

## 火山観測ツールとしての無人観測機の開発

佐伯和人\*・大場 武\*\*

(2009年12月7日受付, 2010年5月14日受理)

Development of an Unmanned Observation Aerial Vehicle (UAV)  
as a Tool for Volcano Survey

Kazuto SAIKI\* and Takeshi OHBA\*\*

An unmanned aerial vehicle (UAV) named "Osaka University Sky-1" was developed as a field survey tool based on the concept that the researchers and the staff of the municipality who investigate volcanic field were able to operate it easily, safely, and at low cost. Sky-1 is a radio control airplane with wingspan of 90 cm. It is controlled by three channel signal for motor, aileron, and elevator. Remote control distance is about 400 m limited by human distance vision. The strong points of Sky-1 are as follows; custom-designed manufacturing of the black polypropylene foam for the airframe material, an electric ducted fan is employed to secure the safety, portable on one's back because of the new design of the airframe division, the payload that reaches 300 g is secured, and achievement of the high flight performance against the strong wind around 10 m/s. Field test for Sky-1 was performed at Kusatsu-Shirane volcano on 15 May 2008. During the field tests, Sky-1 obtained movies of the crater lake and data of H<sub>2</sub>S gas concentration in the air. A training course in assembly and operation of Sky-1 was held at Osaka University and Kansai Mokei Airport (KMA) on 3-4 August 2008. By the field test and the training course, we proved that the development concept of Sky-1 had been achieved.

**Key words:** Unmanned Aerial Vehicle (UAV), radio control, airplane, volcanic survey

## 1. はじめに

近年, 小型軽量の遠隔操作無人飛行機や自律航行無人飛行機の製作が可能となり, 軍事目的, 森林調査や火山防災等, 空中撮影が効果的な様々な分野で活躍している。例えばヤマハの自律航行型ヘリは, 国土交通省らとの連携で, 2000年に有珠山火山観測, 2001年に三宅島火山観測を行い空中撮影で成果をあげている (Nonami, 2007)。また, 被災地のモニタリングに使われるものでは, 超小型で自律飛行を備えたものもあり (Nonami, 2007), 将来的には野外調査のツールに進化すると考えられている。スカイリモート社のカイトプレーンシリーズは, 高機能なものから安価なものへとシリーズを広げ, 空中撮影や大気観測で多くの実績を持ち, 国内では最も成功している無人観測機であると言える。また, 観

測機器を搭載して比較的手軽に運用されているものに, 林産資源調査用のラジコン飛行機がある (例えば, 古川・他, 2004)。

無線操縦飛行機運用によって火山で試料採取した例としては, 国内では桜島において, 無線操縦飛行機に真空瓶を搭載し, 上空で真空瓶に取り付けた毛細管を遠隔操作で折ることで, 噴煙中あるいはその周辺の火山ガスを採取することに成功した例がある (小坂・小沢, 1975), さらに同様の装置で1991年に雲仙普賢岳においてもガス採取がなされた (Nogami *et al.*, 2001)。最近では, 伊の火山学者が無線操縦モータグライダーを使ってストロンボリ火山の火山灰を採取した例がある (Taddeucci *et al.*, 2007)。また, 無線操縦機によって火山の空中撮影をした例としては, 無線操縦ヘリコプターで三原山火口底およ

\* 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-1  
大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻  
Department of Earth and Space Science, Graduate  
School of Science, Osaka University, 1-1 Machikaneyama,  
Toyonaka 560-0043, Osaka, Japan.

\*\* 〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 4-1-1  
東海大学理学部化学科

Department of Chemistry, School of Science, Tokai  
University, 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa  
259-1292, Japan.

Corresponding author: Kazuto Saiki  
e-mail: ksaiki@ess.sci.osaka-u.ac.jp

び溶岩池を観察した例(木村, 1974)や, 無線操縦水上飛行機で活動中の西之島新島の写真観測を行った例(青木・小坂, 1974)がある。

しかし, これらの火山地域や他の地域で運用されてきた自律飛行機や無線飛行機の多くは, 2章で述べるように, 高価であったり, 高度な操縦・整備技術を要するものであったりするなど, 手軽に運用できるものではない。また, 衝突など安全性や運用に関しても様々な問題を有している。

本稿で報告する新しい飛行機は, 地質学研究者や自治体職員が単独で火山や峡谷等の危険な地域を調査する時の補助ツールとして開発された“安全で手軽に運用できる無人観測飛行機”である。例えば活火山に近づく際に有毒ガスの濃度をあらかじめ広範囲に測定しておいたり, 火口や峡谷等, 簡単に近づけない場所での噴気活動や, 地すべり等の災害予兆を上空からの空撮で早期に発見したり, 火山ガスや火山灰を採取するような運用を想定している。本研究では既存の無人機が重視していなかった数多くの問題点を解決し, 調査者が単独で運用する“道具”として完成度の高い無人観測飛行機を開発した。本稿では機体の特徴を紹介するとともに, 草津白根山で行った実証試験や, 大阪大学で実施した機体製作飛行講習会を通して, 本機の開発構想が実現されているかを検証する。

