多大な時間と費用を必要とし、かつ墜落や転落など作業には常に危険を伴うものであった。晴天の昼食時、調査に要する労力に正直少々うんざりする気持ちもちながら施設を眺めていた。そのとき、隣にいた顧客の現場管理者が「ラジコンヘリコプターでみるのであれば楽なのにね。」とポツリと言った。

2014 年 3 月、筆者は個人事業主として開業したばかりで、今後の営業活動においてアピールとなるサービスをつくりたかった。「ヘリコプターを利用した調査ができれば、調査の役に立つし、わかりやすいアピール材料にできる」と思うに至った。これがきっかけとなり、ドローンを利用したサービスをつくるべく情報収集とサービス内容の検討を始めた。

3. 機体の選定方法

機体の選定は、ドローンの情報を集め、サービスの仕様を考案しながらの作業となった。当時、筆者はドローンに対する知識や経験をまったく有しておらずさぐりの状態であった。そのため操縦トレーニングに必要となる機体入手するまで結構な時間を要してしまった。ここではサービス内容の検討を経て、機体の選定から調達に至るまでの経緯について報告する。

3. 1. 現場導入までの手順

機体選定から現場導入に至る一般的な手順について図 2

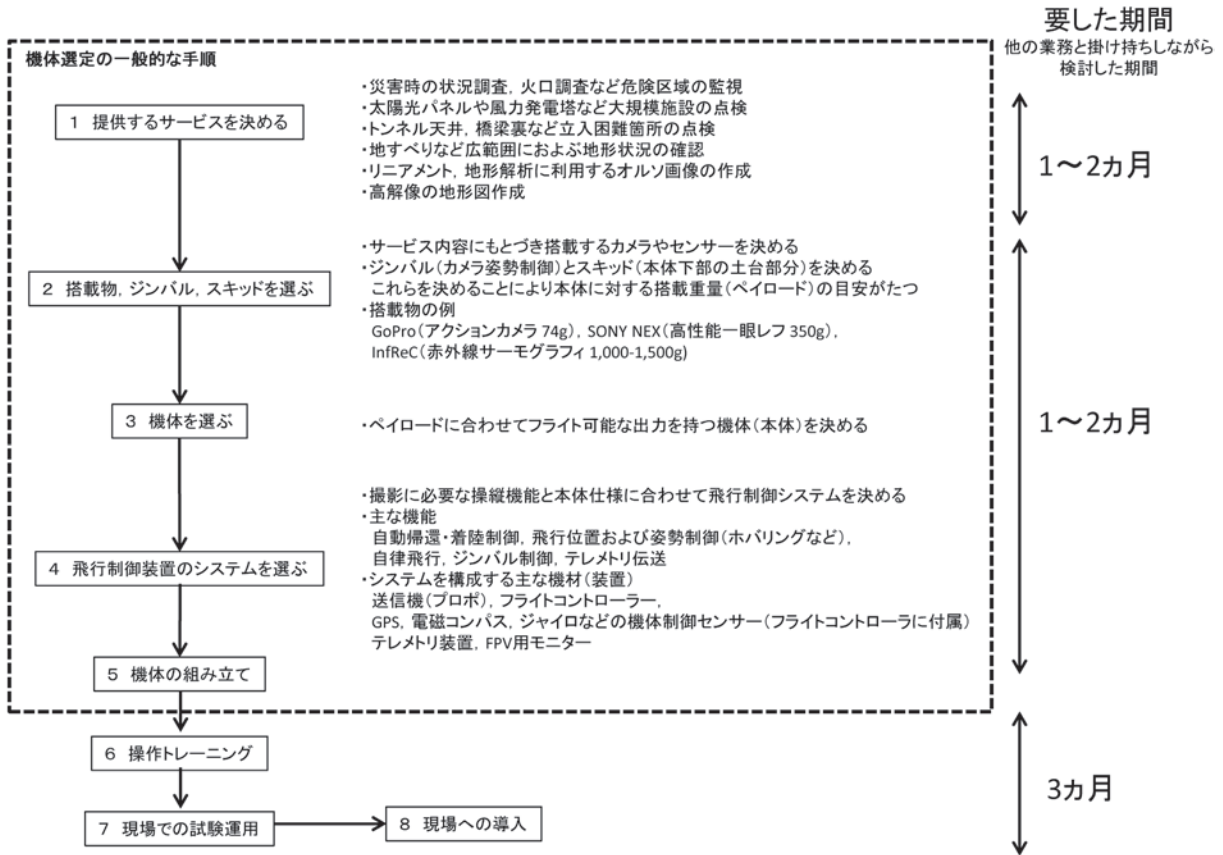


図2 機体選定から現場導入への一般的な手順。

に概要を示す。

3.2. ドローンの機能

ドローンの機能として一般的に知られているのは、空中における静止画や動画を撮影できることである。正確には、ドローンに連結したカメラの機能である。ドローンとしての特徴や機能は以下に集約される。

- ・機体にセンサーと自動制御システムを組み込むことが可能で安定した飛行が容易にできる。
- ・自動帰還、自律飛行といった自動飛行機能をプログラミングできる。このため、目視範囲外のフライトが可能。
- ・長時間フライトを可能にする軽量、大容量のリチウムポリマーバッテリー（通称：リポバッテリー）が採用されている。
- ・積載重量（ペイロード）を大きくできる高出力モータが搭載されている。

ドローンはこのような特徴を有しているため、カメラやジンバル（カメラの姿勢制御機器）の搭載が可能となる。

3.3. 必要な機材・装置・価格

空中写真撮影（以降から空撮と表記）を目的としてドローンを現場利用するには、機体本体だけでなく、機体内部や外部の伝送装置、周辺機材の調達と組み立てが必要となる。筆者は30万円を当面の予算として計上し、調達に向けた情報を集めた。現場利用可能なドローンとするために必要な機材を表1にまとめて示す。また図3に、機体と

の操作や通信の際に利用されている内部装置や外部通信機の関係を示す。

ドローン本体や周辺装置など必要な機材を調達する方法は大きく二通りに分かれる。一つ目は機体開発メーカーから代理店を経由して購入する方法。二つ目はカスタムメーカーからセミ・オーダーで購入する方法である。カスタムメーカーは、機体開発メーカーが販売している部品にカメラやジンバル等を組み合わせ独自仕様の機体として販売している。機体の仕様を任意の業務に合わせてオーダーするので、機体の組み立てからフライト用の各種セッティングなど調整済み機体を手取できることがメリットで、購入後すぐに操作が可能である。これらカスタムメーカーは機体の保守、操作トレーニング、調査業務も実施している。ただし、カスタムメーカーが提供する機体はハイスペックなことに加え機体の保守点検費用や賠償責任保険をセット販売されることが多く、結果として費用が高額になる傾向がある。

表2にドローンを提供する企業、代表的な機種および価格を紹介する。現在、市販されているドローンの機体は価格帯が数千円（玩具タイプ）から100万円（ハイエンドタイプ）と機体の仕様によって広い幅がある。練習用の機体としては1万円程度の機体で十分であるが、現場業務に利用できるのは5万円以上の機体が必要となる。現在販売されているドローンのほとんどは、標準的なフライトコントローラーを実装している機体のみで販売されている。これだけではフライトも空撮もできないので、送信機・テレメ

表1 空撮に必要な機材および機材の価格。

| 必要な機材もしくは装置 | 機材の内容 | 主な製品名 | 価格帯 |
|--|--|---|-------------|
| 機体（ドローン本体） | フレーム、モーター、プロペラ、配電盤などの本体 | ※表2を参照 | 3.0～100万円 |
| 送信機（プロポ） | 機体の操作を行う送信装置 | ・Futaba 14SG ・JR XG11 ・Hitec Aurora9 | 5.0～8.0万円 |
| 機体内装置 ・受信機 ・フライトコントローラー、 ・各種センサー ・センサーステーション | 本体に搭載する装置。送信機、GPS、コンパス、高度計、ジャイロなどセンサー情報を受信機が受け、フライトコントローラーが情報を処理しモーター回転を調整することで飛行状態を制御する。またセンサーステーションは上記センサーや充電電圧をテレメトリ情報として送信機に伝送する。センサーステーションは送信機の仕様に合わせて選ぶ。 | ・Hitec Optima7（受信機） ・NAZA-M（フライトコントローラー） ・APM2.6（フライトコントローラー） フライトコントローラーには受信機やGPS、ジャイロセンサーなど各種センサーが付随するのが一般的。 | 2.0～4.0万円 |
| データ取得用 搭載物 ・カメラ ・赤外線センサー ・GPSロガー など | サービスの内容によって搭載する撮影機器などを決める。当社は空中写真と動画を利用するためカメラを必要とした。 | ・GoPro heroシリーズ ・RICOH, SONY, OLYMPUSなどのハイスペックカメラ ・InfReCなどの赤外線カメラ ・PhotoMate887(GPSロガー) | 4.0～8.0万円 |
| 搭載物の姿勢制御機材 ・ジンバルおよびピカペイ ・スキッド | カメラの姿勢制御機材。フライトコントローラーと接続することでモータによる振動や飛行時の傾きを補正しブレのない撮影が可能となる。またジンバルとカメラの大きさから、スキッド(ドローンの脚立部分)を決める | ・ジンバルはZenmuse社もしくはTAROT社製が主流 ・スキッドはドローンメーカーから仕様に合わせて選択 | 0.5～3.0万円 |
| FPV通信セット | リアルタイム映像伝送システム | ・DJI Lightbridge ・モニター | 18-20万円 |
| 自律飛行できるフライトコントローラー | 自律飛行可能なフライトコントローラーにカスタムする。 | ・APM2.6 ・Pixhawk ・WooKong-M(WAYPOINT) | 2.0-20万円 |
| ※予備バッテリー | - | ドローンの指定規格のものを3～5本程度 | 0.8～1.5万円/本 |
| ※充電器 | - | - | 0.5～2.0万円 |
| ※機体収納ケース | - | - | 1.0～3.0万円 |
| ※予備機体 | - | - | 3.0万円～100万円 |

※空撮の機体操縦時には利用しないが揃える必要がある備品

トリ・カメラ・ジンバルなどを機体に合わせ別途調達し組み立てる作業が発生する。これら機材や装置の組み立ては各人の責任において行うのが一般的である。また、調達した部品を各人の仕様に合わせて組み立てるので、装置の連結時仕様や設定方法・機器間の調整においてメーカーサポートは無いのが通例である。

