

安価な火山観測用小型固定翼ドローンの開発

Development of an Inexpensive Fixed-wing Drone for Volcanic Observations

東野伸一郎⁽¹⁾・吉村令慧

Shin-Ichiro HIGASHINO⁽¹⁾ and Ryokei YOSHIMURA

(1) 九州大学大学院工学研究院 航空宇宙工学部門

(1) Department of Aeronautics and Astronautics, Kyushu University

Synopsis

Drones have been said to be suitable for 3D missions, that is, dull, dirty, and dangerous missions. Volcanic observations, especially around a crater of an active volcano using drones are obviously one of the dangerous missions, and quite appropriate missions to use drones. However, the more dangerous the mission becomes, the higher the likelihood of losing or damaging the drone becomes. If an expensive drone is lost, economic and emotional loss becomes greater. Thus the authors tried to establish inexpensive volcanic observation system using a drone with no hesitation to use by integrating an inexpensive off-the-shelf parts which compose a fixed-wing drone such as a motor, an electronic speed controller, a flight computer, an airframe, and so on. The final goal is to establish an observation system using a fix-wing drone that can take off and land at the west sand shore of Yakushima and perform several missions such as in-situ visual observation of the crater and a collection of ash and gas at Kuchinoerabujima in Kagoshima prefecture. A current status of the fixed-wing-drone-based visual observation system which was built using off-the-shelf inexpensive products and the issues to be solved for practical use in the future are summarized.

キーワード: 火山観測, 固定翼ドローン, 使い捨て, 安価

Keywords: volcanic observation, fixed-wing drones, expendable, low-cost

1. はじめに

今日では、いわゆるマルチコプタをはじめとするドローンが、映像撮影や物品輸送、科学観測、測量、構造物点検、被災地観測、軍事利用などさまざまな目的のために利用されている。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、機体損失に対して躊躇することなく利用できるようにして観測機会を増やすことである。ウクライナ戦争において、「段ボールドローン」なるものが使用されたとの報道(The Conversation, May 2025 アクセス)は記憶に新しく、いかにも使い捨てを前提としていることを連想させる。しかしながら報道によれば機体価格はUS\$3,500(1US\$=¥150として約50万円)程度であり、確かに、通常のドローンと比較すると安価である。

しかしながら、50 万円を使い捨て可能と考えられるかどうかの判断は人にもよる。機体自身としては、安価な市販のいわゆるラジコン用量産機であれば、せいぜい数百 US\$であるため、低価格化のために段ボール製の機体を使用することは本質的ではない。むしろドローンの頭脳である制御装置やモータ、バッテリー、通信装置などをいかに安価にできるか、が使い捨て可能すら可能なレベルの安価なドローン開発のポイントとなる。

第 1 筆者は、極低温である南極において高高度からエアロゾルサンプルを回収するための固定翼ドローン(東野ほか, 2020)や広域磁場探査用ドローン(Funaki et al., 2014), 逆に高温環境であるエチオピア・アフール凹地において広域磁場探査を行うための航続距離 500km を越える固定翼ドローン(石川ほか, 2020)などをその制御システムも含めて独自開発し、いずれも現地における観測に同行してその有用性を実証してきた。これらの固定翼ドローンの開発においては、温度や運用環境への耐性や信頼性を考慮し、機体設計もミッションに合わせて行い、特注品として製作しているため、低コストで実現されているわけではない。しかしながら、それらの経験を通して得た知見を利用することによって、逆に耐性や信頼性がある程度損なわれることは覚悟しつつ、低コストで実現することを目指す。現在はマルチコプタあるいは eVTOL electric Vertical Take-Off and Landing, 垂直離着陸用の電動推進機と前進用の推進装置を個別に持つもの)が全盛であるが、いずれもバッテリー容量不足の問題を抱えており、バッテリー技術のブレークスルーを待っている状態である。ある程度の航続距離が必要となる場合には、やはり固定翼ドローンに分があるため、本研究では固定翼ドローンを対象とする。