## 2. 既存の観測機の問題点と開発の構想

既存の無人観測機が安全で手軽な道具になれない原因は, 「墜落の問題」と「運用上の問題」にある。「墜落の問題」は以下の3点である。(1) 人に怪我を負わせたり, 器物を破壊する可能性の問題「衝突問題」。(2) 崖や火口等で回収不能に陥った時に, 景観に与える損害の問題「景観問題」。(3) 限られた研究費で運用する際に, 予算的に研究続行不可能になる問題「予算問題」。そして, 「運用上の問題」は以下の3点である。(1) 調査者が自分で操縦できない問題「操縦問題」。(2) 調査フィールドまで運べない問題「運搬問題」。(3) 調査者が自分で整備できない問題「整備問題」。「衝突問題」に関して, 無線操縦飛行機は危険であり, 死亡事故も起きている。国内では, 2003年に兵庫県明石市で無線操縦ヘリコプター(全長1.5 m, 重さ約5 kg)を65歳男性の頭部に衝突させ死亡させた73歳男性が書類送検された事例が報道されている(神戸新聞2005年2月2日)。また, 2005年には栃木県佐野市で無線操縦ヘリコプターが5歳の男児に衝突して死亡させるという事故も起きている(朝日新聞2005年10月24日)。無線操縦機の墜落が日常の出来事であるのに対して死亡事故が少ないのは, 操縦者が墜落して

も危険のない場所を選んで飛行しているからに過ぎず, 不適切な場所で操縦すると電波障害や機械のトラブルによって簡単に事故は起きる。また, 無線操縦飛行機のプロペラでエンジン始動の際等に操縦者自らが手を怪我する事例は, 統計はないが多くの無線操縦飛行機愛好家が経験しており, 著者自身も経験がある。結局のところ, 重量が数kg以上あるものや, 回転するプロペラが露出しているものは, 第三者がいるところで飛ばすことは危険であるし, 操縦者も細心の注意を払わなければ負傷するおそれがあるということである。林産資源観測用に使用されている中・小型無線操縦機は墜落して人に当たると大怪我を負わせる可能性が高いものの, 森林観測用の飛行機の運用場所は, たいいてい観測者の管理する森林であり, 第三者の立ち入りを制限できる場所であるから, 運用が可能なのである。「景観問題」に関して, 火山地帯は観光地であり, 景観は重要な観光資源である。一方, 従来の観測機は視認性の高い明るい色に塗装されているため, 火口や崖の途中などの回収不能な場所の玄武岩質～安山岩質の岩肌に墜落した際, 明るい色の機体の残骸が残ると数km先からもゴミとして認識されてしまう。「予算問題」は, 無人機利用が手軽な道具として普及しないもっとも大きな原因であろう。研究者が使うことを前提として市販されている無人機の中で最も安価なカイトプレーンでも250万円なので, 数百万円程度の調査予算規模では一機損失ただけで運用を中止せざるを得ない。山腹で無人機を飛ばし損失した際, 林産関連調査目的であれば, 研究者と関連のある組織の管理地での飛行であるので, 不時着をしても回収できる可能性が高い。しかし, 火山等, 地質学調査のフィールドの場合は, 人の入り込めない場所が多いため, 場所によっては回収できない可能性も高い。

次に運用の問題を検討する。「操縦問題」に関して, 既存の飛行機タイプの観測機で, 観測機の開発グループ以外の第三者の操縦を想定したものは前述のカイトプレーンシリーズのみである。無線操縦飛行機は安全に飛行させるために, ある程度の練習を要するため, 道具として利用したい研究者には, その練習時間や練習による機体の損失が負担となろう。「運搬問題」に関して, 既存のほとんどの観測機はエンジン機であるために, 機体のみでなく始動に必要なバッテリーやスターター等, 様々な道具を携行しなくてはならない。また, エンジン機の場合は機体が燃料に混合する潤滑油で汚れるために, 車に乗せるにも注意が必要である。一方, 電動飛行機の場合は携行する道具は少なくないので, 問題になるのは機体そのもののサイズである。飛行機の翼は場所をとり, かつ, 軽量化のために強度が低いので, 山中で持ち歩くこ

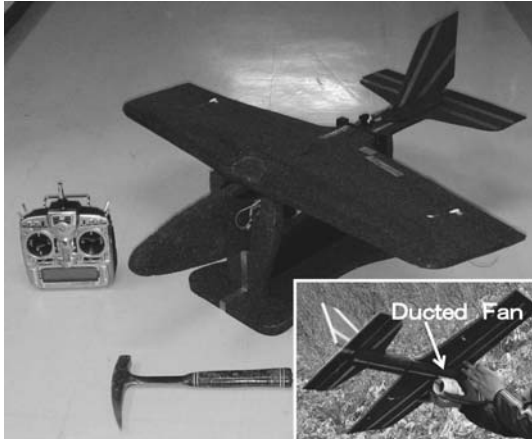


Fig. 1. Photographs of Osaka University Sky-1. Wing span is 90 cm. The position of a ducted fan unit is indicated with a white arrow.

とは、通常困難である。「整備問題」に関して、模型飛行機の機体は着陸の衝撃で簡単に壊れたりひずんだりするので、修正する必要があるが、これは模型飛行機製作の経験が必要であるため、使用者にとって操縦を覚える以上に高い障壁となる。

開発構想は、上記の問題を解決した真に安全で手軽な道具としての無人観測機を製作することであった。

### 3. 機体の概要

開発された機体、「大阪大学 Sky-1」の外観を Fig. 1 に、機体の仕様を Table 1 に示す。Sky-1 は小型の無線操縦飛行機であるが、既存の機体の様々な問題点を解消している。「衝突問題」については、発泡ポリプロピレン (EPP) という、軽量で柔らかい素材で機体をつくり、機体を動力バッテリー込で約 500 g という軽量にしあげることで解決した。発泡ポリプロピレンは 2003 年頃から無線操縦飛行機自作愛好家の間で使われ始めた素材であり、発泡スチロールよりも変形に対する復元力が強い。現在、玩具店で売られている子供用の無線操縦飛行機は、ほとんどが発泡ポリプロピレン素材である。発泡ポリプロピレンだけでは強度が不足するところは部分的にヒノキ棒やカーボンファイバー素材を埋め込んである。また、手投げ離陸や、飛行中に人に衝突した際に人体を傷つけないよう、プロペラが外に露出せず、筒の中で小型のプロペラを高速回転させるタイプのダクトファンという推進装置を使っている。ダクトファンはそもそも時速 100 km を超える高速飛行をするジェット機型の無線操縦飛行機用の推進装置なので、安全性を目的に使用す

Table 1. Specifications of “Osaka University Sky-1”.

