

ドローンの進化と火山活動観測への活用の試み

新村 太郎（熊本学園大学） 丸本 幸治（国立水俣病総合研究センター）

野田 和俊（産業技術総合研究所）

Evolution of Drones and an Attempt to Volcano Monitoring

Taro Shinmura (Kumamoto Gakuen University),

Koji Marumoto (National Institute for Minamata Disease),

Kazutoshi Noda (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

はじめに

災害現場や災害の可能性のある所は、既に危険であるか危険になる可能性が高いために、地上からアクセスするには限界がある。状況把握のために地上からアクセスした場合には、かなり接近しなければ状況が把握しにくい上に、危険が表面化した場合に避難する方向が二次元方向で限定され、避難する速度も遅い。そのため上空から、すなわち三次元空間を活用してアクセスの方が安全かつ有効である。また、対象の時間変化が情報収集において重要な場合は、上空から地上の限られた場所を一定時間継続して監視するために、観測者も上空で静止もしくはそれに近い状態にあることが必要となる。以上のことから、上空でホバリングが可能な、ヘリコプターに代表される回転翼をもつ航空機がよく利用される。有人のヘリコプターは機体が大きく、込み入った場所では高度を下げにくい。また離発着には、固定翼のように滑走路は必要でないにしても、機体が大きい分、一定の広さの場所が必要となる。そのために重大な災害が起きた場合や、特別に重点観測を行わなければならない箇所以外に有人ヘリコプターを飛ばすことは難しい。

小型の無線操縦によるヘリコプター（以下ラジコンヘリと表記）は機体が小さい分その欠点を補うが、かつては燃料エンジンを動力として、また姿勢制御をサポートするセンサーと電子回路が搭載されていないことから、管理や操縦には高い技術が必要であった。無人であることから、リアルタイムで画像をとらえて伝送する小型のカメラと送信システムが必要であるが、十分な技術もなかった。そのため有人ヘリを十分に補う存在にはなっていなかった。

現在までの数年間でドローン（本論におけるこの言葉の定義は後述）は、制御、映像、通信の3要素の飛躍的な技術革新と普及によって進化を遂げてきた。当初は個人の趣味の範囲で使用されることが多かったが、現在では産業の様々な分野でも活用され始めている。本論はこのようなドローンの進化とともに、火山活動の監視にどのように役立てることができるかを模索したプロセスといくつかの事例を報告する。

1. ドローン

現在使用されている「ドローン」という語は、広義には、ある目的をもって遠隔操作によってもしくは自律して動作し、移動することがその目的を達成するために重要な要素であるひとまとまりの機械システムを示している。分野によっては、無人飛行が可能な飛翔体(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)に限定して使用されている。本論ではこれをさらに限定して、遠隔操作可能な3枚以上の回転翼をもつ小型のマルチコプターに対して高度なジャイロセンサーと加速度センサーによる安定飛行と、電子コンパスとGPSによる位置制御を可能にした小型の無人飛翔体について「ドローン」という語を用いる。

遠隔操作が可能な小型の飛翔体として、かつては固定翼をもつラジコン飛行機と回転翼をもつシングルローター機であるラジコンヘリが中心に普及していた。当初は小型の燃料エンジンを動力としていたために、ドローンよりも扱いが複雑で機体は大きかった。1枚のメインローターとテールローターをもつヘリコプターは、空中にホバリングすることや低速度で飛行することが可能であるために、地上の様子の把握には非常に有用である。ところが、初期のラジコンヘリは現在のドローンに搭載されている機体の姿勢を安定させるための高度なジャイロセンサーおよび加速度センサーを搭載していなかったために、最初から熟練した操縦技術を必要とした。充電式のバッテリーの普及にともなって電動式の動力(モーター駆動)をもつタイプが登場し始めたが、それらの性能がまだ低かったために飛行時間が短く、用途は限定的で普及は緩やかであった。その後、ブラシレスモーターとリポバッテリー(リチウムイオンポリマー二次電池)の登場によって飛行性能と飛行可能時間が飛躍的に向上し、電動タイプが広く普及することになった。

動力を電気的および電子的に制御するようになったことは、機体の姿勢を把握する電子的なセンサーと複数のプロペラの出力をフィードバックして制御するフライトコントローラーの発展を促す結果となった。そうして2010年頃までには、現在のドローンの原型ともいえる4枚のプロペラを水平方向に回転させる電動のマルチローター機(マルチコプター)が登場した。例えばGauji社の「330X-S」は4枚のプロペラ駆動で飛行するクワッドコプターで、自分でパーツを組み立てて比較的自由的な構成が可能のために、軽量のカメラを搭載することもできた。ラジコン用の周波数帯の電波を使用し、プロポとよばれる送信機で操縦を行う。これとは対照的にParrot社の「AR Drone」は完成された状態で販売された。簡易式のカメラを搭載し、Wi-FiやBluetoothでリンクしてApple社製の携帯端末やAndroid OSで動作するアプリによってコントロールする。現在のトイドローンの上位機種のプロトタイプともいえる。シングルローター機に比較して機体の安定性が格段に高まったものの、操縦者からの距離が大きくなるとその形状から機体の向きが分かり難くなって操縦不能に陥る。電波が届かなくなった場合も同様である。

次に登場するGPSと電子コンパスを搭載したタイプによって、これらの問題は解決することになる。電波が届かなくなった、もしくはバッテリー残量が少なくなった場合には自動的に、操縦者が機体を見失うなどした場合には操縦者の単純なスイッチ操作によって離陸地点(ホームポイント)へ自動帰還を行うフェールセーフ機能が加えられた。また、機体の向きに関係なく操縦者との位置関係で方向を決めることができるというフェールセーフを考慮した操縦モードも加わった。機体が自律してほぼ一定の位置に留まることができ、さらには

あらかじめ設定したコースを自動的に飛行することも可能になっていった。機種の世界を経るたびに、これらの機能はより精密にかつ充実したものに進化していく。2012年にはDJI社から「F330」というマルチコプターのフレームをベースに、上記のGPS受信機と電子コンパスを含むパーツを組み立てるタイプのドローンが発売された。同時に同様の機能を備え、すでに組み立てられて送信機とセットになった「Phantom 1」（後に大ヒットしてドローンの普及に大きな影響を及ぼした Phantom シリーズの初号機）も登場した。組み立てとセットアップ作業が必要ないために、RTF（Ready To Fly）という言葉も使われるようになった。「Phantom 1」の機体下部には、同じ頃 GoPro 社から発売が開始された「GoPro HERO」という小型で高性能なカメラ（動画と静止画の両方に対応）を搭載できるようになっていたため、20万円程度の投資で上空から解像度の高い良質な動画を撮影できるようになった。ここではまだモーターやプロペラで発生する振動がカメラに伝わることによって画像の質が下がり、飛行中に機体が傾くことによって撮影画像が傾いた。これらの問題を解消するために次の「Phantom 2」では、ゴムの弾力性と2軸のサーボモーターを使ってカメラへの振動と傾きの影響をキャンセルするジンバルを搭載できるようになった。さらに、iPad や Android OS で動作するモバイル端末に専用アプリを導入して、プロポに接続することによって、搭載したカメラの画像をほぼリアルタイム確認することができる FPV（First Person View）も可能になった。マイナーバージョンアップ版の「Phantom 2 Vision+」ではジンバルが3軸でフル HD（full high definition の略で画素数が 1920 × 1080 以上の高解像度の画像）の動画の撮影が可能になった。これらによって、操縦性および動画の撮影性能が一気に向上した。この時期からすでにドローンを景観の撮影目的としてではなく、防災に活用を広げた事例が報告されている（例えば井上ほか、2014）。

