高出力中継器性能評価実験

川崎和義

2006 年 12 月に打ち上げられた技術試験衛星VII型(きく 8 号、ETS-VII)は、Ka 帯及び S 帯の実 験用通信機器を搭載している。この実験用通信機器の経年変化を調査するために、5 回の性能評価 実験を行った。

本実験結果は、軌道上での衛星搭載機器の経年変化に対する評価であり、今後、衛星搭載機器を設計・製作する上で一助となるものである。

1 まえがき

技術試験衛星¹⁰¹型(以下、ETS-¹⁰⁰)は、衛星搭載用 大型展開アンテナ及びそれを使用した小型移動体地球 局との間の衛星通信に必要な技術開発とその実証を目 的とした衛星で、2006年12月18日にH-IIA ロケット 11号機によって打ち上げられた。

この衛星には、地上基地局と衛星間を結ぶフィーダ リンク用として Ka帯(30GHz/20GHz帯)、小型移動 体地球局と衛星間を結ぶサービスリンク用としてS帯 (2.6GHz/2.5GHz帯)の通信機器が搭載されており、 これらの通信機器の接続経路を変えることにより多種 多様な実験を行うことが出来る。また中継方式として、 交換機を介して信号を中継する再生中継と、交換機を 介さず無処理で信号を中継するベントパイプモードを 選択出来る。

本稿では、初期性能評価実験及び定期性能評価実験 の概要と、実験で得られたデータから中継器の性能及 び機能についての評価結果を述べる。

2 高出力中継器の概要^{[1]-[3]}

高出力中継器は、フィーダリンク装置 (FLCE)、パ ケット交換機 (PKT)、オンボードプロセッサ (OBP)、



図1 中継器構成

サブシステム	機能概要
フィーダリンク装置(FLCE)	Ka带送受信、周波数変換
パケット交換機(PKT)	パケット交換制御、変復調
オンボードプロセッサ(OBP)	音声通信用交換機能
S帯コンバータ部(SCNE)	S带周波数変換、経路切換
大型展開アンテナ給電部(LDAF)	S带送受信
大型展開アンテナ反射鏡部(LDR)	アンテナ・リフレクター (送受別に2面)

表1 中継器サブシステムの機能概要

衣 Ζ 屮継奋の土安商兀	表 2	中継器の主要諸元
--------------	-----	----------

	フィーダリンク	サービスリンク
RF 周波数	30.6GHz 帯 (Uplink) 20.8GHz 帯 (Downlink)	2.6GHz 帯(Uplink) 2.5GHz 帯(Downlink)
IF 周波数	140MHz 帯	
偏波	右旋円偏波(Uplink) 左旋円偏波(Downlink)	左旋円偏波
アンテナ	0.8mφオフセットパラ ボラ	l.0m φ パラボラ(HAC)(Uplink) 大型展開アンテナ(Downlink)
給電方式		31 素子フェーズドアレイ
ビーム数		最大3ビーム

S帯コンバータ部 (SCNE)、大型展開アンテナ給電部 (LDAF)、大型展開アンテナ反射鏡部 (LDR)から構 成されている。図1に中継器の構成を、表1に各中継 器サブシステムの機能概要を、表2に中継器の主要諸 元を示す。

FLCE は、30GHz 帯の受信信号を低雑音増幅器 (FL-LNA) で増幅後、ダウンコンバータ (FL-DNC) によ り 140MHz 帯の中間周波数信号 (IF 信号) に周波数 変換し、パケット交換機、オンボードプロセッサ、及 びS帯コンバータ部へ出力する機能、並びにパケット 交換機、オンボードプロセッサ、及びS帯コンバータ 部から出力された IF 信号を、アップコンバータ (FL-UPC) により 20GHz 帯の送信信号に周波数変換し、 進行波管増幅器 (FL-TWTA) で電力増幅を行った後、 地球局へと送信する機能を持つ。FL-TWTA は 8W の 送信出力を持つ。FL-UPC 及び FL-DNC は利得可変機 能を持つ。また、FL-UPC 及び FL-DNC 用の局部発振 器は周波数可変機能を持つ^[4]。

PKT 及び OBP は、衛星上でパケットや音声信号の 交換処理を行う機能を持つ。

SCNE は、S 帯受信信号を 140MHz 帯の IF 信号へ周 波数変換するダウンコンバータ (S-RX)、及び IF 信号 を S 帯送信信号へ周波数変換するアップコンバータ (S-TX)、並びに経路切換を行う 10 個の IF スイッチ (IF SW)で構成される。S-TX 及び S-RX は利得可変機 能を持つ。また、S-TX 及び S-RX 用の局部発振器は周 波数可変機能を持つ⁵³。