Name:	Osaka University Sky-1 (Basalt-color)
Maximum length:	90 cm
Maximum width:	90 cm
Airframe Material:	Expanded polypropylene (EPP)
Weight:	450 g (with battery)
Payload:	300 g maximum
Battery:	11.1V Lithium-polymer battery
Propulsion:	Ducted fan with brushless motor
Thrust:	500 gf
Control:	3 ch (motor, aileron, elevator)
Technological control range:	1 km
Actual control range:	400 m (limited by human ability)
Flying time:	ca. 5 min. (with standard battery)

ることは逆転の発想である。機体の形状はジェット機のようなものであるが、機体重量に対して翼面積が大きいことから、低速での飛行が可能である。また、ダクトファンの推進力が機体重量を上回っているため、風に推力が負ける心配が少なく、さらに最大 300 g の観測機器を搭載することができる。ダクトファンの静止推力は約 500 g 重あり、機体の運動性能の一つの指標である推力÷重量の比は、観測機器のない状態で 100%、最大積載時で約 60% である。無線操縦飛行機でスポーツ機と呼ばれる軽快に飛行する機体で 50%、アクロバット機で 75%~100% というデータから、決して鈍重な機体ではないと言える。関西模型飛行場でのテスト飛行において、風速 10 m/s の環境下でも飛行可能であることを確認した。

「景観問題」については、回収不能な場所、例えば、火口や崖の途中などに墜落した際に気体の残骸を目立たなくするよう、機体素材として、内部まで黒色に染色した発泡ポリプロピレンを JSP モールディング社に特注して製造した。内部まで黒色の機体は、墜落分解しても、玄武岩質や安山岩質の火山の山肌に溶け込む。この保護色のことを環境ストレス性能と命名する。この特注品は少量生産できないため、現在大量の材料を常備する一因ともなっている。

「予算問題」の対策としては、機体コストを搭載観測機込みで 10 万円以内を目標に開発を行った。たとえば、ある研究者が科学研究費補助金等で 300 万円程度の予算を運用するとして、機体 3 機を 30 万円程度で準備できれば、無人観測機を研究の支援の道具として気軽に活用することができるであろう。現在、墜落して失われる、観測機器を除いた機体部分の材料費は 3 万円程度である。機体以外に必要なものは、送信機 (約 3 万円)、バッテリー充電器 (約 1 万円)、交換用バッテリー (一個 4000 円前後) である。観測機器については後述する。

次に「運用上の問題」への対応を解説する。「操縦問



Fig. 2. Disassembling instructions for Sky-1. Sky-1 can be disassembled for its transport and reassembled on site.

題」の対策は、機体の設計と、教育プログラムである。Sky-1は、研究者自身が操縦して運用することができる。そのことで、運用コストが0に近づき、運用の柔軟性もあがる。機体の構造は、製作しやすく、操縦しやすく、壊れにくいものにした。発泡ポリプロピレンの機体は乱暴な着陸でも破損しにくいいため、操縦訓練が気軽に行える。また、プロペラが露出した従来の機体の場合は、初心者が操縦すると着陸時に頻繁にプロペラが折れることがある。しかし、ダクトドファンを採用したことにより、内蔵プロペラが折れる心配はほとんどない。さらに、無線操縦シミュレータ用データや運用教育プログラムも開発した。詳細は6章で述べる。

「運搬問題」は、用途の範囲を左右する重要な要素である。Sky-1は電動ブラシレスモータを動力とすることで、エンジン始動の道具を不必要にするとともに、機体が油で汚れないので持ち運びがし易くなった。なお、ブラシレスモータとは、従来のブラシモータが整流子によって機械的に電磁石の極性を反転していたものを電子式にすることで、高回転数運用・低ノイズ・メンテナンスフリーを実現した高性能モーターである。また、可搬性を向上させるため、翼と胴体が分割できるようにしてある。一般には主翼と胴体を分割するものが多いが、胴体についてままの水平尾翼が場所をとり、また壊れやすい。そこで、主翼と水平尾翼の水平部分と、機体と垂直尾翼の垂直部分とを分割できる特殊な分割方式の機体を開発した (Fig. 2)。主翼と水平尾翼を一体とする分割方式は著者の一人 (佐伯) が初めて考案したものである。この新しい分割方式によって複数の機体を厚さの薄い箱に収納できるようになり、数機分の機体を背負って登山するような運用も可能となった。

「整備問題」は使用者に機体を託す上で最も解決すべき問題である。Sky-1の翼は、翼底面が平面となるように設計してある。翼底面形状が平面なので、製作が容易となり、飛行前日の主翼のねじれチェックも、机や床の平面を利用して正確に行うことができる。また、破損した際の修復もたやすい。Sky-1の機体は構造も単純であるため、発泡ポリプロピレンの板と、補強材を両面テープと瞬間接着剤で接着してだけで完成する。使用者は著者らの用意する教育プログラム (後述) によって、

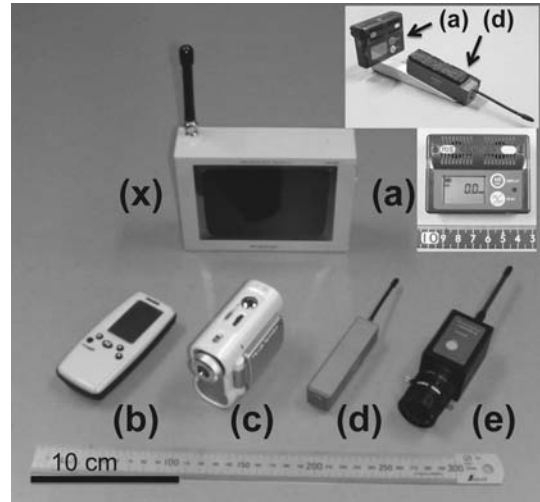


Fig. 3. Observation equipments installable on Sky-1.

