

報 告

長岡工業高等専門学校における 極軌道衛星からのAPT(AUTOMATIC PICTURE TRANSMISSION)信号受信の試み

高橋恭一¹

¹教育研究技術支援センター (The Technical Support Center for Research and Education, Nagaoka National College of Technology)

ATTEMPTS TO RECEIVE THE APT(AUTOMATIC PICTURE TRANSMISSION)
SIGNAL FROM POLAR ORBITING SATELLITES IN NAGAOKA NATIONAL
COLLEGE OF TECHNOLOGY.

Kyouichi TAKAHASHI¹

和文要旨

人工衛星には、通信衛星、放送衛星、気象衛星、そしてカーナビゲーションなどで位置情報を得るためのGPS (Global Positioning System) 衛星など、多種多様な実用衛星が稼働している。その中で、アメリカ合衆国の国立海洋大気庁(NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration)から打ち上げられた、極軌道で地球を周回し地表の植生分布状況、海面温度、雲状況などに関する可視域、赤外線域の撮影画像を地上に送信している NOAA 衛星がある。

本研究では受信設備を製作、構成し、NOAA 衛星からの APT 信号による撮影画像の受信および復号を試み、併せて長岡工業高等専門学校における衛星パス範囲を検証し南北方向の受信可能な仰角測定を行った。

Key Words : *polar orbiting satellites, noaa, apt, qfh antenna, elevation,*

1. 緒言

人工衛星には、通信衛星、放送衛星、気象衛星そしてカーナビゲーションなどで位置情報を得るための GPS 衛星など、多種多様な実用衛星が稼働している。放送衛星や気象衛星は、高度約 36,000 [km] の静止軌道上にあって 24 時間高信頼の情報を提供し続けている。

極軌道科学衛星は、日本から2009年1月23日に宇宙航空研究開発機構(JAXA : Japan Aerospace

Exploration Agency) から温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT : Greenhouse gases Observing Satellite), H-II A ロケット(通称いぶき)が発射された。この中にはいくつかの小型衛星が相乗り形態で搭載され、現在これらの衛星より宇宙からの観測データや電波ビーコンなどが送信されている。そのひとつに東京都立産業技術高等専門学校の超小型衛星開発プロジェクトの KKS-1 (通称 輝汐, 一辺約 15 [cm] の立方体形状, 重量 約 3.17 [kg]) も含まれ、極軌道(高度 636 [km] 付近)で地球を周回している。

このプロジェクトの特徴は、世界最年少クラス(15歳～22歳、専攻科生は21,22歳)の衛星開発プロジェクトで、宇宙を題材とした最先端ものづくり教育研究が開発目的である。

一方、アメリカ合衆国では国立海洋大気庁から打ち上げられた地球観測衛星 NOAA がある。NOAA 衛星は気象と地表の植生の分布状況、オゾンホール、海流や海面温度などの観測に可視域、赤外線域の撮影画像を地上に送信している。

当然のように使用している人工衛星からの情報は、衛星からの直接受信以外、身近にはテレビの天気予報番組だったり、インターネットや新聞の情報だったり、二次的に加工された情報を利用している。

本研究では、各種ある極軌道衛星の中で、NOAA 衛星について、電波を直接受信する簡便な装置を製作、構成し、長岡工業高等専門学校の準天頂を通過する衛星の通信時間が長くても 15 分程度、受信途中におけるドップラー効果による受信周波数偏移、およびアンテナの指向性、衛星位置等に依存する受信の安定性の変化など、各種の課題が考えられる中、撮影画像の受信、復号を試み、併せて長岡工業高等専門学校における衛星のパス範囲を検証し南北方向における受信開始・終了仰角測定を行った。

2. NOAA 衛星の概要

NOAA 衛星は、極軌道気象衛星で高度 810 [Km] 付近を、周期約 100 分で周回し、地上視野 3000 [Km]、分解能 1.1 [Km]で、地球環境の変化を調査および予測し、アメリカの沿岸域や海洋の自然資源を保全および管理し、持続的な経済活動に資することを目的としている。

大きさの例として NOAA 17号の形状は、長さ約 2 [m]、直径 2 [m]、重量 1.5 [t]の5面体で、可視域、赤外線域のセンサを搭載している。改良型高解像度放射計 (AVHRR : Advanced Very High Resolution Radiometer) で、可視域から赤外線域を、6チャンネルに分けて撮影画像を取得している。

