

南極周回気球に搭載したハウスキーピング機器の結果

太田 茂雄^{*1}・山上 隆正^{*1}

矢島 信之^{*1}・門倉 昭^{*2}

Results of on-board House Keeping Equipments of PPB Project

By

S. Ohta, T. Yamagami, N. Yajima and A. Kadokura

Abstract: Since 1984, we have developed the on-board house keeping equipments of the PPB project.

The PPB-1 was launched on 25 Dec 1990 and accomplished a complete circumpolar flight over the Antarctic region and floated for 38 days. The PPB-2 was successively carried out on 5 Jan 1991 for observing auroral X-rays, magnetic and electric fields. This PPB-2 floated for 30 days.

This paper will describe the flight behavior and results of house keeping equipments of PPB-1 and PPB-2.

概 要

1984年より、南極周回気球に搭載する基本搭載機器の開発を行ってきた。本項は、第32次観測隊が放球した南極周回気球 PPB-1号機および PPB-2号機の観測結果を基に基本搭載機器の飛行状態について記す。PPB-1号機は1990年12月25日 8時25分に放球され、約39日間の飛行に成功した。また、PPB-2号機は1991年1月5日18時55分に放球され、約30日間の飛行を行った。本論文は、特に気球高度の日変化、気球の航跡図、各部の温度変化および各搭載機器の電源変動を詳細に記し、今後の PPB 観測に役立てることが最大の目的である。

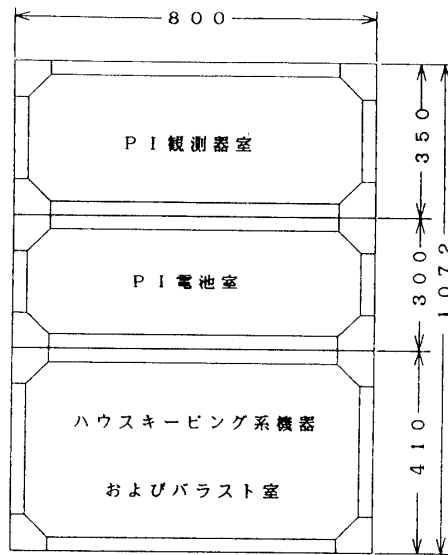
*1 宇宙科学研究所

*2 国立極地研究所

1. ハウスキーピング・データ

PPB 観測器のゴンドラ製作は宇宙科学研究所で担当した。南極監査船「しらせ」の実験室に持ち込めるように3分割できる構造とし、上段をPI室、中段をPI電池室、下段をハウスキーピング系の基本搭載機器、電池およびバラスト収納室とした。主な搭載機器はコマンド受信機、HK用アルゴス送信機、気圧計、温度計回路、オートバラスト回路等であり、ゴンドラ内の配置は第1図の通りである。ハウスキーピング・データは別項で述べているPI用のマルチアルゴス送信機でも送っているが、データのサンプリング・レートは1時間に1回である。南極周回気球はきめ細かくハウスキーピング・データを送るため、独立したアルゴス送信機を備え、90秒毎に観測データを送信した。

測定項目は気圧、オートバラストの投下回数、各部の温度および電圧である。気圧は地上から測定できる0.7倍のアンプを通したもの、高度22 km以上を測定する20倍アンプを通したものを送っている。温度の測定箇所はPI用アルゴス送信機温度、CPUラック温度、ハウスキーピング用アルゴス送信機温度、回路箱内温度、PI電池箱内温度(中段)およびゴンドラ・フレーム温度である。電池電圧を計測した搭載機器はハウスキーピング用およびPI