(a) H<sub>2</sub>S sensor, (b) GPS, (c) SD-video camera, (d) Wireless camera (150 m range), (e) Wireless camera (500 m range), and (x) Wireless camera receiver. Details for each equipment are shown at Table 2.

Table 2. Equipments onboard Sky-1.

Equipments	Weight (g)	Cost (yen)
(a) H <sub>2</sub> S sensor, Cosmos XS-2100	69	70000
(b) GPS, Garmin Geko201	89	20000
(c) SD-video camera, SEGA-TOYS Movie Carrier	151	12000
(d) Wireless camera (150 m range), RF Tiny-3RH	56	50000
(e) Wireless camera (500 m range), RF Pro5H	167	78000
(x) Wireless camera receiver, RF TP-6R	not onboard	70000

自分で機体をつくることができるようになる。使用者が素材から作ることができる機体であればこそ、使用者自身が現場での様々な機械的トラブルや機体の損傷を自分で解決できる。素材と接着剤を常に常備しておけば、修理しながら長期間運用する事も可能となる。

#### 4. 観測装置

観測装置としては合計 300 g までのものを搭載することができる。現在、試験的に運用している装置は無線カメラ、SDカードビデオカメラ、GPS、硫化水素モニタ (Fig. 3, Table 2) である。

カメラは用途に応じて選択する。例えば、無線カメラを搭載すると、飛行中の映像をリアルタイムで観測者に電送できるので、観測したい地域が操縦者から見えない場合に、上空からの飛行画像を見ながら撮影すべき場所を探すことができるという利点がある。また、火山灰採取器を噴煙や噴気への突入にあわせて動作させるなど、



搭載機器動作と飛行機操縦の連携を取らねばならないときに、目視によりタイミングを調整することもできる。ただし、使用可能範囲であっても、電波状態によって画像が視認不能な程に乱れることがあるので、電送画像のみによる操縦は難しい。また、無線カメラは機体本体のコストよりも高価であるため、機体が行方不明になった時の被害は大きくなる。一方、SDカードを利用したビデオカメラは、軽量、コンパクト、かつ安価なので、気軽に使うことができる。画像は飛行後にみればよいときには、高解像の画像を得ることができるようにSDビデオカメラを搭載することもできる。これらのカメラは、フィールドを撮影する以外にもデータ記録装置としての利用も考えられる。計測器そのものにデータを保存する、あるいは電送する機能がついたものは、重量がかさみ、高価であることが多い。そこで、小型の計測器の表示板をカメラで撮影することによって (Fig. 3 右上)、空中でのデータを保存することができる。

カメラと同様に重要な搭載機器はGPSである。小型軽量のGPSを搭載することにより1秒ごとに機体の位置、移動方向、移動速度を記録することができる。GPSの時計と搭載カメラや搭載測定機器の時計を合わせることで、画像や測定値を取得した位置を知ることができる。

これらの観測機器は搭載重量300gの範囲内で自由に組み合わせて使うことができる。例えば5-4章の空撮試験では、GPS (89g) と電送カメラ (56g) を搭載し、5-5章の硫化水素濃度測定試験では、GPS (89g)、電送カメラ (56g)、硫化水素計 (69g) を搭載した。その他、電送カメラ (56g) とSDビデオカメラ (151g) とGPS (89g) を搭載し、撮影位置を電送カメラで確認しつつSDカメラで高画質撮像を行うという場合もある。搭載はゴムバンドと両面テープで行うので、機体の重心位置を大きく変えないように気を付けさえすれば、現場で自由な組み合わせで機器を搭載することができる。

## 5. 実証試験

Sky-1の実証試験を2008年5月15日に草津白根山で行った。草津白根山は群馬県吾妻郡草津町に位置する標高2160mの火山である。頂上付近には火口湖があり、湯釜と呼ばれ観光地となっている。山頂の各所から硫化水素ガスが噴出している (大場・他, 2000)。今回は、湯釜の北側に位置するガスの噴気口そばから離陸した。実証試験では、Sky-1の開発コンセプトの内「運搬問題」「衝突問題」「整備問題」を検証した。

### 5-1 Sky-1の運搬

火山等の調査地域には車で近づけないところも多く、徒歩で運搬することが必要である。また、1機だけの



Fig. 4. Photographs showing how to carry Sky-1. At Kusatsu-Shirane volcano on 15 May 2008.

運用では、機体の損傷や故障があった場合に観測を中断せねばならないので、複数の機体を一度に運ぶことができれば実用的である。そこで、機体格納用のダンボール箱を用意し、Sky-1の本体3機を背負子で現地まで運ぶことができるかを実験した。当日、登山したメンバーは著者2名に加え、操縦担当として、Sky-1の設計改良・製作やテストパイロットを請け負う、無線飛行機操縦の専門家1名の計3名であった。検証のために、機体3機、運用に必要な送信機、工具、10フライト分のバッテリー、観測機器、弁当といった運用に必要なものを著者一人が運搬した (Fig. 4)。格納箱と機体3機 (約8kg) を背負子で背負い、観測機器や弁当等 (約6kg) をリュックサックに詰めて胸に抱えた。国道292号線からFig. 5の地点Jより分岐している登山道を通って、運用場所となるFig. 5の地点Aまで機体を運んだ。分岐から400mほどの地点Sまでは車を使い、残りの地点Sから地点Aまでの約1.5kmの雪が残る道のりを45分かけて徒歩移動した。帰りも同様の経路を一人で運んだ。このことによりSky-1の可搬性を確認した。なお、この機体格納用の箱はそのまま機体の宅配輸送にも使え、京都-草津間、草津-大飯間を宅急便で運んだが、機体が壊れることはなかった。

