

南極昭和基地での係留気球を用いた下部対流圏
エアロゾル観測の報告原 圭一郎^{1*}・長田和雄²・山内 恭³Tethered balloon operation for wintering aerosol measurements
in the lower troposphere at Syowa Station, AntarcticaKeiichiro Hara^{1*}, Kazuo Osada² and Takashi Yamanouchi³

(2006年7月31日受付; 2006年10月27日受理)

Abstract: The 46th Japanese Antarctic Research Expedition (JARE-46) carried out twenty seven tethered-balloon-borne aerosol measurements at Syowa Station for better understanding of aerosol chemical and physical properties in the lower troposphere from 6th January 2005 until 11 December 2005. This report summarizes the plan, preparation, field activities and some troubles/problems in the tethered-balloon observations.

要旨: 第46次南極地域観測隊は、上空の大気エアロゾルの性状と数濃度の季節を捉えるため、昭和基地において2005年1月6日から12月11日かけて、27回の係留気球によるエアロゾル観測を実施した。この観測は、第VI期5カ年計画のプロジェクト研究観測で行われている「エアロゾル集中観測」の一環として実施された。ここでは、通年で係留気球観測を実施するための計画や準備、実際の観測状況、問題点について報告する。

1. はじめに

南極・昭和基地において、国立極地研究所、福岡大学、名古屋大学を中心として、南極大気エアロゾルの重点観測を第44-47次南極地域観測隊で実施している。南極大気エアロゾル観測は、日本の観測隊に限らず極域での過酷な作業環境と設備の制約から、大陸沿岸域で、かつ地上での観測に集中している。しかし、低温時には接地逆転層が発達するため、地上付近と逆転層の上空が同じ大気質である保証はない。そのため、南極での物質循環・長距離輸

¹ 福岡大学理学部地球圏科学科. Department of Earth System Science, Faculty of Science, Fukuoka University, 8-19-1, Nanakuma, Jonan-ku, Fukuoka 814-0180.

² 名古屋大学大学院環境学研究所. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Furocho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601.

³ 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.

* Corresponding author. E-mail: harakei@fukuoka-u.ac.jp

送過程について理解するためには、上空でのエアロゾル観測が必要であり、地上観測と比較することが必須となる。また、新粒子生成や大気中での不均一反応過程では、地上と上空では粒子数濃度（粒子表面積）や粒子を取り巻く相対湿度といった条件が大きく異なるため、地上での連続観測に加え上空の大気エアロゾル観測も並行し進めることが、南極大気中のエアロゾルの性状、物質循環、輸送過程を知る上では非常に重要となる。第46次越冬隊では、上空のエアロゾル粒子の組成・性状や数濃度・粒径分布の季節変化を捉えるために、昭和基地において係留気球を用いた大気エアロゾル観測を実施した。

上空の大気をその場で観測する手法としては、航空機、気球、係留気球などの飛翔体の活用がある。航空機による観測は重量のある測器での計測や高高度まで上昇して観測することが可能である。その反面、パイロット・整備士の常駐や機体保守・燃料準備・滑走路保守などの設営面で大きな規模の観測計画となるだけでなく、滑走路となる海氷の状態によっては、気象条件は良くても観測を実施できない状況になることもあり得る。また、飛行時の巡航速度が速いため、大気を機内に導入する際に、大気取り込み口や配管中での粒子損失や変質が起きることも考慮しなければならない。日本の観測隊では、航空機によるエアロゾル観測以外にも気球を用いたエアロゾル観測も昭和基地やドームふじ基地で行ってきている（林, 2001, 原, 2003）。この観測は、気球観測用に設計された OPC (optical particle counter) を使用するエアロゾルゾンデと気象ゾンデを気球により上空へ放球して観測を実施するため、上空に存在する大気エアロゾル粒子の数濃度・粒径分布を観測することが可能となる。しかし、気球と測器の回収は困難であるため、組成分析用試料採取を目的とする観測には適さない。今回、第46次隊で行った係留気球を用いたエアロゾル観測では、観測を行える高度は気球を係留するためのウインチラインの長さで制約されてしまうが、その制約範囲内であれば航空機観測で問題となるエアロゾル粒子の損失や変質の影響はほとんど無視ができ、組成分析用のエアロゾル粒子試料の回収も容易に行える。3-4 kg の観測測器を吊り下げ、係留用のライン重量分の浮力を得るためには大き目の気球を使用する必要がある。観測時に現場での作業支援者が数名必要となるものの、航空機運用と比べると全体の設営作業としてはかなり少なくなることが大きな利点である。

第46次隊では係留気球を用いた下部対流圏エアロゾルの越冬観測を、2005年1月6日～12月11日の間に27回実施することに成功した。本稿では、観測結果から国内での準備、機材や観測体勢などの詳細を報告する。

2. 観測計画と国内での準備

2.1. 観測計画の検討

係留気球観測のために準備した観測機材を表1にまとめる。エアロゾル観測に使用する CPC (condensation particle counter) と OPC の重量と気球係留に使用するラインの重量を考

表 1 係留気球観測に準備した主な機材・物品

Table 1. List of instruments and other equipment used in tethered-balloon operation.

機材名	型番	メーカー	備考
係留気球観測用気球	TTB-329	バイサラ	9 m ³ 仕様
電動ウインチ	TTW-111	バイサラ	
係留気球用ウインチライン	TTL-324	バイサラ	
	(240 # 3 km)		
係留気球用気象ゾンデ	TTS-111	Vaisala	定期的にセンサーを交換
ゾンデ用受信機	SPS-220T	Vaisala	
ゾンデ受信用アンテナ		Vaisala	
受信データ収録用 PC	Latitude	Dell	Windows2000 英語版
可搬型凝縮粒子計測装置 (CPC)	CPC-3007	TSI	10 nm 以上の粒子総個数濃度を計測
可搬型光学式粒子計測装置 (OPC)	KR-12	RION	0.3 μm 以上の粒子数濃度を 6 ch に分けて計測
係留気球用 2 段式インパクター	特注品	ARIOS	上空のエアロゾル粒子サンプリングに使用
インパクターコマンド受信機	特注品	スカイリモート	
インパクター制御用プロボ	NET J120HS (72 MHz)	JR	
ガソリン発動発電機	EF2500i	YAMAHA	インバーター付
無停電電源装置	Smart-UPS 700	APS	電源の安定器として使用 (夏季のみ)
コードリール		—	ケーブルは布被服コードに変更
He ガスカードル	特注品	鈴木商館	11 基 (ボンベ 88 本分)
He ボンベ用減圧弁	JET-S306	日酸 TANAKA	
Li 電池	単三型	富士フィルム	CPC、インパクター、ゾンデ外部バッテリーとして使用
Li 電池	9V 角型	Sonnenshine	ゾンデ内部バッテリーとして使用
電気毛布	—	National	電動ウインチ保温用
使い捨てカイロ	大・小		測器保温用に使用
ゴム気球	TA30 (赤・白)	トーテックス	上空の風見用パイロットバルーンとして使用

