



東京大学 CubeSat 気球通信実験 データ解析書

2001 年 5 月 20 日

東京大学 ISSL CubeSat プロジェクト
通信系グループ

1. 実験結果概要
 - 1.1 地上局
 - 1.2 気球
 - 1.3 各地上局送受信状況
 - 1.4 宇宙研テレメトリデータ
 - 1.5 GPS

2. 地上試験時のテレメトリデータ解析
 - 2.1 COMM1FM 送信
 - 2.2 COMM2FM 送信
 - 2.3 インターバル
 - 2.4 COMM1CW 送信

3. 実験当日のイベント履歴

4. 各地上局送受信データ解析
 - 4.1 三陸局送受信データ解析
 - 4.2 東大局送受信データ解析
 - 4.3 理論値と計測値の相関

5. 気球テレメトリデータ解析
 - 5.1 全シーケンスのデータ履歴
 - 5.2 各サイクルのデータ履歴

6. 成果と今後の課題

1. 実験結果概要

本実験(東京大学 CubeSat 気球通信実験)の目的や実験システム構成等については、東京大学 CubeSat 気球通信実験計画書を参照されたい。

1.1 地上局

本実験において、以下の4つの地上局で送受信実験を行った。

表1 気球通信実験で使用した各地上局

地上局名	北緯	東経	高度(m)	コメント
三陸局	39° 09 30	141° 49 30	450	実験全体統括
東大局	35° 42 55	139° 45 39	26	軌道上CubeSatを運用するメインの局
高専局	35° 44 53	139° 48 45	50	都立航空高専の400MHz帯パラボラアンテナを借用
菅平局	36° 31 01	138° 19 01	1330	電通大衛星受信局の設備を借用

1.2 気球

実験は5月20日7:00~13:00にわたり約6時間かけて行われた(放球から着水まで)。放球場所は岩手県三陸町の宇宙科学研究所三陸大気球観測所である。CubeSatと宇宙研バスを吊り下げた気球は、約140分かけて高度39.3kmまで上昇しそのまま約200分水平飛行した。その後パイロードが気球から切り離され、パラシュートで約30分で降下し着水した。着水点が三陸沖120km程度の海上であったため、CubeSatを回収することはできなかった。

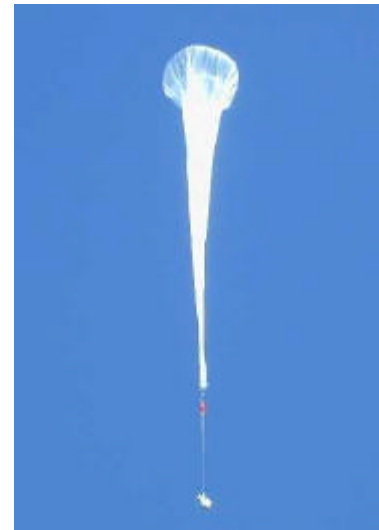


図1.1 放球直後の気球

1.3 各地上局送受信状況

各局の送受信結果を簡単にまとめる。

(1)三陸局

COMM1CW,FM、COMM2FMの受信は放球から着水まで良好(最大距離120km)。COMM1受信機へのアップリンクは受信機がダウンする(放球から2時間後、高度35kmにて)までは良好。ハンディ機の実出力(2W)で十分であった。

(2)東大局

放球後35分(エレベーション角 $El = -0.6^\circ$)で受信を開始。その後、着水まで全て良好に受信(気球との距離420~500km)。アップリンクは三陸局と同様、COMM1受信機がダウンするまでは良好。送信出力2.5W~50Wで実験。

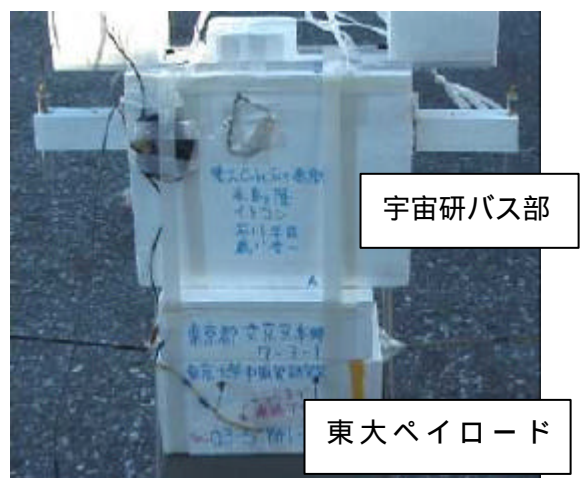


図1.2 宇宙研バスと東大パイロード

(3)高専局

東大局と同じく放球後 35 分で受信開始し、着水まで良好に受信。アップリンクに関しては、高専局設備の問題で失敗(正しく電波が放射されず)。

(4)菅平局

放球後 135 分(レベルフライト)で COMM2FM パケットの音のみ受信。このとき、 $EL=2.7^\circ$ 。周囲が山に囲まれている影響と思われる。S метраの振れは全く無く、受信電力は極めて弱い、場合によってはクリアーに聞える。ただし、パケットのデコードはできず。放球後 295 分後にダウンリンク受信音が完全に途絶する。

(5)各地のアマチュア無線家

東工大が事前にアマチュア無線家のネットワークに CubeSat 気球通信実験についてアナウンスしていたため、多くのアマチュア無線家の方から受信レポートを頂いた(図 4)。CW のデコードはほとんどの人が成功し、一部にはパケットのデコードもできた人もいた。

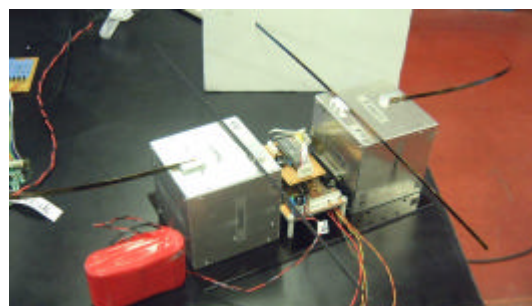


図 1.3 東大 CubeSat 通信実験モデル COMM1&2

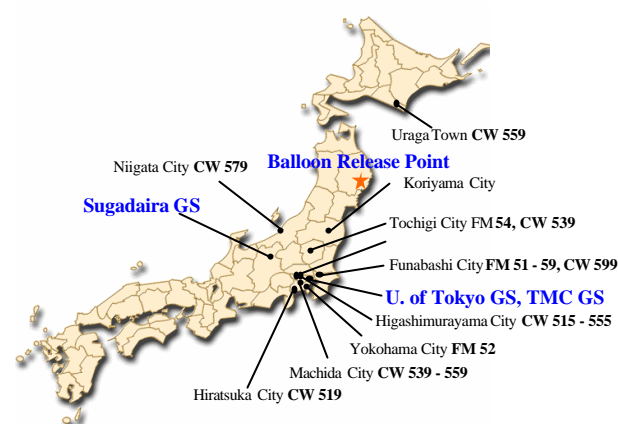


図 1.4 受信レポートを頂いたアマチュア無線家の分布

1.4 宇宙研テレメトリデータ

本来は各無線機ごとの供給電圧・電流、温度等のアナログデータを 14ch、送信や受信ステータスを示すデジタルチャンネルを 7bit 取得する予定であった(気球実験計画書を参照)。しかし、宇宙研テレメ回線との接続によってダウンリンクにノイズが乗ってしまい、デコードできなくなるという現象が見られたため、いくつかのアナログチャンネルのデータを諦めることとなった(詳しくは Appendix のトラブルシューティングを参照)。また、実験当日の不具合により、さらにいくつかのチャンネルが機能しなくなっていた。このため、実験中に正しくデータが取得できたアナログチャンネルは、RSSI (COMM1 受信機の受信強度)、COMM1CW 送信機消費電流、COMM1 無線機温度、COMM1 構体温度、COMM2 構体温度、気圧計の 6 つであった。

また、デジタル回線については、COMM1FM 送信機の PTT が不具合により検出できなくなり、結局、COMM1CW 送信機電源 on/off、COMM1 アップリンク受信回数カウンタ(2bit)、COMM2FM 送信機 PTT、COMM2 アップリンク回数カウンタ(2bit)の 6bit がセンシングできた。

1.5 GPS

宇宙研側、東大側の双方に GPS レシーバを搭載して気球の位置を把握する予定であったが、宇宙研のダウンリンク周波数と GPS の周波数が近いために干渉が起こり、測位に影響が出たと考えられる。東大 GPS レシーバは全く測位することができず、宇宙研側の GPS レシーバは高度 7km 程度で測位が不可能になってしまった。このため気球の位置把握は宇宙研地上局からの測距で行った。

2. 地上試験時のテレメトリデータ解析

送信地上において宇宙研側と噛み合わせて得たテレメトリデータのログを基に各無線機の特性を解析する。0～64秒までは COMM1FM 送信、64～316秒で COMM2FM 送信、317～497秒はインターバルで休み、497～508秒で COMM1CW 送信である。この時点では宇宙研へのテレメデータ部に関して改造を行っていなかったため、予定していたチャンネルのデータが取得できた。

2.1 COMM1FM 送信(0～64sec)

図2.1 RSSI応答(COMM1FM)

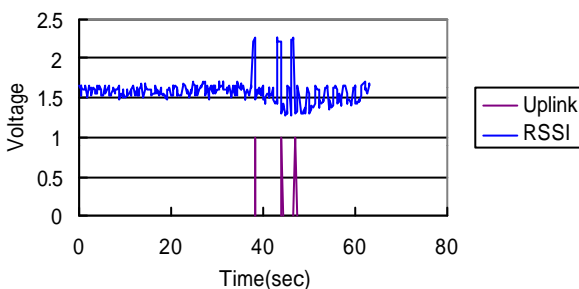
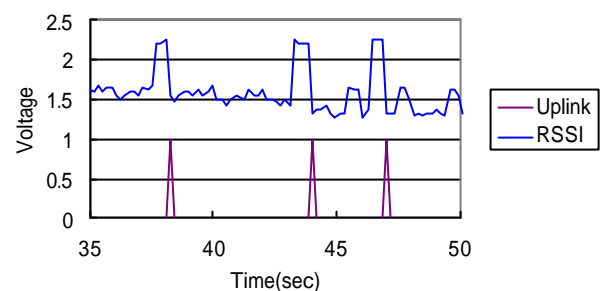


図2.2 RSSI応答(COMM1FM)拡大



アップリンクコマンドが TNC により復調される直前の 1 秒弱の間、RSSI が上昇していることが分かる。アップリンク無送信時に RSSI 出力が 1.5V と高い(通常 0.5V 程度)のは、試験環境が、様々な測定機器が動いているノイズの多い環境なためと思われる。

図2.3 西無線供給電圧

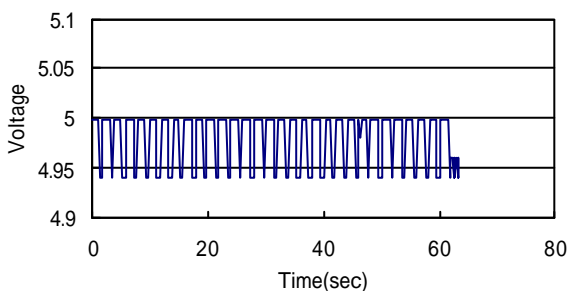
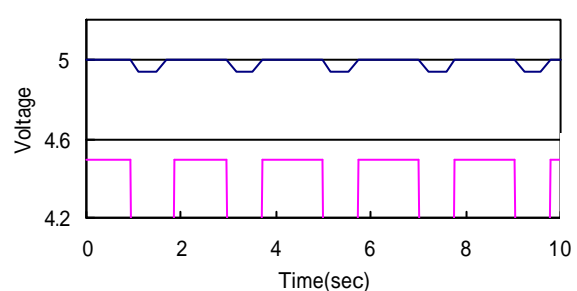


図2.4 西無線供給電圧と送信on/off



送信 on/off の時間比率は TNC の命令では 8:3 となっている。それに応じて西無線供給電圧も変化している。送信時に電圧が上昇するのは直感に反するが、大きな出力の送信でノイズが乗り、AD 変換がオーバーレンジしている可能性がある。後述する CW 送信時にはこのような大きな変化は見られず、西無線供給電圧は 4.94V 程度である。

図25 TX1I

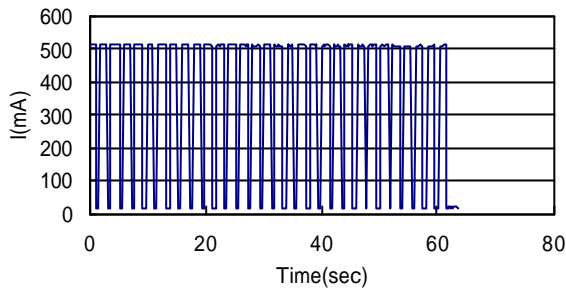
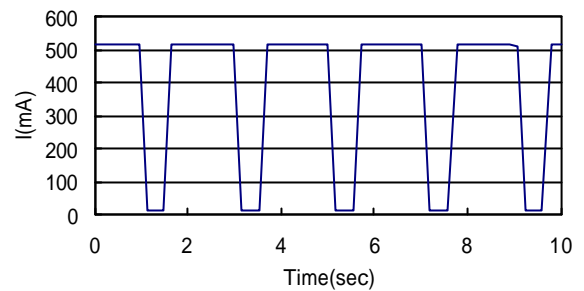


図26 TX1拡大



FM 送信機消費電流も供給電圧と同様の变化をする。ただし、送信時の消費電流が設計値の 700mA よりも低く 500mA 程度しか流れない。電流検出回路に異常がないならば、送信出力が設計値の 800mW よりも小さくなっていると考えられる。また、無送信時に 15mA 程度電流が流れているが、FM 送信機の待機電力である。

図2.7 RX1I

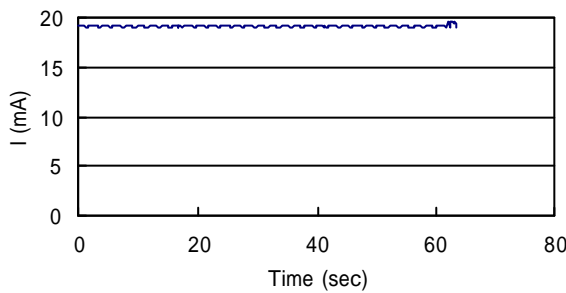
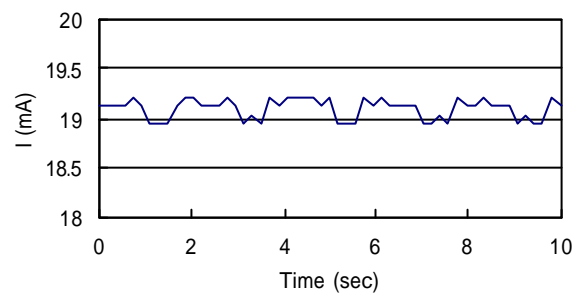


図2.8 RX1I



消費電流は 19mA で消費電力に換算すると 95mW となり、無線機製作時のスペックである 125mW よりも省消費電力となっている。他のチャンネルと同様、FM 送信時に値が上昇するという現象が見られるが、大電力送信によるノイズと思われる(後述の温度計出力にも同様の現象が見られるため)。

図2.9 COMM1温度計測(COMM1FM送信時)

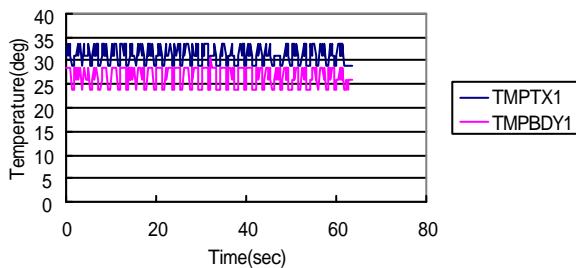
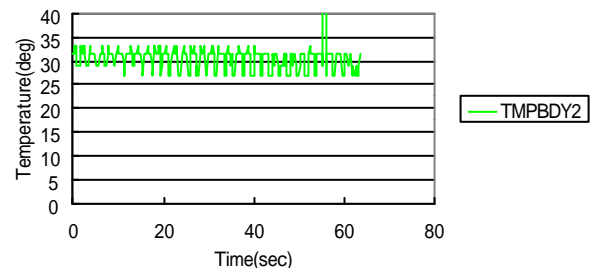


図2.10 COMM2温度計測(COMM1FM送信時)



FM 送信時にノイズが出るためグラフの下端の線が実際の温度となる。温度計には LM335Z(レンジ: -40 ~ 100、精度: 2) を使い、電圧 温度変換式には個別にキャリブレーションした結果を用いた。COMM2 側は休んでいるので温度が下がっているのが分かる。

図2.11 温度計測(COMM1FM送信時)拡大

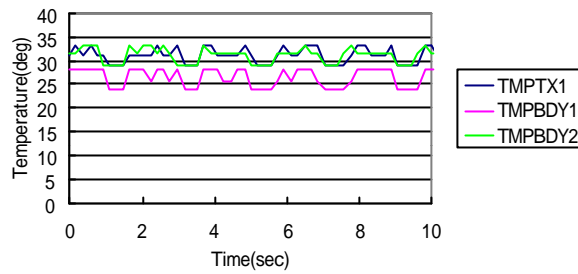


図2.12 気圧計(COMM1送信時)

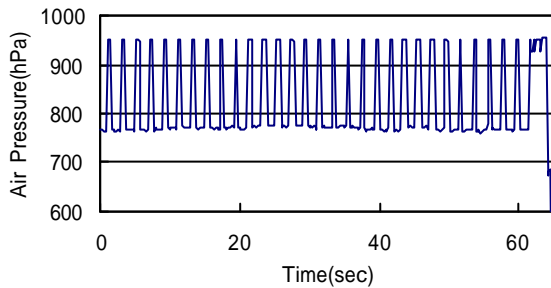
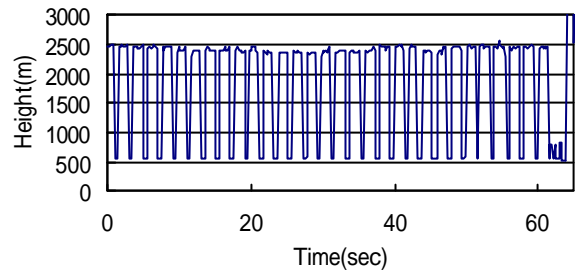


図2.13 BARO-ALT



気圧計には、フジクラのXFPM-115KPAを用いている。計測レンジは150hPa～1150hPaである。高度に換算して10数kmとなる。気圧の値から高度へ変換する際には外気温のデータが必要となるが、COMM1の構体温度が外気温に最も近いと考えられ、この値で代用している。

COMM1FM送信時にはセンサ出力電圧が大きく下がり(電流検出の傾向とは逆)、気圧としても小さな値となる。高度に変換すると逆に大きい値となる。無送信時の状態では気圧高度の値は一定しており、560m程度を示している。実際の作業地点の高度は480m程度である。

2.2 COMM2FM 送信(64 ~316sec)

図2.14 TEKKV

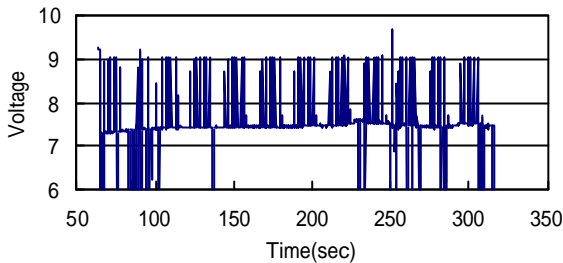
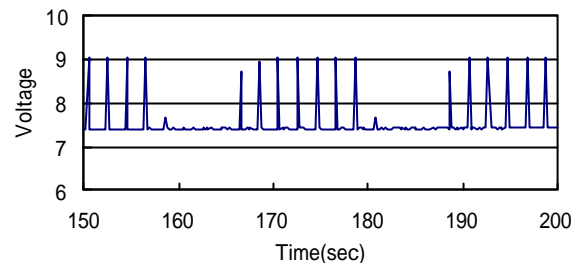


図2.15 TEKKV拡大



COMM2FM 送信機である TEKK は電池電圧そのまま駆動している。通常、電池電圧は 10V 程度であるが、TEKK 送信時は消費電流が大きいため電池電圧が引きずられて下がってしまう。COMM2 の TNC プログラムでは無送信時間が極めて短いため、5Hz 程度のサンプリングを宇宙研のエンコーダがしてくれているにもかかわらず無送信時のサンプリングが取れずに見かけ上無送信時間が無い様に見える周期がある。

図2.16 TX2I

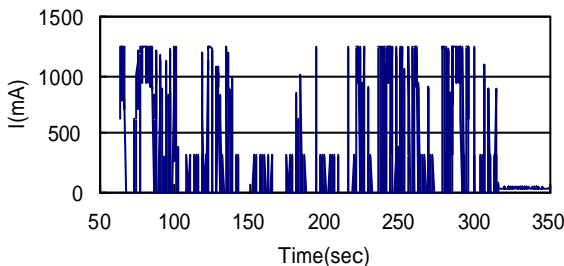
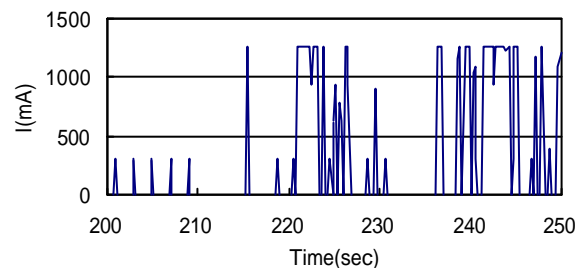


図2.17 TX2I拡大



TEKKV と同様、消費電流も値がばらついているが、これもサンプリングの問題と考えられる。電源電圧が高いので、消費電流も 1250mA と大きい。

図2.18 DJV

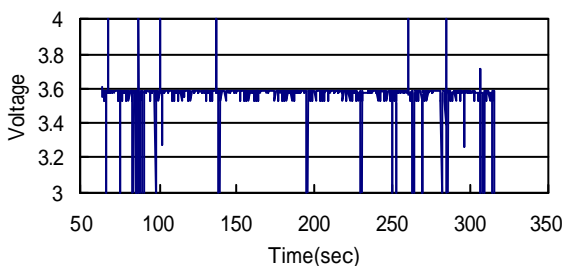
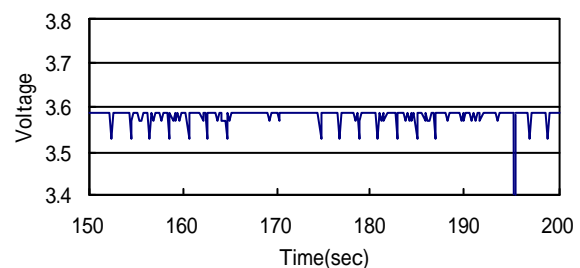


図2.19 DJV拡大



DJ C1 への電源は 3.6VDC-DC コンバータを用いている。FM 送信時は 3.58V、無送信時は 3.53V である。地上試験をしている時点から DJ-C1 でのアップリンク受信は難しい状態であった。構体を開けて無線機を剥き出しにした状態ではアップリンクが通ることが確認されたが、構体に収納してからは全く成功しなかった。推定される原因としては、DJ-C1 の受信信号出力のレベルとそれを受ける受信系のモデムチップ MX614 の定格信号レベルとが適合していなかった可能性がある。これは本来 DJ-C1 側の Volume 設定を調整すべきところを行っていなかったためである。また、DJ-C1 は元々 Li-ion2 次電池で動作するのであるが、今回は供給電圧が高いため 3.6V に降圧して使用していた。通常はシリースレギュレータで整圧するところであるが、今回は入手可能な部品の関係で DC-DC コンバータを使用した。無線機の電源には DC-DC コンバータのようなスイッチング電源は望ましくなく、これが悪影響を及ぼした可能性もある。

図2.20 RX2I

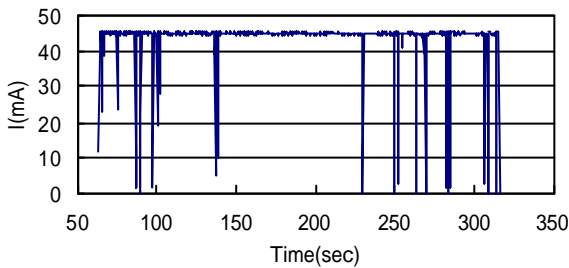
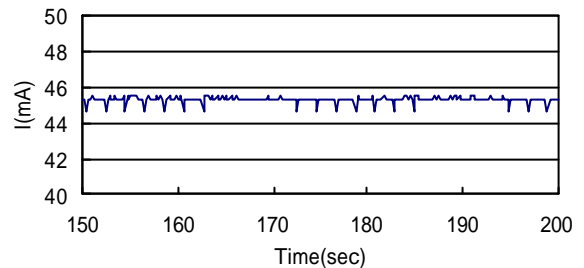


図2.21 RX2I拡大



DJ-C1 の消費電流である。約 45mA と西無線 FM 受信機に比べてかなり大きい。ただし、動作電圧が異なるので、電力ベースで比べると DJ-C1 : 171mW(at 3.8V)、西無線 FM 受信機 (COMM1FMRX) : 95mW(at 5V)。西無線 FM 受信機の方は電池電圧 3.8V から 5V への変換効率がかかるため(0.6 ~ 0.7)、実際の投入電力としては 136 ~ 158mW となる。

図2.22 COMM1温度計測(COMM2FM送信時)

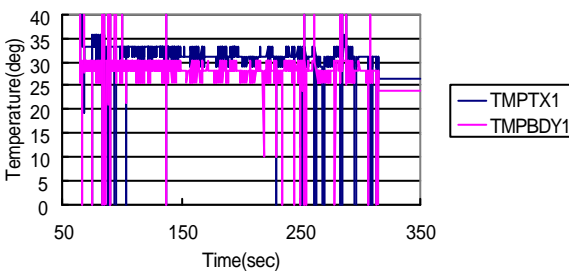


図2.23 COMM2温度計測(COMM2FM送信時)

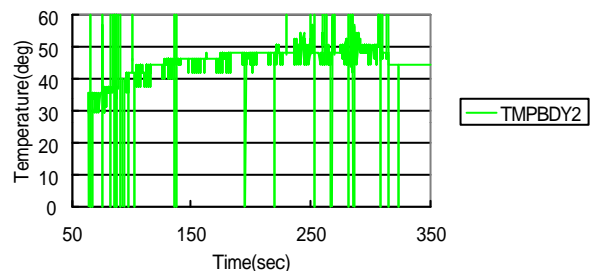
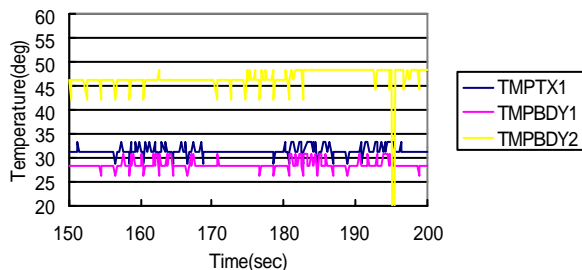


図2.24 温度計測(COMM2FM送信時)拡大



COMM2FM 送信時の温度履歴を図 2.22 ~ 24 に示す。この間 COMM1 は電源オフなので COMM1 の無線機温度・構体温度ともゆるやかに下がっていく。一方、COMM2 構体温度は無線機消費電力がピーク時 9W と大きいため、上昇していくが 50 度程度で平衡に達しつつあり、ここで COMM2 の送信モードが終わっている。

このモードでは、ノイズの乗りが大きい、電源電圧の変動が大きいためレギュレータの出力がたいてこれずに変動してしまっている可能性がある。レギュレータのパスコンに容量の大きな物を用いる必要がある。

図2.25 気圧計(COMM2送信時)

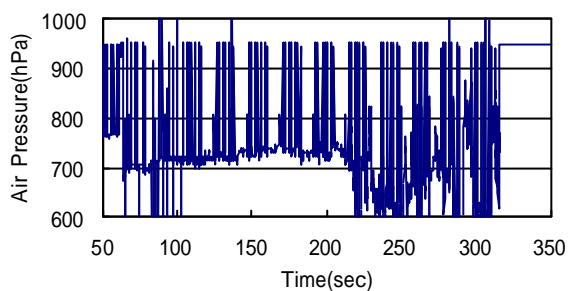
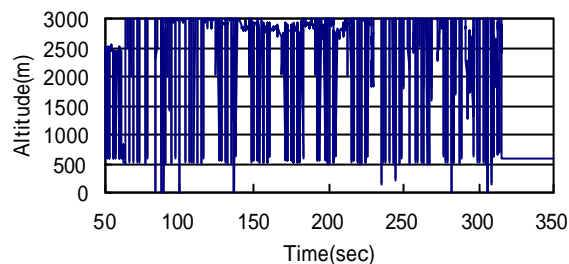


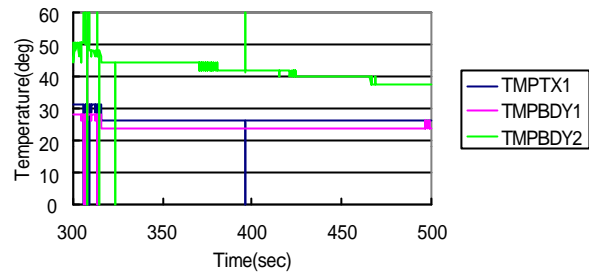
図2.26 BARO-ALT(COMM2送信時)



