

# 南極観測用小型無人飛行機“Ant-Plane”と 空中磁気観測

船木 實<sup>1)</sup>・Ant-Plane Group<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

昭和基地の東600kmにあるアムンゼン湾周辺にはナピア岩体が露出する。ナピア岩体は39億年前の源岩が破碎、堆積、そして約25億年前に高温高压変成を受けた先カンブリア初期の変成岩と考えられている。アムンゼン湾周辺の変成岩は、しばしば磁鉄鉱と石英を主成分とする縞状鉄鉱床(BIF)を胚胎する。BIFは一般に赤鉄鉱と石英を主成分とし、一部に磁鉄鉱を含む。この地域のBIFは高温の変成作用を受けた結果、赤鉄鉱が全て磁鉄鉱に還元されている。磁鉄鉱は赤鉄鉱に比べ飽和磁化強度が250倍も大きく、大きな磁気異常が観測されると期待される。Dolinsky *et al.* (2002)はアムンゼン湾の中でも、特に露岩が広く分布するリーセル・ラルセン山周辺で、徒歩による磁気観測を実施した。プロトン磁力計とGPSを持ち4×7kmの範囲を約2ヶ月間歩き、地表高度2mで最大8,000nTもの磁気異常を観測した。磁気異常は海岸から大陸内部に向かって延びているが、流水や氷河が覆っている湾内や大陸内部では磁場探査は不可能で、BIFの規模の推定はできなかつた。地球に海が形成された頃、なぜ多量の鉄が堆積したかを知ることは、地球の進化を知る上で興味ある研究テーマである。このような地域で磁場探査を広範囲で行うためには、空中磁気観測が唯一の手段である。

昭和基地では2005年1月までセスナとピラタスの固定翼機が越冬し、ペンギンやアザラシの調査、気象観測、高所医学、空中磁気観測、それに航空写真撮影等の研究に使用されてきた。しかしそれ以降、越冬中の昭和基地には航空機は一機もない。夏期間は海上自衛隊のヘリコプターが物資輸送や観測支援のために南極観測船「しらせ」から飛来する他、時にはチャーターのヘリコプターや飛行機が調査地域に飛来す

ることもある。しかし、現在昭和基地では越冬中の航空機使用による観測手段はない。航空機を越冬させるためには、機体2機とパイロット2名、それに整備士1名の越冬が必要である。この他、格納庫の地上設備の建設や、海氷上の滑走路の保守、それに安全な航空機運用の手法の確立等が必要で、観測隊への経済的・精神的負担は大きい。このような理由により昭和基地では航空機の越冬が再開される見通しはない。

我々はアムンゼン湾地域で空中磁気観測を行うには模型飛行機を用いることが最も可能性が高いと考え、その実現性を調べた。米国の模型飛行機グループはTrans Atlantic Model 5により2003年8月9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3030kmを38時間52分で飛行させ、大西洋の横断を成功させた。この機体には日本のメーカーが開発したエンジンやサーボモーターが使用されていた。同様の機体で空中磁気観測を行うことができれば、ナピア岩体の空中磁気探査も可能と考えた。さらにこの無人機は昭和基地での航空機観測にも貢献できると考えた。そして2002年に極地研究所、九州大学、それに民間企業の協力を得てAnt-Plane計画を立ち上げた。開発する機体は翼長3m前後で、模型飛行機の部品を用い、GPSによるナビゲーションを行う機体である。夏の南極の沿岸地域で、気温-15℃以上の静穏時に、数百グラムの観測機器を搭載し、最大1,000kmの連続自動飛行を目指した。

南極観測用の小型無人飛行機(Unmanned Aerial Vehicle: UAV)を開発し、科学観測や安全な野外活動に使用貢献できれば、以下のようにその意義は極めて大きいものと考えられる。

- 1) 無人のため安全性が高い
- 2) 経済的である(機体200万円前後, 200円/時以下の運用費)

1) 国立極地研究所  
190-8518 東京都立川市緑町10-3

キーワード: 無人飛行機, UAV, Ant-Plane, 空中磁気観測, 磁気異常, MR磁力計, 南極観測

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での飛行が可能
- 4) 法的規制がほとんどない  
日本では高度250m以下(航空路付近では高度150m以下)の飛行では航空法は適用されない、250m以上の高度を飛行する時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) 有人機のような滑走路や付帯設備が不要
- 10) 一機での運用が可能