慮し、今回の観測では、最大で 5-6 kg の浮力の得られる気球 (TTB-329: 9 m³, Vaisala Inc.) を選択した。係留気球に使用する気球は、放球観測によく使用されるゴム気球と比べると大分高価となるが、飛行船型の形態のため、風に対する安定性は非常に良く、振動に弱いエアロゾル観測測器を係留するには好都合である。また、ゴム気球では強風時や複数回使用時には素材のゴム膜が伸びてしまい気球破断の危険性も伴うが、複数回使用でも十分な耐久性のあるポリウレタンフィルム製であったことも重要な点である。TTB-329 気球は、直径 2.3 m、長さ 5.2 m のため、地上平均風速が 5 m/s を越すような状態では、気球の取り回しが困難になり、地面や周辺への衝突や気球の損傷事故の危険も考えなければならない。エアロゾル観測をする上では、濃い雲が低い高度まで覆っているような状況も観測に支障をきたすことも

あるが、係留気球観測を行う上でまず重要な気象要素は、気球飛揚の可否に関わる地上付近での風速となる。

通年観測の計画を立てる上では、目標回数に応じて準備する物資量も大きく変動するため（例えば、He ボンベなど）、観測回数の見込みは重要な項目である。1年を通じて観測可能性のある気象条件の頻度を検討するため、昭和基地で観測された過去の気象データから平均風速の頻度を調べた（図1）。各年のばらつき（標準偏差）を考慮しても、観測に適していると判断される平均風速が3m/s以下になる日が1カ月に数日はあることが期待された。観測作業に若干の困難が予想されるものの、何とか観測することができると思われる条件である平均風速が5m/s以下の日まで含めると7-10日程度となった。実際の天候（晴天か曇天か）や上空の風の状態、観測作業支援者、車両使用の調整も考えると、すべての条件で観測を実施できる訳ではないため、2005年1月~12月の間に月1-3回程度の頻度で観測を行うことを目標とした。

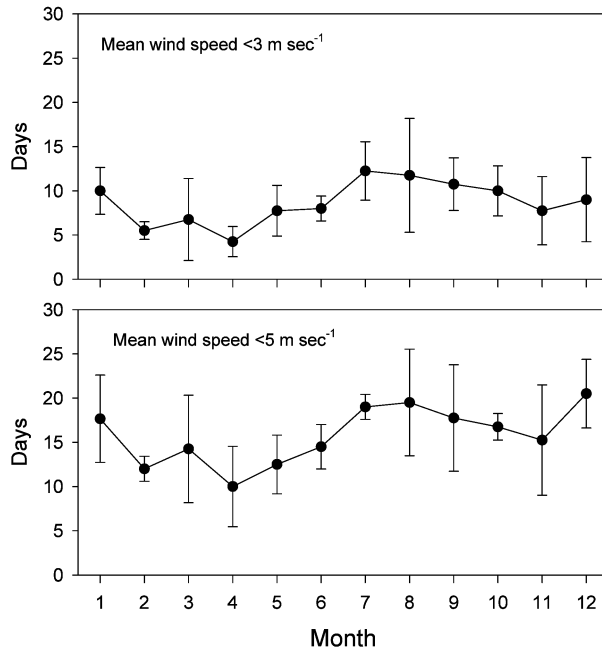


図1 過去（1994-2004）の気象データから得られた月別の各平均風速の頻度（日数）
 Fig. 1. Frequency (in days of occurrence) of each mean wind speed at Syowa Station in every month during 1994-2004 (from "Antarctic meteorological data obtained through the Japanese Antarctic Research Expedition"). Error bars indicate standard deviations.

2.2. 観測場所の選定

係留気球観測を行う際には気球とウインチの間にラインが存在するため、観測場所として

は昭和基地内あるいは基地付近で周囲の障害物が少なく開けた所が望ましい。また、エアロゾル観測の観点からは、基地の発電棟や主要部からの排気の影響が少ない場所（卓越風向の風下側ではない場所）であることも重要となる。さらに、今回の観測ではエアロゾルの季節変化を捉えることが観測目的の中心でもあるため、通年で観測を実施でき、観測人員・機材輸送の面でも利便の良い場所であることも前提となる。以上の条件を考慮した上で、昭和基地内のCヘリポートを第一候補地とした。また、風向によってはCヘリポート以外の場所も検討し、特に越冬中間期間中の観測候補地としては、海氷上やAヘリポートも考えていた。しかし、1年を通じてCヘリポートで実施したが、大きな支障はなかった。

2.3. 観測機材の準備と対策

ここで、係留気球に関する重要な機器（気球・ウインチ）や観測測器、気球観測に不可欠なHeガスボンベやその他予備品についてまとめる。予備品として用意した機材・物品を表2にまとめる。

係留用気球として、TTB-329気球を二つ用意したが、ガス充填時や取り回し時の接触・衝突事故による気球の破損、上空の風が強い時には気球の破損やライン破断が起きる可能性も想定し、念を入れてゴム気球（TA1500及びTA2000、トーテックス社製）も多めに準備した。国内で道具を準備している段階では、気球の保管方法がはっきりしなかったこともあり、観測ごとに気球へのHeガス充填とガス抜きを行うことを前提として、目標観測回数分（月1-3回の頻度:12カ月分）のHeガスを準備した。気球のサイズは9m³となっていたが、国内での訓練では2本弱のHeを消費する状態であり、輸送・野外保管中のHeリークの可能性も

表2 係留気球観測に準備した主な予備品

Table 2. List of spare instruments and equipment used in tethered balloon operation.

予備品として準備した物品	型番	メーカー	備考
係留気球用気球	TTB-329	Vaisala	
係留用ライン	TTL-324 (240# 3 km)	Vaisala	使用ラインが切れた時の予備
係留用ライン	TTL-224 (240# 2 km)	Vaisala	使用ラインが切れた時の予備
係留用ライン	TTL-236 (360# 2 km)	Vaisala	使用ラインが切れた時の予備
可搬型凝縮粒子計測装置	CPC-3007	TSI	第45次隊より予備機として引継ぎ
可搬型光学式粒子計測装置	KR-12	RION	第45次隊より予備機として引継ぎ
ゴム気球	TA1500、 TA2000	トーテックス	係留気球用気球予備品として
レーウィンゾンデ	RS80-15H	バイサラ	係留用受信機が故障した時のための代替センサー
ゾンデ受信機	デジコラ2	バイサラ	係留用受信機が故障した時のための受信機

あるので、カードル11基分(88本)のHeボンベを昭和基地に持ち込んだ。Heカードルは氷上輸送にてCヘリポートに搬入した。Heカードル1基は、ウインチ固定用の台としてCヘリポート中央部に設置し、残りのカードル10基は、第2廃棄物保管庫入口横へ移動させた。

通年で観測を成功させる上では、束の間の好天を狙って気球の飛揚と撤収をできる環境も重要となる。TTB-329気球は直径2.3m、長さ5.3mと大きいため、気球観測で最も事故(気球へ損傷やそれに伴うガス漏れなど)が起こりやすいガス充填やガス抜きを観測ごとに行うのは可能な限り避けたい。言い換えれば、気球にガス充填をした状態で保管し、観測直前に気球を持ち出し、直ちに観測を行えるようにすることが、通年観測の成功につながる。最終的に第46次隊では、環境保全隊員の協力と調整により、第2廃棄物保管庫の一面を気球保管用の場所として使用でき、観測を行う上では非常に好都合だった(詳細は4.1節参照)。

今回使用した係留気球観測用の電動ウインチ(TTW-111, Vaisala Inc.)の動作保証温度は、0°C以上のため、越冬期間中に使用するには、ウインチの保温・暖気が必要となる。-10°C未満であれば保温対応をしなくても、ウインチは正常に稼動するようだったが、保温処置を取った方が稼動部は順調に動作していた。ウインチの保温には、内側から電気毛布2枚、毛布2枚、発泡スチロールの順でウインチを覆い、ラッシングベルトで固定するようにした(図2)。ウインチ自身の固定については、下記(第3節)に詳細を述べる。

エアロゾル観測用の測器には気象要素に関する精度の高いセンサーは搭載されていない。高度情報や気象データを得るために、気象観測用のゾンデを併用した。係留気球観測では、



図2 電動ウインチの保温(第46次隊長谷川隊員撮影)。ウインチ右側にはリモコンを出すため、小さめの発泡スチロール材にしてある。

Fig. 2. Warming of the electric winch during operation (photo by Y. Hasegawa, JARE-46).

