

—研究ノート—

Scientific Note

南極サウスシェトランド諸島での小型無人飛行機 Ant-Plane の飛行と 空中磁気・航空写真観測

船木 實^{1,8*}・東野伸一郎²・坂中伸也³・岩田尚能⁴・中村教博⁵
平沢尚彦^{1,8}・小原徳昭⁶・桑原幹夫⁷

Aeromagnetic and aerial photographic survey in the South Shetland Islands,
Antarctica, conducted by a small unmanned aerial vehicle (Ant-Plane)

Minoru Funaki^{1,8*}, Shin-Ichiro Higashino², Shinya Sakanaka³, Naoyoshi Iwata⁴, Norihiro Nakamura⁵
Naohiko Hirasawa^{1,8}, Noriaki Obara⁶ and Mikio Kuwabara⁷

(2013年1月31日受付; 2013年4月15日受理)

Abstract: Two small unmanned aerial vehicles, Ant-Plane 6 and Ant-Plane 3, were assembled using parts and technologies developed for model airplanes. The aerial vehicles were scheduled to conduct aeromagnetic and photographic surveys of the Bransfield Basin, from a takeoff runway at Marsh Airfield on the South Shetland Islands, Antarctica, during January 2011. However, the scheduled surveys were not conducted on account of poor weather. Research was later conducted on a glacier, using a takeoff runway at St. Kliment Ohridski Base, Livingston Island, during December 2011. A flight from St. Kliment Ohridski Base to Deception Island yielded satisfactory results; the total distance of 302.4 km was traversed in 3 h 7 min (3:07). On this flight, aeromagnetic and aerial photographic data were obtained from an altitude of 780 m for a 9×18 km area on the northern half of Deception Island. Aerial photographs of Deception Island and South Bay showed the distributions of glaciers and their crevasses. The Ant-Plane flew over the Antarctic horizon and surveyed above Deception Island. That was the successful venture of this kind, demonstrating that airborne surveys by Ant-Planes are useful for Antarctic research investigations. Airborne surveys provide a safe and economical approach to data acquisition as compared with manned aerial operations.

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, Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

² 九州大学. Kyushu University, 744, Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395.

³ 秋田大学. Akita University, 1-1 Tegata Gakuen-machi, Akita City, 010-8502.

⁴ 山形大学. Yamagata University, 1-4-12 Kojirakawa-machi, Yamagata-shi, 990-8560.

⁵ 東北大学. Tohoku University, 6-3 Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai-shi, 980-8578.

⁶ ロボティスタ. Robotista Co., M&T 103, 2-9-3 Sakura-machi, Koganei, Tokyo 184-0005.

⁷ RC サービス. RC Service, 2-15-26 Sakuradai, Isehara, Kanagawa, 340-0022.

⁸ 総合研究大学院大学複合科学研究科極域科学専攻. Department of Polar Science, School of Multidisciplinary Sciences, The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

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

要旨: 模型飛行機の部品と技術を応用し、2種類の小型無人飛行機、Ant-Plane 3と6を開発した。2011年1月、南極キング・ジョージ島 (King George Island) でブランスフィールド海盆 (Bransfield Basin) の空中磁気観測を計画したが、悪天候等で満足できる飛行ができなかった。2011年12月にはリビングストン島 (Livingston Island) にあるセント・クリメント基地 (St. Kliment Ohridski Base) からデセプション島 (Deception Island) とサウス・ベイ (South Bay) に Ant-Plane を飛行させ、空中磁気観測と航空写真撮影を行った。デセプション島では、島の北半分 9×18 km の範囲を高度 780 m で、3時間 07分、302.4 km を飛行し、空中磁気観測を行った。この結果からデセプション島の北半分とその周辺海域の磁気異常を明らかにすることができた。デセプション島とサウス・ベイでの飛行からは良好な画像が得られ、氷河の分布やその構造が撮影された。デセプション島の飛行は、無人機が南極の地平線を越えて科学観測をした数少ない飛行の1つである。暴風圏南端の過酷な自然条件の中で成功したことは、南極での無人飛行機による科学観測が可能であることを示した。また実機による航空機観測と比較し、極めて大きな費用対効果を実証した。

1. はじめに

2000年5月より民間で使用できる全地球測位システム (GPS) の測位精度が 100 m から 10 m 程度に向上したことにより、模型飛行機に GPS を搭載し自律飛行を行う無人機の開発研究が民間でも行われるようになってきた。また時期を同じくして、コンピュータの小型・省電力化も進み、模型飛行機を制御する電子機器の開発や、搭載できる観測機器の開発も可能となった。このような科学技術環境の変化を背景に、国立極地研究所は 2001 年より南極観測で使用する小型無人機 (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) の開発を民間企業や九州大学、それにラジコン飛行機マニアと共同で始めた。この計画 (Ant-Plane project) の目的は、夏の南極の沿岸地域で 1000 km 以上飛行する翼幅 3 m 以下の無人機 (Ant-Plane) の開発と、磁力計や気象観測装置等の搭載機器の開発、そしてそれらによる観測である。Ant-Plane による航空機観測の利点は、高い費用対効果と安全性、それに環境への負荷が小さいことが挙げられる。Ant-Plane を用いることにより研究者自身による即応性に富んだ航空機観測が可能となり、南極観測での利用の期待は大きい (船木・Ant-Plane Group, 2006; Funaki *et al.*, 2008)。

我々は 2003 年に桜島南岳周辺で行った Ant-Plane による飛行距離 100 km の空中磁気観測と航空写真撮影、2005 年に紋別市で行った上空 5700 m までの気象観測、2007 年に五島列島で行った 1108 km の連続飛行等の実績を積み上げてきた。また、日本南極地域観測隊 (JARE) は昭和基地周辺で以下のような Ant-Plane の飛行実験を行ってきた。

- 1) 第 46 次日本南極地域観測越冬隊 (JARE-46) は、2006 年 1 月に無人飛行機 Ant-Plane 2-2 による空中磁気観測を昭和基地周辺の海氷上で計画した。トラクタータイプのこの機体は 86 cc ガソリンエンジンを搭載し、翼幅 2.0 m、機体重量 15 kg、巡航速度 130 km/h で 1 時間飛行が可能である。しかし、夏の終わりの南極では、滑走路となる海氷の凹凸が激しく、離陸時に海氷面に翼が接触し、機体の一部が破損し離陸に失敗した。
- 2) 第 48 次日本南極地域観測夏隊 (JARE-48) は、2007 年 1 月に昭和基地の北東にある大陸

氷床 (S17) で、凧型無人機 (カイトプレーン) により温度、湿度、エアロゾル観測を高度 300–1200 m の間で行った。安定した飛行により満足できる気象データを得ることができた。この機体は翼幅 2.3 m、巡航速度 36–55 km/h、滞空時間 2 時間である (平沢・原, 2007)。引き続き同隊はプッシャータイプの Ant-Plane 4-2 による気象観測を実施した。しかし、滑走路を離陸した後失速し、滑走路近傍の雪面に墜落した。この原因はウェイポイント (WP; 飛行ルート上に定めた通過地点、緯度、経度、高度、スピードから成る) の設定ミスであった。本機体には 86 cc ガソリンエンジンが搭載され、5 時間、500 km の飛行が可能であった。

- 3) 第 49 次日本南極地域観測越冬隊 (JARE-49) は、2008 年 12 月に Ant-Plane 4-3 を昭和基地東方 2 km の海氷上で飛行させ、1.5×1.5 km の周回飛行で、高度 200 m から 1000 m まで、200 m 間隔で気温と湿度観測を行った。本実験の飛行時間は 1 時間、飛行距離は 110.5 km、良好な気象データを得ることができた。しかし、磁力計を搭載した Ant-Plane 4-4 は同様の飛行を計画したが、自動飛行中にエンジンが停止し墜落したため、空中磁気データは得られなかった。なお Ant-Plane 4-2、4-3、4-4 は同じ形状と飛行性能を持つ機体である。

一方、日本南極地域観測隊が行っている無人飛行機観測と同等の観測が、イギリス南極研究所 (BAS) でも行われている。2007 年 8 月にはハレー基地 (Halley Station, Brunt Ice Shelf floating on the Weddell Sea) で、UAV (mini-UAV M²AV) を使用して、高度 230 m までの気象観測を行っている。この機体は電動で、翼幅 2 m、機体重量 6 kg、飛行時間は 40 分で 45 km 飛行が可能である (Spiess *et al.*, 2007; BAS, 2008)。

図 1 に示されるように、サウスシェトランド諸島 (South Shetland Island) は南極半島の北に位置し、その間にはブランスフィールド海峡 (Bransfield Strait) がある。太平洋プレートの一部を構成する Phoenix プレートが諸島の北にある海溝で南極プレートに沈み込むことにより、諸島が南極半島 (Antarctic Peninsula) から切り離され、ブランスフィールド海盆を形成したと考えられている。南米と南極半島の間にある沈み込み帯は 2 億年前に形成し、海盆形成は 4 百万年前に停止した (Tanner *et al.*, 1982; Barker and Dalziel, 1983; Pankhurst, 1983; Barker and Austin, 1994)。GPS 観測によると、現在サウスシェトランド諸島は 15–20 mm/yr の遅い速度で北東方向に移動している (Dietrich *et al.*, 2001) が、海盆北側の拡大軸付近では、活発な海底火山噴火や地震が観測されている (Dziak *et al.*, 2008)。

デセプション島 (62°58'37"S, 60°39'00"W) はブランスフィールド海盆の拡大軸とリビングストーン島の間にある直径 12 km のほぼ円形の島であるが、東海岸は直線的である。島の中央に 9×6 km のカルデラのポート・フォスター (Port Foster) があり、最高峰はマウント・ポンド (Mt. Pond: 539 m, 図 7) である。デセプション島の地下構造は地球物理学・地質学的

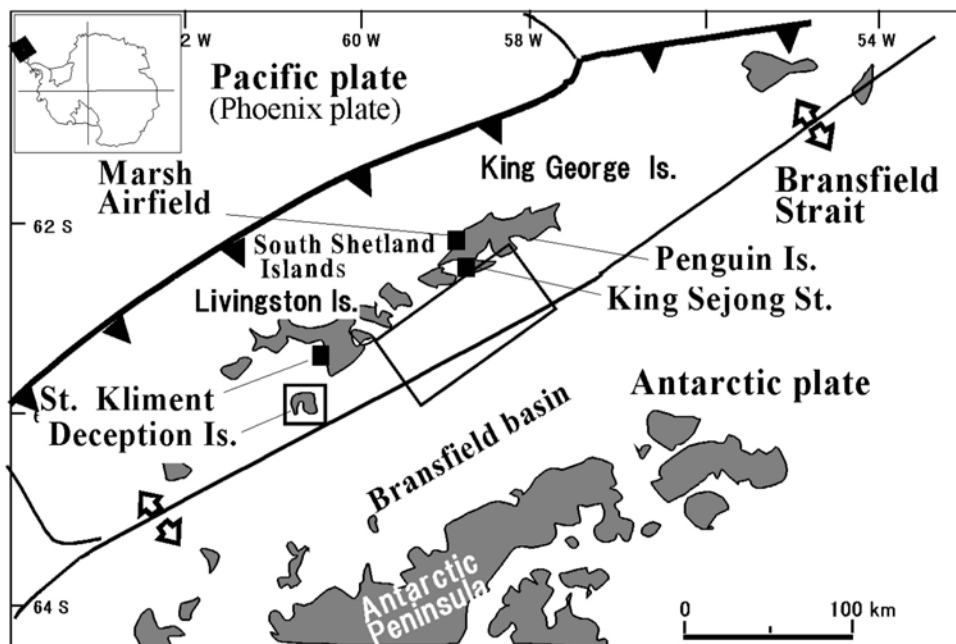


図1 サウスシェトランド諸島と南極半島間のブランスフィールド海盆とプレート境界. 四角で囲まれた領域は2011年1月の調査予定地. 黒三角の付いた線は太平洋プレート(Phoenix plate)が南極プレートに潜り込む, 沈み込み帯. 白矢印の付いた線はブランスフィールド海盆のプレート拡大軸.

Fig. 1. Bransfield Basin and the plate boundary located between the South Shetland Islands and the Antarctic Peninsula. Open square, main survey area; line with solid triangles, subduction zone between the Pacific (Phoenix) plate and the Antarctic plate; line with white arrows, spreading ridge in the Bransfield Basin.

手法によって研究され (Pedrera *et al.*, 2012), 島の南東部に ENE-WSW 方向に伸びた高い電気伝導帯 (高温液体と部分溶融した領域) が深さ 2-10 km に推定され, 断層系との関係が研究されている. 船舶によるブランスフィールド海峡の磁気異常の研究は Lawver *et al.* (1995) により報告され, 島の北側の海域とポート・フォスター内部で負の磁気異常が, また島の東の海域と島の西からポート・フォスター内部にかけて正の磁気異常が報告されている. しかしデセプション島陸域の磁気観測は行われておらず, 島本体の磁気異常は不明である.

本研究はブランスフィールド海盆の進化と形成の研究 (2010-2012, 古地磁気学, 岩石年代学, 地磁気学, 地質学) の一環として行われた. 2011年1月には空中磁気観測をブランスフィールド海盆の 100×50 km の範囲で Ant-Plane により行う計画を立てた. また 2011年12月にはデセプション島とその周辺海域, 及び 2012年1月にはキング・ジョージ島のペンギン島 (Penguin Island) とマリアン・コブ (Marian Cove) の調査を計画した.