地球への伝送方法としては、高解像度伝送 (HRPT : High Resolution Picture Transmission)と自動画像伝送の APT 信号がある。HRPTは、多数のセンサからのデータを 1.7 [GHz]帯のデジタル変調で送信している。APT は 6 チャンネルの撮影画像の中で、2 つのチャンネルを随時選択し、解像度を地上分解能 4 [Km] に削減処理したデータを、137 [MHz]帯でFM (Frequency Modulation) のアナログ変調で送信している。

2. 1 衛星の周回軌道

衛星の周回軌道は、協定世界時 (UTC : Universal Time Coordinated) と軌道要素に基づき計算される。

軌道要素の形式は、ケプラー軌道要素のテキスト形式のフォーマットである 2 行要素 (NASA 2 Line Element) が用いられ、アメリカ航空宇宙局 (NASA : National Aeronautics and Space Administration) と北アメリカ航空宇宙防衛司令部 (NORAD : North American Aerospace Defense Command) 等で古くから使用されている。最新の衛星軌道要素は、NASA, NORAD, NESDIS (National Environmental Satellite Data and Information Service) 等の各ホームページで公開されていて入手できる。

2. 2 NOAA の搭載装備概要

地球表面状況は、可視域、赤外線域などの放射、反射強度が、リモートセンシング技術により測定し知ることができる。NOAA 17 号に搭載されている AVHRR 各種センサを表-1 に示す。

表中チャンネル 3A とチャンネル 3B は昼夜の別で切り替えられて送信されている。尚、地表面の水や土、植物、雲状況等の物性別分光反射、放射特性と各種センサとの対応関係については別項に譲る。

次に、2. の概要で述べた 2 つある地上への伝送周波数帯で、簡易な地上設備でデータ利用が可能な

表-1 NOAA17号に装備してあるAVHRR装置 (NESDISより作成)

構成	概要
ベースプレート	AVHRR ベースプレート
チャンネル 1	#1 スペクトル 0.58～0.68 [μm]
チャンネル 2	#2 スペクトル 0.725～1.0 [μm]
チャンネル 3A	#3A スペクトル 1.58～1.64 [μm]
チャンネル 3B	#3B スペクトル 3.55～3.93 [μm]
チャンネル 4	#4 スペクトル 10.3～11.3 [μm]
チャンネル 5	#5 スペクトル 11.5～12.5 [μm]
電子装置	AVHRR エレクトロニクス
光学系	AVHRR 用望遠鏡と鏡
PSU	パワーサブライユニット
放射器クーラー	AVHRR 放射器クーラー
走査モーター	AVHRR 走査モーター

表-2 NOAA17号APTの送信装置仕様
(NESDISより作成)

データチャンネル数	6チャンネル中2チャンネル
分解能	4.0[km]
変調方式	FM波に2.4[KHz]のAM波の変調
送信周波数	137.50 or 137.62[MHz]
送信出力 (EOL)	5 [W] (37[dBm])
放射出力	36.7([dBm], @63[°])
偏波	右旋

APT 送信装置の仕様を表-2 に示す. 表から, 送信電力 5 [W], 送信周波数 137.50 [MHz] ないしは 137.62 [MHz] であることが分かる.

3. APT 信号の受信設備

HRPT 信号の受信はデジタル信号のスレッシュホールド効果により, 低 SN 比では画像受信が不可能になる. この周波数帯における最適なアンテナは, 直径 1.2 [m] 程度のパラボラアンテナになる.

高 SN 比が必要なことからアンテナサイズは小型にはできず, 指向特性が鋭くなり, 精密なアンテナ制御を備えた衛星追尾制御装置¹⁾も必要となる. こうしたアンテナ装置は総重量の増加や耐風性能や位置再現性も大きな問題で, 簡易な設備での画像受信は困難である.

他方の APT 信号は, 低 SN 比でもある程度の画像品質の受信は可能で, アンテナサイズも使用周波数帯から $\lambda/2$ ダイポールアンテナを仮定し推算すると, エレメントサイズはおよそ 1.0 [m] で済む. 受信機への要求性能も, APT 受信については簡便なもので済ますことができる.