その後の5年間では、飛行の動力や制御を含めた性能、衝突回避などの安全機能、静止画および動画の撮影機能、より安定した高速なデータ伝送、それらとユーザーをつなぐアプリケーションをはじめとしたインターフェースなど、様々な機能がさらに総合的に進化してドローンが高性能化していった。その結果、従来の独自に進化した高コストの産業モデルではなく、一般向けの機種が進化した比較的 low コストの産業モデルが普及しつつある。そこではさらに、RTK への対応によるより高い位置制御の実現と赤外線カメラの搭載による熱の可視化で、測量や送電線、橋梁、太陽光発電パネルなどのインフラの点検にも非常に有用なツールとなっている。

飛行中のドローンは上空にあるため、安全性に配慮して設計されていても、操縦ミスやそれ以外の何らかの原因によるトラブルによって落下や暴走する確率はゼロではない。落下した場合、その下にいる人は重大な危険にさらされる。高度な技術を必要とするラジコンヘリなどにおいては、操縦できる者が限られていた。また経験と知識のある他者によらず独力で技術を身につけることは難しかった。十分な経験と知識からは安全性も導かれる。操縦技術を学ぶ者には技術のみならず安全性についても伝えられることになり、その結果多くの場合飛行における安全性は、操縦者の技術、そして良心とマナーが支えていた。それに対してドローンにおいては、操縦が容易なために状況が変わった。ドローンに関する知識が乏しく、操縦が未熟で、危険に対する意識が低い者であっても、ドローンを手にして（安全かどうかは別として）飛行させることは難しくない。そしてそのような操縦者による、ドローンの墜

落や暴走などのトラブルが他者や他者の財産を傷つけた、もしくは脅威を与えたという報道が増えていった。ドローンそのものの初期不良、ファームウェアのアップデートによる不具合によって生じたトラブルも発生した。その中で特に社会に大きな影響を与えた事件は、2015年4月22日の総理大臣官邸屋上に何者かが飛行させたドローンが無許可で着陸しているのが発見されたことである。ドローンが反社会的なツールに使われることを強く懸念した国は、緊急に対策を取り始めた(首相官邸「平成27年5月12日小型無人機に関する関係府省庁連絡会議決定」)。その後、ドローンの誤った使用によるトラブルの危険を防止することや、ドローンを使用した犯罪、テロ行為を防止、同じ上空を飛行する航空機とのトラブルを避けることを目的に、2015年12月10日より改正航空法が施行され、ドローンの飛行禁止に関する内容も追加された。例えば空港周辺、150m以上の上空、人口集中地区での飛行を禁止し、さらに飛行の方法についてもいくつかの条件を設定している(ただし許可を得た場合には例外的に飛行可能になる)。

2. 火山活動観測へのドローンの活用と飛行試験結果

活動的な火山は大きな災害をもたらす脅威でもある。その状況を把握することは防災と減災のために必要不可欠である。火山活動は火山研究に重要な情報を与えるため学術の側面からも同様である。リモートセンシングやテレメトリー観測によって、地形の変化、火山性微動、山体の膨張・収縮などに関する様々なデータが得られている。一方で、より詳細な地形データが必要な場合は低高度からの観測が必要であり、また火山ガスなどの「もの」の観測、測定のためには現地へ赴く必要がある。いずれの場合もすでに危険、もしくは危険になる可能性が高い場所に近づくことになる。前述のようにこのような状況ではドローンの有用性が非常に高くなる。橋本ほか(2018)では火山観測におけるドローンの活用例や可能性がまとめられている。気象庁では来年度(平成31年度)予算に火山の監視や噴火時の状況把握のためにドローンを活用するための予算を含めている(気象庁「平成31年度気象庁関係平成30年8月気象庁予算概算要求概要」)。このように、今後ますます火山活動の監視と観測のためのドローンの活用は広がっていくと考えられる。

本論では、(1)2014年末から始まった阿蘇火山の噴火の影響による表面の変化の把握のために噴火口上空から撮影を行った事例および、(2)JSPS 科研費16K00536「火山・地熱由来水銀の放出量及び拡散量の推計を目的とした安価な長期観測手法の開発」(研究期間:平成28年度~平成30年度)において、火山や地熱地帯の噴気中の水銀の観測のためにドローンを活用した事例とその準備のために行ったいくつかの試験の結果について報告する。各研究の成果については稿をあらためて報告する。

① 荷重試験

本試験は2015年3月に実施した。ここではDJI社製のドローンである「Phantom 2」(図1-a)および「s1000+」(図1-b)について行った。複数のビニール袋にそれぞれ重量が分かる量の水を入れてウェイトとし、それらをドローンから吊り下げたネットに入れて、着地状態から上昇、ホバリング、水平移動をさせて飛行の安定性を確認した。

