



京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute
Kyoto University

一般共同研究

2024GC-05

火山火口上空の In Situ 観測用 Expendable Drone の開発

令和 8 年 3 月

March, 2026

研究代表者 東野 伸一郎

一般共同研究（課題番号：2024GC-05）

課題名：火山火口上空の In Situ 観測用 Expendable Drone の開発
研究代表者：東野 伸一郎
所属機関名：九州大学
所内担当者名：吉村 令慧
研究（滞在）期間：令和 6 年 4 月 1 日 ～ 令和 8 年 3 月 31 日
研究（滞在）場所：九州大学
共同研究参加者数：2 名（所外 1 名，所内 1 名）

研究及び教育への波及効果について

本研究において開発した固定翼および VTOL ドローンシステムは、マルチコプタドローンと比較して飛行時間や飛行距離が大きく、また離着陸の自動化によつて、わずかなトレーニングによつて誰にでも利用できる。使い捨てすら可能な安価なシステムであるため、活動中の火山研究および教育に大きな効果があると期待される。

研究報告

(1) 目的・趣旨

本研究の目的は、まさに活動が進行中の火山の火口上空において、カメラによる観察や火山灰・火山ガスの採取など、その場観測のニーズに対して“使い捨て”すら可能な低コストの固定翼ドローンを開発し、観測機会を増やすことである。盛んに利用されているマルチコプタ型ドローンは、ホバリングができるという利点は有するものの、自重と同じ揚力をプロペラによつて発生させなければならないのに対して、自重のわずかに何分の一の推力によつて発生する飛行速度が生む揚力によつて自重を支える固定翼ドローンの方が、原理的に圧倒的に有利である。すなわち同時間あるいは同距離を飛行するためのバッテリー容量は、マルチコプタ型ドローンよりも小さくて済み低コストにできる。また、現在市販されているマルチコプタ型ドローンはわずかなトレーニングによつて素人でも操縦できるレベルになっているが、使い捨てにするにはまだ高価である。

一方、固定翼ドローンの市販品も価格的にはマルチコプタドローンとは大きくは変わらないが、筆者は固定翼ドローンを機体や制御装置の設計・開発にいたるまですべて内製できるほどに熟知しているため、固定翼ドローンを構成している構成部品、すなわち機体、モータ・スピードコントローラ、バッテリー、制御装置、データおよび画像記録装置などを、それぞれなるべく安価な市販品から個別に選択しインテグレーションすれば、かなり安価にすることができることに注目した。固定翼ドローンの弱点である離着陸が難しいという問題には離着陸を自動化することにより、また、ホバリングができないという問題については、固定翼ドローンに後付けで 4 つのペロペラをマルチコプタのように主翼前後に取り付けた VTOL (Vertical Take-Off and Landing) 機とし、さらにその離着陸も全自動化することによつて、コストを抑えたテストベッド機を開発し、機体や運用方法等についての知見を蓄積して実用化をめざす。

(2) 研究経過の概要

本研究では、口永良部島の噴火時に、屋久島西岸から固定翼ドローンを飛行させて火口付近の観察や

火山灰、火山ガスなどのサンプリングを行えるシステム開発を目標とした。

・要求仕様の決定

口永良部島(標高 657m)の火口は、Fig.1(Google Earth¹)より作成)に示すように屋久島の北西岸に位置する永田前浜あるいは永田いなか浜と呼ばれる砂浜の海岸から約 20km の距離があり、永田前浜または永田いなか浜は、Fig.1 上に示した写真(筆者撮影)からもわかるように、ドローンの発進・回収に都合が良い広い場所である。一般的な固定翼ドローンの飛行速度 75~100km/h であれば、20km という距離は無風ならば約 12~13 分の距離である。風速によって飛行時間は変化するものの、往復時間はやや長めに見積もっても 30 分程度と推定される。これに火口付近での各種ミッションに応じた飛行時間を加えれば、必要航続時間は 45 分~60 分と見込まれる。

Fig.2 に、気象庁発行の GPV データ(気象庁データ²)から、口永良部島付近海面上における気圧面 1000hPa 面(ほぼ海面上)、925hPa(高度 800m)、850hPa(高度 1500m)の 2015 年~2024 年、10 年間の風速予測値をプロットしたものを示す。Fig.2 より、海面上(1000hPa)でも特に冬季には風速 10m/s 以上の日が多く、口永良部島最高標高の 625m よりやや高い高度約 800m(925hPa)では海面境界層の影響により、海面上よりも風速は大きく、20m/s 以上の風速の日も散見される。また、高度 1500m(850hPa)では 900m (925hPa)とほぼ同様の傾向であることがわかる。