世界のUAVは、米国やイスラエルを中心に開発が進み、すでにアフガニスタンやイラク戦争で敵地の偵察や攻撃に使用され、その有用性が実証されている。軍用以外には、米国のNASAや大手航空会社が民間用に開発したUAVがあるが、高額であることに加え、運用できる地域が制限されるなど、研究者がUAVを所有し、運用することは困難である。この機体をレンタルし、気象観測や空中磁気観測をした例がいくつか報告されている。2000年にはNASAがボリビアのアマゾンにある隕石クレーターの空中磁気探査をUAVで試みたが、エンジンから出る電磁ノイズのため、意味あるデータは得られなかった。最近は多くの国で画像撮影を目的とする小型UAVの開発が行われるようになったが、我々の知る限り空中磁気観測に成功した例はない。

## 2. 機体の開発

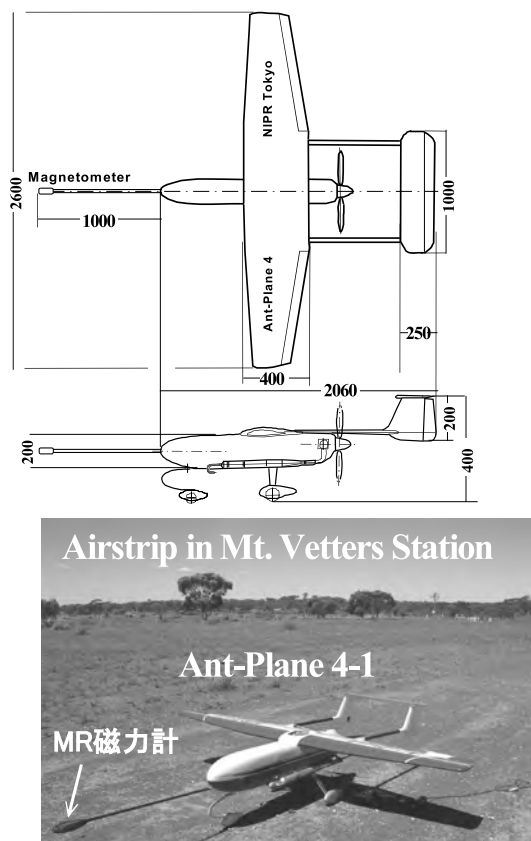
我々がAnt-Plane計画を立ち上げた2002年、日本飛行機kkはすでにUAVの開発に成功していた。この機体は当初航空自衛隊の標的機として開発されたが、採用されず、使用目的がはっきりしない状態であった。我々はこの機体に着目し、日本飛行機と共同研究を進め、2機のUAVをAnt-Plane1号機と2号機とした。これらの機体の翼端に磁力計を取り付け、空中

第1表 機体性能。

	Ant-Plane 1・2号機	Ant-Plane 4-1号機
機体重量(ドライ)(kg)	15	15
最大搭載燃料(cc)	2,400	8,000
離陸最大重量(kg)	19	25
最大ペイロード(kg)	4	5
燃料消費量(cc/h)	95	1,600
航路距離(km)	230	500
巡航速度(km/h)	150	130
最高高度(m)	1,400	5,700
飛行時間(h)	1.5	5
失速速度(km/h)	90	60
エンジン	水平2気筒 86cc ガソリン	水平2気筒 86cc ガソリン
馬力(HP)	7.5	7.5
発電器	—	12V 30W
回転数(rpm)	6,000	6,000
非常用パラシュート	有	有
無線機通信距離(km)	5	5

磁気観測に使用できないか研究した。機体は機首にエンジンがあるトラクタータイプの単発固定翼機で、全長1.8m、翼長2.0m、全高0.8m、総重量15kgの模型飛行機である。第1表に示すように、エンジンは86cc水平対向2気筒・2サイクル・ガソリンエンジンを搭載し、巡航速度150km/hで、1.5時間の飛行が可能である。胴体はベニヤ材で、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。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50m以上に上昇した後、自動操縦に切り替える。着陸は機体が操縦者の視認範囲の400m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)無線で送信され、基地局から半径5km以内であれば、地上局で機体位置と飛行状態がモニターできる。飛行中にトラブルが発生した場合は、手動により搭載のパラシュートによる回収が可能である。

Ant-Plane1号機及び2号機に磁力計を取り付けて飛行させた場合、磁力計から出る電磁ノイズが機体のコントロールに影響を与え、また機体の持つ磁気が磁力計に影響を与えることが判明した。これは磁力計と機体制御装置の距離が近いために発生するもの



第1図 (a) Ant-Plane4-1号機の図面(単位: mm). (b) 西オーストラリア, Kalgoorlie周辺のMt. Vettors Stationの仮設滑走路でのAnt-Plane4-1号機.