LDAFは、マルチビーム用フェーズドアレイアンテ ナを実現するために送信用・受信用それぞれ2組の ビーム形成回路(BFN)や31台の固体電力増幅器 (SSPA)等で構成されている。SSPAは20W級が8台、 10W級が23台の合計31台が搭載されており、合計で 355Wの送信出力を得ている^[6]。また、給電素子として 送信用・受信用それぞれに31個のカップ・マイクロス トリップアンテナ(MSA)が搭載されている。

LDR は、世界最大級の大きさ(外形約 19m×17m、 開口径約 13m)のものを送信用・受信用にそれぞれ 1 面ずつ搭載している。

3 実験の概要

中継器性能評価実験として Ka帯(30GHz/20GHz 帯)及びS帯(2.6GHz/2.5GHz帯)用通信機器の基本 性能評価データを取得するため、定期的に各通信機器 の入出力特性、振幅周波数特性、スプリアス特性、周 波数可変特性等の測定を行い、得られたデータから各 通信機器の性能及び経年変化について評価を行った。

実験は、衛星打ち上げ直後の2007年2月に初期性能 評価実験を行い、その後2008年9月に第1回、2010 年1月に第2回、2011年1月に第3回、2012年4月に 第4回の定期性能評価実験を行った。

なお、S帯受信用 LNA(Low Noise Amplifier)で あるが、電源系で発生した不具合が回復せず、この装 置を使った実験は未実施のままである。そのため、こ の装置の代替として、高精度時刻基準装置(HAC: High Accuracy Clock)のS帯 RF 部を使用して実験を 行っている^[7]。

4 実験システムの構成

地球局として、鹿島宇宙技術センターのKa帯 フィーダリンク地球局とS帯基準地球局を使用し、測 定用の信号としては無変調波(CW)を用いた。

中継器内の経路(以下、中継リンク)は、図1で示 すSCNEにある10個のIFスイッチ(IFSW1~10) を用いて設定した。またS帯の送信に使用したLDAF とHAC装置のS帯送信部の切換は、S帯用アップコ ンバータ(S-TX2)の出力側にあるミッション計装部 のRFスイッチSW2を用いた。S帯の受信にはLNA の不具合により大型展開アンテナが使用出来ないため、 HAC装置のS帯受信部を使用した。経路の切換には、 S帯用ダウンコンバータ(S-RX2)の入力側にあるミッ ション計装部のRFスイッチSW4を用いた。

4.1 中継リンク

実験で使用する中継方式はベントパイプモードとし、 中継リンクは次に示す5つの経路を用いた。

4.1.1 フィーダリンク・クロスリンク

アップリンク(地上から衛星方向のリンク)及びダ ウンリンク(衛星から地上方向のリンク)の両方にKa 帯フィーダリンクを用いるフィーダリンク・クロスリ ンク(FL-CRS)は、主にFLCEの性能評価実験で使 用した。図2にフィーダリンク・クロスリンクの経路 を示す。

4.1.2 フォワードリンク

アップリンクに Ka帯、ダウンリンクにS帯の大型 展開アンテナを用いるフォワードリンク(FWD)は、 主にS帯送信部の性能評価実験で使用した。図3に フォワードリンクの経路を示す。

4.1.3 フォワードリンク (HAC 送信)

アップリンクに Ka帯、ダウンリンクに HAC 装置 のS帯 RF 部を用いるフォワードリンク(HAC送信)は、 主に HAC装置のS帯 RF 部の性能評価実験で使用した。 図4にフォワードリンク(HAC送信)の経路を示す。

4.1.4 サービスリンク・クロスリンク

アップリンクに HAC 装置のS帯 RF 部、ダウンリ ンクにS帯の大型展開アンテナを用いるサービスリン ク・クロスリンクは、主にS帯受信部の性能評価実験 で使用した。図5にサービスリンク・クロスリンクの 経路を示す。

4.1.5 リターンリンク

アップリンクに HAC 装置のS帯 RF 部、ダウンリ ンクに Ka帯を用いるリターンリンクも、主にS帯受 信部の性能評価実験で使用した。図6にリターンリン クの経路を示す。

5 実験内容

5.1 入出力特性

フィーダリンク・クロスリンク(図2)、フォワード リンク(図3)、フォワードリンク(HAC送信)(図4) の各中継リンクについて入出力特性を測定した。

実験では、CW を衛星へ送信し、衛星からの受信信 号の強度をスペクトラムアナライザで測定した。この 測定を送信信号レベルを変えながら繰り返し行い、測 定結果の値を換算することにより衛星入力電力と衛星 出力電力を求めた。なお、フォワードリンクでは、31 台ある SSPA 全てについて1台ずつ測定を行った。