3. 1 APT受信アンテナ

3. で述べた理由から簡易な設備での受信画像品質は, APT 受信に優位性がある²⁾. しかしながら高度約 810 [km] を, 北の地(水)平線から天頂を経て南の地(水)平線に過ぎ去る, 或いは反対行程で移動する衛星から放射される電波を, 地上にて固定アンテナ設備で受信しデータ解析するには, 設備の高い総合性能が必要となり, 電波の受け手となるアンテナ

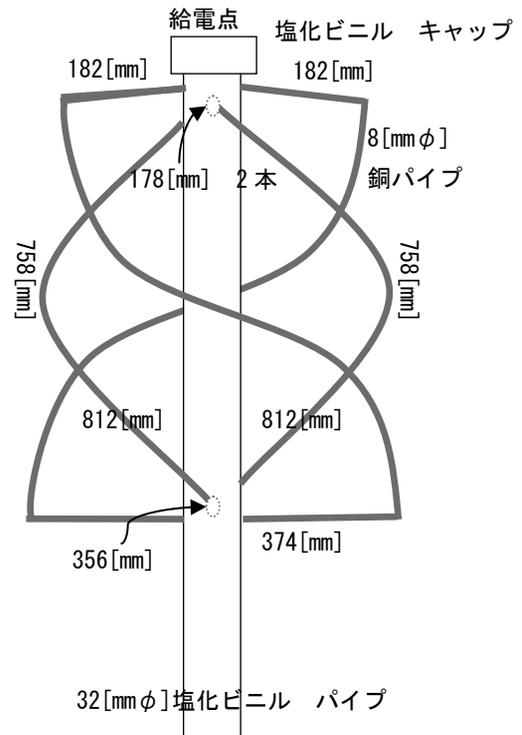


図-1 QFHアンテナの概要

ナ性能は受信性能に大きく影響する.

この周波数帯のアンテナ特性は, 地上間相互の通信に適す特性で開発設計されているものが多い.

APT受信への対応として従来の VHF アンテナ (Very High Frequency Antenna)を組み合わせたり, 変形して構成し, 地上の固定姿勢で天頂および地(水)平線の各方向に対して良好な指向特性となるように工夫し使用されている.

各種工夫されたアンテナ形式における指向特性などについて, WEB 上で数々の実験報告がされているが, ここではAPT復号ソフト (WXtoImg) を提供しているホームページで推奨されている QFH アンテナ (The Quadrifilar Helical Antenna)を製作・装備した.

QFH アンテナについては, イギリスの熱心な気象衛星ファンの Bob CobeyとBill Sykes³⁾らによって, 製作概要図および特性の測定結果などが紹介されていて, これを参考に製作した. QFHアンテナの概要を図-1に示す. この図と他の資料から, エレメント部の外形寸法は 374 [mm] × 560 [mm] の円柱形であることが判明した. 各面の指向特性を図-2, 図-3にそれぞれ示す. 図-2 で水平面の指向特性はほぼ円形で, 全周囲に対して均一な感度を示している. 図-3 からは, 垂直面の半値角は 100 [°] と広範囲であることが読み取れる. これは, 低仰角の衛星位置

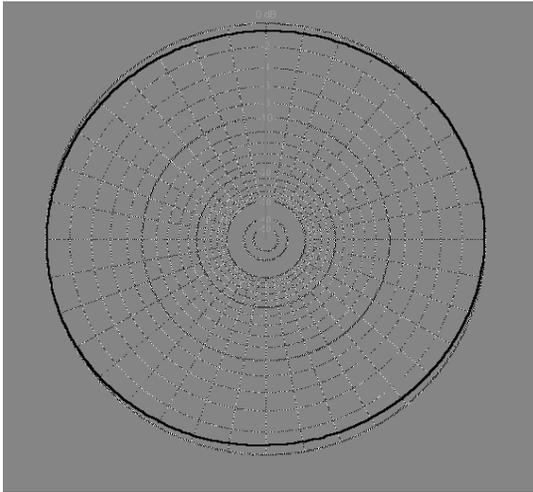


図-2 水平面 (Azimuth) 指向特性
(Bob CobeyとBill Sykesらのホームページより引用)

