

南極観測用小型無人航空機 Ant-Plane の開発 —その可能性と課題—

船木 實^{1*}・Ant-Plane Group²

Development of small drones “Ant-Plane” for Antarctic research
—its possibility and difficulty—

Minoru Funaki^{1*} and Ant-Plane Group²

(2006 年 3 月 6 日受付; 2006 年 5 月 23 日受理)

Abstract: Four kinds of small drones (autonomous unmanned aerial vehicles UAV, so called Ant-Plane) are developed under the Ant-Plane project for scientific research and logistics in the coast region of Antarctica in austral summer. The Ant-Plane 2 cruised within 30 m of the planned course during calm weather at Sakurajima Volcano on Kyushu. During strong wind, 22 m/s, at Chokai Volcano, northern Honshu, the drone remained on course during straight flight but deviated when turning leeward. An onboard magneto-resistant magnetometer (400 g) recorded the variation of magnetic field with accuracy of 10 nT in calm wind, but strong magnetic noise was observed in strong wind, especially a head wind. The Ant-Plane 4 achieved a continuous flight of 500 km and the highest flight altitude of 5700 m. The Ant-Plane UAV can be used for various kinds of Antarctic, requires further development of techniques for easy takeoff and landing and easy start of engines.

要旨: 南極の夏期間、沿岸地域で科学観測や氷状偵察に用いる小型無人飛行機の開発を Ant-Plane 計画のもとで行っている。今までに GPS と気圧高度計、それにピトー管速度をもとに自動操縦する機体を 4 種開発した。Ant-

¹情報・システム研究機構国立極地研究所. National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

²船木 實・平沢尚彦・伊村 智・森脇喜一・野木義史・石沢賢二 (国立極地研究所). 東野伸一郎 (九州大学航空学府). 村瀬弘人 (日本鯨類研究所). 酒井英男 (富山大学理学部). Minoru Funaki, Naohiko Hirasawa, Satoshi Imura, Kiichi Moriwaki, Yoshifumi Nogi, Kenji Ishizawa (National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515). Shin-ichiro Higashino (Kyushu University, Department of Aeronautics and Astronautics, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395). Hiroto Murase (The Institute of Cetacean Research, 4-5, Toyomi-cho, Chuo-ku, 104-0055). Hideo Sakai (Faculty of Science, Toyama University, 3190, Gofuku, Toyama 930-8555).

*Corresponding author. E-mail: funaki@nipr.ac.jp

Plane 2 号機により桜島と鳥海山で飛行実験を試みた結果、風が弱い時は機体の位置精度は 30 m 以内で、極めて良い自動飛行が確認された。最大風速が 22 m/s でも機体はウェイポイントに向けて飛行し、おおむね良好な直線飛行であったが、旋回時に風下側で大きくルートを逸脱した。風が弱い時は、三成分磁気抵抗型磁力計（総重量 400 g）で 10 nT の精度で空中磁場観測が可能であったが、強風時に風上に飛行する時は大きなノイズが発生し意味あるデータは得られなかった。Ant-Plane 4 号機は 500 km の連続飛行と最高飛行高度 5700 m を達成した。南極の夏期間沿岸地域で 500 km までの航空機観測が小型無人飛行機で可能になったが、南極観測隊員が容易に Ant-Plane を使用するためには、簡易な離着陸やエンジン調整等の手法の確立が重要である。

1. はじめに

昭和基地における航空機観測はセスナとピラタスにより行われてきたが、2005 年 1 月末には第 45 次隊により 2 機とも撤収され、日本南極地域観測隊 (JARE) 第 46 次隊からは航空機無しの越冬となった。その理由は機体や氷上滑走路のメンテナンスに多大な労力を要し、安全運行が観測隊の大きな負担を強いたことにある。昭和基地には格納庫が無く、真冬の一時期を除いて両機の駐機場は海氷上に設けられてきた。このためブリザードの時には航空隊員は機体の保守に苦勞し、風が止んだ後には機体内部に隙間なく入り込んだ雪を取り除くのに多大の労力を要した。とはいえ航空機観測の重要性がなくなった訳ではない。ペンギンやアザラシの調査、気象観測、高所医学等の研究観測は中断を余儀なくされ、野外調査に不可欠のルート偵察や海氷観測等においても航空機撤収の影響は大きい。

有人機で行ってきた航空機観測を小型無人航空機 (UAV) で行うことができれば、中断している昭和基地の航空機観測の一部を再開に導く可能性がある。コンピューターや観測機器の小型化と GPS の高性能化に伴い、これらの機器を翼長 3 m 前後の模型飛行機に搭載することも可能となってきた。また、模型飛行機の信頼性も向上し、4 l ほどの燃料で 3000 km 以上の飛行を実現した例もある。例えばオーストラリアの AEROZONDE 社のリーマという UAV (無人飛行機・スパン 2.9 m, 重量 13 kg) は 1998 年 8 月 21 日にカナダのニューファンドランドからアイルランドまで 3270 km を 26 時間 45 分で飛行し、大西洋を横断している。また、米国の模型飛行機グループは Trans Atlantic Model 5 (TAM-5) により 2003 年 8 月 9 日に同様の飛行を行い、3030 km を 38 時間 52 分で大西洋の横断に成功している。TAM-5 の場合、木製の機体にフィルムを張ったもので 10 cc のガソリンエンジンを搭載している。

画像撮影を目的とする UAV は、イスラエルや米国を中心に開発が行われてきた。すでにアフガニスタンやイラク戦争で敵地の偵察に使用され、その有用性が実証されている。また、大型の UAV は情報収集等を目的として既に多機種実用化され、主に軍事用として使用されている。しかし、これらの UAV はいずれも 1000 万円以上の高額で、軍事関連ということで一般には購入できない。

JARE においても南極観測用 UAV を開発し、科学観測や安全な野外活動に使用できれば、その意義は極めて大きいものと考えられる。昭和基地に UAV を持ち込むことにより以下のような利点が考えられる。

- 1) 無人のため安全性が高い
- 2) 経済的である（機体 200 万円以下、フライトごとに 1000 円以下の運用費）

国内で有人航空機をチャーターする場合、固定翼機で数十万円/時、回転翼で 100 万円/時程度

- 3) クレバス地帯、流水域、活火山等の危険地域の観測が可能
- 4) 法的規制がほとんどない

日本では高度 250 m 以下（航空路付近では高度 150 m 以下）の飛行では航空法は適用されない。250 m 以上の高度を飛行するときには航空局の許可が必要

- 5) 飛行計画の届け出が不要
- 6) 定期点検、完熟訓練、飛行時間制限等が不要
- 7) 電波法に触れずに飛行が可能
- 8) パイロットや整備士が不要、研究者自身の運用が可能
- 9) 滑走路や付帯設備が不要
- 10) 一機での運用が可能

このような大きなメリットが考えられる UAV ではあるが今まで南極観測に導入されることはなかった。我々は南極観測で使用する UAV を開発する目的で Ant-Plane 計画を立案した。Ant-Plane の“Ant”は南極（Antarctica）とアリ（Ant）のように小さいという意味を持つ。この計画は極地研究所が中心になり、九州大学航空学府航空学科や鯨類研究所等の研究機関や、企業、模型飛行機愛好者が参加して 2002 年より進めている。

2. 南極で使用する小型無人機

小型 UAV による科学調査や観測を極域で行うには、寒冷での飛行、輸送と格納の容易性、容易な操縦性、それに長時間飛行が重要な条件となる。機体を大型化させればペイロードを大きくできるが、輸送や運用が困難になる。また、機体重量が 100 kg を超えると航空法が適用され、自由な飛行ができなくなる。このような観点から、研究者自身が昭和基地等で容易に運用できる機体として、翼長 3 m 前後、離陸重量が 30 kg 以下に押さえることが望ましい。この程度の機体なら観測船「しらせ」搭載のヘリコプターでの昭和基地への輸送や、雪上車での沿岸地域や大陸内部への輸送も容易である。また、機体の組み立てや離着陸も少人数で可能である。一方、テントを基地とする小規模キャンプでの使用するには、機体の保管が容易で、なおかつ一人で運用できる翼長 2 m 以下、離陸重量 5 kg 以下の機体が望ましい。JARE が行ってきた航空機観測はリュツォ・ホルム湾、やまと山脈、昭和基地