2. 小型無人飛行機 Ant-Plane

本研究に用いた無人機, Ant-Plane 6-3 は, 図 2a に示すように, プッシャー式の機体である. 機体の大きさは, 図 3a に示すように, 全長 2100 mm, 翼幅 2890 mm である. 図 4a に飛行に必要な装置と燃料タンクを搭載した胴体内部と, 図 4b に観測装置を収納するノーズを示した. 表 1 に機体の特徴を示すように, 燃料搭載前の重量は 20 kg, 10 l のガソリンを搭載した場合の離陸重量は 28 kg である. 機体は胴体, ノーズ, 主翼, 垂直尾翼の付いたブーム, 水平尾翼に分かれ, 現地で組み立てる. エンジン (フジインバック社製, BT-86) は 2 サイクル, 水平対向で胴体の後部に取り付けられ, 発電機 (25 W) と逆転のプロペラ (木製, 24/10 L) が直結している. 主翼から後方に延びた 2 本のブームにより水平尾翼が固定され, 水平尾翼の可動部は中央で分割され, それぞれ異なるサーボモーターで駆動する. 機体はガラス繊維と炭素繊維をエポキシ樹脂で固化させた FRP 製で, 補強のため機体の要所に木枠が取り付けられている. 離着陸は前輪が 1 本, 主輪が 2 本のアームにタイヤまたはスキーを装着して行う. 胴体容積の約 2/3 を占める燃料タンクは, 2 カ所のパーティションで区切られ, 機体が傾いても急激な重心移動を回避している. 機体制御は全てサーボモーター (日本遠隔制御 kk 社製 JR DS8421) で行う. 自動飛行システム (Higashino, 2006), サーボモーター, 通信機の電源はバッテリー (NH 6 V, 1600 mA/h) から得る. 発電機 (ブラシレスモーター: Model motors

表 1 Ant-Plane 3-5 と Ant-Plane 6-3 の機体緒言

Table 1. Characteristics of Ant-Plane 3-5 and Ant-Plane 6-3.

	Ant-Plane 3-5	Ant-Plane 6-3
機体重量 (ドライ) (kg)	6.8	20
離陸最大重量 (kg)	9.0	28
最大搭載燃料 (cc)	1800	10000
最大ペイロード (kg)	0.5	2
燃料消費量 (cc/h)	600	2000
航続距離 (km)	300	500
飛行速度 (km/h)	100	100
最高高度 (m)	2000	5000
飛行時間 (h)	3	5
失速速度 (km/h)	57	70
エンジン	20cc ガソリン	86cc ガソリン
馬力 (HP)	1.5	7.5
発電機	あり	あり
回転数 (rpm)	7000	6000
非常用パラシュート	あり	あり
無線通信距離 (km)	5	5
データ記録	通信経由地上局にて	通信経由地上局にて
自動操縦	あり	あり
離陸	手動	手動
着陸	手動またはパラシュート	手動またはパラシュート
プロペラ	38 cm, 15/8 L 正転 塩ビ樹脂	61 cm, 24/10L 逆転, 木製

Ltd. 社製, AXi 4120/18) から得た AC 電流 (7.4 V, 巡航で 25 W) はコンバーターで DC に変換 (ロボティスタ社製 RBT-NO440316) され, バッテリーに充電される. 機体の手動操作は, 基地局のプロポ送信機 (日本遠隔制御 kk 社製, JR CPM9XII) で行い, その信号は機体搭載の受信機 (日本遠隔制御 kk 社製, JR 9ch DR 931, 2.4 GHz) を経由し, サーボモーターをコントロールする. また基地局と機体の相互通信は無線モデム (双葉電子社製, 2.4 GHz 帯 SS 無線モデム FDA-01) によって行われる. 通信可能の範囲は半径 5 km 以内である.

Ant-Plane 3-5 は Grob Aircraft 社 (ドイツ) G-109 のスケール機で, 図 2b に示すようにトラクター式の機体である. 右翼端には磁力計のセンサーを, 左翼端にビデオカメラを装着している. 機体の大きさは図 3b の, 機体性能は表 1 の通りである. ガソリン 1.8 l を搭載した時の重量は 9 kg で, 300 km の飛行が可能である. 機体制御方法や通信等については, Ant-Plane 6-3 と同じである.

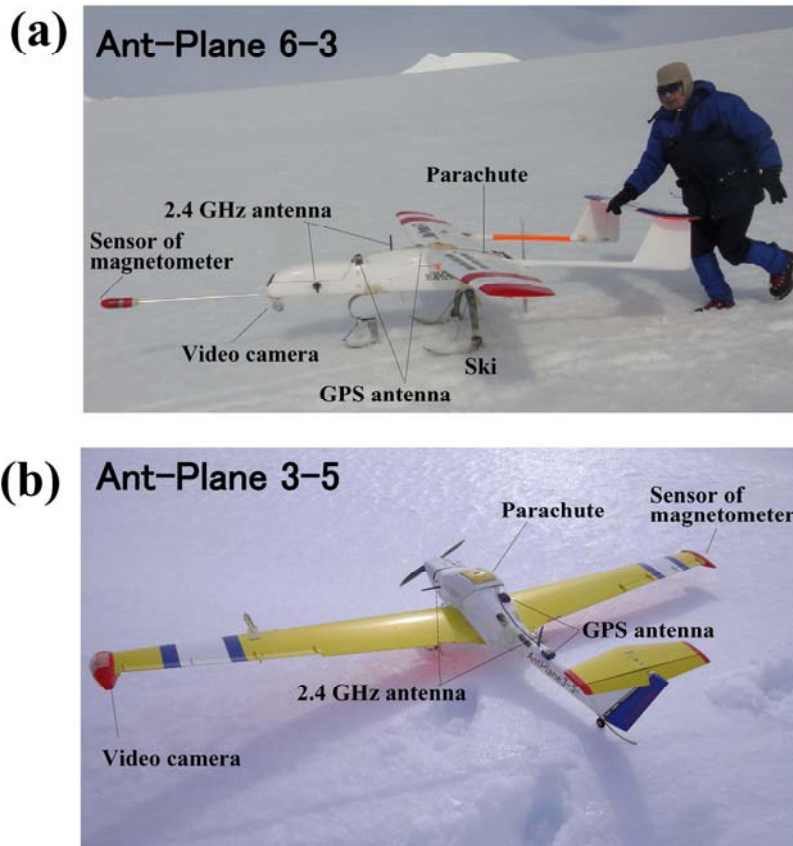


図 2 セント・クリメント基地の滑走路における機体. (a): Ant-Plane 6-3 と (b): Ant-Plane 3-5 の写真.
Fig. 2. Photographs of Ant-Planes. Ant-Planes 6-3 (a) and 3-5 (b) on the runway at St. Kliment Base.

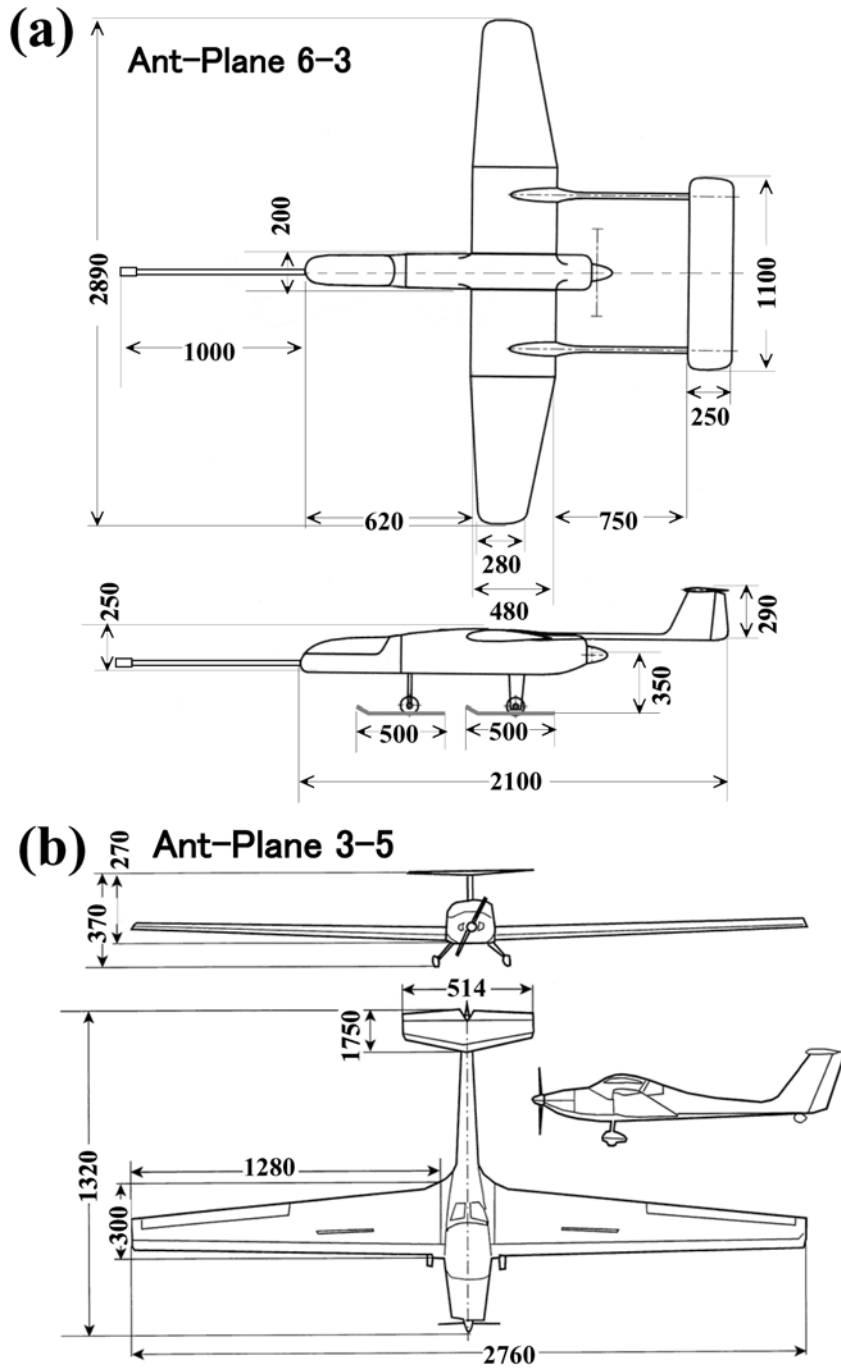


図 3 (a): Ant-Plane 6-3 と (b): Ant-Plane 3-5 の形状 (単位: mm)

Fig. 3. Outline of Ant-Planes 6-3 (a) and 3-5 (b). Units, mm.

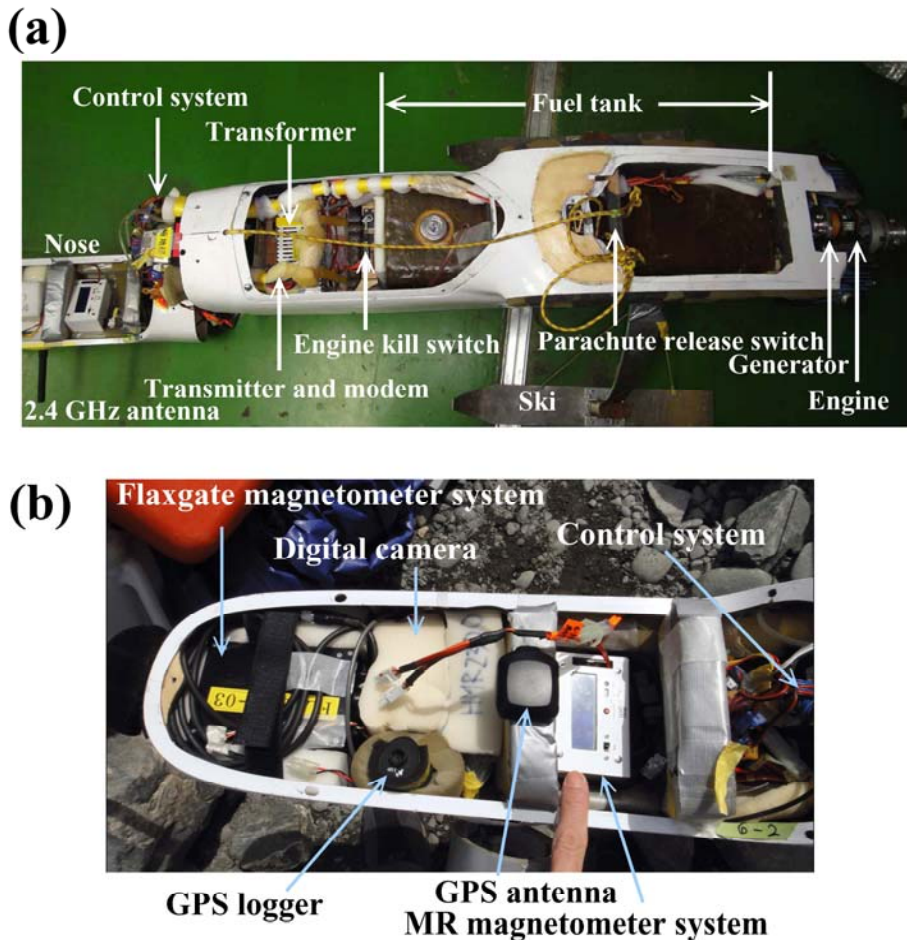


図 4 (a): Ant-Plane 6-3 の胴体内部 (機体制御関係と燃料タンク) と (b): ノーズ内部 (観測装置)
 Fig. 4. Views inside the body (control system and fuel tank) (a) and nose (scientific instruments) (b) of Ant-Plane 6-3.