### 5-2 安全性について (「衝突問題」)

安全性を示すには、Sky-1の離着陸の方法を示すことが効果的であろう。離陸は手投げで行う。操縦者自らがオーバースローで投げれば、離陸に十分な初速が得られる。通常の着陸は胴体着陸である。対人への安全性を証明するために、カメラとGPSを搭載したSky-1を著者 (佐伯) 自らが受け止めて回収するというテストを草津白根山で実施した。5フライト受け止め回収をおこなった結果、機体そのものが柔らかいことと、プロペラと手が接触する心配がないことから、危険なく回収できた。ただし、この回収方法は、受け止め地点に飛行機を誘導する正確な操縦技術が必要である。初心者は胴体着陸でよい。プロペラが露出しておらず機体も軽量なので、胴体着陸でも機体が損傷することはほとんどない。

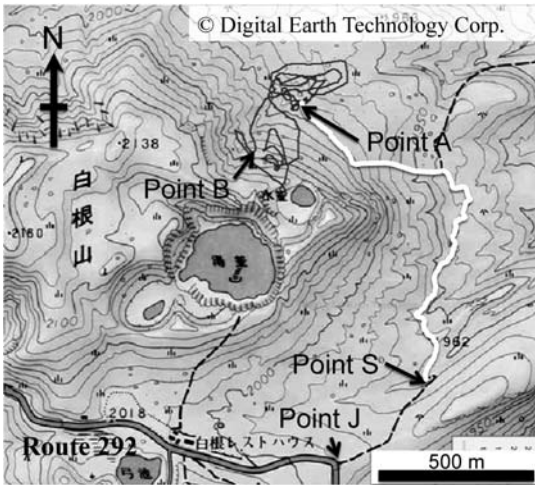


Fig. 5. Flying track of Sky-1 (gray curve) and walking track of our survey party (white curve) imposed on the map of Kusatsu-Shirane volcano. Point J is the junction of the national route 292 and a mountain trail. Point S is the point where the party started to walk. Point A is the take-off point and point B is the point from where the photo shown in Fig. 6 was taken.

### 5-3 整備性の問題

野外調査をする研究者は、数日から数週間にわたって調査地域の宿で過ごすことも多い。調査道具としての観測機は、壊れにくく、また壊れても自分で修理できることが重要である。

これまでに行った50フライト以上におよぶ試験飛行を通じて、Sky-1が飛行続行不能なまでに壊れたのは、操縦ミスによって地面へ垂直急降下墜落した場合と、木に翼から衝突して胴体に比べて強度の弱い主翼の一部に応力が集中した場合だけである。これらの場合も、接着剤と機体素材の端切れで1時間以内の修繕で飛行可能になった。

しかし、本質的に重要な要素は、Sky-1は設計を公開した機体であり、かつ特殊な工具や部品を使うことなく複製が可能のように設計されていることである。研究者が素材状態から自分で組み立てた経験があってこそ、修繕も可能となる。このことを実現する製作教育プログラムについては、6章で述べる。例えば、3機程度を調査地に持っていけば、機体を行方不明にさせない限り、宿で修理しつつ何ヶ月も運用することが可能であろう。機体に使う部品は、現在、通信販売で購入可能なものばかりであるので、修理用の部品も国内であれば調査地域の宿でも調達可能である。

### 5-4 空撮飛行試験

電送カメラとGPSを搭載した機体を用いて、上空から草津白根山の火口の撮影を行った。飛行軌跡をGPS受信機から得ることで機体の飛行性能を確かめる他に、Fig. 5のA地点（GPS標高2003m、数値地図標高1999m）から手投げにより離陸し、離陸地点に対して尾根の反対側にある火口湖の撮影を試みた。

数値標高地図から3次元の眺望画像を作り出すことができるソフトウェア、カシミール3D（DAN杉本氏製作）を用いて、Sky-1搭載GPSのデータからSky-1の飛行軌跡を地図上に描いた（Fig. 5）。地図データとしてデジタル・アース・テクノロジー社の山岳立体地図を、数値標高データとしてカシミール3Dのサイトより有償で配布されている日本高密度メッシュ標高を使用した。

1400mAh、11.1Vのリチウムポリマー・バッテリーを用いた時の標準飛行可能時間は約5分間である。標高2000m以上の大気圧での飛行は初めてであったが、飛行性能の低下は感じられなかった。今回使用した搭載カメラは、送信機からの信号に従って歯車を希望通りの回転角度に保持することができるサーボモーターによって機体前方視と機体直下視を選べるようになっている。電送カメラの利点は、飛行経路や飛行姿勢を変えながら、目的対象が撮影されているかをリアルタイムにチェックできることである。ただし、操縦者は機体から目を離すことができないので、撮影画像のチェックは別の人がする必要があり、今回使用したカメラは電送可能距離が150mという仕様のものであったが、直線距離にして400m程度離れても受信可能であった。ただ、カメラが噴気の中を飛行するような場合は、たとえ近距離であっても受信不能な場合があった。

機体搭載カメラから撮影した湯釜の画像がFig. 6である。機体のロール軸を回転させるための動翼であるエルロン（補助翼）を持つSky-1は、機体を傾けることで、直下視カメラで左右斜め下方の撮像をすることができる。これはヨー軸を回転させるための動翼であるラダー（垂直尾翼）で方向を変える方式の飛行機よりも優れた点である。撮影時の位置情報をGPSに記録されたデータから確認した。Fig. 7に、湯釜撮影フライトの1秒間隔の飛行高度とSky-1直下の地面の標高を示した。高度上昇のための飛行をした145秒目から170秒目までの高度記録によると、この間の平均上昇速度は、分速190m（高度変化分）であった。また、全飛行区間の平均飛行速度は時速43kmであった。画像の記録時間とGPSの時計から、撮影場所をFig. 5、Fig. 7のB点と特定した。

飛行姿勢を目視確認しながら飛行するのは、本機体サイズでは直線距離にして400m前後が限界である。従っ



Fig. 6. Air photograph of the crater lake of Kusatsu-Shirane volcano taken by Sky-1.