例外として、DJI社のPhantom Visionシリーズは専用送信機やカメラ・ジンバルが標準装備されているものもあり、購入後に簡単な調整をするだけで利用できるように

なっている。

ドローン市場のシェアの大半はDJI社（中国）と3DRobotics社（米国）の2社で占められている。特にDJI社から2014年に発売されたPhantom Vision2+はこれまで専門業者しか扱えないとされていたドローンの壁を取り払い、昨今のブームをつくるきっかけとなった。DJI社のPhantom Vision2+は15万円を切る価格で1200万画素の専用カメラ、ジンバルを装備、さらに各種テレメトリ含めたFPV（First Person View）機能、電圧低下時の自動帰還、

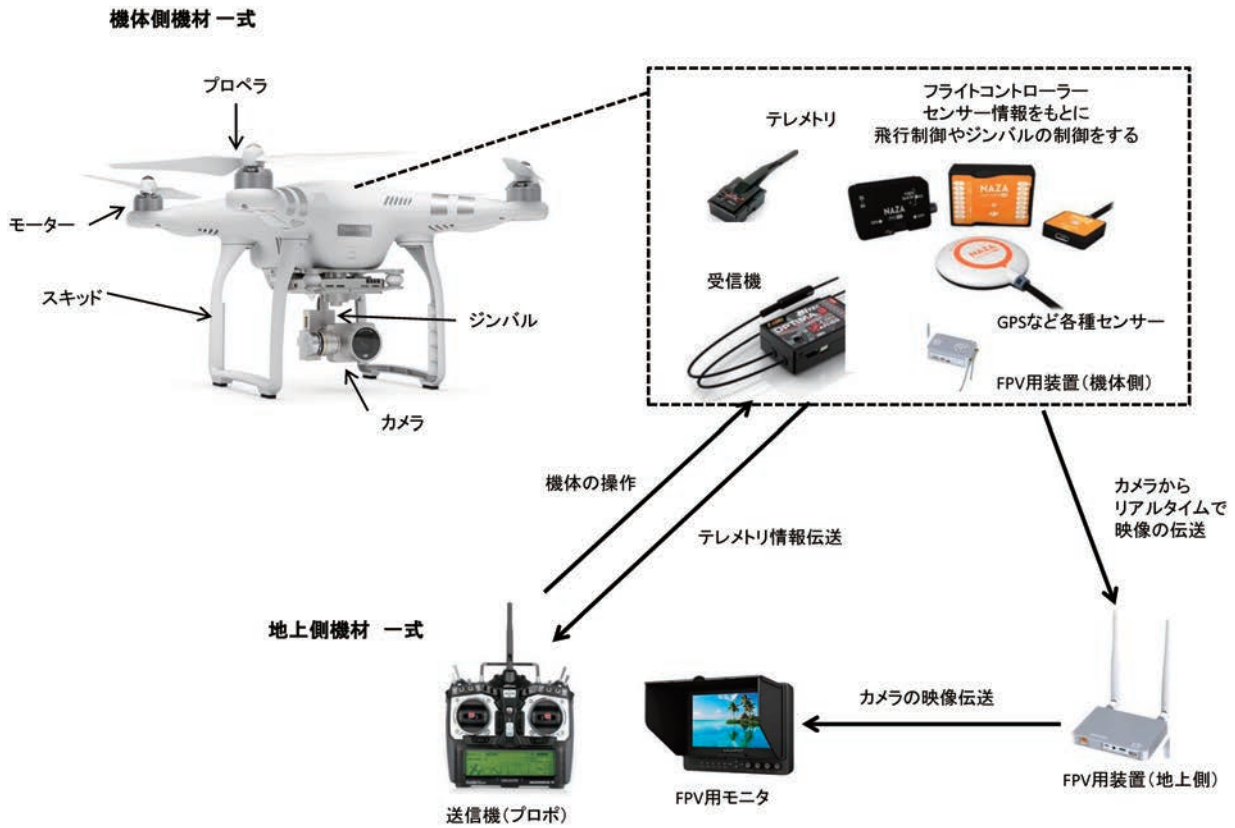


図3 機体側と地上側機材の関係。写真はDJI (2015) および株式会社ハイテックマルチプレックスジャパン (2015) より引用。

表2 ドローン販売店と代表的な機種および仕様の概要。

| 機体販売メーカー | 機種名 | 参考価格 | 機体仕様 | 特徴 |
|--|--|-----------|--|---|
| DJI (中国) 機体開発メーカー 国内代理店経由で購入可能 | DJI Phantom Vision2+ | 15万円 | 専用送信機, カメラ, ジンバル, 自律飛行, 自動帰還機能, FPV機能 バッテリー搭載時重量 1,000g ペイロード不可 | 空撮に必要な機材や機能がほぼ網羅されている。購入後、即座に利用可能。ただし機材のカスタム余地がなく、機材も機体専用で連結されていて拡張性はない。 |
| | DJI Phantom 2 | 9万円 | 専用送信機, 自動帰還機能 バッテリー搭載時重量 1,000g ペイロード300g | カメラ, ジンバル, FPV機能は別途調達しカスタムが必要。 |
| | DJI F550 | 15万円 | 代理店選定の送信機, バッテリー搭載時重量 1,000g ペイロード585g | カメラ, ジンバル, FPV機能は別途調達しカスタムが必要。フレームが大きくモータ出力もあるのでペイロードが大きい。 |
| 3DRobotics (米国) 機体開発メーカー メーカーHP(英語)より予約購入可能 | Solo Quad | 1,300US\$ | 専用送信機, GoPro用ジンバル, 自律飛行, 自動帰還機能, FPV機能 バッテリー搭載時重量 1,500g ペイロード400g程度 | 空撮に必要な機材や機能がほぼ網羅されている。購入後、即座に利用可能。カメラはGoProの購入が別途必要。DJI Phantom2に拡張性を持たせた印象。 |
| OS Engine(日本) 機体開発メーカー メーカー直販 | O.S.SPYDER 850 O.S.LIMITED EDITION II | 20万円 | セット内容がいくつかあるが、20万円程度のもはスペックの高い送信機と、カメラジンバルが付いている | 組み立てを各人で行う必要がある。カメラは別途購入必要。 |
| enRoute (日本) フレーム開発および、 機体カスタムメーカー メーカー直販 | Zionシリーズ | 15~90万円 | 本体および送信機, フライトコントローラーなど, 周辺機器含め仕様をカスタムした組立て調整済み機体が入手できる。 ペイロードは組み合わせ次第で10kg以上にすることも可能。 バッテリー搭載時重量2.0~12kg ペイロード2kg以上~ | 空撮専門業者が採用しているハイエンドタイプの機種がそろそろ。価格帯が高いものはペイロード, 飛行時間も長く設定でき, 自律飛行の機能も業者側で設定してくれる。 |
| サイトテック(日本) フレーム開発および 機体カスタムメーカー メーカー直販 | DOKAHELIIシリーズ | 詳細不明 | 送信機等, 周辺機器は要求仕様に合わせて同社が選定と組み立てを行う | 橋梁や施設の高所点検業務など業務に特化した調整済みの機体が入手できる。ただし高額で保守および破損時の修理費用等, メンテナンスも同社に依頼が必要となる。 |

自律飛行機能を標準装備している。DJI社と3DRobotics社の機体や部品は代理店(大手ラジコン販売店など)を経由して個人でも容易に調達できる。さらに市場シェアも高いため各種機体や部品の価格は廉価に設定されている。

enRouteは国内老舗のカスタムメーカーである。フレーム開発も行っており、サービスに合わせたカスタム注文が可能である。ハイスペックな仕様が要求される空撮専門業者で積極的に採用されている。同社の機体は2014年の御嶽山噴火時、状況監視用に利用されていた。

サイトテックは橋梁施設点検業務に特化した機体を販売する国内カスタムメーカーであるが、調査業務にも対応している。同社は橋梁など施設点検業務に特化したサービスを商用ベースで提供できる国内でも数少ない企業である。

3.4. サービス内容の検討

情報収集を通してドローンの機能や必要機材、調達コストの概要がつかめてきた。梅雨の時期に入り現場調査案件が減少したころ、独自のサービスとして確立可能か検討を開始した。

3.4.1. 地質技師からみたドローンの利点

これまでの現場経験を踏まえ、地質技師の観点から「ドローンがあったら助かる」場面をイメージして提供するサービスを具体化した。想定した利用シーンとその効果について、当時イメージした一例を以下に示す。

- ・高所にある地形、露頭、施設が観察できる(ドローン導入のきっかけ)。
- ・海岸沿いの露頭、施設が観察できる。
- ・調査地の空中写真が手軽に入手できる。
- ・地すべり地形など規模の大きい地形の全体像を写真で把握できる。
- ・赤外線センサーで広範囲の地表地熱状況や土壌水分量が計測できる(かもしれない)。

特に現地調査と並行しながら、欲しいと思った箇所でも空中写真が入手できるメリットは大きいと感じた。立体視による地形判読を現地で行えるし、現場技師の間で作業状況や結果についてより明瞭なイメージを共有できる。また、調査報告書としてまとめる際、強い説得力を持つ調査資料のひとつとなる。

3.4.2. Structure from Motion (SfM) 技術

機体の情報収集をする過程で、動画や静止画から撮影位置を推定し三次元の形状を復元するStructure from Motion (SfM) 技術があることを知った。この技術を実現できるソフトウェアを利用すれば、空中写真からオルソ画像およびDEM(数値標高モデル)(正確にはDSM:数値表層モデル)データの作成が可能となる。このデータに、GCP(Ground Control Point)もしくはローカル測量点を3カ所以上設定することができれば、GIS(地理情報システム)解析ソフトを用いることで容易に高分解能(数10cm~1mの等高線間隔)の地形図が作成できる。調べた結果、SfMソフトとしてはAgiSoftが提供するPhotoScan(価格3,500US\$)が汎用性もあり、機能やユーザビリティ

が優れているようである。また、オープンソースとしてVisualSfM(Wu, 2013; Wu *et al.*, 2011)が配布されていることが分かった。

3.4.3. 提供するサービスの具体化

搭載できるセンサーや機体の操作性、SfM技術などドローンの情報収集を通して提供するサービスを具体化していった。その結果、

- 1) 任意地点の静止画および動画
- 2) 任意地点のオルソ画像および地形図

これら2点を成果品に設定することとした。後述するが、この2点の成果品の間には、作成に要する機体仕様、ソフトウェア、技術要件に大きな違いがある。

次に想定する対象業務として、資源探査(初期ステージ)、地すべり調査、道路防災点検、ストック点検とし、これら業務から想定した調査仕様を検討した。その結果、撮影対象は地形および地上施設、調査範囲の仕様は撮影一カ所につき最大範囲を1km×1km、最大標高を地対高度250mとした。2014年6月頃にはこのような調査仕様の大枠が決まりサービスとしての形が具体化してきた。7月末には調査仕様に合わせて機体を選定し、調達を実施した。また同時期に練習機による操作トレーニングを開始した。