で、その最短距離は60 cmであった。この機体磁気を可能な限り小さくするため、我々はフジインバックkkと共同で、第1図に示すような、Ant-Plane4-1号機を開発した。この機体は、第1表に示すような性能を持ち、最大500kmの連続飛行と磁気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。Ant-Plane1号機と同じエンジンを搭載し、エンジンが機体の後部にあるプッシャー式で、30 Wの発電機を搭載している。チュンドパイプによりエンジンパワーを上げている。Ant-Plane1号機と同様の自動操縦装置と送信機やパラシュートを搭載し、飛行状態を基地局でモニターできる。機体の先端に長さ1 mのFRPパイプを取り付け、先端に磁力計センサーを装着する。これにより磁力計センサーは制御装置から1.2m離すことができた。燃料を8リットル搭載し、ペイロード1kg、巡航速度130km/hで航路距離500

km以上を実現させた。

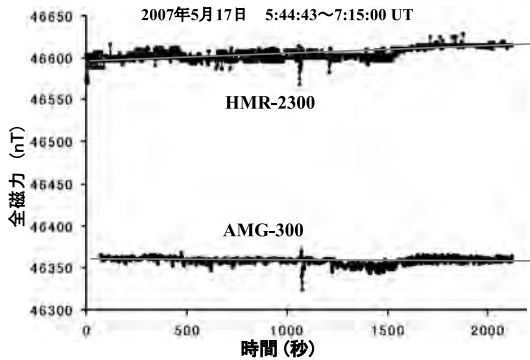
### 3. 自動操縦装置

Ant-Planeで使用している自動操縦の原理はFunaki *et al.* (2006)に紹介した。その概要は以下のとおりである。機体にはGPS(単独測位)、三軸加速度計、三軸角速度計と気圧高度計、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に基づき自動操縦される。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を順番に直線飛行するが、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。地形の凹凸に沿った飛行や曲線飛行はできない。

### 4. 磁力計

#### 磁気抵抗型磁力計システム

Ant-Planeは実機に比べれば極めて安価な飛行機であるが、模型飛行機の部品を使用する関係で機体を失う確率が実機よりはるかに高い。このような機体に搭載する磁力計は安価であることが必要である。我々はAnt-Planeに搭載する磁力計として磁気抵抗型三成分磁力計(MR磁力計: HMR-2300, Honeywell社, 米国)を選定した。この磁力計は、磁気測量に使用された例はないが、価格はセシウムの価格の2.5%以下、プロトン磁力計の5%以下、またはフラックス磁力計の10%以下である。この磁力計は磁気抵抗センサーを使用しており、小型(9.0×3.8×2.2cm)で軽量(80g)、精度は7nT、xとy軸の直交度は極めて高いが、z軸はxy軸に対して±2度以内の誤差を持つ。直交度の誤差は観測終了後ソフトウェアにより補正する。この磁力計にGPSとデータロガ、それにバッテリー(リチウムポリマー、1.7A/h)を取り付け、磁力計システムを製作した。秒値で観測時刻、磁場三成分、緯度、経度、GPS高度、それに受信衛星数を連続6時間データロガに記録できる。磁力計システムの総重量は400gで、消費電力は約0.3Wである。第2図はつくば市で2007年4月17日05:50~06:25(UT)の35分間に観測したフラックスゲート磁力計(AMG-300、



第2図 MR磁力計(HMR-2300)とフラックスゲート磁力計(AMG-300)で測定した全磁力地磁気変化。2007年5月17日, 5:44:43~7:15:00 (UT), つくば市。

テラテクニカ社)とMR磁力計(HMR-2300)によって得られたデータで、全磁力(F)変動を示している。両磁力計のF値はおおよそ250nT異なるが、長周期変動は両者でほとんど同じである。MR磁力計の短周期変動は±15nTであるのに対し、AGM-300は±10nTであった。MR磁力計の場合、35分間で20nTと大きな直線的なドリフトが観測されたが、フラックスゲート磁力計では顕著なドリフトは観測されなかった。この結果、MR磁力計は、z軸の直交度とドリフト補正を行うことにより、磁気異常の大きな地域で空中磁気観測に使用できると結論した。