気圧データもノイズの乗りが激しいが、同様の原因と考えられる。

2.3 インターバル(317 ~497sec)

図227 温度計測(インターバル時)



インターバル中は COMM1、COMM2 とともに電源オフであり、ノイズ無く計測できている。COMM1 は無線機・構体ともに外気温と平衡になっている。両者の差はセンサの精度を超えた誤差と考えられる。COMM2 の方は、送信直後であるので上昇した温度が徐々に下がっているのが分かる。

図228 気圧計(インターバル時)

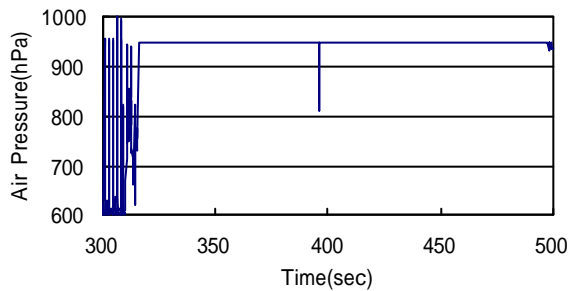
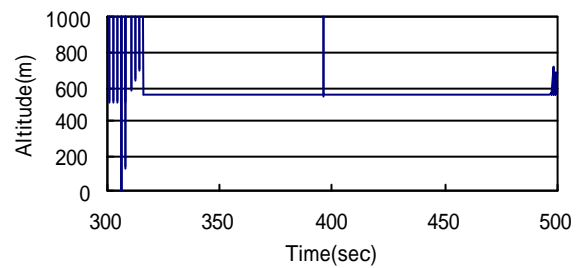


図229 BARO-ALT(インターバル時)



気圧データも温度計と同様、極めて安定している。396 秒にノイズが現れているが、原因は不明である。

2.4 COMM1CW 送信(497 ~508sec)

図2.30 西無線供給電圧(CW送信時)

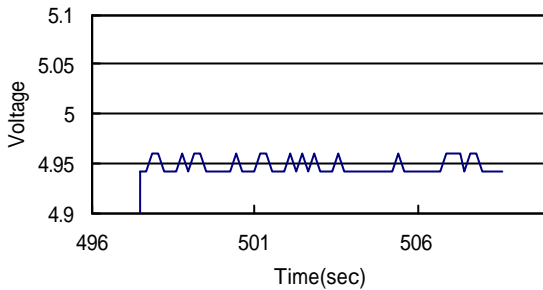
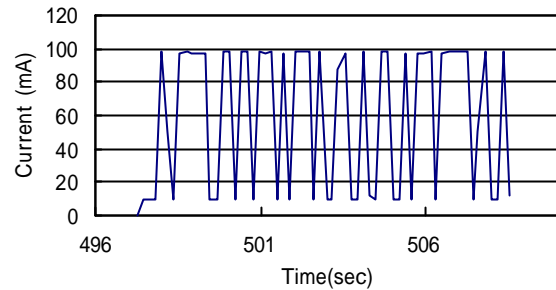
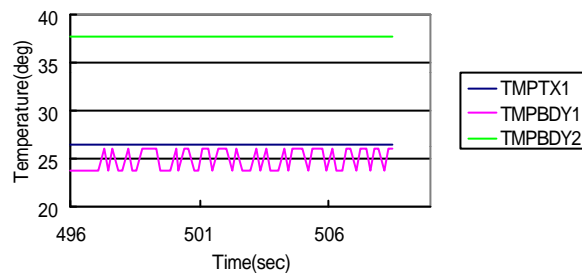


図2.31 CW送信機消費電流(CW送信時)



CW 送信機は FM 送信機に比べて消費電力が小さいため電圧変動も小さくなっている。CW 送信機の消費電力は送信時 97mA,待機時 10mA となっている。

図2.32 温度計測(CW送信時)



温度計データも COMM1 構体温度に微小な(1bit)変動があるだけで、きれいなデータが得られている。COMM2 構体温度は依然外気温より高く、COMM1CW 送信中は下がっていくはずであるが、タイムスパンが小さいため 1bit(2 程度)分の変化も起きていないと考えられる。

図2.33 気圧計(COMM1CW送信時)

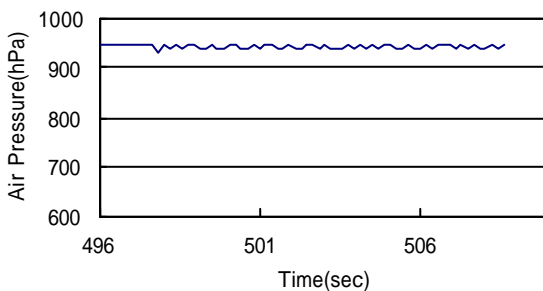
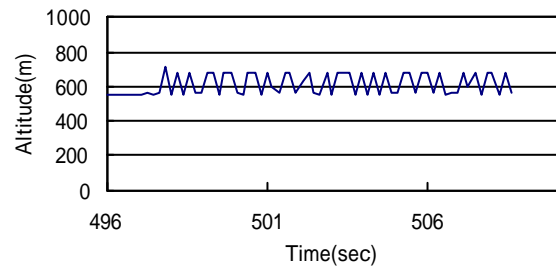


図2.34 BARO-ALT(COMM1CW送信時)



気圧計も比較的ノイズの少ないきれいなデータが得られている。ノイズの大きさは最大で 3bit 程度である。

3. 実験当日のイベント履歴

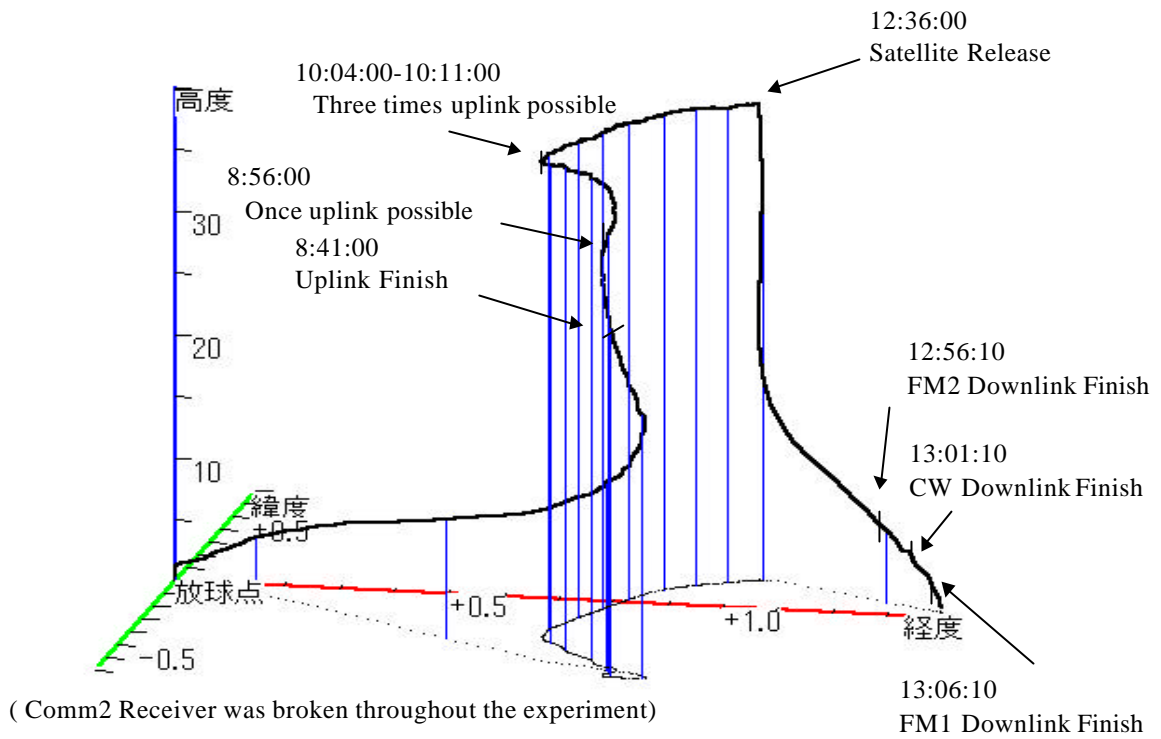
実験当日 5 月 20 日のイベント履歴を下表に示す。

時刻	実験時間(分)	イベント
6:00	-56	電源投入
		CubeSat動作チェック
		宇宙研テレメ回線・測距チェック
6:30ごろ	-27	放球点へ移動
6:56:40	0	放球。実験開始
		三陸局単独運用
7:02	6	三陸局放球後最初のアップリンク成功
7:31	35	東大局、高専局CW受信
7:36	40	東大局、高専局COMM1FM/パケット受信(高専局は音のみ)
7:44:00	48	三陸局単独から全局運用へ移行
7:52:30	56	東大局最初のアップリンク成功
8:41	105	東大局アップリンク途絶
8:56	120	三陸局アップリンク途絶
9:10	134	気球最高高度39kmに。これ以降レベルフライト
9:11	135	菅平局COMM2FM/パケット音のみ受信
9:16	140	菅平局CW受信
10:04	188	三陸局アップリンク復活
10:08	192	東大局アップリンク復活
10:11	195	三陸局・東大局ともアップリンク途絶
11:51	295	菅平局、ダウンリンク受信途絶
12:36	340	気球切り離し
12:51	355	東大局、ダウンリンク受信途絶
13:08:50	372	着水。実験終了

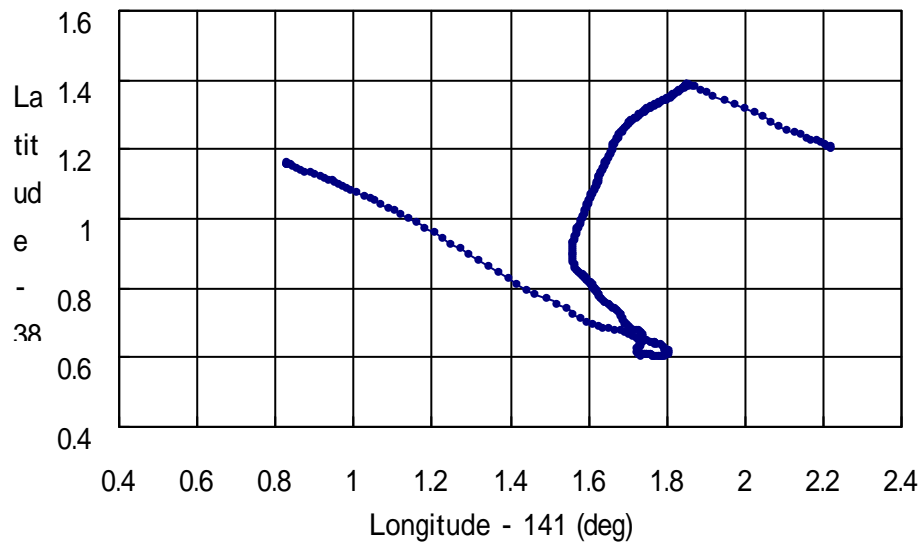
三陸局は、放球から着水までの全実験時間中に COMM1CW・FM, COMM2FM ダウンリンクを受信。ただし、パケットのデコードについては必ずしも完全ではなかった。

東大局はダウンリンク受信の開始から途絶までの間、COMM1CW・FM, COMM2FM ダウンリンクを受信。ただし、パケットのデコードについては必ずしも完全ではなかった。

图 3.1 气球飞行经路(3 次元)



申 3.2 Balloon Trajectory(2 次元)



4. 地上局送受信データ解析

4.1 三陸局送受信データ

表 4.1.1 三陸局ダウンリンクデータ

サイクル	モード	開始時刻	終了時刻	Az [deg]	El [deg]	距離 [km]	自由空間損失[dB]	Sメータ[dB]	スペアナ [dB]	受信電力[dBm]	送受信電力[dBm]	デコード率[%]	LM[d]
1	CW	7:01:20	7:06:20	116.28	17.73	4.10	-97.51	20.0	25.5	-21.5	-84.7		72.233
	FM1	7:06:20	7:11:20	115.81	14.14	10.13	-105.38	9.2	28.5	-18.5	-83.6		46.203
	FM2	7:11:20	7:16:20	117.53	13.60	14.97	-108.77	9.2	28.5	-18.5	-83.0		46.789
2	CW	7:16:20	7:21:20	119.37	12.49	21.73	-112.00	9.2	11.5	-35.5	-99.2		57.747
	FM1	7:21:20	7:26:20	121.40	11.23	30.12	-114.85	9.8	17.5	-29.5	-93.0		36.738
	FM2	7:26:20	7:31:20	123.35	9.85	41.30	-117.59	9.2	17.5	-29.5	-91.8		37.975
3	CW	7:31:20	7:36:20	125.41	8.63	54.79	-120.03	?	?	-	-107.2		49.714
	FM1	7:36:20	7:41:20	126.63	7.95	68.48	-121.98	9.5	25.0	-22.0	-100.2		29.604
	FM2	7:41:20	7:46:20	126.52	7.56	81.62	-123.51	9.1	24.0	-23.0	-97.7		32.058
4	CW	7:46:20	7:51:20	126.23	7.67	89.79	-124.32	7.0	7.5	-39.5	-111.5		45.424
	FM1	7:51:20	7:56:20	125.23	7.98	95.89	-124.90	9.8	18.5	-28.5	-103.1		26.679
	FM2	7:56:20	8:01:20	124.85	8.40	100.42	-125.31	9.2	20.5	-26.5	-99.5		30.257
5	CW	8:01:20	8:06:20	124.68	9.04	102.78	-125.49	7.1	8.5	-38.5	-112.7		44.250
	FM1	8:06:20	8:11:20	124.77	9.65	105.64	-125.75	10.0	18.5	-28.5	-103.9	15	25.838
	FM2	8:11:20	8:16:20	124.95	10.36	107.04	-125.86	9.1	10.5	-36.5	-100.1		29.703
6	CW	8:16:20	8:21:20	125.67	11.24	107.36	-125.87	7.2	7.5	-39.5	-113.1		43.872
	FM1	8:21:20	8:26:20	126.37	12.19	106.94	-125.85	10.1	18.5	-28.5	-104.0	10	25.732
	FM2	8:26:20	8:31:20	126.60	13.24	106.21	-125.79	9.2	13.5	-33.5	-100.0		29.771
7	CW	8:31:20	8:36:20	126.88	14.34	105.49	-125.72	4.6	7.5	-39.5	-112.9		44.024
	FM1	8:36:20	8:4 2	127.11	15.32	105.35	-125.72	10.0	12.5	-34.5	-103.9		25.862
	FM2	8:41:20	8:46:20	127.47	16.39	105.35	-125.72	9.1	19.0	-28.0	-99.9		29.841
8	CW	8:46:20	8:51:20	127.54	17.37	105.59	-125.73	6.1	6.5	-40.5	-112.9		44.016
	FM1	8:51:20	8:56:20	126.56	18.54	104.74	-125.67	10.0	17.5	-29.5	-103.8		25.913
	FM2	8:56:20	9:01:20	125.10	19.51	105.15	-125.71	9.2	16.0	-31.0	-99.9		29.858
9	CW	9:01:20	9:06:20	123.98	20.79	103.83	-125.58	6.4	6.5	-40.5	-112.8		44.162
	FM1	9:06:20	9:11:20	124.10	21.81	102.47	-125.48	10.0	12.0	-35.0	-103.7		26.103
	FM2	9:11:20	9:16:20	123.73	22.45	100.04	-125.27	9.0	13.0	-34.0	-99.5		30.290
10	CW	9:16:20	9:21:20	122.71	22.95	97.95	-125.08			-	-112.3		44.668
	FM1	9:21:20	9:26:20	122.09	23.52	95.82	-124.90	9.9	11.5	-35.5	-103.1		26.686
	FM2	9:26:20	9:31:20	121.61	24.16	93.27	-124.66	9.1	13.5	-33.5	-98.9		30.899
11	CW	9:31:20	9:36:20	121.02	24.77	91.35	-124.47	4.4	3.5	-43.5	-111.7		45.274
	FM1	9:36:20	9:41:20	120.22	25.20	89.94	-124.35	9.8	13.5	-33.5	-102.5		27.236
	FM2	9:41:20	9:46:20	119.58	25.49	88.74	-124.23	9.2	15.5	-31.5	-98.4		31.331
12	CW	9:46:20	9:51:20	118.99	25.77	87.64	-124.11	5.3	5.5	-41.5	-111.3		45.634
	FM1	9:51:20	9:56:20	118.40	26.24	85.83	-123.94	9.8	11.0	-36.0	-102.1		27.642
	FM2	9:56:20	10:01:20	117.86	26.71	84.25	-123.78	9.1	15.5	-31.5	-98.0		31.782
13	CW	10:01:20	10:06:20	116.72	27.27	82.49	-123.58	6.5	8.5	-38.5	-110.8		46.160
	FM1	10:06:20	10:11:20	114.79	27.76	81.03	-123.44	10.2	13.5	-33.5	-101.6		28.142
	FM2	10:11:20	10:16:20	112.66	28.13	80.06	-123.34		15.5	-31.5	-97.5		32.226
14	CW	10:16:20	10:21:20	110.47	28.46	79.32	-123.24	6.7	8.5	-38.5	-110.4		46.501
	FM1	10:21:20	10:26:20	108.12	28.58	78.91	-123.21	9.8	15.5	-31.5	-101.4		28.372
	FM2	10:26:20	10:31:20	105.81	28.62	79.05	-123.23	9.0	13.5	-33.5	-97.4		32.336
15	CW	10:31:20	10:36:20	103.43	28.59	78.96	-123.20	6.2	11.0	-36.0	-110.4		46.540
	FM1	10:36:20	10:41:20	101.06	28.57	78.95	-123.22	9.8	10.0	-37.0	-101.4		28.368
	FM2	10:41:20	10:46:20	99.09	28.42	79.27	-123.25	9.1	12.0	-35.0	-97.4		32.312
16	CW	10:46:20	10:51:20	97.15	28.22	79.66	-123.28	7.3	12.0	-35.0	-110.5		46.464
	FM1	10:51:20	10:56:20	95.49	28.19	79.96	-123.33	9.8	14.5	-32.5	-101.5		28.257
	FM2	10:56:20	11:01:20	93.94	28.19	80.35	-123.37	8.5	15.5	-31.5	-97.6		32.194
17	CW	11:01:20	11:06:20	92.38	28.04	80.55	-123.38	6.2	11.5	-35.5	-110.6		46.367
	FM1	11:06:20	11:11:20	90.80	27.87	81.26	-123.47	11.0	20.0	-27.0	-101.6		28.117
	FM2	11:11:20	11:16:20	88.96	27.58	81.73	-123.52	2?	13.0	-34.0	-97.7		32.046
18	CW	11:16:20	11:21:20	86.93	27.26	82.46	-123.58	6.9	11.0	-36.0	-110.8		46.163
	FM1	11:21:20	11:26:20	84.95	26.83	83.33	-123.69	10.0	13.5	-33.5	-101.9		27.899
	FM2	11:26:20	11:31:20	83.19	26.55	84.28	-123.78		15.5	-31.5	-98.0		31.779
19	CW	11:31:20	11:36:20	81.63	26.12	85.72	-123.92	6.5	11.0	-36.0	-111.1		45.827
	FM1	11:36:20	11:41:20	80.43	25.74	86.88	-124.05	10.0	20.0	-27.0	-102.2		27.536
	FM2	11:41:20	11:46:20	79.64	25.43	87.82	-124.14		16.5	-30.5	-98.3		31.422
20	CW	11:46:20	11:51:20	78.96	25.06	89.19	-124.26	7.0	8.5	-38.5	-111.5		45.482
	FM1	11:51:20	11:56:20	78.20	24.69	90.42	-124.39		19.5	-27.5	-102.6		27.190
	FM2	11:56:20	12:01:20	77.61	24.33	91.33	-124.48	9.1	18.0	-29.0	-98.7		31.082
21	CW	12:01:20	12:06:20	77.31	24.06	92.26	-124.56	6.3	12.0	-35.0	-111.8		45.188
	FM1	12:06:20	12:11:20	76.83	23.73	93.62	-124.70	1?	17.5	-29.5	-102.9	10	26.887
	FM2	12:11:20	12:16:20	76.43	23.28	94.88	-124.81	5?	18.5	-28.5	-99.0		30.750
22	CW	12:16:20	12:21:20	76.11	22.99	96.10	-124.91	7.2	11.0	-36.0	-112.1		44.834
	FM1	12:21:20	12:26:20	75.44	22.70	97.40	-125.04	5?	18.5	-28.5	-103.2		26.544
	FM2	12:26:20	12:31:20	74.84	22.28	98.90	-125.17	9.2	19.5	-27.5	-99.4		30.390
23	CW	12:31:20	12:36:20	74.34	21.97	100.21	-125.27	7.6	6.5	-40.5	-112.5		44.470
	FM1	12:36:20	12:41:20	73.86	14.54	96.32	-124.94	10.0	20.5	-26.5	-103.1	20	26.640
	FM2	12:41:20	12:46:20	74.33	9.47	94.66	-124.79	9.0	18.0	-29.0	-99.0		30.770
24	CW	12:46:20	12:51:20	76.87	6.06	98.40	-125.12	7.8	10.5	-36.5	-112.3		44.628
	FM1	12:51:20	12:56:20	81.77	3.47	107.56	-125.90	10.0	21.0	-26.0	-104.1		25.682
	FM2	12:56:20	13:01:20	85.15	1.52	114.81	-126.47	9.0	14.5	-32.5	-100.7		29.094

- (注1) サイクルとは、COMM1CW,COMM1FM,COMM2FM 送信を各 5 分ずつ行うシーケンスを指す。
- (注2) Az,EI は三陸局から気球への方位角をあらわす。実際のアンテナの指向方向については正確なデータは無い。そのためリンク計算などはアンテナ指向誤差 20°として計算している。実験中は分度器を用いてアンテナを気球に指向させており、意図的にずらしたケース以外はこの程度の誤差以内で気球に指向できていると考えられる。
- (注3) 受信強度に関して。Sメータとは、無線機に付いている受信強度を示すメータであるが、精度や線型性に疑問があり、受信電力の算出には用いていない。今後、航空高専にてSGを用いたキャリブレーションを行う予定である。受信電力の算出には宇宙研からお借りしたハンディスペアナを用いている。これはホイップアンテナがついた携帯用スペクトルアナライザであり、飛んでいる電波の強度や周波数成分を調べられる。ただし、強度のに関してその単位やリファレンスレベルなどが不明である(Attenuation 60dB は確認。リファレンスレベルは-180dBmを仮定)。理論受信強度に関してはリンク式を用いている。ただし、受信アンテナとしてはハンディスペアナについているホイップアンテナを考慮するため、ゲインを 2.15dBとして計算した。また受信アンテナ指向誤差は入れていない。
- (注4) LM: Link Margin については、回線設計のリンク式を用いている。各種パラメータの値は以下のように算出・仮定した。

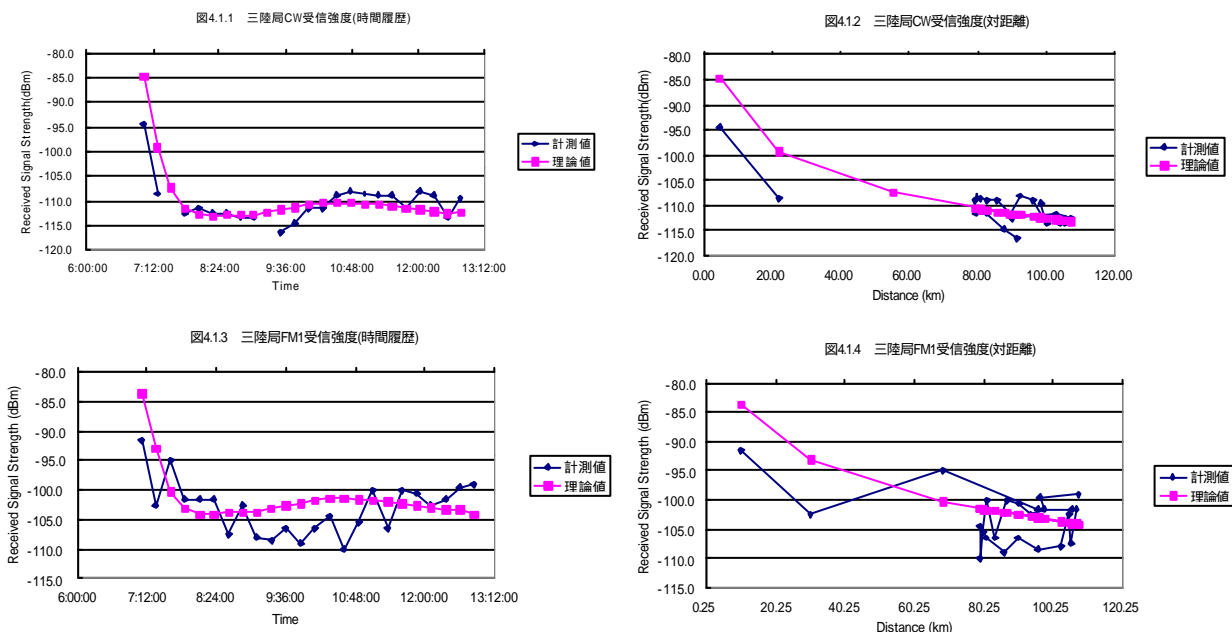
表 4.1.2 三陸局リンク式パラメータ値(ビーコン)

	Symbol	Unit	Beacon	Remark
Frequency	f	MHz	436.850	
Transmit	P	W	0.100	Parameter
Transmit	P	dBW	-10.000	
Transmitter Line Loss	Ll	dB	-3.000	Usually -1dB ~ -3dB
Transmit Antenna Half-Power Beamwidth	t	deg	110.000	Ideal dipole
Peak Transmit Antenna Gain	Gpt	dB	2.148	Ideal dipole
Transmit Antenna Pointing Offset	et	deg	90.000	Uncontrolled
Transmit Antenna Pointing Loss	Lpt	dB	-8.033	
Transmit Antenna Gain	Gt	dB	-5.885	
Equiv. Isotropic Radiated Power	EIRP	dBW	-18.885	
Propagation Path Length	S	km	variable	
Space Loss	Ls	dB	variable	
Propagation & Polarization Loss	La	dB	-0.470	Polarization (-0.3dB)
Peak Receive Antenna Gain	Grp	dB	12.500	GS 435HS20
Receive Antenna Half-Power Beamwidth	r	deg	60.000	GS 435HS20
Receive Antenna Pointing Error	er	deg	20.000	Estimation
Receive Antenna Pointing Loss	Lpr	dB	-1.333	
Receive Antenna Gain	Gr	dB	11.167	
System Noise Temperature	Ts	dBK	25.700	
Carrier-to-Noise Density Ratio	C/N0	dB-Hz	variable	
Threshold	C/N0th	dB-Hz	20.000	
Implementation Loss		dB	-5.000	
Margine		dB	variable	

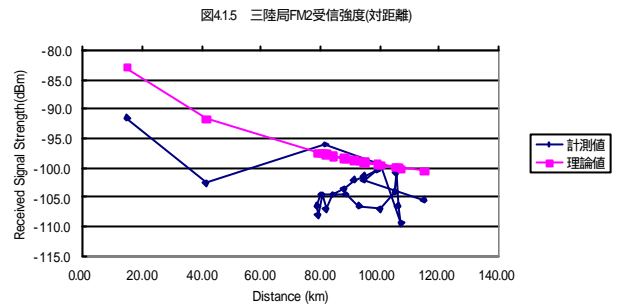
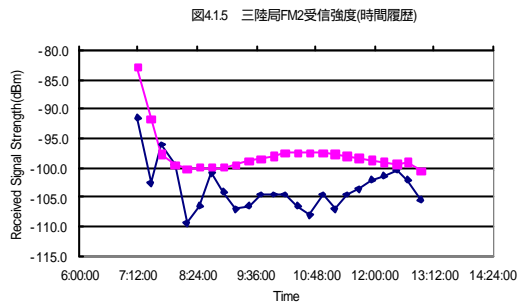
表 4.1.3 三陸局リンク式パラメータ値(テレメトリ)

	Symbol	Unit	Telemetry	Remark
Fr	f	MHz	43.7	0
Transmit	P	W	1 (FM1)	Par F
Transmit	P	dBW	0 (FM1)	
Transmitter Line Loss	Ll	dB	-3	Usually -0dB ~ -3
Transmit Antenna Half-Power Beamwidth	t	deg	110.	Ideal dip 0e
Peak Transmit Antenna Gain	Gpt	dB	2.1	Ideal dip e
Transmit Antenna Po	et	deg	90.000	Uncontrolled
Transmit Antenna Gain	Lpt	dB	-8.03	
Equiv. Isotropic Radiate	Gt	dB	-5.885	
Propagation Path Length	EIRP	dBW	-8.885(F)	
Space Loss	S	km	variable	
Propagation & Polarization Loss	La	dB	-0.470	Polarization (-0.
Peak	Grp	dB	13	GS 436HS20
Receive Antenna Half-Po	r	deg	3.0	GS 435HS20
Rec	er	deg	20.000	Est
Receive Antenna Gain	Lpr	dB	-5.3	
System Noise Temperature	Gr	dB	7.767	
Data Rate	Ts	dBK	25.700	
Bit	R	bps	120 0 0	MX60
Required E	Eb	dB 0	variable	N
Implementation Loss	BER		1.00E-05	
Margine	Req Eb/N0	dB-Hz	13	FSK, B0 -5
		dB	-5.000	
		dB	variable	