安全に観測作業を行うためには上空の風速データをリアルタイムに得ることが必要のため、風向風速データの得られる係留気球用の気象ゾンデ (TTS-111, Vaisala Inc.) を用いることにした。また、TTS-111 の発信形式と対応している受信機 (SPS-220T, Vaisala Inc.) も準備した。

エアロゾル観測では、CPC (CPC-3007, TSI) で 10 nm より大きな粒子総個数濃度を、OPC (KR-12, RION) で $0.3\mu\text{m}$ より大きな粒子個数濃度を 6 チャンネルで計測し、粒径分布を得るようにした。データ記録間隔は、高度分解能を上げるため、CPC では 1 秒間隔、OPC では約 25 秒間隔 (1 吸引時間に相当) にした。また、上空で化学分析用試料を直接採集するためのエアロゾルサンプラー (2 段式インパクター) は、大気球観測用に設計された 2 段式インパクター (Okada *et al.*, 1997) を基にしているが、タイマー制御部分を取り除いた。インパクターの制御は、Yamashita *et al.* (2005) と同様に、ラジコンで使用するプロボより信号を送る方式にし、コマンド受信機 (インパクターへのインターフェース) は特注した。また、インパクターのノズル径を対流圏下層向きに変更した仕様にした。CPC-3007 と 2 段式インパクターは単三乾電池で作動させられるため、低温下でも性能が比較的落ちにくい単三リチウム電池を使用するようにした。一方、KR-12 は内蔵の Ni 水素充電電池を使用しており、低温下での動作不良をさけるため、各測器とも発泡スチロール材で作成した保温箱に入れるようにした。外気温が約 -10°C 以下になる場合には測器自身の熱で保温することができず、測器の保温には市販の使い捨てカイロを保温箱に入れることで対処した。

2.4. 観測時間の見積もり

係留気球観測で使用するエアロゾル観測測器 (CPC-3007, KR-12, 2 段式インパクター) は、いずれも携帯可能な小型の計測器ではあるものの、測器全体とウインチラインの重量と気球の浮力を考えると、一度の飛揚ですべての観測を行うことはできない。そのため、粒子

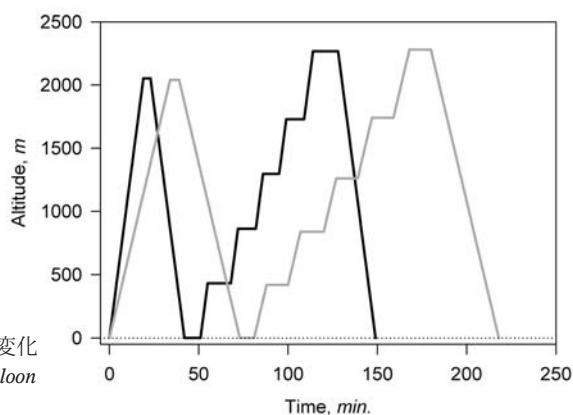


図 3 仮想した係留気球高度の時間変化
Fig. 3. Simulated variation of tethered-balloon height.

数濃度計測の飛揚とエアロゾルサンプリングの飛揚の2回の飛揚に分けて観測を実施した。全体の作業時間を見積もるために、図3に仮想した気球高度変化を示す。到達高度を約2000 m、気球の上昇速度を60 m/minとし、5高度でエアロゾルサンプリングを行うと仮定すると、2回の気球飛揚時間だけで3時間40分程度となった。ウインチ最速のライン送り出し速度(108 m/min)で動作させた時には、2時間半程度となる。ウインチを最高速度で動かすと

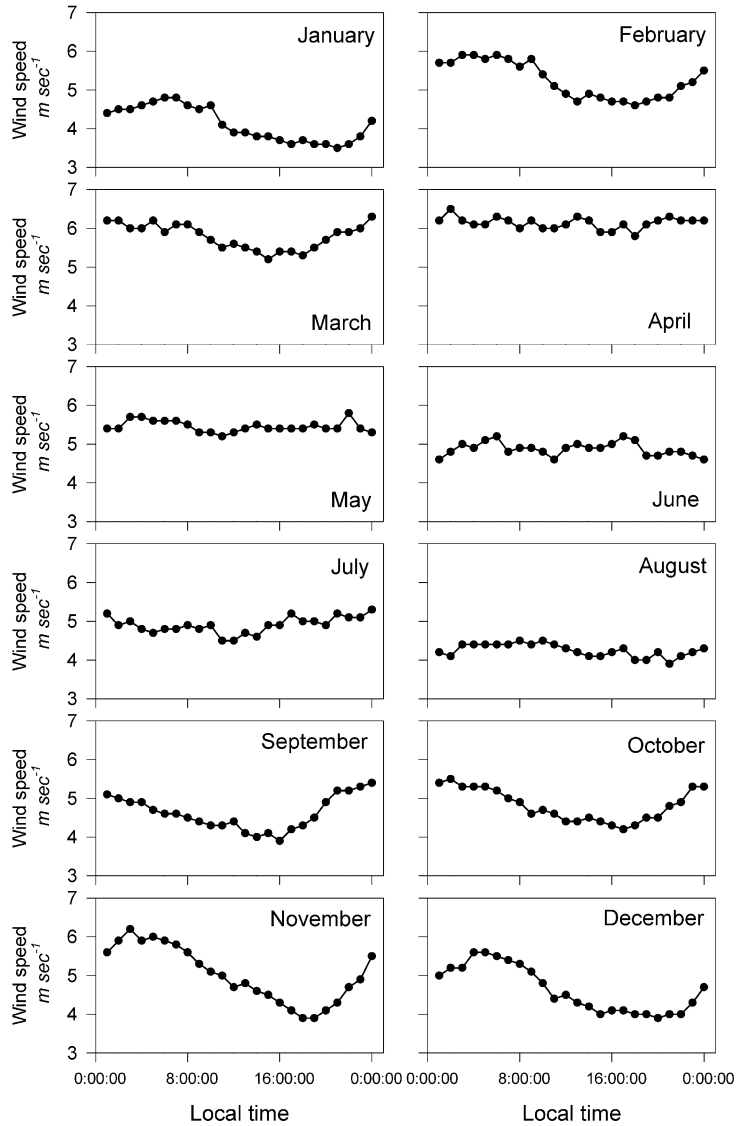


図4 過去(1994-2004)の気象データから得られた地上平均風速の日変化
 Fig. 4. Diurnal variation of wind speed on surface at Syowa Station during 1994-2004 (from "Antarctic meteorological data obtained through the Japanese Antarctic Research Expedition").