一みずほ基地, それにプリンス・オラフ海岸地域が中心である。これらの地域を UAV で調査するためには, 往復飛行距離 600 km, 観測のための飛行距離 300 km, それに予備の飛行距離 100 km, 合計 1000 km の連続飛行が必要である。

小型 UAV を南極で通年運用するためには低温でのエンジンやバッテリーの性能の低下を考慮に入れなければならない, 開発にはかなりの困難を伴う。また, 強風下での運行も軽量機には不利である。それゆえ本研究では南極の夏季の沿岸地域で, 風の弱い時に運行できる UAV の開発に限定する。すなわち気温 -15°C 以上, 風速 10 m/s 以下の気象条件となる。

科学観測用の小型 UAV の場合, 飛行距離や観測の特質から種々の制約を受ける。磁場観測では機体磁気の小さい, 電磁ノイズの無い機体が必要である。気象観測では 5000 m 以上の飛行高度が要求される。ペンギン調査やルート偵察などの画像撮影を目的とする飛行ではエンジン音が小さく振動の少ない機体が必要である。近距離での観測は騒音や機体振動の小さいバッテリー駆動の電動機が可能だが, 現時点で 100 km を越える飛行についてはエンジン機のみが可能である。このような点をかんがみ, 本研究では図 1 に示すような 4 種類の機体をベースに, 6 種類の機体の開発を試みている。

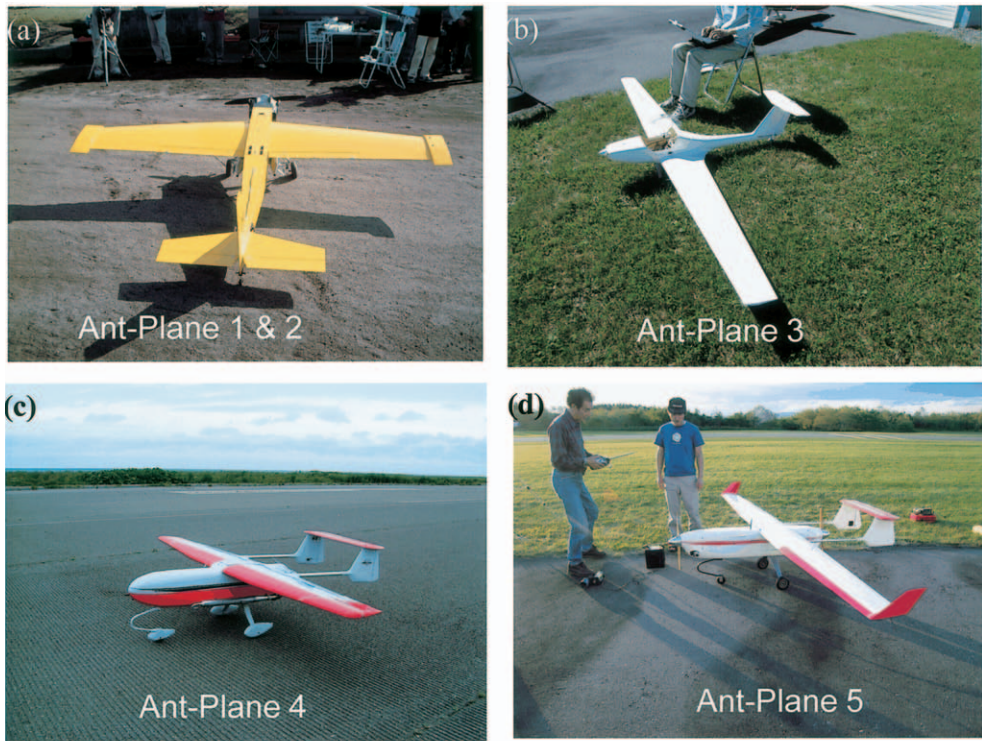


図 1 Ant-Plane 計画により開発された代表的な自動飛行機種
Fig. 1. Ant-Plane UAVs developed by the Ant-Plane Project

3. 開発機体，自動操縦装置，送受信機

3.1. 自動操縦装置

Ant-Plane で使用している自動操縦の原理を図 2 に示す．機体には GPS と気圧高度計，それにピトー管が搭載され，緯度，経度，気圧高度とピトー管速度データに基づき自動操縦される．機体の姿勢は加速度計により検出し，常時最適飛行ができるようプログラミングされている．飛行前に基地局の PC から機体搭載のコントローラーにウェイポイント (Wp) として緯度，経度，高度，それに速度を登録する．UAV は与えられた Wp を順番に飛行するが，実際の飛行では設定ルートから機体のずれを最小にするため，機体は通過した Wp と次の目標となる Wp を結ぶ線上を設定速度で移動する仮想の Wp を目指し飛行する．

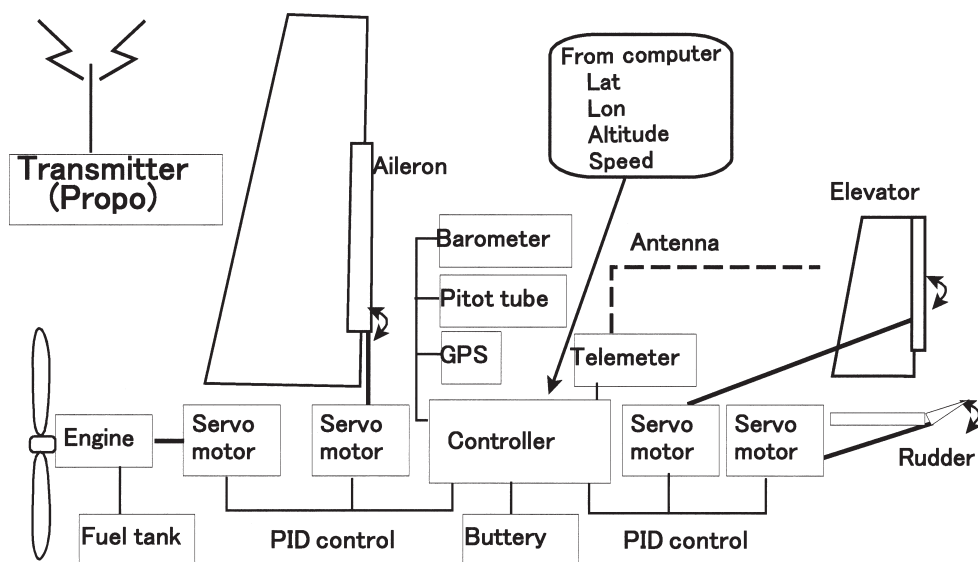


図 2 自動操縦装置の概要
Fig. 2. Outline of autonomous navigation system

3.2. Ant-Plane 1 号機，2 号機

Ant-Plane 1・2 号機は日本飛行機株式会社が標的機として開発したプロペラ II を磁場観測用に改良したものである．機体は(表 1, 図 1a, 及び図 3), 単発固定翼機で全長 2.03 m, 翼長 2.37 m, 全高 0.8 m, 総重量 15 kg の模型飛行機である．エンジンは 86 cc 水平対向 2 気筒・2 サイクル・ガソリンエンジンで，巡航速度 150 km/h, 滞空時間 1 時間, 昇速度最大 200 m/min である．胴体はバルサ材で，翼は発泡スチロールにバルサを張ったもので，機体全体は熱収縮フィルムで仕上げている．翼の一端に磁力計センサーを取り付けた．この機体は無線機(プロポ)による手動操縦で離陸させ，高度 50 m 以上に上昇した後，自動操縦

表 1 Ant-Plane 計画で開発したの自動操縦機体
Table 1. Autonomous UAVs developed by Ant-Plane project.

