

北海道紋別市で行った大気観測における無人航空機の 飛行特性と気象測器の動作状況

平 沢 尚 彦*・尾 塚 馨 一**・林 政 彦***・船 木 實*

要 旨

南極観測での無人航空機の実用化を目指した国内試験として、2005年6月下旬に北海道紋別市で行った高高度飛行性能試験と気象観測試験の結果に基づいて、無人航空機及び気象測器の動作性能を議論し、観測実施の手順を述べる。今回の最高高度5700 mは、130 km/h (約36 m/s) の巡航速度で飛行する本無人航空機が、向かい風に抗して安定な航行が困難になった高度であった。高度の上限が、航空機の揚力による上昇性能ではなく、水平風速が上空に向かって増加する中で現れる場合があることが分かった。無人航空機観測では飛行経路を予め設定するため、向かい風を回避することは難しい。対流圏の風速を考慮すれば、強風時の観測や広範囲の観測を実現するために、目安として巡航速度が100 km/h (約30 m/s) を越え、加速性能の高い機体が有利である。明星電気製の気象ゾンデとリオン製のエアロゾルカウンターにより、気温逆転層などの詳細な鉛直分布を観測することができた。

1. はじめに

日本の気象関係者によく知られている無人航空機システムとしてエアロゾンデがある(浅沼・玉川 1999; 別所ほか 2002)。エアロゾンデは予め設定した数千 km の経路に沿った観測が可能で、既に実用化されている(Holland *et al.* 2001; Inoue and Curry 2004など)。国内で開発・実験が進んでいるカイトプレーンも既に実績を残している(Watai *et al.* 2006; Yamashita *et al.* 2005など)。

国立極地研究所では、南極観測用に無人航空機の実用化を目指した所内プロジェクトを進めている。人員が限られる南極では、研究者が直接操作できるシステムであることが求められ、大気観測だけでなく地磁気観測、生物分布観測などの研究活動や、野外行動のための海水・氷床表面状態の監視などの設営面にも用途が広がる。大気観測としての目標の一つは、大気境界

層を対象とした地上高2000 m程度である。標高約4000 mの南極内陸部においては、海拔6000 m程度の飛行性能が要求される。もう一つの目標は、南極大陸沿岸からカタバ風帯を往復し総観規模の大気場の変動を把握できる1000 km以上の航続距離を持つことである。

このような目標のもとで、さまざまな地域で飛行及び計測試験を行ってきた(Funaki 2005; Funaki *et al.* 2006; 船木ほか 2006)。2007年3月には、長崎県上五島で1000 kmの飛行に成功している。2005年6月27日から29日に北海道紋別市で高高度飛行試験及び大気観測試験を行なった。我々の試験結果や経験は、南極観測だけでなく無人航空機を利用した観測を企画する際の参考になると思われる。そこで、本稿では紋別市での試験結果に基づいて、現在開発中の無人航空機と搭載可能となった気象測器の性能を述べる。また、無人航空機を利用した観測を企画する際の留意点や今後の課題を記述することを目的とする。

2. 無人航空機と測器の仕様

今回の観測で用いた無人航空機の主な仕様を第1表に、外観を第1図aに示す。無人航空機は、機体の

* 国立極地研究所。

** 福岡大学大学院理学研究科。

*** 福岡大学理学部。

—2006年1月23日受領—

—2008年11月11日受理—

水平位置 (GPS による) と高度 (気圧計及び気温計による) を認識し, 予め設定された空間の点 (Way Point と呼ぶ, 以後 W.P. と記す.) を次々に通過しながら飛行する. 航空機には W.P. に向かって方向舵やエンジン出力を調節するための自動航行装置が搭載されている. 通信が確保されていれば, 飛行中にも W.P. の修正や制御条件の変更を行える.

機体の大きさや重量はエアロゾンデ (Holland *et al.* 2001) とほぼ同じであるが, エアロゾンデと異なり自力滑走での離陸が可能である. 巡航速度は130 km/h である. 滞空時間は燃料 (飛行距離) と搭載測器の兼ね合いで決まる.

気象測器について第2表に, 測器の搭載状況を第1図bに示す. 気温及び湿度の観測には明星電気製の高層気象ゾンデ (以下, ゾンデ, ゾンデ気温など) を利用し, データロガーに記録した. 航空機の上昇率をゾンデと同程度の5 m/s 前後に設定することで, 十

第1表 無人航空機の仕様.