5.2 利得

フィーダリンク・クロスリンク (図 2)、フォワード リンク (図 3)、フォワードリンク (HAC 送信)(図 4)、











図5 サービスリンク・クロスリンク



サービスリンク・クロスリンク(図5)、リターンリンク(図6)の各中継リンクについて利得を測定した。
実験ではCWを用い、衛星中継器で折り返されてく

る信号の強度を測定した。次にその値を使って衛星入 力電力と衛星出力電力に換算し、その差を中継器利得 とした。

なお、フォワードリンクでは、31 台ある SSPA 全てに ついて、またサービスリンク・クロスリンクでは、3 組 ある S 帯用 S-TX 全てについて 1 台ずつ測定を行った。

5.3 振幅周波数特性

フィーダリンク・クロスリンク(図2)、フォワード リンク(図3)、フォワードリンク(HAC送信)(図4)、 サービスリンク・クロスリンク(図5)、リターンリン ク(図6)の各中継リンクについて振幅周波数特性を 測定した。

実験では、中継器雑音の受信スペクトルをスペクト ラムアナライザ上で100回平均をとり平滑化したもの を取得し、このデータを用いて振幅周波数特性の評価 を行った。

5.4 スプリアス特性

フィーダリンク・クロスリンク(図2)、フォワード リンク(図3)、フォワードリンク(HAC送信)(図4)、 サービスリンク・クロスリンク(図5)、リターンリン ク(図6)の各中継リンクについてスプリアス特性を 測定した。

実験では、CWを衛星へ送信し、その受信スペクト ルを測定することにより、不要スプリアス発射の有無 を評価した。

5.5 利得可変特性

フォワードリンク(図3)、リターンリンク(図6) の各中継リンクについて利得可変特性を測定した。

ETS-WDの中継器には、Ka帯及びS帯用にそれぞれ アップコンバータ(Ka帯: FL-UPC,S帯: S-TX)及び ダウンコンバータ(Ka帯: FL-DNC,S帯: S-RX)が搭 載されている。また、それぞれのアップコンバータ及 びダウンコンバータには利得可変機能(ステップアッ テネータ)を備えており、地上からのコマンドにより 利得を可変することが可能である。

実験では、この利得可変機能を用い、各設定値での 受信信号強度を測定した。

5.6 周波数可変特性

フィーダリンク・クロスリンク(図2)、フォワード リンク(図3)、サービスリンク・クロスリンク(図5) の各中継リンクについて周波数可変特性を測定した。

ETS-MDの中継器には、Ka帯及びS帯用にそれぞれ 局部発信器が搭載されており、アップコンバータ及び ダウンコンバータで使用されている。局部発信器には、 発信周波数の可変機能が備わっており、Ka帯、S帯で それぞれ独立に周波数を可変することが可能である。

実験では、この周波数可変機能を用い、局部発振器 の出力周波数を変化させた時の受信周波数を測定し、 周波数変化量を求めた。

6 実験結果と評価^{[8][9]}

6.1 入出力特性

図7にフィーダリンク・クロスリンク(図2)を用 いた時の測定結果の一例を、図8にフォワードリンク (図3)でS帯送信に20W級SSPAを用いた時の測定 結果の一例を、図9にフォワードリンク(図3)でS 帯送信に10W級SSPAを用いた時の測定結果の一例 を示す。図の横軸はLNAへの入力電力を、縦軸は電力 増幅器(Ka帯:TWTA、S帯:SSPA)の出力電力を 表す。

図7より、フィーダリンク・クロスリンク(図2) の入出力特性はリニアであり、初期性能評価実験結果 と比べてもばらつきが少なく良好な特性を示している ことが分かる。しかし、図8及び図9よりフォワード リンク(図3)の入出力特性では、測定年でデータに ばらつきが見られる。これは、フィーダリンク・クロ スリンク(図2)の入出力特性でのばらつきが少ない ことから、LDRで時間帯によってゆがみが生じたた





図 8 入出力特性 (フォワードリンク、20W 級 SSPA の一例)

め^[10]、受信信号強度が変化したものと推定される。

以上より、経年変化による入出力特性の劣化はほと んど起きていないが、S帯送信に大型展開アンテナを 使用する場合は、時間帯による受信信号強度の変化に 注意が必要である。

6.2 利得

図 10 にフォワードリンク(図 3) での S 帯用 SSPA 31 台(20W 級 8 台、10W 級 23 台)における利得の測 定結果を示す。図の横軸は 31 台の SSPA を、縦軸は 対応する SSPA の利得を表す。

図 10より、各 SSPA とも初期性能評価実験に比べ 大きな利得の劣化はみられず良好であることが分かる。 これより経年変化による中継器利得の劣化は起きてい ないことが分かった。また、中継器として十分な利得 を有しており、中継器利得としてシステム要求を満た していることが実証された。