図 4.1.1~6 に三陸局でのダウンリンク受信電力の計測値と理論値の比較を示す。ただし、スペアナによる計測値は、リファレンスレベルを-180dBm と仮定している。



左側が時間履歴、右側が距離との相関を示す。いずれも 10dB 程度の範囲に計測と理論値の差が収まっている。計測値が変動する要因としては、CubeSat 側の送信アンテナの回転によるゲ



インの変動・送受信アンテナ間の偏波のズレなどが考えられる。

次に各ダウンリンク系のリンクマーヅンの変化を図 4.1.7~12 に示す。計算条件は表 4.1.2,3,4 のように基本的に最悪ケースを想定している。

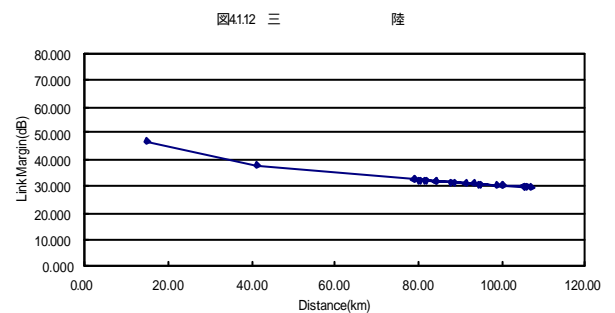
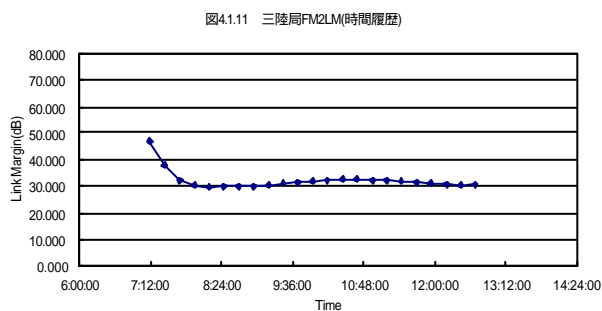
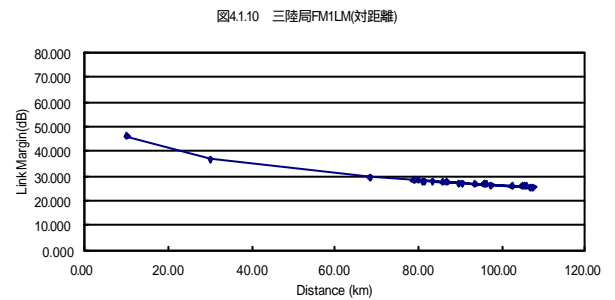
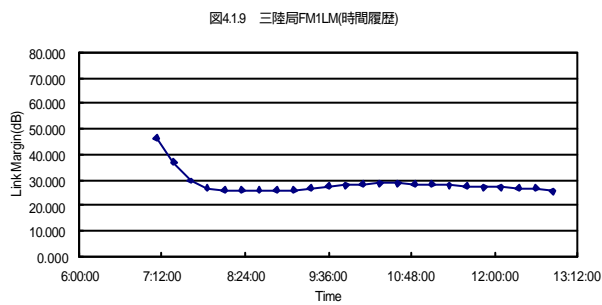
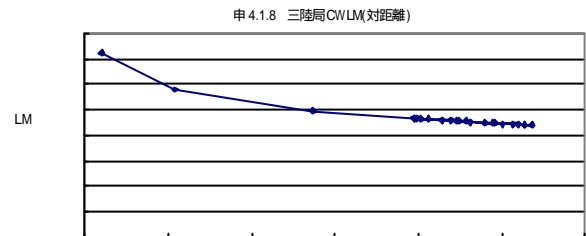
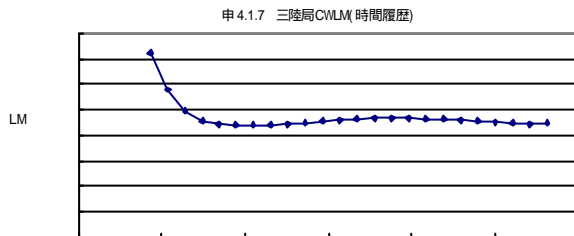


表 4.1.4 三陸局アップリンクデータ(7時~9時)

開始時刻	終了時刻	モード	UL回数	成功回数	送信出力 [dBW]	距離 [km]	自由空間損失 [dB]	RSSI [V]	RSSI [dBm]	理論受信電力 [dBm]	LM [dB]
7:00:00	7:00:30	comm2	4	0	3.010299957	1.55	-79.53			-55.41	63.301
7:02:30	7:03:00	comm1	4	4	3.010299957	2.47	-83.58	0.647	-117	-59.45	59.254
7:04:00	7:04:30	comm1	4	4	3.010299957	3.13	-85.64	0.647	-117	-61.51	57.197
7:06:00	7:06:30	comm1	4	4	3.010299957	5.10	-89.88	0.627	-118	-65.75	52.957
7:08:00	7:08:30	comm1	4	4	3.010299957	7.77	-93.54	0.51	-122	-69.41	49.300
7:10:00	7:10:30	comm1	4	4	3.010299957	10.13	-95.84	0.647	-117	-71.71	46.996
7:12:00	7:12:30	comm2	4	0	3.010299957	12.26	-97.50			-73.37	45.338
7:14:00	7:14:30	comm2	4	0	3.010299957	14.07	-98.69			-74.57	44.142
7:16:00	7:16:30	comm2	4	0	3.010299957	16.13	-99.88			-75.75	42.955
7:16:30	7:17:00	comm1	4	4	3.010299957	17.36	-100.52	0.588	-119.2	-76.39	42.317
7:18:00	7:18:30	comm1	4	4	3.010299957	18.52	-101.08	0.588	-119.2	-76.95	41.755
7:20:00	7:20:30	comm1	4	4	3.010299957	21.73	-102.47	0.549	-120.5	-78.34	40.367
7:22:00	7:22:30	comm1	4	4	3.010299957	24.84	-103.63	0.49	-122.8	-79.50	39.205
7:24:00	7:24:30	comm1	4	4	3.010299957	28.48	-104.82	0.549	-120.5	-80.69	38.017
7:26:00	7:26:30	comm1	6	4	3.010299957	31.97	-105.82	0.41	-126.2	-81.70	37.013
7:28:00	7:28:30	comm2	4	0	3.010299957	36.20	-106.90			-82.77	35.934
7:30:00	7:30:30	comm2	0			41.30	-108.05			-83.92	34.789
7:32:00	7:32:30	comm1	6	6	3.010299957	46.32	-109.04	0.529	-121.2	-84.92	33.793
7:34:00	7:34:30	comm1	4	4	3.010299957	51.79	-110.01	0.529	-121.2	-85.89	32.823
7:36:00	7:36:30	comm1	0			57.68	-110.95			-86.82	31.887
7:38:00	7:38:30	comm1	4	4	3.010299957	63.19	-111.74	0.529	-121.2	-87.61	31.095
7:40:00	7:40:30	comm1	4	4	3.010299957	68.48	-112.44	0.51	-122	-88.31	30.397
7:42:00	7:42:30	comm2	4	0	3.010299957	73.86	-113.10			-88.97	29.740
7:44:00	7:44:30	comm2	4	0	3.010299957	79.44	-113.73			-89.60	29.107
7:47:00	7:47:30	comm1	7	6	3.010299957	85.55	-114.37	0.49	-122.8	-90.24	28.464
7:48:00	7:48:30	comm1	4	4	3.010299957	87.15	-114.53	0.509	-122	-90.41	28.303
7:50:00	7:50:30	comm1	4	4	3.010299957	89.79	-114.79	0.451	-124.2	-90.66	28.043
7:52:00	7:52:30	comm1	4	4	3.010299957	92.13	-115.02	0.471	-123.8	-90.89	27.820
7:54:00	7:54:30	comm1	4	4	3.010299957	94.67	-115.25	0.451	-124.2	-91.12	27.584
7:56:00	7:56:30	comm1	4	2	3.010299957	96.88	-115.45	0.431	-125.2	-91.32	27.383
7:58:00	7:58:30	comm2	4	0	3.010299957	98.55	-115.60			-91.47	27.235
8:00:00	8:00:30	comm2	4	0	3.010299957	100.42	-115.76			-91.64	27.072
8:02:00	8:02:30	comm1	4	4	3.010299957	101.44	-115.85	0.471	-123.8	-91.72	26.984
8:04:00	8:04:30	comm1	4	4	3.010299957	102.54	-115.95	0.49	-122.8	-91.82	26.890
8:06:00	8:06:30	comm1	4	4	3.010299957	103.12	-115.99	0.451	-124.2	-91.87	26.841
8:08:00	8:08:30	comm1	4	3	3.010299957	104.48	-116.11	0.294	-152	-91.98	26.727
8:10:00	8:10:30	comm1	4	4	3.010299957	105.64	-116.20	0.451	-124.2	-92.08	26.631
8:12:00	8:12:30	comm2	0			106.06	-116.24			-92.11	26.597
8:14:00	8:14:30	comm2	0			106.81	-116.30			-92.17	26.536
8:16:00	8:16:30	comm2	0			107.25	-116.34			-92.21	26.500
8:18:00	8:18:30	comm1	4	4	3.010299957	107.52	-116.36	0.431	-125.2	-92.23	26.478
8:20:00	8:20:30	comm1	4	4	3.010299957	107.36	-116.34	0.451	-124.2	-92.22	26.491
8:22:00	8:22:30	comm1	0			107.33	-116.34			-92.21	26.494
8:24:00	8:24:30	comm1	4	4	3.010299957	107.24	-116.33	0.314	-152	-92.21	26.501
8:26:00	8:26:30	comm1	4	2	3.010299957	106.93	-116.31	0.451	-124.2	-92.18	26.526
8:28:00	8:28:30	comm2	0			106.54	-116.28			-92.15	26.558
8:30:00	8:30:30	comm2	0			106.21	-116.25			-92.12	26.585
8:32:00	8:32:30	comm1	4	3	3.010299957	105.80	-116.22	0.431	-125.2	-92.09	26.618
8:34:00	8:34:30	comm1	4	4	3.010299957	105.60	-116.20	0.431	-125.2	-92.07	26.635
8:36:00	8:36:30	comm1	4	3	3.010299957	105.51	-116.19	0.392	-127.5	-92.07	26.642
8:38:00	8:38:30	comm1	4	4	3.010299957	105.34	-116.18	0.412	-126.5	-92.05	26.656
8:40:00	8:40:30	comm1	4	4	3.010299957	105.35	-116.18	0.43	-125.2	-92.05	26.655
8:42:00	8:42:30	comm2	0			105.33	-116.18			-92.05	26.657
8:44:00	8:44:30	comm2	0			105.49	-116.19			-92.06	26.644
8:46:00	8:46:30	comm1	4	0	3.010299957	105.21	-116.17			-92.04	26.667
8:48:00	8:48:30	comm1	4	0	3.010299957	105.44	-116.19			-92.06	26.648
8:50:00	8:50:30	comm1	0		3.010299957	105.59	-116.20			-92.07	26.635
8:52:00	8:52:30	comm1	0		3.010299957	105.12	-116.16			-92.03	26.674
8:54:00	8:54:30	comm1	4	0	3.010299957	104.85	-116.14			-92.01	26.697
8:56:00	8:56:30	comm1	4	0	3.010299957	104.98	-116.15			-92.02	26.686
8:58:00	8:58:30	comm2	0			104.89	-116.14			-92.01	26.693
9:00:00	9:00:30	comm2	0			105.15	-116.16			-92.04	26.672

表 4.1.5 三陸局アップリンクデータ(9時~11時)

開始時刻	終了時刻	モード	UL回数	成功回数	送信出力 [dBW]	距離 [km]	自由空間損失 [dB]	RSSI [V]	RSSI [dBm]	理論受信電力 [dBm]	LM [dB]
9:02:00	9:02:30	comm1	4	0	3.010299957	104.53	-116.11			-91.99	26.723
9:04:00	9:04:30	comm1	4	0	3.010299957	104.35	-116.10			-91.97	26.738
9:06:00	9:06:30	comm1	0			103.56	-116.03			-91.90	26.804
9:08:00	9:08:30	comm1	4	0	3.010299957	102.83	-115.97			-91.84	26.866
9:10:00	9:10:30	comm1	4	0	3.010299957	102.47	-115.94			-91.81	26.896
9:12:00	9:12:30	comm2	0			101.50	-115.86			-91.73	26.979
9:14:00	9:14:30	comm2	0			100.51	-115.77			-91.64	27.064
9:16:00	9:16:30	comm2	0			99.67	-115.70			-91.57	27.137
9:18:00	9:18:30	comm1	0			98.79	-115.62			-91.49	27.214
9:20:00	9:20:30	comm1	0			97.95	-115.55			-91.42	27.288
9:22:00	9:22:30	comm1	4	0	3.010299957	97.21	-115.48			-91.35	27.354
9:24:00	9:24:30	comm1	4	0	3.010299957	96.36	-115.41			-91.28	27.430
9:26:00	9:26:30	comm1	0			95.44	-115.32			-91.19	27.513
9:28:00	9:28:30	comm2	0			94.29	-115.22			-91.09	27.619
9:30:00	9:30:30	comm2	0			93.27	-115.12			-91.00	27.713
9:32:00	9:32:30	comm1	0			92.48	-115.05			-90.92	27.787
9:34:00	9:34:30	comm1	4	0	3.010299957	91.67	-114.97			-90.84	27.863
9:36:00	9:36:30	comm1	4	0	3.010299957	91.02	-114.91			-90.78	27.925
9:38:00	9:38:30	comm1	0			90.46	-114.86			-90.73	27.979
9:40:00	9:40:30	comm1	0			89.94	-114.81			-90.68	28.029
9:42:00	9:42:30	comm2	0			89.27	-114.74			-90.61	28.094
9:44:00	9:44:30	comm2	0			88.98	-114.71			-90.59	28.122
9:46:00	9:46:30	comm2	0			88.40	-114.66			-90.53	28.179
9:48:00	9:48:30	comm1	4	0	3.010299957	87.92	-114.61			-90.48	28.226
9:50:00	9:50:30	comm1	4	0	3.010299957	87.64	-114.58			-90.45	28.254
9:52:00	9:52:30	comm1	0			86.84	-114.50			-90.37	28.334
9:54:00	9:54:30	comm1	0			86.26	-114.44			-90.32	28.392
9:56:00	9:56:30	comm1	0			85.68	-114.38			-90.26	28.450
9:58:00	9:58:30	comm2	0			85.05	-114.32			-90.19	28.514
10:00:00	10:00:30	comm2	0			84.25	-114	4		-90.11	228.597
10:02:00	10:02:30	comm1	0			83.58	-114.17			-90.04	28.666
10:04:00	10:04:30	comm1	4	4	3.010299957	82.84	-114.09	0.471	-123.8	-89.97	28.743
10:06:00	10:06:30	comm1	4	0	3.010299957	82.25	-114.03			-89.90	28.805
10:08:00	10:08:30	comm1	4	4	3.010299957	81.38	-113.94	0.471	-123.8	-89.81	28.898
10:10:00	10:10:30	comm1	4	4	3.010299957	81.03	-113.90	0.471	-123.8	-89.77	28.935
10:12:00	10:12:30	comm2	0			80.65	-113.86			-89.73	28.976
10:14:00	10:14:30	comm2	0			80.28	-113.82			-89.69	29.016
10:16:00	10:16:30	comm2	0			79.73	-113.76			-89.63	29.076
10:18:00	10:18:30	comm1	4	0	3.010299957	79.52	-113.74			-89.61	29.098
10:20:00	10:20:30	comm1	4	0	3.010299957	79.32	-113.71			-89.59	29.120
10:22:00	10:22:30	comm1	4	0	3.010299957	79.14	-113.70			-89.57	29.140
10:24:00	10:24:30	comm1	0			78.98	-113.68			-89.55	29.158
10:26:00	10:26:30	comm1	0			78.90	-113.67			-89.54	29.166
10:28:00	10:28:30	comm2	0			79.00	-113.68			-89.55	29.155
10:30:00	10:30:30	comm2	0			79.05	-113.69			-89.56	29.150
10:32:00	10:32:30	comm1	4	0	3.010299957	79.05	-113.69			-89.56	29.150
10:34:00	10:34:30	comm1	0			79.06	-113.69			-89.56	29.149
10:36:00	10:36:30	comm1	0			79.02	-113.68			-89.55	29.153
10:38:00	10:38:30	comm1	0			79.09	-113.69			-89.56	29.146
10:40:00	10:40:30	comm1	0			78.95	-113.67			-89.55	29.161
10:42:00	10:42:30	comm2	0			79.09	-113.69			-89.56	29.146
10:44:00	10:44:30	comm2	0			79.22	-113.70			-89.58	29.131
10:46:00	10:46:30	comm2	0			79.34	-113.72			-89.59	29.118
10:48:00	10:48:30	comm1	0			79.40	-113.72			-89.60	29.112
10:50:00	10:50:30	comm1	0			79.66	-113.75			-89.63	29.083
10:52:00	10:52:30	comm1	0			79.77	-113.76			-89.64	29.071
10:54:00	10:54:30	comm1	0			79.88	-113.78			-89.65	29.059
10:56:00	10:56:30	comm1	0			80.02	-113.79			-89.66	29.044
10:58:00	10:58:30	comm2	0			80.11	-113.80			-89.67	29.034
11:00:00	11:00:30	comm2	0			80.35	-113.83			-89.70	29.008

表 4.1.6 三陸局アップリンクデータ(11 時 ~ 13 時)

開始時刻	終了時刻	モード	UL回数	成功回数	送信出力 [dBW]	距離[km]	自由空間損失[dB]	RSSI [V]	RSSI [dBm]	理論受信電力[dBm]	LM [dB]
11:02:00	11:02:30	comm1	4	0	3.010299957	80.31	-113.82			-89.70	29.013
11:04:00	11:04:30	comm1	0			80.50	-113.84			-89.72	28.992
11:06:00	11:06:30	comm1	0			80.60	-113.85			-89.73	28.981
11:08:00	11:08:30	comm1	0			80.95	-113.89			-89.76	28.944
11:10:00	11:10:30	comm1	0			81.26	-113.92			-89.80	28.910
11:12:00	11:12:30	comm2	0			81.27	-113.93			-89.80	28.909
11:14:00	11:14:30	comm2	0			81.54	-113.95			-89.83	28.881
11:16:00	11:16:30	comm2	0			81.86	-113.99			-89.86	28.847
11:18:00	11:18:30	comm1	0			82.26	-114.03			-89.90	28.804
11:20:00	11:20:30	comm1	4	0	3.010299957	82.46	-114.05			-89.93	28.783
11:22:00	11:22:30	comm1	0			82.77	-114.08			-89.96	28.750
11:24:00	11:24:30	comm1	4	0	3.010299957	83.00	-114.11			-89.98	28.726
11:26:00	11:26:30	comm1	0			83.48	-114.16			-90.03	28.676
11:28:00	11:28:30	comm2	0			84.00	-114.21			-90.09	28.622
11:30:00	11:30:30	comm2	0			84.28	-114.24			-90.11	28.593
11:32:00	11:32:30	comm1	4	0	3.010299957	84.70	-114.28			-90.16	28.550
11:34:00	11:34:30	comm1	0			85.21	-114.34			-90.21	28.498
11:36:00	11:36:30	comm1	4	0	3.010299957	85.76	-114.39			-90.27	28.442
11:38:00	11:38:30	comm1	0			86.36	-114.45			-90.33	28.382
11:40:00	11:40:30	comm1	0			86.88	-114.51			-90.38	28.330
11:42:00	11:42:30	comm2	0			87.21	-114.54			-90.41	28.297
11:44:00	11:44:30	comm2	0			87.57	-114.57			-90.45	28.261
11:46:00	11:46:30	comm2	0			88.02	-114.62			-90.49	28.216
11:48:00	11:48:30	comm1	0			88.57	-114.67			-90.55	28.162
11:50:00	11:50:30	comm1	0			89.19	-114.73			-90.61	28.102
11:52:00	11:52:30	comm1	0			89.61	-114.77			-90.65	28.061
11:54:00	11:54:30	comm1	0			90.01	-114.81			-90.69	28.022
11:56:00	11:56:30	comm1	0			90.43	-114.85			-90.73	27.982
11:58:00	11:58:30	comm2	0			90.91	-114.90			-90.77	27.936
12:00:00	12:00:30	comm2	0			91.33	-114.94			-90.81	27.896
12:02:00	12:02:30	comm1	4	0	3.010299957	91.73	-114.98			-90.85	27.858
12:04:00	12:04:30	comm1	0			92.11	-115.01			-90.89	27.822
12:06:00	12:06:30	comm1	0			92.49	-115.05			-90.92	27.786
12:08:00	12:08:30	comm1	0			92.99	-115.10			-90.97	27.739
12:10:00	12:10:30	comm1	4	0	3.010299957	93.62	-115.15			-91.03	27.681
12:12:00	12:12:30	comm2	0			94.06	-115.20			-91.07	27.640
12:14:00	12:14:30	comm2	0			94.70	-115.25			-91.13	27.581
12:16:00	12:16:30	comm2	0			95.10	-115.29			-91.16	27.544
12:18:00	12:18:30	comm1	0			95.56	-115.33			-91.21	27.502
12:20:00	12:20:30	comm1	0			96.10	-115.38			-91.25	27.453
12:22:00	12:22:30	comm1	0			96.49	-115.42			-91.29	27.418
12:24:00	12:24:30	comm1	4	0	3.010299957	97.23	-115.48			-91.36	27.352
12:26:00	12:26:30	comm1	0			97.73	-115.53			-91.40	27.307
12:28:00	12:28:30	comm2	0			98.33	-115.58			-91.45	27.254
12:30:00	12:30:30	comm2	0			98.90	-115.63			-91.50	27.204
12:32:00	12:32:30	comm1	4	0	3.010299957	99.52	-115.69			-91.56	27.150
12:34:00	12:34:30	comm1	0			100.01	-115.73			-91.60	27.107
12:36:00	12:36:30	comm1	0			100.48	-115.77			-91.64	27.066
12:38:00	12:38:30	comm1	4	0	3.010299957	98.51	-115.60			-91.47	27.238
12:40:00	12:40:30	comm1	4	0	3.010299957	96.32	-115.40			-91.27	27.434
12:42:00	12:42:30	comm2	4	0	3.010299957	95.19	-115.30			-91.17	27.536
12:44:00	12:44:30	comm2	4	0	3.010299957	94.53	-115.24			-91.11	27.597
12:46:00	12:46:30	comm2	4	0	3.010299957	95.03	-115.28			-91.16	27.551
12:48:00	12:48:30	comm1	4	0	3.010299957	96.24	-115.39			-91.27	27.441
12:50:00	12:50:30	comm1	4	0	3.010299957	98.40	-115.59			-91.46	27.248
12:52:00	12:52:30	comm1	4	0	3.010299957	102.12	-115.91			-91.78	26.926
12:54:00	12:54:30	comm1	0			105.81	-116.22			-92.09	26.617
12:56:00	12:56:30	comm1	0			109.09	-116.48			-92.36	26.352
12:58:00	12:58:30	comm2	0			112.08	-116.72			-92.59	26.117

(注1) アップリンクの送信機には、ハンディトランシーバの TH-D7(High モード)を用いた。出力は約 2W である。

(注2) RSSI 電圧から電力への変換は西無線 2 号機の RSSI 特性曲線を使用した。(図 4.1.13 参照、実験には 2 号機を使用)

図4.1.13 RSSI出力レベル(V)

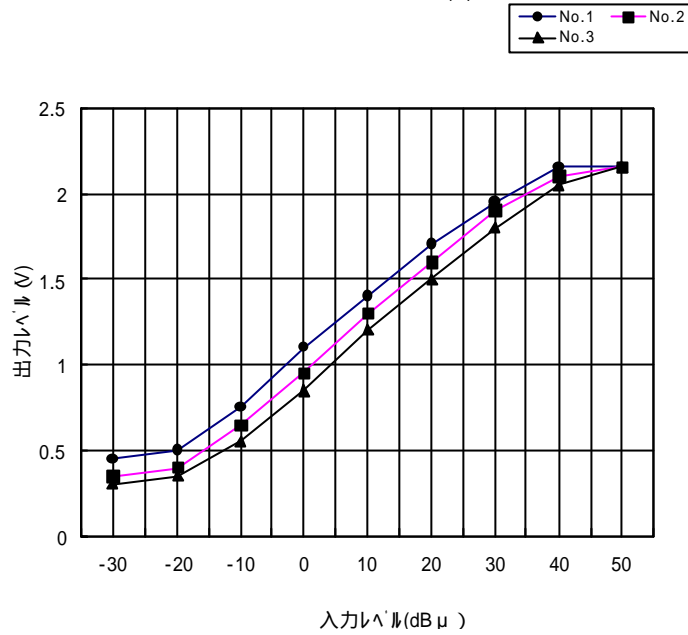


表 4.1.7 三陸局リンク式パラメータ値(アップリンク)

	Symbol	Unit	Uplink	Remark
Frequency	f	MHz	145.835	
Transmit	P	W	2.000	Parameter
Transmit	P	dBW	3.010	
Transmitter Line Loss	Ll	dB	-3.000	Usually -1dB ~ -3dB
Transmit Antenna Half-Power Beamwidth	t	deg	64.000	GS 144HS12
Peak Transmit Antenna Gain	G _{pt}	dB	8.000	GS 144HS12
Transmit Antenna Pointing Offset	et	deg	20.000	Assumption
Transmit Antenna Pointing Loss	L _{pt}	dB	-1.172	
Transmit Antenna Gain	G _t	dB	6.828	
Equiv. Isotropic Radiated Power	EIRP	dBW	6.838	
Propagation Path Length	S	km	variable	
Space Loss	L _s	dB	variable	
Propagation & Polarization Loss	L _a	dB	-0.470	Polarization (-0.3dB)
Peak Receive Antenna Gain	G _{rp}	dB	-2.521	Monopole
Receive Antenna Half-Power Beamwidth	r	deg	100.000	Monopole
Receive Antenna Pointing Error	er	deg	90.000	Uncontrolled
Receive Antenna Pointing Loss	L _{pr}	dB	-9.720	
Receive Antenna Gain	G _r	dB	-12.241	
System Noise Temperature	T _s	dBK	31.100	
Data Rate	R	bps	1200.000	
E _b 0	E _b N	dB 0	variable	N
Bit E	BER		1.00E-05	
Required E _b /N ₀	Req E _b /N ₀	dB-Hz	13.000	FSK, BER=10 ⁻⁵
Implementation Loss		dB	-5.000	
Margine		dB	variable	

図41.14 三陸局アップリンクCubeSat受信強度

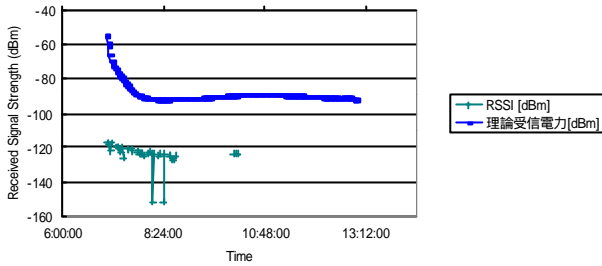
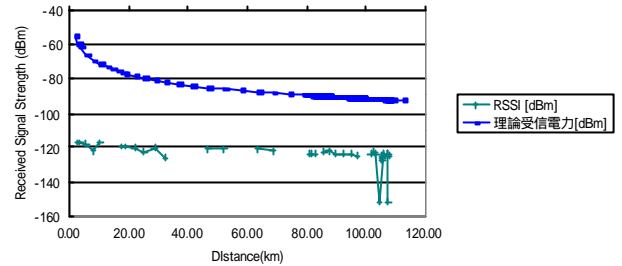


図41.15 三陸局アップリンクCubeSat受信強度



CubeSat のアップリンク受信強度はリンク式から導かれる計算値よりも実測値が 30 ~ 40dB も小さい。考えられる原因としては、(1)受信アンテナの整合が取れていない事の影響。(2)偏波のズレの影響をリンク式に反映できていない(3)ハンディトランシーバは電池駆動であるため、電池残量によっては正しい送信出力が出ない(4)何らかの故障により RSSI の出力が全体的に低下した可能性がある。