て、三平方の定理によって、水平距離 260 m、垂直距離で 300 m で、直線距離ほぼ 400 m となることから、飛行姿勢を目視確認しながら飛行するには高度 300 m 以内が適当である。上昇能力と飛行速度から計算すると、目視可能な最遠部（例えば、水平距離 260 m、対地高度 300 m）に達するためには、水平移動に 22 秒、高度を獲得することに 95 秒必要である。実際は高度獲得中にも水平移動しているため、水平移動時間を別に取り必要はない場合が多い。標準バッテリーの飛行可能時間 5 分間の間に飛行可能な空域の任意の位置まで十分に飛行可能であることがわかった。

#### 5-5 空中硫化水素濃度測定試験

電送カメラを使った硫化水素リアルタイム計測実験を行った。Fig. 3 右上のように配置して硫化水素濃度を電送カメラの画像を通じてリアルタイムにチェックする。

Fig. 8 は離陸地点から撮影した飛行中の Sky-1 の動画と、電送カメラの画像を後で合成したものである。合成した動画を見るとどこで硫化水素濃度が上昇したかを知ることができる。着陸点近くの噴気口は、噴気口の直上 1 m に計測器を差し入れて測定した結果、硫化水素濃度 120~130 ppm であった。一方、噴気上空を飛行したときに得られた最高硫化水素濃度は 3.6 ppm であったが、この値を利用するには注意が必要である。今回使用した硫化水素計は反応速度が最大 1 分と遅く、噴気を通りすぎた後で表示が変わるような状態であったので、濃度は過

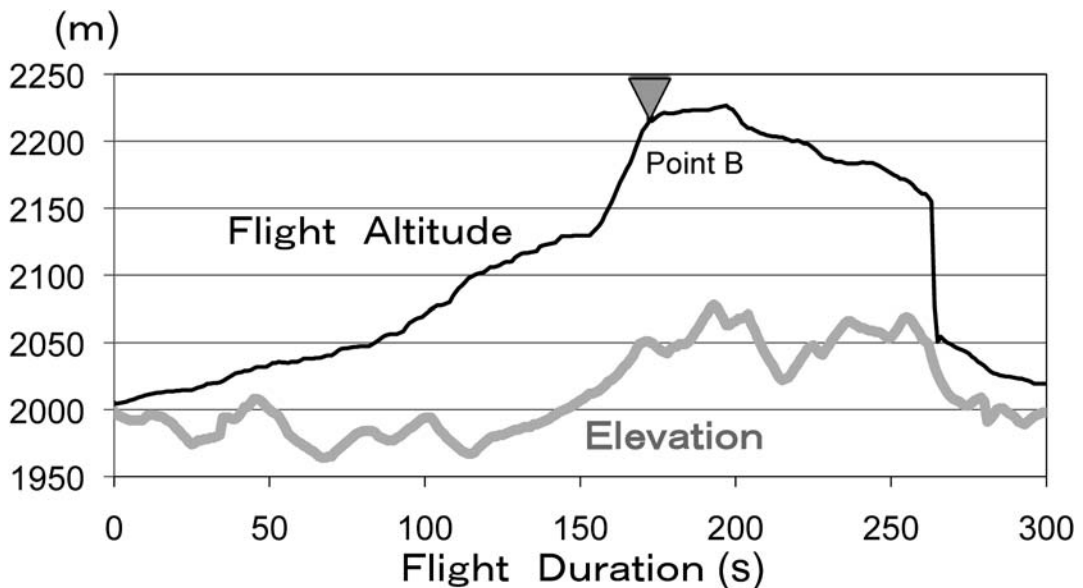


Fig. 7. The flight absolute altitude of Sky-1 obtained by an onboard GPS and the ground elevation of the sub-airplane point on the air photography mission for the crater lake.





Fig. 8. A screenshot of the observation video on the H<sub>2</sub>S measurement mission. The main frame is an objective view of Sky-1 flight. Sub frame is the view of an onboard wireless video camera shooting the indicator of a portable H<sub>2</sub>S sensor. These two frame are synchronized by a video-editing software.

小評価されていると推定される。三宅島の住宅地のガス警戒区域のように広域で同程度の濃度の地帯が続いていると思われる場所を計測する場合は、今回の方法でも構わないが、数 m 程度の差でも濃度が変化しているような場所では、もっと反応速度の速いセンサーが必要である。今回は、データを表示するしかできない計測器のデータを電送カメラで記録するというアイデアがうまく行くことを確認した。

## 6. 教育プログラム

無人観測機を研究者自らが運用するためには、修理や操縦が自分でできる必要がある。Sky-1 を運用してみたいというモニター希望者の協力を得て、Sky-1 の組み立て・飛行講習会を 2008 年 8 月 3~4 日に行った。自分用の Sky-1 を自分で製作し、操縦訓練もするという企画である。参加者は、高校教員で理科教育や地域防災に活用希望する方 (2 名)、エアロゾル採取・エアロゾル空中測定に活用を希望する大学教員 1 名、火山観測・磁場観測に活用を希望する大学院生 (火山観測ロボットの製作経験有り) の 3 組であった。講師は、前述の無線操縦飛行機サポートショップの専門家に依頼した。

第一日目は、あらかじめカットした発泡ポリプロピレンと組み立て済みのダクトファンユニットを用意した状態から機体の製作を開始して、作業時間約 10 時間で全員自分の Sky-1 を完成させることができた (Fig. 9)。この作業は 1 日で行ったが、作業に余裕をもたせるため組立てには二日あるとよいことがわかった。

第二日目は、飛行訓練を Sky-1 の試験飛行を行って



Fig. 9. A photo of the training course for assembly of Sky-1 at Osaka University on 3 August 2008.