3.4.4. 機体の選定と調達

機体の選定は調査の種類、必要な成果品、撮影の範囲を考慮して行った。想定される業務のほとんどはDJI Phantom Vision+2によって対応可能との判断に至った。同機体は撮影に必要な機能を網羅し、調達費用も予算内に収めることができる。しかしながら、オルソ画像や地形図の作成といったより高度な成果品の作成には、ペイロードがより大きく、機体重量も2.0kg以上のスペックの高い機体、SfMソフトウェア、GISソフトウェアが必要となることが判明し、調達費用も格段に高額になることが分かった。これに加え、スペックの高い機体进行操作するには、機体機能の習熟、通信システムの適切な構築スキルなどより高度な技術を身に付ける必要があることも分かった。またソフトウェアの利用法を習得する期間も必要で、これらを考慮するとサービス提供までに相当期間を要することが明確になった。結果、最初に採用する機体はDJI Phantom Vision2+とした。また撮影仕様を当初予定より限定し、撮影範囲300m×300m、地対高度150m以下とし、成果品は画像補正を行った静止画と動画とした。フライトは原則2名体制で行い、公共施設周辺(送電線、鉄塔、発電所、主要国道、鉄道)やフライト時に常時風速が8m/秒以上ある場合は実施しない方針とした。

筆者が現場の導入までに調達した機材(図4)とそれぞれの価格を表3に示す。全体予算の目安であった30万円からは多少上回ったが、ほぼ予算内に収めることができた。

表4は、資源探査や広域調査といったフィールドにおいて、オルソ画像および地形図作成に対応した業務を実施する際の調達予定機材と概算の見積もりであるが、予算等の都合で見送っている。



図4 調達した機材一式。Phantom 本体、送信機、リポバッテリー、プロペラガード、予備プロペラはすべてケースに収納可能である。

4. 操縦技術の習得方法

静止画や動画を得るにはドローンを飛ばす技術が必要となる。従来のラジコンヘリコプターや飛行機に比べ格段に操作が容易になったとはいえ、最低限の操縦技術がなければ画像の取得はままならない。また、突然の気象変化時、例えば突風によって起こる機体の急激な姿勢変化に対応できなければ機体を喪失する。そしてもっとも憂慮すべきことは、墜落となった場合に施設だけでなく人を傷つけるおそれが十分に起こり得ることである。筆者が導入した Phantom の機体はバッテリーを搭載して1,200g 程度で商業利用のドローンの中では最も軽量の機体のひとつである。しかしながら、数10m から落下して人に直撃すれば死亡事故にもつながる大事故となる。また高速で回転するプロペラに接触すれば重大な裂傷を与える。

ここではドローンの操縦方法について概要を説明したのち、筆者がどのように操作技術を習得していったかその過程を紹介する。

表3 ドローンの現場導入までに調達した機材と価格(参考)。

| | 調達機材 | 内容 | 備考 | 調達先 | 参考価格(税込) |
|------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------|----------|
| 1 | SYMA社製 X5C Explorers | 練習機 × 2 | ¥8,000/機 × 2 | Amazon.com | ¥16,000 |
| 2 | 練習機用リポバッテリー | 練習機の予備バッテリー×3 | ¥900/本 × 3 | Amazon.com | ¥2,700 |
| 3 | DJI Phantom Vision2+ | 現場で利用する機体。標準バッテリー1本で約20分のフライトが可能 | 専用プロポ、カメラ、ジンバル装備 FPV,自動帰還、自律飛行機能実装済み | セキドラジコンセレクト | ¥130,000 |
| 4 | Apple iPhone 6 | 専用アプリでFPV通信,テレメトリ伝送,自律飛行設定を行う | 専用アプリは無料ダウンロード可能 | 現状利用している携帯電話 | 無料ダウンロード |
| 5 | Phantom用予備リポバッテリー | 予備バッテリーとして4本購入 | ¥16,000/本 × 4 | セキドラジコンセレクト | ¥64,000 |
| 6 | 予備プロペラ | プロペラ破損時の予備として常備 | ¥1,900/組 × 4 | セキドラジコンセレクト | ¥7,600 |
| 7 | 予備充電器 | 予備充電器 | 充電には40分/本かかるので予備を持っていた方が充電時間を短縮できる | セキドラジコンセレクト | ¥12,000 |
| 8 | プロペラガード | プロペラ保護 | ¥2,500/組 | Amazon.com | ¥2,500 |
| 9 | アルカリ単三充電電池と充電器 | 送信機用 | ¥5,000/一式 | Amazon.com | ¥5,000 |
| 10 | microSD カード | 撮影データ保存媒体, SanDisc製 32GB | ¥2,000/枚 × 3 | Amazon.com | ¥6,000 |
| 11 | アルミケース | 機体運搬用 | Phantom仕様のケースが販売されている | セキドラジコンセレクト | ¥15,000 |
| 12 | キャリアー | アルミケース運搬用 | 特になし | Amazon.com | ¥5,000 |
| 13 | 双眼鏡 | 機体喪失時の探索用 | 特になし | Amazon.com | ¥5,000 |
| 14 | 距離計 | 機体との位置関係把握用 | ゴルフで利用するスペックがあれば十分 | Amazon.com | ¥15,000 |
| 15 | カーボンキャッチャー | 機体が高所に引っかかった時の回収用竿 | 電線メンテナンスなどに利用されている。長さ5m程度までが利用限界。 | 道楽会.com | ¥13,000 |
| 16 | proDrenalin | 画像の歪補正ソフトウェア | 各種メーカーのレンズ仕様に対応 | C Valley / フラッシュバックジャパン | ¥6,000 |
| 17 | DJI Phantom Vision2+ assistance | 機体ファームウェア設定管理ソフト | Phantom機体専用ソフトウェア | DJI オフィシャルサイト | 無料ダウンロード |
| 18 | DJI RC system assistance | 送信機ファームウェア設定管理ソフト | Phantom送信機専用ソフトウェア | DJI オフィシャルサイト | 無料ダウンロード |
| 19 | DJI Vision | PhantomのFPV, 自動帰還, 自律飛行を管理設定する専用アプリ | iOS, Galaxy端末にのみ対応 | DJI オフィシャルサイト | 無料ダウンロード |
| ※機材はすべてオンライン購入可能 | | | | 合計 | ¥304,800 |

表4 オルソ画像および地形図作成まで対応する場合の調達予定機材と参考価格。

| | 調達機材 | 内容 | 備考 | 調達先 | 参考価格(税込) |
|------------------|--------------------|--------------------------|---|-------------------|------------|
| 1 | DJI Phantom 2 | 練習機 | ¥90,000/機 × 1 | セキドラジコンセレクト | ¥90,000 |
| 2 | 練習機用リポバッテリー | 練習機の予備バッテリー×2 | ¥16,000/本 × 2 | セキドラジコンセレクト | ¥32,000 |
| 3 | Zion QC630 | カスタムメーカーより調整済み機体を購入 | メーカー選定プロポ, ジンバル・スキッド装備 自動帰還, 自律飛行機能実装済み, FPV機能なし | enRoute | ¥500,000 |
| 4 | 撮影用カメラ | GoProHERO4 | | GoProオフィシャルサイト | ¥72,000 |
| 5 | Zion用予備リポバッテリーと充電器 | 予備バッテリーとして4本購入 | ¥16,000/本 × 4 | enRoute | ¥64,000 |
| 6 | 予備プロペラ | プロペラ破損時の予備として常備 | ¥2,000/組 × 4 | セキドラジコンセレクト | ¥8,000 |
| 7 | プロペラガード | プロペラ保護 | ¥2,500/組 | Amazon.com | ¥2,500 |
| 8 | アルカリ単三充電電池と充電器 | 送信機用 | ¥5,000/一式 | Amazon.com | ¥5,000 |
| 9 | microSD カード | 撮影データ保存媒体, SunDisc製 32GB | ¥2,000/枚 × 3 | Amazon.com | ¥6,000 |
| 10 | アルミケース | 機体運搬用 | | Amazon.com | ¥30,000 |
| 11 | キャリアー | アルミケース運搬用 | 特になし | Amazon.com | ¥5,000 |
| 12 | 双眼鏡 | 機体喪失時の探索用 | 特になし | Amazon.com | ¥5,000 |
| 13 | 距離計 | 機体との位置関係把握用 | ゴルフで利用するスペックがあれば十分 | Amazon.com | ¥15,000 |
| 14 | カーボンキャッチャー | 高所に機体が高所に引っかかった時の回収用竿 | 電線メンテナンスなどに利用されている。長さ5m程度までが利用限界。 | 道楽会.com | ¥13,000 |
| 15 | Agisoft PhotoScan | SfMソフトウェア | オルソ画像, DEM作成, レンズ歪補正機能付き | Agisoft オフィシャルサイト | ¥450,000 |
| 16 | QGIS | GISソフトウェア | 地形図およびGISデータセットの作成 | QGIS オフィシャルサイト | オープンソース |
| ※機材はすべてオンライン購入可能 | | | | 合計 | ¥1,297,500 |

4. 1. 基本操作の習得

4. 1. 1. 送信機

ドローンは他のラジコンヘリや飛行機と同様にプロポと呼ばれる送信機の、左右2本のスティックを用いて操縦する。送信機が発する電波の周波数は2.4GHzがほとんどで、機体との間に遮蔽物が無ければ1km以上離れても通信は十分可能である。図5に送信機の左右のスティックの役割と機体の動きを示す。送信機に限らず、各スティックの機能の割り当てにはMODE1とMODE2と呼ばれる二つの設定がある。日本ではMODE1が一般的であり、欧米ではMODE2が一般的である。筆者は海外資源探査案件への適用を検討しているためMODE2を採用している。このため本稿ではMODE2のスティック割当を前提として説明する。

各スティックの機能の割り当ては右手の左右の動きが機体の左右移動、右手の前後の動きが機体の前進とバック、左手の左右の動きが機体の左右回転、左手の前後の動きが加速(と上昇)、減速(と下降)となっている。またそれぞれの操作の呼称は航空機の操縦と同様に、エルロン、エレベーター(昇降舵)、ラダー(方向舵)、スロットルとなっている。