「Phantom 2」はPhantomシリーズの2番目の機種でありプロペラを除く本体のサイズ

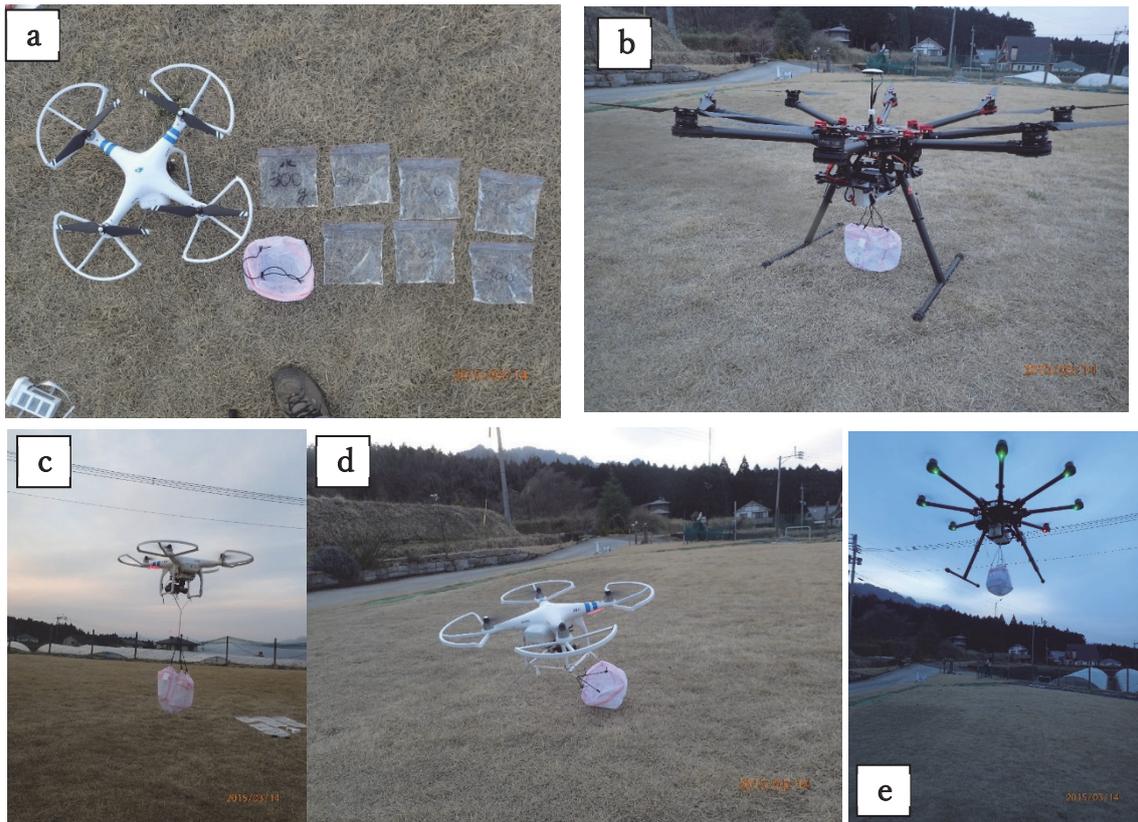


図1 ドローンの荷重試験

aは「Phantom 2」、bは「s1000+」で両機とも DJI 社製。aは隣のモーターの軸までが約30cmで小型、bは対角位置の軸までが約1mで大型、ウェイトがある状態の挙動を両者で比較した。それぞれ水の入ったビニール袋を吊り下げた状態で上昇、回転、水平移動などの飛行安定状況を確認。cでは400gのウェイトを吊り下げているが、いったん高く上昇したが、回転させたら揚力のための出力が落ちて下降した。dの500gのウェイトを吊り下げた状態では、本体だけ上昇してもウェイトを持ち上げることができず、水平移動で地面に引きずっている。eは「s1000+」が2.1kgのウェイトを吊り下げている状態で、飛行に関してはほとんど影響がみられない。

は29cm四方、高さ18cmの小型である。メーカーのカタログスペックによると飛行時重量の最大値は1300g、最大飛行時間は25分（どのような状況下での数値かについては不明）である。実験時の本体（専用バッテリーを含む）が1000g、カメラジンバル（DJI社製「ZEMUSE H3-3D」）が168g、映像伝送装置（DJI社製「Lightbridge Air system」）が71g、カメラ（GoPro社製「GoPro HERO 3+」）74gで合計1313g。ウェイトがない状態ですでに最大重量をオーバーしているが飛行に大きな影響はなかった。ウェイトの量を100gから徐々に増やし300gまでは上昇、ホバリング、水平移動に対して支障はないが、プロペラの回転数が重量に応じて大きくなっているために、ペイロードの重量に応じて飛行時間が短縮されることが予想される。400gのウェイトをつり下げた状態では、浮上してホバリングするのがやっとの状態であり、移動や回転を行うと上昇のための出力が不足することになって高度が徐々に落ちてきた（図1-c）。500gのウェイトをつり下げた状態では、本体が浮上してもウェイトを浮上させることはできなかった。水平移動すると本体は傾きながらウェイトを地面に引きずって移動する（図1-d）が、墜落はしなかった。400gのウェイトをつるした状態では12分間の飛行で早くもバッテリー残量が20%まで低下した。必要な飛行時間

に応じたペイロードを設定する必要がある。バッテリーがフル充電で10分間以上飛行のためには約400gが限界である。飛行に直接関係のないカメラとカメラジンバルおよび映像伝送装置を取り外せば、700g程度の追加ペイロードが限界ということが分かった。

「s1000+」は8対のプロペラの推力によって飛行する。この機種は一眼レフカメラとジンバルの搭載用に設計させているために大型であり、プロペラを除いた対角長は約105cmである。プロペラの数が多いのは、大きな出力と飛行の安定性を確保するため、さらに冗長性によって安全性を高めるためである（モーターやプロペラにトラブルがあっても1箇所であれば飛行継続可能である）。バッテリーを除いた本体の重量（フライトコントローラーや映像伝送装置などを含む）は約4.8kg。バッテリーは必要に応じた容量の汎用のバッテリーを使用する。ここでは20000mAhの大容量のものを使用して約18分間の飛行が可能であることを確認した。メーカーのカタログスペックでは飛行時重量の最大値は11.0kgであり、「Phantom 2」の最大値の10倍に近い。ここでは約2.6kgのバッテリーを含む計7.4kgのペイロードから徐々に増やしていった。スペックを参考にして計算すると3.6kgのウェイトを追加することが可能である。用意したすべてのウェイト（計2100g）をつり下げた状態でも浮上、移動とも安定していた（図1-e）。この状況で負荷の程度をより詳しく把握するために、降下状態から出力を上げて上昇に転じるまでにかかる時間を測定した。ウェイトがない状況と比較して時間はほとんど変化がなかった。さらに、急な上昇や旋回、方向転換なども行ったが、ウェイトによって安定性が妨げられる様子は観察されなかった。火山ガスの測定装置（約700gを想定）を搭載しても安定した飛行に大きく影響しないことが分かった。飛行可能な時間は約16分であった。

「s1000+」ではペイロードと飛行時間とも余裕があるため、それぞれを想定範囲内での程度大きくできるか試算した。今回は容量と重量ともに大きいバッテリーを使用した。より容量が小さく重量が小さいバッテリーを使用することによってウェイトの量はスペック上で3.6kgより増やすことが可能である。例えば容量が半分の10000mAhのものを積載した場合は約1.3kgと軽いため、4.9kg程度のウェイトをつり下げることができることになる。しかしながらその場合は飛行時間が短くなる。重量当たりの飛行時間を比例配分して試算すると700gの追加ペイロードで、 $18 \times 7.4 \div (7.4 + 0.7) = 16.4$ 分であるため、目標とする15分を超える。さらに飛行時間を延ばすためには、より容量の大きいバッテリーを搭載する、もしくは複数のバッテリーを並列に接続することになる。市販品のバッテリーでは20000mAhが容量の最大に近い。そのためこれを2個搭載すると全体の重量は10.0kgになり、1.0kgのペイロードが可能である。仮に追加ペイロードを1.0kgと大目に見積もって上記と同様に試算すると、約20分間飛行できることになり、これは目標の15分を十分に超えている。