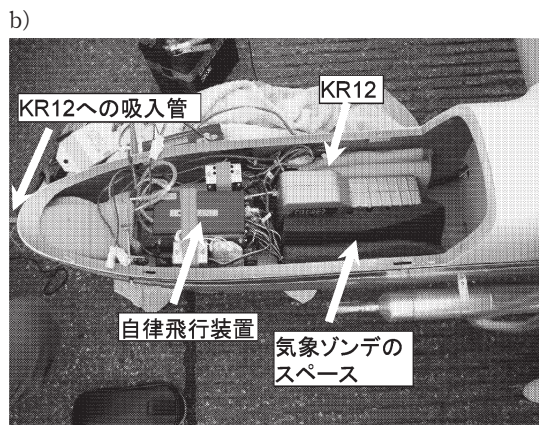
項目	仕様・性能
種類	模型航空機 (単発固定翼)
動力	86 cc 2気筒2サイクルガソリンエンジン
大きさ	全長2.2 m, 全幅2.7 m, 全高0.72 m
総重量	12 kg (空燃料)
滞空時間	9時間
航続距離	1000 km
巡航速度	130 km/h
最大上昇速度	180 m/min.
操縦	無線による遠隔操作, および搭載コンピュータによる自動操縦

(フジインバック (株) 資料による)

分な測定精度が得られると考えた. 軽量, 低価格という特徴は, 無人航空機観測に適している. 機体底面から外部に露出した気温・湿度センサーのうち, 気温センサーは離陸後10分程度で半田固定されている部分から脱落した. 後日, 気温・湿度センサー部分をステンレス管に入れることでこの問題は解決した. 高度算出用に機体に搭載された気温計の計測値 (以下, 機体気

第2表 搭載測器の仕様 (メーカーのカタログからの抜粋).

測定項目	仕様・性能	
気温	明星電気製 気象ゾンデ (RS-01G), サーミスタ	
	温度範囲	-90°C~+45°C
	計測間隔	1秒
湿度	明星電気製 気象ゾンデ (RS-01G), 静電容量式湿度計	
	湿度範囲	0%RH~+100%RH
	計測間隔	1秒
エアロゾル	リオン製 KR12	
	測定粒径 (直径)	0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 2.0, 5.0 μm
	流量	2.83 l/min.
気温 (機体)	松下製 サーミスタ (ERTG1 AHJ103)	
	温度範囲	-20°C~+40°C
	計測間隔	1秒
気圧 (機体)	フジクラ製 絶対圧センサー (FPM-15 PAR)	
	定格圧力	346.6 hPa~1680 hPa
	計測間隔	1秒
	圧力ヒステリシス	0.2%FS



第1図 (a) 無人航空機の外観と (b) 測器搭載スペース.

温)の精度についても4章で議論する。気球によるラジゾンデ観測値との比較は今後の課題である。

エアロゾルカウンターはリオン製のKR12を使用した。計測粒子粒径は直径0.3 μmから5.0 μmまでの6種類に分類される。測器内部に吸入された空気のと湿度(以下、KR12気温など)の計測も行う。外気の引き込みは第1図に示すように機首から銅管を通した。銅管内への外気の流れ込みに対する抵抗を減らすことと、KR12に送られる大気流量を安定化させるために、機体内での銅管とKR12の繋ぎに隙間をもたせ、余分な流入大気を流し出した。

3. 飛行試験の概要

3.1 飛行試験サイト

無人航空機の離着陸には北海道紋別市の旧紋別空港滑走路を使用した。第2図に示したように、オホーツク海に面した海岸に隣接している。滑走路から約2 km内陸側には国道238号線があって、この地域の幹線道路として交通量は少なくない。飛行ルートは、国道238号線と接触せず、通信に関する利点から滑走路を中心とし、陸側と海側をほぼ二分した。また、滑走路から約10 km離れたオホーツク紋別空港での定期便(羽田間の1往復)の発着時刻には観測飛行を避けた。

3.2 飛行試験の概要

飛行試験は、第3表に示すように、2005年6月27日に1回、28日に4回、29日に3回行った。比較的短時間で観測が実施でき、したがって1日に複数回の観測ができることは、有人航空機より有利な面である。