H18 年 2 月末現在

	1号機・2号機	3号機	4号機	5号機	6号機	7号機
機体重量(ドライ)	15	4	15	15	6	4.5
最大搭載燃料(cc)	2400	—	8000	18000	700	1600
離陸最大重量(kg)	19	7	25	28	7.5	5.8
最大ペイロード(kg)	4	0.5	5	1	1	0.8
燃料消費量(cc/h)	95	—	1600	1000	470	320
航路距離(km)	230	30	500	1000	100	300
飛行速度(km/h)	150	70	210	150	70	70
最 高 高 度 (m)	1400	>250	5700	300	>250	>250
飛 行 時 間 (h)	1.5	0.5	5	10	1.5	5
失速速度(km/h)	90	50	60	60	48	40
エンジン・モーター	水平 2 気筒 86 cc ガソリン	756 W ブラシ レスモーター	水平 2 気筒 86 cc ガソリン	34 cc 4サイク ルガソリン2台	15 cc 4サイク ルガソリン	14 cc 4サイク ルディーゼル
馬 力 (HP)	7.5	1	7.5	2.0×2 台	1	1
発 電 器	—	—	12 V 30 W	12 V 30 W×2	—	3 W
回 転 数 (rpm)	—	10000	1400~9000	1400~9000	9000	5000~7500
非常用パラシュート	有	無	有	有	有	無
無線機通信距離(km)	15	15	15	15	2	15
デ ー タ 記 録	無線	データロガ	無線	無線	無線	データロガ
観 測 機 器	磁力計	画像撮影装置	磁力計, 気象 測器	磁力計	磁力計, 画像 撮影装置	磁力計
自 律 装 置	日本飛行機	マイクロパイロット	フジ・インバック	フジ・インバック	九州大学	マイクロパイロット
製 造 機 関	日本飛行機	極地研	フジ・インバック	フジ・インバック	九州大学	極地研

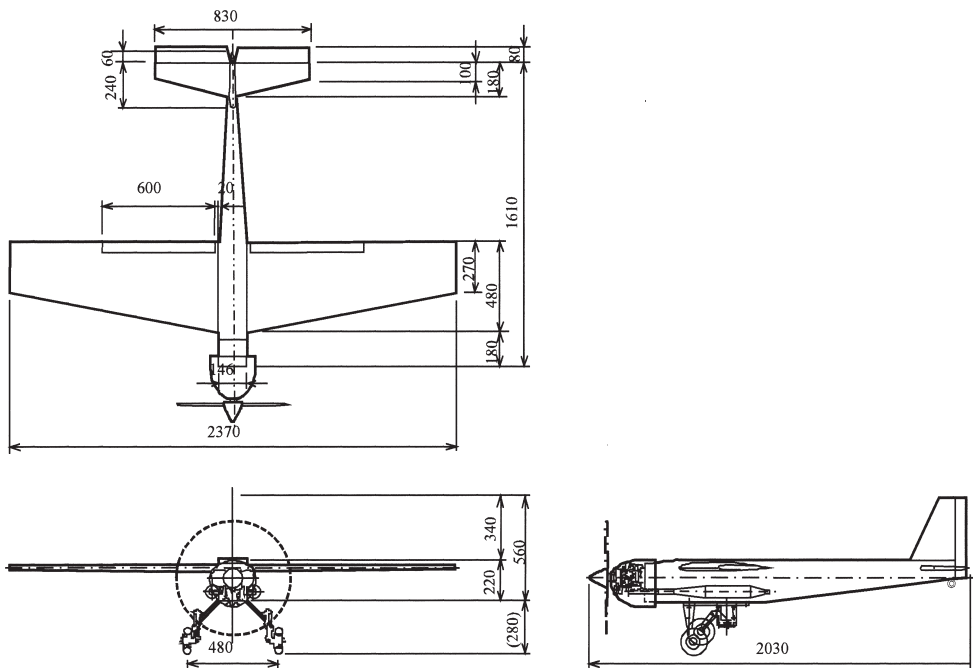


図 3 Ant-Plane 1・2号機の概要
Fig. 3. Design of Ant-Plane 1・2

に切り替える。着陸は機体が操縦者の視認範囲の 400 m 以内にきた時点で送信機から信号を送り、自動操縦を手動操縦に切り替え滑走路に誘導し着陸させる。飛行中の機体データは (GPS データ, 大気速度, 気圧高度, エンジン回転数等) 無線で地上局に送信され, 機体位置とともにモニターできる。飛行中にトラブルが発生した場合は, 搭載のパラシュートによる回収が可能である。

3.3. Ant-Plane 3 号機, 6 号機, 7 号機

Ant-Plane 3 号機 (表 1, 図 1b, 図 4) は実機 GROB-109 のスケール機 (Aeronaut 社製, ドイツ) のモーターグライダーである。全長 1.32 m, 翼長 2.76 m, 全高 0.37 m, の模型飛行機で, 動力は 756 W (約 1 HP) ブラシレスモーターで, リチウムポリマー電池 18.5 V 6.45 A/h を使用している。本機は小型ではあるが胴体に大きな収納スペースがあり自動操縦装置や測定器の搭載が可能である。離陸重量 5 kg の時, 巡航速度 70 km/h で滞空時間 25 分 (6.45 A/h のバッテリー搭載の場合) の飛行が可能である。胴体はグラスファイバー製で, 翼は発泡スチロールの基盤にバルサを張り熱収縮フィルムで仕上げている。自動操縦装置はカナダのマイクロパイロット社の MicroPilot (PL2028 g) を使用している。また送信機の搭載により基地局より半径 5 km 以内であれば飛行状況を基地局でモニターできる。胴体前部の床には写真撮影用の窓があり, デジタルカメラやビデオカメラによる画像

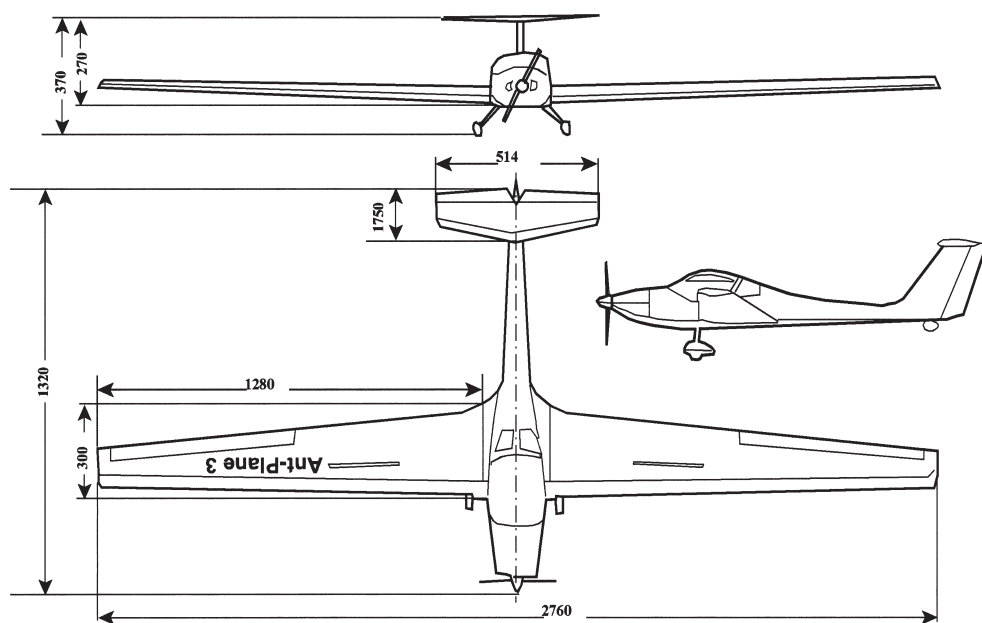


図 4 Ant-Plane 3 号機の概要
Fig. 4. Design of Ant-Plane 3

撮影が可能である。車輪による離着陸の他、ゴムの張力を利用したカタパルト発進や、離陸後に脚が自重により自動的に脱落するダリー（dolly）方式による離陸が可能で、着陸はネット回収も可能である。