以上から、小型の「Phantom 2」の場合は400gの追加ペイロードが限度であり、その場合の飛行時間は12分。ペイロードと飛行時間とも目標には至らなかった。一方、大型の「s1000+」では追加ペイロード、飛行時間ともに十分であることが分かった。

② 活動的火山の火口上空飛行試験

阿蘇中岳は2014年11月にはストロンボリ式噴火が始まり（福岡管区气象台「阿蘇山の火

山活動解説資料（平成 26 年 11 月）」）、高温の火山灰やスコリアを噴出し、その後火山灰を大量に吹き出す灰噴火が数ヶ月間続いた（横尾・宮縁、2015）。また、2015 年 9 月 14 日の爆発的な噴火では多くの噴石が火口周辺に落下し、噴煙は上空 2000m まで確認された（福岡管区气象台「火山名 阿蘇山 噴火警報（火口周辺）平成 27 年 9 月 14 日 10 時 10 分」）。

これを受けて 2015 年 11 月 30 日に火口およびその周辺の地形や噴石分布の把握のために、ドローンによる地表面の撮影を試みた。機体は DJI 社製の「Phantom 3 Advanced」を使用した。この機体はサイズ、重量とも前出の「Phantom 2」とほぼ同じで、プロペラを除くと約 29cm 四方、高さは約 19cm、バッテリー装着時の総重量は約 1.3kg、最大飛行時間は約 23 分である（カタログスペックによる）。「Phantom 2」とは異なり、最初からフル HD の動画撮影が可能なカメラと専用のジンバルが装備されている。現地では二人体制で飛行と撮影を行った。操縦者が操縦用のアプリ「DJI GO」上に写し出されている航空写真と機体の現在位置と軌跡を元に、手動で矩形の軌跡になるように飛行させつつ（図 2）アプリ上にあるカメラのシャッターボタンを定期的には押した。もう一人が目視によって飛行している機体と周囲の地形を監視した。砂千里の駐車場を離陸して中岳第一火口の南側を飛行していたが、目視の誤りによって東側にある古期山体の火口壁に激突した。その後地形的に険しい場所に墜



図 2 2015 年 11 月 30 日阿蘇中岳第一火口上空における DJI 社製「Phantom 3 Advanced」の飛行経路

地表面のマッピングを行うために矩形の飛行を行ったが、手動で操縦したためにいびつな飛行経路になった。図の左下の赤い矢印が示すドローンの現在地は、火口壁に衝突して墜落した地点でもある。図は iPad 上で動作する「DJI GO」アプリに Google map の航空写真を重ねたもの。



図 3 2016 年 2 月 18 日阿蘇中岳第一火口上空における DJI 社製「Phantom 3 Professional」の飛行経路

ここでは Map Pilot というアプリを使用してあらかじめ決めた経路を自動的に飛行させた。紫色の点は砂千里駐車場にある離陸場所、緑色は撮影開始場所、黒色の小丸はすでに撮影を終えた場所、青色は現在飛行中の場所、赤色は最終撮影場所を示す。図は iPad 上で動作する「Map Pilot」アプリに Google map の航空写真を重ねたもの。

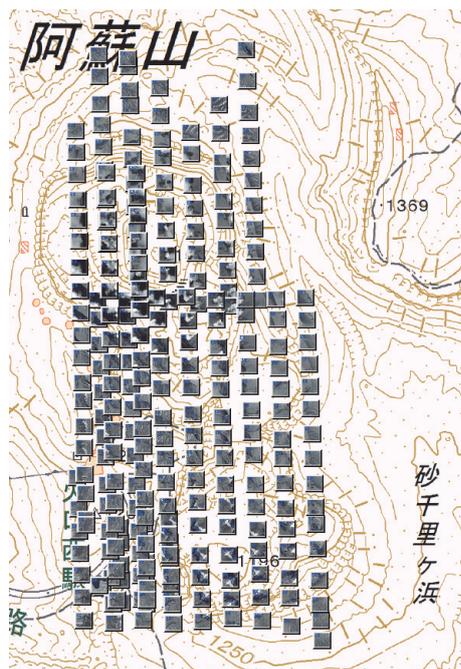


図4 2016年2月18日阿蘇中岳第一火口上空におけるDJI社製「Phantom 3 Professional」が地表を撮影した場所

「Map Pilot」アプリによって自動的に飛行して撮影した場所に写真のサムネイルが表示されている。背景には国土地理院の地形図を重ねた。地形図によって、火口周辺のどのような場所を撮影したかが明確に分かる。ここでは第一火口の上空と、その南側の二つの地域に分けて、二つの飛行経路を作成した。左下で込み入っているのは、試験的に飛行と撮影を行った部分が重なっているため。

落したと思われるので、回収は断念した。広くて複雑な地形では目視では錯覚によって正確な位置を捉えられなくなることがあるということが分かった。撮影データは本体のMicroSDカードに記録されるために、撮影データを得ることはできなかった。

約二ヶ月半後の2016年2月18日には、DJI社製の「Phantom 3 Professional」を使用して再び撮影を試みた。この機体の全体的なスペックは先に使用した「Phantom 3 Advanced」とほぼ同様であるが、前方を監視するセンサーによって衝突を自動的に防止する機能があることが大きな違いといえる。ここでは前回の目視の欠点を補うために自動飛行および自動撮影を行った。「Map Pilot」というアプリを使用した(図3、4)。このアプリでは撮影する範囲と飛行する標高を決めると自動的に飛行ルートや撮影間隔が決まるので、あらかじめ地形や標高を確認して安全な飛行ルートを計画することができる。現地ではアプリで設定したフライトの起動ボタンをタップするだけでドローンは自動的に上昇して、あらかじめ決められた飛行ルートに沿って自動的に撮影を開始した。バッテリーが少なくなるとドローンは自動的に出発地点に戻って着陸し、バッテリーの交換後に再スタートさせると、続きの場所から撮影を自動的に開始した。ここでは2つのことが懸念された。1つは、噴火口からは主に湯気からなる噴煙がもくもくと上がっているために火口上空には激しい上昇気流があると予想された。そのため火口上空を通過する時にこれに巻き込まれて飛行が不安定になり、墜落するのではないかとということ。また、離着陸を行う砂千里の駐車場付近ではほぼ無風であったが、噴煙は北西に強く流されていたことから、火口上空では比較的強い南東風が吹いていることが予想された。飛行ルートは離着陸地点から120mの上空で、火口縁の60から90m上空になる。ドローンのほぼ南北方向の飛行において、南向きの飛行時には強い向かい風になり、バッテリーの消耗が激しくなる。そのため2つ目の懸念は、北側で折り返した時点でバッテリー残量が少なくなっていた場合に、南向きの向かい風の中の飛行中にバッテリー切れになって火口内に墜落することであった。幸いいずれの結果にもならず済んだ。飛行のログを確認したところ、飛行ルート上で標高に大きな変化はなく(上昇気流に