ハウスキーピング室内配置図

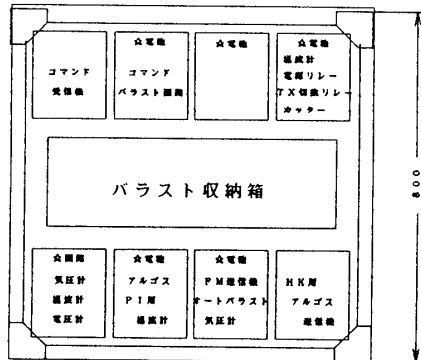


図1 ゴンドラ構成図

用のアルゴス送信機，オートバラスト回路，データレコーダーの+5V系，+12V系およびCPUの+5V系，+12V例である。

第1表 アルゴスによる位置検出回数およびデータ取得回数

1990～1991年

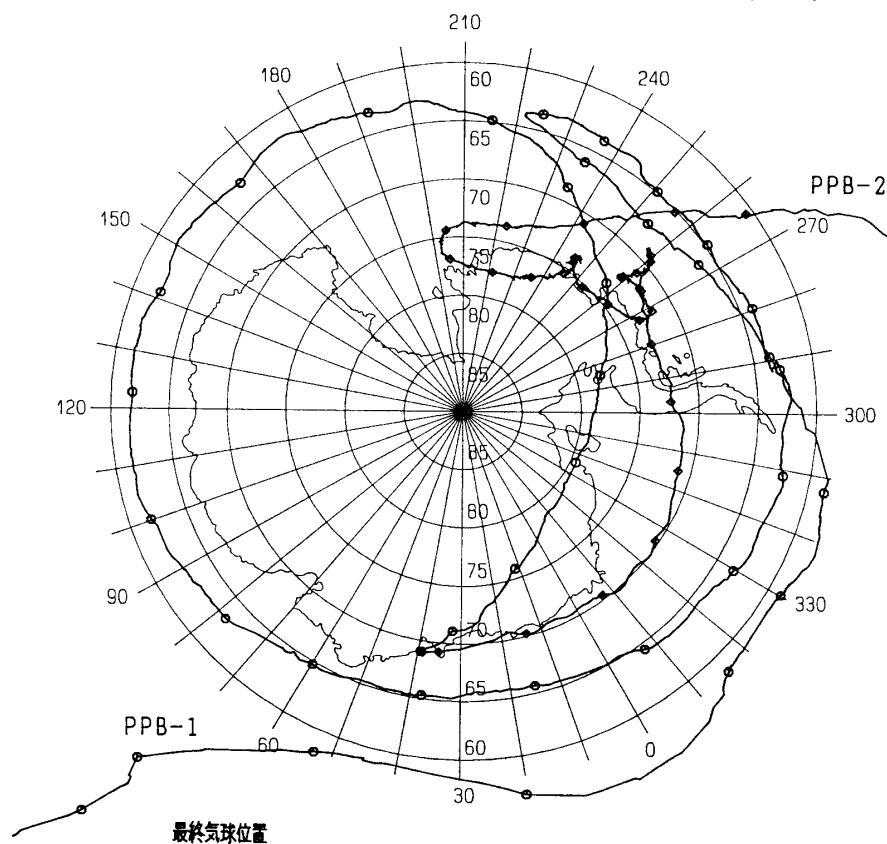
通算日	PPB-1 気球			PPB-2 気球		
	位置回数	データ回数	衛星可視時間	位置回数	データ回数	衛星可視時間
359	13	187	4:40	—	—	—
360	24	270	6:45	—	—	—
361	19	289	7:13	—	—	—
362	23	275	6:52	—	—	—
363	23	243	6:04	—	—	—
364	18	201	5:01	—	—	—
365	17	162	4:03	—	—	—
1	20	231	5:46	—	—	—
2	19	233	5:49	—	—	—
3	17	234	5:51	—	—	—
4	19	227	5:40	—	—	—
5	19	237	5:55	7	90	2:15
6	20	229	5:43	19	251	6:16
7	18	164	4:06	19	177	4:25
8	19	177	4:25	21	193	4:49
9	18	231	5:46	20	245	6:07
10	18	244	6:06	21	266	6:39
11	20	236	5:54	22	261	6:31
12	18	230	5:45	19	258	6:27
13	19	224	5:36	18	234	5:51
14	10	221	5:31	23	237	5:55
15	15	209	5:13	20	216	5:24
16	19	179	4:28	20	175	4:22
17	20	179	4:28	23	207	5:10
18	19	224	5:36	22	239	5:58
19	18	243	9:04	21	250	6:15
20	20	231	5:46	20	240	6:00
21	19	216	5:24	19	234	5:51
22	17	214	5:21	23	235	5:52
23	17	190	4:45	20	220	5:30
24	21	163	4:04	22	178	4:27
25	16	152	3:48	23	191	4:46
26	14	175	4:22	17	237	5:55
27	13	211	5:16	21	247	6:10
28	10	189	4:43	19	254	6:21
29	5	155	3:52	20	251	6:16
30	5	128	3:12	21	251	6:16
31	2	127	3:10	20	231	5:46
32	1	6	0:09	17	193	4:49
—	—	—	—	15	147	3:40
—	—	—	—	17	135	3:22
—	—	—	—	0	50	1:15

2. アルゴスによるデータの取得

アルゴスシステムは極軌道衛星を利用して、地球上のあらゆる地点に配置された観測点からデータを収集するシステムである。この方式は観測点の緯度によってデータ収集回数に大きな差があり、赤道地方で最小極地方で最大となる。比較的小電力で衛星とリンクできるため、極パトロール気球のテレメタリング方式としては最適である。現在アルゴスシステムは2機のNOAA衛星によって運用されており、極地方では衛星は1日約24回上空を通過する。1回の衛星通過で平均15分間衛星とリンク出来るとすれば、1日当たり6時間のデータ収集が期待できる。また、アルゴスシステムは観測地点の位置（緯度、経度）を検出できるので、気球の航跡も併せて得ることができ便利である。第1表はPPB-1、2号機の飛翔時にアルゴスシステムによって得られた気球位置の検出回数、データ取得回数および気球からNOAA衛星を見通し得る時間（可視時間）を示した。表から位置検出回数、データ取得回数および可視時間はほぼ予想通りの値が得られたことを示している。

放球年月日 PPB-1 1990年12月25日 8時25分

放球年月日 PPB-2 1991年 1月 5日18時55分



最終気球位置

2月1日 1時42分 79° 44' E, 33° 00' S

2月4日 4時25分 79° 40' W, 50° 16' S

図2 極地パトロール気球 航跡図

3. 気球の軌跡

第2図は南極周回気球の軌跡図である。PPB-1号機は12月25日に放球し予想通りの航跡を示し、約15日間を費やして南極大陸を1周し、更に周回を続け1.5周した所で高度が下がり逆行を始め、放球から39日目の2月1日に東経79°44′、南経33°00′付近の海上に着水した。PPB-2号機は1月5日に放球したが、オートレベル高度の28 Km以上に上昇せず、5日間で搭載した全バラストを消費した。このため、南極大陸を約1/3周した所で気球は風速の弱い高度25から20 kmまで降下し、付近を約2週間浮遊した後南極大陸を離れ、2月4日に西経79°40′、南経50°16′の海上に着水した。PPB-2号機がバラストを投下しても28 km以上の高度に上昇しなかった理由は、気球の下部に小さな穴が開いたことが考えられる。もし、気球に故障が無ければPPB-2号機も充分南極大陸を周回したと思われる。

4. 気球高度

気球は日没等の影響で気球内温度が低下すると降下を始める。三陸では、一日当り気球総重量の約7%のバラストを投下することにより、高度補償を行っている。南極でPPB-1、2号機を放球した時期は昭和基地付近は日没のない季節なので、一日当りのバラスト投下量を平均して、総重量の2%とみて搭載バラスト量を決定した。南極周回気球の場合にはコマンドによってバラストを投下できないので、自動的にバラストを投下するオートバラスト装置を搭載した。気球高度を設定高度以上に保つオートレベル・コントロールの方法はいろいろ考えられる。気球の降下速度を検出し、バラストの投下量を決定する方法は最もバラストの消費量を節約できるが装置が複雑で電力消費が大きくなる。極地周回気球の場合にはもっと簡便な方法を採用した。気球が設定高度以下となった場合、一定時間毎に一定量のバラストを投下する方法である。前回までの予備実験の結果、この方法で充分南極周回が可能なが判っている。第2表は気球の容積および各部の重量、第3表はオートバラスト回路の設定値を示した。

表1 気球系の諸元

気球番号	気球容積 (m ³)	各部重量 (kg)			理論高度 (km)
		気球	観測器	全	
PPB-1	25000	107.50	285	400	30.2
PPB-2	32000	127.46	340	480	30.6