Ant-Plane 6 号機は、表 1 に示すように、3 号機と同じ機体を使用し、単気筒 4 サイクルガソリンエンジンを搭載している。このエンジンは 15 cc の 4 サイクルグローエンジンをガソリンエンジンに改造したもので、3 号機に比べ長距離飛行が可能である。3 号機より振動は大きい、画像撮影用や磁場観測等の多目的観測を目的に開発された。

Ant-Plane 7 号機は、表 1 に示すように、3 号機と同じ機体であるが、単気筒 4 サイクルディーゼルエンジンを搭載している。このエンジンは 14 cc の 4 サイクルグローエンジンをディーゼルエンジンに改造したもので、振動が大きいものの、高燃費を実現している。燃料の圧縮比が一般のディーゼルエンジンより小さいため、燃料にエーテルを加え爆発を容易にしている。本機は磁場観測を目的に開発された。ディーゼルエンジンのため構造が簡単で電磁ノイズを発生させない利点を持つが、燃料が特殊なために容易に入手できないという問題がある。

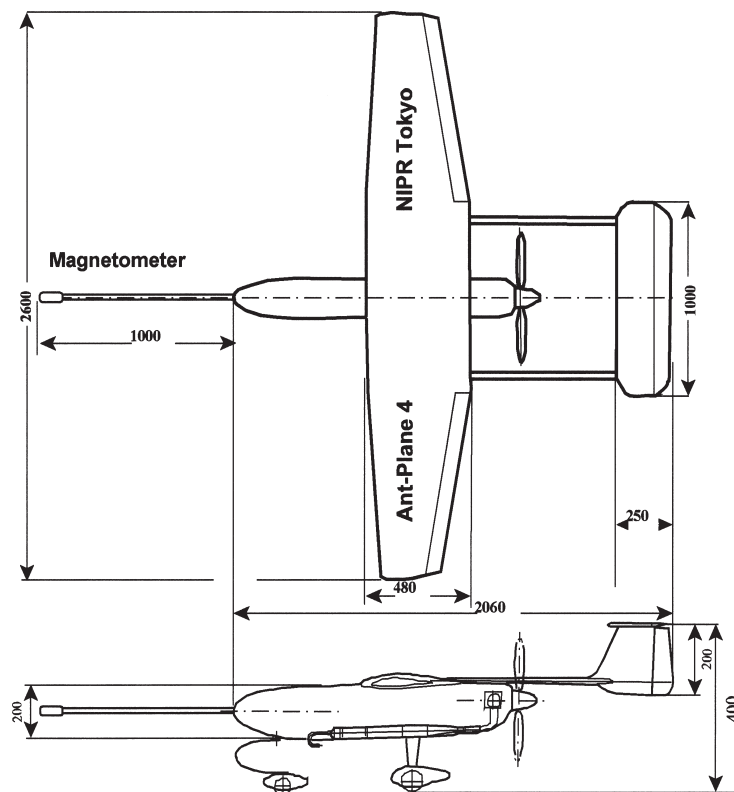


図 5 Ant-Plane 4 号機の概要
Fig. 5. Design of Ant-Plane 4

3.4. Ant-Plane 4号機

Ant-Plane 4号機は表 1, 図 1c, 図 5 に示すように, 最大 500 km の連続飛行と磁場観測を目的に開発された。胴体はグラスファイバー製で, 翼は発泡スチロールの基盤にバルサ材と熱収縮フィルムを張ったものである。86 cc 水平対向 2 サイクルガソリンエンジンを胴体の後部に搭載したプッシャー式で, チュンドパイプにより出力を向上させている。30 W の発電機を搭載し, 必要電力を供給している。Ant-Plane 1 号機と同様の自動操縦装置と送信機を搭載し, 飛行状態は基地局でモニターできる。また, 非常時にはパラシュートによる機体の回収も可能である。本機はペイロード 1 kg, 速度 120 km/h で連続 4 時間 30 分(飛行距離 500 km 以上)の飛行が可能である。機体の先端に長さ 1 m のパイプが装着でき, 磁気センサーなどを装着できる。

3.5. Ant-Plane 5号機

Ant-Plane 5号機は, 表 1, 図 1d, 図 6 に示すように, 34 cc・4 サイクルガソリンエンジンを胴体の前後に取り付けたタンデム型 UAV である。Ant-Plane 1 号機と同様の自動操縦装置と送信機を搭載し, 飛行状態は基地局でモニターできる。また, 非常時にはパラシュ

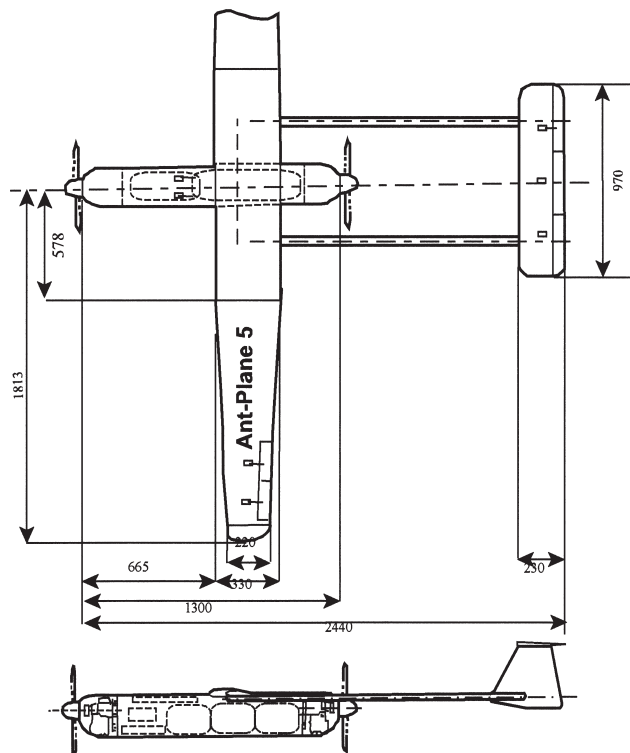


図 6 Ant-Plane 5号機の概要
Fig. 6. Design of Ant-Plane 5

トによる機体の回収も可能である。本機はペイロード 1 kg, 速度 100 km/h で連続 10 時間 (飛行距離 1000 km) の飛行を目的に開発されたが, 長距離飛行実験による実証はまだ行われていない。

4. 桜島での飛行実験

2003 年 11 月 17, 18 日 Ant-Plane 1 号機, 及び 2 号機により鹿児島県桜島町溶岩グラウンドを滑走路として, 桜島火山山麓の空中磁場観測とビデオカメラによる山頂の画像撮影を行った。桜島はこの期間, 天候が良いこと, 滑走路として使用できるグラウンドがあること, それに大きな地磁気変化が期待できることから, 飛行実験地として選ばれた。両機は磁場観測を主目的にするため, ガソリンエンジンから出る電磁ノイズを除去するため, イグニッションコイルと点火プラグ間のケーブルを銅メッシュでシールドした。1 号機は順調に飛行し空中磁場観測実験を行ったが, 着陸をさせるためスロットルを絞った時, エンジンが停止する事故が発生した。この事故で 1 号機は溶岩グラウンドの樹林に激突し大破した。2 号機でも同様のエンジン停止事故が発生したが, 着陸開始作業を滑走路近傍で行うことにより, 機体の破損を回避できた。このエンジン停止の原因は, 点火プラグに流れる高圧電流が電磁誘導で, 銅メッシュに電流を流し, プラグ電圧を減衰させるためと推定した。エンジン回転を低下させた時に十分な電圧をプラグに供給できず, エンジン停止にいたった。