## 5. 国内での空中磁気観測

2003年11月17と18日, Ant-Plane1号機, 及び2号機により鹿児島県桜島町(鹿児島市)溶岩グラウンドを滑走路として、桜島火山山麓の空中磁気観測を行った。2004年9月13日には秋田県由利郡(由利本庄市)の由利原高原にある矢島町立の軽飛行機飛行場を滑走路として、空中磁気観測をAnt-Plane2号機で行った。これらの実験結果はFunaki *et al.* (2006, 2008)に紹介した。機体の主翼端にMR磁力計を取り付け、それ以外の磁力計システムを胴体内部に収納した。これらの飛行実験の結果、機体の持つ磁気が約600nTあり、無風状態や風下に飛行する時は、±10nTの短周期磁気ノイズが観測された。風上に飛行する時には磁気ノイズが大きく、その大きさは22m/sの風速で最大±100nTにもなることが判明した。これらの磁気ノイズは、磁力計の姿勢が急激に変化する時に発生すると考えられ、機体の振動や急激な風速・風向の

変化に起因すると考えられる。MR磁力計システムのノイズレベルが7nTであることは、静穏時に飛行した時のノイズレベル以下である。この結果はMR磁力計でもフラックスゲート磁力計と同じ精度で空中磁気観測ができることを示した。このことはAnt-PlaneとMR磁力計の組み合わせでは、磁気異常が数十nTと小さな地域では使用できないが、火山地帯のような数百nT以上の大きな磁気異常を持つ地域では使用できることを意味している。なお、設定飛行コースと実際のそれとの差は、Wp間隔が1km以上あり、風が弱い場合は水平距離誤差±10mで、これはGPSの精度によって決まる。しかし、風が強い時は旋回後、大きなコースの逸脱が直線飛行範囲でも見られた。高度誤差については旋回時に最大±30mにもなったが、直線飛行では気圧高度で±5mであった。

## 6. オーストラリアでの空中磁気観測

### 6.1 輸出許可と飛行許可

Ant-Plane4-1号機は500kmの連続飛行が可能のため、長距離飛行による空中磁気観測を計画した。国内での実験結果に基づき、大きな磁気異常が期待され、機体が墜落した場合に人間や地上施設に与えるリスクが小さい地域を考えた。当初インドのデカン高原にあるLonar隕石クレーター上空での観測をインド地質調査所と共同研究で計画したが、インド政府から飛行許可が出ず、断念した。Ant-Planeはミサイルにも転用可能なため、政情にトラブルがある地域では飛行許可が出ないものと思われる。次にオーストラリアのパースの東400kmにあるKalgoorlie市郊外を実験地に選定した。Kalgoorlieは金やニッケルを産出する鉱山町で、地形は平坦な砂漠地帯で、大きな磁気異常が期待できる。Australia Geoscienceで磁気異常を研究しているPeter Milligan博士に共同研究を提案したところ、同氏は快く本計画を受諾してくれた。

オーストラリアにAnt-Plane4-1号機を持ち込むためには、いくつもの課題があった。外国に持ち出すためには通商産業省(現 経済産業省)の輸出許可が必要である。本機体は法令上以下のようなリスト規制(軍事関連製品等)の対象となる。

1. 輸出令第4項-の2: ペイロードを300km以上輸送の無人機
2. 輸出令第4項-の3:

イ：自立的な飛行制御及び航行能力を有するもの

ロ：視認できる範囲を超えて人が飛行制御できる機能を有するもの

この法令に違反すると以下のように罰則される。

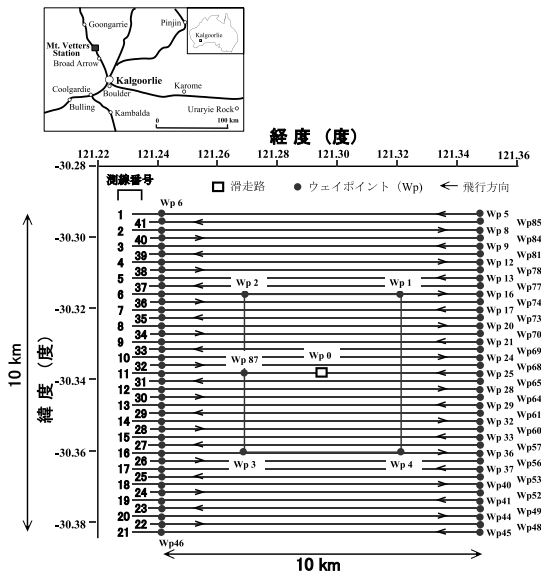
- a. 違反した場合は、罰則(刑事罰, 行政制裁, 警告処分)
- b. 法令を知らなかったとしても、違反した場合は免責されない
- c. 法令上の違反にならない場合でも、社会的制裁をうける