3. 磁 力 計

一般に地磁気観測用に使用されている設置型磁力計は、大きさ、重量、消費電力の問題から Ant-Plane には搭載できない。飛行中の振動に対する磁力計の故障対策も必要である。また高価な磁力計は飛行の信頼性が確立していない無人機に搭載するにはリスクが大きい。このような理由で我々は Ant-Plane に搭載可能な 2 種類の磁力計を製作した。以下にそれぞれの磁力計の特徴を示した。

3.1. フラックスゲート磁力計システム (FLFG 27-03: テラテクニカ社製)

FLFG 27-03 磁力計システムは、三成分フラックスゲート磁力計、GPS、データロガ、バッ

テリで構成される。三軸磁気センサーの x , y , z 軸の角度は互いに 90° が望ましいが、数度の誤差 (直行度) を含む。この磁力計の場合、直行度の誤差はソフトウェア的に補正され、各軸の直行度は 1° 以下となっている。磁力計の感度は 0.1 nT 、消費電力 0.5 W 、リチウムポリマーバッテリー (7.4 V , 2100 mA) を使用した場合の総重量は 523 g で、4 時間の地磁気連続観測が可能である。磁気データは 10 Hz で出力される。GPS の位置情報は秒値で出力されるが、変動分を比例配分し 10 Hz データとして、磁気データとともに SD カードに収録される。

3.2. 磁気抵抗型磁力計システム (MR 磁力計: ロボティスタ社製, RBT-NO40081E)

MR 磁力計システムは三成分磁気抵抗型磁気センサー (HMR-2300, Honeywell 社製, 米国) に GPS, データログ, それにバッテリーを組み込んだ磁力計である。感度は 7 nT 、消費電力は 0.4 W 、リチウムポリマーバッテリー (7.4 V , 1500 mA) で、総重量 400 g 、3.5 時間の地磁気連続観測が可能である。秒値の GPS 位置情報と三成分磁気データが SD カードに記録される。

図 5 に HMR-2300 とフラックスゲート磁力計による地磁気測定結果 (全磁力値: F 値) を示す。HMR-2300 はフラックスゲート磁力計に比べ、感度が悪いのに加え、顕著な F 値のドリフトがみられる。HMR-2300 では、 x と y 軸に対し z 軸の直行度が最大 2° の誤差を含む可能性があるが、機体の持つ磁化や機体搭載電子機器から発生する電磁ノイズや価格を考慮すると、概査的な空中磁気観測には使用できると思われる。

Ant-Plane 6-3 では機体のノーズ先端からアルミパイプを 1 m 出し、フラックスゲート磁力計センサーを先端に取りつけ (スティング方式)、ノーズ前部にはデータログとバッテリーを搭載した。磁力計の GPS アンテナはノーズ上部の外側に固定した。MR 磁力計はノーズ中央部に設置し、ノーズ内部の磁気ノイズを測定する一方、データログから出力される電気信号によってデジタルカメラのシャッターを制御した (図 4b)。

機体磁気の大きさを評価するため、地上から 40 cm 上方に設置した三成分フラックスゲート磁力計 (FLFG 27-03) に向かって東西南北方向から Ant-Plane 6-3 のノーズを磁力計に 1 m まで近づけた。この時、全ての装置の電源を入れ、エンジン回転数を 3000 rpm に固定した。この結果、ノーズ先端から 1 m の距離での機体磁気のおおよその大きさと方向は 14 nT で機首方向から 243° であった。

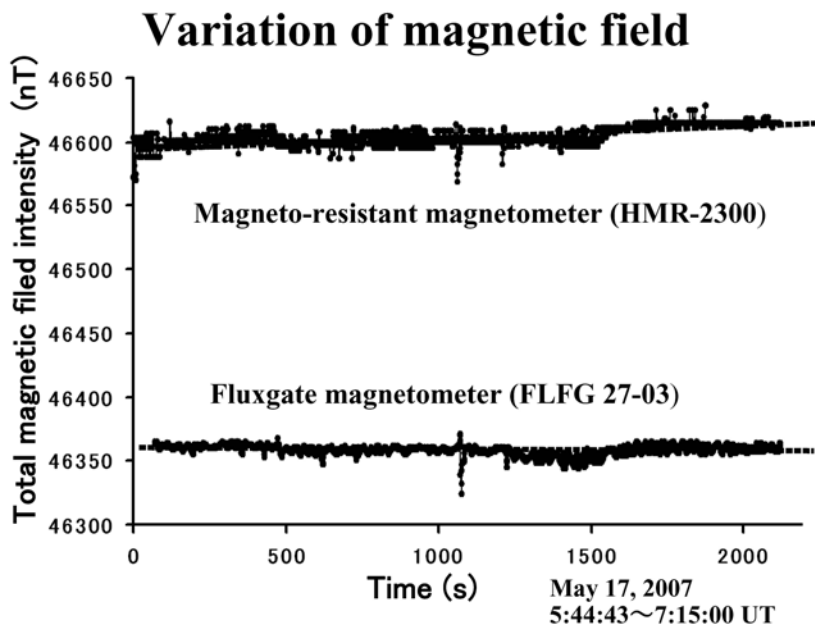


図 5 三成分磁気抵抗型磁力計 (HMR-2300) と三成分フラックスゲート磁力計 (FLFG 27-03) の全磁カノイズレベル

Fig. 5. Noise level of total magnetic field for 3-axis magneto-resistant magnetometer (HMR-2300) and 3-axis fluxgate magnetometer (FLFG 27-03).

4. 画像撮影装置と GPS 受信機

ノーズ中央部にデジタルカメラ (Pentax Optio RS1000, 4288×1536 pixel) を真下に向けて搭載した (図 4b)。機体振動を吸収し、画像のブレを軽減するため、厚さ 2 cm の粘着性ゲル状マット (Polyurethane Elastomer, Pro 7 mat) でカメラをノーズに固定した。またシャッター部を改造し、MR 磁力計の信号と接続し、4 秒ごとにシャッターを切るようにした。カメラの焦点距離を無限大、画角 60° に設定し、絞りと露出時間はカメラの自動調節機能を用いた。デジタルビデオカメラ (Gopro, 1920×1080 pixel) をノーズ外側の前方下部に、水平面より約 15° 下向きに両面接着テープで固定した。視野角度 170°, 30FPS, 露出等はカメラの自動撮影機能を用いた。

磁力計に付属の GPS 受信機の予備として、小型 GPS ロガ (Holux GPS Logger, m-241, 63 g) をノーズ内部に搭載した (図 4b)。この受信機は磁力計 GPS より感度が高く、秒値の GPS 測位情報が内蔵のデータログに記録される。

5. 飛行実験

5.1. 2011年1月のマーシュ・エアフィールド (Marsh Airfield) での飛行実験

2010年10月、機体以外の観測物資を韓国極地研究所 (Korea Polar Research Institute) の極地観測船「Araon」で韓国の南極基地に輸送した。また機体と電子機器は民間航空機でプンタ・アレナス市 (Punta Arenas City, チリ) を経由してプロフェッソール・フリオ・エスクデロ基地 (Base Profesor Julio Escudero (エスクデロ基地), チリ) に輸送した。これらの物資をエスクデロ基地の倉庫に集め、機体の組み立てを行った。2011年1月8-31日までキング・ジョージ島にあるマーシュ・エアフィールド (チリ) において、図1に示すフランスフィールド海盆の空中磁気観測を計画した。マーシュ・エアフィールドの管制塔は緯度 $62^{\circ}11'27''S$ 、経度 $58^{\circ}59'12''W$ 、標高 45 m にあり、図6に示すように、未舗装の滑走路 1292×38 m が1本ある。本実験のため5名が4機の機体 (Ant-Plane 6-3, 6-4, 3-4, 3-5) をエスクデロ基地に持ち込んだ。しかし、以下のような理由で満足いく飛行実験はできなかった。

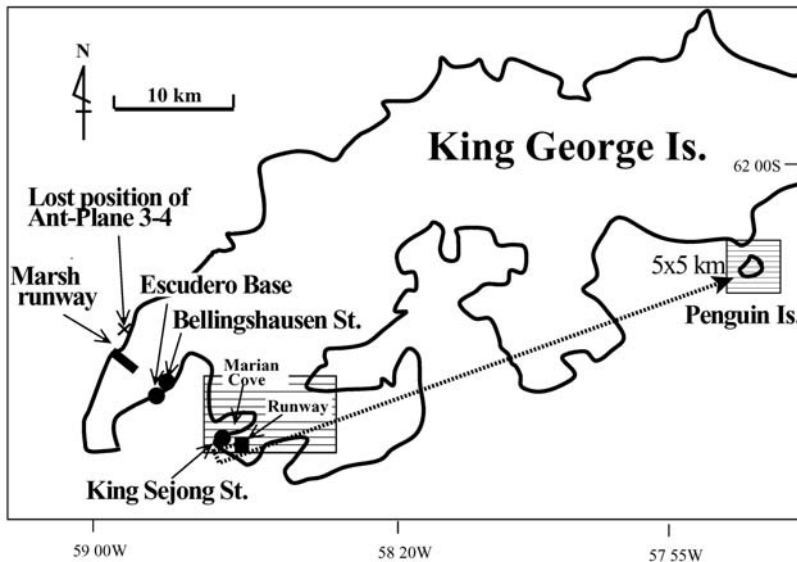


図6 キング・ジョージ島にある基地と調査地域 (●)。マーシュ・エアフィールドの滑走路 (■), キング・セジョン基地での滑走路 (■), マリアン・コブとペンギン島の調査地域 (四角で囲まれた範囲), ペンギン島への飛行ルート (.....)。

Fig. 6. Stations and research areas on King George Island (●), showing the runway at Marsh Airfield (■), the runway at King Sejong Station (■), research areas in Marian Cove and on Penguin Island (open square), and the flight route on Penguin Island (.....).

- (1) 晴天日が少なく、雨、雪、霧の日が多い。
- (2) 一般に風が強く、無人機の飛行に適する静穏日（風速 7 m/s 以下）が少ない。
- (3) 天候が良いと風が強く、風が弱いと曇りや霧の日が多い。
- (4) 無人機の飛行に適さない 200 m 以下の雲底の日が多い。
- (5) 晴天で風が弱い日には、民間機や軍用機が飛来し滑走路の使用はできない。
- (6) 実機が駐機場にある場合でも、滑走路の使用許可が出ない。

2011 年 1 月 15 日は早朝から風が弱く晴天で、無人機の飛行に適した天候であった。この日はプンタ・アレナス市で燃料費の高騰に対するストライキが行われ、空港が閉鎖された。そのため実機の飛来はすべてキャンセルになり、滑走路が我々の実験に開放された。Ant-Plane 6-3 を 100 km/h の速度で基地上空の 600×800 m の範囲を 1 時間旋回させ、自動飛行装置と磁力計の調整を行った。

1 月 24 日は風が強かったが（上空 300 m で風速 15 m/s）、Ant-Plane 6-3 でキング・ジョージ島の空中磁気観測の飛行を試みた。離陸直後の旋回飛行中にパラシュートハッチが開くトラブルが発生し、機体は滑走路の横にパラシュートにより着陸した。パラシュートハッチを開閉するプラスチック板が振動で磨耗したことが原因であった。この着陸の衝撃でノーズと磁力計パイプが破損した。

また 1 月 25 日には地上風速が 7 m/s で（上空 300 m で風速 15 m/s）UAV の飛行限度であったが、天候は良く Ant-Plane 3-4 の飛行を行った。自動飛行のためのテスト飛行を行った後、空中磁気観測の飛行を行った。観測範囲は滑走路の北 1-3.5 km の範囲を、東西 3 km 測線を 9 測線（500 m 間隔）飛行し、空中地磁気観測を行うものである。飛行高度は 500 m、速度 100 km/h、観測飛行距離は約 27 km である。離陸後、約 15 分の調整飛行を行った後、観測領域に入り、南側の測線から測定を開始した。最初の 15 分は順調に飛行したが、その後 GPS 受信衛星数が徐々に減少し、機体は操縦不能となり、ドレーク海峡（Drake Passage）にパラシュートにより不時着した。事故直後と翌日、機体の回収を試みたが、発見には至らなかった。極域では GPS 衛星の仰角が小さく衛星の補足数が減少する問題がある。しかし当時、仰角 20°以上に少なくとも 4 個の衛星があり、測位は可能であり、それが墜落の原因とは思えない。その後 Ant-Plane 6-2 と 3-5 を組み立て、再度の飛行実験を行うべく 1 月 30 日まで待機したが、天候不順で実験は叶わなかった。マーシュ・エアフィールドに滞在した 22 日間で飛行できた日数は 3 日間であった。

飛行実験終了後、機体と自動飛行装置は日本に持ち帰り、エンジンスターター、バッテリー、発電機等はマーシュ・エアフィールド滑走路の近くにあるベリングスハウゼン基地（Bellingshausen Station, ロシア）に保管を依頼した。

5.2. 2011年12月のセント・クリメント基地 (St. Kliment Ohridski Base) での飛行実験

5.2.1. 飛行準備

2011年1月の飛行実験で滞在したエスクデロ基地でブルガリア南極観測隊からリビングストン島周辺での飛行実験の打診があった。ブルガリア南極観測隊はセント・クリメント基地 (図1) をリビングストン島で運営している。マーシュ・エアフィールドから100 km以上南西に離れ、マーシュ・エアフィールドの管制空域外で、いつでも自由に飛行できる。暴風圏から離れるため、天候はキング・ジョージ島より良い可能性が大きい。基地の裏は比較的平坦な氷河に覆われ、クレバスも少なく、滑走路に使えるという。

2011年12月4日、4名のメンバーはAnt-Plane 6-3, 6-4, 3-5, 3-6, およびベリングスハウゼン基地に保管していた機材を、チリ南極研究所、ブラジル空軍 (C130 輸送機)、スペイン南極観測船「Las Palmas」の協力を得てセント・クリメント基地に持ち込んだ。Ant-Plane のガソリン100 lはセント・クリメント基地から3 km南西にあるスペインのフォアン・カルロス I 世基地 (Juan Carlos I Base) の協力を得た。

12月のセント・クリメント基地の気温は、昼間1-5°C、夜間の最低気温は-3.5~0°Cであった。雪面はザラメ状で柔らかく、日本でAnt-Plane 6-3用に準備した幅7 cm、長さ30 cmのアルミ製スキーは、雪中に沈み、滑走中にスキーと脚の取り付け部材が破壊した。スキーの長さを50 cmにし、取り付け部材を補強することにより、雪面滑走が可能となった。次に木製プロペラの改良を行った。滑走時にプロペラはザラメ雪を巻き込み、先端にぶつかり前縁部が摩耗した。先端の縁にグラスクロスを接着することにより、この問題を軽減させた。飛行前には付図に示すチェックリストにより機体状態や通信の状況を確認した。燃料はガソリンとエンジンオイルが50 : 1の混合ガソリンである。最大搭載容量は10 lであるが、機体の傾きでリークする可能性があるため、9 lを搭載した。

5.2.2. 飛行計画

Ant-Plane 6-3に燃料9 lを搭載した場合、450 kmの連続飛行が可能であるが、風の状況により飛行距離が短くなる可能性がある。そのため安全を考え、フライトを約300 kmとした。セント・クリメント基地から南方に35 km離れたデセプション島とその周辺海域で空中磁気観測をする場合、測線長は少なくとも18 kmになる。測線間隔1 kmで行うには、図7に示すように、少なくとも19測線が必要である。滑走路と観測領域の往復を考えると総飛行距離は500 kmになり、1回の飛行では全ての観測はできない。そのため観測領域を、図7の下図に示すように、島の北部と南部に分けて計画した。北部のフライトコースにはWP 0-27が与えられた。機体はWPを順番に通過し飛行する。滑走路から手動で離陸させ、高度250 mで自動飛行に切り替える。滑走路上空を旋回させながら上昇させ、高度800 mで安定飛行を確認し、南西に約8 km飛行させた後、南下させ、デセプション島の観測領域に飛ぶ。北部の観測領域は南北9 km、東西18 kmの範囲で、東西の測線 (Line) が1 km間隔で北から南に

Line 0, Line 2, …Line 9 と並ぶ. Line 9 を終了後は Line 10 を Line 1 と, また Line 11 を Line 0 と逆方向から飛ばし, 機体磁気等の評価を行う. 観測終了後は行きと同じコースをとり, 滑走路に帰還する. 南部の観測は北部が終了した後に, 同様に行う. 飛行高度はデセプション島の最高高度が 539 m (マウント・ポンド) のため 800 m, 巡航速度は 33 m/s (118.8 km/h) とした.