(4)については、RSSI の飛行時の出力が、地上試験におけるデータ(図 2.1,2.2)と明らかに異なるふるまいをしている。

しかし、40dB というのは非常に大きな値であるため、複数の要因が関係している可能性がある。

4.2 東大局送受信データ

表 4.2.1 東大局ダウンリンクデータ

サイクル	モード	開始時刻	終了時刻	Az/Fレナ [deg]	Az気球 [deg]	EI/Fレナ [deg]	EI気球 [deg]	アンテナ指向誤差[deg]	Lpr[dB]	距離 [km]	自由空間損失[dB]	S [d]	受信状態	受信電力 [dBm]	理論受信電力[dB]	LM [dB]
1	CW	7:01:20	7:06:20	30	24.94	10	-1.74	12.7752778	0	422.80	-137.78		x	-132.1343	20.76565	
	FM1	7:06:20	7:11:20	30	25.54	10	-1.63	12.4488324	-2.2113	422.99	-137.80		x	-111.9312	17.17695	
	FM2	7:11:20	7:16:20	30	26.31	10	-1.45	12.0248517	-2.0632	422.74	-137.79		x	-107.799	21.30914	
2	CW	7:16:20	7:21:20	30	26.99	10	-1.3	11.6905191	0	422.21	-137.77		x	-132.1222	20.77778	
	FM1	7:21:20	7:26:20	30	27.99	10	-1.13	11.3084028	-1.8247	421.22	-137.76		x	-111.5082	17.59996	
	FM2	7:26:20	7:31:20	30	29.22	10	-0.95	10.9774877	-1.7195	419.76	-137.73		x	-107.3938	21.71435	
3	CW	7:31:20	7:36:20	30	30.89	10	-0.78	10.8163309	0	417.66	-137.67			-132.0281	20.8719	
	FM1	7:36:20	7:41:20	30	32.81	10	-0.57	10.9336602	-1.7058	416.00	-137.65	4	-105.3699	-111.281	17.8272	
	FM2	7:41:20	7:46:20	30	34.65	10	-0.38	11.3646282	-1.8429	416.10	-137.65	9	-96.81191	-107.4412	21.667	
4	CW	7:46:20	7:51:20	30	36.25	10	-0.19	11.9376793	0	416.78	-137.65	5	-112.4123	-132.0098	20.89022	
	FM1	7:51:20	7:56:20	30	37.13	10	-0.01	12.2686485	-2.1477	418.76	-137.71	9	-96.81191	-111.7804	17.3278	
	FM2	7:56:20	8:01:20	30	37.89	10	0.17	12.5791873	-2.2578	419.82	-137.73	38	-81.61126	-107.9335	21.17474	
5	CW	8:01:20	8:06:20	30	38.34	10	0.36	12.7181102	0	420.40	-137.73	9	-96.96833	-132.0849	20.8151	
	FM1	8:06:20	8:11:20	30	38.61	10	0.56	12.7454333	-2.3179	420.59	-137.75	9	-96.81191	-111.9884	17.11975	
	FM2	8:11:20	8:16:20	走査	38.9	10	0.79	-	-	420.49	-137.74	15	-91.42098	-	-	
6	CW	8:16:20	8:21:20	15	39.07	10	1	25.5684611	0	419.32	-137.71	4	-118.2754	-132.0626	20.83744	
	FM1	8:21:20	8:26:20	65	39.01	10	1.25	27.2781423	-10.617	418.13	-137.70	6	-101.0909	-120.2369	8.87128	
	FM2	8:26:20	8:31:20	80	38.89	10	1.48	41.7343246	-24.853	417.80	-137.69	9	-96.81191	-130.4863	-1.37816	
7	CW	8:31:20	8:36:20	走査	38.69	10	1.73	-	-	417.41	-137.67	6	-107.6218	-132.0229	20.8771	
	FM1	8:36:20	8:41:20	120	38.59	10	1.98	81.1988629	-94.077	417.13	-137.67	7	-99.46412	-203.6762	-74.568	
	FM2	8:41:20	8:46:20	220	38.5	10	2.24	167.669199	-401.14	416.68	-137.67	9	-96.81191	-508.7466	-377.638	
8	CW	8:46:20	8:51:20	220	38.42	10	2.48	167.421204	0	416.74	-137.65	6	-107.6218	-132.009	20.89105	
	FM1	8:51:20	8:56:20	走査	38.31	10	2.72	-	-	418.58	-137.70	variable	-	-	-	
	FM2	8:56:20	9:01:20	走査	38.19	10	2.94	-	-	421.27	-137.76	38	-81.61126	-	-	
9	CW	9:01:20	9:06:20	38	38.01	10	3.13	6.87000717	0	423.20	-137.79	7	-103.5716	-132.1426	20.75744	
	FM1	9:06:20	9:11:20	38	37.73	10	3.33	6.67538264	-0.6358	422.99	-137.80	20	-88.38497	-110.3558	18.7524	
	FM2	9:11:20	9:16:20	30	37.43	10	3.45	9.86344269	-1.3882	423.39	-137.80		-	-107.1373	21.97084	
10	CW	9:16:20	9:21:20	30	37.08	10	3.42	9.62709513	0	424.79	-137.82	9	-96.96833	-132.1751	20.72487	
	FM1	9:21:20	9:26:20	走査	36.77	10	3.4	-	-	425.51	-137.85	20	-88.38497	-	-	
	FM2	9:26:20	9:31:20	走査	36.41	10	3.39	-	-	425.94	-137.86	45	-79.82694	-	-	
11	CW	9:31:20	9:36:20	30	36.06	10	3.37	8.95211015	0	426.59	-137.86			-132.2119	20.68814	
	FM1	9:36:20	9:41:20	走査	35.78	10	3.37	-	-	427.54	-137.89			-	-	
	FM2	9:41:20	9:46:20	走査	35.56	10	3.34	-	-	428.27	-137.90			-	-	
12	CW	9:46:20	9:51:20	30	35.4	10	3.31	8.57263918	0	428.91	-137.90			-132.259	20.64103	
	FM1	9:51:20	9:56:20	30	35.19	10	3.28	8.46772654	-1.0231	429.43	-137.93			-110.8743	18.23388	
	FM2	9:56:20	10:01:20	30	34.94	10	3.26	8.33527375	-0.9913	429.88	-137.94			-106.8727	22.23563	
13	CW	10:01:20	10:06:20	走査	34.68	10	3.24	-	-	431.03	-137.95			-132.3018	20.5982	
	FM1	10:06:20	10:11:20	30	34.38	10	3.2	8.07141373	-0.9296	433.13	-138.00			-110.8553	18.25288	
	FM2	10:11:20	10:16:20	走査	34.15	10	3.15	-	-	435.49	-138.05			-	-	
14	CW	10:16:20	10:21:20	30	33.91	10	3.11	7.90834888	0	437.87	-138.08			-132.4386	20.46145	
	FM1	10:21:20	10:26:20	走査	33.77	10	3.07	-	-	440.48	-138.15			-	-	
	FM2	10:26:20	10:31:20	30	33.65	10	3.04	7.84700304	-0.8786	443.16	-138.20			-107.0242	22.08401	
15	CW	10:31:20	10:36:20	30	33.53	10	3.01	7.81953718	0	445.81	-138.24			-132.5946	20.30536	
	FM1	10:36:20	10:41:20	30	33.38	10	2.95	7.80812324	-0.8699	448.45	-138.30			-111.0976	18.01063	
	FM2	10:41:20	10:46:20	30	33.27	10	2.91	7.79819357	-0.8677	450.75	-138.35			-107.1608	21.9474	
16	CW	10:46:20	10:51:20	30	33.17	10	2.86	7.80314705	0	453.07	-138.38			-132.735	20.16505	
	FM1	10:51:20	10:56:20	30	33.1	10	2.84	7.79375365	-0.8667	455.00	-138.43			-111.2203	17.88788	
	FM2	10:56:20	11:01:20	30	33.01	10	2.82	7.77736413	-0.8631	456.84	-138.46			-107.2727	21.83546	
17	CW	11:01:20	11:06:20	30	32.92	10	2.8	7.76201848	0	458.61	-138.49	9	-96.96833	-132.8405	20.05948	
	FM1	11:06:20	11:11:20	30	32.85	10	2.77	7.76426925	-0.8602	460.67	-138.54			-111.3213	17.78685	
	FM2	11:11:20	11:16:20	30	32.76	10	2.75	7.75085464	-0.8572	462.91	-138.58			-107.3815	21.72669	
18	CW	11:16:20	11:21:20	30	32.66	10	2.7	7.76332542	0	465.47	-138.61			-132.9695	19.93052	
	FM1	11:21:20	11:26:20	30	32.57	10	2.65	7.78061324	-0.8638	468.10	-138.68	30	-84.10595	-111.4639	17.64425	
	FM2	11:26:20	11:31:20	30	32.49	10	2.6	7.8023458	-0.8686	470.52	-138.72	38	-81.61126	-107.5346	21.57363	
19	CW	11:31:20	11:36:20	30	32.42	10	2.57	7.80914186	0	473.11	-138.76			-133.1109	19.78911	
	FM1	11:36:20	11:41:20	30	32.41	10	2.54	7.83466713	-0.8758	475.16	-138.81	12	-93.7759	-111.606	17.50218	
	FM2	11:41:20	11:46:20	30	32.4	10	2.52	7.85070229	-0.8794	476.67	-138.83	20	-88.38497	-107.6582	21.45004	
20	CW	11:46:20	11:51:20	30	32.43	10	2.51	7.86932534	0	478.37	-138.85	9	-96.96833	-133.2069	19.69307	
	FM1	11:51:20	11:56:20	30	32.46	10	2.5	7.88802995	-0.8878	480.09	-138.90	30	-84.10595	-111.7076	17.40056	
	FM2	11:56:20	12:01:20	30	32.47	10	2.47	7.91964865	-0.8949	481.43	-138.92	18	-89.49688	-107.76	21.34822	
21	CW	12:01:20	12:06:20	30	32.51	10	2.44	7.96055108	0	482.47	-138.93	9	-96.96833	-133.2811	19.61895	
	FM1	12:06:20	12:11:20	30	32.56	10	2.42	7.99521829	-0.9121	484.02	-138.97	22	-87.37913	-111.8027	17.30545	
	FM2	12:11:20	12:16:20	30	32.62	10	2.39	8.04277435	-0.923	485.47	-138.99	18	-89.49688	-107.8606	21.24759	
22	CW	12:16:20	12:21:20	30	32.68	10	2.37	8.08115394	0	486.76	-139.00	9	-96.96833	-133.3579	19.54206	
	FM1	12:21:20	12:26:20	30	32.72	10	2.36	8.103766	-0.937	488.48	-139.05	38	-81.61126	-111.9073	17.20085	
	FM2	12:26:20	12:31:20	30	32.77	10	2.34	8.13929671	-0.9453	490.34	-139.08	45	-79.82694	-107.9696	21.1386	
23	CW	12:31:20	12:36:20	30	32.81	10	2.31	8.18103169	0	491.92	-139.09	8	-100.0631	-133.4495	19.45046	
	FM1	12:36:20	12:41:20	30	32.82	10	2.04	8.43880545	-1.0161	491.43	-139.10	40	-81.06994	-112.0387	17.06947	
	FM2	12:41:20	12:46:20	30	32.78	10	0.26	10.1249829	-1.4628	490.44	-139.08	15-40	-	-108.4888	20.61934	
24	CW	12:46:20	12:51:20	30	33.04	10	-0.52	10.9463485	0	490.74	-139.07	0		-133.4287	19.47132	
	FM1	12:51:20	12:56:2													

いため、一般的な製品の値である 25dB を用いて理論受信電力を算出している。
 (注4) リンク式のパラメータは表 4.2.2,3 の通りである。

表 4.2.2 東大局 CW ダウンリンクパラメータ値

	Symbol	Unit	Beacon	Remark
Frequency	f	MHz	436.850	
Transmit	P	W	0.100	Parameter
Transmit	P	dBW	-10.000	
Transmitter Line Loss	Ll	dB	-3.000	Usually -1dB ~ -3dB
Transmit Antenna Half-Power Beamwidth	t	deg	110.000	Ideal dipole
Peak Transmit Antenna Gain	Gpt	dB	2.148	Ideal dipole
Transmit Antenna Pointing Offset	et	deg	90.000	Uncontrolled
Transmit Antenna Pointing Loss	Lpt	dB	-8.033	
Transmit Antenna Gain	Gt	dB	-5.885	
Equiv. Isotropic Radiated Power	EIRP	dBW	-18.885	
Propagation Path Length	S	km	variable	
Space Loss	Ls	dB	variable	
Propagation & Polarization Loss	La	dB	-0.470	Polarization (-0.3dB)
Peak Receive Antenna Gain	Grp	dB	9.000	GP
Receive Antenna Half-Power Beamwidth	r	deg	?	GP
Receive Antenna Pointing Error	er	deg	0.000	Estimation
Receive Antenna Pointing Loss	Lpr	dB	-	
Receive Antenna Gain	Gr	dB	0.000	Estimation
System Noise Temperature	Ts	dBK	25.700	
Carrier-to-Noise Density Ratio	C/N0	dB-Hz	variable	
Threshold	C/N0th	dB-Hz	20.000	
Implementation Loss		dB	-5.000	
Margine		dB	variable	

表 4.2.3 東大局 FM ダウンリンクパラメータ値

	Symbol	Unit	Telemetry	Remark
Frequency	f	MHz	437.490	
Transmit	P	W	1(FM1)/2(FM2)	Parameter
Transmit	P	dBW	0(FM1)/3.010(FM2)	
Transmitter Line Loss	Ll	dB	-3.000	Usually -1dB ~ -3dB
Transmit Antenna Half-Power Beamwidth	t	deg	110.000	Ideal dipole
Peak Transmit Antenna Gain	Gpt	dB	2.148	Ideal dipole
Transmit Antenna Pointing Offset	et	deg	90.000	Uncontrolled
Transmit Antenna Pointing Loss	Lpt	dB	-8.033	
Transmit Antenna Gain	Gt	dB	-5.885	
Equiv. Isotropic Radiated Power	EIRP	dBW	-8.885(FM1) / -5.875(FM2)	
Propagation Path Length	S	km	variable	
Space Loss	Ls	dB	variable	
Propagation & Polarization Loss	La	dB	-0.470	Polarization (-0.3dB)
Peak Receive Antenna Gain	Grp	dB	13.400	GS 435HS20
Receive Antenna Half-Power Beamwidth	r	deg	29.000	GS 435HS20
Receive Antenna Pointing Error	er	deg	variable	
Receive Antenna Pointing Loss	Lpr	dB	variable	
Receive Antenna Gain	Gr	dB	variable	
System Noise Temperature	Ts	dBK	25.700	
Data Rate	R	bps	1200.000	MX614
Eb	Eb	dB	0	N
Bit	BER		1.00E-05	
Required Eb/N0	Req Eb/N0	dB-Hz	13.000	FSK, BER=10 ⁻⁵
Implementation Loss		dB	-5.000	
Margine		dB	variable	

図421 東大局CW受信強度(時間履歴)

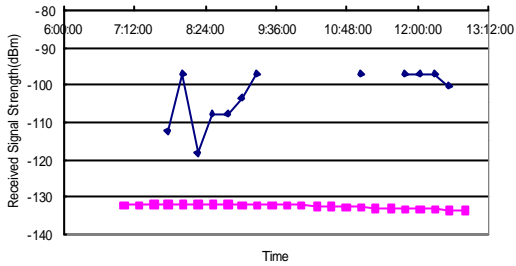


図422 東大局CW受信強度(対距離)

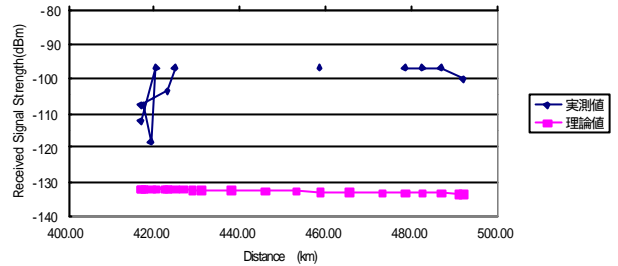


図423 東大局FM1受信強度(時間履歴)

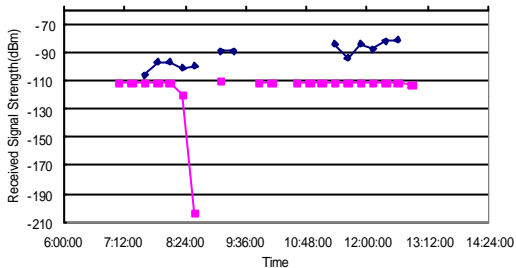


図424 東大局FM1受信強度(対距離)

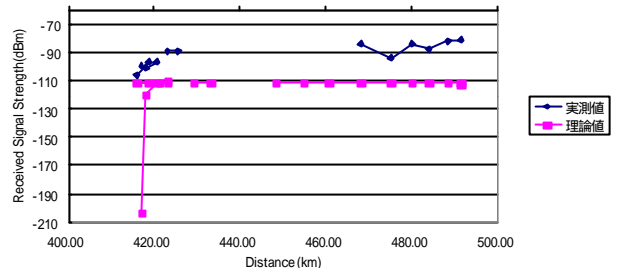


図425 東大局FM2受信強度(時間履歴)

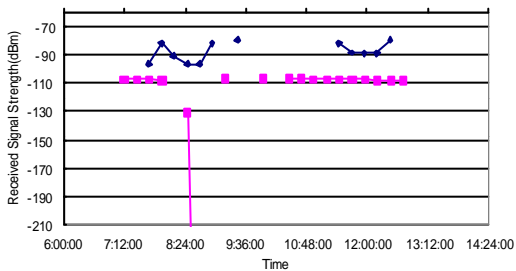
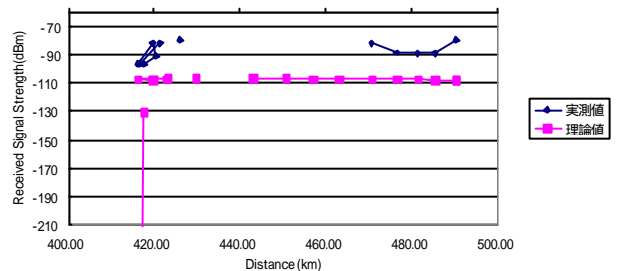


図426 東大局FM2受信強度(対距離)



全体的に計測値のほうが理論値を上回る.CW に関しては最大 35dB 程度、FM1,2 については 20 ~ 30dB 程度計測値のほうが受信強度が強い.この要因として考えられるのは、

- (1)東大局アンテナ直下のプリアンプの効果。一般的なプリアンプのスペックである 25dB のゲインを用いて計算しているが、実際の増幅率を計算する必要がある。
- (2)S メータの振れの誤差、非線形性.SG を用いた較正試験である程度確かな値が求められる。
- (3)理論値は条件の悪いケースで計算しているため、低い値が出る傾向にある.特にアンテナ指向誤差の式： $-12 (e/\theta)^2$ [dB] (e：誤差角， θ ：半値幅)はワイヤーアンテナでも有効か検討の必要あり。

図427 東大局CWリンクマージン(時間履歴)

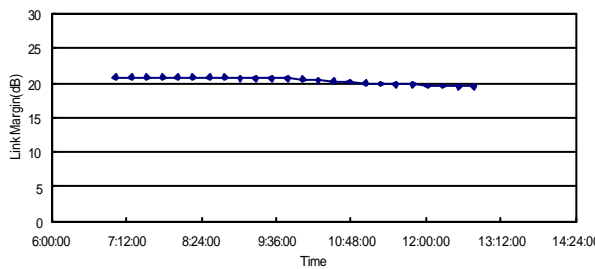
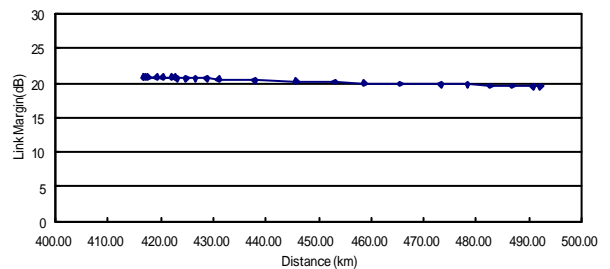
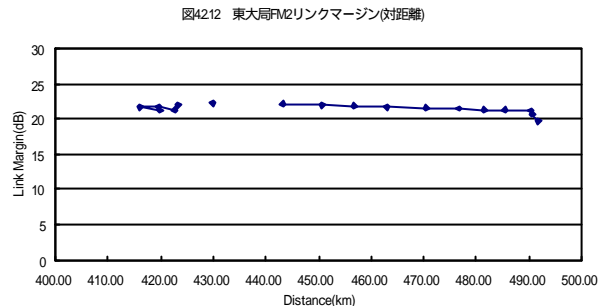
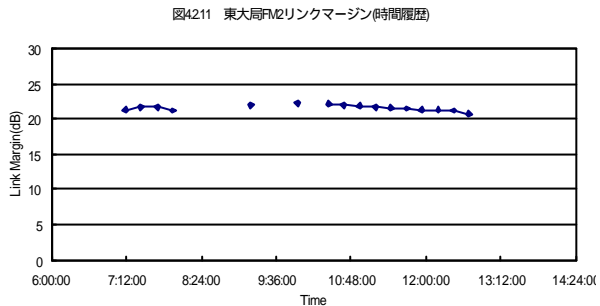
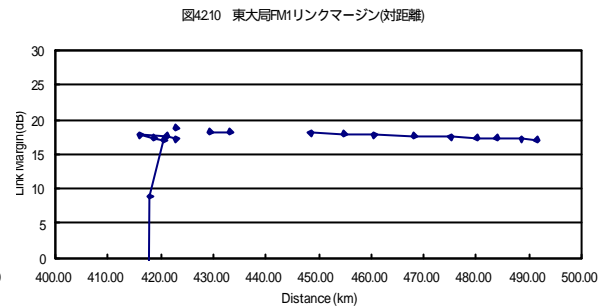
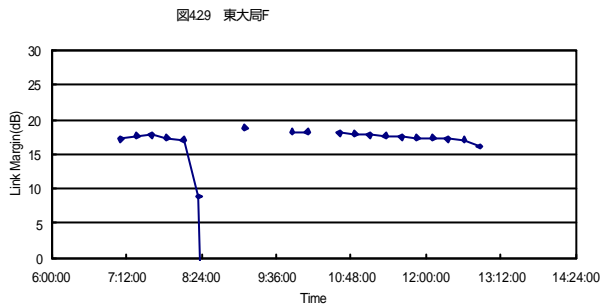


図428 東大局CWリンクマージン(対距離)



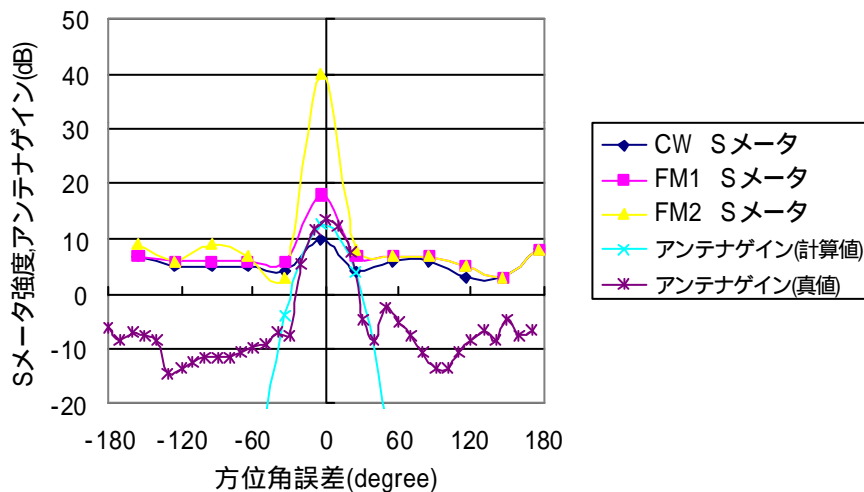


受信強度でもリンクマージンでもいくつか激しく落ちこんでいる点があるが、これはアンテナ指向方向を意図的に大きくずらしたときの値である。実際には受信できている場合でも計算式上は受信が不可能なレベルにまで低くなってしまう。(上述の要因(3)のため)

< アンテナ走査時の受信電力の変化 >

430MHz クロス八木アンテナを走査したときの各モードの受信電力の変化を S メータの振れで計測した。エレベーションのローテータコントローラが故障していたため、El=10(deg)で固定、Az を回転させて受信電力の変化を見た。図 4.2.13 はアンテナ方位角の気球方向からのズレを横軸にとったときの CW,FM1,FM2 の各メータの振れと 430MHz アンテナゲイン変化を示す。アンテナゲイン(計算値)に関してはピークゲイン 13.4dB からポインティングロス-12(e/)² を引いたものである(: 半値角 29deg)。真値はアンテナ製品添付の資料から読み取った。

図4.2.13 方位角誤差による受信電力変化



アンテナゲインの変化と FM1 の S メータ変化の方位誤差ゼロ近傍での一致がかなり良いことが分かる。アンテナ指向誤差角が半値角の倍程度までは(数式上は $e=$)ポインティングロスが適用できることが分かる。誤差角がこれを肥え、一致が見られなくなる。これは、ポインティングロスの式は、誤差角がアンテナゲインのメインローブ内にある場合は実際のアンテナゲインとよく一致するが、それを超えるとサイドローブなどの影響で実際のアンテナゲインと一致しなくなることを意味している。

ピークの値が、CW ではやや低めに FM2 ではかなり高めに出ているが、考えられる要因としては、送信側の CubeSat の状態が一定ではないこと(送信アンテナのゲインや偏波面の変化)、S メータの振れの非線形性が挙げられる。

図4.2.14 パケットデコード率の変化

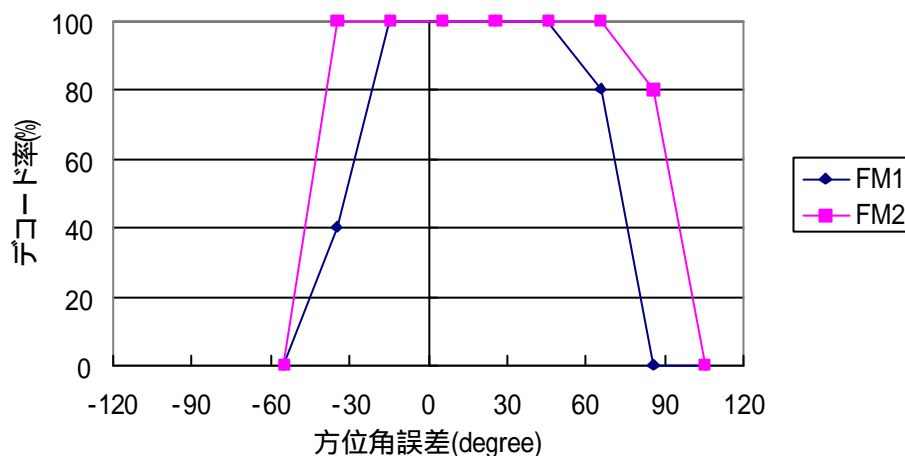


図 4.2.14 に方位角誤差とパケットデコード率の関係を示す。FM2 の方が送信出力が高いため方位角誤差にロバストになっている。FM1 では $\pm 30^\circ$ 、FM2 では $\pm 45^\circ$ 以内ならばほぼ 100% デコードが可能であることが確認された(距離 400 ~ 500km の場合)。方位角誤差がアンテナ半値幅より大きくなり、ゲインが相当小さくなった状態(-5dB 程度)でもデコード可能なのは驚きである。

表 4.2.4 東大局アップリンクデータ(7:48 ~ 10:11)