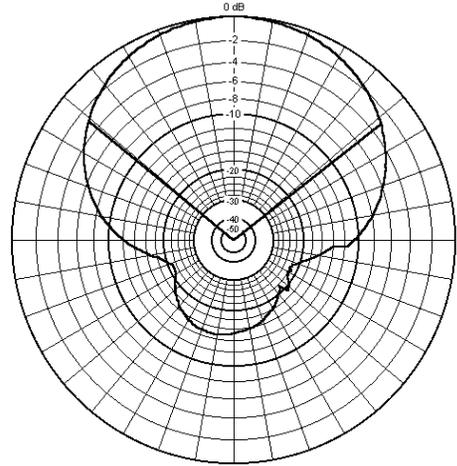


図-3 垂直面 (Elevation) 指向特性
(Bob CobeyとBill Sykesらのホームページより引用)

に対して受信が可能であることを示している。偏波面は円偏波で、最大利得は 5.64 [dBi]である。

製作した QFH アンテナのエレメントには、直径 8 [mm] のヒートポンプエアコンの冷媒循環用部材と屈曲部には同サイズの銅材料のエルボを半田付けし製作した。以上から、APT 信号の受信アンテナとして、製作した QFH アンテナを写真-1 に示す。

アンテナの放射特性などの測定は測定装置の不備のため実施していない。が、同軸ケーブルを接続し、アンテナアナライザ (DELICA AZ1) にて、アンテナインピーダンスを測定したところ、116 [MHz] ~200 [MHz] の範囲で 50 [Ω] が確認できた。

3. 2 衛星の軌道運動の影響と受信機

受信機の基本性能としては、帯域幅(選択度)と受信感度、および周波数の安定性が重要である。

加えてAPT 信号を受信するため、衛星から放射される電波は送信点が約8 [km/Sec] で移動しているので、受信周波数にドップラーシフトを生じ、地上間通信より難しくなる。ドップラーシフトに対応するため、受信機には AFC (Automatic Frequency Control) や APC (Automatic Phase Control)などの受信周波数の自動補正機能⁴⁾が必要になる。

ドップラーシフト周波数の一般式は、

$$f_R : \text{受信周波数 [Hz]}$$

$$f_T : \text{衛星の送信周波数 [Hz]}$$

$$v_{sat} : \text{衛星速度 [m/s]}$$

$$c : \text{光速 [m/s]}$$

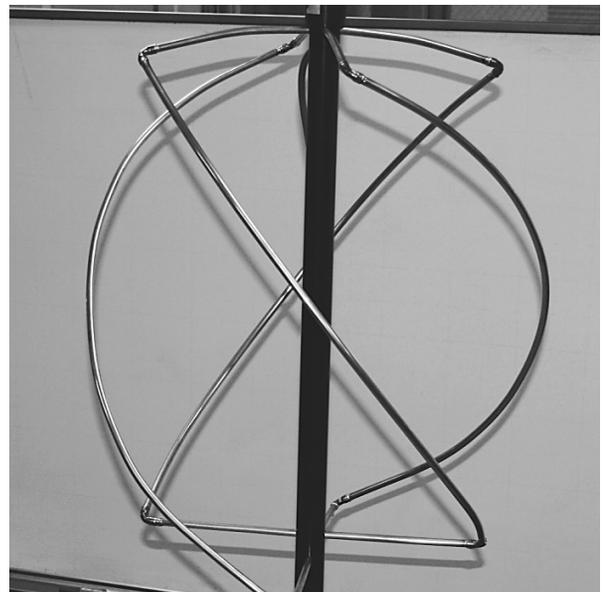


写真-1 製作したQFHアンテナ

θ : 仰角 [°]

とすると

$$f_R = f_T \cdot \frac{c}{(c \pm v_{sat} \cdot \cos \theta)} \quad [\text{Hz}]$$

が知られている。

“±” は衛星が受信点に向かってくるときは“-”，遠ざかるときは“+”とする。

ここで、衛星の送信周波数を 137 [MHz] とすると、近づいてくるときは周波数偏移は +3.65 [KHz]，過ぎ去って行くときは -3.65 [KHz]であるので、パス範囲で 7.3 [KHz]の周波数偏移が見込まれる。衛星

と受信点間の距離が大きく変わり、受信点での電界強度の変化が大きく、受信機のダイナミックレンジを大きくする必要もある。

以上が APT 信号の受信で必要となる受信性能である。この結果より、待ち受け受信の必要とドップラーシフト対応から、周波数などをコンピュータコントロールできる、かつ受信機としての基本性能が十分な、アイコム社の IC-PCR1000 を使用した。表-3に IC-PCR1000 の仕様(抜粋)を示す。なお各種文献からAPT 信号の受信に必要な受信機の帯域幅は 40 [KHz] であることが分かった。