図 7 は Ant-Plane 2 号機で行った自動飛行実験の一例である。飛行当時の気象は快晴無

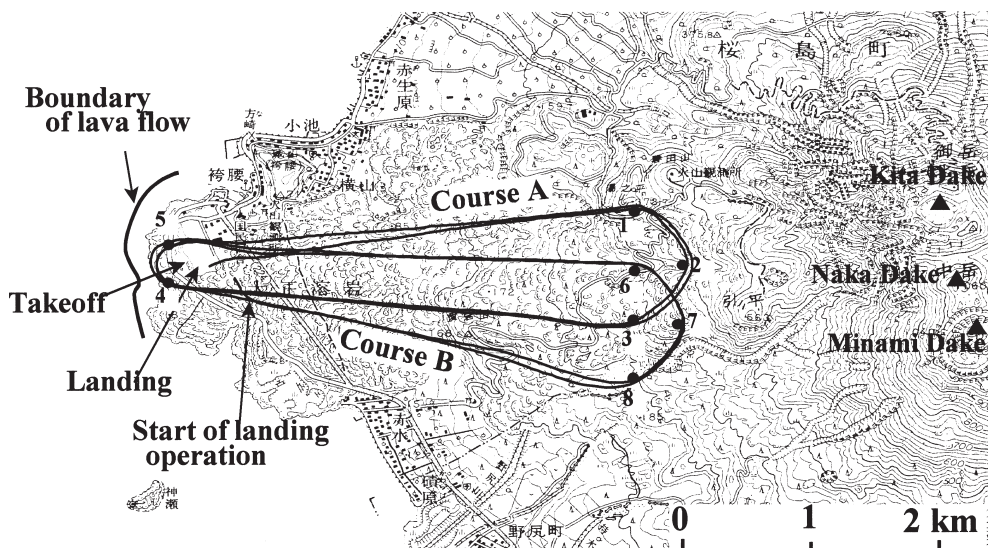


図 7 Ant-Plane 2 号機による桜島でのコース A とコース B の飛行軌跡, 設定高度: 700 m, 1-8: ウェイポイント

Fig. 7. Flight tracks A and B followed by Ant-Plane 2 over Sakurajima Volcano, programmed altitude: 700 m, Way points: 1-8

風，地上気温は 23°C であった。風行速度 130 km/h，飛行高度 700 m に設定し，滑走路から手動で離陸させた後，高度約 50 m で自動操縦に切り替え，図中の Course A の Wp1, 2, 3, 4, 5 を 2 周 (#1, #2)，さらに Course B の Wp6, 7, 8, 1, 2 を 1 周 (#3) させた後，6, 7, 8 を周回 (#4) し Wp4 の手前で手動により高度を下げ着陸させる計画を立てた。1 周の距離は約 8 km である。図 7 の飛行軌跡は GPS の緯度・経度の位置を秒値で示したものである。周回 #1 と #2 のコースを比べた場合，#1 では離陸から Wp1 まで #2 と大きくずれているが，これは Wp1 を目指す出発点が異なるためである。Course A では直線飛行で 20 m 以内，旋回時には 50 m 以内のコースのずれが発生している。Course B では Wp5 から 6 へ飛行中のコースのずれは 20 m 以内であるが，Wp8 を旋回した後は約 50 m のルートずれが発生している。このずれを解消するに要する距離は約 1 km である。

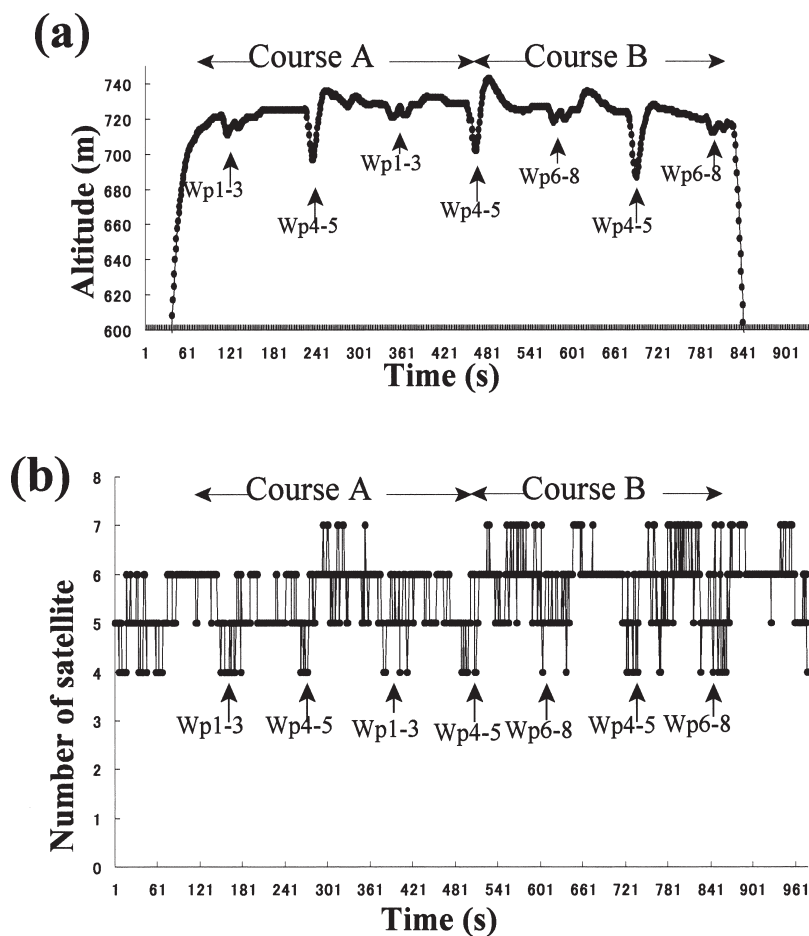


図8 (a) 図7に示した桜島の飛行中のGPS高度変化（設定高度700 m）と (b) GPS受信数
 Fig. 8. (a) Variation of GPS altitude (programmed altitude 700 m) during the flights in Sakurajima Volcano described in Fig. 7 and (b) the number of GPS receptions.

図 8 は飛行中の高度変化と GPS の受信状態を示したものである。機体は離陸から 700 m まで 1 分 40 秒で上昇している。その後は図 8a に示されるように、直線飛行では 723 ± 3 m の高度を保持しているが、Wp1-3, Wp4-5, Wp6-8 で示される巡回開始直後に顕著な高度の低下、その後は急激な上昇が発生し、直線飛行中にはほぼ一定の高度に落ち着く。巡回中の高度変化の最大は Course B で観測され、巡回 #1 の Wp4-5 で 742 m までの上昇と、巡回 #2 の Wp4-5 では最大 678 m までの降下があり、巡回半径が小さい Wp4-5 の巡回中に顕著である。設定高度 700 m と飛行高度の違いの主な要因は、機体は気圧高度に基づく設定高度を飛行するが、図 8a の高度は GPS の高度変化を示したためである。

飛行中に観測された GPS の受信衛星数を図 8b に示す。GPS の受信数はいずれも 4 個以上で、自動操縦に必要な三次元測位が行われたと考えられる。しかし、機体が上昇するときや巡回するときには受信数が 4-5 個と少なく、これに対し直線飛行中には 6-7 個に増加する。これは機体が傾いたとき、GPS アンテナが機体搭載機器の陰になり、受信数が減少するものと思われる。

GPS による対地速度を図 9 に示す。機体が東に飛行している時は 108-140 km/h の速度であるのに対し、西に飛行している時は 145-172 km/h と高速である。すなわち機体の巡航速度は約 145 km/h、飛行方向の風速は最大 30 km/h (8.3 m/s) となる。鹿児島地方気象台によると実験時間帯 (2003 年 11 月 18 日 10 時) の鹿児島市上空 700 m の風向は 118° 風速は 7 m/s であることから、対地速度のずれは妥当な結果と考えられる。巡航速度と設定飛行速

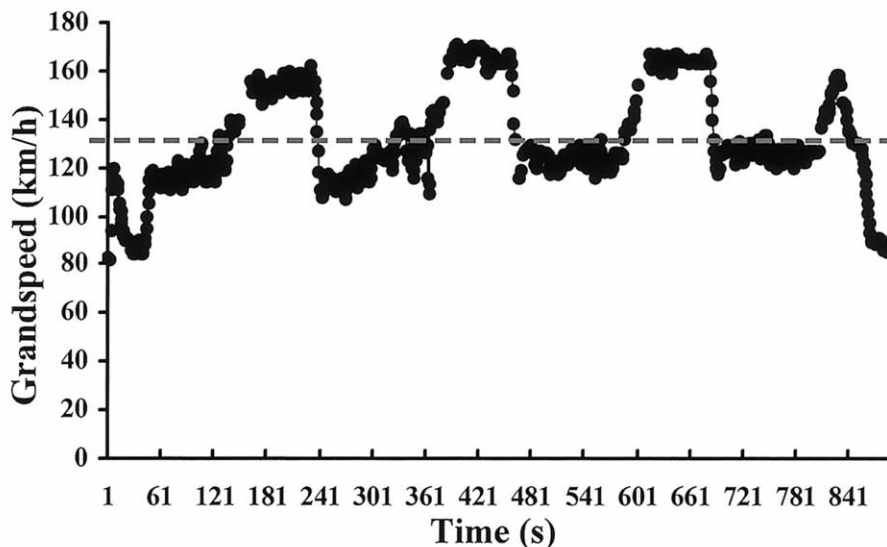


図 9 図 7 を飛行中の対地速度変化、破線は設定高度 700 m

Fig. 9. Variation of ground speed of the flights described in Fig. 7, dotted line: programmed altitude of 700 m.