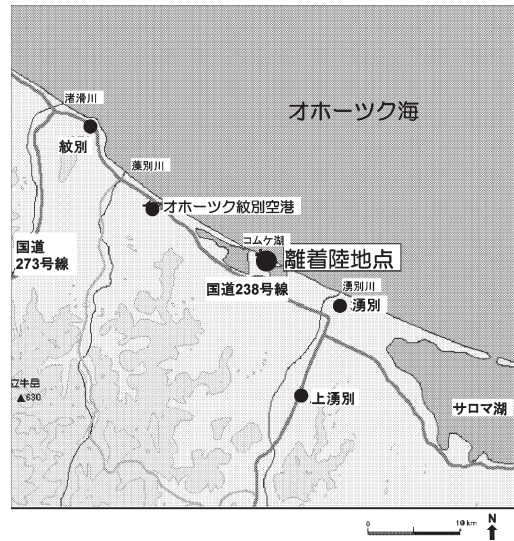
高高度を目的とした飛行は28日の第1回目と第3回目で、最高高度はそれぞれ約4000 mと約5700 mであった。どちらの試験も向かい風の領域でW.P.に近づけない状態になった。このことは、対地速度が50

km/h(約14 m/s)を下回っていることから示唆される。無人航空機の最高高度が水平風速に関連することについて、4.1節でさらに議論する。

測器の動作状況では、高度5700 m以上に達した観測でゾンデとデータロガー間の結線不具合によりデータ記録が出来なかった(×印で表示)。28日の第1回目と第3回目では飛行中にゾンデの気温センサー部分が脱落した。

3.3 航空関連部署への連絡

現在の航空関連の法規では、無人で総重量が100 kg以下の航空機で、高度250 m(航空路近傍では150 m)を超えない場合には届け出の必要はない。しかし、一般に我々が観測目的で行う場合には、観測地域



第2図 飛行試験の離着陸地点(旧紋別空港)の位置。

第3表 飛行試験の概要。飛行記録の極値を下線で示す。気象測器の試験結果について、良好：○，非搭載：-，ゾンデ信号ケーブルの接触不良：×，ゾンデ気温センサー部分の脱落：△で示す。

月日(当日回)	時刻(JST)	飛行時間(分)	最高高度(m)	最小対地速度(km/h)	最大対地速度(km/h)	最低気温(°C)	搭載センサーの動作						飛行目的	
							機体気圧	機体気温	ゾンデ気温	ゾンデ湿度	KR12気温	KR12湿度		KR12 OPC
6月27日(1)	16:55-17:11	16	2048	45	174	8.9	○	○	-	-	-	-	-	立ち上げ
6月28日(1)	10:22-11:19	57	4019	48	165	-4.8	○	○	△	○	○	○	-	高高度
6月28日(2)	13:14-13:40	26	214	75	157	11.9	○	○	-	-	-	-	○	カメラ撮影
6月28日(3)	15:56-16:51	55	<u>5722</u>	31	183	<u>-13.8</u>	○	○	×	×	○	○	-	高高度
6月28日(4)	18:15-18:42	27	221	86	191	12.9	○	○	-	-	-	-	○	高速
6月29日(1)	10:05-10:37	32	2007	<u>27</u>	178	4.6	○	○	-	○	○	○	-	気象観測
6月29日(2)	14:05-14:55	50	3694	63	<u>209</u>	-0.3	○	○	-	○	○	○	-	気象観測
6月29日(3)	17:37-18:04	27	2002	66	169	5.5	○	○	-	○	○	○	○	高速 気象観測

第4表 観測実施に関わる連絡先と連絡内容。

連絡時期	連絡先	連絡内容と方法
事前連絡	釧路空港事務所	飛行通報書, 計画書の提出
	紋別市役所	同上
	離着陸地点所有者	同上
	新千歳空港	連絡体制確認
	札幌管制部	同上
観測期間初日	紋別市役所 (以下, 市役所)	観測期間開始の連絡 (電話)
	警察	同上
	消防	同上
	新千歳空港	同上
	海上保安部	同上
観測期間各日	新千歳空港対空通信卓	開始前の連絡 (電話)
離陸15分前	新千歳空港対空通信卓	離陸予定時刻の連絡 (電話) 定期便の時刻確認
	札幌管制部・管制官	離陸予定時刻の連絡 (電話)
着陸直後	新千歳空港対空通信卓	着陸の連絡 (電話)
	札幌管制部・管制官	同上
緊急時	市役所	緊急内容 (電話)
	警察	同上
	消防	同上
	新千歳空港対空通信卓	同上
	釧路空港事務所	同上
	海上保安部	同上
観測期間最終日	市役所	観測終了の連絡 (電話)
	新千歳空港対空通信卓	同上
	釧路空港事務所	同上