Fig.3 には、気象庁による 1991~2020 年までの過去 20 年間の屋久島の気象データ³から、1991 年~2020 年の風向風速全データの月ごとの平均値をプロットしたものを示す。Fig.3(a)は、風向を線の向きで、風速を線の長さで示している。Fig.3(b)は風速のみを取り出した月ごとの棒グラフである。Fig.3(a)の平均風向を見ると、赤で示された 6~8 月はほぼ南風が卓越し、平均風速は約 4m/s と弱い。一方、6~8 月以外は、圧倒的に西~北西風が卓越し(Fig.3 (a)), 平均風速は、青で示した冬季およびマゼンタで示した春季で 5~6m/s、緑で示した秋季で 4~6m/s 前後であり、秋季は風向が北寄りではあるものの、



Fig.1 Kuchinbierabu Island and Yakushima

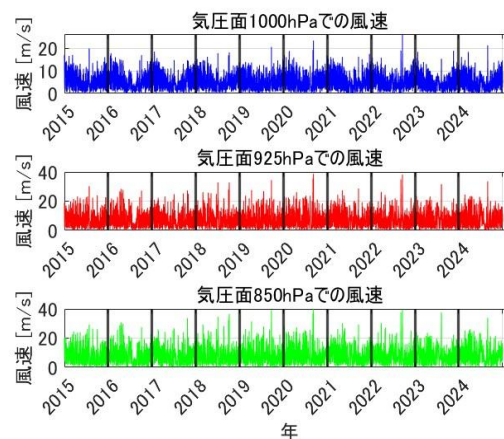


Fig.2 Average wind speed prediction near

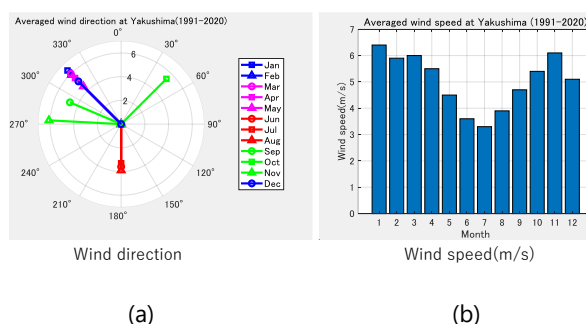


Fig.3 Average wind speed and direction observed at

10 月は東寄り、9 月と 11 月は西よりとばらつきが大きい。Fig.2 と Fig.3 との平均風速には若干違いがあるが、その違いは、Fig.2 は屋久島および口永良部島中間部の高度ごとの風速予測値であるのに対し、Fig.3 は屋久島の観測所での観測値であることによるものと思われる。屋久島には島の北東部および南東部にそれぞれ観測所があるとされるが、これらのデータがどちらの観測所で観測されたものかは不明である。いずれにせよ、西風または北西風の場合には、急峻な地形である屋久島の地形の影響を受けて観測所における観測値は小さくなっている可能性があり、GPV 予測値は海面上の値であるため、やや大きめになっているものと思われる。

これらのこと、すなわち常識ではあるが海面境界層の影響により、海面付近と比較して高度 800m 付近の風速が大きいことや、季節により卓越風の方向が異なることを考慮すれば、ミッションの際の飛行方法として、屋久島の永田前浜あるいは永田いなか浜から離陸後、適当な同一高度で口永良部島を目指す、あるいは屋久島に帰投するのではなく、季節によって往復の飛行高度を有利な高度とすることによって、必要なバッテリー容量を節約できる。また、10m/s を超す風速が比較的頻繁にありうることから、飛行速度があまり遅い機体では実用的でないこともわかる。失速という特性を持つ固定翼ドローンの速度制御は対気速度によって行うため、対気速度と風の速度の合成がある対地速度は向かい風成分が大きくなれば小さくなり、追い風成分が増えれば大きくなる。このことを利用し、より対地速度が大きくなるように、向かい風成分が大きくなる方向に飛行する場合には海面境界層底部の低高度を飛行し、追い風成分が大きい場合には海面境界層上部の高高度を飛行する方式を採用すると有利になる。

・ペイロード重量, サイズ

ペイロードとして現在考えているものは、映像取得用のカメラ、火山灰や火山ガスなどのセンサあるいはサンプラーである。カメラは必要な機能にもよるが、単に映像を取得するだけならば数 10~100g 以下の超軽量・小型のものが多く市販されている。なお、現時点では火山灰や火山ガスサンプラーの詳細なサイズや重量の情報を持っていないが、過去のエアロゾルのカウンターやサンプラーを搭載した経験((東野ほか, 2020))からすると、オンボードのペイロードは小型・軽量化の改良ができるものがほとんどである。このため、これらを考慮してペイロード重量は 1~2kg と仮定することとした。