度 (130 km/h) とのずれはピトー管による対気速度のキャリブレーションが原因と考えられる。

5. 鳥海山での飛行実験

2004年9月13日秋田県由利郡の由利原高原にある矢島町立の軽飛行機飛行場 (39.21707°N, 140.0726°E, 標高 393 m) を滑走路として、空中磁場観測を目的に Ant-Plane 2 号機による飛行実験を 6 回行った。この地域は地質調査所により精密な磁場探査が行われており、磁気異常図が刊行されている (産業技術総合研究所地質調査総合センター編, 2002)。2 号機で測定された磁気観測結果がこの磁気異常図とどの程度一致するかを調べるため、本地域で飛行実験を行った。図 10 に 4 回目 (#4) と 6 回目 (#6) の飛行軌跡を示す。図の #4 飛行ルート上に示すように、6 km × 4 km の範囲に東西 9 本、南北 5 本の磁場測線を設け、各旋回点に Wp を合計 25 点設置し、Wp 1 から順に Wp 25 まで飛行させた。東西方向の測線の間隔は東西 500 m、南北方向は 1 km、または 2 km である。飛行高度は 800 m、飛行速度は 130 km/h に設定し、手動で離陸させた後、地表から約 30 m 上空で自動操縦に切り替えた。着陸は Wp 25 を通過した後、手動に切り替え着陸させた。総飛行距離は約 100 km で 45 分間の飛行であった。飛行時の風速は地上局で約 5 m/s であった。

#6 飛行は #4 の飛行ルートを 250 m 北に平行移動させ、同様に飛行させた。飛行開始時には地上で 5 m/s 前後の風が吹いていたが、飛行中に徐々に強まり、飛行後半には小雨も降

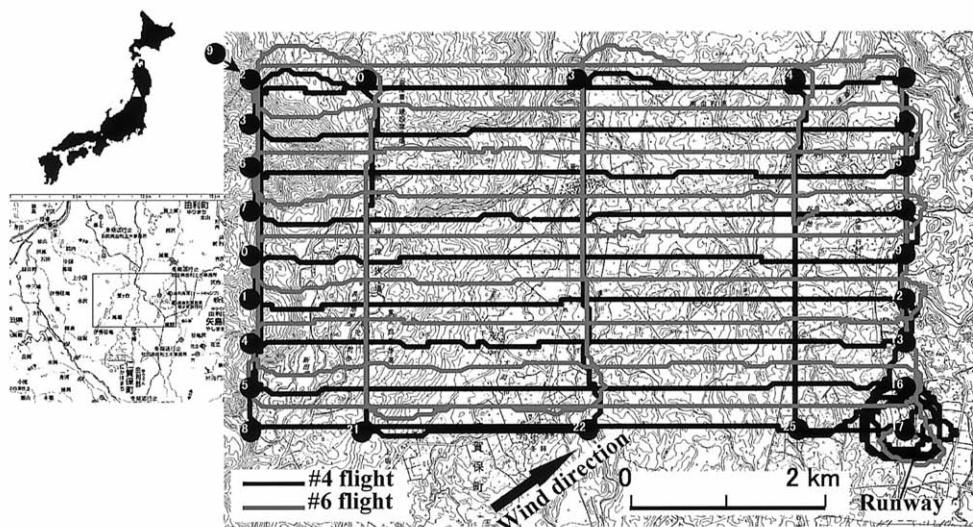


図 10 Ant-Plane 2 号機による鳥海山での飛行軌跡、黒線は 4 回目飛行、灰色線は 6 回目飛行 (4 回目飛行に対し 250 m 北に移動)。1-25 はウェイポイント。

Fig. 10. Flight tracks #4 (black line) and #6 (gray line) followed by Ant-Plane 2 over Mt. Chokai Volcano, flight #6 was shifted 250 m north of flight #4

り出した。飛行は順調に行われていたが、Wp 24 から Wp 25 への飛行中に機体が急激に降下する現象が基地局のモニター画面で観測された。何らかのトラブルでエンジンが停止したと判断し、通信機により機体搭載のパラシュートを作動させた。機体の回収は基地局で最後にモニターされた緯度・経度をもとに捜索を行い、図 10 の飛行軌跡の最終地点付近で無傷の機体を回収した。エンジン停止の原因は燃料の完全な消耗であった。

飛行軌跡パターンは#4 飛行の軌跡とほとんど同じで、信頼できる自動飛行が行われたといえる。機体が旋回する時、飛行コースは南と西側で Wp からの乱れは小さいが、北と東側で大きく乱されている。これは南西方向の風に機体が流されるためと考えられる。飛行中の風向はパラシュート降下中に流された方向から 235° と推定される。強風を斜めから受け飛行したために、絶えず方向修正が必要で、予想以上の燃料を消耗したものと考えられる。なお#6 飛行の総時間は 48 分であった。

図 11 に#4 と#6 飛行の GPS 対地速度を示す。#4 飛行では設定速度 130 km/h に対し、

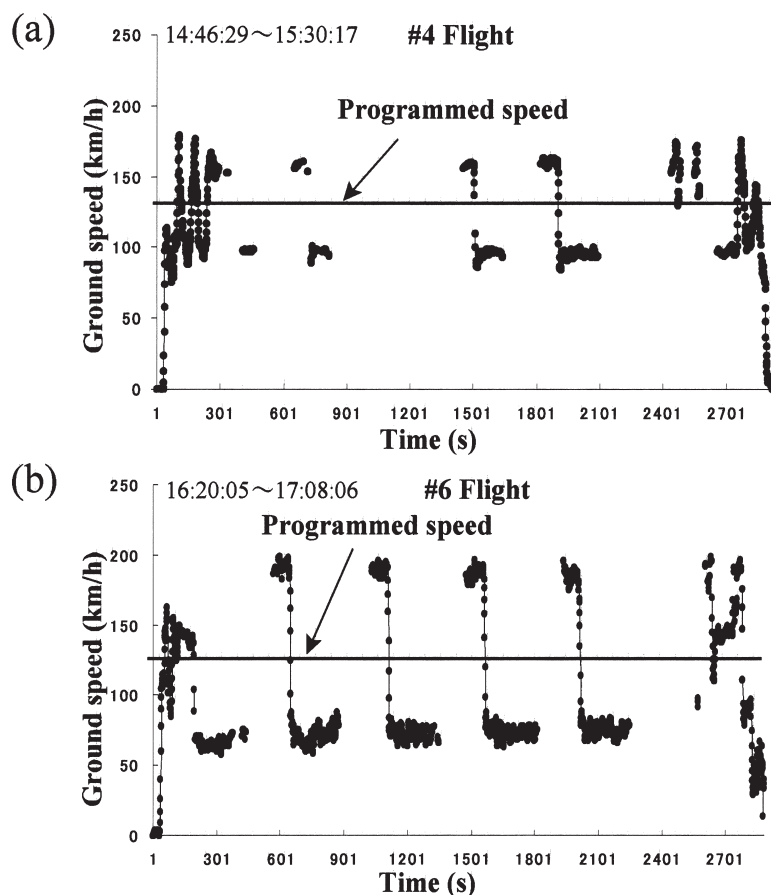


図 11 図 10 を飛行中の対地速度。(a) 4 回目飛行, (b) 6 回目飛行
Fig. 11. Variation of ground speed during the flight described in Fig. 10.