開始時刻	終了時刻	モード	UL回数	受信回数	送信出力 [dB]	送信出力 (W)	RSSI [V]	RSSI [dBm]	理論受信強度	搬送波送信	周波数設定	Link Margin [dB]
7:46:30	7:47:00	comm1										
7:48:30	7:49:00	comm1										
7:50:30	7:51:00	comm1	4	3	60	50	0.412	-126.5	-85.01256			18.695627
7:52:30	7:53:00	comm1	4	4	60	50	0.431	-125.2	-85.04869			18.6595
7:54:30	7:55:00	comm1	4	4	60	50	0.471	-123.6	-85.07148			18.63671
7:56:30	7:57:00	comm2	4		60	50			-85.08447			18.623713
7:58:30	7:59:00	comm2	4		60	50			-85.10126			18.606923
8:00:30	8:01:00	comm2	4		60	50			-85.12696			18.581229
8:02:30	8:03:00	comm1										
8:04:30	8:05:00	comm1	4	4	60	50	0.471	-123.6	-85.14272			18.56547
8:06:30	8:07:00	comm1	4	4	20	30	0.451	-124.2	-87.3775			16.330683
8:08:30	8:09:00	comm1	4	4	20	30	0.49	-122.8	-87.3828			16.325383
8:10:30	8:11:00	comm1	4	3	2	2.5	0.412	-126.5	-98.17272			5.535463
8:12:30	8:13:00	comm2	4		2	2.5			-98.17935			5.528841
8:14:30	8:15:00	comm2	4		2	2.5			-98.17935			5.528841
8:16:30	8:17:00	comm1	4	3	18	27	0.471	-123.6	-87.8453			15.862889
8:18:30	8:19:00	comm1	4	4	18	27	0.471	-123.6	-87.8258			15.882391
8:20:30	8:21:00	comm1	4	4	16	25	0.392	-127.5	-88.15529			15.552894
8:22:30	8:23:00	comm1	4	2	16	25	0.353	-137	-88.14732			15.560863
8:24:30	8:25:00	comm1	4	4	16	25	0.373	-130	-88.13346			15.574731
8:26:30	8:27:00	comm2	4		16	25			-88.13194			15.576252
8:28:30	8:29:00	comm2	4		16	25			-88.12337			15.584814
8:30:30	8:31:00	comm2	4		16	25			-88.11861			15.589574
8:32:30	8:33:00	comm1	4	3	16	25	0.373	-130	-88.11461			15.593574
8:34:30	8:35:00	comm1										
8:36:30	8:37:00	comm1	4	4	16	25	0.392	-127.5	-88.10146			15.606732
8:38:30	8:39:00	comm1	4	4	16	25	0.373	-130	-88.09497			15.613222
8:40:30	8:41:00	comm1	4	3	16	25	0.373	-130	-88.09497			15.613222
8:42:30	8:43:00	comm2	4		16	25			-88.09114			15.617043
8:44:30	8:45:00	comm2										
8:47:00	8:47:00	comm1	0	4	6	16			-88.08541			15.622776
8:48:30	8:49:00	comm1	4?		60	50			-85.07683			18.631356
8:50:30	8:51:00	comm1	4		60	50			-85.07473			18.633459
8:52:30	8:53:00	comm1	4		60	50			-85.08562			18.622568
8:54:30	8:55:00	comm1	4		60	50			-85.09593			18.612262
8:56:30	8:57:00	comm2										
8:58:30	8:59:00	comm2										
9:00:30	9:01:00	comm2										
9:02:30	9:03:00	comm1	4		60	50			-85.15561			18.552579
9:04:30	9:05:00	comm1	4		60	50			-85.16167			18.54652
9:06:30	9:07:00	comm1	4		20	30			-87.38375			16.324437
9:08:30	9:09:00	comm1	4		60	50			-85.14935			18.558833
9:10:30	9:11:00	comm1	4		60	50			-85.1393			18.568885
9:12:30	9:13:00	comm2										
9:14:30	9:15:00	comm2										
9:16:30	9:17:00	comm1	4		60	50			-85.1393			18.568885
9:18:30	9:19:00	comm1	4		60	50			-85.14253			18.565659
9:20:30	9:21:00	comm1	4		60	50			-85.14765			18.560539
9:22:30	9:23:00	comm1	4		60	50			-85.14424			18.563952
9:24:30	9:25:00	comm1	4		60	50			-85.14139			18.566798
9:26:30	9:27:00	comm2										
9:28:30	9:29:00	comm2										
9:30:30	9:31:00	comm2										
9:32:30	9:33:00	comm1										
9:34:30	9:35:00	comm1	4		60	50			-85.12772	145.834		18.580469
9:36:30	9:37:00	comm1	4		60	50			-85.12943	145.833		18.578759
9:38:30	9:39:00	comm1	4		60	50			-85.13152	145.833		18.576669
9:40:30	9:41:00	comm1	4		20	30			-87.35228			16.355903
9:42:30	9:43:00	comm2										
9:44:30	9:45:00	comm2										
9:46:30	9:47:00	comm1	4		60	50			-85.13911	145.836		18.569075
9:48:30	9:49:00	comm1	4		60	50			-85.14082	145.836		18.567367
9:50:30	9:51:00	comm1	4		60	50			-85.13873	145.836		18.569454
9:52:30	9:53:00	comm1	4		60	50			-85.13873	145.836		18.569454
9:54:30	9:55:00	comm1	4		60	50			-85.13684	145.837		18.571352
9:56:30	9:57:00	comm2										
9:58:30	9:59:00	comm2										
10:00:30	10:01:00	comm2										
10:02:30	10:03:00	comm1	4	4	60	50	0.392	-127.5	-85.13418	×	145.833	18.57401
10:04:30	10:05:00	comm1	5	5	60	50	0.471	-123.6	-85.13968		145.833	18.568505
10:06:30	10:07:00	comm1	4		60	50			-85.14746			18.560728
10:08:30	10:09:00	comm1	4	4	60	50	0.451	-124.2	-85.15807		145.832	18.550117
10:10:30	10:11:00	comm1	4	4	60	50	0.471	-123.6	-85.17226		145.832	18.535926

表 4.2.6 東大局アップリンクデータ(11:46~13:01)

開始時刻	終了時刻	モード	UL回数	受信回数	送信出力 [dB]	送信出力 [W]	RSSI [V]	RSSI [dBm]	理論受信強度	搬送波送信	周波数設定	Link Margin [dB]
11:46:30	11:47:00	comm1	4		60	50			-85.83873		145.832	17.882596
11:48:30	11:49:00	comm1	4		60	50			-85.85081		145.833	17.869454
11:50:30	11:51:00	comm1	4		60	50			-85.86024		145.834	17.857381
11:52:30	11:53:00	comm1	4		60	50			-85.87107		145.831	17.847944
11:54:30	11:55:00	comm1	4		60	50			-85.88553			17.837122
11:56:30	11:57:00	comm2	4		60	50			-85.89267	x		17.822655
11:58:30	11:59:00	comm2	4		60	50			-85.90449			17.815518
12:00:30	12:01:00	comm2	4		60	50			-85.91318			17.803693
12:02:30	12:03:00	comm1	4		60	50			-85.91943			17.795009
12:04:30	12:05:00	comm1	4		60	50			-85.92775		145.832	17.788762
12:06:30	12:07:00	comm1	4		60	50			-85.95008		145.832	17.769873
12:08:30	12:09:00	comm1	4		60	50			-85.95941		145.832	17.758111
12:10:30	12:11:00	comm1	4		60	50			-85.95941		145.832	17.758111
12:12:30	12:13:00	comm2										
12:14:30	12:15:00	comm2										
12:16:30	12:17:00	comm1	4		60	50			-85.99112		145.832	17.725673
12:18:30	12:19:00	comm1	4		60	50			-86.00006		145.833	17.717066
12:20:30	12:21:00	comm1	4		60	50			-86.01243		145.833	17.708124
12:22:30	12:23:00	comm1	4		60	50			-86.02426		145.833	17.695758
12:24:30	12:25:00	comm1	4		60	50			-86.03523		145.834	17.683924
12:26:30	12:27:00	comm2	4		60	50			-86.04891		145.834	17.672962
12:28:30	12:29:00	comm2	4		60	50			-86.06257		145.834	17.659278
12:30:30	12:31:00	comm2	4		60	50			-86.07519		145.834	17.645616
12:32:30	12:33:00	comm1	4		60	50			-86.08558		145.834	17.632998
12:34:30	12:35:00	comm1	4		60	50			-86.09459			17.622611
12:36:30	12:37:00	comm1	4		60	50			-86.10207			17.613595
12:38:30	12:39:00	comm1	4		60	50			-86.09102			17.606118
12:40:30	12:41:00	comm1	4		60	50			-86.07962			17.617166
12:42:30	12:43:00	comm2	4		60	50			-86.07246			17.628569
12:44:30	12:45:00	comm2	4		60	50			-86.07263			17.635725
12:46:30	12:47:00	comm1	4		60	50			-86.08439			17.635555
12:48:30	12:49:00	comm1	4		60	50			-86.10003			17.623802
12:50:30	12:51:00	comm1	4		60	50			-86.1248			17.608157
12:52:30	12:53:00	comm1	4		60	50			-86.15744	x		17.583386
12:54:30	12:55:00	comm1										
12:56:30	12:57:00	comm2										
12:58:30	12:59:00	comm2										
13:00:30	13:01:00	comm2										

注 1 受信回数の空欄は全てアップリンク不成功.

注 2 搬送波送信の欄は、アップリンクを打ち終わった後に PTT を連続数秒間おして搬送波を送信させるモードを実行したか否かで、CubeSat 搭載の FM 受信機の RSSI 出力のリアクションを見るための実験である.

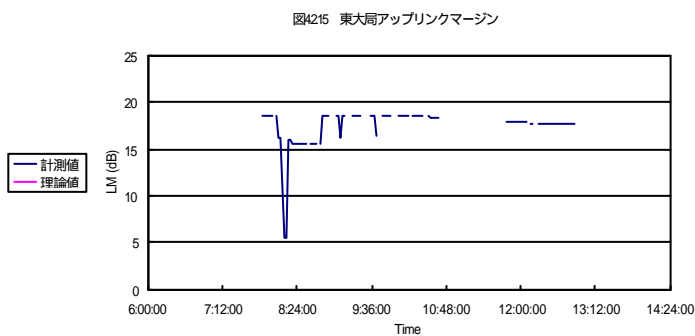
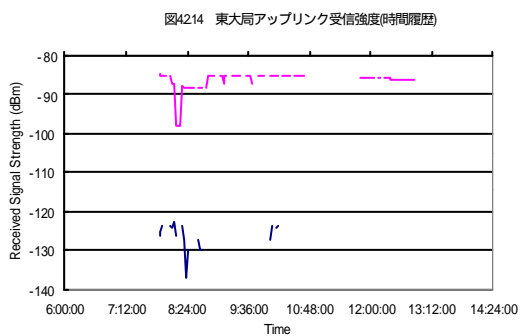
注 3 周波数設定とあるのは、CW ダウンリンクの温度に起因する周波数遷移に応じてアップリンク周波数もずらして送信したため.

表 4.2.7 に東大局アップリンクの各パラメータを示す。

表 4.2.7 東大局アップリンクパラメータ値

	Symbol	Unit	Uplink	Remark
Frequency	f	MHz	145.835	
Transmit	P	W	variable	Parameter
Transmit	P	dBW	variable	
Transmitter Line Loss	Ll	dB	-3.000	Usually -1dB ~ -3dB
Transmit Antenna Half-Power Beamwidth	t	deg	33.000	GS 144HS12
Peak Transmit Antenna Gain	Gpt	dB	12.000	GS 144HS12
Transmit Antenna Pointing Offset	et	deg	variable	
Transmit Antenna Pointing Loss	Lpt	dB	variable	
Transmit Antenna Gain	Gt	dB	variable	
Equiv. Isotropic Radiated Power	EIRP	dBW	variable	
Propagation Path Length	S	km	variable	
Space Loss	Ls	dB	variable	
Propagation & Polarization Loss	La	dB	-0.470	Polarization (-0.3dB)
Peak Receive Antenna Gain	Grp	dB	-2.521	Monopole
Receive Antenna Half-Power Beamwidth	r	deg	100.000	Monopole
Receive Antenna Pointing Error	er	deg	90.000	Uncontrolled
Receive Antenna Pointing Loss	Lpr	dB	-9.720	
Receive Antenna Gain	Gr	dB	-12.241	
System Noise Temperature	Ts	dBK	31.100	
Data Rate	R	bps	1200.000	
Eb	0	dB	0	N
Bit	E	BER	1.00E-05	
Required Eb/N0	Req Eb/N0	dB-Hz	13.000	FSK, BER=10 ⁻⁵
Implementation Loss		dB	-5.000	
Margine		dB	variable	

図 4.2.14 に東大局アップリンクの CubeSat 側受信強度の計測値と理論値を示す。理論値で受信強度が落ち込んでいる点は、送信出力を下げた部分である。図 4.2.15 のアップリンクについても同様である。



4.3 理論値と実験値の相関

4.1、4.2 節で三陸局・東大局のアップリンク・ダウンリンクに関して受信強度の実測値と理論式から導かれる値とを比較した。これらには 10~数十 dB のずれがあることが確認されたが、本節では、理論値と実測値の間に相関が見られるかを検証する。

図 4.3.1 , 4.3.2 に三陸局・東大局のダウンリンクの理論値対実測値プロットを、図 4.3.3 に両局のアップリンクの同様のプロットを示す。

図4.3.1 三陸局ダウンリンク受信強度 実測値と理論値の相関

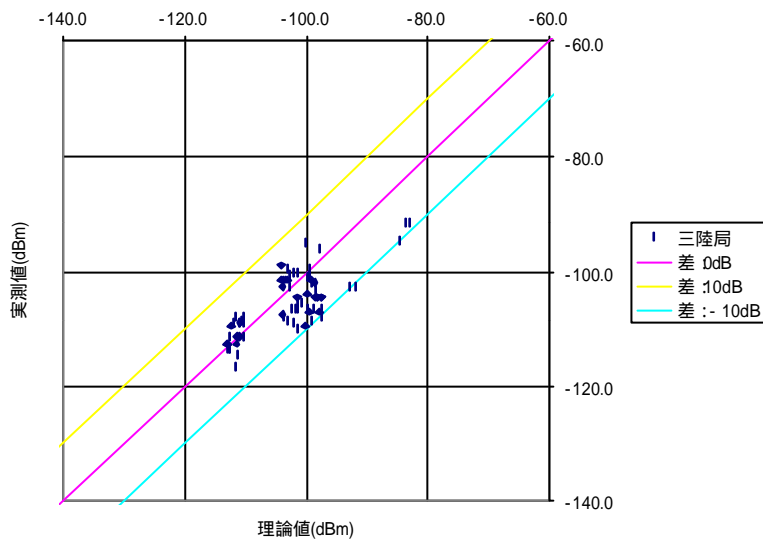


図4.3.2 東大局ダウンリンク受信強度 実測値と理論値の相関

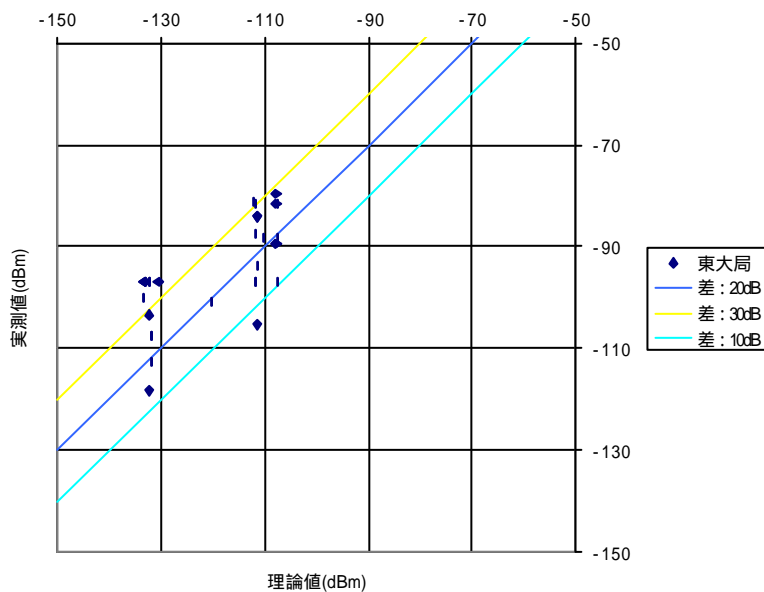
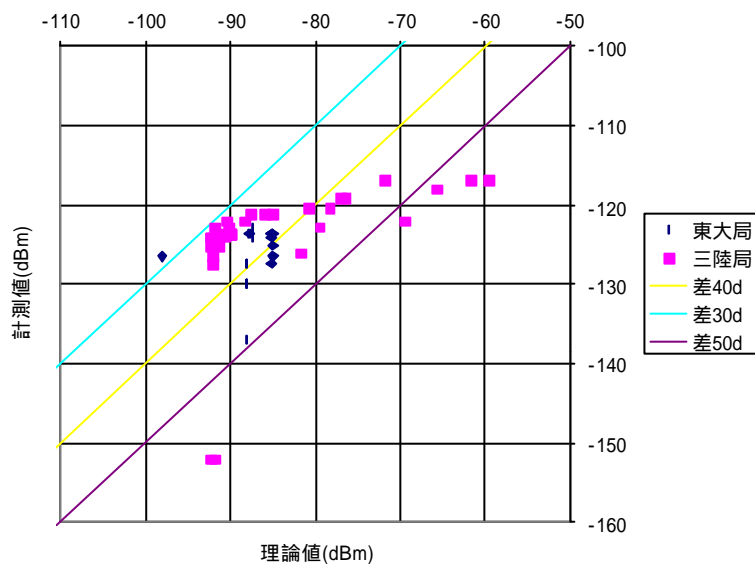


図 4.3.1 の三陸局の受信電力計測値は、ハンディスペアナで計測したものであるが、4.1 節で述べたようにリファレンスレベルは計測値と理論値が適合するように仮定したものである。ただし、2 つの間の相関が見られることはよく分かる(相関係数 0.77)。

図 4.3.2 の東大局のデータはばらつきが大きい、計測に用いた S メータの精度が悪いことと非線形性によると思われる。また、理論値に比べて計測値のほうが平均して 20dB ほど高いが、リンク式上でのロスを見積もっている可能性がある(ラインロス・メインローブを外れた時のアンテナポインティングロスなど)。

三陸局・東大局とも近似曲線からのズレがほぼ $\pm 10\text{dB}$ に収まっているが、上記に述べた計測や計算上の問題以外に CubeSat 側のアンテナ方向の変化によるゲインの変動が挙げられる。電波暗室でのアンテナパターン計測によると、ゲイン最大値と最小値との差が 23dB 程度あることが確認されている (CubeSat ダウンリンク用 430MHz アンテナ)。

図4.3.3 アップリンク受信強度 理論値と計測値の相関



アップリンク受信強度は、ダウンリンクと逆に計測値のほうが理論値よりも平均して 40dB ほど小さい。5 章で紹介するが、CubeSat の RSSI チャンネルの出力異常で通常よりも低い値が出た可能性が高い。また、受信強度の変動幅はダウンリンクと同じく近似式から $\pm 10\text{dB}$ 程度であるが、CubeSat 受信アンテナのゲインは最大値と最小値で 10dB 程度の差があり、受信強度の変動の主要因になっていると考えられる。

5. 気球テレメトリデータ解析

5.1 全シーケンスのデータ履歴

宇宙研テレメトリー回線により得られたデータは、アナログチャンネルが **RSSI**(COMM1FM 受信機受信強度)、**CW1I**(COMM1CW 送信機消費電流)、**TMP1X1**(COMM1 無線機温度)、**TMPBDY1**(COMM1 構体温度)、**TMPBDY2**(COMM2 構体温度)、**BAR** (気圧計) の6つである。デジタルステータスについては、**CW1SUPPLY** (COMM1CW 送信機の電源 μ ・ μ)、**RX1CNT0.RX1CNT1** (COMM1FM 受信機アップリンク受信回数カウンタ)、**TX2PTT** (COMM2FM 送信機 PTT μ ・ μ) **RX2CNT0.RX2CNT1** (COMM2FM 受信機アップリンク受信回数カウンタ) の6bit である。

本節では、実験シーケンス全体を通しての各データの遷移を見る。また、次節では 5 分ずつの COMM1CW 送信、COMM1FM 送信、COMM2FM 送信の流れを 1 サイクルと定義し、各サイクル毎にデータの推移を見る。

本章で使用される時間データは、放球時刻である 2001 年 5 月 20 日 6 時 56 分 40 秒を 0 とした、実験時間系を用いる。

図 5.1.1 に気圧計データを示す。所々周期的に COMM2FM 送信によるノイズが乗っているが、グラフの上端の境界線が真値である。気圧計の計測限界が 150hPa 程度であるため、55 分程度で気圧の減少が止まっているように見えるが、実際はもっと低い気圧になっている。ペイロードの切り離し後は、高度が降下して気圧が回復する現象を捉えている。

図5.1.1 気圧計データ

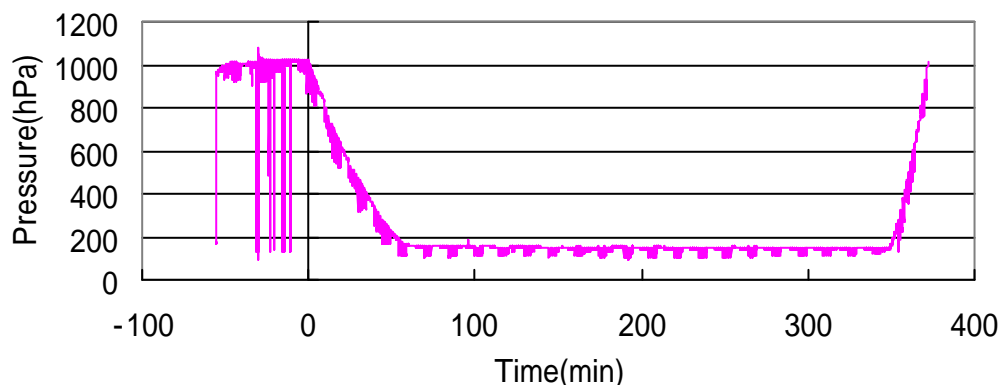


図 5.1.2 は、気圧の値から高度データに変換したものである。このとき温度補正が必要となるが、外気温度は計測していないため近似的に COMM1 構体温度を使用した。宇宙研の測距による高度データ (測距精度：数百メートル) も合わせて示しているが、気圧計が測定限界に達するまでは極めてよく一致していることが分かる。切り離し後の降下のトラジェクトリもきちんと一致している。この気圧センサの計測有効高度は 15km までと読み取れる。

図5.1.2 気球高度履歴 (気圧高度と測距高度)

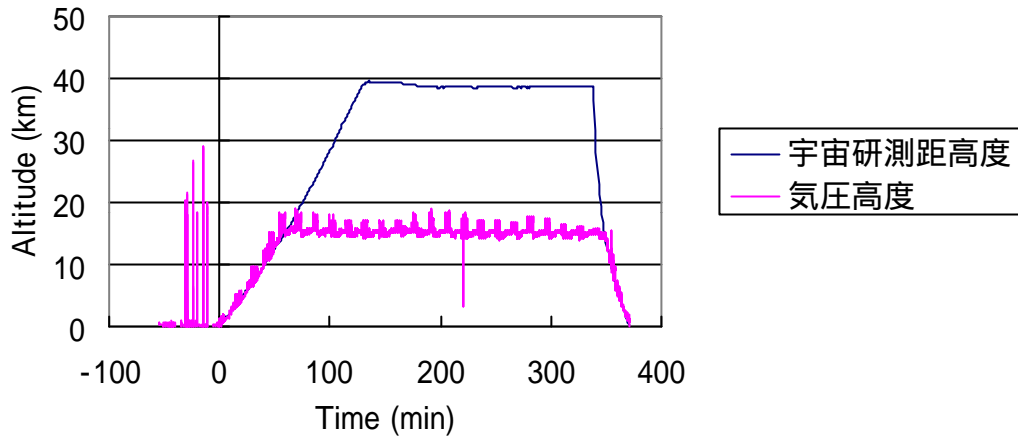
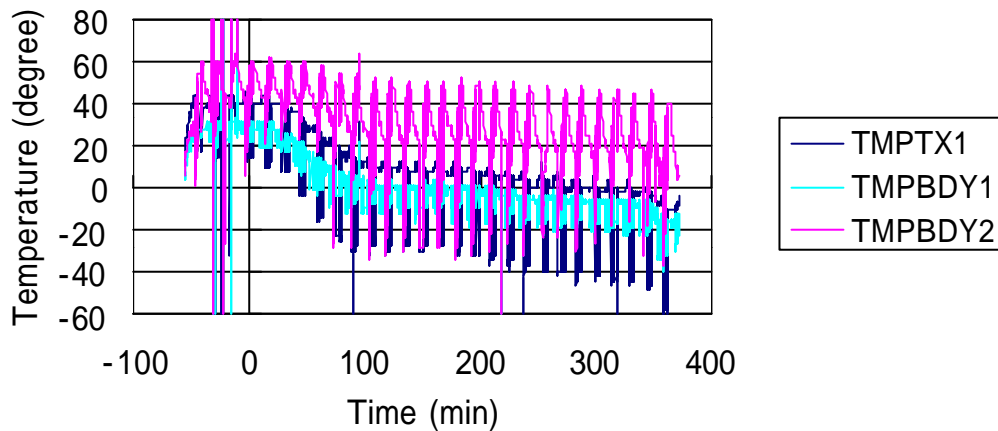


図 5.1.3 に温度データの履歴を示す.COMM1 へのアップリンクが途中で途絶してしまったため、温度変化のデータは極めて重要である.

図5.1.3 温度変化



周期的に大きく落ちこんでいるのは COMM2FM 送信によるノイズである.グラフの上側が正しい計測値を示している.ノイズと異なる周期的変動は無線機の切替による発熱のオンオフでおこる温度変化である.全体としては高度上昇により温度が下降していく様子がわかる.COMM1 が FM 送信時の消費電力が 3.5W であるのに対して、COMM2 は 6~9W 程度消費していると考えられ、発熱が大きいこと COMM2 構体温度も COMM1 に比してかなり高い。

送信機の発熱が大きいこと、発泡スチロールできちんと断熱したことなどにより、温度は COMM1 構体温度で - 20 度程度までしか下がらなかった。

図5.1.4 RSSI

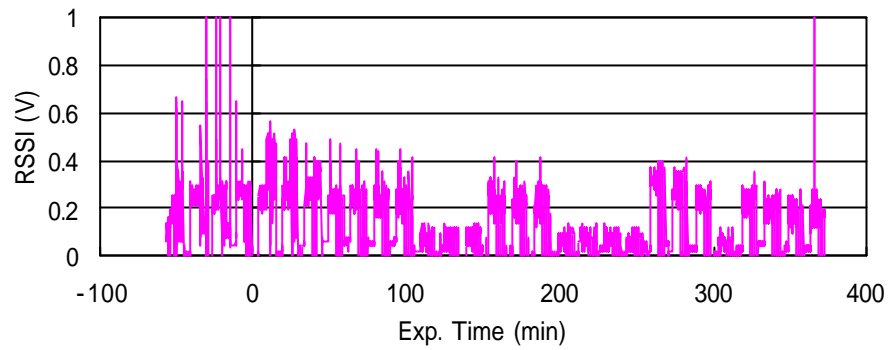


図 5.1.4 に全実験シーケンスでの RSSI 変化を示す.1V を超えている者はノイズである.平均的に 0.3V 弱出ているものが RSSI ピンの無信号時の出力で、時々それを超えて出ているものがアップリンクが通ったときの S メータの振れに対応している.実験時間で 100 分~150 分、200 分~270 分、300 分~320 分は RSSI の平均レベルが下がっており、アップリンクも成功していない.レベルが下がったときにはアップリンクは通らなくなっており、無線機の異常と何らかの相関がある可能性がある.また、全体的に RSSI ピンの電圧が通常の状態より低く出ているが、原因は不明である.

5.2 各サイクルのデータ履歴

次のようにサイクルの番号を定義する.

サイクル 3...電源投入直後の最初のサイクル

サイクル 0...放球が行われたサイクル

サイクル 25...ペイロードが着水したサイクル.

各サイクル毎に RSSI と温度変化のデータを見る.