これらの検討に基づき、安価な市販品の中から要求仕様を満たす固定翼ドローンの機体、モータ・スピードコントローラ、バッテリー、制御装置、データおよび画像伝送装置などのコンポーネントをそれぞれ個別に選択し、インテグレーションすることによってコストを抑えたテストベッド機を開発した。また、難易度の高い離着陸をともに自動化し、さらに VTOL 化することによって狭小地における離着陸も可能なシステムを開発し、実用化の目途を得た。

(3) 研究成果の概要

市販されているドローンは、構成パーツが既にインテグレーションされ、制御パラメータ等も調整済みの状態で販売されている。また機体や制御装置が個別に設計されたものであれば、その設計・製造コストも必要となるためその分高価なものとなるが、今回開発したものは、それらのコストをすべた省いたものである。本研究では、市販の半完成機(翼幅 2m, 総重量約 3kg)をベースとして利用し、機体サイズに適合するモータ、プロペラ、スピードコントローラ、サーボモータ等の機器およびバッテリーと、データ通信および画像通信が同時に可能な通信システム、さらにオープンソースの制御プログラムが利用できる制御装置やカメラを選択して個別に購入し、Fig.4 に示すようなシステムを構築し、使い捨てとなりうる機上システムは 6 万円程度で実現できることを示した。

Fig.4 下部右側に示した地上局ラップトップで機体のセットアップおよび飛行ルートや飛行速度、高度の設定を行うとともに、飛行中には飛行データのモニタおよび画像モニタが可能である。Table1 に機体の諸元を、Table 2 に各システムの概略価格を示す。

機体は、胴体が軟質プラスチックの射出成型品、主翼および尾翼はポリプロピレン製であり、モータやサーボモータなどを取り付ける必要がある安価なラジコン用半完成機である。またスパン(翼幅)が 2.0(m)あり、取り扱いも容易で、ある程度のペイロード搭載が可能なサイズである。飛行速度も 70~100km/h 程度であり、降着装置が無いため、手投げ発進と胴体着陸による回収となるが、降着装置が無い分、軽量になるとともに機体の空気抵抗が減少するため、飛行時間の延長に寄与する。

飛行制御装置としては、ArduPilot⁴⁾と呼ばれるオープンソースの制御コードが実行可能なハードウェアが多く販売されており、その中から固定翼に特化した安価なもの(Fig.4 右上の電子基板、SpeedyBee F405-wing)を選択した。この製品は、電子基板むき出しの状態で販売されており、電源線やサーボモータ、GPS などの外部装置との接続に必要なピンを自分ではんだづけしたり、必要に応じてシャーシ(筐体)に格納するなどの必要があるが、その分安価である。制御コード(ソフトウェア)である ArduPilot は、オープンソースであるため無料であり、また年々継続的に進化、高度化しておりバグフィクスも頻繁に行われている。一般的なウェイポイント飛行(通過させたい位置、高度を指定して飛行させる方式)であれば、十分な機能を持っている。さらに、固定翼ドローンの手投げによる自動離陸や自動着陸機能も有しており、自動離陸~ウェイポイント飛行~自動着陸までのシーケンスをすべて地上局からのコマンドによって実施できることを飛行試験によって確認した。このため、固定翼の離着陸操縦スキルを持たない人にとっても、マルチコプタ並みに取り扱いが簡単である。ただし、着陸方式は通常通り、ある程度の高度から直線飛行をしつつ高度を落として着地する方法であり、センサの精度の問題から着地のためにはある程度の広さのある場所を必要とする。

このため、Fig.5 に示すように、Fig.4 の機体の左右各主翼中央から前後にカーボンパイプを取り付け、クワッドコプターのようにホバリング用モータとプロペラを取り付けた VTOL(Vertical Take-Off and Landing)型のもも開発した。これも離着陸ともに地上局からのコマンドによって完全自動で行うことができる一方、Table2 に示すように、使い捨てとなりうる機上システムは 10 万円を超えるものになる。自動飛行のためには、飛行制