強く吹き上げられることはなかった)、さらに北向き南向きの飛行時間にも大きな差はみられなかった。上昇気流や上空の水平方向の風に対して、十分な推力があったと判断できる。あらかじめ上空の三次元方向の風向風速を知ることが対策を講じる上で重要な情報となるが、ドローンによってそれを測定することは難しい。

③ 地熱地における噴気中のホバリング試験 (1)

ここでは、地獄と呼ばれることが多い硫化水素と水蒸気が主体の地熱地での火山ガスの測定に、ドローンを使用した。より良好なデータを取得するためには大気との混合ができるだけ少ない状態のガスを測定した方がよい。

2016年11月8日に、鹿児島県始良郡湧水町にある栗野岳八幡地獄において噴気中の試験飛行を行った。この噴気地は緩やかな谷地形の底にあり、大小の岩が露出しているために、ドローンの離着陸に適した平坦面が少ない。そのためにここでは機体のサイズが小さい「Phantom 3 Professional」のみを使用した。噴気中の環境を測定するためにロガーおよびWi-Fi伝送機能のある測定装置を搭載した(野田ほか、2018)。離着陸地点から噴気までは水平距離にして約80m、噴気の約10m付近上空で約10分間ホバリングを行った。飛行中のWi-Fi電波の干渉による操縦や映像伝送に対する影響はなかった。「Phantom 3 Professional」では送信機と機体がリンクする際に、空いているチャンネルをスキャンして使用する。山間部では2.4GHz帯に空きチャンネルがない、もしくはリンクができた後に割り込むなどの事態は発生しにくいと思われる。ドローンが噴気中を自律的にホバリングしている間、ほとんど位置の変化は見られなかった。GPSによって水平位置、気圧計によって高度を確認してポジショニングを行っているが、これらの機能は正常であったといえる。

帰還後に本体を確認したところ、機体の外側に細かい水滴がついていた。噴気中には水蒸気やそれが凝結した細かい水滴が多く含まれる。よって直接水滴が付着したものと、水蒸気が本体表面で凝結したものの両方の可能性がある。「Phantom 3 Professional」には防水機能はない。本体には制御や動力のための電子基板があり、それを冷却するために1mm程度の幅の狭いスリットが多くある。今回はそれらを通して内部に水滴は付着していなかったが、さらに長時間飛行させていけば付着する可能性は十分に考えられる。また、プロペラを動かすブラシレスモーターについても同様である。電子基板やモーター内部に水滴が浸入もしくは結露がひどく起きた場合には、ショートが起こって墜落や制御不能になる可能性があるため、十分な対策が必要であることが分かった。機体に防水機能が必要である。

④ 阿蘇中岳第一火口上の火山ガス計測 (1)

阿蘇中岳で活動的な噴火活動がおさまった2017年10月19日に中岳第一火口にある噴気孔群の上空約100mで火山ガスの計測を行った。ここからは水蒸気とともに大量の二酸化硫黄ガスが噴出している。③の結果をうけて、ここでは機体に防水防塵機能(IP等級IP43)のあるDJI社製「Matrice200」を使用した。カタログスペックでは、機体の大きさはプロペラを除いた幅が縦横約90cm、高さが約40cmである。Lタイプのバッテリーを搭載した重量は約4.5kgで、最大ペイロードは約6.1kg、最大追加ペイロードは約1.6kg、Lバッテリーを使用した最大ペイロード時の最大飛行時間は24分である。

ここでは火山ガス中の水銀の含有量を測定するために、センサユニット測定システムを搭載した(野田ほか、2018)。火口上空では強い風が予想されるため、風の抵抗を減らすためにセンサユニット測定システムの各パーツは、本体のすぐ下(脚の付け根)に取り付けた。センサユニット測定システムではモーター駆動の吸引ポンプもあるために、電磁波のノイズの影響が懸念されるが、ここでは風による影響を重視した。追加のペイロードはこのシステムが約500g、専用のカメラシステム(DJI社製「ZENMUSEX4S」)が253gで、合計は約750gとなり最大追加ペイロードの半分以下である。

離着陸地点は火口縁の平坦部であり、観測時には5m/s前後の強い風が断続的に吹き、小雨が降っていた。離陸後に火口内の噴気地点上空へ移動して、離着陸地点とほぼ同じ標高で、火山ガス測定のために15分間を目指してホバリングを行い、バッテリー残量の警告が出たらすぐに手動で着陸地点に戻るという計画で行った。1回目のフライトは13時28分に開始して約14分間。離陸地点からほぼ水平に移動して、目視とドローンに搭載したカメラによって噴気孔のほぼ直上に移動してホバリングを行った。ホバリングを行った位置はおよ



図5 阿蘇中岳第一火口の火口底南東縁付近にある噴気孔群

DJI社製ドローン「Matrice200」搭載したカメラ「X4S」で撮影。ドローンのほぼ直下にカメラを向けている。左上は湯だまり。ホバリングしている所から火口底までは約100m。白い粒状に見えるものは比較的小さい噴気孔。黄色い所は昇華した硫黄。2017年10月19日13時35分撮影。

そ北緯32.883687°、東経131.086191°で、離陸地から約250m北西方向に離れている。図5は1回目のフライト時にホバリングした場所の直下の画像である。緑色は湯だまりで、その南東側の火口壁で白い細かい煙が出ているエリア全体から火山性ガスが噴出している。全体的に高温で黄色い部分は噴出する火山ガス中の硫黄が昇華したものである。火口内部の風向きによって、最も右下の大きな噴煙に直接さらされる。2回目のフライトは14時42分に開始した。約8分を過ぎた8分14秒後から、それまではほぼ空中の一点で静止していたが、移動させる操縦をしていないにもかかわらず、緩やかに4秒かけて半径5m程度の円周上を反時計回りにゆっくり回転しながら移動し、7秒かけて北西側に約30m移動し標高は約25m下がり、9秒かけて南東側へ元に戻るよう移動し(標高は15m上昇)、さらに4秒かけて北東側に約20m移動(標高は3m上昇)、7秒かけて南西側に約20m移動して(標高は約7m)、ほぼ元のホバリング地点に水平および標高とも戻って静止した。南東側に移動する際に「motor overloaded」のエラーが操縦するアプリ上に表示された。図6はその時の軌跡である。その後、すみやかに手動で移動、着陸させた。その際には特に以上は見られなかったものの、進行方向右前のモーターが異常に加熱していた。