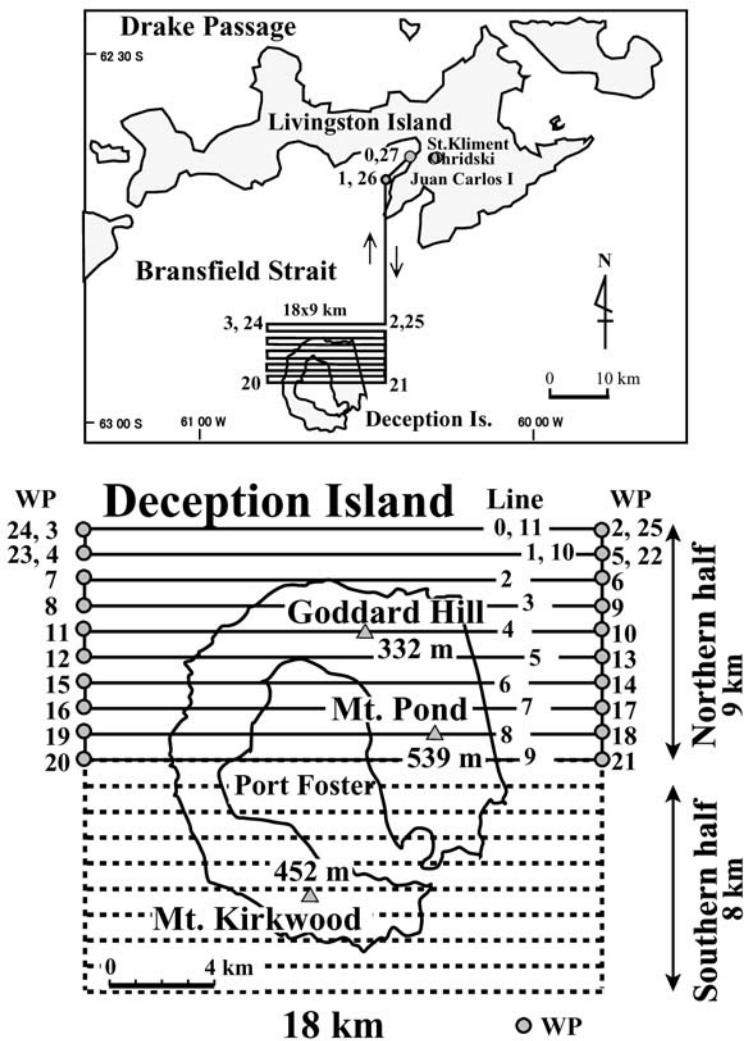


図7 上図はリビングストン島のセント・クリメント基地とデセプション島. — : 計画飛行ルート. 数値: WP. 下図はデセプション島と主な山. — (....) : 北半分(南半分)の調査範囲. WP と Line を図に示した.

Fig. 7. Upper figure: St. Kliment Base and Deception Island in Livingston Island. — : flight route, Number: WP. Lower figure: topography of Deception Island. — (....) : northern (southern) half of the research area. WP and survey line are denoted.

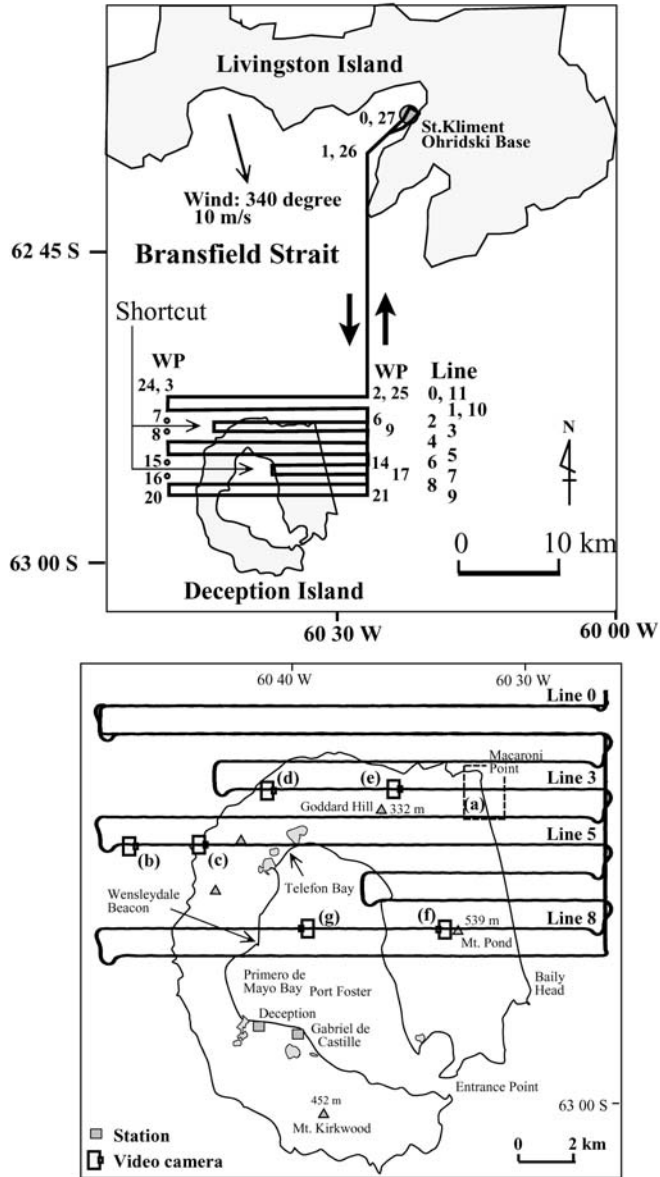


図 8 デセプション島の飛行結果. 上図: 飛行の全体の概略, 数値は WP と Line 番号. 下図: デセプション島での飛行の詳細. 図 18 の画像撮影地点を画像番号と共に示した.

Fig. 8. Result of to Deception Island. Upper figure: outline of the flight. WP and Line are denoted. Lower figure: detail of the flight. The points to take photos in Fig. 18 are denoted with the photo numbers.

表 2 飛行の経過時間

Table 2. Event sequence during the flight.

	Ant-Plane 6-3 Dec. 18, 2011 UT	Remarks	Ant-Plane 3-5 Dec. 17, 2011 UT	Remarks
takeoff	5:20:20		22:22:27	
autonomous flight at 260 m	5:29:02		22:31:36	
reach to planed height	5:40:00	800 m	22:40:11	350 m
to the survey area	5:43:20		22:41:15	
in the survey area	5:56:09	Survey time:	22:41:51	Survey time:
out the survey area	7:59:49	2:03:40	23:27:36	0:45:45
start of descent	8:22:19		23:28:32	
manual flight	8:24:49		23:29:00	
landing	8:27:28	Total flight time 3:07:08	23:29:34	Total flight time 1:07:07

5.2.3. 飛行結果

2011年12月17日午後セント・クリメント基地周辺で Ant-Plane 6-3 を飛行させ、高度 500 m で 1 時間のテスト飛行を行った。このテスト飛行で自動飛行装置の調整と、フラックスゲート磁力計、それにデジタルカメラの動作確認を行った。

12月18日 052020 UT (022020 LT), Ant-Plane 6-3 は地上気温 -3.5°C , 北の風 4 m/s, 曇り (雲底 1000 m 以上) の気象のもと、風上に向かって滑走路を離陸させた。そして機体は、表 2 に示すように、082728 UT に滑走路に着陸した。飛行時間は 3 時間 07 分 08 秒、総飛行距離は 302.4 km であった。飛行中に Holux GPS ログが記録した位置情報 (秒値) による飛行経路は図 8 に示す通りである。なお、捕捉衛星数は 7-10 個であったが、観測領域では 9-10 個であった。磁気観測領域での飛行は 2 時間 03 分 40 秒間であった。機体は WP 0-2 まで予定コースを飛行し、観測領域に入った。図 8 の下図に示すように測線 (Line) 0 と 1 (WP 2-6) は予定のコースを飛行したが、西方飛行の Line 2 の途中、WP 7 の手前 4.5 km で突然コースを逸脱し、南方に飛行した。その後、機体は Line 3 (WP 8-9) の線上まで飛行したとき、東に方向を変え、予定のコースを WP 9 に向けて飛行した。Line 4, 5 (WP 9-13 間) は予定のコースを飛行したが、Line 6, 7 (WP 14-15 間) で同様の短絡飛行が発生した。WP 15 の手前 10.5 km で機体は南方に機首を変え、Line 7 上で東方に進路を変え、当初のコースを飛行した。その後は Line 8, 9, 10, 11 を予定通り飛行し、WP 25 で観測領域を出、予定通り帰路のコースを飛行した。短絡飛行は MR 磁力計の GPS と Holux GPS ログにも記録されており、また、ビデオ画像でも 2 回の短絡飛行が確認された。短絡飛行の原因について、回収機体に記録されていた WP の位置情報を調べたが、WP データの入力ミスは無かった。

Holux GPS ログに記録された離陸から着陸までの GPS 高度を図 9a に示した。自動飛行中は順調に高度を上げ、巡航飛行を行った後、高度を下げ、手動で着陸していることが分かる。機体は気圧高度を参照し、高度 800 m で飛行しているが、巡航時の GPS 高度は約 780 m を示している。この 20 m の差は気圧高度計のキャリブレーションの精度と、GPS の示す高度エ

ラーに起因するものと思われる。観測領域内の高度変化を図 9b に示した。各 Line の境界、すなわち旋回の時に最大 15 m の降下と、その後最大 8 m の上昇があるが、直線飛行では 5 m 以内の変動である。GPS の単独測位の場合、±20 m の高度誤差が想定されるので、この飛行高度の誤差は GPS 高度誤差内である。

Holux GPS ログに記録された対地速度を図 10 に示す。自動飛行中の設定対気速度は 33 m/s に対し、巡航飛行中の対地速度の平均値は 27 m/s (97.2 km/h) であった。観測領域内で西に飛行する時は対地速度が 25–28 m/s であるが、東に飛行する時は 30–33 m/s と上昇した。自動飛行を開始し、観測領域に向け南下する時は 38 m/s (137 km/h) の対地速度であったが、北上する時は 19 m/s (68 m/h) の対地速度であった。この他、機体の旋回時には高度変化に起因する対地速度の増減 (17–42 m/s) が観測された。

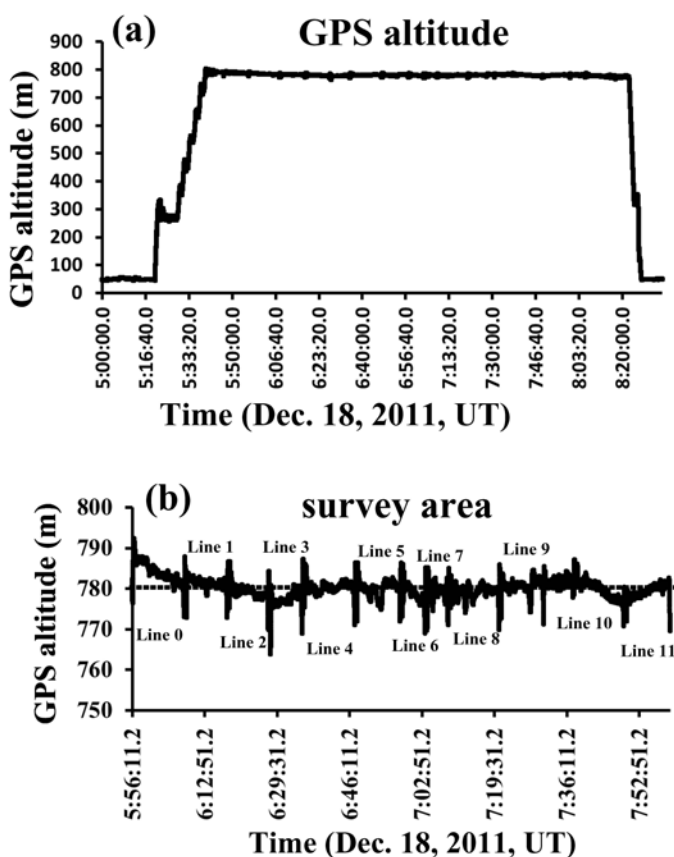


図 9 (a): デゼプション島飛行での離陸から着陸までの GPS 飛行高度。(b): デゼプション島の観測領域での GPS 飛行高度の詳細、.....: 観測領域内での平均飛行高度 (780 m)。

Fig. 9. (a): GPS altitude of the flight between takeoff and landing. (b): GPS altitude in the research area.: average altitude (780 m) in the research area.

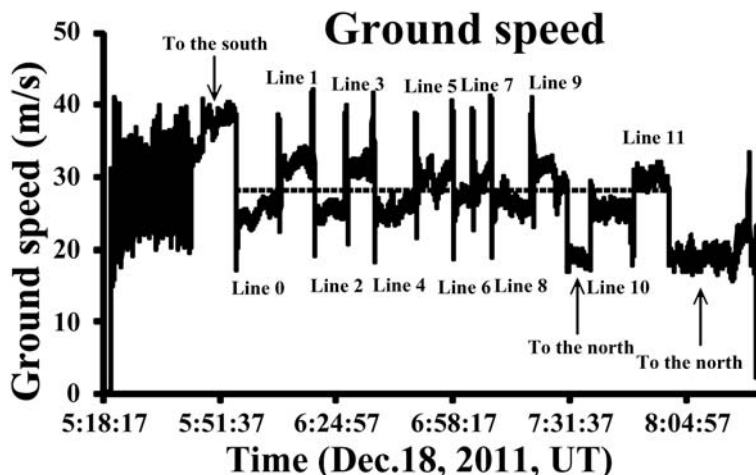


図 10 デセプション島飛行の対地速度の変化 (m/s). Line 番号を図に示した.: 観測領域内での平均対地速度 (27 m/s).