4. APT 信号の受信システム構成

APT 信号受信の調査結果から、製作したQFHアンテナを用いた受信システムの構築を行った。構成概要図を図-4に示す。QFH アンテナで APT 信号を受けた後、IC-PCR1000 にて FM 復調したオーディオ周波数帯の信号を、パソコンのサウンドボードに入力する。受信機出力レベル、受信周波数、帯域幅などはパソコンの RS-232C ポートからコントロールする。尚、この受信機の装備している帯域幅で、APT 受信用途における最適値は 50 [KHz] で、以後この値を用いた。

以上の構成で受信した信号レベルの分析例として、NOAA 15号の FM 復調波の周波数スペクトルを図-5に示す。Tektronix 社の TDS2012B による、1024ポイントの Flattop ウィンドウを被せた FFT 結果である。2.4 [KHz]のサブキャリアレベルが約 -24 [dB]、ノイズレベルが -65 [dB] であった。又、サブキャリアが振幅変調され、サブキャリアの上下 1 [KHz] に信号が確認できる。

以降、サウンドボードに入力された信号の信号処理はパソコンにインストールした WXtoImg のフリーウェアバージョンのソフトウェアによる復号と描画を行った。このソフトウェアの詳細について

表-3 IC-PCR1000 の主な仕様

周波数範囲	0.01000 ~ 252.90000 [MHz]
	255.10000 ~ 261.90000 [MHz]
	266.10000 ~ 270.90000 [MHz]
	275.10000 ~ 379.90000 [MHz]
	382.10000 ~ 411.90000 [MHz]
	415.10000 ~ 809.90000 [MHz]
	834.10000 ~ 859.90000 [MHz]
	889.10000 ~ 914.90000 [MHz]
	960.10000 ~ 1300.00000 [MHz]
受信方式	スーパーヘテロダイン方式
受信可能電波形式	WFM/FM/AM/SSB/CW
周波数安定度	±3[ppm] (1300[MHz]にて、0[°C] ~ +50[°C])
周波数分解能	最小 1 [Hz]
アンテナインピーダンス	50[Ω] 不平衡
中間周波数	1st 266.7[MHz]、2nd 10.7[MHz]、3rd 450[kHz] (WFMを除く)
受信感度	周波数範囲 50 ~ 699.999999
FM/WFM 時は	-10[dBμ] FM
12[dB] SINAD	-2[dBμ] WFM

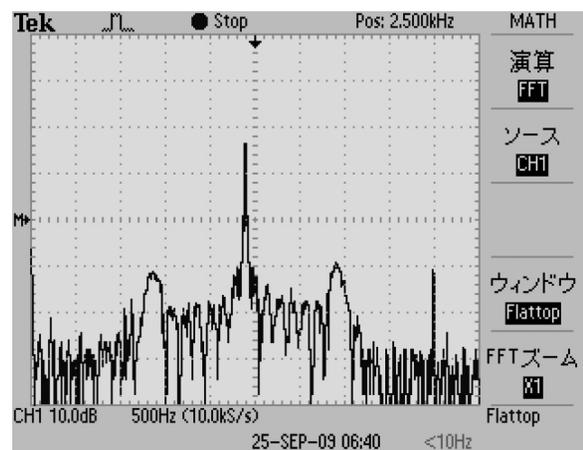


図-5 NOAA15号のFM復調波周波数スペクトル



図-4 システム構成概要図

ては別項に譲る。

5. 受信結果と考察

長岡工業高等専門学校(北緯 37度25分57.95秒, 東経 138度53分21.214秒)の一号館東側屋上(2階建て)に QFH アンテナを設備(写真-2)し, 4章で述べた構成および受信方法により NOAA 衛星からの信号を受信し, 復号処理した結果を写真-3, 写真-4に示す。

写真-3では衛星パスが南 (Northbound)からであるため, 復号開始の上方が南に対応している。WXtoImg ソフトウェア上での描画処理は, コントラストや輝度等の処理を施さない“Pristine”モードで, サウンドボードの内部同期を NOAA からの信