の航空関連部署や役所などには事前に連絡し、了承を得ておきたい。航空関連部署への連絡は、観測地域を管轄する空港事務所に航空機の性能や飛行の目的などを記述した飛行通報書で申請する。観測現場からの連絡を行なうため、携帯電話は必須である。今回の観測で我々が事前及び当日に連絡を行った機関とその内容を第4表に示す。

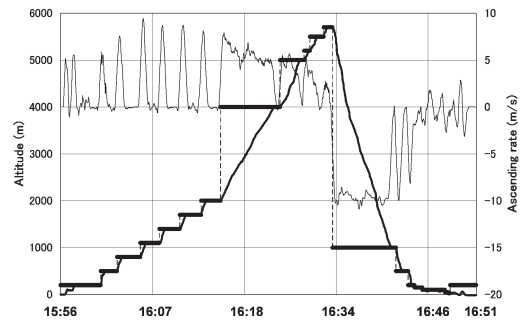
4. 飛行試験の結果

4.1 高高度飛行試験

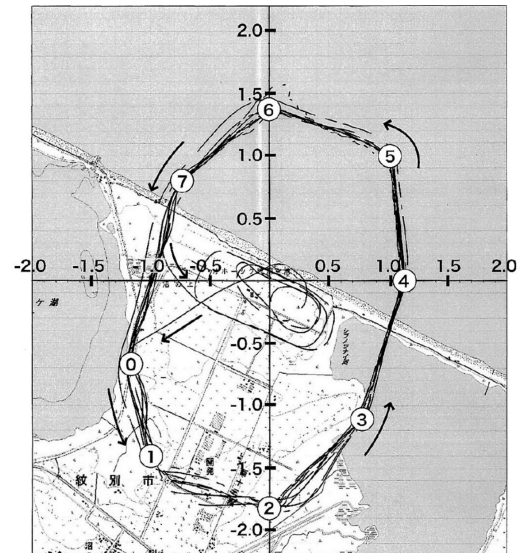
ここでは、高高度飛行試験として高度5700 m以上に達した28日第3回目の飛行について述べる。第3図に航空機の高度と目標高度の時間変化を示す。航空機は、目標高度の変更に応じてそこに向かって最高出力で上昇する。高度5700 m付近の上昇率は約2 m/sであり、上昇能力は残している。

水平位置の航跡を第4図に示す。離陸し自動飛行に移るとW.P.-0(図中の①)を目指し、その後はW.P.-1(同, ①), W.P.-2(同, ②)と順番に通過する。航跡の途切れは通信不具合による欠測である。

観測期間中の主風向は北から北西であり、向かい風



第3図 2005年6月28日第3回飛行試験(高高度飛行試験)時の無人航空機高度(実線), 設定された目標高度(水平の太実線及びそれを破線で結ぶ), 及び上昇率(m/s)(グラフ上部の細実線)の時間変化。



第4図 2005年6月28日第3回飛行試験(高高度飛行試験)のW.P.(円内数字で示す)と航跡(実線). 航跡の途切れはデータ通信不具合による欠測部分に対応する。

を受けるW.P.-4~6付近で対地速度が落ちる。W.P.-6付近でコースを大きく逸れた航跡は、強い向かい風にあおられたことを示している。概して、水平風が強い領域では風の乱れが比較的大きく、従って航空機の姿勢は乱されやすい。巡航速度と同程度の大きさの向かい風中で航空機の姿勢が乱れた場合、W.P.の通過がさらに困難になり、墜落の可能性がでてくる。本稿ではこれを臨界風速と呼ぶ。臨界風速は、エンジ