表3 オートバラスト回路の設定値

気球番号	設定高度		投下重量 (kg)	投下間隔 (分)	機能停止時間 (時間)
	(km)	(mB)			
PPB-1	28.0	17.5	2.0	5	5
PPB-2	28.0	17.5	2.0	5	5

1990年12月25日 8時25分UT 放球

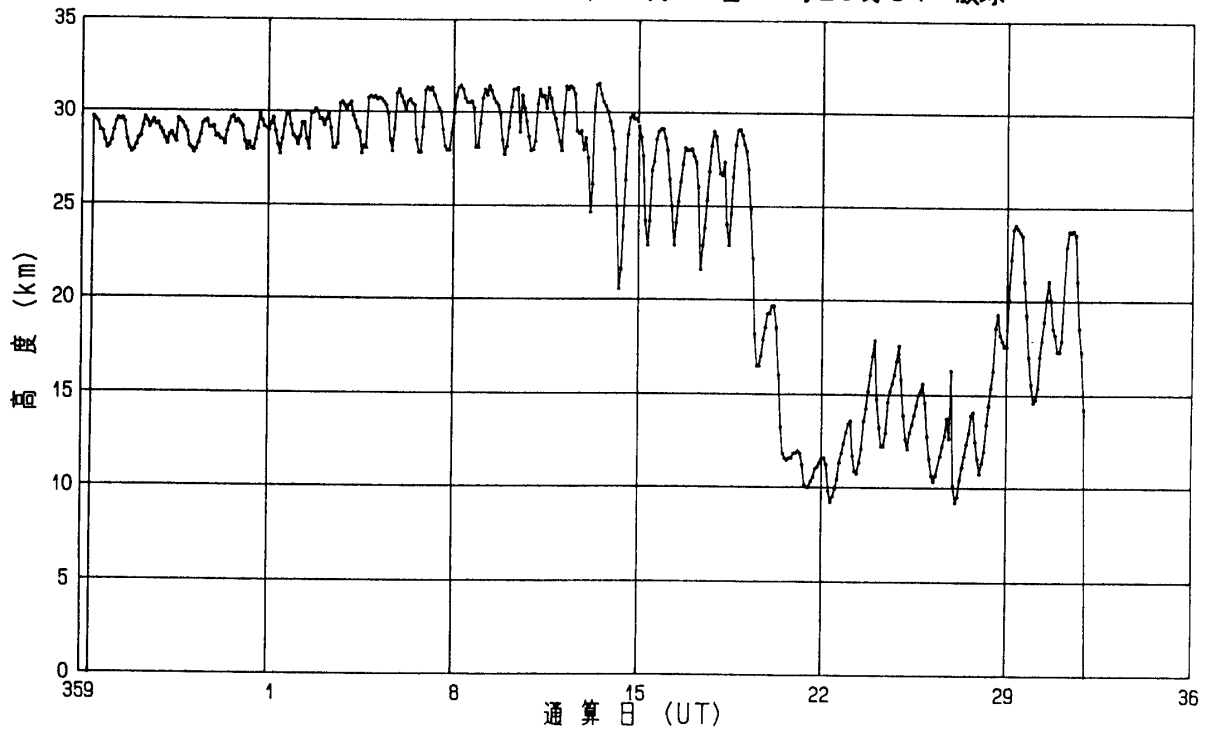


図3 気球番号 PPB-1 全飛行時間の気球高度

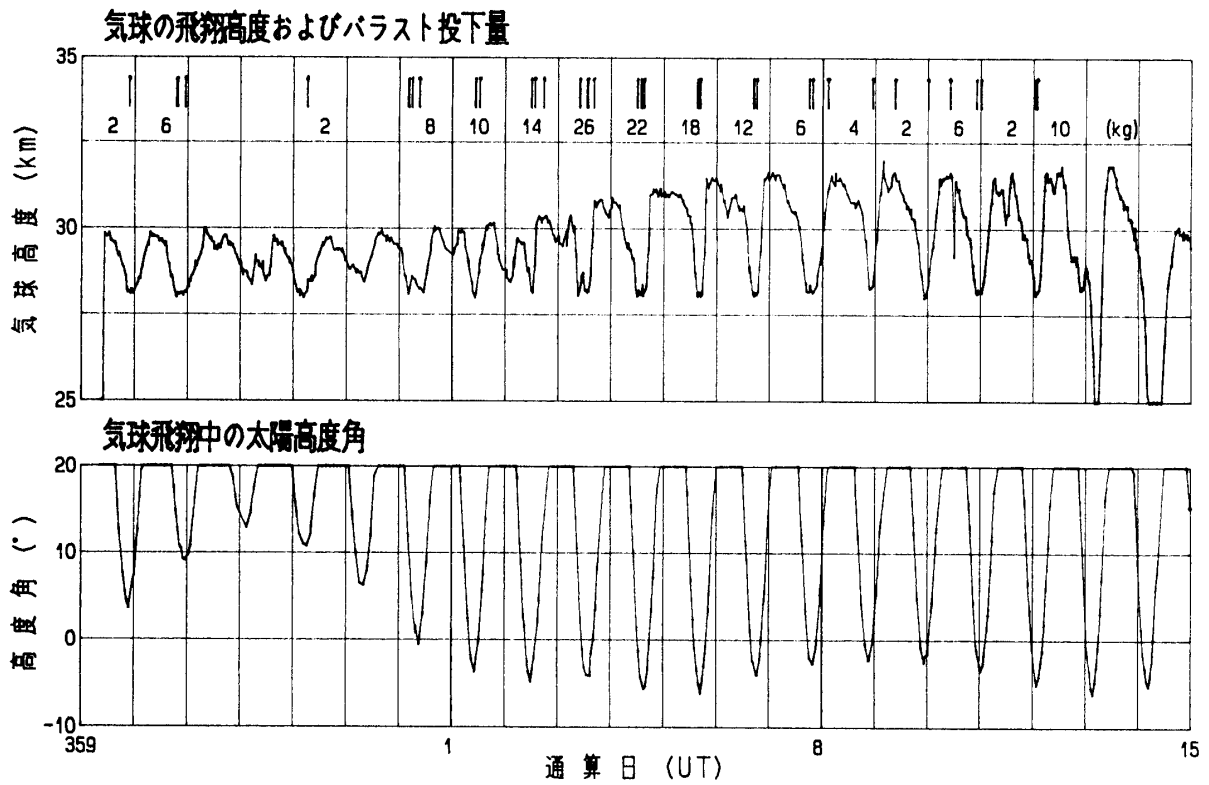


図4 PPB-1 1990年12月25日 8時25分 UT 放球

PPB-1, 2号機とも水平浮遊高度は30~31 kmと予想されるので, オートバランスが作動する設定高度は28 kmとした. 上記の設定は, 気圧計の出力が28 km以下になると5分間隔で2 kgのバラストを投下し, 気球の高度が28 kmを回復するまで継続するものである. オートバラスト機能は電源投入と同時に動作を開始し, バラストを投下し始めるので, 放球作業時から気球が28 kmを越えるまでの間オートバラストの機能を停止させる必要がある. 本球はこの機能停止用のタイマーを内臓しており, 今回は両気球とも停止時間を5時間に設定した.

第3図はPPB-1号機の高度カーブである. 時間軸を圧縮して全飛翔時間を1枚の図に示している. 高度カーブを見て気が付くことは, 気球高度の周期的な変動である. 日本での気球実験においては観測高度(レベルフライト)を維持するため, こまめにバラスト補償を行う. このため, このような現象をあまり経験しない. 気球の浮力は太陽輻射, 地上輻射および雲のアルベド等によって定まるが, PPB気球に見られる高度変動の日変化は主に太陽輻射の影響である. 第4図はオートバラストが機能している期間の気球高度, 気球の現在位置から見た太陽の高度角, バラスト投下時期および1日当りの投下量を示している. 気球は12月25日に放球され, 12月30日までの間は気球の航跡が高緯度方向へ寄ったため, 全く日没にかからず, 殆どバラストを投下していない. 1月1日から1週間は1日4~5時間日没がかかるようになり, 1日当り総重量の2~5.5%のバラストを投下している. 搭載したバラストは放球から18日目の1月12日に尽き, 以後はコントロール無しの飛翔となった. 気球の到達高度は放球直後は30 kmであったが, バラストの減少に従い徐々に上昇し, 全てのバラス