Fig. 10. Ground speed (m/s) of the Deception flight. Line number is denoted.: average ground speed (27 m/s) in the research area.

観測領域内の平均風速と風向を東西南北方向に飛行した時の対地速度から推定した。その結果、推定される平均風速は約 10 m/s で 340 度の方向と考えられる。飛行中のビデオ画像を調べると、離陸から着陸の 14 分前までは薄曇り、または曇りで雲の下を飛行していたが、その後 3 分 13 秒間は雲中の飛行となった。地上気温 -3.5°C から推定すると、高度 800 m の気温は約 -10°C と見積もられる。対気速度は 33 m/s である。しかし、雲中には水滴が多く含まれ、ビデオカメラのレンズに付着した水滴の一部は、吹き飛ばされることなく、そのままレンズに凍りついていくのが記録されていた。いわゆるアイシングである。雲中飛行が更に長ければ、極めて危険な飛行になったと考えられる。短絡飛行の結果、機体は 30 km 短い飛行となり、約 18 分早く着陸した。着陸して 20 分後には滑走路周辺は激しい吹雪となった。もし機体が予定通り飛行していたらアイシングの問題の他、視界不良で手動による着陸も困難だったと考えられる。

着陸後、エンジンを手動で回転させた時、回転の重いことが判明した。エンジンを分解して調べたら、クランク部のオイルが不足したため、動きが悪い事が判明した。また、エンジンスロットルとサーボモーターを繋ぐピアノ線が金属疲労で切断寸前の箇所も発見された。このような状況からデセプション島の飛行は極めて危険な状況を何とかクリアして成功したことが分かる。この飛行で使用した燃料は 6 l、燃料タンクには 3 l の燃料が残っていた。燃費は 50 km/l となり、日本で行った飛行の燃費と同じで、極めて大きな費用対効果を実証することができた。Ant-Plane 6-3 の場合、デセプション島への飛行の前に、すでに 10 時間以

上のエンジン稼働を行っている．この飛行後のトラブルは、少なくとも 10 時間のエンジン稼働後には、金属疲労等を起こす可能性のある部品を交換する等のメンテナンスが重要であることを示した．

5.2.4. 空中磁気観測結果と考察

機体には自動飛行のための三軸ジャイロが搭載されているが、精度が悪いため磁気解析には使用できない．機体コンピュータは WP と GPS 位置を一致させるよう 20 m/s 毎にコントロールしている．それ故、強風で機体が流され計画コースから逸脱する時は、機首の方向が変化する．また、機体の持つ GPS は単独測位であるため、極域のような GPS 衛星の捕捉数が少ない地域では、測位誤差が大きく、絶えず機首の変更が行われる可能性がある．そのため、三軸フラックスゲート磁力計の磁気データ x , y , z は全磁力に変換して磁気解析に使用した．WP 付近で機体が旋回するときは、最大 15 m の高度の変化があったため、磁気解析には東西の直線飛行のデータのみを使用した．

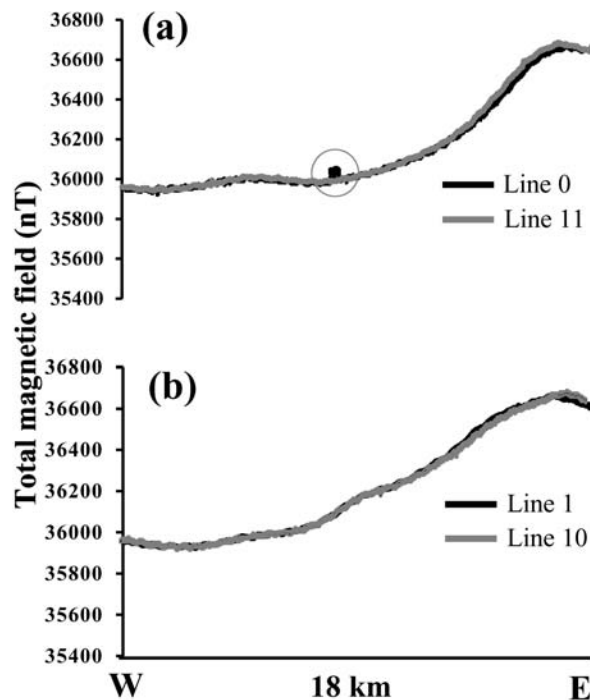


図 11 デセプション島飛行の同じコースを互いに逆方向に飛行する時の全磁力．(a): Line 0 (西方向) と 11 (東方向)、及び(b): Line 1 (東方向) と 10 (西方向) の全磁力強度．Line 0 の中央部の丸で囲まれた範囲はノイズ．

Fig. 11. Total geomagnetic field intensity obtained antiparallel flight direction in the same route. (a): Line 0 (toward the west flight) and 11 (east flight), (b): Line 1 (east flight) and 10 (west flight). A pump marked circle is a noise observed in the Line 0.

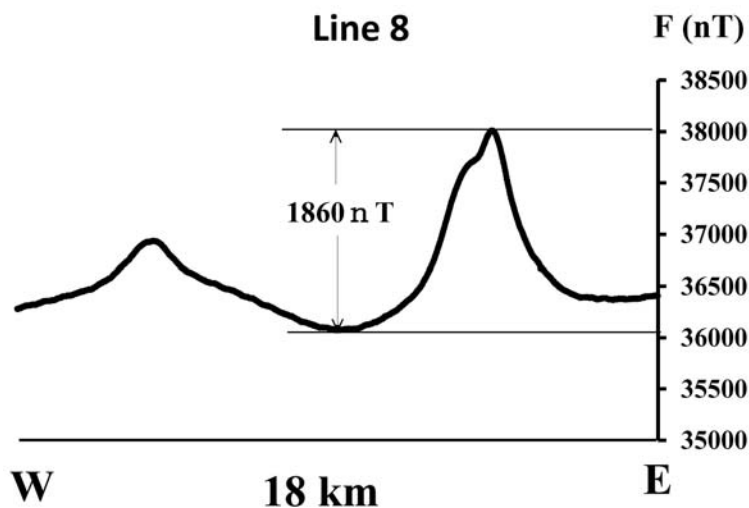


図 12 飛行の Line 8 の全磁力の変化

Fig. 12. Variation of total geomagnetic field intensity of Line 8.

観測されたほとんどの磁気データで、前後の磁気変化量は 10 nT 以下で、スムーズな磁気変化であった。しかし稀ではあるが、図 11a の Line 0 の中央部で見られるように、ノイズ起源と思われる地磁気の急激な増加（最大磁気ノイズ 63 nT 以下）が記録されていた。このようにはっきりノイズと判断されるデータは全て消去した。機体磁気と地磁気の日変化を調べるため、同一ルートを互いに逆方向に飛行した Line 0, 11, 及び Line 1, 10 について磁気データを比較した。図 11 はこれらの側線 (Line) の飛行方向と距離を統一して全磁力で比較したものである。Line 0, 11 は、ノイズと思われる部分を除いて、極めて似た地磁気変化曲線を示している。両測線の平均地磁気強度は 36158.5 nT であったが、西方に飛行した Line 0 が Line 11 に対し 7.5 nT 大きかった。また Line 1 と 10 も似た地磁気変化曲線で、その平均地磁気強度は 36187 nT であったが、東方に飛行した Line 1 が 16 nT 大きかった。即ち、東西飛行での地磁気強度差は、機体磁気の影響は極めて小さく、他の要因が大きいと考えられる。最初の測線 Line 0 の開始から最後の測線 Line 11 の終了までの時間は 1 時間 54 分であった。キング・ジョージ島にあるキング・セジョン基地 (King Sejong Station, 韓国) の地磁気データを見ると、この日の地磁気変化は静穏で、観測中の地磁気変化は 5 nT 以下であり、観測誤差は日変化の影響ではない。可能性として、観測誤差は飛行中に機体から発生する不規則な磁気ノイズや機体の位置の誤差などに起因するものと考えられる。各測線間で最大地磁気変化量が観測された測線は Line 8 で、図 12 に示すように、その大きさは 1860 nT であった。東西飛行での観測誤差は、この最大地磁気変化量に対し 1% 以下であった。

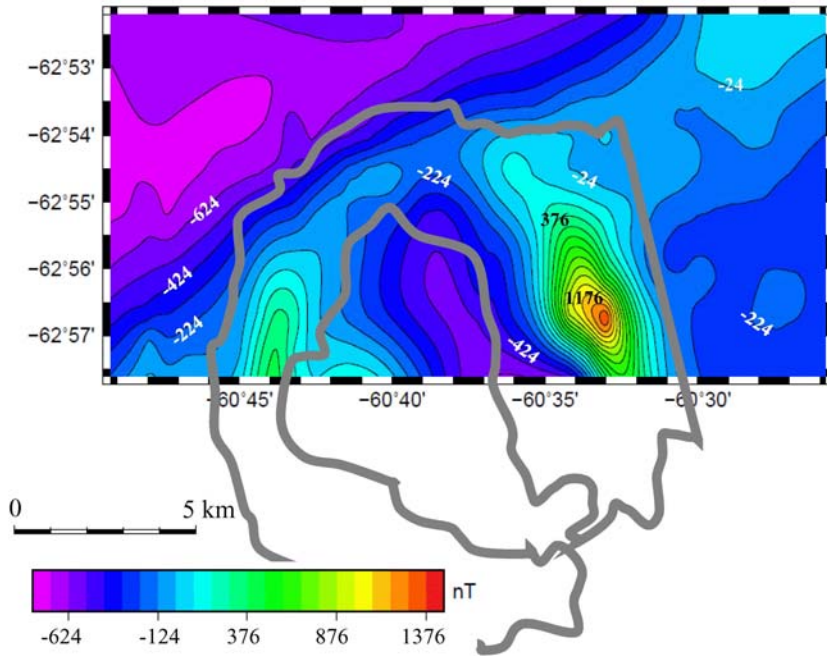


図 13 観測値から得られたデセプション島北半分とその周辺海域の磁気異常
 Fig. 13. Magnetic anomaly map of Deception Island and surrounding sea.

デセプション島の中央部 (Lat=62°54'36"S, Lon=60°36'37"W) の高度 800 m での 2010 年の国際標準地磁場 (International Geomagnetic Reference Field, IGRF-11) は $F=36623.5$ nT, 偏角 (D)=12.666°, 伏角 (I)=-55.919°である. ノイズを取り除いた観測データから IGRF の F 値を差し引き, 磁気異常とした. 500 m²の移動平均により短周期成分を平滑化し, 図 13 に示すようなデセプション島の北半分とその周辺海域の磁気異常図を作成した. この図から以下のような磁気異常の特徴が明らかになった.

- (1) 島の東側のマウント・ポンド付近で最も大きな正の磁気異常 (1387.0 nT).
- (2) 観測領域の西側中央部で最も大きな負の磁気異常 (-774.5 nT).
- (3) 観測領域の南西端から北東の線を境に, 北側と南側で磁化構造が異なる. この線は島の北部を通り, Lawver *et al.* (1995) の磁気異常図に記載されている断層と一致する.
- (4) ポート・フォスター内部の東側に, 南東に伸びる負の磁気異常.
- (5) デセプション島の磁気異常は Lawver *et al.* (1995) が明らかにした海域の磁気異常図と矛盾しない.
- (6) デセプション島東側の海岸線は直線的で, 断層の存在が考えられるが, 断層を想定させるような磁気異常の構造はない.

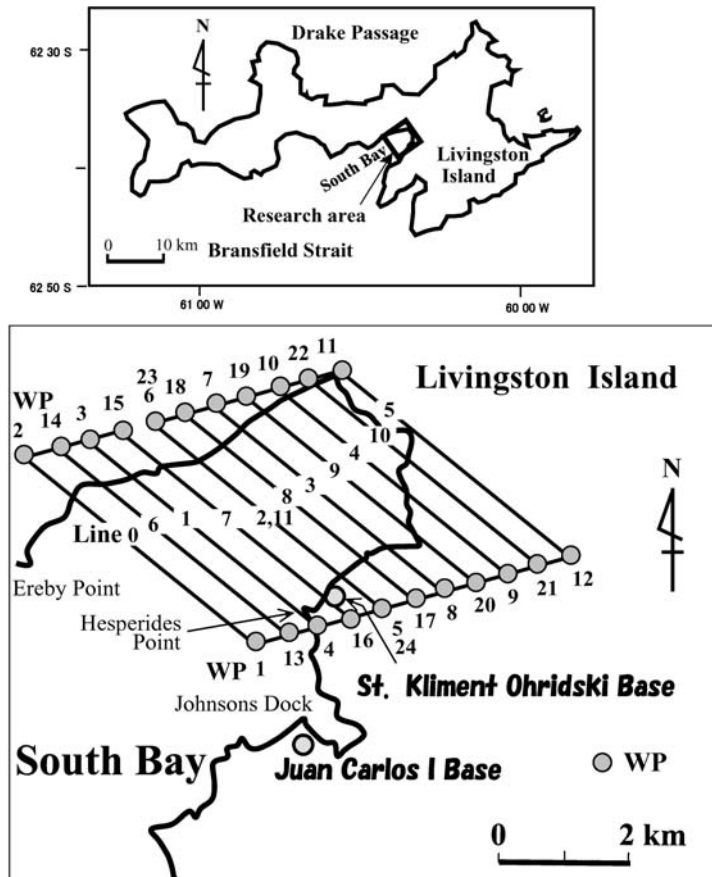


図 14 サウス・ベイの位置と飛行計画. WP と Line 番号を図に示した.
 Fig. 14. Location of South Bay and flight plan. WP and Line number are denoted.