< サイクル - 3 (Exp. Time:-55.9 ~ -40.9) >

図5.2.1.1 サイクル - 3RSSI

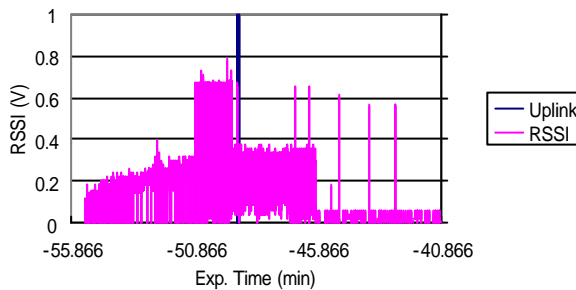


図5.2.1.2 サイクル - 3アップリンク時RSSI

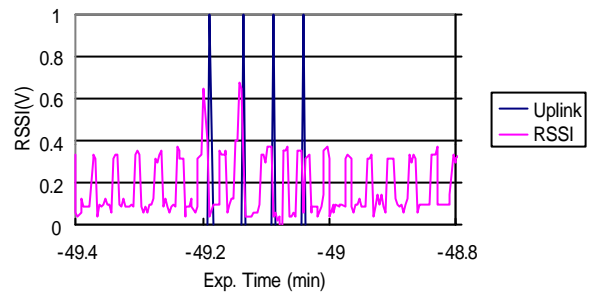
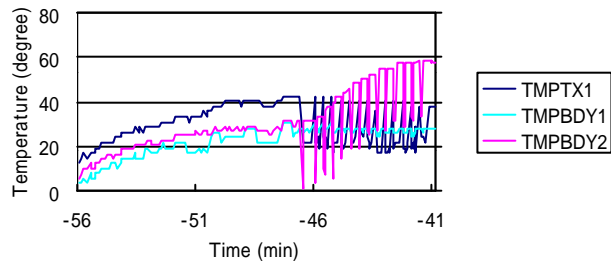


図5.2.1.3 サイクル - 3温度変化



< サイクル - 2 (Exp. Time:-40.9 ~ -25.9) >

図5.2.2.1 サイクル - 2 RSSI

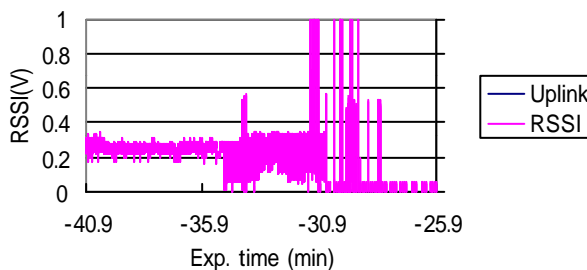
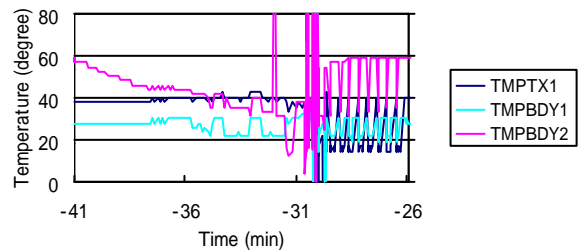


図5.2.2.2 サイクル - 2温度変化



< サイクル - 1 (Exp. Time:-25.9 ~ -10.9) >

図5231 サイクル - 1 RSSI

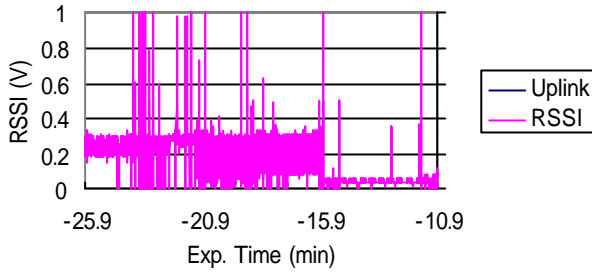
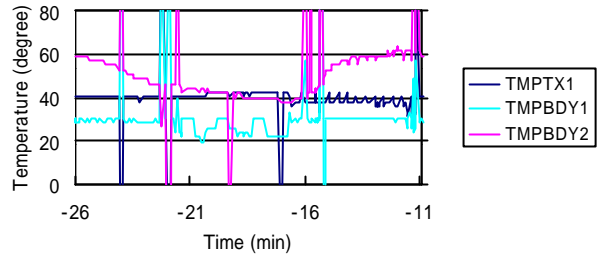


図5232 サイクル - 1温度変化



< サイクル 0 (Exp. Time:-10.9 ~ -4.1) >

図5241 サイクル0 RSSI

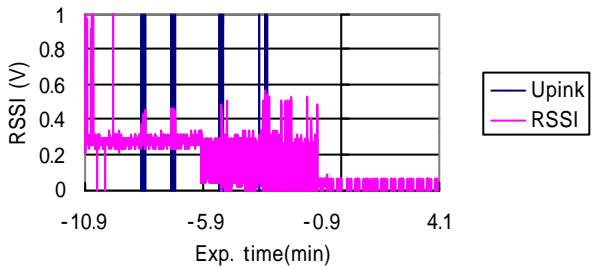


図5242 サイクル0アップリンク時RSSI (1)

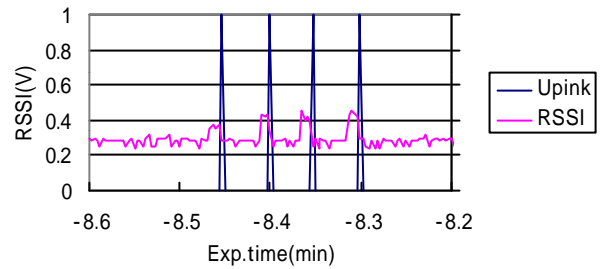


図5.2.4.3 サイクル0アップリンク時RSSI (2)

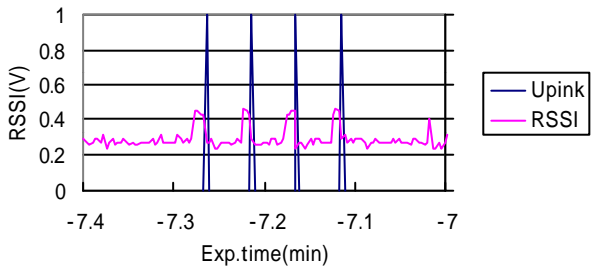


図5.2.4.4 サイクル0アップリンク時RSSI (3)

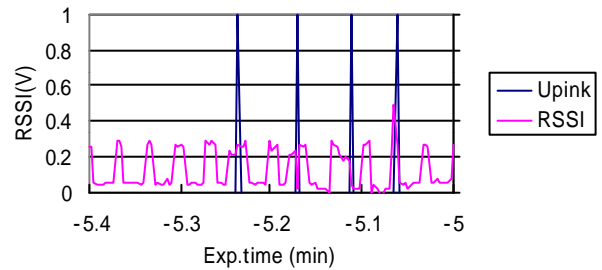


図5245 サイクル0アップリンク時RSSI (4)

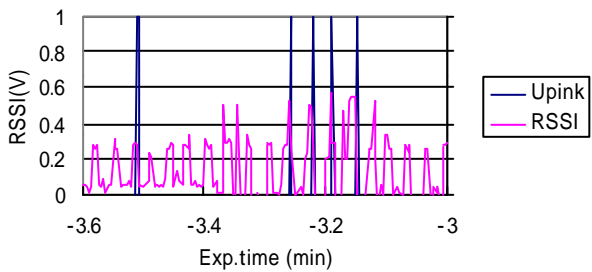


図5246 サイクル0 温度変化

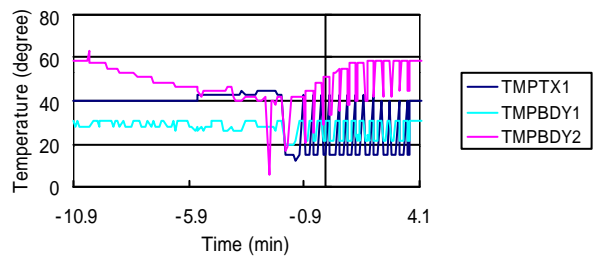
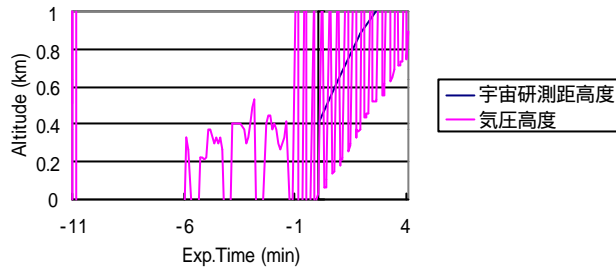


図5247 サイクル0気球高度履歴 (気圧高度と測距高度)



< サイクル 1 (Exp. Time:4.1 ~ 19.1) >

図5251 サイクル1 RSSI

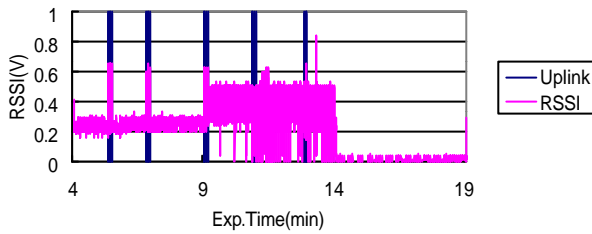


図5252 サイクル1アップリンク時RSSI (1)

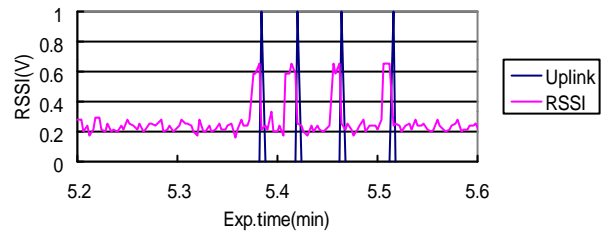


図5253 サイクル1アップリンク時RSSI (2)

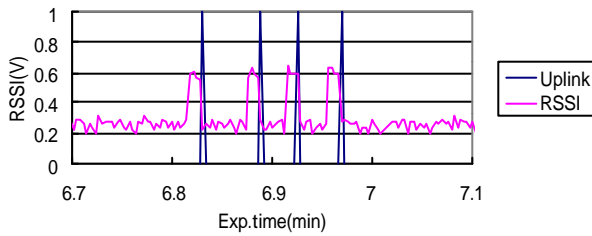


図5254 サイクル0アップリンク時RSSI (3)

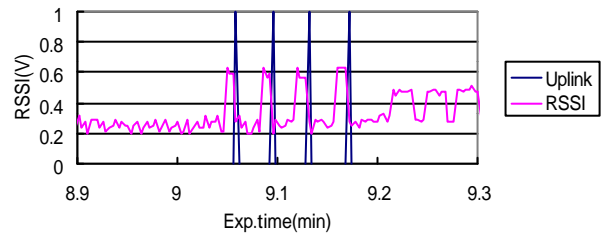


図5255 サイクル1アップリンク時RSSI (4)

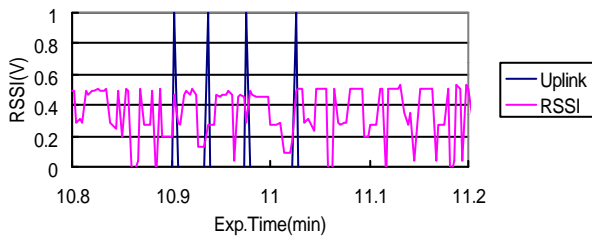
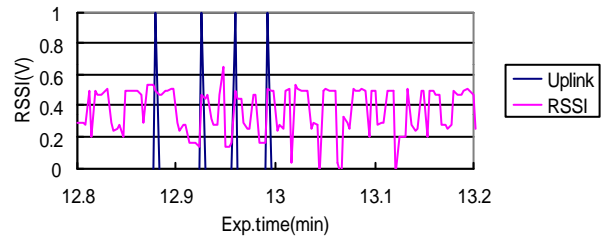
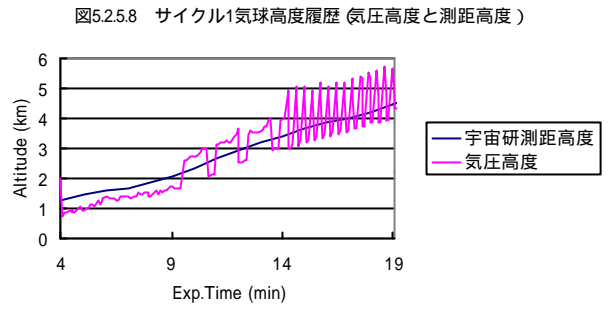
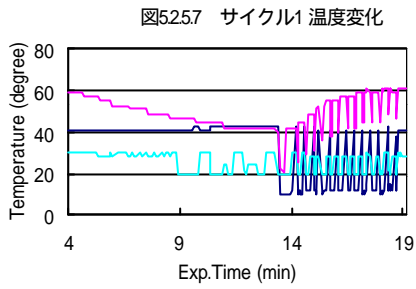


図5256 サイクル1アップリンク時RSSI (5)





< サイクル 2 (Exp. Time:19.1 ~ 34.1) >

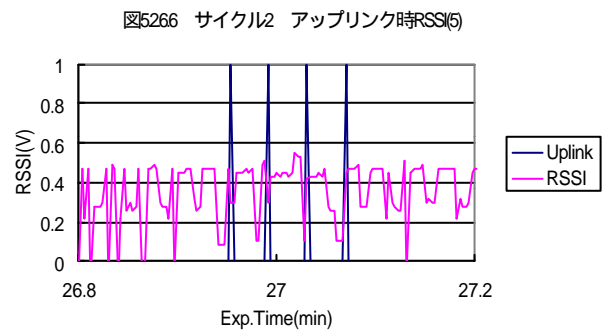
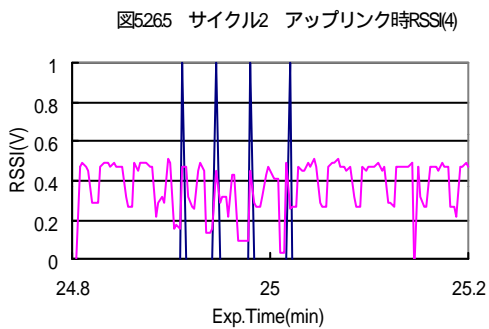
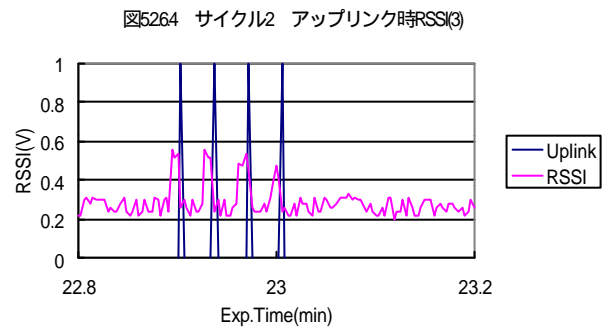
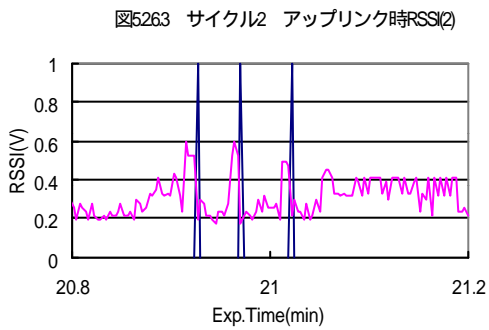
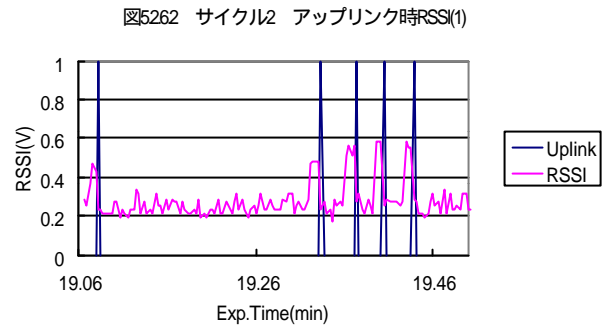
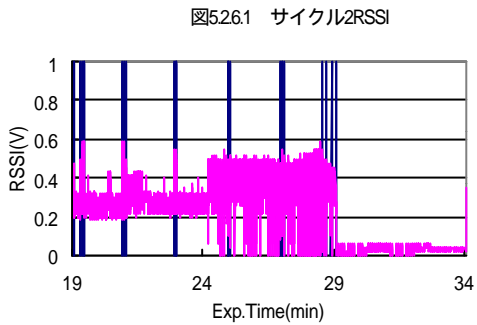


図5267 サイクル2 アップリンク時RSSI(6)

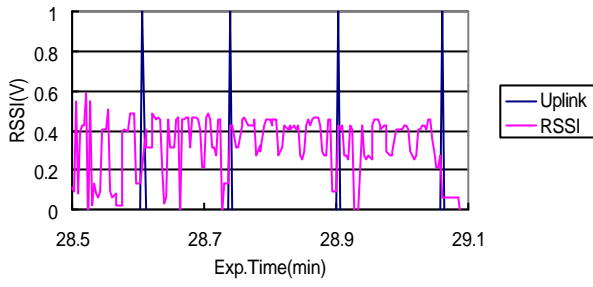


図5268 サイクル2 温度変化

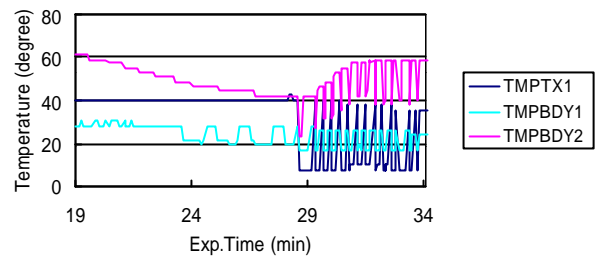
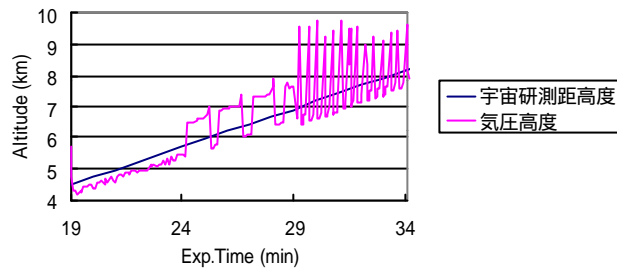


図5269 サイクル2気球高度履歴 (気圧高度と測距高度)



< サイクル 3 (Exp. Time:34.0 ~ 49.0) >

図52.7.1 サイクル3 RSSI

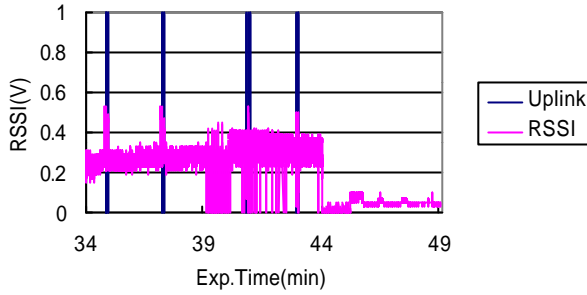


図52.7.2 サイクル3 アップリンク時RSSI(1)

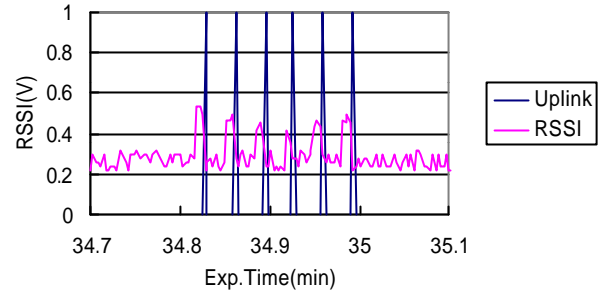


図52.7.3 サイクル3 アップリンク時RSSI(2)

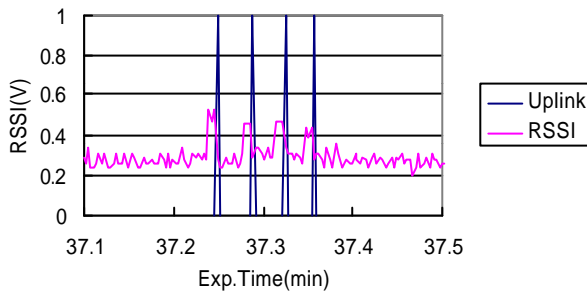


図52.7.4 サイクル3 アップリンク時RSSI(3)

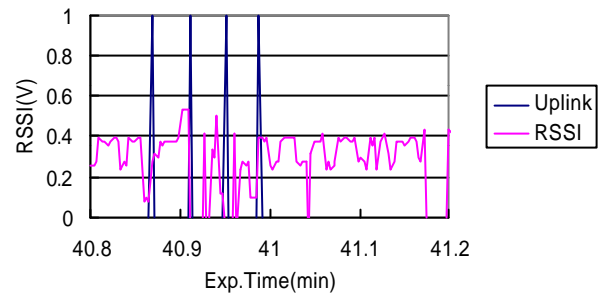


図52.7.5 サイクル3 アップリンク時RSSI(4)

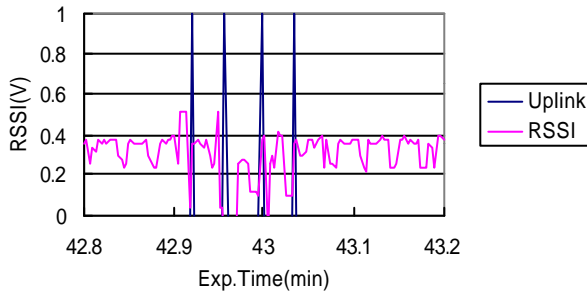


図52.7.6 サイクル3 温度変化

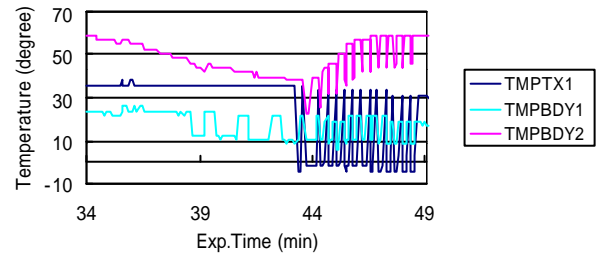
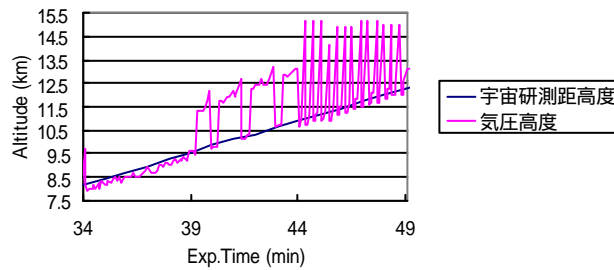


図52.7.7 サイクル3気球高度履歴 (気圧高度と測距高度)



< サイクル 4 (Exp.time:49.0 ~ 64.0) >

図5.28.1 サイクル4 RSSI

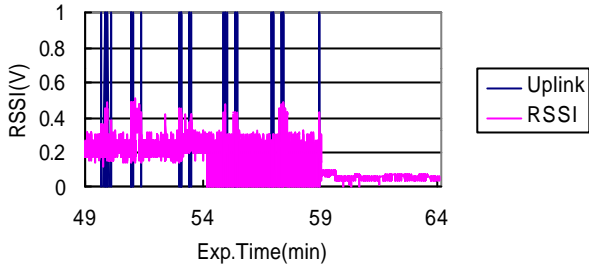


図5.28.2 サイクル4 RSSIアップリンク時(1)

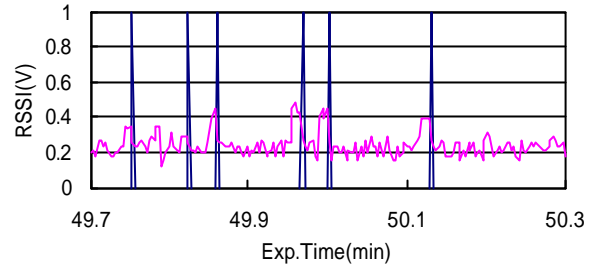


図5.28.3 サイクル4 RSSIアップリンク時(2)

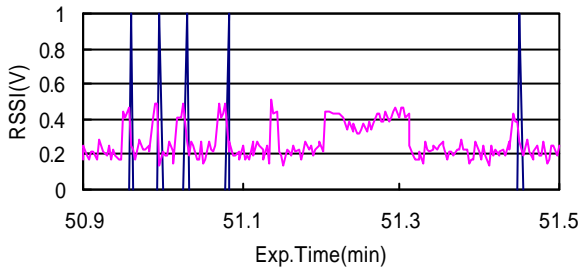


図5.28.4 サイクル4 RSSIアップリンク時(3)

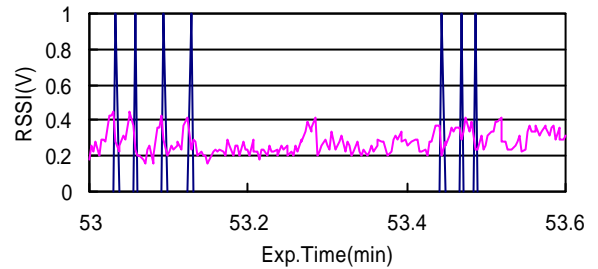


図5.28.5 サイクル4 RSSIアップリンク時(4)

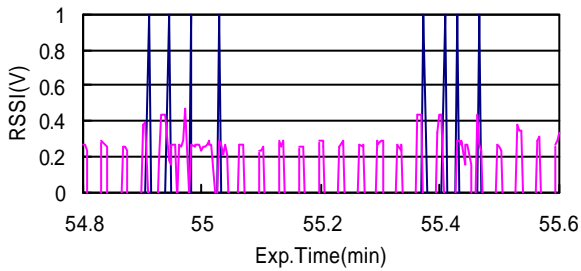


図5.28.6 サイクル4 温度変化

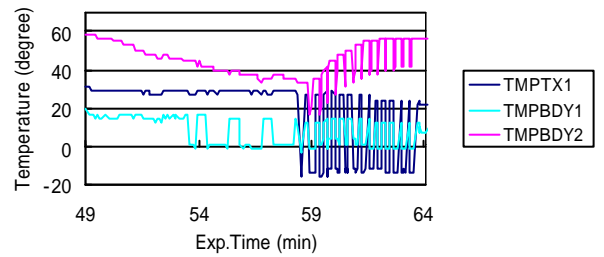
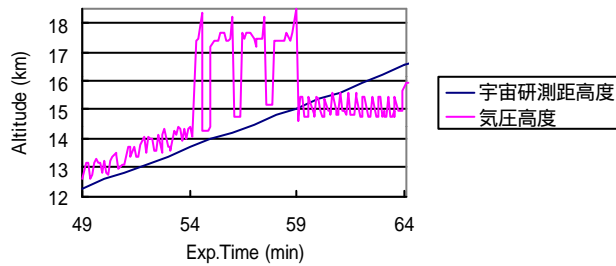


図5.28.7 サイクル4気球高度履歴 (気圧高度と測距高度)



< サイクル 5 (Exp.time:64.0 ~ 79.0) >

図5.2.9.1 サイクル5 RSSI

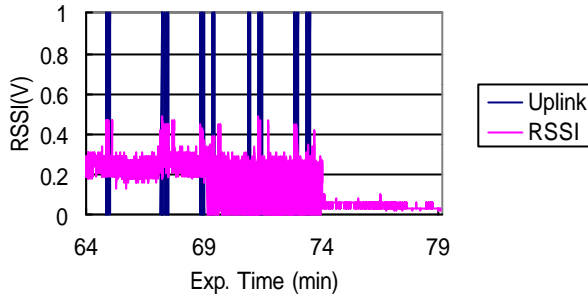


図5.2.9.2 サイクル5 アップリンク時RSSI(1)三陸局

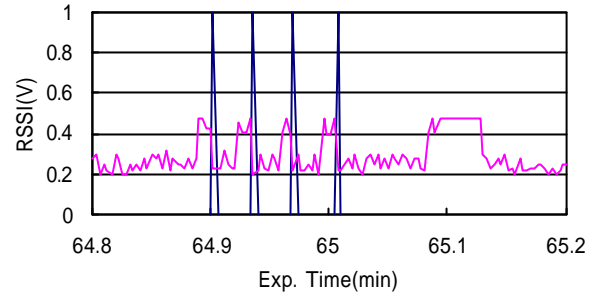


図5.2.9.3 サイクル5 アップリンク時RSSI (2)三陸局と東大局

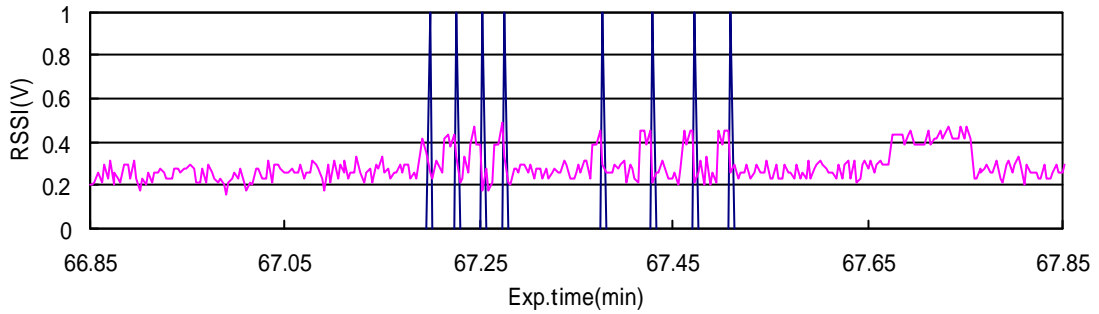


図5.2.9.4 サイクル5 アップリンク時RSSI (3)三陸局と東大局

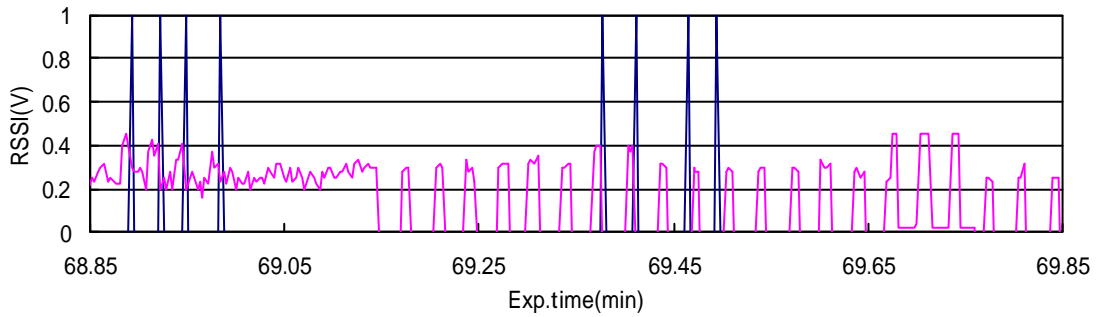


図5.2.9.5 サイクル5 アップリンク時RSSI (4)三陸局と東大局

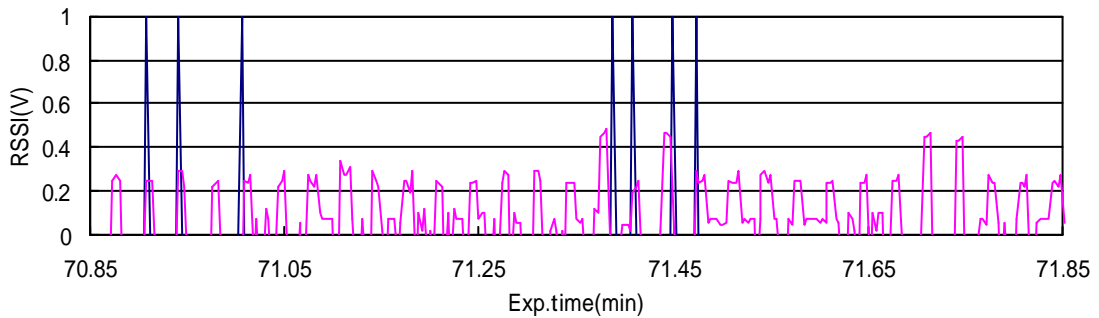


図5296 サイクル5 アップリンク時RSSI (5)三陸局と東大局

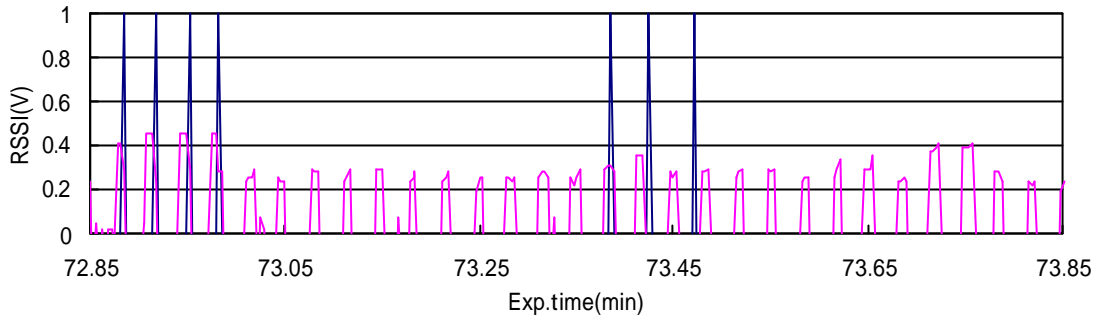


図5.2.97 サイクル5 温度変化

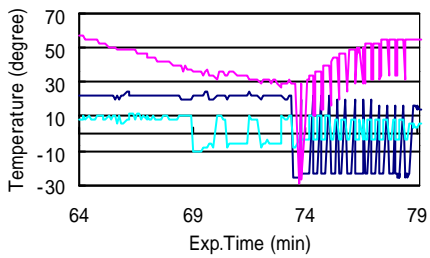
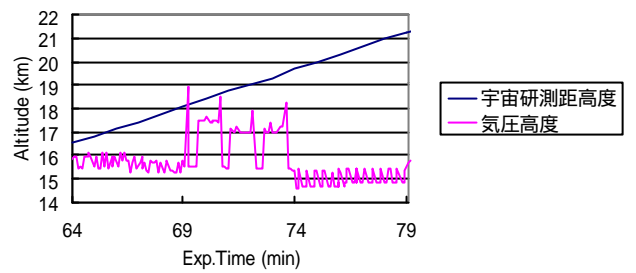