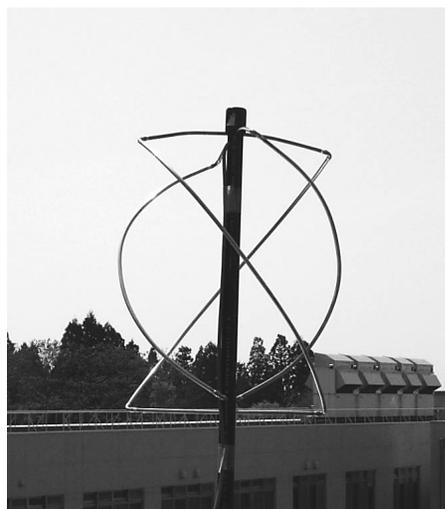


写真-2 長岡高専におけるQFHアンテナの設置状況

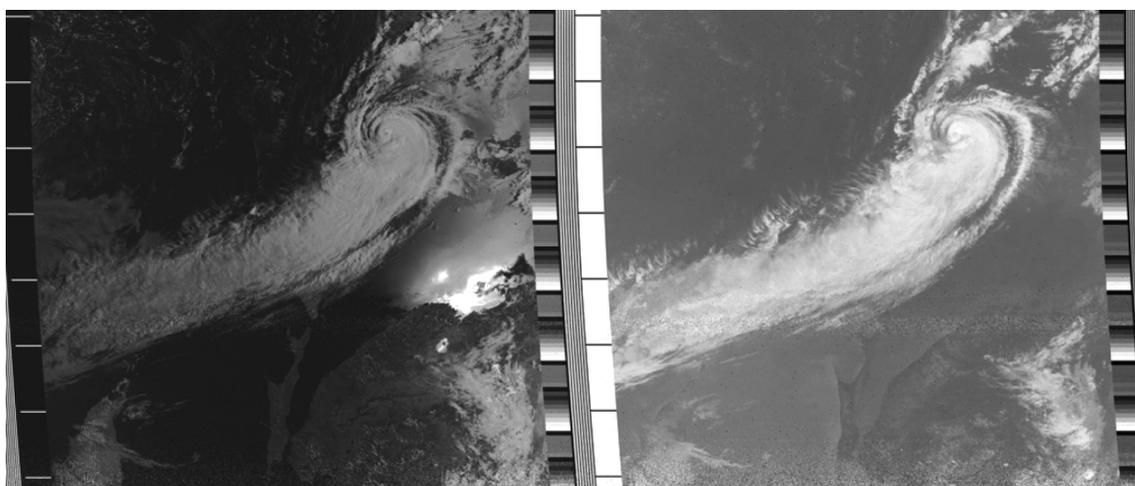


写真-3 NOAA15 号受信画像(台風11号)
(NOAA15 Ch2-4 Pristine 2009.8.31 6:30 UTC)

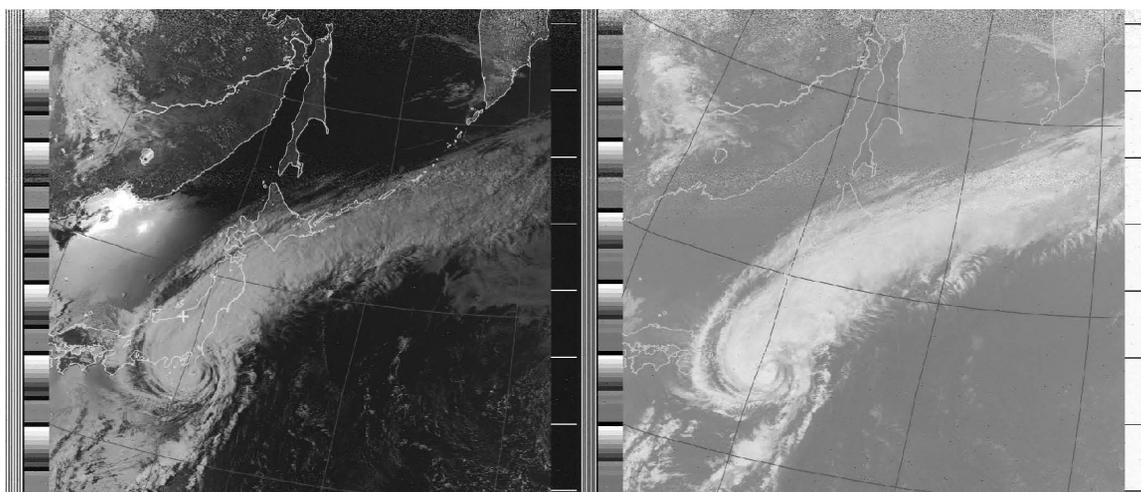


写真-4 NOAA15号からの受信画像にマップ画像を重ねた画像(台風11号)
(NOAA15 Ch2-4 Normal 2009.8.31 6:30 UTC)