1991年 1月 5日 18時55分UT 放球

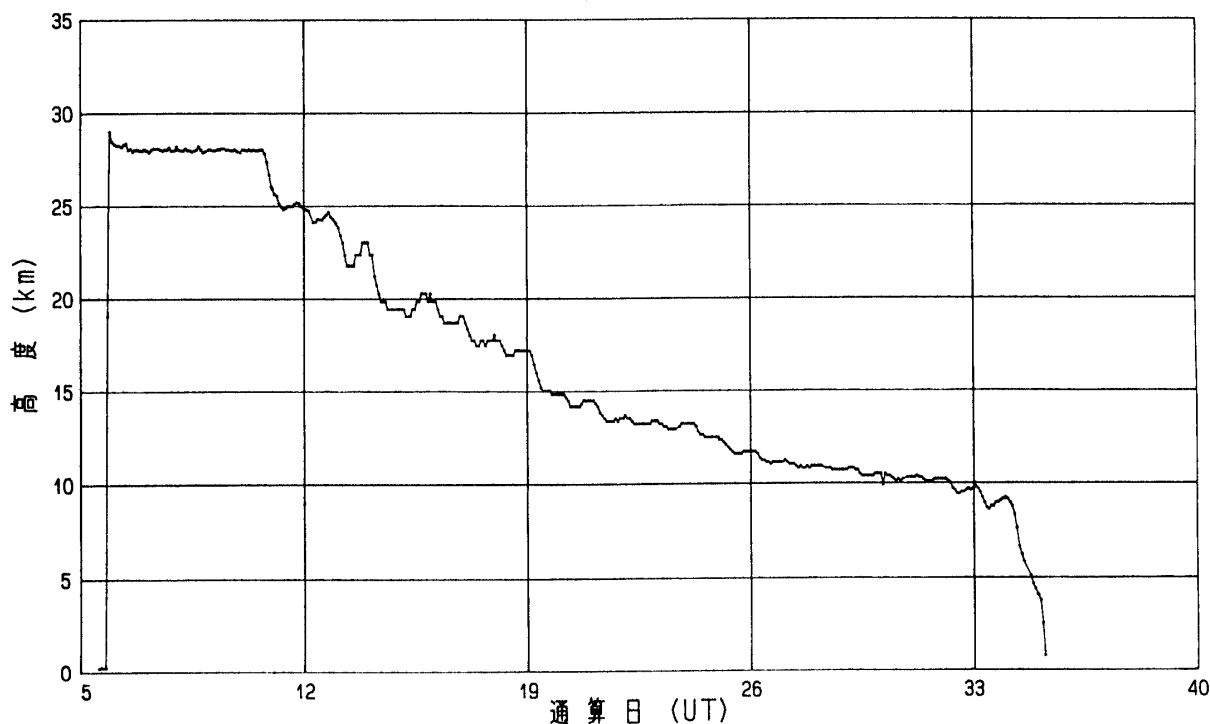


図5 気球番号 PPB-2 全飛翔時間の気球高度

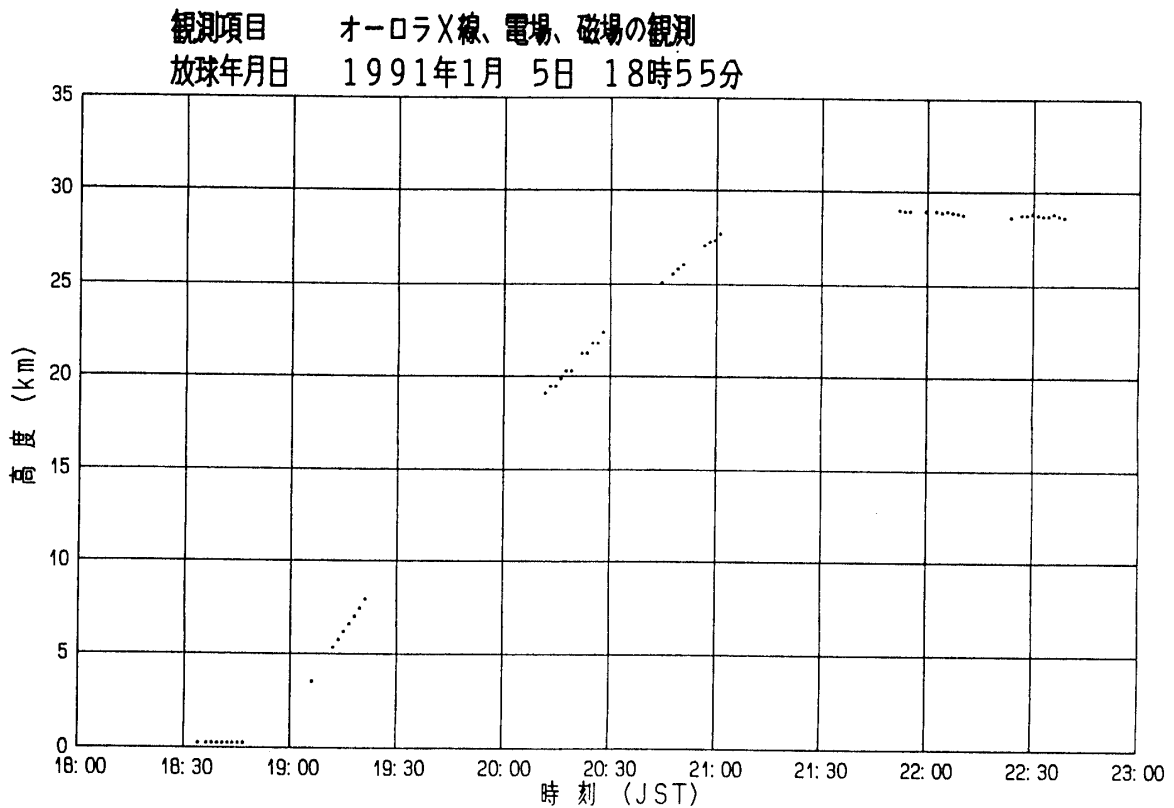


図6 PPB-2気球

トを投下した後では31.6 km に達している。オートバラストが機能している間の気球高度は、設定高度の28 km と気球の容積、総重量に依って定まる最高高度の間を往復している。バラスト補償が無くなった後も、気球の最低高度が20 km を切るまでは29 km 前後の最高高度を維持していたが、20 km 以下になると急激に高度が低下している。日本などの中緯度地方ではこのまま地上まで降下してしまうのであるが、南極では高度12~3 km で一旦降下が止まっている。気球はその後10日間10~15 km の高度を往復し2月1日に着水している。

第5図はPPB-2号機の高度カーブである。この図も時間軸を圧縮して全飛行時間の気球高度を示している。PPB-2号機は1月5日18時55分に放球され29 km まで上昇したが、その後降下を始め6日12時頃よりオートバラストが作動し、10日にバラストが尽きるまで高度28 km を維持した。第6図は放球時の上昇カーブである。上昇カーブに異常が見られず、水平浮遊後の降下速度が小さいことから、航跡図の項で述べたように気球の下部に小穴が開いたと考えられる。その後、穴は拡大しなかった様で、PPB-1号機は全バラストを投下した後も20日以上飛行を続け、徐々に下降しながら2月4日に着水した。

4. 各部の温度

第7図はPPB-1号機のアルゴス送信機の筐体温度である。PI用のマルチアルゴス、HKアルゴスおよびゴンドラのアルミフレーム温度を示している。マルチアルゴスはほぼ全期間にわたって0°C以上の温度を保っているが、HKアルゴスは放球直後から0°C以下となり、