火口内部はとても広いために、20~30m程度勝手に移動しても、火口壁に衝突もしくは火口底に墜落することはなかった。しかしながら重大な異常動作である。加熱していたモーターは、その後本体の電源を入れただけで異常加熱して、回転しなくなった。その後メー

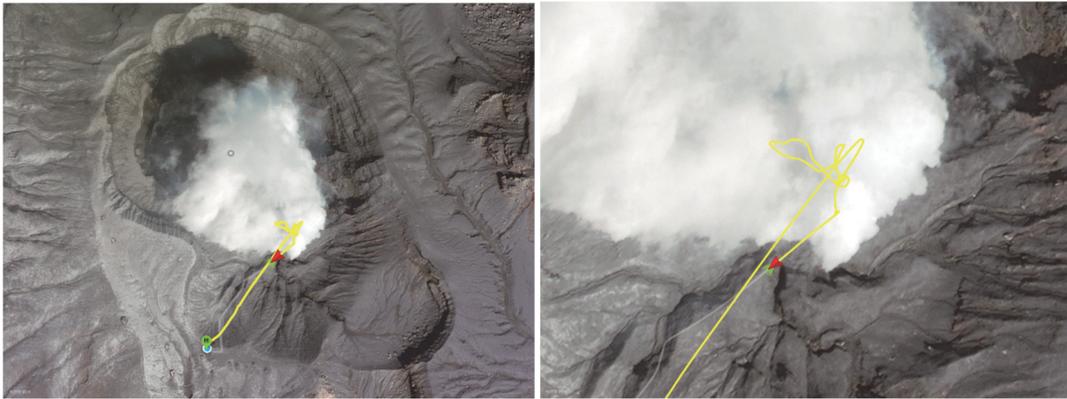


図6 2017年10月19日第二回目の飛行の際の異常飛行の軌跡（黄色い線）
 両方の図とも、DJI GO 4 アプリに Googlemap の航空写真を重ねたもの。
 左：左上の凹地が第一火口。火口の右下（南東縁）が図5に示した噴気孔群がある場所で、この上空でホバリングする予定が、不規則な異常飛行を行った。
 右：左図の飛行軌跡の右上部分を拡大したもの。元のホバリング地点から北西および北東方向に大きく逸れた（約20～30m）後、元に戻った。赤い矢印はドローンの現在地で、手動で帰還させている時の状況。

カーに修理を依頼したものの、初期不良という診断だけだった。詳細は不明である。出荷時に内在していた不具合が、たまたま飛行中に顕在化したのか、それとも過酷な環境で飛行させたためにそれがあらわれたのかも分からない。しかしながら、モーターが過負荷となったというエラーが表示されたために、それが正しいと仮定して原因を考察する。考えられることは2つであり、1つ目には、実際に過負荷になったということ。一定の方向から強い風が吹き、追加のペイロードがある中で静止するためには、モーターに強い出力が課せられる。その時に、同じ方向から風が吹いて機体が方向を変えていなければ、特定のモーターに強い負荷がかかることが想定される。ただしその場合は、異常飛行が起きる前に過負荷のエラーが表示されるはずが、実際には異常飛行の途中に表示された。表示されるのにタイムラグがあるようなソフトウェアの仕様であれば、実際に負荷がかかったとも考えられるため、確定できない。もう1つは、防水の不具合である。小雨が降っている中で濃い二酸化硫黄があり、硫酸ミストが存在している可能性が高い。防水の不具合によって酸性の液体が浸入すれば、モーターに部分的にショートが発生して、過電流が発生して過負荷と判断された可能性もある。原因は特定できないものの、機体に不良がない場合、強風下では長時間ホバリングした際に、特定のモーターに過負荷がかかる可能性は否定できないため、このような状況下では、機体の向きを時々変えて、負荷を分散させることが有効な対策になる。

⑤ 阿蘇中岳第一火口上の火山ガス計測（2）

2018年8月1日から2日にかけて、上記④と同様な目的で第一火口にある噴気孔群の上空で火山ガスの計測を行った。機体は前回と同様 DJI 社製「Matrice200」を使用した。異常があったモーターは取り替え済みであるが、メーカーがその他に修理したかどうかについては不明である。

8月1日には同様な手順で、7時47分から約17分間、10時5分から約15分間、18時48分から約12分間、3回それぞれ火口上空で噴気孔群からの火山ガスの測定のためにホバリ

ングを主体とする飛行を行った。風も穏やかであり、特に異常はみられなかった。

8月2日は同様な手順で7時49分に離陸を開始した。離陸直後から異常が発生した。上昇のための操作を送信機で行ったが、操作よりも過度な速度で上昇を始めた。下降するように操作しても上昇を続ける。水平方向の動作には異常はなかった。すぐに自動帰還のモードに入れたが、さらに激しく上昇を始めたため、自動帰還を解除した。上昇を続ければ見失い、バッテリーが切れて落下するために、機体や積載した測定機器を失うどころか、非常に危険である。すぐに自動下降のモードに切り替えた。幸い下降を始めた。ただ、このモードを切れば再び上昇する可能性が考えられ、しかも正常に着陸するかどうか不明なために、火口壁の土砂が堆積している斜面に着陸するように水平方向の位置を調節した。そのまま着陸したが、測定器を搭載する都合で下方センサーを切っており、地上を認識することができないために、比較的速い速度のまま着陸した。ガスの測定機器の一部は破損したものの主要なものに被害はなかった。またドローン本体にも脚を取り付ける部品が破損した以外に大きな破損はなかった。



図7 2回目の阿蘇中岳第一火口上の火山ガス計測におけるドローンへの観測機器の取り付けの様子 (2018年8月1日および2日の観測での機器構成)

右：脚に沿って取り付けられた細長いものはバッテリー、本体に近い表示があるものは気体を収集するための負圧ポンプ。

左：本体のすぐ下にある透明の円筒には水銀測定用のプローブなどが格納されている。脚に沿って取り付けられている透明の長いパイプは気体採取用パイプ。負圧のポンプによって気体採取用のパイプの先端から気体を取り込まれて、下端からプローブなどに送られる。採取位置が上にあるのは採取する気体に、ドローンや搭載されたものから落ちる不純物によってコンタミが起きないようにするため。

後に飛行記録とその時に撮影した映像を比較したところ、映像では明らかに上昇しているのに、制御用のアプリ上の記録ではそれに応じた上昇を記録していない。すなわち、ドローン本体は上下方向の移動がないにもかかわらず下降していると判断して、それを打ち消すために上昇をしたと解釈できる。さらにログには「working compass encounters magnetic-interference」というエラーが出ていた。動作している電子コンパスに電磁的な干渉という意味である。コンパスといえは一般的に水平方向の移動のための情報を与えると考えられるが、水平方向の移動や認識には特に異常は見られなかった。また、異常が発生してから約1分後にエラーが出力されている。単純に考えれば、エラーは異常飛行の原因にはなっていないということであるが、エラーが出なければ異常飛行をしないという保証もない。電子コン