る KMA 関西模型飛行場 (京都府久世郡) で行った。受講者は、まず、操縦が楽な中型エンジン機で無線操縦飛行機の操縦になれ、その後、自分でつくった Sky-1 の操縦を試みた。全員、一日 (4 フライト程度) で上空での旋回飛行ができるようになった。無線操縦クラブで多くの初心者を指導してきた講師によると、個人差はあるが、単独で離着陸を含めた飛行ができるようになる目安は 40 フライト程度ということである。1 日の飛行訓練でも、今後一人で練習をするための運用の基礎知識の習得という大きな意味があるが、単独で操縦するには 3 日間程度の教習が適当だと思われる。

教育プログラムの一環として、単独飛行練習のための無線操縦飛行機シミュレータも準備した。無線操縦飛行機・ヘリコプターシミュレータとして世界中で使われている Flying Model Simulator (FMS) (R. Möller・M. Möller 両氏製作) というフリーのソフトウェアがある。通常のフライトシミュレータは飛行機の操縦席からの視点の映像で操縦するのに対して、無線操縦シミュレータは、地上にいる操縦者の視点の映像で操縦する。そのため、機体が遠くに行けば機体像が小さくなって見えにくくなり、機体がこちらに向かって来る時は操舵の左右が感覚的に逆転するなど、無線操縦ならではの操縦感覚を体験することができる。FMS 上で Sky-1 を操縦できるようにする Sky-1 の機体情報データを作成し、著者 (佐伯) のサイト (<http://astrosis.ess.sci.osaka-u.ac.jp/MBO.html>) よりダウンロードできるようにしてある。この Sky-1 機体情報データは、Sky-1 の形状、色、操縦命令に対する反応性、運動性能、モーター音等を忠実に再現するよう作成されているので、使用者が自宅で手軽に操縦訓練をすることができる。また、Sky-1 の導入検討のための体験飛行にも活用できる (Fig. 10)。前述の組み立て・飛行講



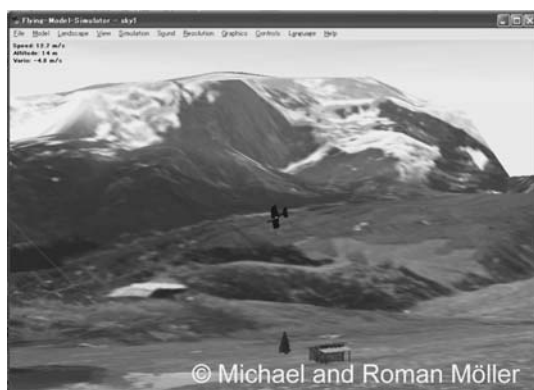


Fig. 10. A screenshot of FMS flight simulator. A virtual Sky-1 is flying in the virtual field.

習会の参加者の内 1 名も講習会参加前にシミュレータで練習してきており、実際の操縦の際には操舵の説明を短縮することができた。ただ、シミュレータがいかに実機に近い飛び方をするとしても、実機を飛ばす緊張感までは模擬できないので、調査地域で飛ばす前には、見通しのよい広場等で練習飛行をする必要がある。

教育プログラムを実施して、無人飛行機を運用してみたいという需要が確かにあることと、実際に運用可能な Sky-1 が初心者にも短期間で製作可能であることが確認された。

## 7. 考 察

草津白根山での運用試験、および、組立・飛行講習会を通じて、Sky-1 のハードウェアとしての開発構想が実現していることが確認された。一方で運用面では、機体の特徴を活かした局面を選ぶ必要があることがわかった。今回行った硫化水素計測は、局地的な高濃度帯の観測には有効ではなかったが、火山ガス濃度が広域で上昇している地域では有効に活用できると考えられる。火山ガスのために自治体による安全確保対策が続いている三宅島では二酸化硫黄ガスが問題になっているが、硫黄化合物の化学平衡が温度によって変わるため、比較的低温のガスからは硫化水素が検出されている。また、1950 年～1997 年の間に硫化水素ガスによる死者 36 名、二酸化硫黄によるもの 6 名、二酸化炭素によるもの 3 名が報告されているように、硫化水素の死者が大多数を占める(平林, 2003)。二酸化硫黄はリモートセンシングで遠隔観測が可能であるものの、硫化水素はその場測定もしくはその場ガス採取に頼る必要があることから、硫化水素測定装置を飛行させるメリットは大きいと考えられる。しかしながら、時速 40 km で飛行する機体は 1 秒で 10 m

移動するので、測定器の反応時間によってはガスが高濃度となっているブロックを見逃す可能性もある。また、高速移動しながら測定することを前提としていない測定装置を使う場合は、機器の反応速度の評価が必須である。これらの点には留意しながら飛行機によるデータの取得とその解釈を行えば、調査地域の谷筋に滞留する平均的なガス濃度の把握や、対地高度 300 m までの上空のガス濃度測定には、現状のままでも十分に活用が可能である。