1990年12月25日 8時25分 放球

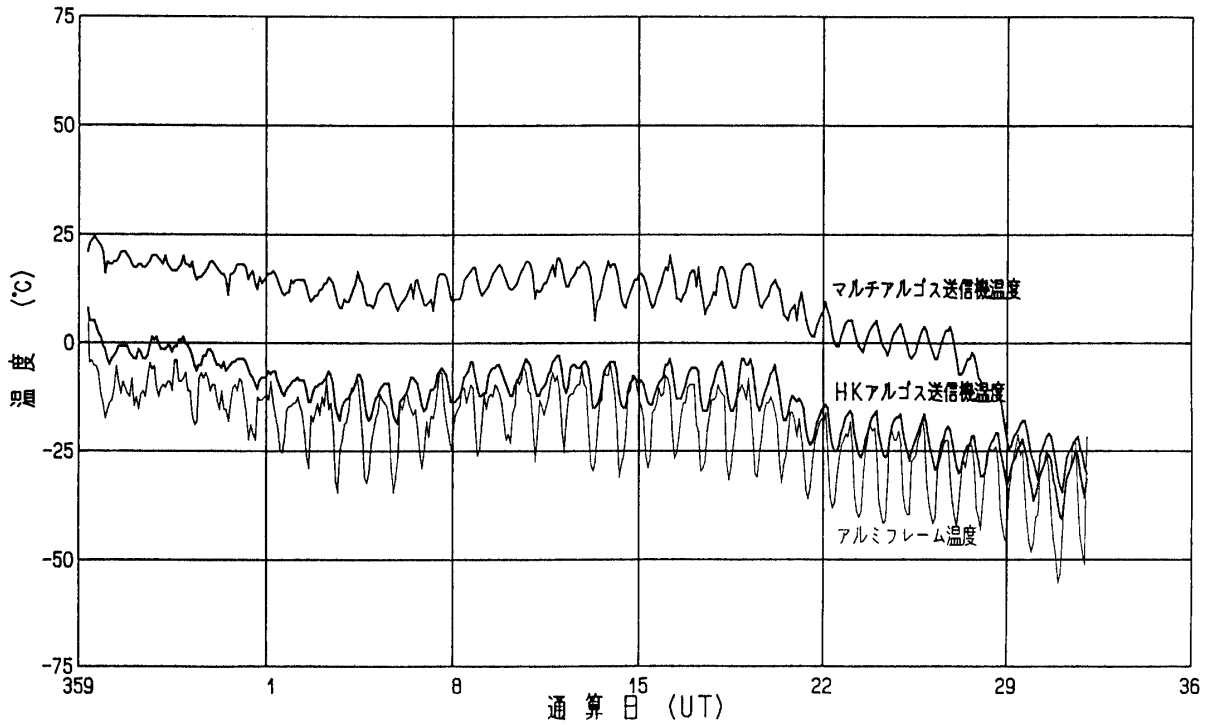


図7 PPB-1 アルゴス送信機の筐体温度

1990年12月25日 8時25分 放球

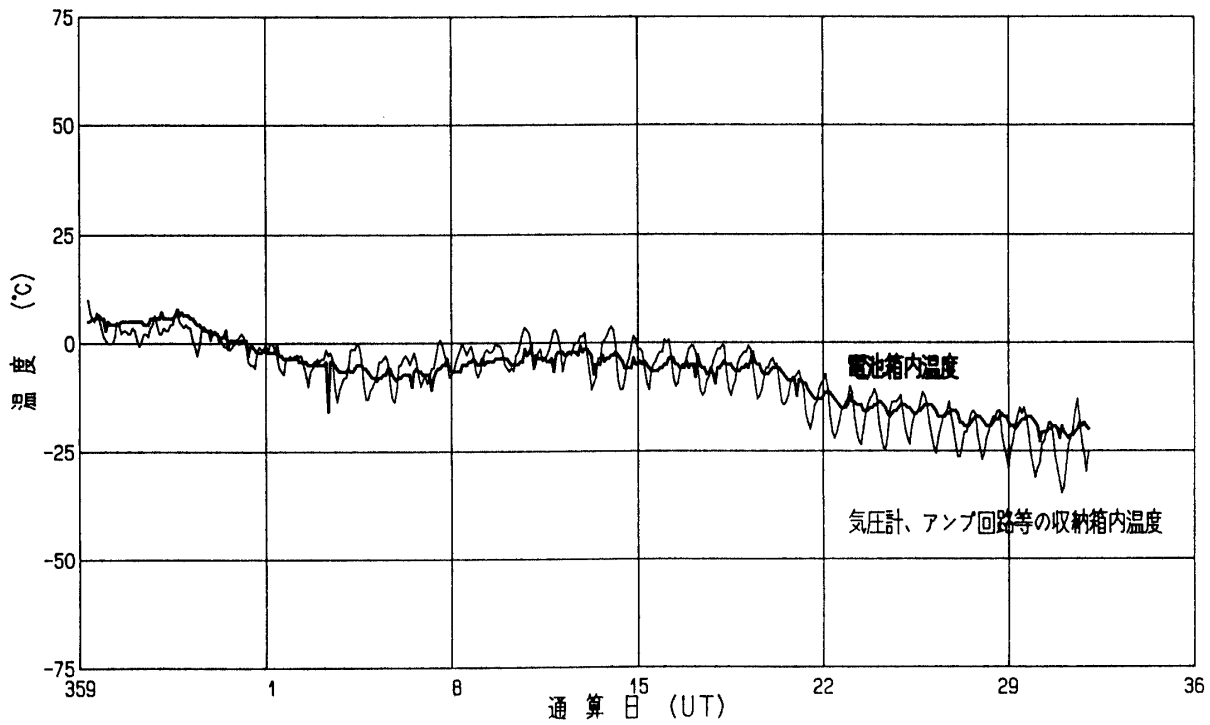


図8 PPB-1 ハウスキーピング系機器の収納箱内温度

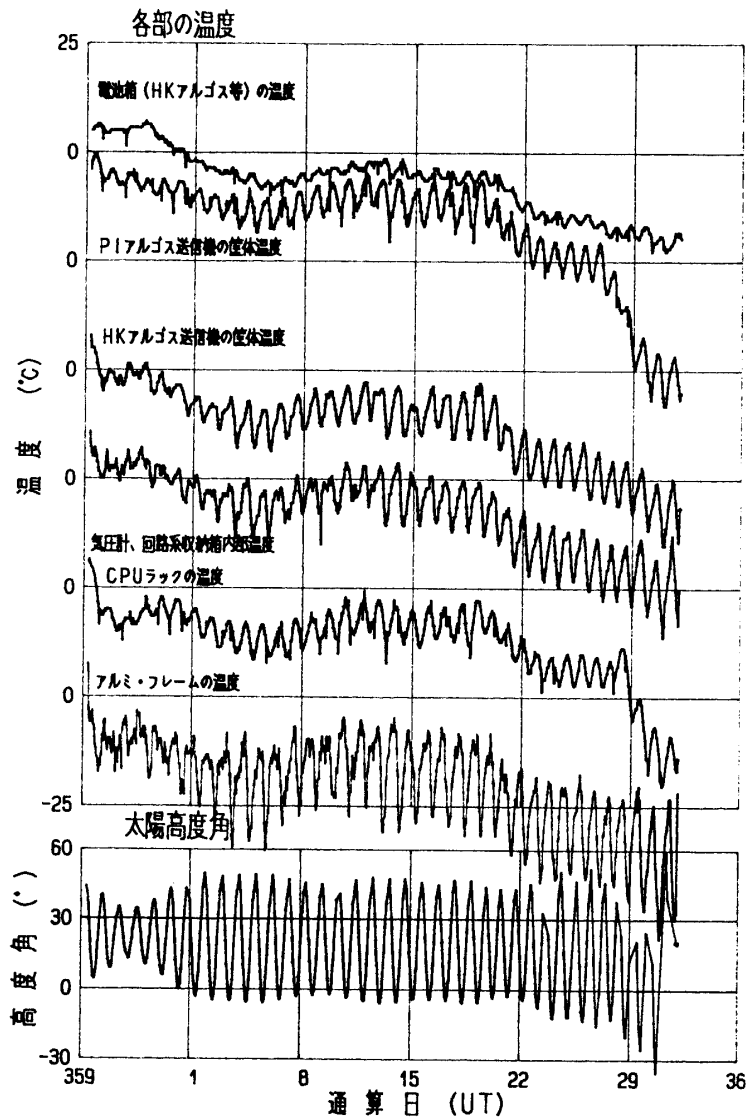


図9 PPB-1 各部の温度と太陽高度角の関係

最終的には -25°C 以下となっている。HKアルゴスは1ID、16チャンネルであるが、マルチアルゴスは20ID、各32チャンネル持っており、送信時間の異いで消費電力に約7倍の差がある。アルミフレームは外気の影響を受けやすいので、気球高度の変動が最も強く現れている。第8図は、気圧計および温度計のアンプ等を収納したスチルフォーム箱の内部温度と、ハウスキューピング関係の搭載機器電池を収納した箱内温度である。電池直接の温度ではなく箱内の空気の温度を測定しているのであるが、電池は熱容量が大きいので外気の影響があまり現れていない。しかし、長時間フライトのため電池1個当りの電流が小さいため、電池の自己発熱も少なく、最終的には -20°C まで温度が下がっている。第9図はPPB-1号機の各部温度を目盛り上で 25°C ずつずらして描いたものである。PPB-1号機は地球磁場観測の専用機であり、内部の消費電力が小さいため、HKアルゴス送信機の温度以外は、放球直後から殆どの期間が 0°C 以下となっている。グラフには太陽高度角も併せて示してある。各部