本システムの最終開発目標は以下のとおりである。

- ① 屋久島からの離着陸を前提として、口永良部島火口の観測ができること。
- ② In Situ 観測に必要なペイロード搭載を実現できるようにすること。
- ③ 固定翼であっても、離着陸を自動化すること。
- ④ 低コスト化実現のために、ある程度信頼性を犠牲にしても安価な市販品を徹底的に利用すること。
- ⑤ 火口からの熱上昇風や山特有の風の特性に耐えられる耐空性のある程度備えること
- ⑥ 最終的に、実際の火山火口において有用性を実証確認すること。

本稿では、これらの目標に対する現時点までの検討・開発状況について報告する。



Fig.1 Kuchinbierabu Island and Yakushima Island(Google Earth より作成, 写真は筆者撮影)

2. 要求仕様の決定

航続性能

口永良部島(標高 657m)の火口は、Fig. 1 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、往復時間はやや過大に見積もっても 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~

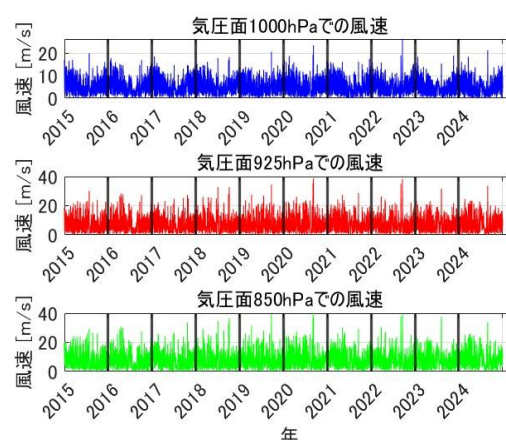


Fig.2 Average wind speed prediction near Kuchinoerabu Island from 2015 to 2024

60 分、航続距離として 70～100km 程度あれば十分であると考えられる。

速度，上昇性能

Fig. 2 に、気象庁発行の GPV データ (気象庁データ：オリジナルデータ (2025)) 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

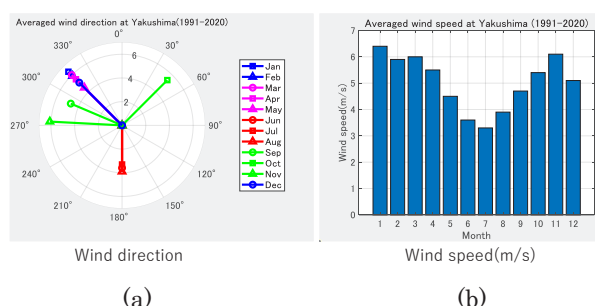


Fig.3 Average wind speed and direction observed at Yakushima

(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 (気象庁 | 過去の気象データ検索, 2025) 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、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法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。

3. 小型固定翼ドローンのテストベッド

機体については、前節で述べたように比較的強風に強い機体、すなわち巡航速度の大きな機体を準備する必要があることがわかったが、まずは固定翼ドローンを構成している構成部品、すなわち機体、モーター・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を、それぞれ安価な市販品から別々に選択し、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す

ることを試みた。市販されているドローンは、これらが既にインテグレーションされ、制御パラメータ



Fig.4 Fixed-wing drone system for video transmission(Picture by the Author)

Table 1 Specifications of the subsystems

Item	Specifications /Manufacturer
Airframe	Volancex Ranger2000
Span	2.0(m)
Total mass	3.0(kg)
Propulsion	Electric motor
Battery cap.	5000(mAh)
Flight controller	
Hardware	Mateksys F405-wing
Software	Ardupilot
Data and movie transmission system	Herelink
FPV camera	SIYI R1M

等も調整済みの状態で販売されており、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。

Table 2 Prices of principle components

Item	Price(JP¥)
Airframe	33,000
Motor, ESC, prop.	30,000
FPV camera	15,000
Flight controller	20,000
Onboard data & movie transmitter	100,000
Subtotal of onboard system	198000
Ground data & movie transmitter	100,000
Total	298,000