5.3. サウス・ベイ (South Bay) での飛行と観測

2011年12月17日, Ant-Plane 3-5 によるリビングストン島のサウス・ベイの空中磁気観測を行った. セント・クリメント基地裏の氷河 ($62^{\circ}43'13''\text{S}$, $60^{\circ}21'45''\text{W}$, 高度 25.9m) を滑走路とし, 高度 350 m, 速度 27.8 m/s (100 km/h) で図 14 に示す範囲の飛行を計画した. 飛行における経過時間を表 2 に示した. 観測範囲は長さ 5 km の NW-SE 測線を 500 m 間隔で, 11 測線並べた領域である. 図に示すように WP 1-24 を順次飛行し, Line 0-11 で地磁気データを取得. Line 2 と 11 は同じコースで, 互いに逆方向の飛行である. 両者のデータを比較して, 機体磁気と地磁気日変化等のノイズを評価する.

222227 UT に離陸した機体は予定の WP に沿って飛行し, 232934 UT に滑走路に着陸した. 飛行時間は 1 時間 07 分 07 秒, 飛行距離は 105.4 km であった. 表 2 に飛行の経過時間を示した. 観測領域内の飛行は 45 分 45 秒であった. 飛行中に観測された GPS による機体の位置を

図 15 に示す．機体は，ほぼ予定のコースを飛行しているが，旋回した後はコースの逸脱が大きく，その回復に約 300 m を要している．また直線飛行でも最大 150 m のコースの逸脱が見られる．図 16 に飛行中の GPS 高度を示した．観測領域を飛行中の平均高度は約 363 m であ

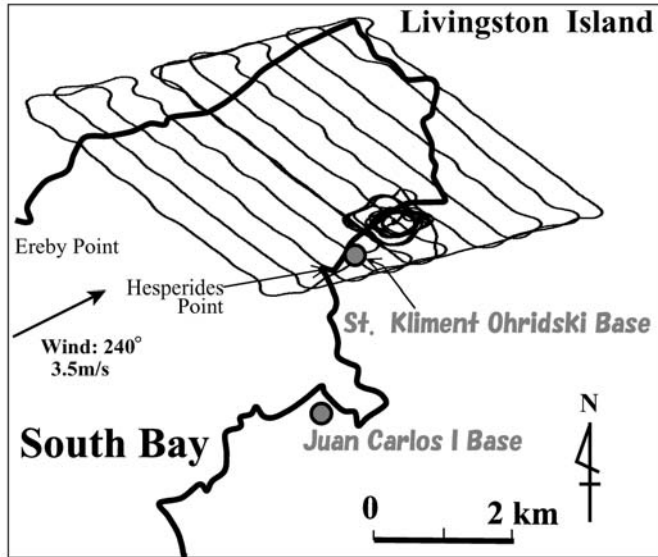


図 15 サウス・ベイでの飛行結果
 Fig. 15. Flight result of the South Bay.

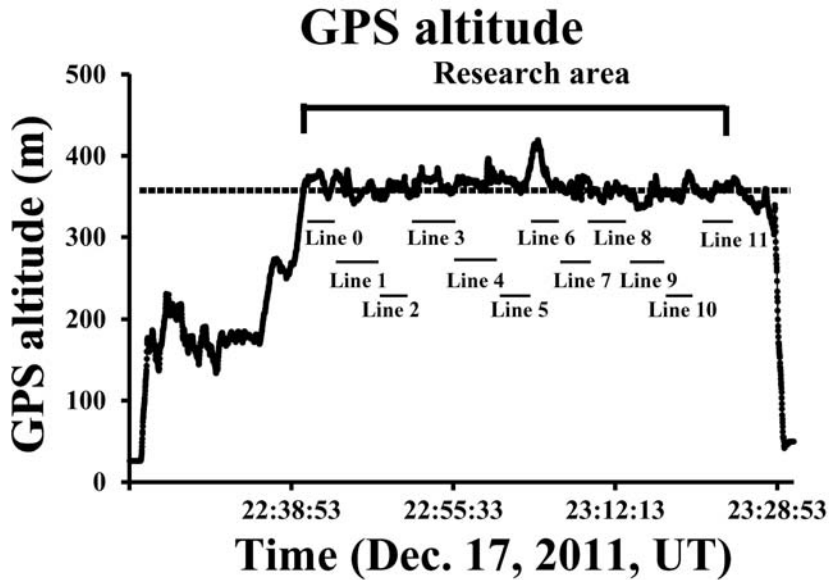


図 16 サウス・ベイ飛行での GPS 高度変化．.....: 観測領域内での平均飛行高度 (363 m).
 Fig. 16. Variation of the GPS altitude of South Bay flight.: average altitude (363 m) in the research area.

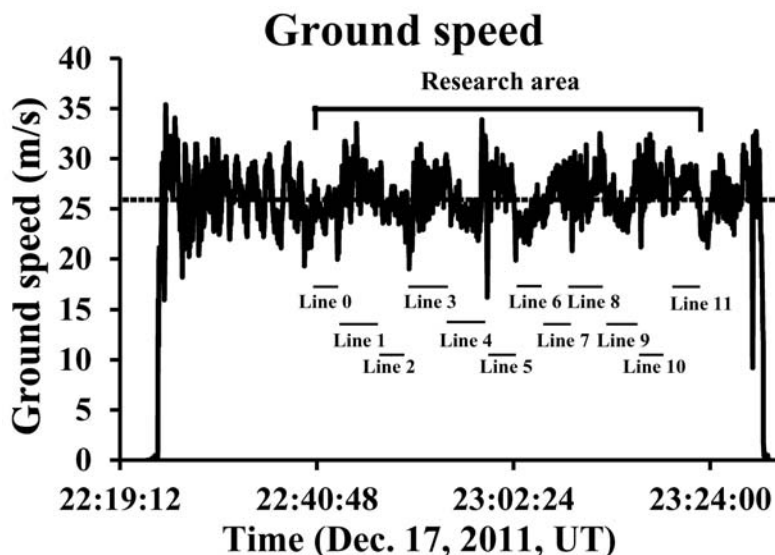


図 17 サウス・ベイ飛行での対地速度 (m/s).: 観測領域内での平均対地速度 (26 m/s).
 Fig. 17. Ground speed of the South Bay flight (m/s). : average speed (26 m/s) in the research area.

ったが、Line 6 では 56 m の急激な上昇があった。しかし旋回時には Ant-Plane 6-3 で見られたような大きな高度上昇と下降は見られなかった。GPS による対地速度を図 17 に示す。観測領域内の平均対地速度は 26 m/s (93.6 km/h) であるが、旋回時には 16–34 m/s と変化した。東西南北方向の平均対地速度から推定される風速は 240 度の方向から 3.5 m/s であった。

ビデオカメラを真下に向け左翼端に、MR 磁力計センサーを右翼端に取り付けた。ビデオ画像是離陸から着陸まで正常に稼動したが、MR 磁力計は高度 125 m まで上昇した 222441 UT に停止した。そのため当初計画していたサウス・ベイの空中磁気データは得られなかった。磁力計とデータログ間の通信トラブルが原因と考えられる。

5.4. 航空写真観測

12 月 18 日に行われたデセプション島での空中磁気観測中に高度約 780 m で撮影されたデジタルカメラ画像を図 18a に、ビデオ画像から作成した画像を図 18b~g に示した。またデジタルカメラ画像の撮影範囲とビデオカメラ画像の撮影地点を図 8 の下図に a~g で示した。図 18a はマカロニ・ポイント (Macaroni Point) 周辺の画像である。撮影時間が早朝のため薄暗く、シャッタースピードが長くなり、機体振動と高速移動による画像のブレが重なり、不鮮明な写真となっている。しかし、周辺より明るい色調のマカロニ・ポイントが直線的な海岸から突き出ており、海岸形成後に半島が形成された可能性を示している。ビデオカメラの視野角度は 170°の広角で、画像にゆがみが発生するが、静止画像に変換する過程でこのゆが

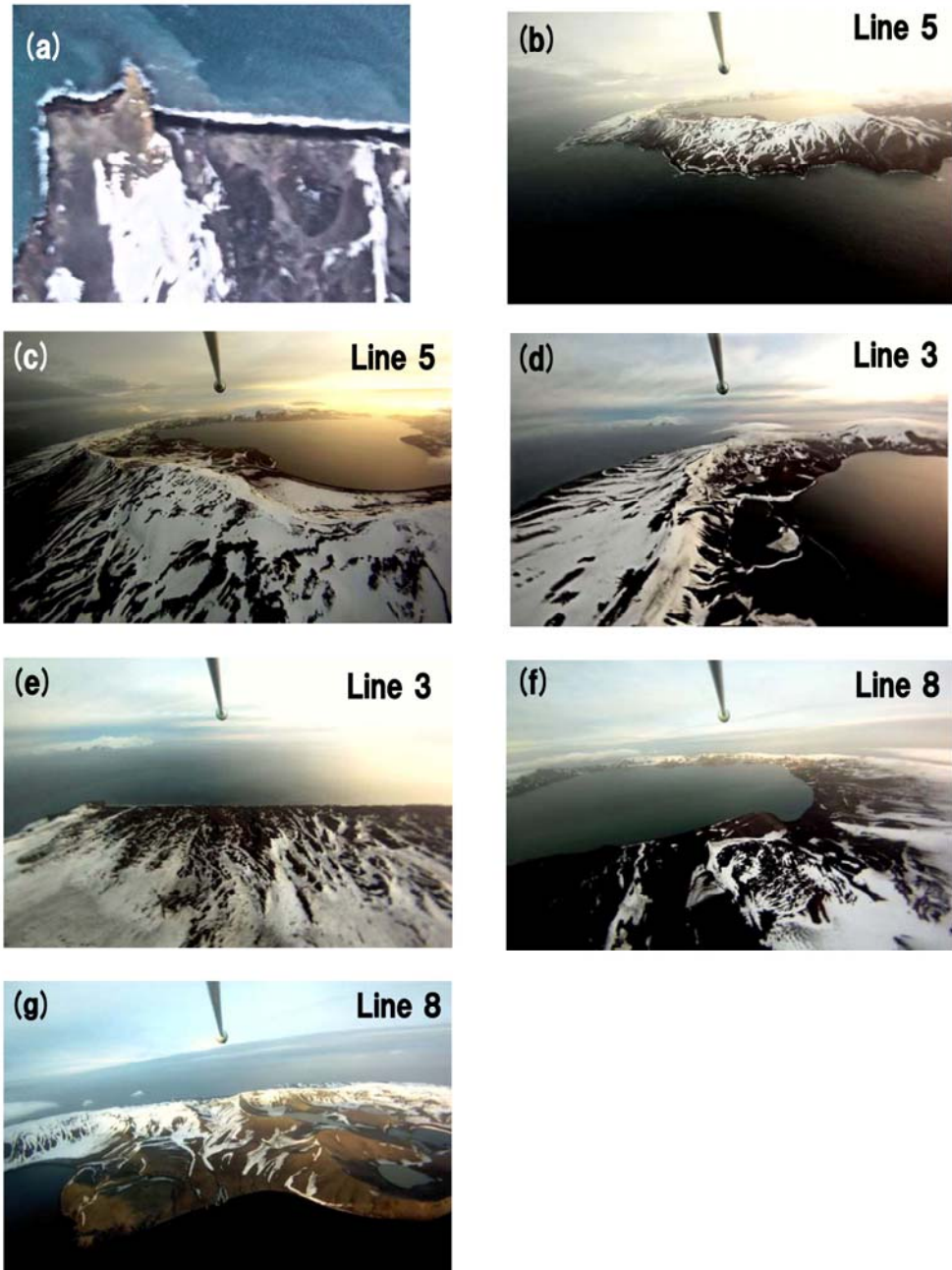


図 18 デセプション島の画像。(a): デジタルカメラが撮影したマカロニ・ポイント (Macaroni Point) 周辺, (b)-(g): ビデオ画像から作成した画像。撮影地点を図 8 に示した。撮影高度: 780 m.

Fig. 18. Photos of Deception Island. (a): around Macaroni Point, (b)-(g): photos obtained from video camera. Points to take the photos are denoted in Fig 8. Altitude of photos: 780 m.

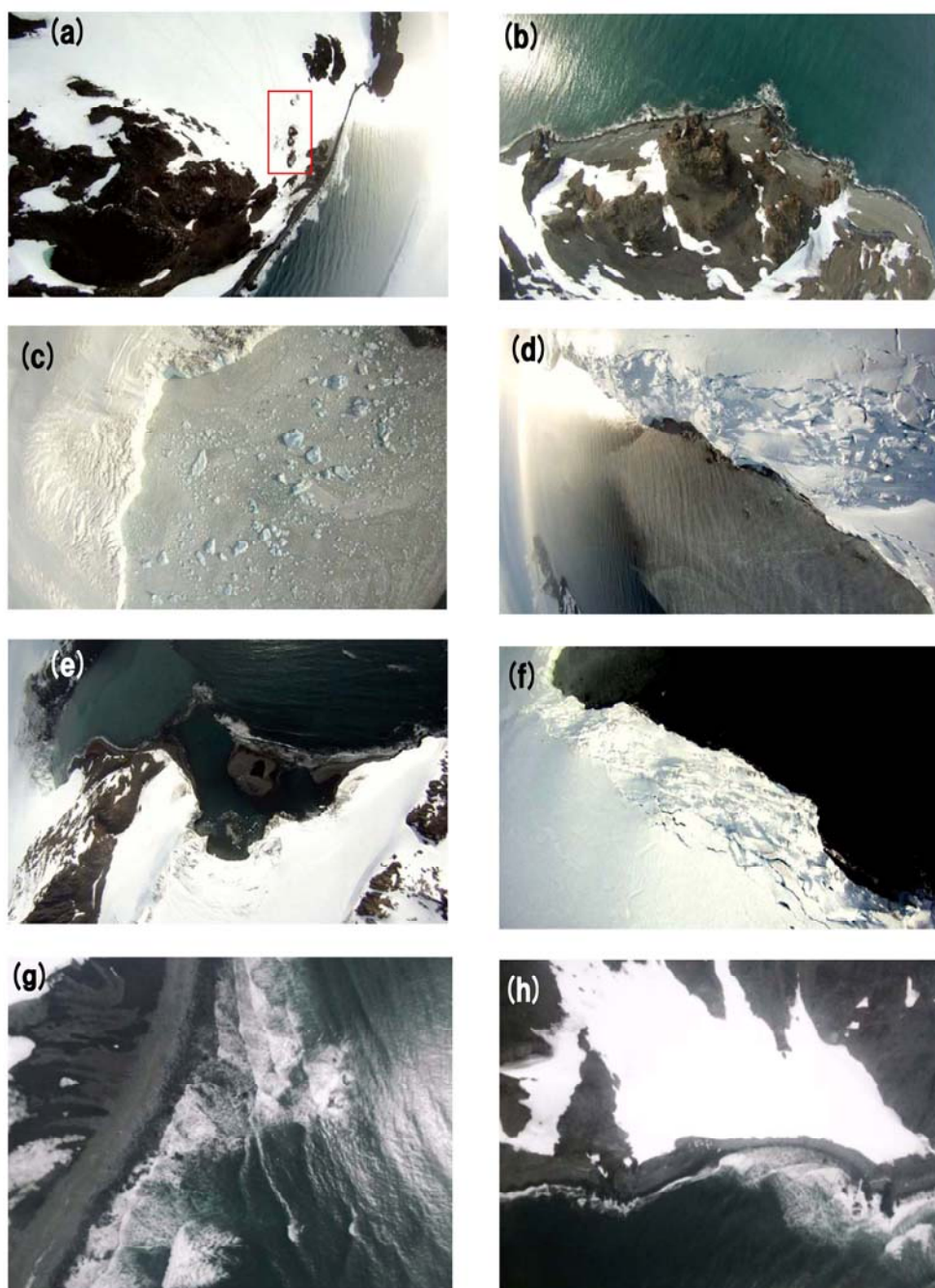


図 19 サウス・ベイの画像. (a)-(f): ビデオ画像から作成したサウス・ベイ沿岸部の画像, (a)の赤四角: セント・クリメント基地, (g)-(h): デジタルカメラが撮影したセント・クリメント基地周辺の海岸.