旅客機に模型飛行機を搭載することは、安全飛行の観点から禁止されている。我々はAnt-Plane4-1号機のエンジンを取り払い、エンジンを貨物機でオーストラリアに輸出し、それ以外を旅客機で持ち込むことにした。

オーストラリアでUAVを飛行させる場合、オーストラリア民間航空局(CASA)の許可が必要である。当初250kmの直線を往復させることにより、Ant-Plane4-1号機の飛行性能と空中磁気観測の精度を評価することを目的とした。しかしCASAから常時機体の位置が確認できること、機体にトラブルが発生した時は、機体を安全に地上に誘導するか、上空で爆破させること、さらに常時航空管制と交信ができること、が条件とされ、250kmの連続飛行を断念した。本機体の飛行許可が出る可能性としては、滑走路を中心とした10×10kmの範囲を飛行させることである。この範囲であれば常時機体の位置をモニターでき、非常時にはパラシュートの開傘が可能である。航空管制との通信確保のため、無線通信の免許を持つパイロットの協力を得、また通信機をレンタルすることにより、CASAの要求を全てクリアすることができた。飛行地域についてはKalgoorlie周辺の10×10kmの範囲で飛行許可を申請した。この結果、CASAからKalgoorlieの北北東50kmにあるMt. Vettters Stationの滑走路を使用して実験を行う許可が出た。この他、パース国際空港の税関では、事前に機体の輸入の手続きがされていないとの指摘があったが、事情を説明し特別にオーストラリアへの持込の許可が出た。

### 6.2 飛行計画

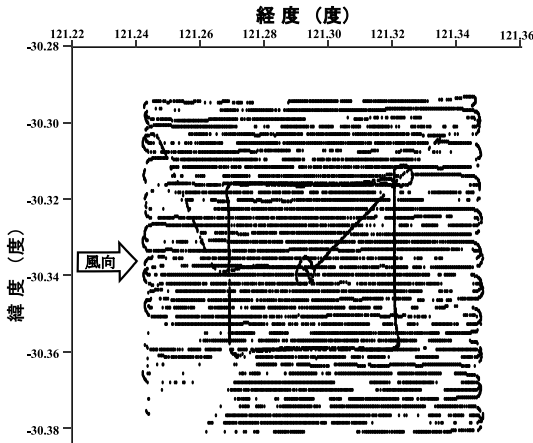
滑走路はMt. Vettters Stationにある牧場の仮設飛行場(緯度S 30.2916, 経度E 121.34405, 標高: 427



第3図 西オーストラリア州, Kalgoorlie周辺のMt. Vettters Stationでの空中磁気観測のための飛行計画。10×10kmの範囲の中央に地上局と滑走路。観測測線: 41本, 地表高度: 500m。

m, IGRFの値は標高900mで57,620.2nT)で、南北方向に長さ200m幅10mの未舗装の滑走路がある。この滑走路の北端に基地局を設け、基地局を中心に10×10kmの範囲を空中磁気観測範囲とした。観測範囲内にはMt. Vettters Stationの施設以外に、集落はない。地形は10m程の起伏があるが、概ね平坦で、数メートルの灌木が茂っている。基地局から見ると南西方向にMt. Vettters Stationの施設の一部が、また北東方向に約10mの丘が見られる。基地局には飛行状況を確認するためのPC、それに機体と通信するためのテレメータ設備を設置した。

飛行ルートを第3図のように設定した。観測の飛行高度は地表面から500m(海拔927m)、測線間隔は250m、飛行速度は130km/hである。滑走路を手動で離陸した機体は、滑走路上空のウェイポイントWp0(高度200m)付近で自動飛行に切り替えた後、500mまで上昇させながらWp1に向かう。Wp0を中心とする5×5kmの範囲(Wp1からWp4)を高度500mで一周させ、飛行の状況を確認した後、Wp5に向かって飛行させる。観測飛行は最北端の測線1から最南端の測線21(Wp5～Wp46)まで500m間隔で飛行させた後、Wp46と47の間で折り返し(巡回半径250m)、測線22から測線41(Wp47～Wp86)を飛行させ