今回は、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た。

Fig.4 上部左側に示したコントローラで、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。Fig.4 上部の右側に示しているのは中央付近がデータ通信装置、右側が飛行制御装置である。Table 1 に、各システムの名称や概略諸元を、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、降着装置が無い場合、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、Ardupilot (Ardupilot (2025))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、Mateksys 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、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になっている。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。自動飛行のためには、飛行制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、デフォルトで一般的な制御系が組み込まれており、筆者らが通常行うような機体の数学モデルからシミュレーションモデルを構築し、制御系設計を行う必要は無い。また、制御パラメータについてはデフォルト値が設定されているが、これは機体特性によって調整の必要がある。手動飛行できるスキルを持っていれば、飛行中に手動飛行と自動飛行を切り替えて、制御パラメータを調整することも可能である。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地上側データおよび画像トランスミッタが該当し、ノートパソコンなどを準備する必要は無い。これは通常のノートパソコンあるいはタブレットとしてのハードウェアに、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ものであり、OSには Android を採用している。また、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、Ardupilot のサイトから 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。

データおよび画像のトランスミッタが Table2 に示した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、昨年度の購入時から漸次価格が上昇してきている。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。また、カメラは機体機首に搭載しており、機体前方ビューの画像伝送が可能である。

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、画像伝送

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 Table 2 に示したとおりである。使い捨てになりうるのはデータ・画像トランスミッタの地上局(GCS)を除いたものであり、機上システムとしては、価格にして約 20 万円弱で使い捨て可能なシステムが実現できることが示された。データ・ビデオ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、さらに低コストで実現することが可能であると思われる。

4. 課題

今後の課題として、機体及び運用法、航空法に則った運用、電波法の制限、3つの領域におもな課題があると考えている。

機体および運用法の課題

今回はフィージビリティスタディ的に、火山灰・火山ガスのサンプラーを除くコンポーネントを市販の安価なものから選択し、インテグレーションすることによってテストベッド機を開発した。しかしながら、今回採用した機体のペイロードスペースは十分とは言い難く、今後の火山灰・火山ガスサンプラーの搭載を考慮すると、今回の機体よりもひとまわり大きなものが必要になると思われる。機体サイズが大きくなると、一般的には操作や取り扱いが困難になるのではないかと思われがちであるが、実際には、機体サイズが大きい方が応答の時定数が大きく(ゆっくりになり)、操作は容易である。また、飛行速度は機体重量によって決まるが、機体サイズが大きくなれば飛行速度は大きくなり、風等の外乱には強くなる。運搬や取り扱い上可能な範囲(筆者の経験によればスパン3mまで)であれば、やや大き目の機体の方が適している。

今回利用したような、安価ないわゆる市販のラジコン用量産機体は、機体材料がプラスチックやポリプロピレンなどの熱に弱い材料が採用されていることがほとんどであり、これが火口付近の高熱に耐えられるとは思えない。機体材料としてFRP(Fiber Reinforce plastic, 繊維強化プラスチック)を利用すれば、ある程度の温度には耐えられると思われるが、価格が上昇してしまうというジレンマを抱えている。この問題の解決もひとつの大きなポイントになりそうである。

運用法に関しては、周辺の風向風速データから、効率の良い飛行方法が示唆された。すなわち、風向・風速によって屋久島〜口永良部島間の飛行高度を変えることである。さらには口永良部島のような孤立峰の風上側斜面には斜面上昇風が存在し、火口上空

には熱上昇風も存在するため、低高度からの高度上昇のために利用すれば、むだなエネルギーを使用しなくとも済む。特に後者は、温度耐性との兼ね合いの問題はあるものの、それらを利用した効率的な運用も可能であると考えられる。今後、シミュレーション等による検討によって、効率的な運用法について検討する必要がある。