送信機には2本のスティックと電源スイッチ以外にも、さまざまなスイッチやレバーがついている。これらは飛行モード(マニュアル操作、GPSによる姿勢制御、自動帰還、自律飛行)の切り替えやカメラのシャッターの操作スイッチとして設定することが可能である。筆者が利用し

ている機体は専用プロポが付属しており、マニュアルやGPS姿勢制御、自動帰還の切替え操作が容易にできる仕様となっている。

4. 1. 2. 練習機(トイラジコン)の購入

フライトには常に衝突や墜落の危険性がつきまとう。操縦者は送信機を通して自身の操縦技術と機体の飛行性能との間にバランスがとれているかを常に意識することが必要になる。具体的に述べると、どのような操作を行えば機体が制御不能になるか、墜落とはどのようなものか、練習の段階で身をもって知る必要があると筆者は考えている。これらの知見を得ることで、トラブル発生時のノウハウを蓄積することが可能である。これらのノウハウをもとに、実際の現場に対して安全運用できるような対策を講じることが可能になると考えている。とは言うものの、現場導入の機体はカメラなどの装備を含め最低でも15万円程度の資産である。これら機体の損失や喪失によって費用および追加の労力が発生するが、そのインパクトは筆者のような零細企業では決して小さいとは言えない。そこで、現場導入機になるべく近い仕様を有して、かつ1万円程度と比較的安価なトイラジコン(SYMA社のX5C Explorers)を初期の練習機として利用し、操作にある程度慣れたところでPhantomを利用した練習に切り替えた。

X5C Explorersはバッテリーを搭載して重量150g程度と軽量であるが、400万画素のカメラを搭載しており飛行操作に加え撮影練習も可能である。また軽量でパーツ類も

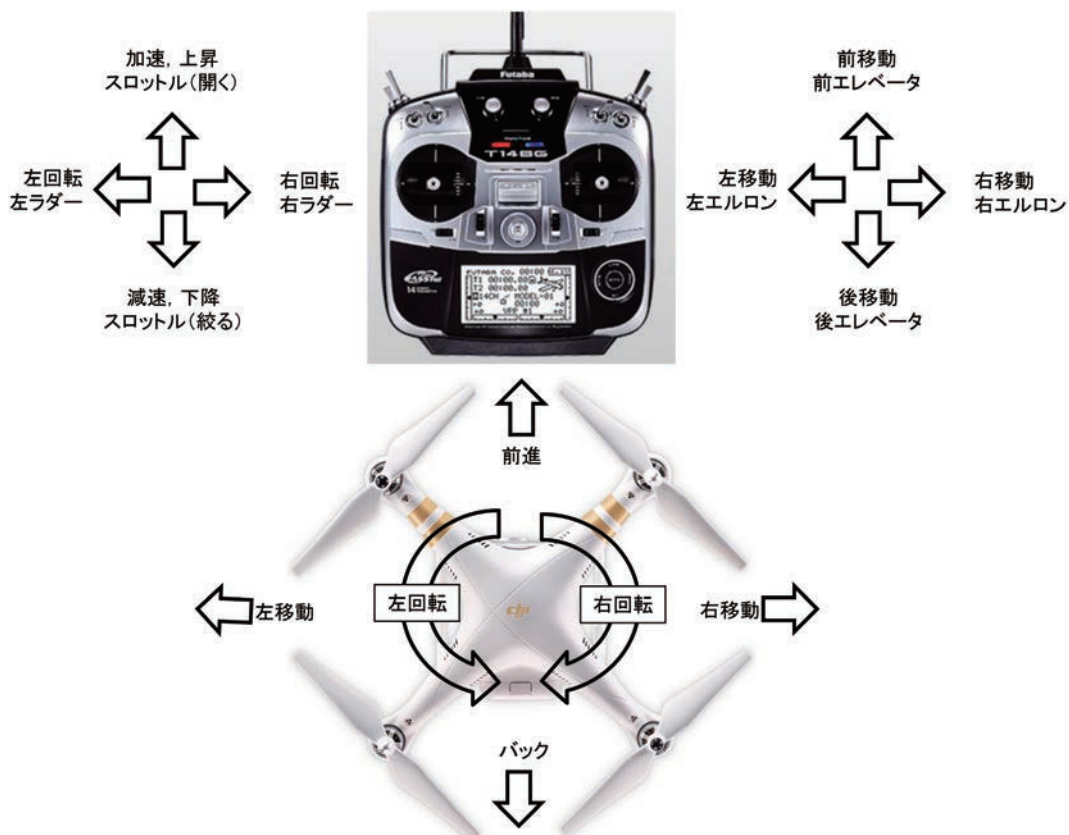


図5 送信機の操作と機体の挙動(MODE2)。写真はDJI(2015)および双葉電子工業株式会社(2015)より引用。

やわらかい素材で作成されているので衝突しても人に危害を加えることはほとんどない。実験的に20m程度から筆者の頭上に落下させてみたが、衝撃は少なく素手でキャッチ可能であった。回転中のプロペラを素手で止めてみたが、擦り傷を負うこともなかった。また数100回の墜落を経験しても機体の損傷はほとんど認められなかった。

トイラジコンにはGPS、気圧高度計、電磁コンパスは装備されていない。そのため操作安定性という面では現場導入するドローンに比較し非常に難易度が高い。練習機を自由に操縦することができれば、現場用のドローンも安定して操縦することが可能となる。

ただし、操作性の面ではトイラジコンが難しいといっても、現場に導入する機体は大きさ、モータ出力がトイラジコンと大きく異なる。現場導入機を実際に飛ばしたときに感じる圧力（迫力）には驚くものがあるだろう。前述したように、筆者は試験運用の前段階においてPhantomを利用した練習へ切り替えた。

4. 1. 3. 飛行場所の確保と基本操作のトレーニング

ドローンの基本操作を習得するためのトレーニング方法を紹介する。本稿は文章での説明となるが、販売メーカー、空撮専門業者や個人のインターネットサイトでは丁寧な解説つきで操縦方法を説明した動画が配信されていることも多いので参考にするとよい。

(1) 飛行場所

最初のトレーニングは練習機を利用し、体育館、オフィス、自宅など室内で行う。練習場の広さにこだわる必要はない。後述する基本の操作方法を習得したのち、室内から野外の練習に切り替えた方がよい。次に野外における最初のトレーニングは風速5m以下、運動場や河川敷など十分に広くかつ人のいない場所、周辺200m以内に鉄道・国道・工事現場、電線、鉄塔がないところを選ぶ。

(2) 基本操作とトレーニング方法

a. 離陸準備

離陸は機体を草や石の少ない水平な場所に置くようにする。もしくは、第三者にスキッド部分をハンドキャッチしてもらいながら行う。これは傾きのある斜面では離陸時にスキッド部分がひっかかり姿勢を崩して転倒するためである。離陸の失敗は人への影響は少なく、機体への衝撃も少ないが、プロペラは容易に損傷するしジンバルにも影響を及ぼす。

b. 離陸・上昇・下降・着陸

最も基本的な操作である。はじめての操作ではスロットル操作のみを行い、離陸→上昇→下降→着陸を繰り返す。スロットルの感触と上昇、下降の感覚を覚える。操縦者からみて、練習機であれば2m程度、現場用機体であれば5m程度離れたところで練習する。このとき、機体の機首は操縦者の進行方向と同じ向きに置く。スロットルを少しずつ開き、プロペラの回転をあげていく。スキッドが地面から離れた瞬間、スロットルを大きく開け

て2～3m程度上昇させる。スロットルを開ける理由は、離陸の瞬間にはスキッドと地面の摩擦が起きていることに加え、地面近くではプロペラの回転による乱気流が生じており機体の姿勢が不安定になりやすいためである。着陸はスロットルを少しずつ絞りプロペラの回転を下げながら高度を落としていく。このとき地面に近づくほど乱気流が生じやすくなり、機体が不安定になる。姿勢が不安定になった場合にはスロットルを少し開け機体を少し上にあげて姿勢を安定させる。このように、スロットルの絞りと開放を交互に調整しながら地面に着地させる。スキッドが地面に接地したらただちにスロットルを絞りきりプロペラの回転を止める。このとき接地面に傾斜があったり、障害物があったり、ラダー操作をしてしまうなど間違った操作をした場合、途端に姿勢が不安定になり機体は転倒する。

c. ホバリング（空中静止）

離着陸の操作でスロットルの感覚を覚えたのち、機体を空中に静止させるホバリング操作の練習を行う。ホバリングは静止画および動画を撮影する上でもっとも重要な操作である。まず機体を離陸させ、高度を3m程度とし同じ場所・高度に機体を留める練習を行う。離陸後、最初の数秒は機体内部のジャイロセンサーにより高度と位置を維持するが、機体は徐々に左方向に流れ始める。左方向に流れ始めたら、エルロンを少し右にきり元の位置に戻す。このときエルロンを右に強くきってしまうと、機体は右方向に流れ始め、高度は下がり始める。さらに、機体を安定させるために今度はエルロンを左にきりつつ、スロットルを上げる。これもエルロンをきりすぎた場合、機体は前進しながら左に流れ、高度を上げる。さらに元の位置に戻すため、今度はスロットルを絞りながら、エルロンを右にきりつつエレベーターでバックさせる。このように、スロットル・エルロン・エレベーターを同時に操作しながら機体のバランスを取り続ける。この練習によりエルロンとエレベーター操作の感覚を覚える。筆者は10分程度ホバリングを維持できるようになるまで練習した。

ホバリング操作はトイラジコンの方が習得するのに向いている。現場導入の機体にはジャイロやGPSのほか、高度計、電磁コンパスが装備され、無風であればたとえマニュアル操作でも手放しである程度ホバリングする機能を有している。このため、現場導入機を練習機として用いる場合、ホバリング操作の重要性を知るの難しい。ただし、現場導入機がホバリング機能を有しているとはいえ、気象条件の急変による強風などに耐えるものでない。現場で利用する際、地上ではそよ風程度であっても上空50mでは風速10m/秒を超えるような強風が吹いていることは珍しくない。筆者の経験であるが、山間部の現場で谷底から上空50m地点にでた途端に稜線からの吹きおろしがあり、機体があっという間に100m以上流され機体を喪失しそうになった。このときは流された機体を目視で捉え、ホバリングさせることで落ち着く時間をつくり、上空の状況を判断したうえで