ンの加速性能や航空機の空力的な性質，更に風の乱れの状態などの様々な条件から決まる．ここでは，巡航速度を臨界風速の目安として使う．

鉛直分布観測では，一般に直径数 km の周回経路が設定され，航空機が向かい風を受けて進まなければならない経路が必ずある．通常の無人航空機の巡航速度は対流圏の水平風速と同程度の大きさで，上空に向かって風速が増す大気中を上昇するうちに臨界風速に達することがある．それは揚力による上昇能力の限界とは異なるものである．鉛直分布観測以外であっても，無人航空機観測では飛行経路を予め設定するため，向かい風を回避することは難しい．

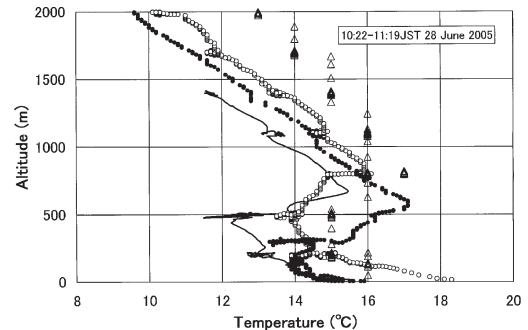
追い風の場合には，風速と巡航速度の合計で対地速度が速くなり，W.P.での方向転換が難しくなる．W.P.-1～2付近では方向転換しきれずにコースを逸れて航跡が蛇行している．直線的な飛行経路が設定できる観測であれば，方向転換に関わる困難は回避できる．

4.2 気温

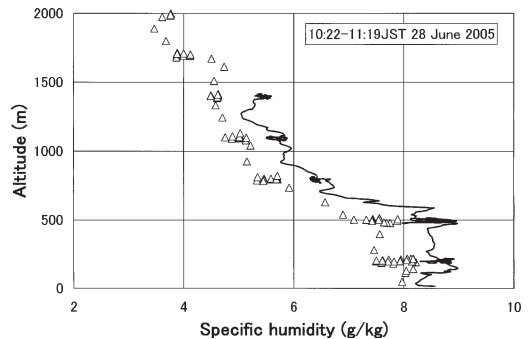
ゾンデ気温，機体気温，KR12気温の3つの測定データが揃った28日第1回目の結果を第5図に示す．ゾンデ気温は上昇時の高度約1400 m までの測定値がある．地上から高度500 m 付近までは高度とともに気温は下降し，高度500 m から600 m 付近に約3°Cの気温逆転層があった．その上空では高度とともに気温は下降した．気温逆転層より上空の高度900 m から1400 m において，上昇時のゾンデ気温と機体気温を比較すると，その差はほぼ一定で機体気温の方が平均的に約1.7°C高い．この値を用いて機体気温をゾンデ気温相当に補正することが可能である．気温逆転層より下方の高度でも同程度の差が観測されている．

上記の差とは別に，上昇時に機体気温で測定された気温逆転層は，その底部がゾンデ気温と同じく高度500 m 付近であるのに対し，頂部は高度約800 m 付近である．これは，機体気温計の時定数の方が大きいためと考えられる．気温逆転層のような空間的に気温変化率が大きな特徴を，機体気温により議論する際には注意を要するが，一定高度間隔（今回は300 m とした）で定高度飛行することにより精度を向上させることができる．

KR12で測定された気温は，一般に粒子数を測定する測器内部環境の温度をモニタする目的で使われる．外気温が下がるほどKR12気温との差が大きくなる傾向は，機体内部が保温的な性質を持つことを示唆す



第5図 2005年6月28日第1回飛行試験時の気温の鉛直分布．それぞれ，実線：ゾンデ気温，白丸：機体気温（上昇時），黒丸：機体気温（下降時），白三角：KR12気温を示す．