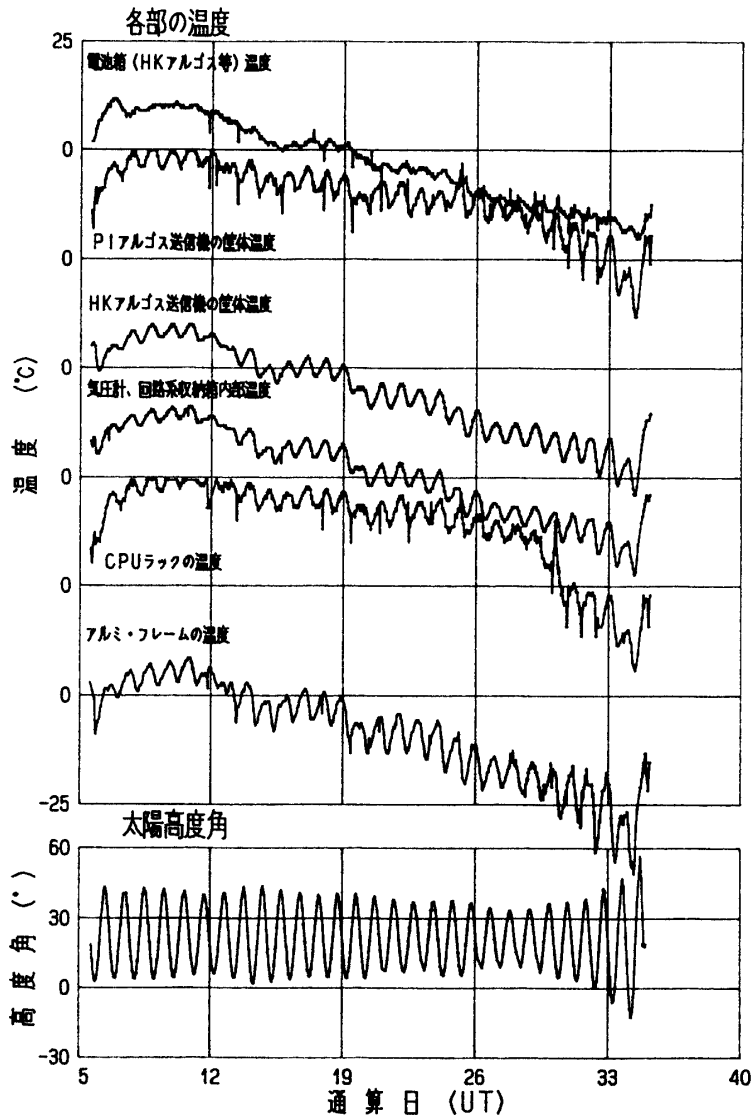


図10 PPB-2 各部の温度と太陽高度角の関係

の温度は太陽の高度角に従った軌跡を画いているが、これは太陽の熱輻射の減少だけではなく、気球の下降による冷たい外気の吸入が大きく影響していると考えられる。第10図はPPB-2号機の各部温度である。前図と同じ目盛りで同じ測定点の温度を画いたものである。PPB-2号機は電場、磁場、オーロラX線の観測器が相乗りしているが、外形寸法、機器の配置等は殆ど同じである。下段にハウスキーピング関係の機器及び電池、中段にPI関係の電池、上段に観測器、アルゴス送信機およびデータレコーダを配置している。各段の間は5 cmのステンレスホーム板で隔離しているが、アングルは厚さ2 mm、幅10 cmのアルミ板8枚で接続している。温度はPPB-1号機に比べて内部の消費電力が大きいため、全体に高めに計測されている。ゴンドラの下段は両気球とも機器の配置および消費電力など同一であるが、PPB-2号機は10°C程度高めに計測されている。CPUラック温度はセンサの設置場所が異なる

のため比較にならないが、X線観測器のプリント板が新に差し込まれたため、ラック内の消費電力が増大し温度上昇につながっている。PPB-2号機は放球後6日目から連続的に降下しているため、冷えた空気を吸入しており、PPB-1号機に比べ飛翔後半の温度降下は大きくなっている。

5. 電池電圧

第11図はPPB-1号機、第12図はPPB-2号機に搭載した機器の電源（電池）電圧の一部である。HKアルゴス送信機およびオートバラスト回路は720時間（30日）仕様、PIアルゴス送信機およびCPUは660時間（27.5日）仕様、データレコーダは間欠動作のため10時間仕様の電池を搭載した。PPB-1号機のPIアルゴス送信機の電池電圧は放球から33日目の1月27日、オートバラスト電池は35日目から下限値を切ったが、予定の日数を充分クリアしている。