操作を続行し無事着陸させることができた。現場導入機に完全マニュアルモード (GPS 姿勢制御も OFF にできる) があれば、その機能を利用して練習を行うことを勧める。

d. 機首の回転 (ラダー操作)

ホバリングができるようになったら、ラダー操作の習得に移る。ラダーを左右にきることによって、機首を左右にふりながら、機体を水平回転させる感覚を覚える。まずホバリング状態にしたうえで、ラダー操作で機体の機首を左右に振り続ける。慣れてきたら、左右どちらでも回転させつづけることが出来るようになるまで練習する。これにより任意の感覚で機首の向きを変える感覚がつかめる。ラダー操作の感覚を覚える重要性は、機首が意図に合わず変わってしまった場合に実感することができる。機首が操縦者と同じ進行方向を向いている場合、MODE2では右スティックの前進・バック (エレベーター)、左右 (エルロン) の進行方向がスティック操作と一致し非常に感覚的にわかりやすい。しかし、機首が操縦者と異なる向きになった場合、操縦は格段に難しくなり、慣れていない場合ホバリングはおろかあらぬ方向に機体を進めてしまう。このような状況を防ぐためにも、ラダー操作の感覚を覚え任意の位置に機首を持っていけるようにすることでより安定した操縦ができるようになる。

e. 水平移動 (エルロン操作)

離着陸、ホバリング、機首の回転操作を覚えたのちエルロン操作の練習を行い、水平移動の感覚を覚える。まずホバリング状態において、ラダー操作で機首と自分の進行方向を揃える。その状態でエルロンを右にきれば機体は右に、左にきれば機体は左に移動する。最初は高度 3m 程度の高度を維持し、左右 5m 範囲で自由に移動できるようになるまで練習する。このとき、左から右へとエルロンを切り替えるとき、ブレーキがかかることや、エルロンの切り替えによって機首が少しずつその向きを

変えていくことがわかる。機種が回転したら、ラダーをきり機首を前方に整えながらエルロンで機体を移動させる。機体の高度を変えることなく、同一直線状に乗せるように水平移動できるまで練習する。慣れてきたら高度や移動幅を順次大きくしていく。

f. 前進およびバック (エレベーター操作)

水平移動の操作を習得したあとは、エレベーター操作による前進とバックの練習を行う。エルロン操作と同様であるが、ホバリング状態から、ラダーで機首と自分の進行方向を揃える。その状態でエレベーターのスティックを前に倒せば前進し、後ろに倒せばバックする。こちらも最初は高度 3m 程度を維持して、前後 5m 範囲内で同一直前上に乗せるように移動できるまで練習し、順次高度と前後の移動幅を大きくしていく。

4. 2. 野外トレーニングに向けた応用操作

基本操作を困難なくこなせるようになってから、室内で応用操作の練習に移る。まず、機首と操縦者の進行方向を同じにする。機種の種類は変えずに四角形および円を描くように機体を移動させる (図 6)。描く図形の大きさは 2m 程度からはじめ、徐々に大きくし半径 5m 程度の円を描けるまで練習する。この操作ができるようになったら、次は機体の進行方向ごとに、機首を回転させながら四角形と円を描く練習を行う。ラダーによって常に機首の位置を進行方向に同調させる必要があるため円を描くのが格段に難しくなる。ラダースティックから手を離さず、常に微調整しながらエルロンとエレベーターを同時に操作する感覚を養う。ラダーの操作に若干のブレがあれば機首が異なる方向を向き、機体の上下運動が加わるため、描こうとする図形がすぐにいびつになる。ここまでできたら、最後に対面飛行させながら四角形と円を描く練習をおこなう。

これら基本操作と応用操作を習得するため、最初はトイラジコンを練習機として使い、室内で練習するのがよい。室内で基本操作と応用操作ができるようになった後、野外での練習に切り替える。野外での練習も最初はトイラジコ



図 6 練習機を利用したホバリングの練習風景 (左) および Phantom と練習機 (右)。向かって左が DJI Phantom Vision2+, 右が練習機である SYMA X50C Explorers。

ンを用いて応用操作の練習を行った方が安全確保の面からもよいと思う。筆者はトイラジコンでの練習で操作範囲を広げ、範囲30m×30m、地対高度30m程度まで任意の操縦が可能になった時点で現場導入機（筆者は Phantom）の練習に切り替えた。

現場導入機での練習は、野外において基本操作の練習からはじめた。トイラジコンによる機体操作ができていれば難なく操作できる。フライト時のモータ出力の大きさなど迫力を段違いに感じると思うが、操作性は練習機より格段によい。そのためすぐに応用操作の練習に移ることになる。応用操作は範囲10m×10m、高さ3mくらいから開始して、順次操作範囲を拡大していく。試験運用前には80m×80m、高さ30mの範囲において任意の操作が可能になるまで練習した。ここまで到達するのに筆者はおおよそ2ヵ月程度を要した。練習頻度は週3～5回、1回の練習につきフライト時間は最大1時間程度であった。

5. 試験運用

Phantom を利用した応用操作の練習は主に公営グラウンドもしくは広さのある公園で実施した。応用操作を範囲50m×50m、高さ30m程度までできるようになった頃に撮影練習をメニューに加えた（図7）。同時期に、Phantom の機能のひとつである FPV、自動帰還、自律飛行の機能テストを開始した。これら撮影練習と機能テストを5回ほど繰り返して操作を覚えたのち、試験運用として現場周辺において任意の地形や施設を設定し、空撮を想定したフラ

イトを開始した。この試験運用に至るまで、墜落により練習機（X5C Explorers）を2機喪失した。練習機の衝突や墜落は特に衝撃がないことは述べたが、これにより気象変化に対応可能な操作スキルの度合いや、人家および施設がない場所を選定する重要性を実感することができた。Phantom を利用した練習では、数回の離着陸時の転倒はあったものの衝突や墜落といった機体を喪失する事態を経験するには至っていない。しかしながら、試験運用の段階では、ヒヤリハットがいくつか発生した。これらヒヤリハットの内容を含め試験運用までに実施した手順を紹介する。

また、試験運用で撮影した静止画と動画に画像補正等の編集を加えて成果品サンプルを作成した。2014年10月末には、これら成果品サンプルを見込み顧客へプレゼンテーションし、サービス提供に向けた営業活動を開始した。

5. 1. Phantom を利用した撮影練習、自動帰還および自律飛行機能のテスト

5. 1. 1. 撮影練習

応用操作を習得し、ある程度の範囲で任意に機体を操作できるようになった段階で、地形や施設など業務を想定した対象物を撮影する練習を開始した。練習開始早々、地上でカメラを構えて撮影するのは視点が全く違うことが分かった。飛行制御機能やカメラ・ジンバルによるブレのない画像を取得するのは容易であるが、対象物を的確にとらえた撮影はトレーニングを積む必要がある。

最初に垂直撮影のトレーニングを行う。FPV 機能を使えば容易であるが、トレーニングを兼ねているので利用



図7 Phantom から撮影した対面飛行練習中の筆者（破線枠内）。水平距離80m、地対高度50m。

しない。離陸前にカメラのチルト角を 90°にし真下に構える。カメラもしくは動画撮影機能を起動させた後離陸し、操縦者自身を中心に据えて上空をホバリングさせる。まずは自分を中心に 10m 四方くらいの範囲が撮影できる位置を見定めて 10 秒程度ホバリングさせる。10m ずつ高度を上げながらホバリングさせ、それぞれの高度で撮影できる範囲が広がること確認する。最後に自身を中心にすえながら 100 ~ 150m 四方の範囲まで撮影できるまで練習する。この範囲は 200m トラックが設置されているグラウンド全体をおおよそカバーできる広さである。

この練習により、撮影対象物の全体像をとらえたいときにどれくらいの位置（高さ）に機体をホバリングさせる必要があるか感覚的につかむことが可能になる。ちなみに先の 150m 四方の直下画像を撮影するためには、Phantom のカメラレンズの仕様では地対高度 100m 程度の高度が必要になる。カメラレンズの仕様はわかっているので、現場業務に対応する時は事前に対象物の範囲（大きさ）を調べておいて、どの位置に機体を持っていけば全体像が撮影できるが見当をつけておくとよい。

次に斜め撮影のトレーニングを行う。地すべり地形や斜面对策工、断崖露頭の撮影では、最初に俯瞰で全体を撮影する。全体状況を把握してから、気になる箇所に近づき近距離撮影を行うことになるだろう。斜め撮影は操縦者から水平距離が 10m 程度の近距離であれば、たとえ垂直距離が高くてもある程度容易に撮影することが可能である。しかしながら、水平距離が 50m 以上はなれると格段に難易度が増すので注意が必要である。練習はまずカメラのチルト角 45°で行う。最初は公園などに設置されている時計台や銅像を対象物に見立てて実施した。はじめに操縦者と対象物の距離を 10m 程度とした。撮影は離陸直後から開始して、対象物の全体を撮影しながら順次機体を接近させ（2m 程度）まで近づけ、そこから対象を任意の角度から撮影する練習を行った。次に機体と対象物との距離を 5m 程度にして、そこから対象物の周囲を旋回しながら撮影しつづける練習を行った。操縦者と対象物との距離を 50m 程度離して上記操作が可能になるまで練習を行った。

これらの撮影操作が可能になったのち、実際の断崖や斜面地形を撮影対象物として試験運用を開始した。

5.1.2. FPV 機能の確認と自動帰還および自律飛行機能のテスト

筆者が利用している Phantom Vision2+ は FPV、自動帰還（ゴーホーム、フェイルセーフ）、自律飛行（グラウンドステーション）機能が標準装備されている。特に自律飛行機能の信頼性が確保できれば広範囲な空中写真を撮影できるメリットがある。これら機能の確認含めテストを実施した。

(1) FPV (First Person View) 機能

リアルタイム映像伝送装置を利用した機能である。機体と操縦者のモニター端末を接続して、モニターから操縦者の視点で操作できるので遠距離にある機体の操作が容易になる。特に地形や施設の撮影で対象物に近づく必要があるときに効果を発揮する。機体が遠隔地にあると距離感がつかみにくく衝突するおそれがあるが、FPV を利用することでその危険性を大きく減じることができる。Phantom では付属の FPV 伝送装置を介して iOS もしくは Android の OS 対応した端末と接続することが可能で、容易に FPV 機能を利用できる（図 8）。