第6図 2005年6月28日第1回飛行試験時のゾンデ比湿（実線）とKR12比湿（白三角）の鉛直分布．

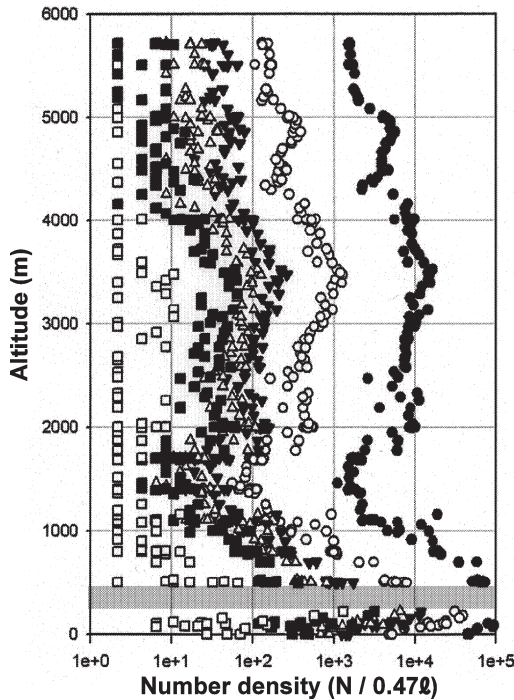
る．

4.3 湿度

第6図は28日第1回目の観測結果を用いて，ゾンデとKR12から計算された比湿の関係を示す．KR12の比湿はゾンデの95～85%程度で，回帰直線の相関係数は0.99であった．KR12内部に吸引した大気中に存在する雲粒やエアロゾル粒子からの蒸発量が多ければ大気比湿に比べてKR12から計算された比湿が多くなるから，この違いはまた別の理由によるものであろう．原因は分からない．しかしながら，KR12で測定される気温，湿度から外気の湿度を推定できる可能性を示している．

4.4 粒子数濃度

第7図には高度5700 m 以上に達した28日第3回目観測時の粒径別粒子数濃度（個/0.47 l）の鉛直分布



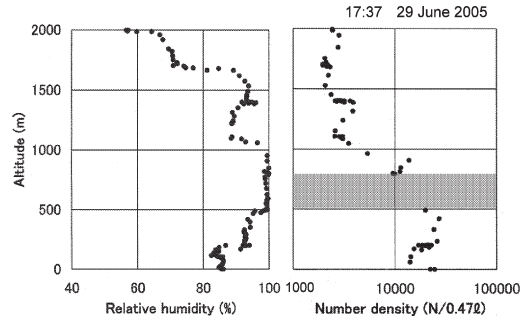
第7図 2005年6月28日第3回飛行試験時の粒径別粒子数濃度(個/0.47ℓ)の鉛直分布。各記号と粒子直径(μm)との対応は、それぞれ、●:0.3-0.5, ○:0.5-0.7, ▼:0.7-1.0, △:1.0-2.0, ■:2.0-5.0, □:5.0以上。高度200m-500m付近の陰は計測不能だった層を示す。

を示す。粒子数濃度は粒径帯毎(例えば、直径0.3 μmから0.5 μmの間)の粒子数濃度で示す。各粒子ともに高度200 m付近の雲底に向かって高度とともに粒子数濃度が増加する。1000 m以上の層では雲底付近の10分の1から100分の1程度の値を示す。

高度200 mから500 m(第7図中の灰色部分)では計測不能であった。同様の特徴は、雲層が比較的明瞭であった28日第1回目観測及び29日第3回目観測でも見られており、この層内で雲粒子を吸入したことによる影響と考えている。湿度測定が行えた29日第3回目観測では、計測不能の層と相対湿度が約100%の層とが重なっており(第8図)、計測不能の状況は雲の存在の傍証としての利用ができそうである。

5. まとめと考察

本稿では、高高度試験を通して無人航空機及び気象測器の動作性能を議論し、観測実施の手順を述べた。



第8図 2005年6月29日第3回目飛行試験時の(左)相対湿度と、(右)直径0.3 μmから0.5 μmの間の粒子数濃度(個/0.47ℓ)の鉛直分布。灰色は計測不能だった層を示す。

今回の最高高度5700 mは、130 km/h(約36 m/s)の巡航速度で飛行する本無人航空機が、向かい風に抗して安定な航行が困難になった高度であった。これにより、高度の上限が、航空機の揚力による上昇性能ではなく、水平風速が上空に向かって増加する中で現れる場合があることが分かった。無人航空機観測では飛行経路を予め設定するため、向かい風を回避することは難しい。対流圏の風速を考慮すれば、強風時の観測や広範囲の観測を実現するために、目安として巡航速度が100 km/h(約30 m/s)を越え、加速性能の高い機体が有利である。巡航速度の高速化は観測時間内で飛行距離の延長につながり、加速性能の高さは離着陸時の地上風速の制約を緩和する効果も持つ。