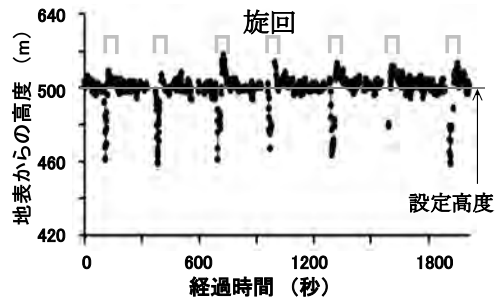


第4図 テレメータにより受信された機体のGPSによる位置(秒値)。

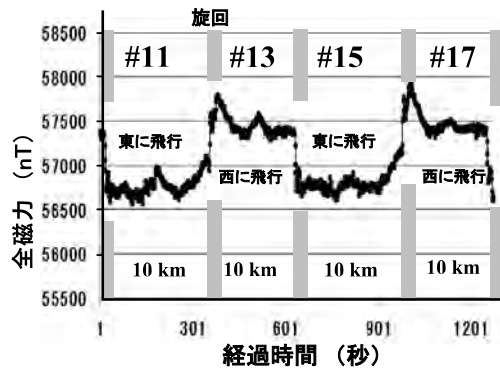
る。その後はWp86から高度200mのWp87まで下降させ、Wp0に飛行させる。Wp0付近で自動操縦を手動に戻し、滑走路に誘導する。

### 6.3 飛行結果

2006年3月22日13時55分(現地時間)、Ant-Plane4-1号機はMR磁力計を搭載しMt. Vettters Stationの滑走路を離陸した。飛行中の天候は晴れ、気温30～36℃、気圧920hPa、地上では断続的に西の風が吹き、最大7.5m/sの風があったが、滑走路上では何度か小規模の竜巻が発生した程度で飛行は全て予定通り行われ、3時間36分後の17時26分に505.7km(対地距離)を飛行し、滑走路に着陸した。飛行中は八木アンテナを常時機体方向に向け、飛行情報の取得に努めた。その結果、第4図に示すような秒値の機体の位置情報を得ることができた。5×5kmの範囲では建物や丘の方向を除き、概ね受信に成功した。この範囲の外でも、断続的に位置情報が得られ、基地局から14km以上離れた地域でも旋回時にデータ受信ができた。第3図の飛行計画と対比させると、機体は予定のWpを旋回し、各測線に沿って飛行したことが分かる。旋回時にはルートの逸脱も見られるが、200m以内で測線上に回帰していた。対地速度は西(風上)に飛行する時は100km/hであったが、風下に飛行する時は160km/hであった。このことから上空500mでは30km/h(8.3m/s)の西風が吹いていたと推定できる。第5図に飛行中のGPSによる高度記録を示した。直線飛行中は±5mで設定高度500mを維持して飛行



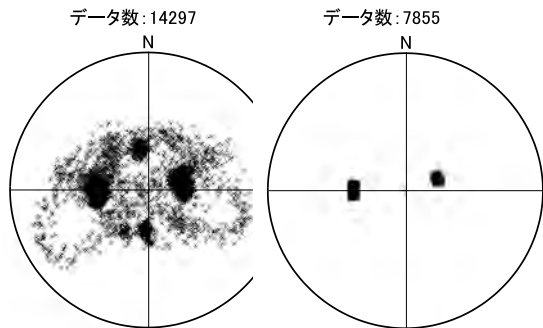
第5図 気圧高度計による高度変化、設定高度500m、旋回中に顕著な降下とその後の急激な上昇を観測。



第6図 測線番号11～17で観測された全磁力変動、大きな機体磁気(683nT)が観測。また、西(風上)に飛行する時は東(風下)に飛行する時に比べ、短周期変動の強度が大。

しているが、旋回開始直後に急激な下降を示し、最大40m降下している。その後、急速に高度を上げ、設定高度より最大18mのオーバーシュートを示した後、設定高度で安定した。なお、旋回開始から設定高度に戻るまでに約100秒を要した。

観測された三成分磁場強度から全磁力を計算した。その時の磁場変化を第6図に示した。東に飛行する時は西に飛行する時より平均で683nT小さく測定された。これは機体磁気の影響と考えられる。風上に飛行する時(西に飛行)の全磁力の短周期変動の振幅は風下に飛行する時より大きかった。機体は大気に対し130km/hで飛行しており、機体から見ると風下と風上の違いはないはずであるが、このような現象が見られた。風上飛行で短周期磁気ノイズが大きくなる原因については、今後の課題である。