気球の上昇速度が上がり、エアロゾル観測の高度分解能が落ちてしまう。そのため、気球上昇速度は60–80 m/minとし、2度の気球飛揚所要時間は3時間~3時間半を目安とした。

2.5. 観測時間帯の目安

図4に過去の気象データより求めた各月の地上平均風速の日変化を示す。平均風速の日変化を見ると、夜~午前中にはカタバ風の影響のため風が強く、午後に風が弱くなる月が多い。特に、日射のある月には、午後の風の弱まりが顕著に見られ、極夜期には日変化がはっきりしない。午後に観測を行えるか否かは、その都度気象場（天気図）を見て判断しなければならないが、朝方に風が強くても、午後に観測を行える状況になることが多いと予想できる。上記（2.4節）の観測所要時間の目安では飛揚に3時間半程度必要なため、前後の準備と片付けまで含めると4時間半近くかかると考えられる。現実的には、食事などの基地内生活時間との調整も取りやすくするため、気象条件の面で選べる状況であれば、飛揚は可能な限り午後にする方向とした。ただし、極夜期や極夜に近い状態では風速の目立った日変化はなく、作業できる程度に明るくなる時間もわずかなため、午後ではなく午前中から観測を始めるようにした。

2.6. 国内での事前訓練

準備した係留用気球、ウインチ、ゾンデ、受信機のすべては観測者・観測協力者にとって使用したことのない機材だったため、出発する前に気球飛揚の訓練をする必要があった。気象庁南極観測事務室とつくば市にある高層気象台の協力により、高層気象台（つくば）の敷地内で飛揚訓練を2004年10月7日に実施した。越冬中の係留気球観測支援を依頼した気象部門隊員と気水圏隊員にも訓練に参加してもらった。日本国内での気球飛揚に関しては、航空管制にかかる煩雑な申請があるが、国内での事前訓練では、最高到達高度まで飛揚させるのが目的ではなく、機器の設置から気球へのHeガス充填、器材の浮揚、データ取得、気球の収納、機器の撤収までの観測に関わる一連の作業を確認することが目的だったため、簡易な申請で済む50 m以下の飛揚に留めた。

3. 昭和基地での係留気球観測に向けた調整と安全対策と実際の観測状況

昭和基地で係留気球観測の実施に向けて留意した点と、想定した事故発生時の対処方法は次の点である。

1) 観測日の設定: 下層雲の状態や地上や上空での風の状態と観測可否

気象隊員に天候の変化を確認することに加え、Antarctic MM5 Mesoscale Prediction System (<http://www.mmm.ucar.edu/rt/mm5/amps/>)などで天気の変化傾向を数日前から確認するようにした。越冬交代前の2005年1月に関しては、45次隊の気水圏隊員・気象隊員と調整

の結果、第45次気水圏隊員と気象隊員の間で天気の変化を確認し、45次気水圏隊員から翌日に係留気球観測が実施できそうな状況の時にミーティング前に夏期隊員宿舎に連絡をもらうようにした。上空の風の状態については、MM5モデルの数値計算値だけではなく、1日2回の定常ゾンデ観測データも参考にしたこともあった。

MM5の予想精度は、おおまかな天候変化の傾向を見るには十分だったこともあり、観測日や野外行動の見込みを立てる上では非常に有効だった。天候が回復傾向の時には、事前に機材の調整を行って準備を整え、前日~直前に気象隊員と天候の変化傾向やゾンデデータを確認し、観測の可否を決定した。地上の風が観測に適した状態ではあっても、上空1000m未満の高度で風速が10m/sを超えていたため、観測を行わなかった日や、予想に反して地上風が弱まらず、測器を運び出す直前で観測を中止したこともあった。

2) 気球飛揚中の強風対策: 気球のメーカー保証耐風速は15m/sのため、強風時には気球の破損、測器落下、ウインチライン切断の可能性がある。

昭和基地で確認できる上空の風速データは、定常気象ゾンデ観測による1日2回(0230LT, 1430LT頃放球)となる。係留気球の飛揚までに数時間以上経過していることが多く、気象場が大きく変化していることもある。そのため、係留気球観測直前に上空の風速を目視で捉えるため、風見用のパイロットバルーン(TA30)を放球し、強風の層の有無を確認することにした。強風の層は気球の流れ具合で判断し、パイロットバルーン放球からの経時時間で大まかな高度を推定した。パイロットバルーン用に、白・赤の二色のゴム気球(TA30)を準備したが、絹雲が出ていたり、日が大きく傾いていたりする状況での観測が多かったため、目視で追跡する上では赤色ゴム気球の方が有用であった。

係留気球飛揚中には、係留気球ゾンデデータ取り込みプログラムにある風速アラームを利用し、風速が10m/s以上になった時にPCよりアラームが鳴る様に設定した。観測中に風速が10m/sを超えた時には一時的にウインチ動作を止め、上空の風速を確認するようにした。上空の風速が10m/sを超えていることが確かな時には、上昇は断念し、風速警告の出ない10m/s以下の高度までの観測に留めた。また、全層で風が強くなってきた場合や地上の風が強くなってきた時には、直ちに観測を中止し気球回収処置をとることにした。

地上での風速が係留気球観測に適した条件ではあっても、上空の風速が10m/sを越すことが数回あった。上空の風の強さは、ラインや気球の流れ具合である程度は予想がつくが、気球の高度が高くなると風速の違いがわかりにくい。また、極夜期や日が非常に傾いた条件下では、上空のラインや気球が見え難くなるため、気象ゾンデより送られてくる風速データが安全に観測を進める上で非常に重要な要素となった。

3) ウインチの固定(横転対策): 上空が強風の時にラインの張力によりウインチが横転やラインの切断が予想される。

Cヘリポート中央部にHeカードルを1基設置し、その上に角材を2本渡してその上にウ

インチを設置した。また、ウインチはラッシングベルトを用いてHeカードルに固定した。Heカードルの上にウインチを置いたためにウインチ位置が高くなり、観測測器の入れ替え作業が若干やりにくくなったが、ウインチ固定の面から見れば全く問題はなかった。また、ウインチの位置を高めにしたことが、上空の風が強くラインが水平方向に流れるような時にも観測作業者がラインを引っ掛ける、あるいはラインを切ってしまうような事故の防止に役立った。

4) 観測中の電動ウインチ動作不良や故障: 暖気・ライン巻取り・気球の回収

観測中に電動ウインチが故障して電気駆動できなくなった際には、付属の手動ハンドルを用いてウインチドラムを回し、ラインの回収に努める。万が一、手動での稼働もできない時には、ライン切断処置も念頭に入れた。

2.3節に示したように電動ウインチに保温処置を取っていたが、低温下では、静電気のためかウインチを制御するためのリモコンからのコマンドが認識されなくなることや、リモコンが指示通りの運転をしなくなるといった誤動作が時々確認された。幸いにもウインチ本体の電源を入れなおすことで動作が正常に復帰したため、大きな問題には至らなかった。第46次隊越冬中には、電動ウインチ本体の重大な動作不良・不具合は確認されなかったため、手動ハンドルによるライン回収は行わなかった。

5) 夏作業中のヘリコプター運行との調整: 観測日の調整と連絡体制

1月には人員・物資空輸のため、「しらせ」と昭和基地（Aヘリポート）の間でヘリコプターが頻繁に飛行する。さらに第46次隊夏オペレーション期間（2005年1月）には、観測隊用の小型ヘリコプターも昭和基地（Bヘリポート）と大陸沿岸露岩域の間で飛行しており、昭和基地内で飛行体を用いた観測を行うためには、観測隊内だけではなく、ヘリコプター飛行関係者へ事前に連絡をして周知することが不可欠となる。観測前日のミーティング時に観測待機と決定した際には、第46次隊長に連絡し、「しらせ」と第45・46次隊内に連絡する体制をとった。さらに、観測中には、昭和基地通信室につめた第46次通信隊員を介して、気球飛揚開始と観測終了の情報をヘリコプターパイロットや「しらせ」に連絡するようにした。また、観測中に状況確認の連絡があれば、直ちに通信室経由で観測状況について回答するようにした。