Sky-1 の活用範囲の限界を定める主たる要因は、操縦可能距離 400 m と、搭載最大重量 300 g という制約である。この制約の中でも、阿蘇中岳や三原山などのように火口の縁まで立ち入ることができる場所で、静穏期に噴気のエアロゾル採取やガス採取を行ったり火口底を空中撮影したりする用途には充分使える。しかし、墜落しても金銭的損失が少ないという特徴は、活発に活動する火山上空の運用にこそ適している。行動範囲の制限は電波到達距離よりも、目視で姿勢を確認する飛行方式による限界が先に来る。無線操縦水上飛行機で 2 km という操縦距離で西之島新島や海中噴火を空中撮影した前例があるが(青木・小坂, 1974)、これは飛行機の翼幅が 2 m と大型で視認しやすいことと、それにも増して操縦者の卓越した操縦技術に因るところが大きいと推察される。活動中の火山を観測するためには、運用する人間は、火山弾の到達距離を考えると最低でも火口から 2 km は離れる必要がある。現在の Sky-1 でも搭載重量の 3 分の 1 をバッテリーの増量に使えば、機体の飛行性能としては往復 4 km の観測飛行は十分に可能である。従って、活動範囲を広げるためには、GPS を利用した自律飛行システムの搭載が最も効果的な解決方法である。2009 年春より米国では模型飛行機用 GPS 自動操縦装置の急激な価格低下が起こっており、GPS で航法誘導し、赤外線センサーで地平線を検出して姿勢制御する自動操縦ユニットの組み立てキットが、300 ドル程度で販売されるようになった。このユニットの Sky-1 への搭載は十分に可能である。

## 8. ま と め

野外調査をする研究者や自治体職員が道具として使える無人観測機「大阪大学 Sky-1」を開発した。既存の無人機が重視していなかった数多くの問題点を解決し、「安全で手軽に使える」、調査者が単独で運用する「道具」として完成度の高い無人観測飛行機となった。一般的な無人機にない特徴をまとめると、「機体材料である黒色発泡ポリプロピレンの特注製造」、「低速機なのに電動ダクトファンを動力として採用し安全性を確保」、「複数

機を重ねて運ぶことができる機体分割方式の考案により徒歩での運用が可能」, 「300gのペイロードを確保」, 「強風下でも操縦可能な飛行性能の実現」等である。草津白根山で運用試験を実施し, 機体の開発構想が実現されていることを確認した。また, Sky-1組み立て・飛行講習会の実施, および, 操縦シミュレーターの整備によって, 道具として使うための教育プログラムを準備した。

なお, 現在, GPSを搭載した自律無人観測飛行機の实地試験およびその改良を進めている。既存の大型自律飛行機にはない, 軽量化および安全性を取り入れたこの機種については, 稿を改めて報告したい。

## 謝 辞

大阪大学 Sky-1 開発の着想は特定領域研究「火山爆發のダイナミクス」によって開発された無人火山探査車 MOVE の運用試験情報から得た。また, MOVE メンバーの方々からは火山現地観測に関する様々な情報をいただいたことを感謝する。関西模型飛行場には本研究のための試験飛行の機会を提供していただいたことを感謝する。鈴木邦彦教諭, 鈴木雅子教諭, 小島知子博士, 安部祐一氏には, Sky-1 組み立て飛行講習会への参加協力を感謝する。中西信昭氏には, Sky-1 の飛行性能向上のための改良, テストパイロット, 講習会講師と様々な局面でお世話になった。ここに感謝する。柳原輝夫氏には講習会講師の補助をしていただいたことを感謝する。本論文の前段階の原稿にコメントをいただいた宮城磯治博士, 本論文編集担当の大場司博士, 査読していただいた谷口宏充博士, 匿名の査読者の方々, および, 西村太志編集委員長には, 本論文の質を高める有益な助言や情報

を多数いただいたことを感謝する。本研究は文部科学省科研費補助金(萌芽研究)の補助, および, 大阪大学大学院理学研究科長裁量経費の補助により行われた。

## 引用文献

- 青木 斌・小坂丈予(1974) 海底火山の謎: 西之島踏査記。東海大学出版会(東海科学選書), 250p.
- 古川邦明・坂井至通・茂木靖和・金森信厚・荻本健二(2004) 小型ラジコン飛行機空撮システムによる森林調査—貴重種自生地の地形と個体の把握—。中森研, **52**, 221-224.
- 平林順一(2003) 火山ガスと防災。 *J. Mass Spectrom. Soc. Jpn.*, **51**, 119-124.
- 木村政昭(1974) 無線操縦模型ヘリコプターによる三原山火孔底の観察。地質学雑誌, **80**, 141-143.
- 小坂丈予・小沢竹二郎(1975) 桜島火山噴出ガスの成分の観測と活動状況, 桜島火山の総合調査報告(昭和49年12月~昭和50年3月)。文部省科学研究費自然災害特別研究, 62-66.
- Nogami, K., Hirabayashi, J., Ohba, T., Ohsaka, J., Yamamoto, M., Akagi, S., Ozawa, T. and Yoshida, M. (2001) Temporal variations in the constituents of volcanic ash and adherent water-soluble components in the Unzen Fugendake eruption during 1990-1991. *Earth Planets Space*, **53**, 732-730.
- Nonami, K. (2007) Prospect and recent research & development for civil use autonomous unmanned aircraft as UAV and MAV, *J. System Design Dynamics*, **1**, 120-128.
- 大場 武・平林順一・野上健治(2000) 草津白根山の火山熱水系。温泉科学, **49**, 163-175.
- Taddeucci, J., Scarlato, P., Andronico, D., Cristaldi, A., Buttner, R., Zimanowski, B., and Kupperts, U. (2007) Advances in the study of volcanic ash. *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, **88**, 24, 253-256.

(編集担当 大場 司)