号に同期しないで復号した。衛星位置により画像の水平方向の開始位置が順次推移しているのが分かる。

これはドップラー効果によるもので、周波数は衛星パスの初期に送信周波数の 137.500 [MHz]+約 3 [KHz] 推移していて、それから次第に衛星の移動に伴って降下推移している。受信に際しては、情報帯域幅に比較してドップラーシフト周波数が小さく、受信機の帯域幅内であるため受信障害は発生せず、周波数追跡の必要はなかった。

写真-4は、受信時刻における衛星軌道要素で計算されて完成するマップデータに、写真-3 のデータを反転し重ね、ソフトウェアのモード“Normal”処理を施した結果である。

NOAA 衛星から送信された2つの撮影画像とマップデータから、MSA (Multispectral Analyses)処理して完成したものが写真-5である。写真からは、上端

部分で受信信号の SN 比低下に伴う、画像品質の低下が認められる。

6. 結言

遙か数千キロ離れた NOAA 衛星のアンテナ電力が、ソーラーバッテリーからの僅かな供給電力で、撮影画像が送信されてくる。

それを受信するには、受信設備も高性能な設備が必要と考え、LNA (Low Noise Amplifier)を製作・準備した。

製作した LNA は、GaAs (ガリウム・ヒ素)半導体で構成されている IC (SO-10Aパッケージ)を使用した。GaAs 半導体は低ノイズを特長とし、超高帯域(1.5 [GHz] 程度)のヘッドアンプに常用され、製作したLNAは、137 [MHz] で約 25 [dB] の電力利得