2005年1月の係留気球観測は比較的天候に恵まれ、ヘリコプター運行のない日や予定された飛行数が少ない時に実施するように調整することができた。安全な観測・ヘリコプター飛行の両面を考慮すると、なるべく飛行数が少ない時に実施するのが適当だった。また、ヘリコプターからの排気の影響もなくなる（あるいは激減する）ため、得られるデータの質を保つ上でも非常に都合が良かった。

6) ラインマーカーの設置: パイロットへのウインチライン位置の周知

係留気球に使用するラインは白色で極めて細いため、目印をつけずに気球を飛揚させたの

では、ウインチラインの位置を認知することは地上で作業をしていても困難となることがある。5) の連絡体制に加え、五者連絡会やしらせ往路での事前の調整により、ヘリコプター運行のある期間（1月～2月上旬）にはウインチラインに目印となる旗（ラインマーカー）をつけることにした。ウインチラインに直接マーカーを取り付けることになるため、ウインチラインの破断や切断を防ぐためには、突起物のない物を選び、摩擦が少ない止め方にしなければならなかった。また、気球による浮力が限られているため、軽量なマーカーにすることも重要となる。ラインマーカーに使用する旗は50cm四方程度の赤色ビニールシートを使用し、その一辺にプラスチック板を貼り付け、上下2箇所結び用の紐を通す穴を開けた。ラインへのマーカーの取り付けは、簡便に作業ができ、ラインに負荷をかけにくいように、紐で結ぶ方式にした（図5）。取り付けのマーカーの数やその間隔は、飛行長・観測隊ヘリパイロットと打ち合わせをし、最高高度に気球が達した状態で、図6になるようにマーカーを設置することにした。

ヘリコプター飛行の可能性のある1月～2月上旬の係留気球観測は、上記のようにヘリコプター飛行予定のない日や1-2フライトのみの時に実施することができた。ヘリコプターの飛行予定がない時の係留気球観測時にも、緊急にヘリコプターの飛行が組まれる可能性も考

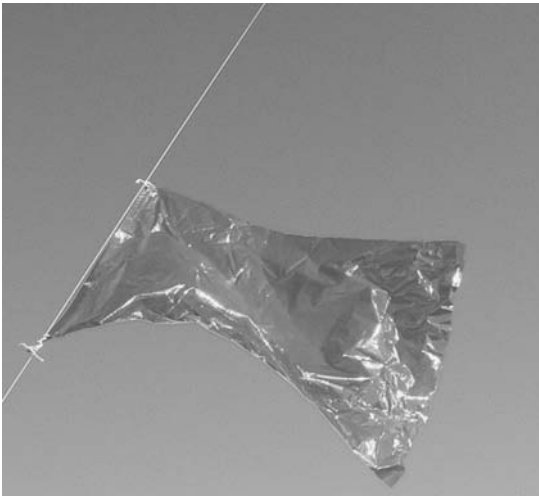


図5 ウインチラインに取り付けたラインマーカー
(第46次隊佐藤隊員撮影)

Fig. 5. Line maker attached to winch line
(photo by T. Sato, JARE-46).

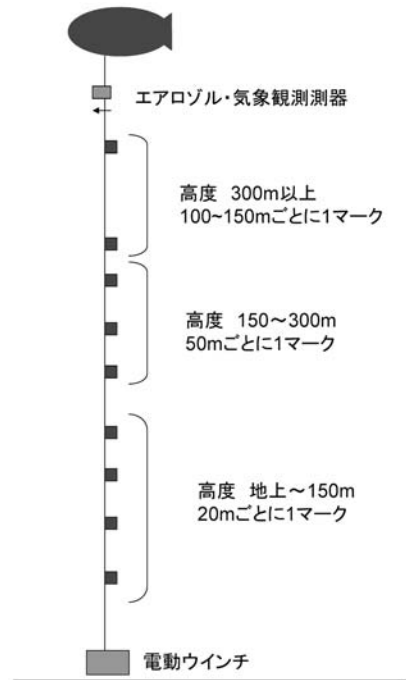


図6 ラインマーカーの設置頻度

Fig. 6. Position of line marker in the winch line.

えられるため、安全対策の一環として、ラインマーカーを設置するようにした。地上では、ラインマーカーの位置ははっきりと見えていたが、飛行していたパイロットに後で確認した所、視認しにくかった様だった。今後、同様の観測を行う際には、より目立つ素材のマーカーの使用やヘリ運行との調整と確認は必要となろう。また、係留気球観測中にヘリコプター飛行があった時に、パイロットから気球の位置（ラインの流れている方向）の確認要請があり、通信室経由でパイロットへ連絡したこともあった。

4. 実際の係留気球作業概況

4.1. 係留気球観測計画・作業の詳細

ここでは、上記の各安全対策以外に観測中に行ったことや起きたことの詳細をまとめて紹介する。

4.1.1. 測器動作の調整と確認

1-2月上旬の観測では、日中の地上気温が0°C以上であるため、観測作業場所であるCヘリポートに係留用気象ゾンデ受信機（SPS-220T）、アンテナ、気象データ収録用PCを設置して、作業現場で動作や気象データを確認した。また、発電機と受信機・PCの間に無停電電源装置を入れ、安定した電力を得るようにした。日中の気温が0°C以下に下がり始める2月中旬以降には、受信用アンテナを気象棟屋上に、受信機、PCを気象棟内に設置させてもらうように調整した。ゾンデの送信周波数は400.0-406.0MHz（出力：~17mW）の範囲で微調整できるため、運用に当たっては、使用周波数が近接するGPSゾンデ（気象部門）と調整した周波数帯で総務省に申請を行った。昭和基地での運用時には、GPSゾンデと係留気象ゾンデの間に干渉による不具合が出ないことを実際に電波を発信して確認した。越冬中の観測時にはゾンデデータの確認をする隊員を気象棟に1名常駐させ、ゾンデデータの受信状況を確認し、無線（UHF）を使用して気象棟とCヘリポート間の連絡を取るようにした。気象棟に受信機を設置している期間の観測ではCヘリポートと気象棟間の無線通信の頻度が高くなるため、観測前に通信隊員と使用するチャンネルを必ず確認するようにした。

係留気球用気象ゾンデに使用する内蔵電池は、9V角型乾電池仕様になっている。寒冷地で使用すること、数時間のデータ送信を行えるだけの容量を有する電池であることが条件のため、9V角型リチウム電池を使用することにした。しかしながら、国内ではリチウム9V電池は生産されてはおらず、9Vリチウム角電池を輸入して購入しなければならなかった。今回の係留気球観測に準備した乾電池はドイツ製の電池（Sonnenschein社製）を使用した。10個当たり1-2個ほど使用開始直後の電圧が低い（8V以下）、あるいは室内動作試験中に電圧が下がってしまう不良電池が見受けられた。気象部門でも他メーカー（アメリカ製）の9Vリチウム乾電池を試用していたが、同様の症状が確認されており、9Vリチウム乾電池を使用する際には、予定数より多めに購入することが重要である。また、観測前に出力電圧の確