西に飛行するときは 90 km/h, 東に飛行するときは 170 km/h の対地速度である。すなわち大気速度は 130 km/h であるが, 飛行方向の風速は 40 km/h (11 m/s) となる。推定される風向が 235°であるから, 実際の風速は 48.8 km/h (13.6 m/s) である。#6 飛行では西方飛行で 70 km/h, 東方飛行で 200 km/h が観測されている。すなわち巡航速度は 135 km/h で, 機体進行方向の風速は 65 km/h (18.1 m/s) となる。この風速は実際の風向を考慮すると 79.3 km/h (22.0 m/s) となる。

6. 空中磁場観測

6.1. 磁気抵抗型磁力計システム

小型 UAV に搭載する磁力計として, Honewell 社が製造している HMR-2300 を選定した。この磁力計は磁気抵抗センサーを使用した小型 (9.0×3.8×2.2 cm), 軽量 (80 g), 省電力型の三成分磁力計で, 精度は 7 nT, 各軸の直行度は $\pm 2^\circ$ 以内である。この磁力計に GPS とデータログ, それにバッテリー (リチウムポリマー, 1.7 A/h) を取り付け, 磁力計システムを製作した。秒値で磁場成分 xyz, 緯度, 経度, 高度, それに受信衛星数を連続 6 時間データログに記録できる。磁力計システムの総重量は 400 g で, 消費電力は約 0.3 W である。

6.2. 桜島での空中磁場観測

桜島で行われた空中磁場観測の結果の一例を図 12 に示す。機体の姿勢が不明なため, 測定値は全磁力 (F) に変換している。機体の持つ磁化は機首方向に 50 nT と推定されるが, 測定された F の変化が 900 nT と大きいため, 本図では機体磁気の影響を考慮していない。地磁気観測所・鹿屋出張所の観測結果から, 飛行時間には磁気嵐等による磁場のじょう乱は発生していない。Course A の #1 と #2 で観測された F 値の変化は極めてよく似ており, Course B の #3 と #4 の F 値も同様である。経過時間 1 秒付近の F 値が最小となっているのは, 図 7 に記載した桜島西端の溶岩流 (大正溶岩) の境界付近を飛行したことが原因である。また, 110-160 秒間に観測される大きな F 値は, 地形が急しゅんになる付近に対応し, 地形効果によるものと考えられる。

桜島での磁場観測では, 磁力計システムから発生する電磁ノイズの影響により機体の GPS が受信できなくなる問題が発生した。応急処置として磁力計システムと GPS アンテナ線をアルミホイルでシールドすることにより解決した。

6.3. 鳥海山での空中磁場観測

図 13 に鳥海山の #6 飛行で測定された東西の 2 測線, 6 km 間の F 値変動の一部を示す。飛行高度は 800 m である。地表の起伏を考慮すると, 機体と地表面の高度差は 500-200 m

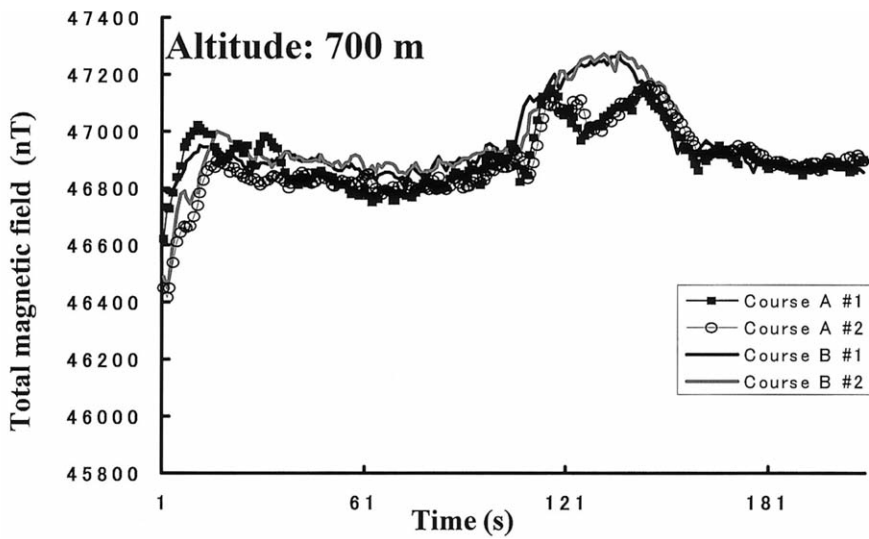


図 12 桜島で Course A #1 と Course A #2, 及び Course B #1 と Course B #2 飛行時に観測された全磁力変化

Fig. 12. Variation of the total magnetic field observed during Course A #1, Course A #2, Course B #1, and Course B #2 flights over Sakurajima Volcano.

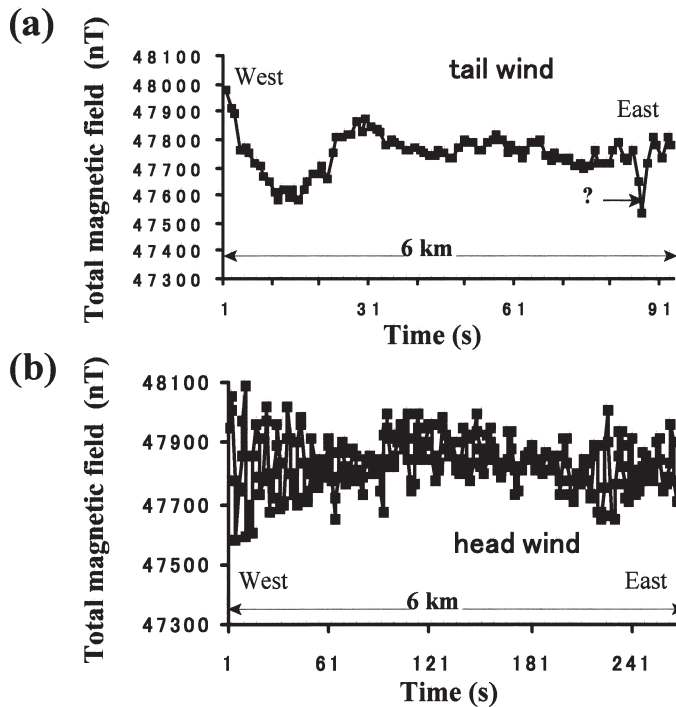


図 13 鳥海山で観測された全磁力変化. (a) 4 回目飛行で風下方向に飛行, (b) 6 回目飛行で風上方向に飛行

Fig. 13. Variation of total magnetic field observed during flights #4 (tail wind) and #6 (head wind) over Chokai Volcano.

である。図 13a は風下（西方）に飛行したときの毎秒の F 値である。大きな十数秒の長周期変動に小さな数秒の短周期変動が見られる。しかし、図中の（？）で示したピークは、2 秒間で 230 nT 減衰し、その後 2 秒間で 270 nT 増加する異常な短周期変動である。図 13b は風上（東方）に飛行したときの毎秒の F 値である。常時 500–100 nT の急激な短周期変動が長周期成分に重なっている。このような異常に大きな短周期変動は火山地帯では考えられない。地表面から数百メートル上空で期待される磁気異常は図 13a のような長周期が顕著となるはずである。図 13b のような短周期変動は機体が風上に飛行した時に観測され、風下に飛行した時はまれである。最大風速 30 km/h のもとで行われた桜島での飛行の時には、このような異常な短周期磁場変動は観測されていない。この現象は 48.8 km/h のような強風を斜め方向から受ける時に顕著に発生している。おそらく機体の姿勢が急激に変化を繰り返した時に、磁力計の値が安定することができず、さらに磁力計の各成分の直行度に $\pm 2^\circ$ の誤差を含んでいるため、大きな短周期ノイズが発生したと考えられる。なお、地形は飛行領域の西端では標高が高くなり、中央から東方ではほぼ平坦である。調査地域の磁気異常図には、中央付近に正の磁気異常がみられる。このような地形や磁気異常のデータを考慮すると、図 13a で観測された長周期変動は妥当なものと考えられる。なお強風下での空中磁場観測を高精度で行うためには、サンプリング間隔の短い光ポンピング磁力計の搭載が必要である。