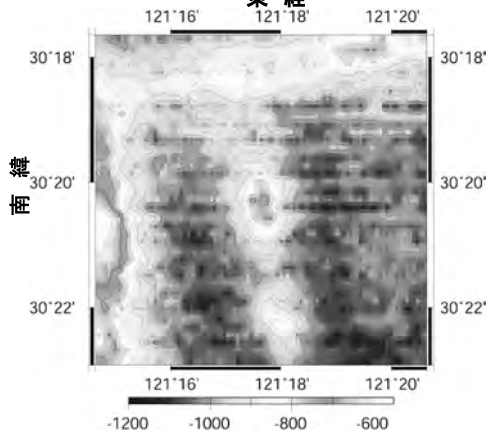
第7図 (a) 磁場三成分から計算される機体のヘッディングの方向(等面積図法). (b) 磁場解析に用いた偏角60-80度・伏角67-72度, 及び偏角260-280度・伏角57-62度を示す7,855個のヘッディングの方向.

### 6.4 データ解析

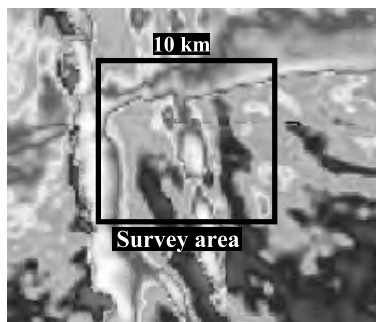
磁力計により観測された磁気データの合計は14,297個である。この内、Wp5~Wp86間で測定された空中磁気観測に使用するデータは10,950個であった。磁気異常図を作成するに当たり、これらのデータについて以下のような補正と選択を行った。

- 1) 全磁力を時間でプロットし、線形近似によりMR磁力計のドリフトを推定した。その結果、0.022151nT/秒の勾配で全磁力が増加していたことが判明した。測定開始の値を基準にドリフト補正を行った。
- 2) 機体磁気を補正するため、風下に飛行した時の全磁力から機体磁気683nTを差し引いた。
- 3) MR磁力計の三成分データから、機体のヘッディングを秒値で求めた。第7図(a)はこれらの値を等面積図法に示したものである。機体が東西に水平飛行したにもかかわらず、測定結果の多くの偏角が約10度反時計方向に回転し、伏角も水平でない。この原因は磁力計が機体軸と平行でなかったためと考えられる。ヘッディングが東西方向から大きく乱れた場合、機体磁気の補正が困難となる。このため本実験では、東方飛行の場合、偏角60-80度、伏角67-72度の範囲のデータのみを、また西方向の飛行では偏角260-280度、伏角57-62度の範囲のデータを選定した。この結果、7,855個のデータを磁気解析に用いた。第7図(b)は磁気異常の解析に用いたデータのヘッディングの方向である。
- 4) 飛行中のGPS位置情報の欠損については、欠損の前後の緯度と経度を基に、補間法により欠損位

(a) Ant-Plane 4で観測した磁気異常



(b) Geoscience Australiaによる磁気異常



第8図 (a) Ant-Plane4-1号機で観測された西オーストラリアのKaloogrlie周辺で観測された磁気異常。MR磁力計のドリフト補正が不完全なため、特に北部の測線間で磁気異常の大きさが異なる。(b) Australia Geoscienceが同地域で観測した磁気異常。

置を推定した。

- 5) 得られた全磁力から、Mt. Veters StationのIGRF値である57,620.2nTを差し引き、磁気異常とした。磁気異常の範囲は-1,200nT~-600nTであるが、この値は相対値としてのみ意味を持つ。

### 6.5 磁気異常

これらのデータ処理の結果に基づき、第8図(a)に示すような磁気異常図を作成した。測定範囲の北部にEWに延びる正の異常と、西部及び中央部にNNWからSSEに伸びる2本の正の異常が観測された。測定範囲中央に見られる正の異常の両側に顕著な負の異常が現れている。北部と南部では測線間の磁気異常変化は比較的スムーズであるが、中央付近では隣接する測線で最大±50nT異なった。西オーストラリ

ア州にあるグナンガラ地磁気観測所の観測結果では、当時磁気嵐は発生していない。飛行中の3時間36分間で、地磁気の日変化は数nTであり、折り返し飛行によるこのような大きな地磁気変化は説明できない。最も可能性が高い要因として、MR磁力計のドリフト補正が不完全であったことが推定できる。ドリフトが複雑な変化を示し、直線近似では完全な補正ができなかったことに起因していると考えられる。