認をすることが重要な点検項目だった。幸いにも今回用いた係留気球用気象ゾンデ (TTS-111) には、内蔵の 9V 角型乾電池に加え、外付けの乾電池ケース (単三乾電池 6 本を使用) も併用できる仕様となっていたため、観測を行う際には外付けの乾電池パック (単三リチウム電池) も併用した。

2.3 節で示したように観測中は電動ウインチを 2 枚の電気毛布などで保温しているとはいえ、保管時に外気温と同程度の気温下で保管してしまうと、電動ウインチ稼動部やウインチラインのグリースが固まってしまう、正常に動作しなくなることもあるので、空調の入っている環境に保管するようにし、観測直前に他の観測測器と共に C ヘリポートへ運んだ。室内保管をし、保温処置を施していれば、 -30°C を下回る環境でも電動ウインチを稼動させることができた。 -34°C 以下になると、観測開始頃には電動ウインチは滑らかに稼動していたが、時間が経つにつれ、ウインチライン送り出し速度を下げた時の動きがやや堅くなっていた。特に、2 回目の飛揚では、上空でサンプリングをする度にウインチ動作を止める必要があったため、ウインチモーター再始動の時の動作が堅くなる症状が顕著に見られた。 -35°C 以下で電動ウインチを使用する際には、より断熱性の高い素材でウインチを保護し、より強いかつ安全な熱源をウインチ暖気に使用することも検討することが必要であろう。

4.1.2. 測器の係留方法

エアロゾルや気象観測の測器を係留する際には、気球本体からほこりや霜が落下してくる可能性があるため、可能な限り気球と離すことが重要となる。特に今回は、2 度の飛揚に分けており、寒冷下での作業となるため、測器の入れ替えが比較的簡便な方法でかつ測器が落下しないように確実に固定できるように工夫することが迅速な作業を行う上でも必要である。ウインチラインは非常に細いため、エアロゾル観測測器を直接ウインチラインに係留することはできない。今回は、エアロゾル観測測器と気球の距離を離し、観測測器を係留できるようにするために、気球とウインチラインの間に、登山用の 4 mm ザイル (長さ: 30 m) と測器固定部の留め具としてカラビナ状フックを上下につけた登山用 4 mm ザイル (長さ: 1.5 m) を入れた (図 7)。測器を入れた発泡スチロール箱は、同じく 4 mm ザイルを使用してウインチラインと 30 m ザイルの間にいれた 1.5 m ザイルの上下端にエアロゾル観測測器を吊り下げ、測器の入れてある発泡スチロール箱にはラインの張力が直接かからないようにした。係留気球用気象ゾンデ (TTS-111) については、ウインチラインに直接固定できる仕様となっているため、エアロゾル観測測器の約 2 m 下付近に固定するようにした。

4.1.3. 観測現場での作業

観測候補地とした C ヘリポート周辺では基地主要部から電気が供給されていないため、発電機を用意する必要があった。係留気球観測で最も電気を消費する機器は電動ウインチ (100 V 最大 10 A) であり、夏季には現地でコンピューターやゾンデ信号受信機なども使用することがあったため、1500-2000 W 程度の出力でインバーター付発電機を選ぶことにした。低温

下ではディーゼル発電機が作業に適しているが、寸法が大きく重くなってしまうこともあり、小型でも高出力の得られるガソリンの発動発電機(2500VA)を使用することにした。ガソリンエンジンは、寒冷地用のエンジンオイルを使用したとはいえ寒冷下での動作には不安があったため、2月下旬以降から室内に保管をするようにし、基地主要部からCヘリポートに輸送する間もエンジンを稼働させて運ぶようにした。上空の風が強い時に電動ウインチのライン巻き取り用内蔵モーターに負荷がかかり過ぎたために、ウインチ側でインターロックがかかり、強制的にウインチ電源が落ちることはあったものの、発電機の出力については観測中大きな支障はなかった。今回準備したガソリン発電機は出力上申し分なかったが、下記(4.2.1項)に示すような不具合が越冬中に発生した。

観測に使う気球は最初の観測時(2005年1月6日)にCヘリポート上でHeガス充填を行った。前述(2.3節)した様に、環境保全部門を中心に調整をし、第2廃棄物保管庫の一画にガス充填をした状態で保管するように調整した(図8)。保管中は浮力以上の重量にしたポリタンクを気球下部にぶら下げ、気球が天井にぶつかからないように固定した。また、ポリタンクによる固定だけでは気球後部側が浮き気味になり、また隙間風で気球が揺れることもあるため、尾翼部のポールを固定するための穴の開いている部分に紐を通して気球を保持する



図7 エアロゾル・気象観測測器の係留方法(第45次隊長田隊員撮影)

Fig. 7. Suspended aerosol instruments and tether-sonde (photo by K. Osada, JARE-45).

ようにした。気球内の He ガスは保管中に徐々に抜けていくため、観測直前に He ガスを追加充填した。パイロットバルーンで上空の風の状態を確かめた後に、第2廃棄物保管庫から気球を出し、Cヘリポートまで運び出すようにした。TTB-329気球の搬出・搬入時には、前方、中央下（ポリタンク部）、後部の3箇所を3人で保持し、もう一人が保管庫外で気球の壁や天井への接触を避けるための誘導を行うようにした。気球をCヘリポートに移動させる際には、3人で保持するよりも5mほど揚げておいた方が安全に取り回しがしやすいこともあり、ウインチラインと気球の間にある4mmザイル（30m）を5mほど送り出して、飛揚させた状態で第2廃棄物保管庫からCヘリポートに移動させた。気球保持者の転倒による気球放球事故を防ぐため、気球をつないでいるザイルは最低2名で保持するように心がけた（図9）。気球をCヘリポートに運んだ後直ちにザイルを伸ばし、電動ウインチのフックに固定し、30mの高さに気球を浮かせた状態にし、観測測器（気象ゾンデ・CPC・OPC）の準備に取り掛かった。

観測終了後は、エアロゾル観測測器を取り外し、直ちに動作状況確認をした後に電源を止めた。測器の取り外し確認の後、気球を再び第2廃棄物保管庫に移動させ保管の処置を取った。移動や保管の方法は、上記の通りである。

4.1.4. 係留気球飛揚状況

実際に2005年3月14日に昭和基地観測で観測を行った時の気球飛揚高度変化を図10に示す。3月14日は、越冬期間中最高の高度2488mに到達した観測時の例である。1回目の飛揚は粒子数濃度観測のため気球は上昇・下降をするのみだが、2度目の飛揚では5高度でエアロゾルサンプルを直接採集するため、ウインチの動作を止めて一定高度に保つようにした。3月14日の観測では1326LTに気球飛揚を開始し、1713LTに2度目の飛揚を終え気球を地上に下ろしたため、飛揚時間は3時間47分だった。3月14日の観測飛揚時間は上記



図8 第2廃棄物保管庫での係留気球保管の様子（第46次隊長谷川隊員撮影）
Fig. 8. Balloon in the hanger (photo by Y. Hasegawa, JARE-46).



図9 係留気球の移動方法（第46次隊長谷川隊員撮影）
 Fig. 9. Transport procedure of tethered balloon from the hanger to C heliport (photo by Y. Hasegawa, JARE-46).