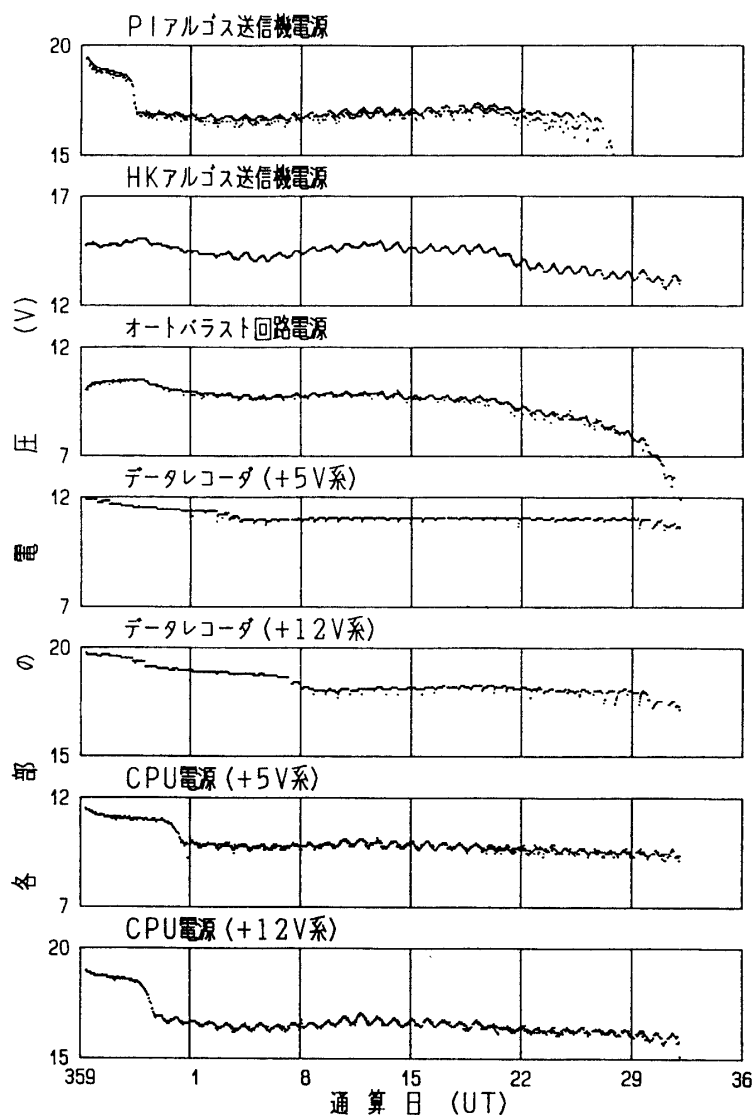
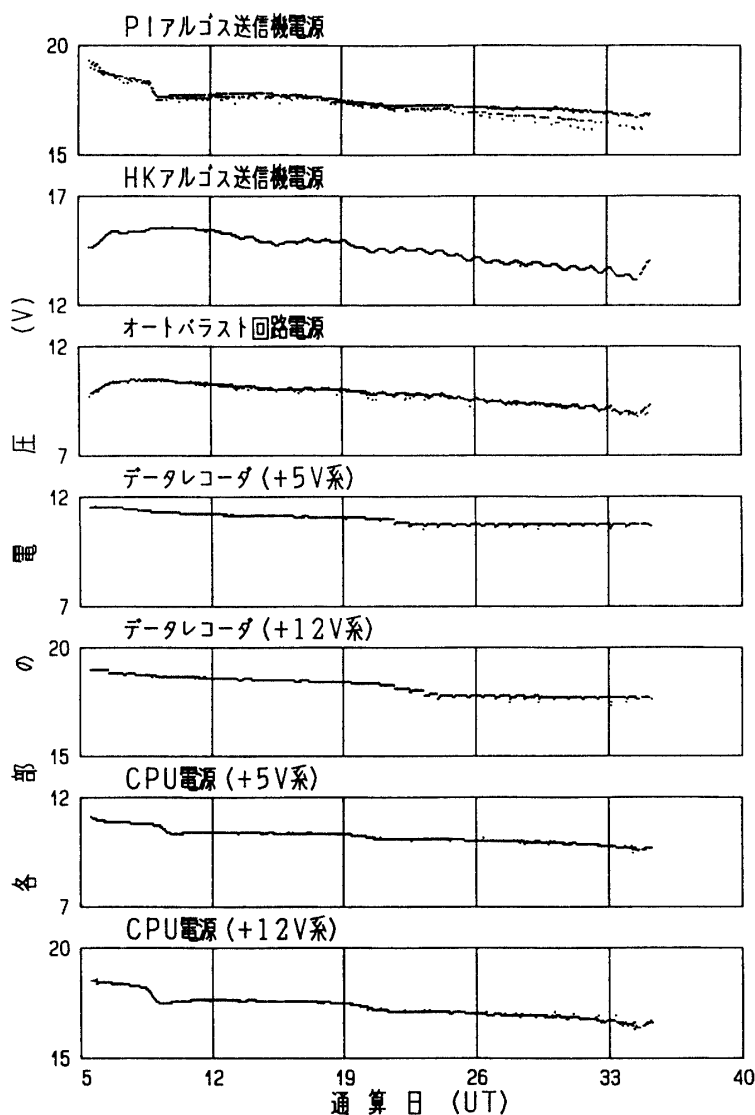


図11 PPB-1 搭載機器の電源電圧



る。その他の電源は2月1日の最終日まで十分な値を保持していた。PPB-2号機の電源はPPB-1号機と同じ基準で設計したが、飛行時間が短いため全く問題はなかった。

6. むすび

- 1) 気球と衛星との会合時間は1日当たり約6時間あり、アルゴスによるデータ収集能力は、実験前に予想した通りである。
- 2) 気球位置の決定は時に3～4時間定まらない場合があるが、通常は1時間に1回程度あり、南極周回気球の航跡を定めるのに充分である。
- 3) オートバラストは今回の方式で充分機能することが実証された。しかし、日没時のバラスト投下量が多めの場合が見られたので、投下時間間隔等を再検討し、バラストを節約

することによって更に長時間の飛翔を目指す考えである。

- 4) 搭載機能の温度は内部消費力の少ない装置は、 $-15\sim-25^{\circ}\text{C}$ 迄下がっており十分な保温が必要である。電池箱内の温度は $-5\sim-20^{\circ}\text{C}$ まで下がっているが、電池の容量から逆算すると、電池本体の温度は 0°C 以上に保たれていたと考えられる。
- 5) 搭載した電池は小型電池は 0°C 、大型電池は -10°C の周囲温度における容量を基準に設計した。結果は少ないもので約20%の余裕が認められ、適正な設定がなされたことを示している。
- 6) 今回搭載した電池の重量は総重量の10%近くを占めており、今後更に長時間飛翔を狙う場合には、テスト飛翔に試みた太陽電池の搭載を検討する必要がある。