(2) 自動帰還機能

送信機と機体との通信が途切れた時や機体のバッテリー電圧が低下しバッテリー切れが近づいた場合に自動的に操縦者のところまで戻ってくる機能である。テストは衛星の受信状態がよいところで行い、動作に問題なく利用できた。ただし、GPS 機能を利用しているため山間部などで衛星受信状態の悪いところでは逆に機体喪失の危険性が高まる。このため、筆者は基本的には利用していない。

(3) 自律飛行機能

地図上に任意に設定したポイントを機体にプログラミングし自動操縦を行う機能である（図 9）。経由ポイント、地対高度、進行速度を機体内部のフライトコントローラーにプログラミングすることで容易に自動操縦が可能となる。ただし、こちらも GPS 機能を利用しているため、衛星受信の悪いところでは利用が難しい。山間部など衛星受信状態が悪い現場で利用する際は、離陸直後から稜線を越える



図 8 iPhone6 を端末に利用した FPV システム（左：送信機，iPhone，FPV 伝送装置）およびモニター（右）。



画像の一部はGIGAZINのブログサイトから引用
<http://gigazine.net/news/20140715-phantom-2-movie-shooting/>

図9 自律飛行機能と自動帰還機能のテスト風景。(左) 写真枠内は送信機を手放した状態の筆者。機体カメラから撮影。(右) 自律飛行の設定画面。右下の画像はGigazine (2014) より引用。

ような高い位置に機体を据え、受信状態を良好にしたうえで利用する必要がある。良好な衛星受信状態で試験を実施した結果、広さ500m×300m、地対高度50mの範囲において走査線を描くフライトが可能であった。

5.2. 現場での試験運用

撮影練習や各種機能のテストを実施しながら、2014年9月下旬より現場での試験運用を開始した。試験運用当時、東北地方での地すべり調査の野外踏査に対応していたため、試験用の撮影対象地を同調査地域一帯の山間部とした。試験運用は現場導入に向けた仕様で行った。

試験運用では先般述べた仕様範囲において、ある程度の天候にも左右されずに静止画と動画を撮影できるようになるまで、場所や対象物を変えながら繰り返し行った。天候は晴天・無風時だけでなく、小雨もしくはやや強風(離陸時8m/秒程度)の状態でも試験した。最終的には操縦者から水平距離で300m、地対高度200mの間で任意の地形や施設を撮影できるようになるまで行った(図10)。

5.3. ヒヤリハット

操作のトレーニングから試験運用に至るまで第三者に重大な過失を与えるような事故を起こすことはなかったが、練習機の墜落や喪失、Phantomの転倒、強風による機体の突然の姿勢不安定化など複数のヒヤリハットがあったので報告する。

(1) 強風にあおられ崖上の樹木に引っかかる

これまでに、練習機を2機喪失した。ひとつはやや強風下(風速8m/秒以下)の谷沿いで野外トレーニングしていた時である。風の強い状態で機体の姿勢を制御できず、崖上の樹木の最も高い場所に機体がひっかかり回収不能になっ

た。

風が強い時の撮影では、ホバリング時に風の向きと同じ方向に機体を進めるような操作を行う必要がある。開けた地形や平地に比べ谷筋の斜面では斜面上部から吹きおろしてくる風や、谷筋下流側から吹上げてくる風があり、それらが頻繁に切り替わるのが通常である。このため、機体は機首に対して前後左右だけでなく上下方向からも常に力を受けることになる。機体を喪失したときは、まず谷筋下流からきた吹上げる風により機体が10m程度上方にもっていかれた。その直後、谷筋斜面を這う吹きおろしの風を受け機体の姿勢が不安定になりながら流された。斜面にぶつかりそうになったため、あわてて斜面から距離をとる操作をとった。このとき、機首が回転し対面飛行の状態になっていたことに気付かず、姿勢制御のコントロールを取って



図10 試験運用時の静止画。正面に見える火山灰層の露頭を対象として撮影。操縦者からの距離は水平距離300m、地対高度はおおよそ100m。

しまった。結果として斜面に向けて機体を移動させてしまった。機体はあっという間に斜面上方の樹木密集地帯に突入してしまった。時間にして3～5秒程度と一瞬の出来事であった。フライトは機体の機首と操縦者の向きを同一にすることが多いと思う。対面飛行に慣れていないと、機首の方向が変化したときに対応できないと実感させられた。この一件では姿勢が不安定になった場合、まず舵をきらずに機体を上昇させ機体の操作空間を確保すること、風が強い時は少なくとも撮影対象物から10m以上の距離を取ること、機首が不明確にならないよう機体に旗を付けるなどの対策が必要であることがわかった。また言うまでもなく、風の強い時はフライトしないというが一番であることがわかった。地上で8m/秒(背の高い樹木が揺れ、森の中がざわざわと音を立て落葉が発生している)くらいの風があるとき、上空は10m/秒を越えた風が吹いていると思われる。

(2) 操縦ミスで谷底に墜落

練習機喪失の2件目も風の強い時である。深い谷をはさんで対岸の斜面を撮影する練習をしていた。姿勢制御の練習のため、あえて風の強い時を選んだ。ホバリングも順調であったので撮影対象物に近づこうとエレベーターを少し強めに切り谷を横断しようとしたところ、谷筋にそって上流から吹き降ろす風が吹いていたようで、機体が風に押し付けられるように傾いた。傾いた機体の姿勢を戻そうと、エルロンを風向きと逆の方向にきったところ、舵を急に切りすぎたようで機体が風と同じ方向に急角度(40°程度と記憶している)に傾き、急激に失速、スロットルを全開させ上昇させようとするも、機体はさらに傾き勢をつけてそのまま谷底に墜落していった。これも風の強い時はフライトしないというのが一番であることを示しているのだが、山間部における地形の変換点では気流が非常に乱れていることがわかった。このため谷を横断する際は離陸したのち、谷筋の風の影響が少ないところまで一旦高度をとり、その高度を保ったまま緩やかなスピードで横断、撮影対象付近まで移動させてから徐々に高度を下げるなどの対策を取った方がよい。

(3) Phantom の転倒

水平面として積雪箇所から Phantom を離陸させようとしたが、姿勢が不安定になり制御できず転倒した。プロペラ2枚を破損した。スキッドが機体の自重によって少しでも積雪部分に埋まる場所では離着陸させない方がよい。水平面が確保できない場合はハンドキャッチで離着陸を行う。積雪箇所は踏み固めておけば問題なかったのだが、水平であれば問題ないだろうという安易な気持ちで操作を開始してしまった。離着陸時、接地面がスキッドの底面であればある程度のブレがあっても機体を制御しうるが、スキッドが少しでも埋まってしまうと左右上下、いずれの方向にも力が不安定に加わるため制御しきれなくなる。

(4) 曇天時、上空150mで機体が生かされる(Phantom 利用時)

山間部、曇天で無風の条件のもと、上空150mまで機体を上昇させ目視可能範囲の限界を試験していたところ、突然機体が機首を回転させながら流されていった。その速さは尋常ではなく、ものの数秒で水平距離にして操縦者から200mほど離れた。このときは機首が回転しているのが分かったので、機首を操縦者の進行方向と同じ向きにすぐさま戻した。また流された方向が機首と同じ向きであったので、エレベーター操作でバックさせることでホバリング状態を確保することができ、機体を喪失せずに済んだ。離陸地点と上空では風の向きや強さがまったく異なる。経験上、地形の変換点に加え、上空50～70mを越えたところでは特に変化が激しいようなので注意が必要である。

前述のように山間部の気流は不安定である。地対高度の高い位置で撮影する場合、まず離陸地点から水平距離を離さず目的の高さまで機体を上げ、そのあとに対象物に近づけた方がよい。さらに、Phantom は機体が白色なので曇天時には背景に溶け込みいったん視界からロストすると捕捉するのが困難である。視界からロストしてしまった場合、FPV が威力を発揮するのが通常だが、風の強い箇所や気流が不安定な場所では機体の姿勢は逐次不安定になるため、FPV 機能が逆効果になることがある。風の強い場所でフライトを実施する必要があった場合、FPV や自律飛行機能を利用したフライトは控え、常に機体を目視捕捉できるフライト範囲で実施する必要がある。

(5) 原因のはっきりしない制御不安定

Phantom の試験運用中、斜面上部から谷底の撮影をしようとして操縦者より地対高度の低い位置に機体を移動させたところ、急に失速、機首が回転しはじめ墜落しそうになった。風も弱く、谷からの突風も少なかった。おそらくGPSの受信状態が急激に悪化したため、フライトコントローラーによる姿勢制御に支障をきたしたと思われる。このときはすぐにマニュアルモードに切り替え、スロットルを目いっぱい開放し機体を上昇させることで墜落を逃れることができた。GPSの感度は山間部では特に不安定であるが、操縦者より高い位置では同様の障害はいまのところ発生していない。機体の仕様にも原因があるかもしれないが、離陸箇所より標高の低い場所でのフライトには特に注意が必要である。

6. 現場業務への導入と今後の業務の展開

ドローンに関するいずれの作業も他の業務と並行しながら実施しているため、まったく手つかずの時期もあった。しかしながら試験運用を経て、2014年12月には地すべり調査の現場にドローンを導入することができた。地すべり地形および調査地域における広域の地形状況をとらえた静止画・動画がドローンを利用した最初の成果品となった。その後、斜面施設の点検業務等へ導入した。2015年現在、筆者が請負う案件に対してはいずれもドローンを導入して

いる。

6. 1. 安全を確保した操縦

ドローンを利用した調査に必要な体制、事前準備、フライト、フライト後のメンテナンスなど調査の手順に沿って作業内容を紹介しながら、調査を安全に運用するために行う対策や準備について説明する。

6. 1. 1. 必要な体制

原則として操作オペレータ1名、オペレータ補助1名の2名体制とする。オペレータは目視によるフライトを行い、機体から目を離さず離陸から着陸まで操作する。オペレータ補助は離着陸時のハンドキャッチを行い、機体が離陸した後は機体のテレメトリ情報を逐次オペレータに報告する。主な報告内容はバッテリー電圧、機体の高度および操縦者からの水平距離、機首方位である。また、カメラのチルト角の操作を行い、地形や対象施設が撮影できているか確認し、できていない場合はオペレータにフライト位置の微調整を指示する。オペレータ補助は非常に重要な役割をもつ。

6. 1. 2. 事前準備

調査地域の住宅・道路の種類や位置、鉄塔・送電線や軌道、飛行制限地域に係っていないか把握しておく。筆者が扱っている業務は山間部の調査が多いため、人家や通行量の多い箇所が近くにあることは少ないが、一方で大規模送電線や鉄塔、水力発電施設などがあるためこれらの施設の周辺ではフライトを控えている。