Fig. 19. Photos of South Bay. (a)-(f): coastal area of South Bay obtained by video camera, Red square in (a): St. Kliment Base, (g)-(h): coastal area around St. Kliment Base taken by digital camera.

みを補正した。ビデオカメラでは機体振動や高速移動による顕著な画像の乱れは発生しなかった。デセプション島全景 (図 18b), ポート・フォスター (図 18c, d, f), 島東部に見られる直線的な海岸 (図 18e), 雪氷の分布 (図 18c~f), クレーターと思われる地形 (図 18g) などが記録されている。写真 (図 18d) には笠雲のかかったゴダード・ヒル (Goddard Hill) が写っている。風がかなり強かったと思われる。

12月17日サウス・ベイの飛行で撮影された Ant-Plane 3-5 によるビデオ画像を図 19a~f に, また Ant-Plane 6-3 によって撮影された静止画像を図 19g, h に示す。撮影高度は前者が約 363 m, 後者は約 500 m で, いずれも真下を向けて撮影している。天候は晴れで昼間の撮影だったため, 良好な画像が得られた。セント・クリメント基地 (赤四角) と周辺の氷河と露岩 (図 19a), セント・クリメント基地周辺のヘスペリデス・ポイント (Hesperides Point) と露岩 (図 19b), 湾奥部を埋める流氷 (図 19c), 湾口方向サウス・ベイと氷河 (図 19d), セント・クリメント基地とフォアン・カルロス I 世基地の間にあるジョンソン・ドック (Johnsons Dock) (図 19e), 湾奥部海岸の氷河とクレバス (図 19f), セント・クリメント基地周辺の海岸 (図 19g, h) が写っている。

5.5. キング・セジョン基地 (King Sejong Station) における空中磁気観測

キング・セジョン基地において Ant-Plane 6-3 と 3-5 を組み立てた。図 20a に示すように, 東西 250 m, 南北 300 m の比較的平らな雪原があり, 滑走路とした。図 6 に示したように, キング・セジョン基地から 46 km ENE にあるペンギン島の 5×5 km 範囲を 12 測線, マリアン・コブ周辺の 12×7 km を 12 測線, デセプション島南部の 9 測線 (図 7) を測定する計画を立てた。

2012年1月3日午後は青空も見られ, 風も弱かったので, Ant-Plane 3-5 でペンギン島の空中磁気観測を計画した。基地局はキング・セジョン基地から 2.5 km 離れているため, 機体 2 機と必要物資をキング・セジョン基地の雪上車で搬送した (図 20b)。しかし, 機体を基地から滑走路のある基地局へ搬送中に, 雪上車内で荷崩れがあり, Ant-Plane 3-5 の一部が破損した。計画を変更して Ant-Plane 6-3 で磁気観測を行うことになった。基地局を 62°13'53"S, 58°45'32"W, 標高 174 m の露岩に設営した (図 20c)。Ant-Plane 6-3 は 2339 UT に離陸した。離陸時の天候は, 気温 1°C, WNW の風 3.2 m, 曇りで一部に青空もあった。機体は滑走路上空を旋回した後, 2350 UT に高度 800 m で順調にペンギン島に向かって飛行して行くのが無線で確認できた。しかし, 3時間 45分待っても機体は滑走路に戻って来なかった。離陸後 30分から基地局上空では雲が厚くなり, 小雪の舞う天候となった。恐らく雲中を飛行中の機体にアイシングが発生し, 制御不能となり墜落したと考えられる。滑走路をキング・セジョン基地の東側にあるマリアン・コブに面した道を選定し, 再度 Ant-Plane 3-5 で空中磁気観測を計画したが, 1月16日になっても飛行に適する天候の日は無く, 本観測を断念した。

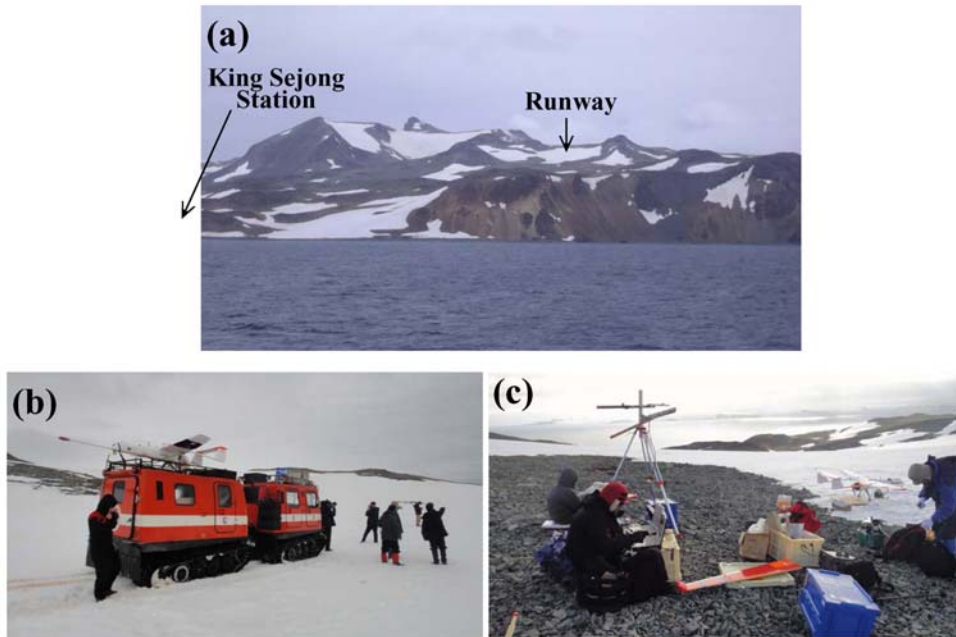


図 20 キング・セジョン基地での飛行実験の写真. (a): 滑走路の雪原 (標高 174 m), (b): キング・セジョン基地から雪上車で Ant-Plane 6-3 を滑走路に輸送, (c): 滑走路側の基地局.
 Fig. 20. Photos for flight in King Sejong Station. (a): runway on a snow field (altitude 174 m), (b): transportation of Ant-Plane 6-3 to the runway by snow vehicle, (c): ground station beside runway.

6. 気 象

2011年1月8日から2月27日までの天気と風速を図21aに示す. 1月8日から31日まではキング・ジョージ島のエスクデロ基地のデータ, 2月1日から2月27日まではキング・セジョン基地のデータである. エスクデロ基地では任意の時間の天候であるが, キング・セジョン基地では朝0700 LT (1000 UT) の値である. 風速は4 m/s以上のみプロットし, それ以下の風速は3 m/sとした. 1月は風の弱い日もあったが, 2月になると7 m/s以上の日が卓越した. 終日晴れたのは2日のみで, 晴れても数時間で曇ったり雨が降ったり, 不安定な天候の日が多かった. 曇りの日には一般に雲底が100–200 mと低く, 湿度は80–100%であった. 気温は夜間に -3°C まで下がったが, 昼間は 6°C を記録した. 全期間を通し3度の飛行実験を行ったが, 好条件で飛行できたのは1月15日だけであった.

図21bに2011年12月3–19日のセント・クリメント基地と2011年12月20日～2012年1月19日のキング・セジョン基地の気象をまとめた. 風速4 m/s以上は測定値を, それ以下は3 m/sとした. セント・クリメント基地滞在中は風が弱く曇りの日が卓越した. 曇りの日の雲底は200–300 mと低く, 視界内での飛行に限定された. 視界外の飛行が可能な天候は12月17日午後～18日早朝だけであった. 気温は夜間に -3.5°C , 昼間は 4°C まで上昇した. キン

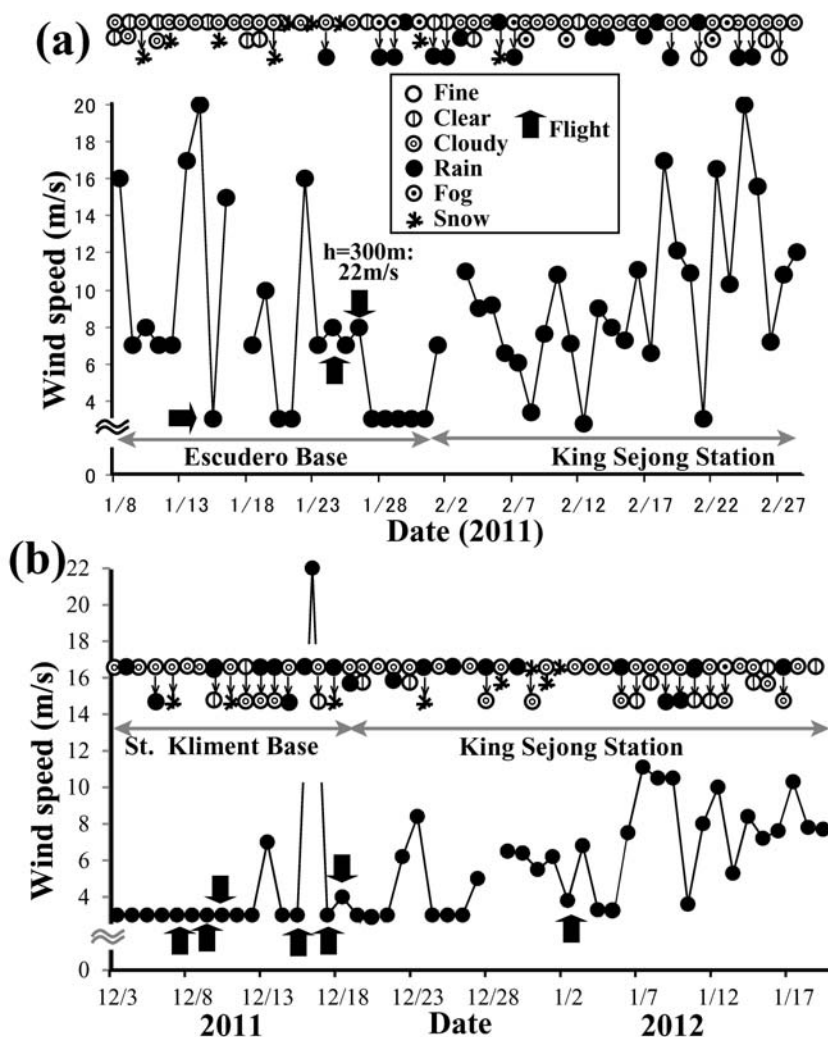


図 21 天候と風速: (a): 2011 年 1 月 8-31 日 (エスクデロ基地) と 2 月 1-27 日 (キング・セジョン基地), (b): 2011 年 12 月 3-19 日 (セント・クリメント基地) と 12 月 20 日から 2012 年 1 月 19 日 (キング・セジョン基地). 風速が 3 m/s 以下の時は 3 m/s とした.

Fig. 21. Weather and wind speed. (a): Jan. 8-31, 2011 (Escudero Base) and Feb. 1-27 (King Sejong Station), (b): Dec. 3-19, 2011 (St. Kliment Base) and Dec. 20-Jan. 19, 2012 (King Sejong Station). Wind speed lower than 3 m/s is plotted on 3 m/s line.

グ・セジョン基地では風が強い日が卓越した. この期間 1 日晴れた日は皆無で, 一時的に晴れて風が弱くても, 数時間後には曇り, 強風が吹き, 不順な天候となった. 湿度は 75-100% であったが, 95%以上の日が多かった.