パスが3次元方向の移動についても情報を与えていると仮定し、影響を受けていても、影響が出るかどうかに関係なく一定の閾値に達しなければエラーが出力されないとすれば、否定できない。観測機器は飛行のたびにいったん取り外してつけ直す。気体採取用のポンプは電磁的なノイズを発生する可能性があり、電子コンパスに大きな影響を与える位置にたまたま取り付けただけによって、不具合が発生したことも想定される。機体や制御用のアプリの仕様は明らかにされていないために、原因については推測の域を出ないが、考えられる可能性は排除した方が安全である。ポンプなど電磁的なノイズが発生するものについては、できるだけ本体から離れた場所に搭載するか、ノイズを遮蔽する方法を考える必要がある。強風下で飛行させる場合には、風の抵抗を小さくするために、搭載機器はできるだけ本体に近い機体の中心部分に集めることが理想的であるために、ポンプを本体から離れた場所に搭載することと相反する。噴気中をホバリングさせるのであれば、できるだけ遮蔽をすることを中心して、対策を考えなければならない。

⑥ 地熱地における噴気中のホバリング試験 (2)

2016年11月8日および9日に、③で行った場所と同じ鹿児島県始良郡湧水町にある栗野岳八幡地獄において噴気中の試験飛行を行った。前回の飛行試験で、噴気中の飛行ではミストや水蒸気の凝結によって多量の水滴が機体に付着することが分かったため、阿蘇中岳の噴火口上空で使用した、防水機能がある「Matrice200」を使用した。また⑤で行った飛行試験から、気体収集用のポンプの電磁的なノイズの影響をできるだけ小さくするために、今回は図8に示すように、ポンプを脚の先端に近い、本体から最も遠いところに取り付けた。ドローンの操縦や映像伝送には、Wi-Fiと同じ2.4GHz帯の電波が使用されている。ポンプのノイズに加えて、その他の電波がドローンの操縦に影響がないかを確認するために、離着陸地点において、Wi-Fi電波用のスペクトルアナライザーによって電波状況を確認した。電波スペクトルアナライザーはOscium社製の「WiPry 5x」とApple社製の「iPod touch」を使用した。ポンプの電磁ノイズは2.4GHz帯では確認されなかった。また測定を行った場所は山間部のこともあり、2.4GHz帯にはドローンに関する電波以外は確認されなかった。

噴気の測定は活動的な噴気孔からすぐ近い（水平距離で約3m）位置の北緯31.955193°、東経130.781478°の地点の上空で行った。機体はそこから水平方向に約20m離れた噴気



図8 気体採取用のポンプの取り付け位置（赤丸の中）

⑥の地熱地での飛行の際には、図7右のようにポンプを本体のすぐ近くではなく、脚の先の本体から最も遠い位置に取り付けた。

較的少ない安全な場所の2 m²程度のおよそ平坦な場所から離着陸を行った。離陸後すぐに噴気がある所へ移動して、噴気地の地上から約5 m程度の高度でホバリングをした。比較のために、高度がこの間ガスを採取して測定を行った。15分を目安にして、バッテリー残量の警告が出た場合には速やかに手動で帰還して着陸させた。2月6日は、10時37分から約21分(ログによる離着陸点からの高度は8 m、以下同様)、11時47分から約14分(8 m)、14時58分から約17分(4-5 m)、15時52分から約15分(6 m)、16時56分から約12分(2-4 m)、合計で5回、延べ約79分の飛行を行い、同時に測定を行った。2月7日は、8時31分から約16分(4-7 m)、9時30分から約16分(15-16 m)、合計で2回、延べ約32分の飛行を行い、同時に測定を行った。この2日間で合計7回、延べ約111分の飛行を行ったが、特にトラブルはなかった。噴気から帰還した機体にはびっしり水滴が付着しており、防水機能がなければ高い確率でトラブルが発生したと予想される。また、ホバリング中にまれに標高の数値が最大で3 m程度不安定になることがあった。機体はその数値にしたがって高さを変えるために、低空を飛行している場合には地表と接触する恐れもある。噴気が強い場合は機体が白い噴気に隠されて見失うこともあったために、リスクは残る。噴気による上昇気流や霧囲気の勢いによる気圧の変化は、高度を決める気圧計に影響を強く及ぼす可能性が高いと考えられる。そのため、視認性を確保できない場合には、上下方向の気流が激しい場所では周辺に接触する恐れがある低空飛行はできるだけ避けるか、噴気が強くなる、もしくは風向きによって噴気に覆われた場合には、空間が開けた上空などにいったん待避するなどの対策をとりながら飛行する必要がある。ポンプを本体から遠い所に取り付けたために、⑤で発生した電磁的なノイズの影響に関する警告は一切なく、飛行についても問題なかった。

3. 考察

① 荷重試験

前章で報告した小型のドローン「Phantom 2」と大型の「s1000+」を用いたそれぞれの荷重試験結果は、モーターの出力と数およびプロペラの形状によって決まるドローンの推力が、安定した飛行での追加荷重の上限を決めていることを示した。そのため、測定機器の重量に十分耐えうる推力を持つ機種選定が必要である。小型のドローンは可搬性に優れ、さらに離着陸のための広いスペースを必要としないために、火山などの複雑な地形をもつフィールドでは便利である。一方で400gの追加荷重をもち上げて飛行することができなかったために用途が限定される。大型のドローンは2100gの追加荷重があっても十分安定して飛行した。追加荷重に対して優れている一方で、可搬性は劣り、離着陸のために広いスペースが必要となるために、フィールドの地表面の様子や地形によって使用可能な条件が限定される。以上から、追加荷重が大型ほどではなくても700g程度が可能で、中型で持ち運びが難しくない機種が適していることが分かった。試験を行った時点では市場にはないために確認はできなかった。

② 活動的火山の火口上空飛行試験

阿蘇中岳第一火口およびその周辺で行った2回の飛行試験から、前述の通り広いスペース

においては目視による空間把握は限界があり、そのことがドローンの操縦に大きく影響することが分かった。その対策として、あらかじめ地形などのデータを元にした飛行計画にしたがって自動飛行させることが可能なシステムの適用が有効であることを実証することができた。

火山の上は標高が高いことと地形が複雑なために風が強く、強さと方向が複雑に変化することが多い。また、火口上空では噴気の上昇気流の影響も懸念された。飛行試験ではそれらによるトラブルはなかったが、それらについては目視で把握するのみであった。安全で確実な飛行を行うためには、ドローンに上空の風向風速を測定する機器を搭載して、あらかじめ上空の空気の動きを観測した後に、目的の観測などを行うことが理想である。ドローンによって上空の気象観測を行うということは本論の目的の範疇を超えるが、事前の状況を把握するのみならず、幅広い用途に応用できると思われる。