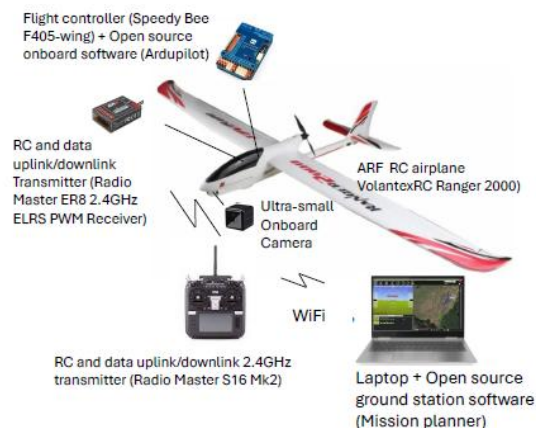


Fig.4 Developed System

Table 1 Specifications

Specifications	Value
Wing span	2000mm
Total weight	2.7kg
Flight time (3cell(11.1V), 8000mAh)	60min
Full automatic flight including take-off and landing	

Table 2 Major components and prices

Item	Price (JPY)
ARF RC airplane (Volantexrc Ranger2000)	20,000
Motor, Speed controller, Battery	20,000
RC and data uplink/downlink Transmitter (Radio Master ER8 2.4GHz ELRS PWM Receiver)	5,000
Flight controller (Speedy Bee F405-wing) + Open source onboard software (ArduPilot)	10,000
Ultra-small onboard camera	5,000
Subtotal (Airplane)	60,000
OPTION : Motors, props, and speed controllers for VTOL	50,000
Subtotal (VTOL)	110,000
RC and data uplink/downlink 2.4GHz transmitter (Radio Master S16 Mk2)	40,000
Total (Airplane, Laptop excluded)	100,000
Total (VTOL, Laptop excluded)	150,000



Fig.5 VTOL version

御装置にかかわる各種制御パラメータの調整が必要であるが、一旦特定の機体でパラメータ調整が終了すれば、同型機体であれば個別に調整する必要はほとんどない。

地上局(Ground Control Station, GCS)のハードウェアには一般的なラップトップでよく、操縦用および機体と地上局間のデータの送受信機能を合わせたトランスミッタ間は WiFi 通信によって機上データのモニタが可能である。トランスミッタは、日本国内の技術基準適合証明(いわゆる技適)を取得済みであり、使用にあたって無線免許等の取得の必要は無い。GCS のソフトウェアは、Audupilot のサイト⁴⁾から Mission Planner と呼ばれる GCS ソフトウェアを、やはり無料でダウンロードして利用可能である。

当初、データおよび画像伝送ができるトランスミッタ(Herelink⁵⁾)の利用を行ったが、構成品の中では最も高価であり、昨今のさまざまなものの値上げラッシュや円安の影響により、漸次価格が上昇してきており、使い捨て可能とはいえないものになったため詳細は割愛する。国内で使用可能なデータおよび画像の伝送システムは、世界的に見てもかなり特殊な日本の電波法によって大きく制限を受けており、今後解決すべき課題の一つである。したがって、Fig.4 に示すカメラは機体機首に搭載した超小型のオンボード記録型のものであり、帰投後にマイクロ SD カードに記録されたものをダウンロードする必要がある。

これらより、特に手動操縦を行わなくとも発進から回収までをすべて自動で行うとともに、画像取得までが可能なシステムが構築できた。また実際に飛行させて大きな問題がないことを確認した。本システム構築に要した費用はすでに Table 2 に示したとおりである。使い捨てになりうるのは地上側のシステム(トランスミッタおよびラップトップを除いたもの)であり、価格にして約 6 万円、VTOL 型としても約 11 万円で使い捨て可能なシステムが実現できることを示した。データ・画像伝送システムの機上ユニットとして、今後より安価なものが利用できれば、画像伝送を行いつつ低コストで実現することが可能であると思われる。さらに、現在一般的に使用されているリチウムポリマー系のバッテリーに代わり、その性能向上と価格低下が進んでいる半固体電池を利用すれば、長時間の飛行についても十分なポテンシャルを持っていると期待される。

今後は、実際の河口付近における飛行実験を実施し、火山ガスや火山灰、周辺の風の影響等についての知見を得て改良する必要があると考えている。

(4) 研究成果の公表

京都大学防災研究所年報に投稿済み

jPGU2026 において発表済み

(参考文献)

- 1) Google Earth, <https://earth.google.com/web/> (accessed 31th May 2026)
- 2) 気象庁データ: オリジナルデータ: 数値予報 GPV(京都大学生存圏研究所, 2025) , <https://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/gpv-original.html>
- 3) 気象庁 | 過去の気象データ検索 (May 2025 アクセス) , https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/view/nml_sfc_ym.php?prec_no=88&block_no=47836&year=&month=&day=&view=p1 (accessed 31th May 2026)
- 4) Ardupilot, <https://ardupilot.org/> (accessed 31th May 2026)
- 5) Herelink, <https://www.japandrones.com/shopdetail/000000000188/> (accessed 31th May 2026)