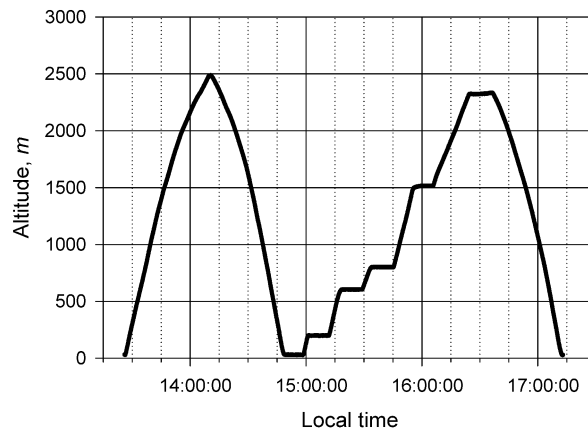


図10 2005年3月14日での係留気球の高度変化
 Fig. 10. Balloon trajectory in the observation of 14 March, 2005.

(2.4節)の想定観測時間よりは長めとなったが、これは気球到達高度が仮想した2000mではなく、2488mまで上昇させたことに因る。1回目の飛揚での気球上昇速度は、平均すると約56m/sだった。実際の気球上昇速度は、ウインチのライン巻出速度だけではなく上空の風速に大きく依存する。そのため、ウインチからのライン送り出し速度を上げて、上空の風が強い時には気球が水平方向に流されてしまうため、上昇速度が遅くなることもあった。

4.2. 係留気球観測中に起きた不具合とその対応

4.2.1. ガソリン発電機の動作不良

今回持ち込んだガソリン発動発電機は、8月頃の観測中にエンジン本体横につけてある円

盤状キャップが抜け、エンジンオイル漏れを起こして停止してしまう不具合が発生した。抜けたキャップは、保守のために頻繁に取り外しをする様な部分のキャップではなく、マフラーなどを取り外さないと見えないエンジン側面にあったキャップだった。幸いにも気球を地上付近まで下ろし、係留する測器を交換している最中に発電機の不具合が発生したため、直ちに観測中断の処置を取るだけで済んだ。不具合発生後、同種の発電機を使用したことのある経験者やメーカーに確認した所、普段の運転ではおきにくい症状とのことで、寒冷下での運転の影響なのか、ロットの当りが悪かったのかははっきりしない。外れたキャップ部のオイルをふき取り、キャップをはめ直したことにより、一時的に復旧して使用できていたが、復旧後2回目の観測で再びキャップが外れてしまった。直ちにこのガソリン発電機の使用を中止した。以後の観測では、基地内にあったディーゼル発電機を借用し、観測に使用した。ディーゼル発電機はガソリンエンジンより始動は安定しやすいが、低温下では始動しにくくなるのは避けられないため、ガソリン発電機同様、空調の入った屋内に保管し、観測時に持ち出すようにした。

4.2.2. 係留用気象ゾンデのデータ受信に関する不具合

気象ゾンデからのデータ受信については、観測中に次に示す三つの症状が確認された。

- (1) ゾンデからのデータは1秒ごとに受信する仕様になっているが、データ受信間隔が3-5秒程度開いてしまう。
- (2) 20-40秒ほどデータ受信が滞り(受信されない)、しばらくすると受信が再開される(図11)。
- (3) 途中でデータの送信が止まってしまう。

(1)については、コンピューター内に記録された時刻データと気象データ数は一致しているので、データ受信上のデータ欠損とは言い難い。これは無線でデータ受信をしているために、電波状態やノイズがあることを考えると、仕様書通りに1秒間隔で受信できないのは避けられないためである。(1)は不具合というほどの症状ではなく、むしろ正常に動いている範囲内と判断できよう。実際、放球した気象ゾンデのデータ受信にも同様によく見られる症状でもある。

(2)のデータ受信が滞る症状に関しては、時刻(PCの時刻)と受信した気圧はデータとして記録されているが、気温・湿度・風向・風速データが受信できていない状態だった。コンピューターに記録されている電池出力電圧を見ると、電池からの供給電圧が下がると(2)の様な症状が確認されることもあったが、供給電圧が規定値の9.5Vの時にもデータ送信の途切れは見られており(図11参照)、(2)は供給電圧降下による原因だけではない。係留気象ゾンデでは、気温・湿度を測るセンサーは交換可能な仕様となっており、不具合が確認された後、センサーを付け直して動作確認をしたところ、データの途切れ症状の減ることが多かった。接点部で起こるわずかなノイズや接触不良がデータの途切れに影響している可能性

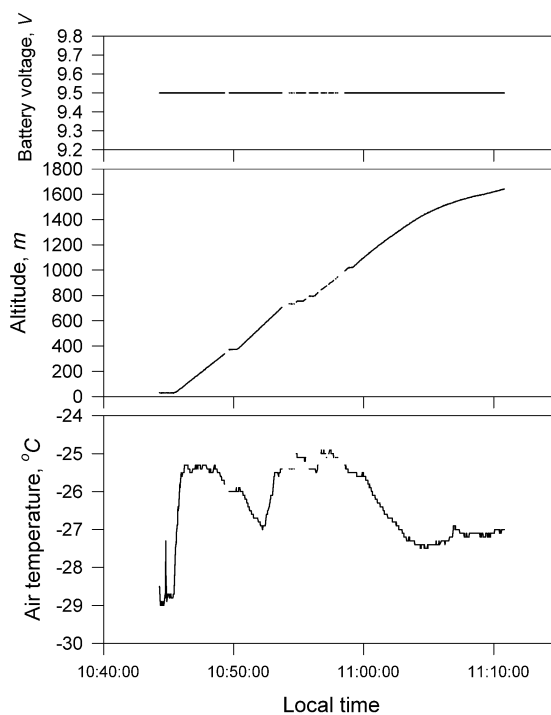


図 11 データ受信不具合の例

Fig. 11. Typical example of erroneous data received from the tether-sonde.

も考えられる。

(3) については、越冬期間中に 3 回ほど症状が確認された。使用している電池の供給電圧が下がればデータ送信が途切れることが予想されるが、データ送信が途切れる直前のデータでは、電池からの出力電圧は 9V 以上となっており（例として図 11 参照）、電圧降下によりデータ受信が途切れたのではなかった様だ。気象ゾンデで測定する気圧を使用して観測高度を出していることもあり、(3) の様な症状が出たときには、観測を続行させても高度情報が全くないことになるため、直ちに気球を降ろす処置を取った。(3) の症状は、地上で係留気象ゾンデの電源を入れなおすことにより、ゾンデからのデータ送信が再開することができた。(2) の症状でもノイズが不具合の原因になるため、ノイズの出方によってはデータの送信が止まることもあるのかもしれない。

4.2.3. CPC-3007 のデータ記録停止

今回、粒径 10 nm 以上の粒子数濃度計測に使用した携帯型 CPC (TSI 社製, CPC-3007) は、本体中にデータロガーを内蔵している。上空 2000 m 付近まで上昇させると、データロガーへのデータ記録が止まる症状が多発した。データ記録の不具合が起きた時にも、地上に降ろした CPC の動作状況は外見上正常で、大気吸引をして粒子カウントをしている状態だった。

メーカー・代理店に確認をしたが、動作保証を大きく外れた環境下での運転であるためか、原因についてははっきりしなかった。CPC-3007の動作不良の原因の可能性としてあげられることは次の三つである。