サウスシェトランド諸島は暴風圏の南端に位置する. それ故, 風が強く, 曇り, 雨, 雪,

霧の日が卓越し、晴れが少ないことは理解できる。エスクデロ基地の関係者によると、2011-2012年の夏期間のサウスシェトランド諸島の天候は特に悪かったとのことである。しかし、高緯度に位置するリビングストーン島の方がキング・ジョージ島より天候が良い傾向があった。

7. ま と め

模型飛行機の部品と技術を応用し、夏の南極沿岸地域で科学観測を目的に飛行する翼長約3 mの自動操縦の小型無人飛行機 Ant-Plane と、それに搭載する磁力計を開発した。2010-2012年の2度の夏に、南極、サウスシェトランド諸島にあるキング・ジョージ島とリビングストーン島に Ant-Plane 3と6を持ち込み、同諸島と南極半島の間にあるブランスフィールド海盆の空中磁気観測と画像撮影を計画した。2011年1月キング・ジョージ島のマーシュ・エアフィールドの滑走路を使用し、飛行実験を試みたが、悪天候や滑走路の民間機等の優先使用により、計画していた飛行はできなかった。2011年12月には計画を変更し、マーシュ・エアフィールドから100 km南西にある、リビングストーン島のセント・クリメント基地、及び2012年1月にはキング・ジョージ島のキング・セジョン基地で行うことにした。セント・クリメント基地では基地の背後にある氷河を滑走路とし、Ant-Plane 6-3でデセプション島の調査を、また Ant-Plane 3-5でサウス・ベイの調査を行った。デセプション島は同基地から35 km南方にあり、磁気異常図はまだ作成されていない。本研究では島の北半分の9×18 kmの範囲で、高度800 m、1 km間隔の空中磁気と画像のデータを得た。デセプション島の地磁気異常図はLawyer *et al.* (1995)が明らかにした海上磁気異常の分布と調和的で、地質構造を反映したと思われる磁気構造を明らかにした。ビデオカメラとデジタルカメラの画像はデセプション島の地形や雪面の分布を記録しており、地形データの少ないデセプション島の地形学的研究等に貢献するものと思われる。また Ant-Plane 3-5で行ったサウス・ベイの調査では、氷河や流水のビデオ画像等を得ることができたが、磁力計のトラブルにより地磁気データは得られなかった。サウス・ベイのビデオ画像は湾沿岸の氷河地形を写しており、氷河変動の研究等に貢献すると思われる。2012年1月にはキング・ジョージ島にあるキング・セジョン基地からペンギン島とマリアン・コブ、及びデセプション島の南半分の空中磁気観測を計画したが、悪天候で成果を上げることはできなかった。ペンギン島の調査の際、天候悪化で Ant-Plane 6-3を失った。

デセプション島への飛行は、無人機が磁力計を搭載して南極の地平線を越え、3時間07分、302 kmもの飛行を行った初めてのケースである。本研究は暴風圏南端にある気象条件が最悪の南極でも、研究者自身が航空機観測を実施できることを実証した。実機と比べ、費用対効果は極めて大きく、100 kmの飛行をガソリン2 l程度の費用で実施できる。研究はまた、南極観測にとって Ant-Plane のような小型無人機が新たな航空機観測の手法として極めて有効

であることを明らかにした。無人であることから安全性は大きく、しかし、機体のメンテナンスが重要である。最低限、10時間のエンジン運転後には重要パーツの交換と点検が必要である。また極域ではGPS衛星の仰角が小さく、単独測位による飛行制御では位置の誤差が大きくなる。そのため重大な事故を引き起こす可能性が予想される。市街地はもちろん、南極基地や重要施設上空での飛行は避けるべきである。

謝 辞

本研究を行うにあたり、韓国極地研究所、チリ南極研究所、ブルガリア南極研究所には計画の立案から実行までお世話になりました。また、キング・セジョン基地、エスクデロ基地、セント・クリメント基地には、基地での滞在と調査のサポートを頂きました。ベリングスハウゼン基地には、調査物資の保管を依頼しました。物資と人員の輸送は韓国極地観測船「Araon」、チリ海軍 (Aguiles (AP-41).)、スペイン南極観測船「Las Palmas」、それにブラジル空軍 (C130 輸送機) の協力を頂きました。本研究では特に以下の方々にはお世話になりました。厚く御礼申し上げます。

Prof. Yeadong Kim, Prof. Jong Kuk Hong, Dr. Hyoung Chul Shin (Korea Polar Research Institute), Director Jose Retamales Espinoza, Dr. Javier Arata S., Dr. Veronica Vallejos M., Dr. Cristian Rodrigo (Chilean Antarctic Institute), Prof. Christo Pimpirev, Dr. Dimo Dimov, Mr. Dragomir Mateev (Bulgarian Antarctic Institute), Dr. Bulat Maviyudov (the leader of Bellingshausen Station, 2011–2012), Dr. Miguel A. Ojeda (Unidad de Tecnología Marina, Barcelona Spain), Prof. Jesus Galindo-Zaldivar (Universidad de Granada, Spain), Dr. Manuel Catalan (Real Instituto y Observatorio de la Armada, Spain).

なお本研究は、日本学術振興会、基盤研究 B、研究課題: 小型無人飛行機による南極ブランスフィールド海盆の空中磁気観測と海盆形成メカニズム、課題番号: 22403006 として行われました。

文 献

- Barker, D.H.N. and Austin, J.A., Jr. (1994): Crustal diapirism in Bransfield Strait, West Antarctica: evidence for distributed extension in marginal-basin formation. *Geology*, **22**, 657–660, doi: 10.1130/0091–7613(1994)022 <0657:CDIBSW>2.3.CO;2.
- Barker, P.F. and Dalziel, I.W.D. (1983): Progress in geodynamics in the Scotia Arc region. *Geodynamics of the eastern Pacific region, Caribbean and Scotia arcs*, S.J. Ramón Cabré. Washington, D.C., American Geophysical Union, 137–170 (Geodynamics Series, Vol. 9), doi: 10.1029/GD009p0137.
- BAS (2008): Unmanned aerial vehicles mark robotic first for British Antarctic Survey, Press release, Issue date: 18 Mar. 2008, Number: 09/2008 (online), http://www.antarctica.ac.uk/press/press_releases/press_release.php?id=352
- Dietrich, R., Dach, R., Engelhardt, G., Ihde, J., Korth, W., Kutterer, H.-J., Lindner, K., Mayer, M., Menge, F., Müller, H., Müller, C., Niemeier, W., Perl, J., Pohl, M., Salbach, H., Schenke, H.-W., Schöne, T., Seeber, G., Veit, A. and Völksen, C. (2001): ITRF coordinates and plate velocities from repeated GPS campaigns in Antarctica - an analysis based on different individual solutions. *J. Geodesy*, **74**, 756–766, doi:

- 10.1007/s001900000147.
- Dziak, R.P., Park, M., Matsumoto, H., Bohnenstiehl, D.R., Haxel, J.H., Mellinger, D.K., Stafford, K. and Lee, W.S. (2008): Hydroacoustic monitoring of the Bransfield Strait and Drake Passage, Antarctica: a first analysis of seafloor seismicity, cryogenic acoustic sources, and cetacean vocalizations. *Antarctica: a keystone in a changing world: proceedings of the 10th International Symposium on Antarctic Earth Sciences*, Santa Barbara, California, August 26 to September 1, 2007, editors, A.K. Cooper *et al.* Washington, D.C., National Academies Press, Extended Abstract 011.
- 船木 實・Ant-Plane Group (2006): 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—. 南極資料, **50**, 212–230.
- Funaki, M., Hirasawa, N. and the Ant-Plane Group (2008): Outline of a small unmanned aerial vehicle (Ant-Plane) designed for Antarctic research. *Polar Sci.*, **2**, 129–142. doi: 10.1016/j.polar.2008.05.002.
- Higashino, S. (2006): Development of an UAV Flight Control Module for the Operation in Antarctica. Proceedings of the 5th Asian-Pacific Conference on Aerospace Technology and Science. (CD-ROM)
- 平沢尚彦・原圭一郎 (2007): 第 48 次南極地域観測夏隊の S17 航空拠点における活動報告—日独共同航空機観測に関連して—. 南極資料, **51**, 273–297.
- Lawver, L.A., Keller, R.A., Fisk, M.R. and Strelin, J.A. (1995): Bransfield Strait, Antarctic Peninsula: Active Extension behind a dead arc. *Backarc basins: tectonics and Magmatism*, B. Taylor. New York, Plenum Press, 315–342.
- Pankhurst, R.J. (1983): Rb-Sr constraints on the ages of basement rocks of the Antarctic Peninsula. *Antarctic earth science*, ed. by R.L. Oliver, P.R. James and J.B. Jago. Canberra, Australian Academy of Science, 367–371.
- Pedreira, A., Ruiz-Constán, A., Heredia, N., Galindo-Zaldívar, J., Bohoyo, F., Marín-Lechado, C., Ruano, P. and Somoza, L. (2012): The fracture system and the melt emplacement beneath the Deception Island active volcano, South Shetland Islands, Antarctica. *Antarct. Sci.*, **24**, 173–182, doi: 10.1017/S0954102011000794.
- Spiess, T., Bange, J., Buschmann, M. and Vörsmann, P. (2007): First application of the meteorological Mini-UAV 'M²AV'. *Meteorol. Z.*, **16**, 159–169, doi: 10.1127/0941–2948/2007/0195.
- Tanner, P.W.G., Pankhurst, R.J. and Hyden, G. (1982): Radiometric evidence for the age of the subduction complex in the South Orkney and South Shetland Islands, West Antarctica. *J. Geol. Soc. London*, **139**, 683–690, doi: 10.1144/gsjgs.139.6.0683.

Preflight Checklist & Log for Ant-Plane 6-3

ver.09-03 10/18/2009

日付 / / 実験番号

実験目的			
質量	g	気温	°C
重心位置	mm	気圧	hPa
天気		風速・風向	m/s

バッテリー

	電波試験用		飛行用	
	ID	電圧[V]	ID	電圧[V]
AP-CUB1	LBT		LBT	
AP-CUB2	LBT		LBT	
modem	LBT		LBT	
Servo1	SBT		SBT	
Servo2	SBT		SBT	
受信機	SBT		SBT	
エンジン	SBT		SBT	
送信機(プロポ)	NPBT		NPBT	

GCS

機材	動作 OK?
シリアル線接続	
アンテナ位置確認	

ハードウェア No.

AP-CUB	
GPS	
受信機	
機上 modem	
プロポ	

機体組み上げ前

機材	備考	OK?
エンジン試験	ID :	
ソフトウェア動作確認	-	
全機/実験棟試験	-	
サーボベットの固定確認	-	
PIC⇄CIC サポートラベルチェック	-	
燃料タンク固定確認	-	
燃料配管確認	-	

機体組み上げ

主翼搭載	主翼ほぞ確認
AP-CUB 搭載	modem(L 型コネクタ)確認
バッテリー搭載	-
カメラ搭載	燃料配管確認

ソフトウェア ver.

ソフト	バージョン
Southern Cross	
Polar Star	

機体

機材	備考	OK?
パラシュート格納チェック	シール確認	
左主翼	INDWGL	
左主翼緩み確認	-	
ピトー管固定確認	-	
左エルロン	-	
δaL リンケージ	先端から 2 番目	
左メインギア	-	
胴体左	INBD	
キャノピ後部穴テープ	-	
垂直安定板	-	
ラダー	INDRD	
δr リンケージ	-	
尾輪	-	
水平安定板	INDHS	
エレベータ	INDEL	
δe リンケージ	-	
アンテナ線	XYZ 方向確認	
GPS アンテナ確認	テープで固定	
胴体右	-	
モデムアンテナ緩み確認	-	
右メインギア	-	
右主翼	INDWGR	
右主翼緩み確認	-	
右エルロン	-	
δaR リンケージ	先端から 2 番目	
カウルはずす	-	
エンジン取り付け	-	
エンジン前部ねじ確認	-	
タイミングプレート位置確認	-	
マフラー固定確認	-	
δt リンケージ	-	
δk リンケージ	-	
イグニッション配線確認	-	
プロペラ	-	
スピナー	-	
プラグ確認	-	
カウルを付ける	-	
ノーズギア	中央に固定	

システムチェック

燃料補給	燃料補給キャップ・ベルクロ確認	
プロポのモデル確認	PIC 確認, アンテナゆるみ確認	
プロポ電源 ON		
システム・modem 電源 ON	:	
サーボ, 受信機電源 ON	:	
イグニッション電源 ON	:	
機体動作チェック	パイロット確認(ゆりかご上)	
センサ出力チェック	CAS	
	PALT	
	R	
	Ay	
	T	°C
	GPS	
	回転数(n)	
パラシュート動作チェック	確実に閉じることをチェック	
ソフトウェア ver. チェック	-	
サーボリミット・ニュートラル確認	PolarStar 設定	
CIC に切り替え	-	
全舵面動作チェック	PolarStar テストモード	
制御側チェック	-	
ハラ吊り時の姿勢確認	ひも・コネクタ周り確認	
キャノピ取り付け	コネクタ, ひも接続確認	
ピトー管チューブ確認	速度・高度センサを確認	
機体を下ろす	-	
重量	g	
重心(標準 65mm)	mm	
荷重試験		
Way Point 送信	-	
Ay リセット	ピトー管チューブ装着	
GPS 確認		
まっすぐ走ることを確認	-	
電波チェック準備	プロポ Box と予備バッテリーをもって移動	

Pre Flight Check

プロポPIC確認	-	
Kill Switch RUN 確認	機体内, 外部	
エアブリージングカバー除去	-	
エンジンスタート(暖機)	:	
電波チェック(PIC)	-	
回転数センサチェック	-	
フェールセーフの確認	プロポ ON 後 2 分経過?	
モデム通信確認	200m 以上離れた状態	
搭載カメラのファイルフォーマット	電波試験の画像消去	
電波チェック終了	パイロット戻る	
エンジン回転数	フルスロットル(Over 8500?)	RPM
	アイドル	RPM
温度チェック	-	°C

気温・気圧・重量・重心の欄は記入されているか?		
プロポバッテリー残量確認	10V 以上を確認	
ピトーカバー除去	-	
キャノピ前部テープ		
ハラ前部テープ除去	-	
飛行用バッテリー交換確認	SYS・RCV/SRV・IG・MDM	
地上ビデオ撮影準備	ピント無限大確認	
パイロット移動	スタータセット携行	
タキシングチェック	真直ぐに走ることを確認	
地上ビデオ撮影開始	:	
データキャプチャ開始	:	
離陸滑走開始	:	
着陸	:	
エンジン停止	:	
機体 Kill STOP	:	
システム・modem OFF	:	
SV & 受信機 OFF	:	
着陸後重量		g
ピトーカバー取り付け	-	
飛行時間	:	
エンジン運転時間	:	

燃料残量	-	
燃料抜き取り	-	
機体外部排気拭き取り	-	
パラシュート確認	シール貼付	
次のフライトへの準備	-	
キャップの燃料を空にする	最後のフライト後のみ	
センサ出力チェック	最後のフライト後のみ	
機体の汚れを落とす	最後のフライト後のみ	

付図 1 Ant-Plane 6-3 のチェックリスト
Appendix 1. Check list of parts of Ant-Plane 6-3.