7. 高高度飛行による気象観測

Ant-Plane 4 号機により 2005 年 6 月 29 日紋別市において高高度飛行実験を行った。紋別

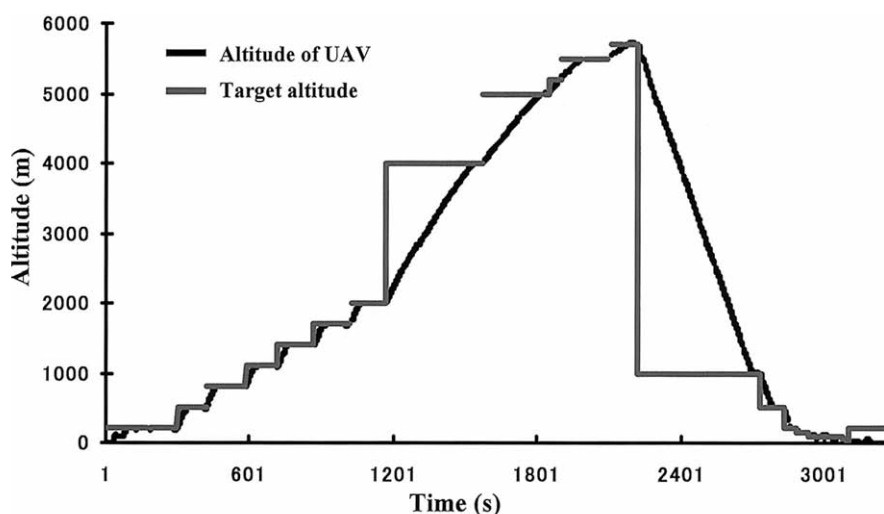


図 14 北海道紋別市で行われた Ant-Plane 4 号機による 5700 m までの高高度飛行
 Fig. 14. High altitude flight up to 5700 m over Monbetsu, Abashiri-shicho, Hokkaido.

市で飛行実験を行った理由は、5000 m を超える高高度飛行は北海道か沖縄のみが可能なこと、北海道はこの時期比較的好天に恵まれること、それに適切な滑走路があることから選定された。滑走路の位置は 44°15.58'N, 143°31.99'E, 標高 13 m で、東西 2 km, 南北 1 km の範囲を旋回させ、図 14 に示すように段階的に高度 5700 m まで上昇させた。機体にはラジオゾンデで使用している気温、湿度センサーとエアロゾルカウンターを搭載した。本飛行実験による気象観測結果は平沢ら (2006a, b) で紹介されており、良好なデータが得られている。

8. 小型 UAV を南極で使用するための問題点

Ant-Plane 計画で開発している小型 UAV は模型飛行機に自動飛行装置を取り付けたものである。機体、エンジン、それに電子機器等は小型・軽量化に特化したもので、その信頼性の補償はない。そのため Ant-Plane を昭和基地内や人口密度の高いところで運航するには危険が伴う。一般に航空機の事故は離着陸時に発生する。これは模型飛行機でも同様である。滑走路は基地やキャンプ周辺に設置されることから、たとえ南極であっても非常時にはパラシュートにより機体を安全に着地させる装置の搭載が重要であろう。

現在 Ant-Plane 計画で開発している機体の低温対策は特に行っていない。昭和基地の 2004 年 12 月 1 日から 2005 年 1 月 31 日までの地上での最高気温と最低気温はそれぞれ 7.5°C と -8.1°C である (国立極地研究所編, 2005)。真冬の北海道でラジコン飛行機が飛行していることから、この程度の低温では簡単な断熱材による保温対策で飛行可能である。しかし 1000 m 以上の高度では、気温が -10°C 以下になり、ケーブルや燃料ホース、それに防振ゴムなどを硬化させ、長時間飛行に大きな障害を与えることが予想される。低温に強い材料への変更が必要である。我々は Ant-Plane を運用できる最低温度を -15°C とし、機体の開発を行っている。

300 km を超える長距離用 Ant-Plane には発電機が搭載されており、ほとんどの電力を発電機から供給している。このため低温による電力低下の問題は発生しない。しかし、中距離機や近距離機ではモーター類の電力はすべて搭載バッテリーによって供給している。室温で保管したバッテリーを断熱材で包み、すぐ飛行させる場合は、自身の発熱でバッテリー容量の低下の心配は少ないと考えられるが、飛行開始までの時間が長いと低温によるバッテリー容量の低下は大きな問題となる。近い将来、超軽量小型の燃料電池やキャパシター、それに発電効率の高い太陽電池パネルが開発されれば、電動機による長時間飛行も可能となると考えられる。電動機は低振動で低温での運用も容易なため、エンジン機の時持多くの問題点を一挙に解決でき、Ant-Plane の発展にとっては極めて重要な要因である。

小型 UAV は大型機に比べ強風に弱い。昭和基地の上記期間の平均風速は 4.4-4.6 m/s である。斜面下降風が吹くこともあっても、午後には止むことが多いことから、南極の夏期

間に沿岸地域で Ant-Plane を飛行させることができる風速 10 m/s 以下の日数は十分確保できると考えられる。Ant-Plane 1, 2, 4, 5 号機は風速 20 m/s でも飛行可能であるが、強風・低温下で手動により離着陸させることは困難であり、非常時にパラシュートによる安全な機体の回収も困難となる。風速 5 m/s 以下の静穏時に風上に向かって離着陸させることが必要であろう。

現時点で小型無人機による 100 km を超える飛行はエンジン機のみが可能である。しかし、エンジンの始動にはキャブレターやアイドルレベルの調整、それに点火プラグのチェック等、経験や特殊技術が必要なことが多々ある。また無線機による手動の離着陸操作では、瞬時の操縦判断が求められ、素人にとってはさらに困難である。自動離着陸装置が開発されれば、エンジン調整の訓練を受けた隊員であれば容易に Ant-Plane を運用できると期待される。その前段階として、カタパルトによる離陸、パラシュートによる回収方法を確立することが当面の課題である。第 46 次隊では越冬中に昭和基地の東の海水を滑走路として Ant-Plane 2 号機を飛行させるための努力が図られた。しかし、良好な滑走路が確保できず、滑走中に機体が傾きプロペラを破損する事故が起り、飛行実験を断念した。特に夏期間は海水の雪面の凹凸は激しく、氷が薄いため雪上車等による整地も困難である。カタパルトによる離陸が可能であれば、このような問題は発生しなかったと考えられる。

謝 辞

Ant-Plane の開発にあたり日本飛行機株式会社、フジ・インバック株式会社、模型航空機研究所、柳瀬川ラジコンクラブ、クロスウィンドフライヤーズクラブにお世話になった。

本研究は国立極地研究所プロジェクト研究・開発研究 E4、文部科学省・科学研究補助金・萌芽研究（課題番号 15654063: 平成 15-17）、それに科学研究補助金・基盤研究 A（課題番号 17204038: 平成 17-20）により行われている。ここに厚くお礼申し上げる。

文 献

- 平沢尚彦・尾塚馨一・林 政彦・田辺誠治・船木 實 (2006a): 梅雨期の北海道オホーツク海岸域における無人航空機による大気観測 (1)—無人航空機, 気象センサー, 観測計画—. 天気, **53**, (投稿中).
- 平沢尚彦・尾塚馨一・林 政彦 (2006b): 梅雨期の北海道オホーツク海岸域における無人航空機による大気観測 (2). 一気温, 湿度, 粒子数の鉛直構造—. 天気, **53**, (投稿中).
- 国立極地研究所編 (2005): 日本南極地域観測隊第 45 次隊報告 (2003-2005). 東京, 182.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター編 (2002): 由利原地域高分解能空中磁気異常図, 1/50000. つくば.