- (1) 低圧下での動作不良
- (2) 低温下での動作不良
- (3) 振動・傾斜による動作不良

第45次隊での越冬航空機観測で同機種のCPCを使用しており、高度5km付近まで上昇しても問題なく動くことが確認されていた。第45次隊で使用されていた航空機は非与圧キャビンであり、測器を動作している環境は飛行高度の大気圧のままである。係留気球での到達可能最高観測高度は3000m以下であることを考えると、気圧の変化（低圧）による要因ではないようだ。

カイロを入れた発泡スチロールの保温箱にCPC-3007を入れているとはいえ、外気温は動作保証温度を大きく下回っている環境での運転となる。低温下での動作状況を確認するため、昭和基地内の冷凍庫（ -20°C ）にてCPC-3007の動作試験を行った。動作試験時には、保温箱内にはカイロは入れずにCPC-3007を運転させた。係留気球観測でCPC-3007を使用する時間に相当する1時間以上運転させたが、問題なく内蔵ロガーにデータの記録がなされていた。実際の観測では、保温箱内にカイロを入れて動作させているため、データ記録の不具合は低温による影響ではないと思われる。

CPC-3007は傾斜させると、観測に使用している2-プロパノールが光学系に浸入する可能性があるため、過度に傾斜させるとデータの記録が止まるように設定されている。保温箱に最大傾斜角の記録を取れる道具をつけて係留を行ったこともあったが、許容範囲内の揺れだった。室内でもCPC-3007を保温箱に入れて吊り下げ、実際に係留している時に確認される揺れをかけて動作状況の確認を試みたが、データ記録が止まるようなことはなかった。揺れによるデータ記録の強制停止であるならば、風速が強い領域や加速度のかかる気球上昇を止める瞬間や気球下降の瞬間（いずれも最高到達高度）に集中して動作不良が起こると想像される。この仮定が正しければ、不具合が発生する高度は観測事例ごとに大きく異なるはずである。しかし、不具合発生は気球上昇中の2000m前後辺りに集中しており、揺れ以外の要因も捨てきれない。現時点では、データ記録不具合の原因ははっきりしてはいない。

今回の観測では、2000m付近でデータ記録が止まることは掴んでいたため、最終的には係留気球での粒子数濃度観測飛揚では2000m前後までの飛揚に留めなければならなかった。ウインチラインを3000m近く送出して、最高到達高度が2000m足らずのときもあったが、安定にデータ記録ができる状態であれば、最高観測高度を2500m程度まで上げられたはずである。今後の係留気球やその他の飛翔体を使用したエアロゾル観測で、CPC-3007を使用する際には、今回の不具合について要因と対策を検討する必要がある。

表 3 係留気球によるエアロゾル観測概要

Table 3. List of tethered balloon operations at Syowa Station during JARE-46.

日付 (2005 年)	粒子数濃度 鉛直分布観測 到達最高 高度, m	エアロゾル サンプリング 到達最高 高度, m	特 記
1月 6日	1385	—	インパクトータラブルのためサンプリング飛揚は実施せず
1月 15日	1536	1585	
1月 26日	1666	1717	
2月 12日	1979	2009	
2月 16日	1530	1560	上空、強風のため 1530-1560 m 付近で上昇を停止
3月 5日	2141	2155	
3月 14日	2488	2320	
3月 23日	2326	2284	
4月 10日	2200	2200	
4月 23日	1025	938	上空、雲のため 1000 m 付近で上昇を停止
5月 10日	1500	1430	上空、雲のため 1400-1500 m 付近で上昇を停止
5月 19日	2050	2030	
5月 28日	2000	1955	
6月 16日	911	995	上空、雲のため 900-1000 m 付近で上昇を停止
6月 28日	1570	1500	上空、風のためウインチライン限界の 3000 m 近く出した
7月 22日	1642	1429	気象ゾンデの受信が上空で止まる*
8月 1日	1975	—	使用していたガソリン発動発電機にエンジンオイル漏れが起き、サンプリング飛揚は中止した
8月 18日	1600	1750	オゾンゾンデ観測 上空、風のためウインチライン限界の 3000 m 近く出した
9月 4日	1333	866	上空、強風のため 1330、860 m 付近で上昇を停止
9月 17日	2000	2035	オゾンゾンデ観測
9月 30日	1167	1130	上空、強風のため 1150 m 付近で上昇を停止
10月 15日	1910	2016	オゾンゾンデ観測
11月 3日	1975	1985	オゾンゾンデ観測
11月 21日	1960	2150	オゾンゾンデ観測
11月 28日	960	800	オゾンゾンデ観測 上空、強風のため 960 m 付近で上昇を停止、サンプリング飛揚では地上風速が上がってきたので、観測途中で中止した
12月 5日	1770	1750	オゾンゾンデ観測 上空、風のためウインチライン限界の 3000 m 近く出した
12月 11日	1830	2020	

* : 気温・湿度センサーを交換した直後で、接触不良が原因だった

4.3. その他

第46次隊で行った係留気球観測の概要を表3に示す。最終的に当初の予定以上の27回の観測に成功した。上空で予想以上に風が強い、あるいは雲底高度が低いといった原因のため、上昇を断念した観測もあった。特に冬季には、係留気球観測を行うには風が強いことが多く、曇天でも観測を実施した日が何度かあった。また、8月以降には、気象部門との共同観測として、オゾンゾンデも係留させて数回観測を実施した。測器の重量の関係で、オゾンゾンデは、エアロゾルサンプリング飛揚時にインパクター下部にオゾンゾンデを吊り下げたようにした。

謝 辞

本計画を実施するにあたり、第46次隊松原廣司観測隊長、渡邊研太郎副隊長からの助言、低温下での現場作業の支援をして頂いた定常気象観測部門（佐藤 建、西巻英明、山本浩嗣、岩城貴信、伊藤大輔の各隊員）、気水圏部門（田阪茂樹、古崎 睦、五十嵐誠の各隊員）、その他部門（上村剛史、奥平 毅、長谷川恭久、山崎哲秀、溝渕裕史、池田満久、江川晋子、高橋 博、岡林 功、岸本栄二の各隊員）から多数の支援、観測にかかる設営関係の調整や協力をして頂いた諸隊員（行松 彰、松本 亨、周藤美津秋、高木善信、小林正幸、濱本初美、原田輝一、藤井純一、張替一史、近江幸秀の各隊員）の支援、その他隊員の協力があり、1年間にわたる越冬係留気球観測を成し遂げることができた。また、日本出国前に係留気球国内訓練のために多大な協力と係留気球観測に関して貴重な助言を、南極観測事務室室長の首藤康雄氏、高層气象台（つくば）観測第一課の木村利朗氏から賜った。係留気球観測に関して、平沢尚彦氏（極地研）、林 政彦氏（福岡大）、佐藤 薫氏（東京大）からも貴重な助言をいただいた。この場を借りて深謝する。

文 献

- 林 政彦 (2001): Optical particle counter による対流圏・成層圏エアロゾルの観測. エアロゾル研究, **16**, 118-124.
- 原 圭一郎 (2003): 南極対流圏のエアロゾル. エアロゾル研究, **18**, 200-213.
- Okada, K., Wu, P.-M., Tanaka, T. and Hotta, M. (1997): A light balloon-borne sampler collecting stratospheric aerosol particles, for electron microscopy. J. Meteorol. Soc. Jpn., **75**, 753-760.
- Yamashita, K., Hayashi, M., Irie, M., Yamamoto, K., Saga, K., Ashida, M., Shiraishi, K. and Okabe, K. (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. Meteorol. Soc. Jpn., **83A**, 121-136.