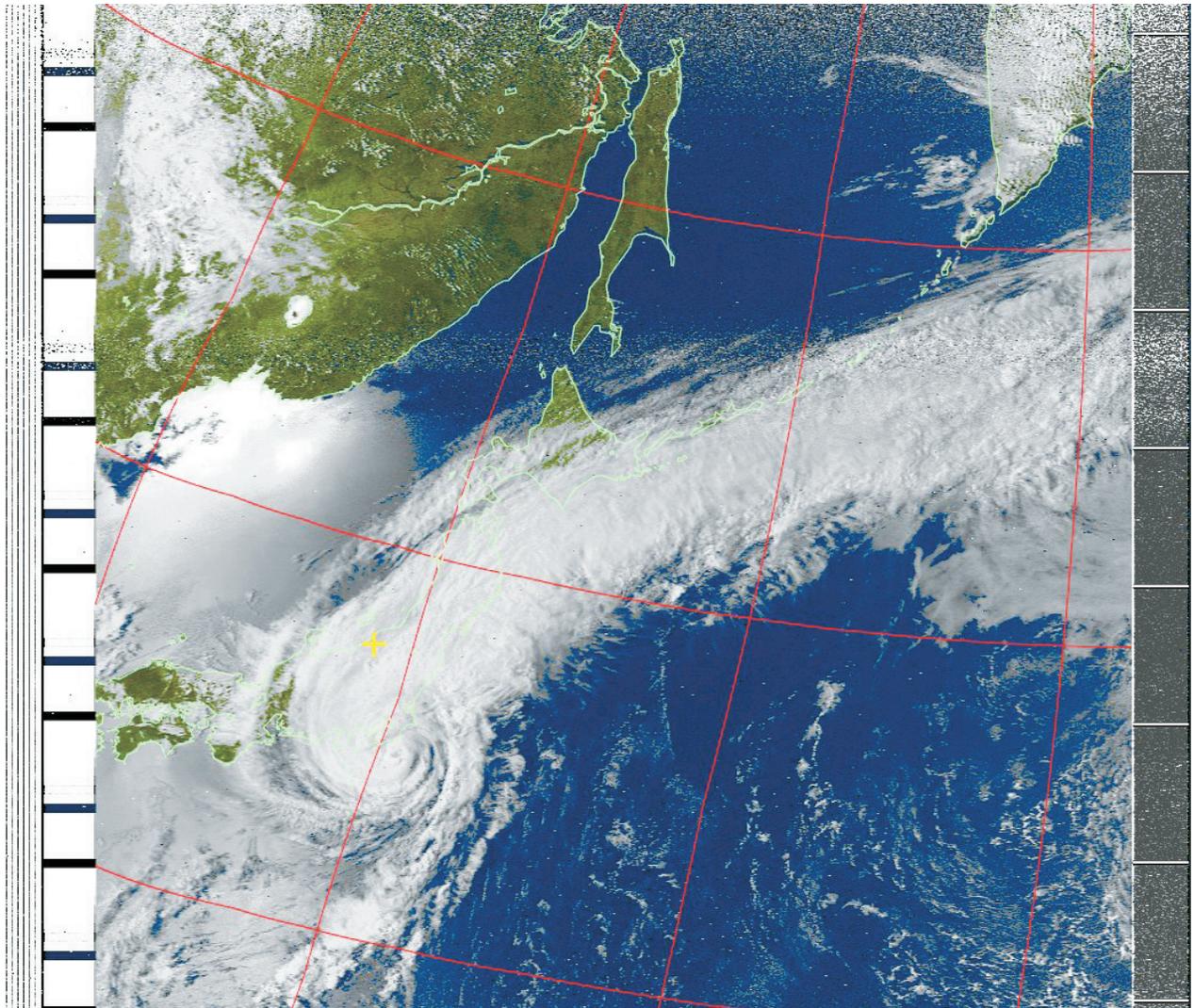


写真-5 NOAA15号からの受信画像(台風11号)

(NOAA15 Ch2-4 Multispectral Analyses 2009.8.31 6:30 UTC)

が得られた。LNA のない図-4の受信設備構成において、NOAA 15号の最大信号強度はSユニットで3, 受信機入力換算電圧で 0.78 [μ VDP] (PD : Potential Drop)であった。以上のAPT 信号の受信状況, 図-5の信号強度測定および SINAD (Signal to Noise And Distortion) を勘案した結果, 受信アンテナ直下のLNA は不必要であった。

UTC に基づく衛星軌道計算位置と, その時の長岡工業高等専門学校(北緯 37度25分57.95秒, 東経 138度53分21.214秒)の一号館東側屋上(2階建て)における, NOAA 衛星からの APT 信号受信時のSN比が +3 [dB] 以上の条件で受信可能な NOAA 衛星のパス範囲を検証し南北方向における受信開始および終了仰角を測定した結果,

- ① 南側(190度) 仰角28.7度, 距離 1350 [Km]
- ② 北側(340.9度) 仰角7度, 距離 2680 [Km]

であった。南側の仰角が極端に大きい原因として, アンテナの設備位置の南方には, 5階建ての3号館および悠久山が位置しているため, 障害が生じていると考えられる。北側は, 衛星がほぼ地(水)平線に隠れる範囲まで受信可能である。

東側および西側の各方面については, 更に多数の衛星軌道データの累積の必要があるが, 東側において東山連峰があることから, パスの仰角は大きいと推測される。

文部科学省研究開発局より, 平成21年度「宇宙利

用促進調整委託費～衛星利用の裾野拡大プログラム～」の公募があり, 本研究の長岡工業高等専門学校における測定データが, 衛星利用の裾野拡大の一助になれば幸いである。

謝辞 : 本研究は, 長岡工業高等専門学校 地域共同テクノセンターからの補助と長岡工業高等専門学校 電気電子システム工学科から技術職員支援費を頂いて完成している。

参考文献

- 1) 高橋恭一 : AVR を用いた RC サーボモータ評価装置の試作, 長岡工業高等専門学校研究紀要, 第44巻第1号, pp. 95-101, 2008
- 2) JAXA 宇宙教育センター : 人工衛星の電波をキャッチしよう II ～地球観測衛星の電波を受信する～, pp. 1-6, 2009
- 3) Bob Cobey と Bill Sykes らのホームページ : <http://www.askrlc.co.uk>
- 4) 高橋恭一 : RC サーボモータを用いた LC 共振回路の自動同調装置, 長岡工業高等専門学校技術支援センターレポート, 第6号, pp. 1-5, 2009

(2009. 10. 5 受付)