観測機器として明星電気製の気象ゾンデとリオン製のエアロゾルカウンター(KR12)を試験した。また、航空機搭載の気温計の測定値やエアロゾルカウンター内部の気温、湿度測定値を比較した。上昇率を5~10 m/s程度とし、一定高度間隔で定高度飛行をすることにより、気温逆転層などの鉛直方向の特徴を捉えた。雲層の中でエアロゾルカウンターが測定不能になる場合があり、雲の存在を示す参考データとして利用できる可能性があることが分かった。

今回の無人航空機は、係留気球観測では不可能な風速30 m/s程度の大气層の観測を実現し、有人航空機観測より高い空間的・時間的分解能のあるデータを得た。

謝辞

紋別市役所の長谷川 恒氏、濱岡荘司氏、及び北見

工大寒冷地工学科の館山一孝氏には観測の実現に協力いただきました。コンティネンタル・テーベス社（ドイツ）の大城 浩氏には滑走路を提供していただきました。フジインバック株式会社の田辺誠治氏には今回の観測を共同で進めていただきました。ここに深く感謝いたします。この飛行試験は国立極地研究所所内プロジェクト「南極観測用自律型無人航空機 Ant-Plane の開発研究」及び「All-in-one 型無人飛行機と氷床用離着陸装置の開発研究」の助成を受けました。

参 考 文 献

- 浅沼 順, 玉川一郎, 1999 : チベットで飛ばせなかったラジコンヒコーキの話. 天気, **46**, 301-306.
- 別所康太郎, 中澤哲夫, CATT エアロゾンデ観測グループ, 2002 : 宮古島近海で台風を観測したラジコンヒコーキの話, 一運輸施設整備事業団 (CATT) によるエアロゾンデ観測実験報告一. 天気, **49**, 251-257.
- Funaki, M., 2005 : A trial of aeromagnetic survey by a small unmanned aerial vehicle at Mt. Chokai Volcano, Japan. 10 th Scientific Assembly of the International Association of Geomagnetism and Aeronomy. July, Toulouse, France.
- Funaki, M. and Ant-Plane Group, 2006 : Development of small unmanned aerial vehicles (UAV) and an onboard magnetometer for the aeromagnetic survey. International Symposium on Airborne Geophysics 2006 (ISAG2006), January, AST Tsukuba Center, Tsukuba, Japan.
- 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.
- Holland, G. J., P. J. Webster, J. A. Curry, G. Tyrell, D. Gauntlett, G. Brett, J. Becker, R. Hoag and W. Vaglianti, 2001 : The Aerosonde robotic aircraft : A new paradigm for environmental observations. Bull. Amer. Meteor. Soc., **82**, 889-901.
- Inoue, J. and J. A. Curry, 2004 : Application of Aerosondes to high-resolution observations of sea surface temperature over Barrow Canyon. Geophys. Res. Lett., **31**, L14312, doi : 10.1029/2004 GL020336.
- Watai, T., T. Machida, N. Ishizaki and G. Inoue, 2006 : A lightweight observation system for atmospheric carbon dioxide concentration using a small unmanned aerial vehicle. J. Atmos. Ocean. Tech., **23**, 700-710.
- Yamashita, K., M. Hayashi, M. Irie, K. Yamamoto, K. Saga, M. Ashida, K. Shiraishi and K. Okabe, 2005 : Amount and state of mineral particles in the upper mixed layer and the lower free troposphere over Mt. Raizan, southwestern Japan : Unmanned airplane measurements in the spring of 2003. J. Meteor. Soc. Japan, **83A**, 121-136.

Performance of the UAV and the Meteorological Instruments in the Experimental Flights for Atmospheric Observation at Monbetsu in Northeastern Hokkaido

HIRASAWA, Naohiko*, OZUKA, Keiichi**, HAYASHI, Masahiko***
and FUNAKI, Minoru*

* National Institute of Polar Research, Kaga 1-9-10, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515, Japan.

** Graduate school of Science, Fukuoka University, Nanakuma 8-19-1, Jonan-ku, Fukuoka 814-0180, Japan.

*** Faculty of Science, Fukuoka University, Nanakuma 8-19-1, Jonan-ku, Fukuoka 814-0180, Japan.

(Received 23 January 2006 ; Accepted 11 November 2008)