③ 地熱地における噴気中のホバリング試験 (1)

鹿児島県始良郡湧水町にある栗野岳八幡地獄の地熱地で試験を行った。地熱地には大小様々な大きさの岩や礫が多く分布しており、平坦で開けた場所のごく限られていた。そのため大型のドローンの離着陸する場所を確保できないために、小型のドローンを使用した。追加荷重の上限が小さいために、搭載可能な測定機器が限定されて目的の測定ができなかった。地熱地の噴気孔上空約 80m で 10 分間ホバリングを行った結果、飛行は安定していたものの機体外部に水滴が多く付着した。噴気中に含まれる水分が原因である。さらに長い時間、より低空で飛行した場合、もしくは繰り返し飛行を行った場合、水分が機体内部に入り込んでトラブルが発生する可能性が高い。防水機能を備えた機体が必要であることが分かった。

④ 阿蘇中岳第一火口上の火山ガス計測 (1)

上記①では中型の機体が適していることが分かり、さらに③では機体に防水機能が必要であることが分かったため、観測を行った 2017 年に新たに発売された防水防塵機能を備えた中型のドローン「Matrice200」を使用した。阿蘇中岳第一火口内の噴気孔上空を飛行させた。離着陸を行った火口縁では風速 5 m/s を超える風が吹き小雨であった。観測を行った上空では、噴気の動きから判断してさらに強い風が吹いていたと予想された。前述の通り、離陸から約 8 分後、ホバリング中に約 30 秒間操縦不能となり暴走した。飛行ログに残された記録から、機体の初期不良以外に考えられる原因は強風によるモーターへの過負荷であった。そのため、強風時にホバリングを継続する場合には、機体を水平方向に回転させてモーターの負荷を分散することによって、特定のモーターに過負荷をかけないなどの対策をとる必要があることが分かった。

⑤ 阿蘇中岳第一火口上の火山ガス計測 (2)

上記④と同様「Matrice200」を使用して阿蘇中岳第一火口内の噴気孔上空を飛行させた。④の結果をうけて、ホバリング中は機体を水平方向に回転させてモーターの負荷を分散させた。ホバリング中には④で起きたトラブルは発生しなかった。ところが 4 回目のフライトで

は離陸直後に上下方向の操縦が不能となり、機体が勝手に上昇を継続した。原因はログと当時の状況から、火山ガス測定用に搭載したポンプから発生する電磁ノイズがドローンの飛行制御に関するセンサーに干渉したと推測された。電磁ノイズの発生源を本体から離れた所に設置するか電磁ノイズを遮蔽するなどによって、干渉を極力小さくするための対策が必要であることが分かった。

⑥ 地熱地における噴気中のホバリング試験 (2)

上記③と同様のフィールドにおいて「Matrice200」を使用した。この機体は防水機能を備えているために噴気からもたらされる水の悪影響は小さい。岩が多く平坦な場所は少ないが、中型機であるためにかろうじて離着陸が可能な場所を確保することができた。また、上記⑤をうけて搭載した気体採取用のポンプを機体本体から離れた脚の部分に取り付けた。2日間にわたって10分以上の飛行を計7回、合計で約111分の飛行を行った。ほとんどの飛行では噴気孔上空数mの場所でホバリングを10分間以上行った。上述の①～⑤の飛行試験などから得ることができたいくつかの知見を元に、機体の種類と飛行方法および測定機器の設置方法を工夫することによって、確実に安定した飛行を行うことが可能となった。

4. 結論

約4年間にわたり、荷重試験から始めて栗野岳の地熱地と阿蘇中岳第一火口という環境が異なる2箇所の火山地域において、地表面の観察や火山ガスの測定のためにドローンを飛行させる試験を繰り返した。通常的环境とは異なる過酷な環境であり、離着陸地点が限定されること、そして特に風と噴気の影響がドローンの飛行や本体に悪影響をもたらすことが分かった。さらに、搭載する計測機器は搭載荷重を増加させるだけでなく、そこから発生する電磁波が本体の制御に影響することも分かった。

搭載荷重と離着陸地点の問題および防水性については、ドローンの開発の進展によってより高度な機能を備えた機種が市場に出て、適切な機種を選定することによって解決した。計測のために長い時間のホバリングが必要であることと、火山という場所に特有の強風という事項の組み合わせによって生じたモーターの過負荷によるトラブルは、機体を回転させるという操縦方法によって解決した。搭載機器から発生する電磁ノイズの影響は本体から遠い所に設置することで解決したが、強風時に機体を安定させるためには機器は本体に近い所に設置することが望ましい。本体の制御に悪影響のない方法で電磁波を遮蔽する方法を見つけることが課題として残された。

以上からドローンの技術の進展によるより高度なドローンの登場と、現地での試行錯誤から見いだされたいくつかの工夫によって、火山という特殊で過酷な環境で、しかも長い時間にわたるホバリングを行うことが可能であることが分かり、それを実証することができた。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 16K00536 及び、平成 26 年度熊本学園大学学術研究助成の助成金を受けて行われた。栗野岳の八幡地獄の観測においては、南洲館の方々に快諾をいただいた。元阿蘇火山博物館学術顧問の須藤靖明氏 (2018 年 7 月逝去) には、本研究を進める上で

大変お世話になった。心より感謝いたします。

参考資料

- (1) 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.
- (2) 首相官邸「小型無人機に関する当面の取組方針」(平成 27 年 5 月 12 日小型無人機に関する関係府省庁連絡会議決定) <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/pdf/shiryoul.pdf>
- (3) 橋本武志・寺田暁彦・森 俊哉 (2018) ドローンによる火山観測 (特集 ドローンの活用と情報発信), 地理 63 (2), 29-35.
- (4) 気象庁「平成 31 年度気象庁関係平成 30 年 8 月気象庁予算概算要求概要」, <http://www.mlit.go.jp/common/001251762.pdf>
- (5) 福岡管区気象台 火山監視・情報センター「阿蘇山の火山活動解説資料 (平成 26 年 11 月)」, https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/14m11/503_14m11.pdf
- (6) 福岡管区気象台「火山名 阿蘇山 噴火警報 (火口周辺) 平成 27 年 9 月 14 日 10 時 10 分」, http://www.jma.go.jp/jp/volcano/forecast_05_20150914101100.html
- (7) 横尾亮彦・宮縁育夫 (2015) : 2014 年 11 月から始まった阿蘇火山中岳第一火口の噴火活動, 火山, 60, 2, 275-278.
- (8) 野田和俊・丸本幸治・新村太郎・須藤靖明 (2018) : IoT センサユニットと小型無人航空機を活用した火山帯ガス測定システム, CHS = The papers of technical meeting on "chemical sensor", IEE Japan 2018 (7-21), 35-38。