図5.2.98 サイクル5気球高度履歴 (気圧高度と測距高度)



< サイクル 6 (Exp.time:79.0 ~ 94.0) >

図5.2.10.1 サイクル6 RSSI

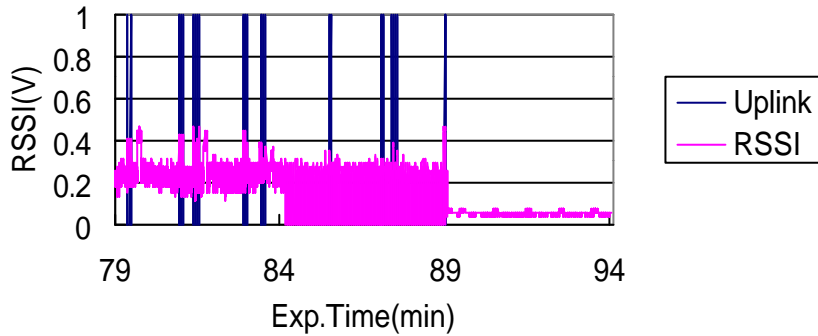


図5.2.10.2 サイクル6 アップリンク時RSSI(1)東大局

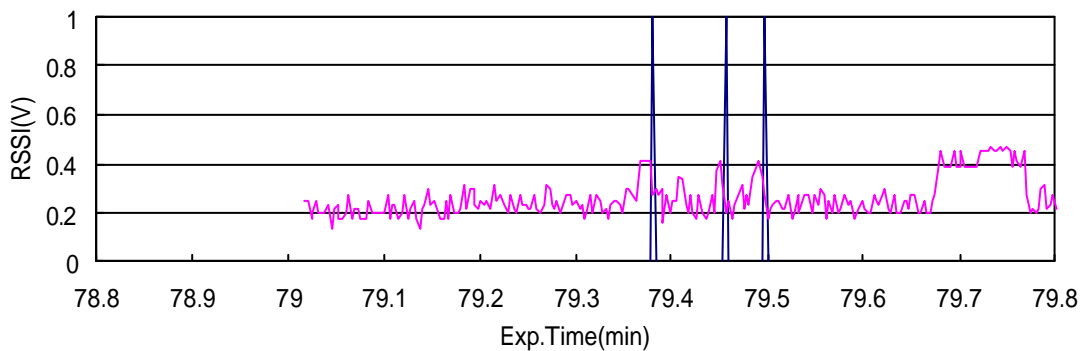


図5.2.10.3 サイクル6 アップリンク時RSSI(2)三陸局と東大局

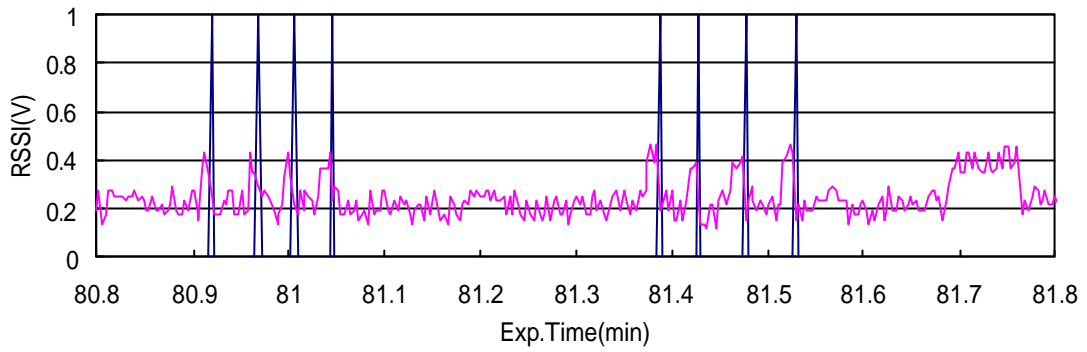


図5.2.10.4 サイクル6 アップリンク時RSSI(3)三陸局と東大局

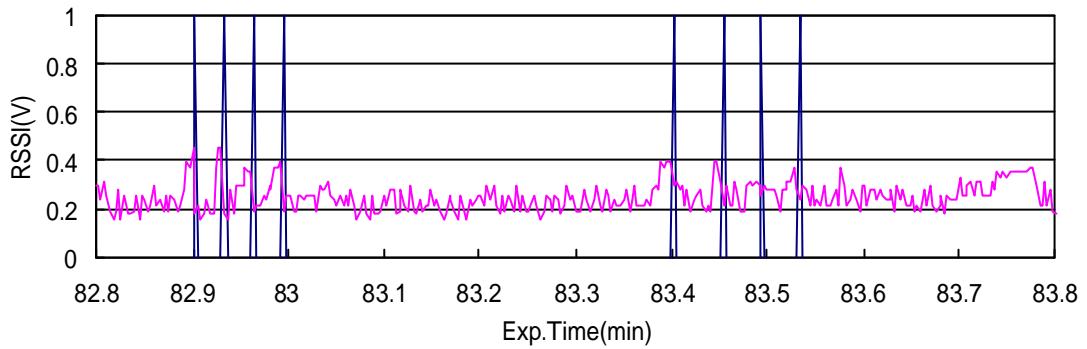


図5.2.10.5 サイクル6 アップリンク時RSSI(4)東大局

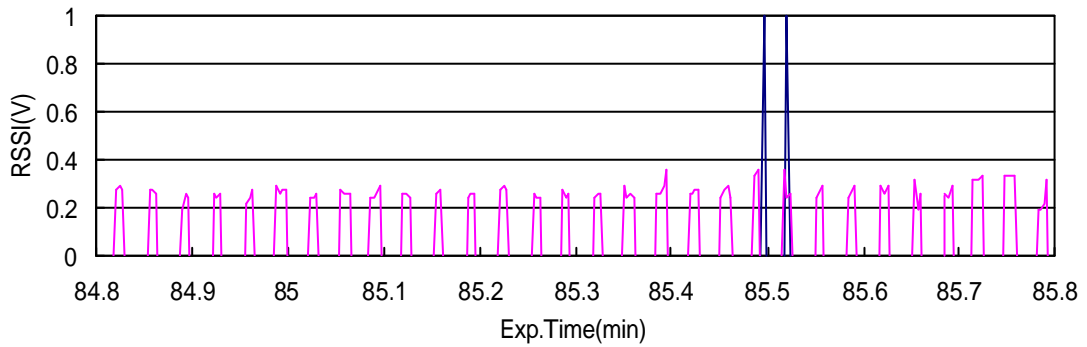
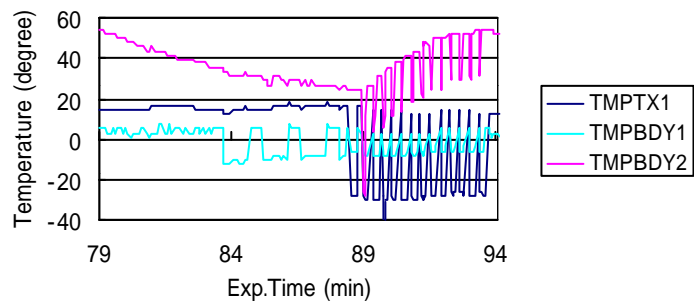


図5.2.10.6 サイクル6 温度変化



< サイクル7 (Exp.time:94.0 ~ 109.0) >

図5211.1 サイクル7 RSSI

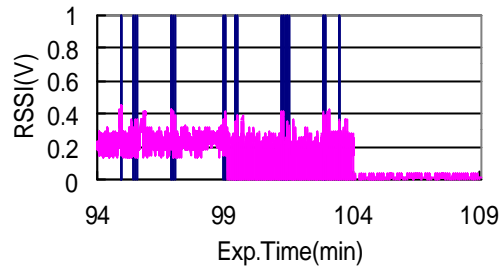


図5.2.11.2 サイクル7 アップリンク時RSSI(1)三陸局と東大局

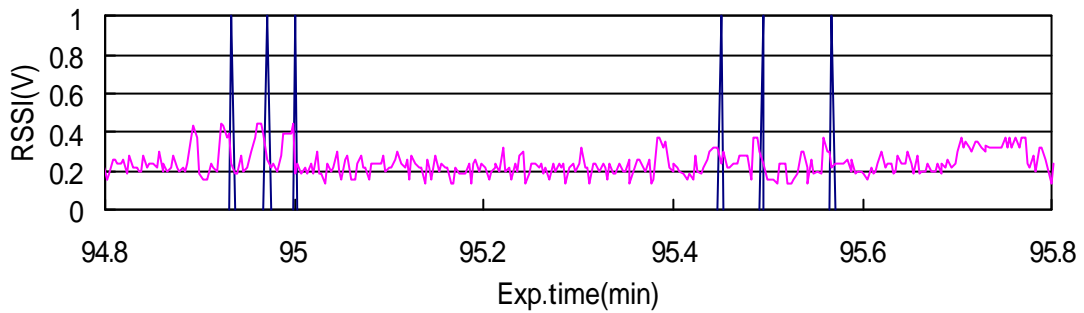


図5.2.11.3 サイクル7 アップリンク時RSSI(2)三陸局

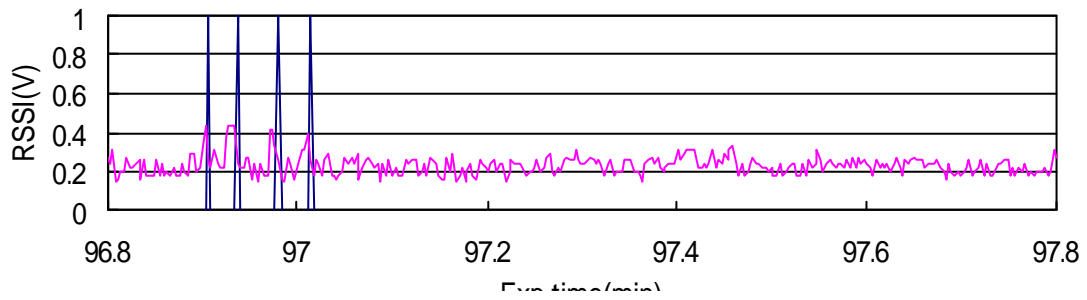


図5211.4 サイクル7 アップリンク時RSSI(3)三陸局と東大局

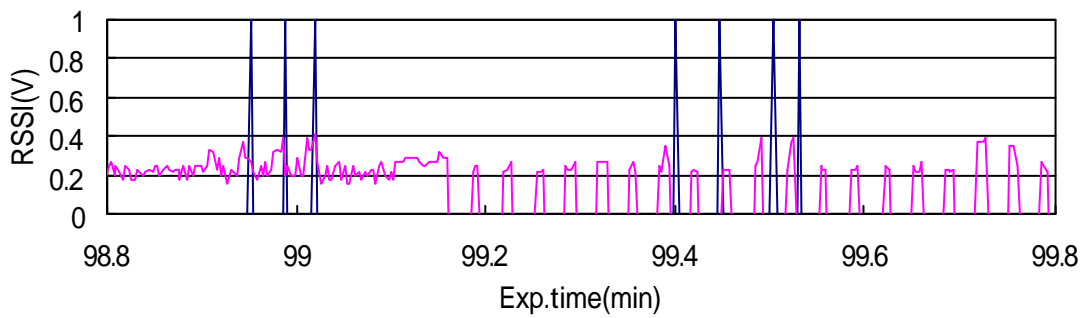


図5.2.11.5 サイクル7 アップリンク時RSSI(4)三陸局と東大局

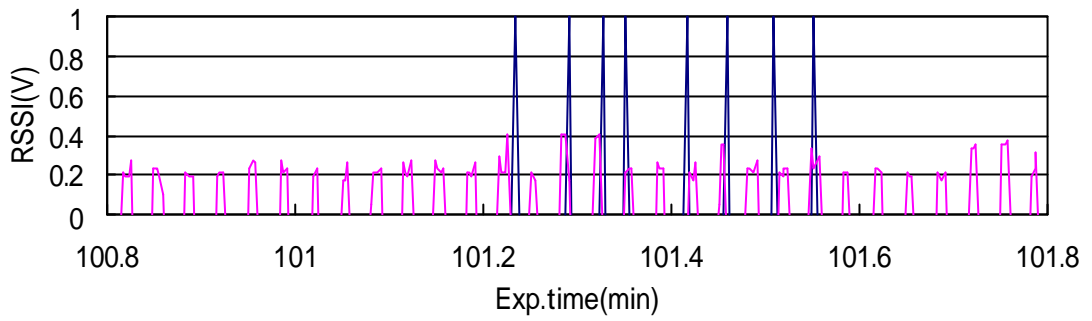


図5.2.11.6 サイクル7 アップリンク時RSSI(5)三陸局と東大局

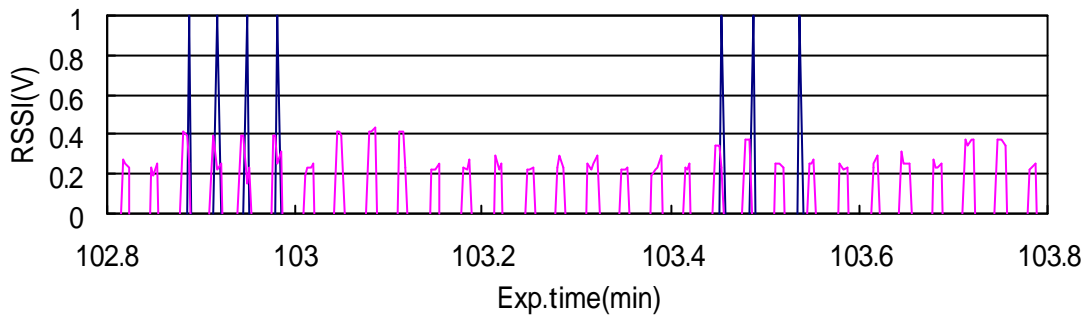
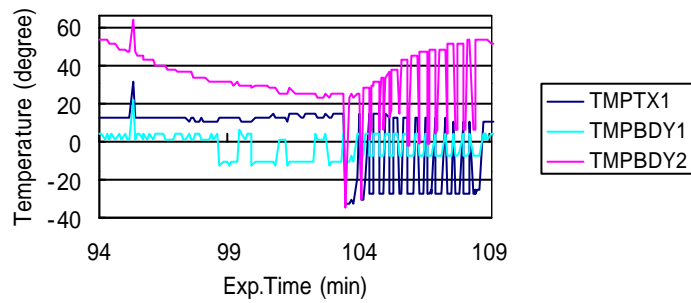
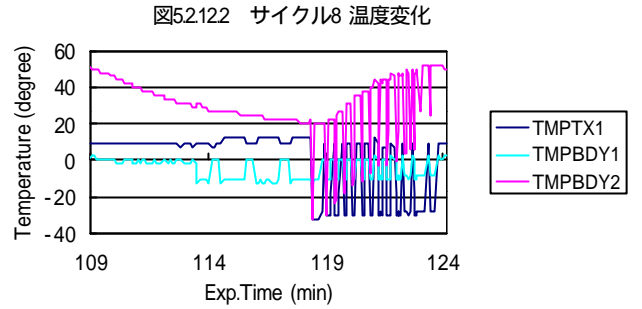
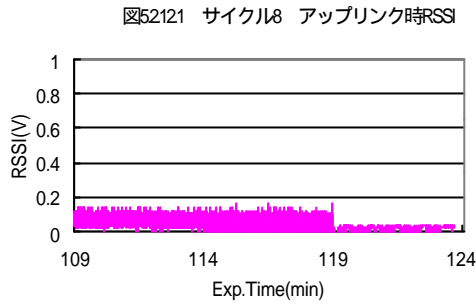


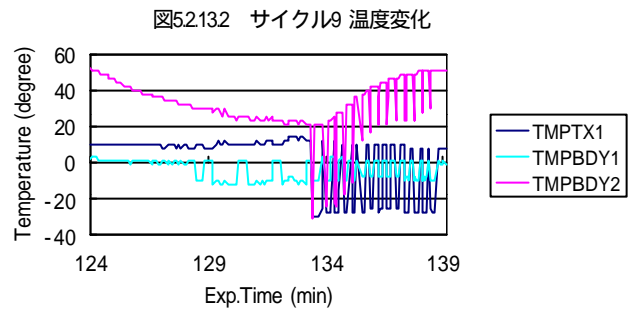
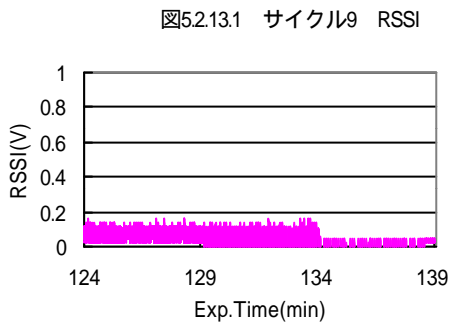
図5.2.11.7 サイクル7 温度変化



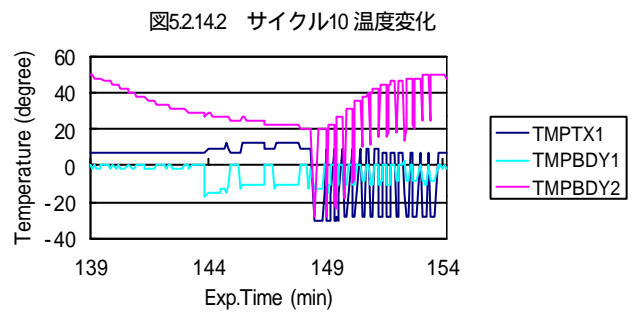
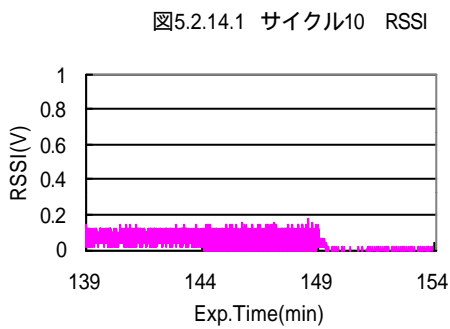
< サイクル 8 (Exp.Time:109.0 ~ 124.0) >



< サイクル 9 (Exp.Time:124.0 ~ 139.0) >



< サイクル 10 (Exp.Time:139.0 ~ 154.0) >



< サイクル 11 (Exp.Time:154.0 ~ 169.0) >

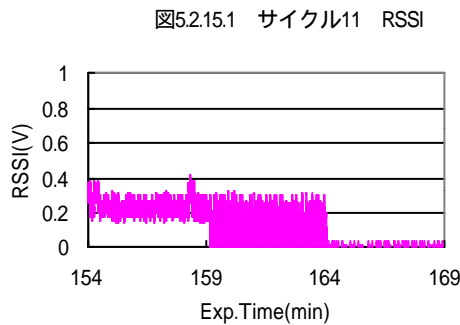


図5.2.15.2 サイクル11アップリンク時RSSI(1)高専局と菅平局？ノイズ？

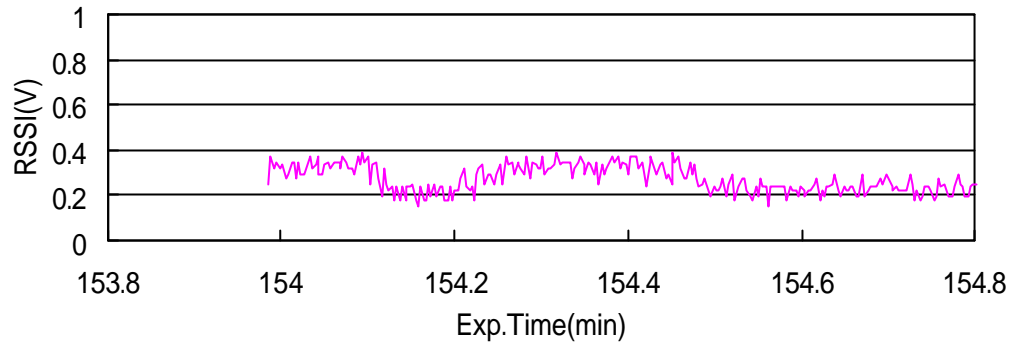


図5.2.15.3 サイクル11 アップリンク時RSSI(2)菅平局？ノイズ？

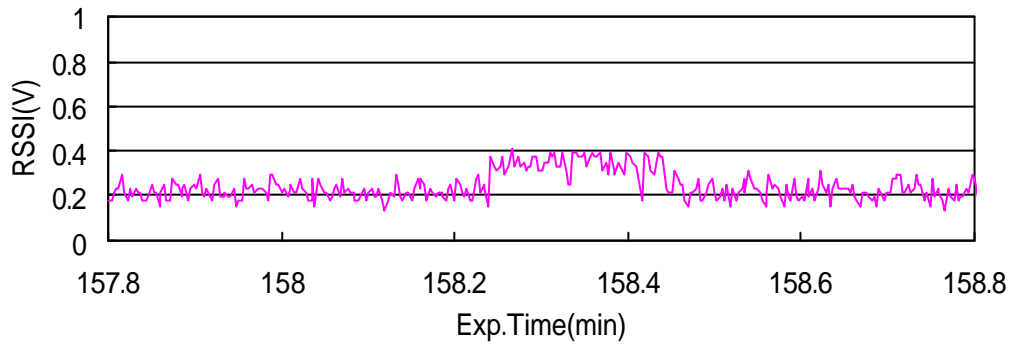
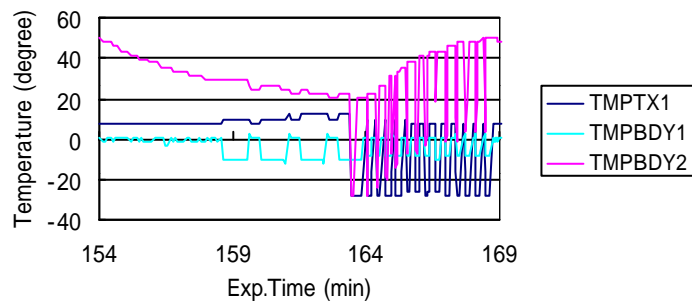


図5.2.15.4 サイクル11 温度変化



< サイクル 12 (Exp.Time:169.0 ~ 184.0) >

図5.2.16.1 サイクル12 RSSI

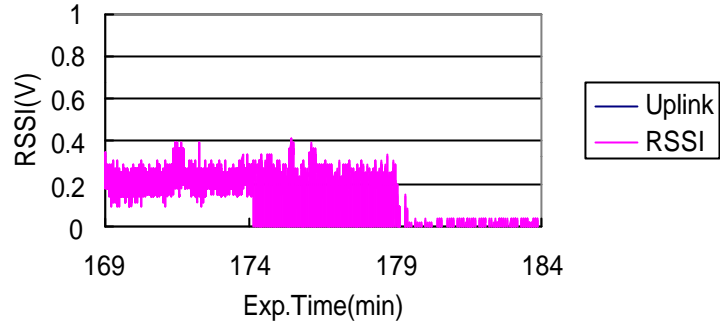


図5.2.16.2 サイクル12 アップリンク時RSSI (1) 東大局?

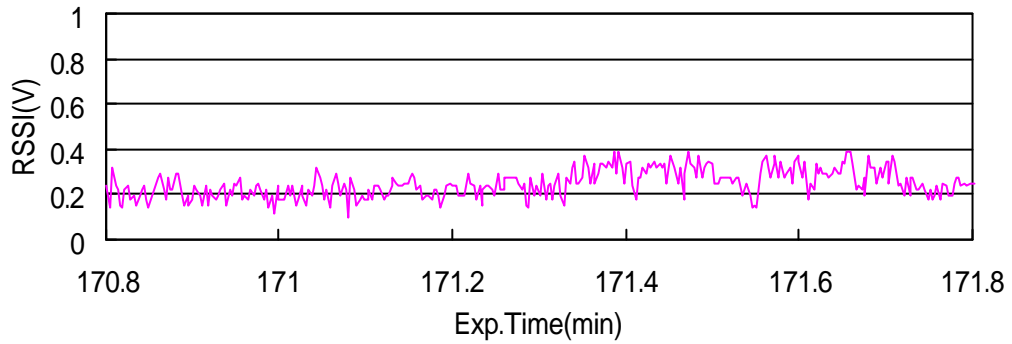


図5.2.16.3 サイクル12 アップリンク時RSSI (2) 東大局?