航空法の課題

航空法のなかで、無人航空機に関わる部分は近年急速に整備されてきてきた。そのほとんどが米国FAAの規則に準拠しているが、2025年6月からは、それまで免除されていたリモートID(機体の同定が可能なID発信装置)を搭載することが必要である。そのうえで機体登録を行い、有人機の機体後部側面や主翼下面に書いてあるJAxxxxなどの番号と同様の機体登録番号を取得し、機体に記載する必要がある。飛行可能な領域も航空法によって細かく定められており、特に今回のミッションに関連するものとしては、「地表または水面から150m以上の飛行を行う場合」と、「目視外飛行を行う場合」のふたつがあり、これらは「特定飛行(用語集(2025))」として一般の飛行と区別されており、特定飛行を行う場合には、飛行するたびに飛行許可申請を行い、承認を得てから飛行する必要がある。あるいは、包括申請と呼ばれる方法によって、場所や日時を特定せずに1年間の許可を得ておき、飛行前日に詳細を航空局に通報することによって飛行させる方法もあるが、いずれにしても事前の飛行許可申請、承認が必要となる。火山活動が活発になってから飛行許可申請を行っていたのでは間に合わないため、必然的に包括申請が必要となる。なお、特定飛行に該当する場合、飛行する領域に「立ち入り管理措置」を実施するかどうかによって、管理措置を実施するカテゴリーⅡと実施しないカテゴリーⅢが存在する。さらに、自動飛行させる領域が無人の場合であって、今回開発したような自作機で飛行させる場合には、レベル3.5と呼ばれる方式での飛行許可申請・承認が必要である。また、この場合には、オペレータには無人航空機の操縦者資格が求められる。屋久島〜口永良部島の間に立ち入り管理措置を取ることは現実的ではなく、「立ち入り管理措置なし」のカテゴリーⅢとなるとともに、いつ噴火が起きるのかはわからないため、年間を通したレベル3.5での包括申請をしておき、直前に通報して実施することが可能であると考えられる。

電波法の課題

日本国内において、ドローンの運用にとって大きな障壁となってきたもののひとつは国際的にみても厳しすぎる電波法である。免許なしで運用できる無線モデムの出力は10mWであり、八木アンテナを利用

しても到達距離はせいぜい5kmである。第3級陸上特殊無線技士免許を有していれば、1W程度の送信電力を持つデータ通信あるいは画像データ通信の運用は可能であるが、国内で入手可能なデータ通信用のモデムは試験局としての運用になるため、常用には向かない。また画像伝送のためには国際標準である5.8GHz帯とは異なる5.7GHz帯の特殊な機器を利用する必要がある、さらにJUTM(Japan Unmanned system Traffic and radio Management consortium)という組織に入会し(入会金10万円)、使用時に電波の割り当てを受ける必要があるなど、気軽に運用できるとは言えない。

国内のLTE回線を使用したモデム(いわゆるLTEモデム)を利用する方法もある。通常のLTEと異なり、「LTE上空プラン」なるものを契約する必要があり、約5万円/月の利用料によってデータ量無制限で利用することができ、屋久島〜口永良部間は一応LTEエリアとしてカバーされているようである(サービスエリアマップ NTT Docomo(2025))。しかしながら、機体を損失するたびにsimを購入する必要があると考えられるため、あまり現実的ではないかも知れない。

もう一つの可能性は、Starlink(Starlink(2025))およびauのStarlink Direct(au Starlink Direct(2025))である。2025年11月時点では、法的には問題ないもののプロバイダ側が国内の上空利用をまだ認めていないが、利用可能となるのは時間の問題であろう。ただしStarlinkのアンテナがまだ30cm角程度と大きく、固定翼ドローンに搭載するには何らかの工夫、たとえばアンテナの大きさよりも大きなデルタ(三角)翼を採用し、翼内部にアンテナを内蔵するなどの方法によって利用できる可能性はある。利用料金も月額¥6,500〜¥11,500程度である。しかしながら、消費電力が75〜100Wとかなり大きく、大容量のバッテリーを搭載するため現時点ではあまり現実的ではない。

携帯電話でありながら、Starlinkと提携できるau Starlink directは有望であるが、現時点ではテキストメッセージのみの取り扱いであり、特にStarlink directを利用するための別料金も不要である。将来、データ通信や画像通信も扱えるようになれば、auのスマートフォンを搭載すればよくなるため、かなり有望と思われる。

5. おわりに

本稿では、火山火口の画像取得や、火山灰、火山ガスなどのその場観測に躊躇なく使用できるような安価なドローン開発を行うことを目的とし、特に屋久島西岸から口永良部島火口をめざして飛行させる固