調査前日もしくは調査直前に機体の調整作業を行う。作業は機体のコンパスキャリブレーション、バッテリーの充電と充電電圧の確認、モータ固定金具の増締め、カメラ・ジンバル位置の確認、機体と送信機の通信確認、スティック操作の感度調整およびキャリブレーションを行う。

この中でも特にコンパスキャリブレーションについてはフライト直前にも実施するのがよい。

フライトプランを作り、関係各所への周知を行う。特に道路防災点検で利用する際には道路沿いから離陸させることが多く、墜落の際には車両への衝突などの事故が起きることが考えられる。斜面および施設も道路に面した箇所である。顧客や土地管理者へ事前にフライトプランを示し、フライト可能箇所なのか最終確認を行う。

天候の確認を行う。フライトの数日前から気象情報を確認しておく。雨天、強風、降雪が予想される場合はフライトを実施しない方向で予定を組む。

第三者賠償責任保険に加入する。当社は地質調査業者として事業者名義で東京海上日動の保険に加入している。年間保険料は2万円程度で保障は最大1億円となっている。当社は地質調査業の範囲内でドローン利用についても保険が適用可能であると保険会社から説明を受けている。ただし、2015年のはじめには保険各社からドローンに特化した保険が販売され始めた。このため従来の保険内容で保障されるのか再度確認する必要がある。

6. 1. 3. フライト

プロペラの取り付け等、部品チェックを兼ねるため機体の組み立ては現地で行うのがよい。プロペラに破損やヒビ・ゆがみがないか指先で触って確認する。また、プロペラおよびモータ周辺の固定金具の増締めを行い、ゆるみがないことを確認する。組み立てが終了したのち電源を入れ起動する。起動後、最初にコンパスキャリブレーションを行う。キャリブレーションのあともフライト前の準備として電源を入れたまま3分程度放置する。この際、カメラの調子、ジンバルの姿勢、GPSの感度やバッテリー電圧に異常が起きないことを確認する。理由は不明だが筆者の経験上、起動後にGPS感度が安定しない場合がよくある。これらに不具合がないことを確認して機体を離陸位置にもっていく。ここで離陸前にカメラの動画撮影もしくはインターバル撮影を開始する。離陸後にオペレータ補助の任意のタイミングで操作可能だが、忘れることが多いためである。フライト時間の長さにもよるが、最大20分程度であれば記憶媒体の容量が16GBもあれば十分足りる。

これらの事前作業が終了したのちにフライトとなる。離陸準備ができたなら、オペレータは機体を目視しながらの操縦に集中する。オペレータは機体から目を離すことなく、離陸・上昇・下降・ホバリングなど操作の変換点があるときは声掛けを逐次行う。オペレータ補助はテレメトリ情報をみながら、逐次内容の把握とオペレータへの声掛けを行う。また、もうひとつ重要な事項としてオペレータの周囲状況にも注意が必要である。オペレータは操作に集中するあまり、予期せず道路にはみ出してしまふ、側溝に落ちてしまふなど常に身の危険がつきまとうためである。またオペレータ補助はこれらの作業を行いながら、カメラのチルト角を操作し地形や対象施設が撮影できているか確認し、できていない場合はオペレータにフライト位置の微調整を指示する。

フライト時間はバッテリー電圧を注意しながら行い、バッテリー電圧30%を切る前にフライトを終了させるようにする。バッテリー電圧は操作やペイロードによって消費時間が大きく異なるが、操作ではスロットルの開放(上昇)操作に大きく電力を使う。このため操縦者から対象物までの直線距離だけでなく、地対高度の高いところと低いところの対象物でフライト時間が異なることを忘れないようにする。

6. 1. 4. フライト後

無事着陸できたら、撮影を終了する。機種によっては撮影終了時のコマンドを入力せず直接電源を切った場合、撮影データがクラッシュする場合があるので注意する。撮影終了を確認したところで送信機の電源を切り、機体の電源を切る。もし連続したフライトを実施する場合は、バッテリーを交換し、バッテリー電圧を確認したうえで次のフライトを実施する。すべての電源を切ったのち、記録媒体を取り出して現場で画像を確認する。もし撮影位置などが不適切で目的の画像が取得できていないときは再フライトする。バッテリーを交換しながらであれば、1日で数時間のフライトが可能であるが、経験上フライトは30分/回程度

を目安として休息を入れたほうがよい。地形的に開けた場所でも人もいない場所など、フライト内容が平易な場合は問題ないが、山間部のフライトは集中力を大きく消費する。オペレータの集中力が下がり操作に支障をきたすおそれがあるので、十分な休息をはさみフライトを実施した方がよい。機体についてはバッテリー交換作業を含め50分程度の連続フライトをしても、プロペラや固定金具の緩み、モータの過加熱などの問題は生じないようである。

適切な画像が撮影できたことを確認したのち、撤収作業に入る。連続フライトした後はプロペラがきつくしまっていることが多いので、取り外し時の破損に注意する。また気圧や温度変化で機体に結露が生じていることも多い。内部装置は過電流に非常に弱いので、小雨や湿度の高い状態でフライトしたときは電源を素早く切り、バッテリーを外す。その後、よく乾いた布でバッテリー、機体、カメラ、ジンバルを拭く。特にリポバッテリーは水にぬれると発熱し、最悪発火するおそれがあるので十分注意する。また、すぐに収納ケースに格納せず時間をおいて乾かす。

6.2. 現場調査への導入例

現場調査の導入例として、2015年1月に実施した斜面防災施設点検について報告する。具体的な調査案件名や調査地、撮影を行った背景の説明については諸々の事由により明記しない。紹介する事例では、撮影ポジションや画質の調整に改善の余地を大きく残すものとなっている。先般述べたように、ドローンを利用した業務は実務に導入しながら撮影技術や操作ノウハウを蓄積している状況である。

斜面防災施設の中には山腹斜面の全体を覆うような大規模なものがある。通常これらは数年にわたり複数回の施工を重ね、施工年ごとに仕様が異なっているのがほとんどである。紹介する案件事例は、数十年前に山腹斜面全体に施工されたアンカー付のり枠工の点検作業である。道路沿いから150mの高さ、幅300mの範囲で山腹斜面全体に対策工が設置されている。対策工はコンクリートシールされているアンカーやロックボルトなど、施工年度の違いにより様々な仕様で施工されている。直接目視点検を行う前にド

ローンを利用し、全体ののり枠の配置と規格、アンカーやロックボルトの種類・本数の計測、対策工の脱落・破損の有無、顕著な漏水の有無、植生の有無などの判定を行った（図11）。

今回の斜面对策工の規模からは、カメラのチルト角45°、地対高度180m、斜面からの水平距離が200mあれば、対策工全体を静止画1シーンで納めることが可能である。ただし、水平距離200m地点の周辺直下は交通量の多い道路であったため、1シーンの撮影をあきらめた。このため、斜面からの距離を50m、カメラのチルト角を0°の正面撮影とし、施設の下端付近から高さ30m刻みで高度を段階的に上昇させて、斜面に対して縦横に移動しながら地対高度150m地点まで撮影して、施設全体をカバーできる撮影を行った。次に近接した画像を撮影するため斜面から20mの距離を保ち、先ほどと同様に施設下端から15m刻みで高度を上げながら撮影を行った。撮影時、風速は8m/秒程度、上空はさらに強いことが予想されたので、静止画のインターバル撮影と動画撮影の両方を実施した。撮影終了までのフライト時間の合計はおおよそ40分であった（うち撮影時間は20分程度）。

撮影した画像をもとに判読を行った結果、のり枠の配置・規格、アンカーやロックボルトの種類や本数の計測は可能であった。しかしながら、対策工の破損状況、特に遊離石灰を伴わないようなセンチオーダーのクラックは確認できなかった。これは撮影対象との距離が遠く、カメラの仕様ピクセルより小さくなってしまったためである。センチオーダーのクラックを確認するためには対象との距離は最大で10m以内、すべて静止画で撮影できれば判定ができる可能性がある。また対象物との距離を5～10m以内で撮影した静止画を取得するには、FPV機能を利用し無風条件下で50分程度のフライト時間が必要となる。

6.3. 今後の業務への展開

ドローンを業務に導入した結果、施設点検等の業務には現状の機材で有効活用できると判断された。しかしながら技術面、操作ノウハウの蓄積など解決すべき課題が山積み

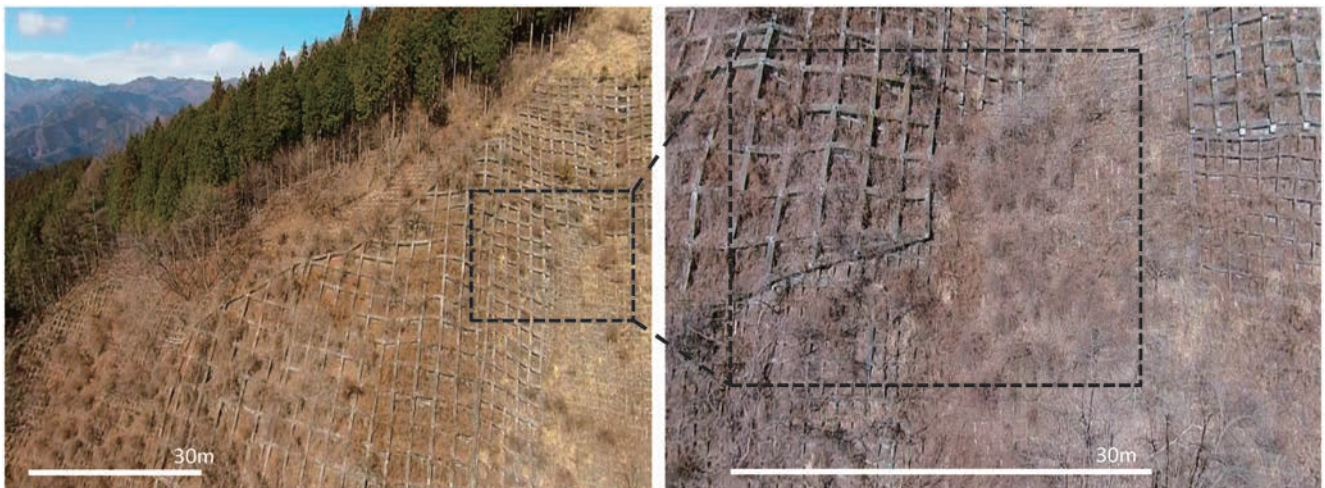


図11 現場導入例。斜面防災施設の遠景と近景。遠景でのり枠工の配置や規格を判定し、近景の画像でアンカーやロックボルトの本数計測や施設の破損状況の概要・植生の有無を確認することができる。