Australia Geoscienceは同地域の磁気異常を実機で観測し、第8図(b)に示すような磁気異常図を発表している。両磁気異常図を対比すると、数kmの長周期異常は両者でかなり似ていることが分かる。しかし、短周期に関してはかなり異なる部分がある。本実験ではドリフト処理が不完全なため、詳細な磁気異常の論議はできないのが現状である。

## 7. 考察

西オーストラリアのKalgoorlie周辺で、実機により本実験と同様の空中磁気観測を行う場合、機体のチャーター料、パイロットの人件費、磁力計取り付け作業や検査、それに保険等、少なくとも数百万円の費用が必要である。これに対しAnt-Plane4-1号機の場合、価格は約200万円、MR磁力計は約30万円であるが、運用費は極めて経済的である。Kalgoorlieでの飛行実験の場合、3時間36分で505.7kmを飛行し、使用した燃料は5.7リットルであった。予備の燃料を考慮しても8リットルあれば十分なことから、燃料費は1,200円以下で、極めて大きな費用対効果を実証することができた。我々はAnt-Planeの開発過程で、数機の機体を失っている。幸い人や財産に危害を与えることはなかったが、一步誤れば大惨事を引き起こす可能性もあった。それ故、Ant-Planeによる航空機観測は、墜落しても大きな問題のない過疎地や海洋、それに極地等の観測に限定することが重要である。

磁力計については、MR磁力計のドリフトの問題が大きい。機体振動や機体磁気の軽減も今後の課題である。経済的で、なおかつ小型・省電力の観点から、今まではMR磁力計を使用した。長時間飛行には不適切である。今後、フラックスゲート、プロトン、それにセシウム等の磁力計等の導入を進めることが必要である。

Ant-Planeによる空中磁気観測は、研究者自身が計画し、機体の運用ができる。日本の場合、地表から

250m以下(一部で150m以下)の高度では、いつでも自由に飛行させることが可能で、有人機に求められる定期点検や機体改造後の検査も不要である。本寄稿では触れなかったが、桜島南岳の噴煙の中を飛行させることにも成功している。実機では飛行が制限される噴火中の火山上空の観測がAnt-Planeでは可能である。機動性に富んだ航空機観測が研究者自身で可能になってきた。

海外に無人機を持ち出す場合、無人機はリスト規制の対象物資で、例えば科学観測でも経済産業省・貿易経済協力局・安全保障貿易審査課が発行する輸出許可書が必要である。また、輸入国においても、無人機には種々の規制が行われているし、飛行許可の取得も容易でない。国外での無人機による航空機観測には、事前の準備が重要である。

謝辞：本研究を進めるに当たり日本飛行機(株)の箱島氏、フジ・インバック(株)の田辺氏には機体の開発で、Australia GeoscienceのP. Milligan博士にはオーストラリアでの飛行実験やデータ解析について、お世話になりました。本研究は国立極地研究所・開発研究(E4, 2004-2006)、及び文部科学省・科学研究補助金(萌芽研究, 15654063, 2003-2005; 基盤研究A, 17204038, 2005-2008)により行われました。ここに厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- Dolinsky, P., Funaki, M., Yamazaki, A., Ishikawa, N. and Matsuda, T. (2002) : The results of magnetic surveys at Mt. Riiser-Larsen, Amundsen Bay, Enderby Land, East Antarctica, by the 42<sup>nd</sup> Japanese Antarctic Research Expedition. *Polar Geoscience*, **15**, 80-88.
- Funaki, M., Dolinsky, P., Ishikawa, N. and Yamazaki, A. (2006) : characteristics of metamorphosed banded iron formation and its relation to the magnetic anomaly in the Mt. Riiser-Larsen area, Amundsen Bay, Enderby Land, Antarctica. *Antarctica*, ed. D.K. Futterer et al., Springer, Berlin, 16-22.
- Funaki, M. and Ant-Plane Group (2006) : Development of small drones "Ant-Plane" for Antarctic research, -its possibility and difficulty-. *Antarctic Record*, in Japanese, **50**, 2, 212-230.
- Funaki, M., Hirasawa, N. and Ant-Plane group (2008) : Outline of a small unmanned aerial vehicle (Ant-Plane) designed for Antarctic research. *Polar Science*, **2**, 129-142.

FUNAKI Minoru and Ant-Plane Group (2011) : Small Drones "Ant-Plane" developed for Antarctic Research and Aeromagnetic Survey.

<受付：2010年8月20日>