定翼ドローンのテストベッド開発を行い、飛行試験によって基本機能の確認を行うとともに、今後に向けての課題抽出を行った。固定翼ドローンのおもな構成部品、すなわち機体、モータ、スピードコントローラ、プロペラ、バッテリー、制御装置ハードウェア、カメラ、データ・映像伝送装置などを、それぞれ安価な市販品のなかから選択し、インテグレーションを行った。心臓部である制御装置のソフトウェアや地上局管制装置のソフトウェアについては、オープンソースであるArdupilotおよびMission Plannerを利用し、機体喪失しても約20万円弱で済む程度のシステム開発を行い、火山以外の場所における通常の飛行試験によってその機能確認を行った。

今後は、第4節で示したいいくつかの課題、すなわち機体および運用法に関する課題に取り組むこと、航空法におけるレベル3.5の飛行をめざすこと、また、電波法に抵触しないより実用的なデータ・画像伝送の方法を模索していく。さらに、阿蘇山や桜島など、福岡市から比較アクセスしやすい火山において、実際に火口付近を飛行させての機能確認と、さらなる課題抽出を行い、eVTOL化も視野に入れて実用的なシステムとすることを目指す予定である。

謝辞

本研究は、京都大学防災研究所、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”, 2024-2025)による補助を受けて実施したものである。ここに謝意を表します。

参考文献

石川 尚人・吉村 令慧・Tesfy KIDANE・東野 伸一郎・加々島 慎一・Ameha. M. MULUNEH・望月 伸竜・北川 桐香・藤井 昌和・角屋 守・岩本 光弘・小原 徳昭・乙藤 洋一郎・船木 實・小木曾 哲 (2020) : 「エチオピアの大地で海洋底拡大現象を探る」ーエチオピア・アフール凹地、プレート拡大域での地球電磁気学的探査(調査概要報告)ー, 京都大学防災研究所年報(No63B), pp.-93-99.)
東野 伸一郎・林 政彦・梅本 紫衣奈・長崎 秀司・西村 大貴・尾塚 馨一・白石 浩一・長沼 歩 (2020) : 新しい気球分離型無人航空機大気観測システム開

発と昭和基地上空夏季自由対流圏のエアロゾル時空間変動, 南極資料, 65, pp.21-44.

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/ctrn/view/nml_sfc_ym.php?prec_no=88&block_no=47836&year=&month=&day=&view=pl

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>

サービスエリアマップ NTT Docomo (May 2025 アクセス),

https://www.docomo.ne.jp/area/service_area/map/?icid=CRP_AREA_service_area_txt45_to_CRP_AREA_service_area_map&rgcd=09&cmcd=5G&scale=250000&lat=31.556678&lot=130.560261

【用語集】特定飛行とは(May 2025 アクセス) 意味/解説/説明 ドローンジャーナル, <https://drone-journal.impress.co.jp/docs/words/1185665.html>

au starlink direct (May 2025 アクセス), <https://www.au.com/mobile/service/starlink-direct/>

Ardupilot (May 2025 アクセス), Ardupilot, versatile, Trusted, Open, <https://ardupilot.org/>

The Conversation (May 2025 アクセス) : Ukraine war: Australian-made cardboard drones used to attack Russian airfield show how innovation is key to modern warfare, <https://theconversation.com/ukraine-war-australian-made-cardboard-drones-used-to-attack-russian-airfield-show-how-innovation-is-key-to-modern-warfare-212629>

Funaki,M., Higashino,S., Sakanaka,S., Iwata,N., Nakamura,N., Hirasawa,N., Obara,N., and Kuwabara,M. (2014): Small unmanned aerial vehicles for Antarctic research: Results of aeromagnetic surveys in the South Shetland Islands, Antarctica, Polar Science, Vol.8, pp.342-356, 2014.

Google Earth (May 2025 accessed), <https://earth.google.com>

LTE 上空プラン(May 2025 アクセス), <https://www.docomo.ne.jp/charge/lte-joukuriyou-plan/>

Starlink (May 2025 アクセス), <https://www.starlink.com/jp>

(論文受理日 : 2025 年 8 月 29 日)