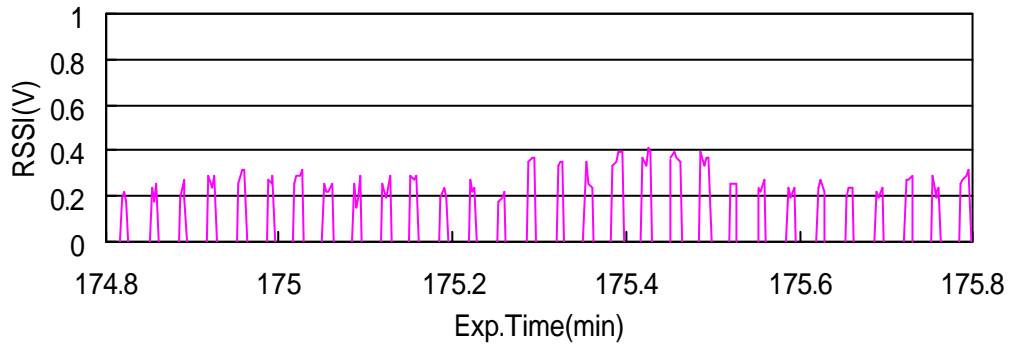
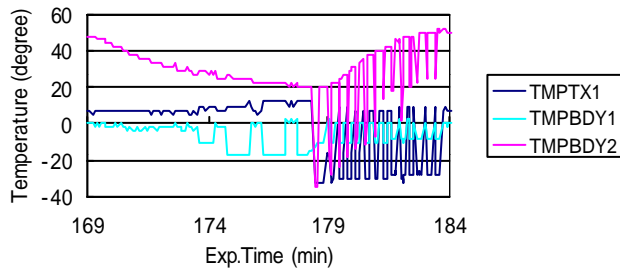


図5.2.16.4 サイクル12 温度変化



< サイクル 13 (Exp.Time:184.0 ~ 199.0) >

図5.2.17.1 サイクル13 RSSI

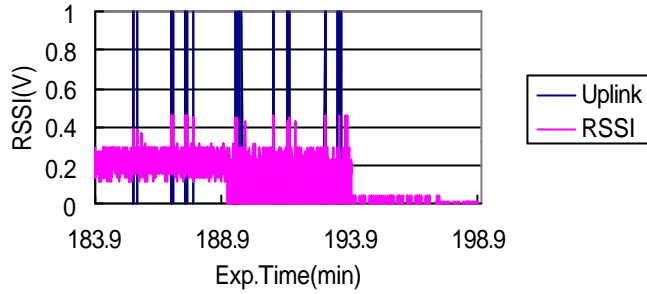


図5.2.17.2 サイクル13 アップリンク時RSSI (1) 東大局

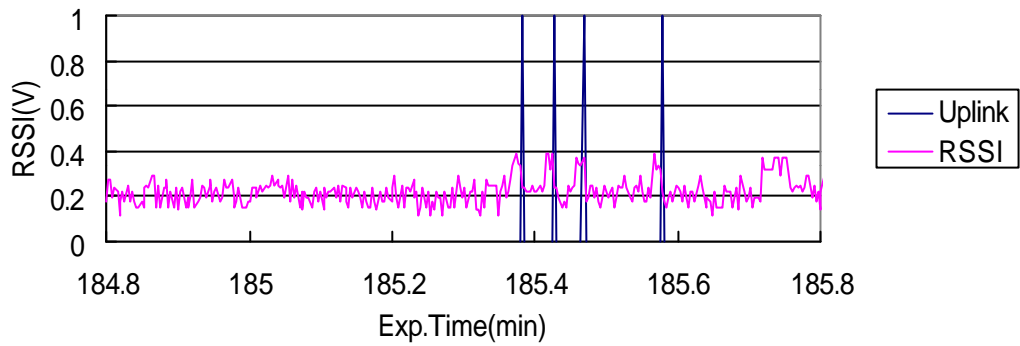


図5.2.17.3 サイクル13 アップリンク時RSSI (2) 三陸局と東大局

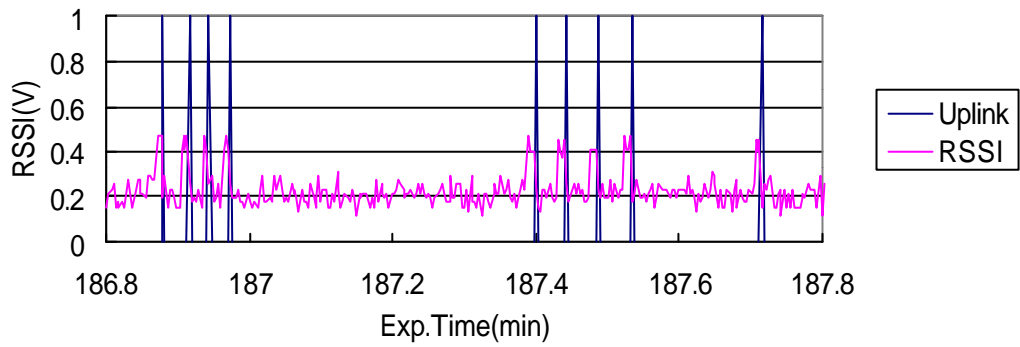


図5.2.17.4 サイクル13 アップリンク時RSSI (3) 東大局

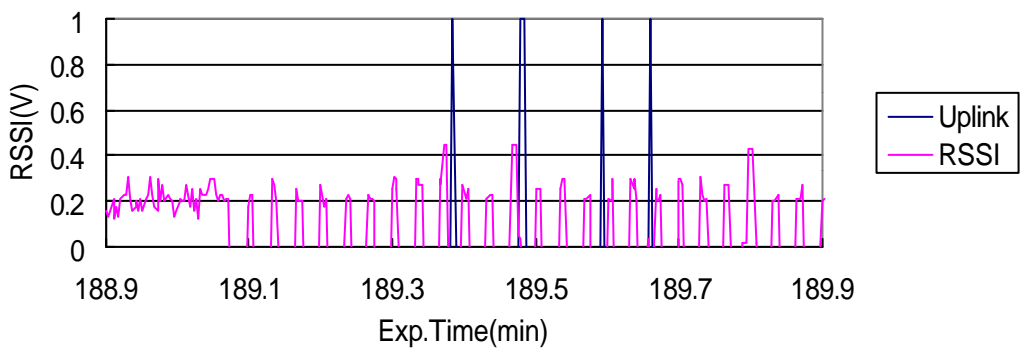


図5.2.17.5 サイクル13 アップリンク時RSSI (4) 三陸局と東大局

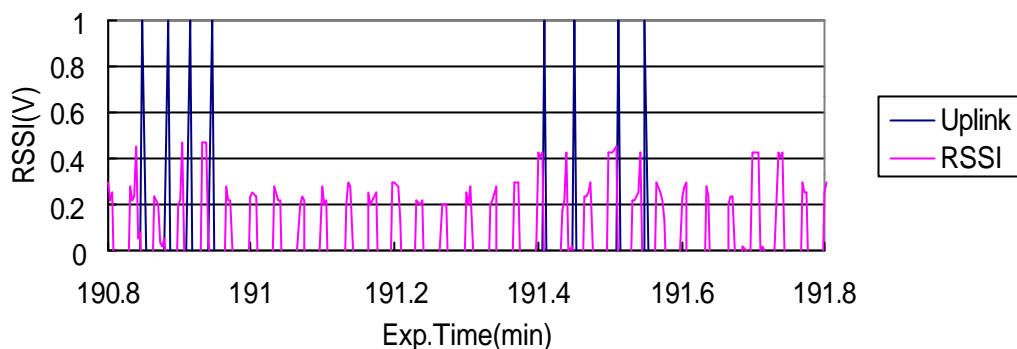


図5.2.17.6 サイクル13 アップリンク時RSSI (5) 三陸局と東大局

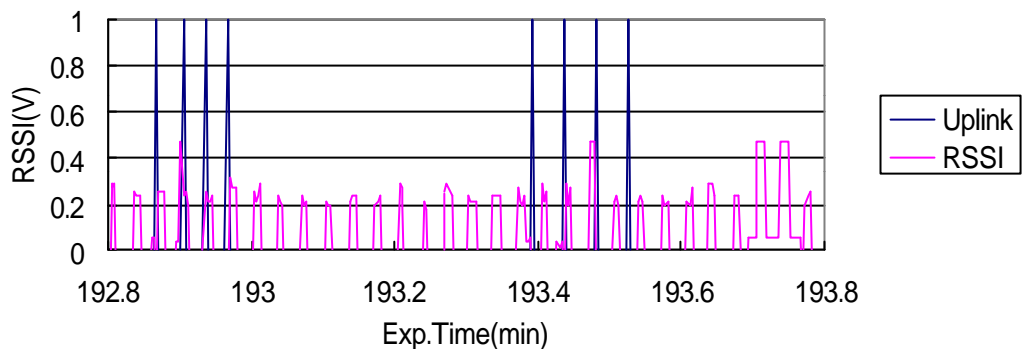
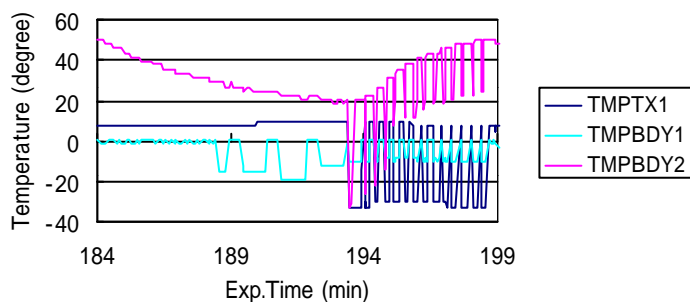


図5.2.17.7 サイクル13 温度変化



< サイクル 14 (Exp.Time:199.0 ~ 213.9) >

図5.2.18.1 サイクル14 RSSI

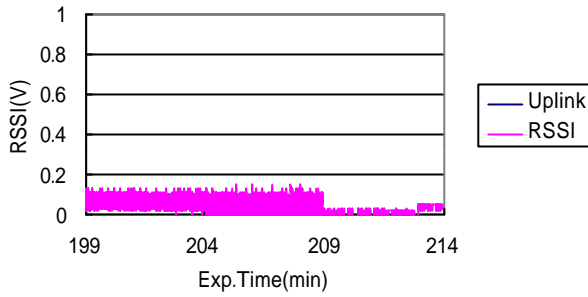
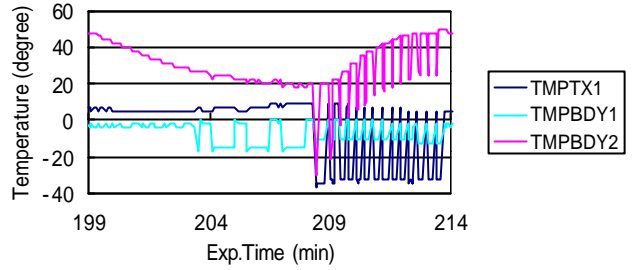


図5.2.18.2 サイクル14 温度変化



< サイクル 15 (Exp.Time:213.9 ~ 228.9) >

図5.2.19.1 サイクル15 RSSI

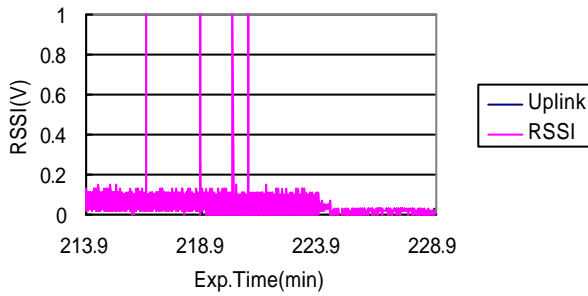
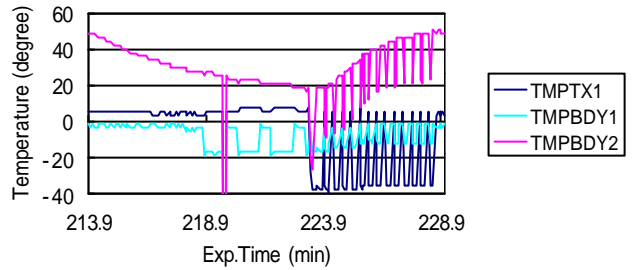


図5.2.19.2 サイクル15 温度変化



< サイクル 16 (Exp.Time:228.9 ~ 243.9) >

図5.2.20.1 サイクル16 RSSI

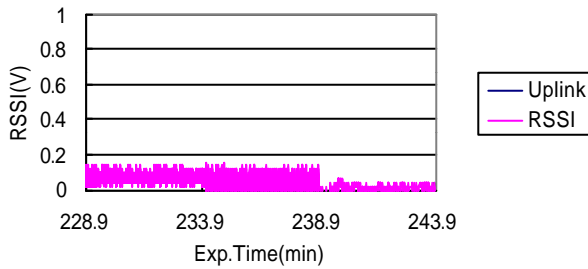
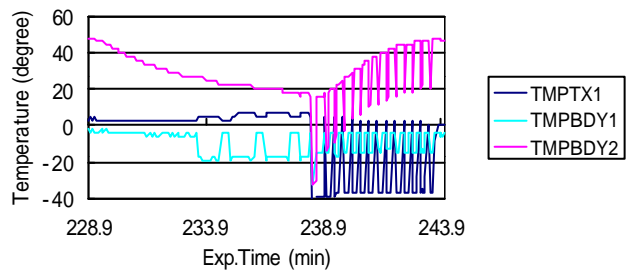


図5.2.20.2 サイクル16 温度変化



< サイクル 17 (Exp.Time:243.9 ~ 258.9) >

図5.2.21.1 サイクル17 RSSI

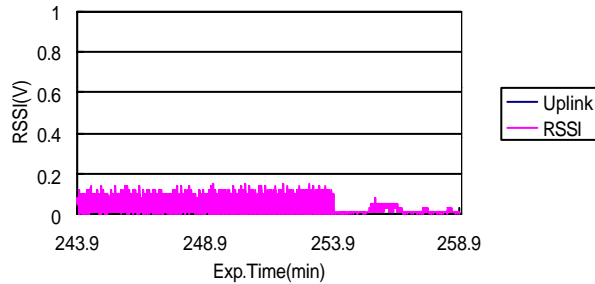
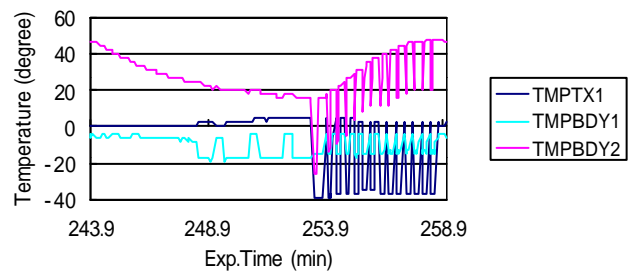


図5.2.21.2 サイクル17 温度変化



< サイクル 18 (Exp.Time:258.9 ~ 273.9) >

図5.2221 サイクル18 RSSI

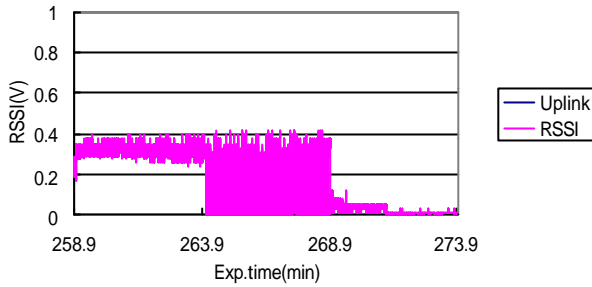
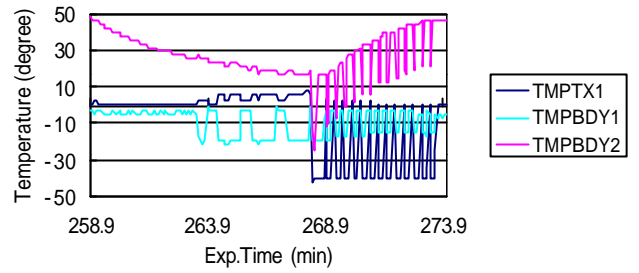


図5.2222 サイクル18 温度変化



< サイクル 19 (Exp.Time:273.9 ~ 288.9) >

図5.2231 サイクル19 RSSI

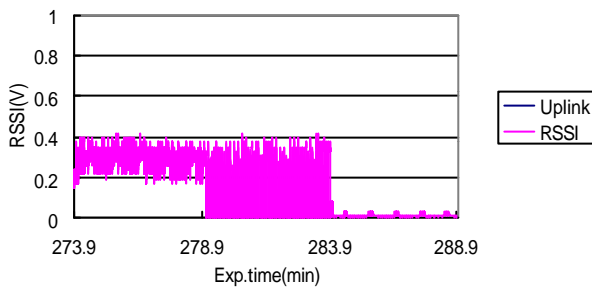
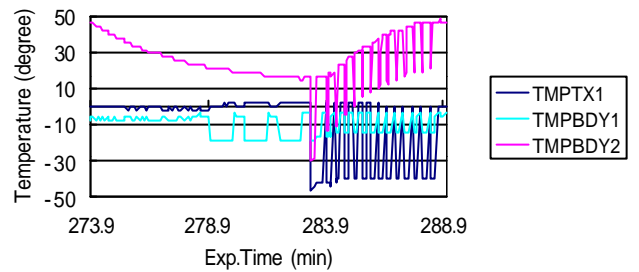


図5.2232 サイクル19 温度変化



< サイクル 20 (Exp.Time:288.9 ~ 303.9) >

図5.2241 サイクル20 RSSI

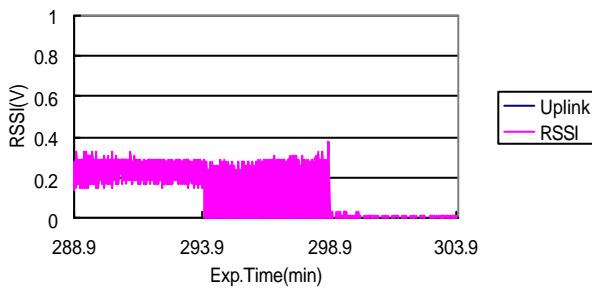
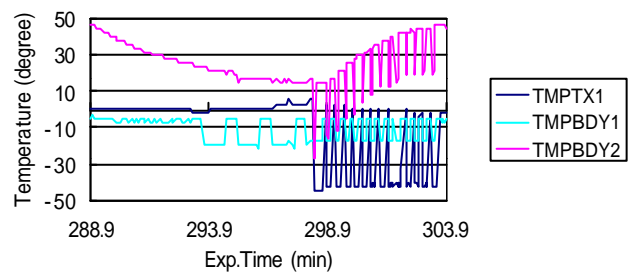


図5.2242 サイクル20 温度変化



< サイクル 21 (Exp.Time:303.9 ~ 318.9) >

図5.2251 サイクル21 RSSI

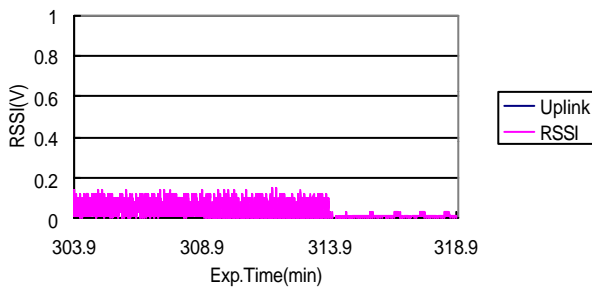
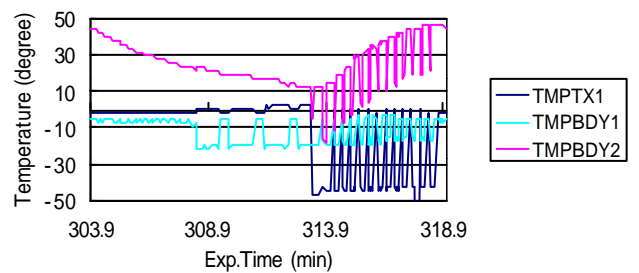


図5.2252 サイクル21 温度変化



< サイクル 22 (Exp.Time:318.9 ~ 333.9) >

図5.226.1 サイクル22 RSSI

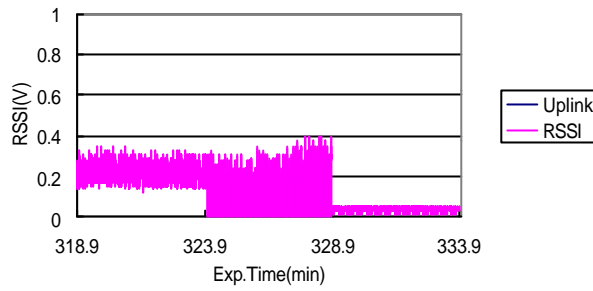
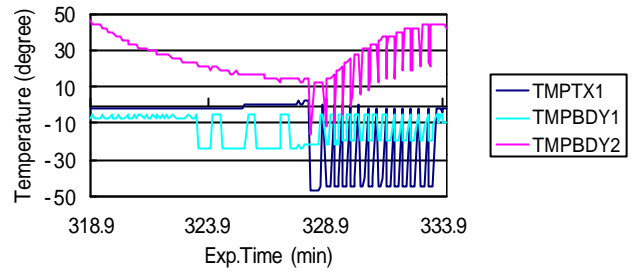


図5.226.2 サイクル22 温度変化



< サイクル 23 (Exp.Time:333.9 ~ 348.9) >

図5.227.1 サイクル23 RSSI

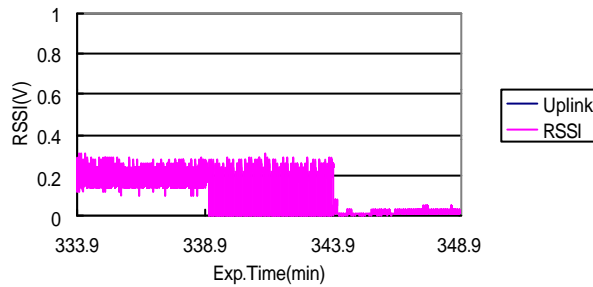


図5.227.2 サイクル23 温度変化

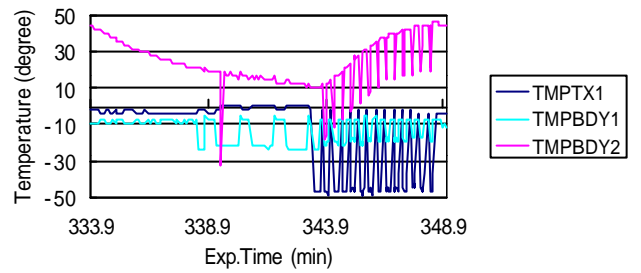
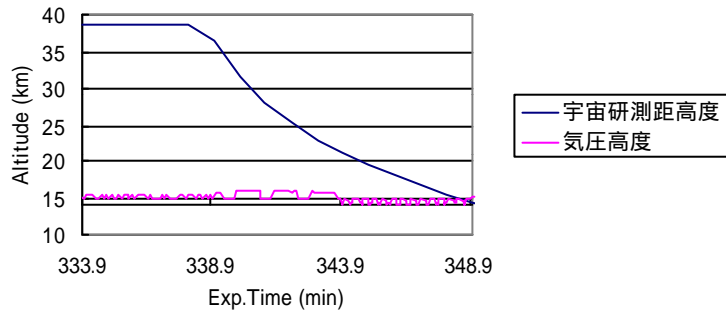


図5.227.3 サイクル23気球高度履歴 (気圧高度と測距高度)



< サイクル 24 (Exp.Time:348.9 ~ 363.9) >

図5.228.1 サイクル24 RSSI

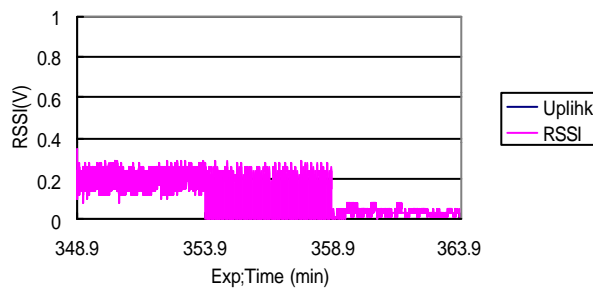


図5.228.2 サイクル24 温度変化

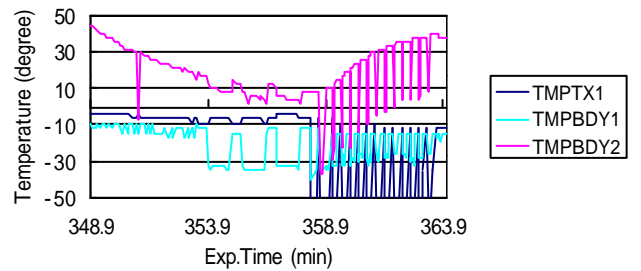
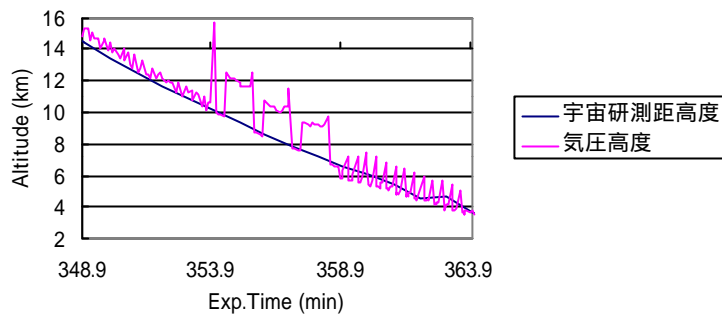


図5.2.28.3 サイクル24気球高度履歴 (気圧高度と測距高度)



< サイクル 25 (Exp.Time:363.9 ~ 372.2) >

図5.2.29.1 サイクル25RSSI

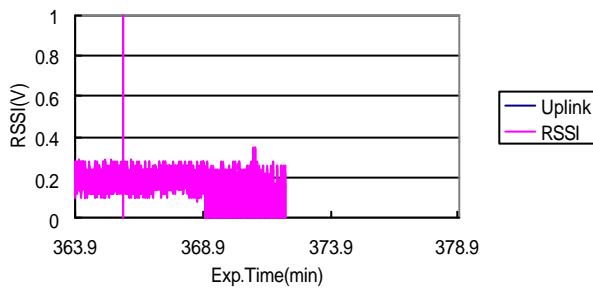


図5.2.29.2 サイクル25 温度変化

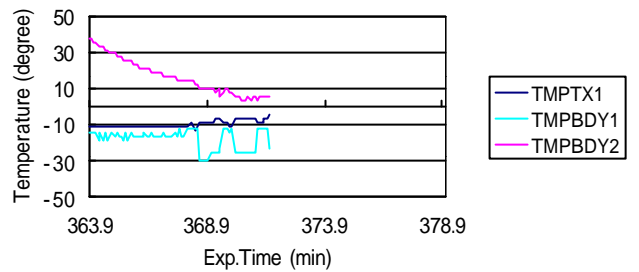
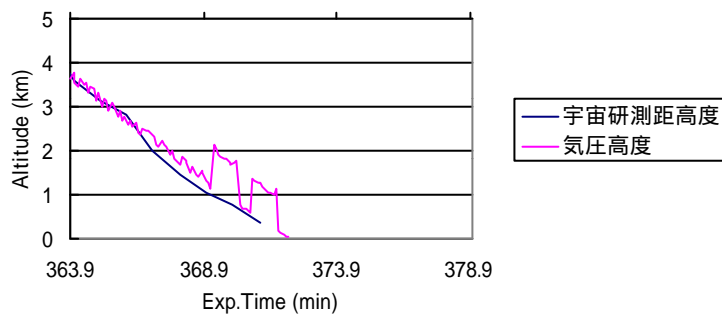


図5.2.29.3 サイクル25気球高度履歴 (気圧高度と測距高度)



6. 成果と今後の課題

6.1 気球通信実験の成果

本実験で得られた成果をまとめる。

- **東京大学CubeSat が軌道上を想定した長距離双方向通信機能を有することを実証**
東大本郷局においてダウンリンク受信では最長 492km、アップリンク送信では最長 425km を達成。
- **2 種類の通信系の特性を把握**
本実験では 2 種類の通信系(COMM1、COMM2)をテストしたが、送信出力の違いによるデコード成功率の違いを評価できた。
- **東京大学本郷局・都立航空高専局・電通大菅平局のダウンリンク受信機能の実証**
東大本郷局だけでなく、高専局や菅平局でもダウンリンク受信が確認されたことで軌道上の CubeSat の運用に対して柔軟に対応することが可能となった。
- **東京大学本郷局のアップリンク機能の実証**
低送信出力あるいは粗いアンテナ指向でもアップリンク成功が確認され、軌道上でのアップリンクに対する目途が立った。
- **東大本郷局の要求アンテナ指向精度の定量的な評価**
ダウンリンクパケットのデコードに関してはアンテナ指向精度 ± 30 度(@距離 400 ~ 500km) でほぼ完全にデコードできることが確認された。ただし、東大局は近傍に高い建物があり、地理的な影響を考慮に入れる必要がある。アンテナパターンを考えると半値幅の中に収めて指向する事が望ましいため、指向精度 ± 15 度で指向したい。
- **運用の経験**
本実験では、三陸局・東大局・高専局・菅平局の 4 つで同時運用を行った。各局間の連絡は電話で行い、30 秒ごとにアップリンクする局が切り替わっていくという時間的にハードな運用をしたが、今回の経験は実際の運用にむけて貴重な経験となった。本実験では、アップリンクのタイミングが重なる等の問題は全く起きず、計画通りの運用が出来た。

6.2 今後の課題

■ ノイズの除去

本実験の準備段階でノイズ対策に非常に悩まされた。この原因は回路設計と基板パターン作成、実際の基板製作のいずれにも問題があった。本実験では発生したノイズが無線機に(特に送信機に)混入しないように対策を取ったが、CubeSatFM に向けてはノイズを発生しないような設計が求められる。今後ノイズの発生源がどこにあるのかを解明するため、スペアナとオシロを用いた計測が必要である。(理論に基づく EMC 対策) もし必要があれば、他の系への基板パターン製作に要求を出す可能性もある。

■ FM 受信機の故障原因の特定

本実験の途中でアップリンクが途絶し、一端回復するが再びダウンするという問題が生じた。当初、これは無線機が低温になりすぎたためではないかと思われたが、テレメトリデータを解析してみると高々 -10 度程度までしか下がっていないことが分かる。無線機の動作は -30 度まで保証されているため、温度が直接の原因で無い可能性が高い。テレメトリを見ると、アップリンク途絶時は、無信号時の RSSI 出力がアップリンク成功時のサイクルの無信号時出力よりも低くなっていることが分かる。この現象と受信機の故障とが関係があるのか、今後究明する必要がある。

■ アンテナ整合

今回の気球実験モデルは、送信アンテナに関しては、整合をかなりよく取ることが出来た..しかし、受信アンテナに関してはそれほどよく整合を取ることが出来なかった。気球実験モデルと本番の CubeSat では、アンテナ取り付け位置が変更されていることもあり、新たにアンテナ整合試験と正確なアンテナパターン測定をしなければならない。(絶対利得の正確な測定)

謝辞

本実験では、非常に多くの方々のご助力を頂いた。

我々のペイロードのために、気球及びバスを用意していただき、ノイズ対策など様々な面で助言を頂いた、

山上先生、稲谷先生、松坂さん、鳥海さん、斎藤さんをはじめ宇宙研気球観測グループの皆さん。

CubeSat アンテナ整合およびパターン測定のため快く電波暗室や測定環境を提供してくださった都立航空高専の若林先生、そして高専のパラボラアンテナを用いてダウンリンク受信に協力して頂いた無線部の学生の皆さん

電通大菅平衛星受信局の設備を快く貸して下さった冨澤先生

高高度で使用可能な GPS レシーバをお忙しい中、特別に提供してくださった古野電気の技術者の皆さん

実験準備が長引いて帰りが非常に遅くなっても、温かい食事を用意してくださった日の出荘の皆さん

皆様のご協力に東京大学 CubeSat チーム一同、心から感謝致します。