であることも明確になってきた。現状では成果品の品質を十分に確保できるとは言いがたいので、空撮専門業者のように独立したサービスとしての提供は行わず、現場における野外調査のオプションとしてドローンを導入している（筆者は地質技師として野外調査など現場調査案件を主に請負っている）。

このため、成果品は静止画や動画に限り、撮影箇所も特段気になる箇所（山間部の地形や大規模対策工）で野外調査のスケジュールに支障をきたさない内容で行う限定的なものでサービスを提供している。このことから、空撮専門業者に比較すると費用も安価である（専門業者に依頼すると、1日あたり20万円程度と高いが非常に品質の高い静止画と動画が入手できる）。費用面でのメリットが大きいかもかもしれないが、現在のサービスとしては非常に限定的でわがままな仕様である。それにも係らず顧客からは現場への導入を快諾頂いており評価も上々のようである。

評価される点はいくつか考えられる。まず、費用面での評判があることは否めないが、現場で撮影した動画をすぐに関係者の間で共有することができるので、調査方針の議論の潤滑的な役割となっているようである。また筆者自身が技師であるので、技師の観点から空撮に適切な箇所を提案し随時撮影することが可能である。また、地質技師（＝筆者）が現地で野外調査をしながら随時調査上の課題を提起して空撮していくという行為が、現場調査員全体のモチベーションを高めるきっかけになっているようである。このようにドローンの現場利用は地質技師の業務特性と非常に親和性が高く、簡易的な利用であっても有用性が認められる。

目視範囲内での静止画や動画の撮影技術は習得できたが、当初予定していたオルソ画像および地形図作成のサービスを提供できる目途はたっていない。これら技術は筆者が検討する今後の業務への展開には必要な事項となる。現状では試用版のソフトウェアを利用しながら実験的な作業でとどまっている状況で、今回の報告には掲載できなかったのが残念である。これら成果品の作成には現在利用している機材に加え、よりスペックの高い機体と SfM および GIS ソフトウェアが必須になるが、予算上の課題についても克服できる目途はまだたっていない。広域の地形を撮影し、現場での立体視可能な高精細画像、オルソ画像や地形図を提供できるようになれば、従来から言われている災害調査や活断層調査だけでなく、さらに以下のような案件に対してもドローンの適用可能性が広がるであろう。

(1) 斜面对策工の図面作成

古い対策工、特にのり砕工には竣工図がない場合がある。ドローンで撮影した画像を利用して、最初に Adobe Photoshop などの写真編集ソフトでのり砕工の色情報を判別させベクタ化する。同時に SfM ソフトウェアでオルソ画像および DEM データを作成し、GIS ソフト上でそれぞれのデータを重ね座標値を与えることができれば、容易にある程度の精度を保持したみなし竣工図が作成可能になるだろう。

(2) 資源探査初期ステージでの活用

資源探査を行う地域では地形図などの基本情報が欠如していることが多々ある。ドローンの自律飛行を利用して4km 四方の画像を入手し、SfM と GIS ソフトウェアを利用すれば探査初期段階でも高分解能の空中写真、オルソ画像、地形図を入手できる。地形情報があればリニアメント判読が可能だし、空中写真があれば写真判読からだけでも有意な地質情報が取得できる。結果として探査計画も立てやすくなり、案件の進捗や精度に大きく貢献できると思われる。

現状では IKONOS 等の衛星画像を購入し、それらの DEM データから地形図をつくることは可能だが、非常に高価であり入手するにも相応の知識や経験が必要となってくる。ASTER GDEM はフリーで入手も容易だが、グリッド間隔が 30m なので精度のよい地形図作成には向いていない。PRISM DSM はグリッド間隔も小さく価格も 30 万円程度と比較的入手しやすいが、画像が撮影されていない箇所も多い。

また、カメラの代わりにセンサーを搭載することができれば鉱種に限定した画像を入手できるようになる。赤外線センサーは搭載可能なので、地熱資源探査における地表面温度分布の解析は迅速に容易にできる状況である。

(3) 大規模露天掘り鉱山の切羽観察

ドローンを利用した斜面对策工における状況観察のノウハウを転用すれば、大規模露天掘り鉱山の切羽観察をドローンで実施できるようになると考えられる。切羽の地質状況だけでなく岩盤状況も同時に入手可能である。

6. 4. ドローンの規制

ドローンの利用者増加に伴いマラソン大会など人口密集地での墜落や、市街地での墜落など一歩間違えば死亡事故にもつながりかねない事故が報告されはじめた。そのような中、2015年4月上旬に首相官邸に意図的にドローンが落とされ、ドローン利用の危険性が注目されている。今国会で規制法案が審議されることとなり、近く法規制が行われるであろう。ちなみにこの事件で利用された機体は筆者が導入しているものと同じものである。自律飛行機能をデフォルトで装備させてきた DJI 社では、この事件以降対象となる機体の販売を制限しているようである。またこれまで同社の HP で大々的に紹介されてきた機能でもあったが、紹介ページは4月下旬の時点で削除されている。これまでドローンの規制はなかった。唯一航空法の範囲内において、高度 250m もしくは 150m 以下のフライト高度の規制があるのみで、違反時も 50 万円程度の罰則があるのみで規制がないも同然の状況であった。その状態の危険性は承知していたつもりなので、ドローン法規制の導入について筆者は賛成する。しかし規制内容次第であるが、厳しいライセンス制などが導入された場合、筆者のような極零細企業では今後商用フライトができなくなる可能性もある。筆者は1年間を通してドローンの有用性を実感できた。知識や経験をさらに積み、地質技師の特性と融合させることができればより、社会に貢献できる技術開発ができる時期

待している。今後の行方は個人的にも非常に気になる事項である。

7. まとめ

本稿では筆者がドローンを導入しようとした背景から、必要な機材とその選定方法や操縦技術の習得方法、飛行時の安全確保の方法、そして業務導入までの流れと実際の事例について順を追って紹介してきた。事故を防ぐために安全運用の手順についても紹介してきたが、安全にドローンを利用するのに最も重要なのは操作トレーニングを怠ることなく実施し、機体を制御できる操作技術を習得することであると考えている。また、顧客から強い要請があった場合でも、天候不順時にはフライトを実施しない勇気をもつことが必要である。

ドローンの有用性は周知となり、法規制の内容次第であるが今後も急速に普及し技術開発が行われるだろう。特に地質技師の業務特性と親和性が非常に高く、将来的には現地調査時の基本装備のひとつとなるだろう。また、初期費用がかかるがSfM含めた画像解析技術とGIS解析ノウハウを融合させることで、ドローンのより有効な利用方法がこれまでにない早さで開発されるであろう。

引用文献

- DJI (2015) Phantom 3 特徴. DJI 社ホームページ, <http://www.dji.com/ja/product/phantom-3#page1>, 2015/04/01.
- 双葉電子工業株式会社 (2015) 14SG (14ch-2.4GHz FASSTest モデル). 双葉電子工業株式会社 ラジオコントロール ホームページ, <https://rc.futaba.co.jp/propo/air/14sg.html>, 2015/04/30.
- Gigazine (2014) 「DJI Phantom 2 Vision+」を飛ばしまくっているいろいろ撮影しまくってみたレビュー. Gigazine ニュースサイト, <http://gigazine.net/news/20140715-phantom-2-movie-shooting/>, 2015/05/01.
- 井上 公・内山庄一郎・鈴木比奈子 (2014) 自然災害調査研究のためのマルチコプター空撮技術. 防災科学技術研究所研究報告, **81**, 61-98.
- 株式会社ハイテックマルチプレックスジャパン (2015) Hitec Aurora 9. 株式会社ハイテックマルチプレックスジャパン ホームページ, <http://hitecred.co.jp/products/hitec/propo/aurora9/index.html>, 2015/04/01.
- 内山庄一郎・井上 公・鈴木比奈子 (2014a) SfM を用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究. 災害科学技術研究所研究報告, **81**, 37-60.
- 内山庄一郎・中田 高・井上 公・熊原康博・杉田 暁・井筒潤・後藤秀昭・福井弘道・鈴木比奈子・谷口 薫 (2014b) 小型 UAV と SfM ソフトウェアを用いた断層変位地形の試みー根尾谷断層水鳥断層崖を例にー. 活断層研究, **40**, 35-42.
- Wu, C. (2013) Towards Linear-time Incremental Structure from Motion. *3DV '13 Proceedings of the 2013 International Conference on 3D Vision*, 127-134.
- Wu, C., Agarwal, S., Curless, B., and Seitz and S. M. (2011) Multicore Bundle Adjustment. *2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 3057-3064.

2015年5月5日受付, 2015年6月15日受理.

Engineering Geology of Japan, No. 5, 'The special issue of 20th anniversary of Hiruzen Institute for Geology and Chronology', 99-116 (2015)

How to learn flight technique of small Unmanned Aerial Vehicle (UAV): its application to geological services Ryuta Shukuwa¹⁾

¹⁾ RINSO JAPAN, 203 6-5-37 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-0061, Japan

© 2015 Hiruzen Institute for Geology and Chronology. All rights reserved.

付録

ドローン導入にあたって著者が参考にしたホームページを以下に示す。

(1) 機体 (ドローン本体)

Phantom Vision2+ (DJI 社)

<http://www.dji.com/>, 2015/04/01.

<https://ja-jp.facebook.com/dji.jp>, 2015/04/01.

<http://gigazine.net/news/20140715-phantom-2-movie-shooting/>, 2015/05/01.

(2) 送信機 (プロポ)

Futaba 14SG (双葉電子工業株式会社)

<https://www.rc.futaba.co.jp/index.html>, 2015/04/30.

JR XG11 (日本遠隔制御株式会社)

<http://www.jrpropo.co.jp/jpn/index.html>, 2015/04/01.

Hirec Aurora 9 (株式会社ハイテックマルチプレックスジャパン)

<http://hitecrd.co.jp/index.htm>, 2015/04/01.

(3) SfM 技術

PhotoScan (Agisoft 社)

<http://www.agisoft.com/>, 2015/04/01.

Visual SFM (Changchang Wu)

<http://ccwu.me/vsfm/>, 2015/04/04.