なお、SSPA によって利得に差があるのは、20W 級 SSPA と 10W 級 SSPA とでは増幅度に 3dB の差がある 上、アレーアンテナのため、実験を行った鹿島宇宙技 術センター(茨城県鹿嶋市)でのアンテナ利得が 31 個 のアンテナ素子で異なるためである。

また、SSPA毎の測定年による利得のばらつきは、 入出力特性のところでも述べたようにS帯送信に使用 した大型展開アンテナのゆがみによる受信信号強度の 変化も影響しているものと思われる。







6.3 振幅周波数特性

図 11 にフォワードリンク(図 3)における振幅周波 数特性の測定結果の一例を示す。図の横軸は周波数を、 縦軸は受信信号強度を表す。

図11より、異常な振幅変化は見られず、良好な特性 を示していることが分かる。したがって、経年変化に よる振幅周波数特性の劣化は起きておらず、また中継 器の振幅周波数特性としてフラットで良好な特性を有 していることが実証された。

6.4 スプリアス特性

図12にフォワードリンク(図3)におけるスプリア ス特性の測定結果の一例を示す。図の横軸は周波数を、 縦軸は受信信号強度を表す。

ETS-皿の帯域外スプリアス特性は、フォワードリンク(図3)の場合でD/U値が50dBc以上となっているが^[4]、実験では地球局受信雑音によってノイズフロアが上昇してしまい正確なD/U値は測定出来ない。そ



のためノイズフロアを上回る不要なスプリアス発射が ないかどうかで評価した。

図 12 より不要なスプリアス発射は見られず、スプリ アス特性は良好であることが分かる。ETS-WIの中継 器においては経年変化によるスプリアス特性の劣化は 起きておらず、中継器として良好なスプリアス特性で あることが実証された。

6.5 利得可変特性

図13にフォワードリンク(図3)におけるS帯用アッ プコンバータ No.2 (S-TX2)の利得可変機能について の測定結果を示す。図の横軸はS帯用アップコンバー タの利得設定値を、縦軸はそれぞれの設定値(S-TX2 GAIN STS)での利得可変量を表す。

図13より、特性にほとんど劣化は見られずリニアで 良好な特性を示していることが分かる。また初期性能 評価実験データとの比較でも、それぞれのデータは良 く一致しており、利得可変機能は所期の機能及び性能 が維持されていることが実証できた。

6.6 周波数可変特性

図14にフォワードリンク(図3)におけるS帯S-TX用局部発信器(S-LO)の周波数可変機能について の測定結果を示す。図の横軸はS帯局部発振器(主系)



図 14 周波数可変特性 (S 帯局部発振器)

の周波数設定値を、縦軸はその時の周波数可変量を表 す。

図 14 より、特性にほとんど劣化は見られず良好であ ることが分かる。また初期性能評価実験データとの比 較でも、測定データは良く一致しており所期の機能及 び性能を維持していることが分かる。

以上より、局部発振器の周波数可変機能は、経年変 化による性能の劣化も起きておらず、設計どおり動作 していることが確認できた。

7 まとめ

中継器性能評価実験として、初期性能評価実験(2007 年)から第4回定期性能評価実験(2012年)までの5 年間にわたり入出力特性、振幅周波数特性、スプリア ス特性、周波数可変特性等の測定を行い、中継器の特 性とその経年変化を評価した結果を述べた。

実験結果は概ね一致しており、初期性能評価実験の データと比較しても明らかな劣化は見られなかったこ とより、中継器自体の性能や機能に大きな変化はなく 所期の性能を有していることが実証できた。しかし、 入出力特性や中継器利得のデータのうちS帯大型展開 アンテナを用いる中継リンクでは、LDRのゆがみに起 因すると思われるデータのばらつきも認められた。

ETS-WIで得られた技術成果は、今後、衛星搭載機器 を設計・製作する上での一助になるものである。

謝辞

本実験を行うにあたりご意見・ご協力頂いた関係各 位、及び関係機関の方々に深く感謝する次第である。

参考文献

- 1 平良真一, "移動体衛星通信・放送システム技術の宇宙実証-ETS-Mの概 要-,"信学会総合大会, TB-1-3, pp. "SS-4"-"SS-5", March 2003.
- 2 小園晋一,"通信·放送実験用中継器の全体構成,"通信総合研究所季報技 術試験衛星 2 利型特集, Vol. 49, Nos. 3/4, pp. 19-26, Sept./Dec., 2003.
- 3 川崎富美雄,川上用一,宮内雅夫, "ETS- WE搭載中継器部の検討," 信学会 ソサイエティ大会, B-3-14, pp. 178, Sept. 1998.
- 4 高畑博樹, 浜真一, "搭載用Ka帯フィーダリンク装置,"通信総合研究所季 報 技術 試験 衛星 2020 特集, Vol. 49, Nos. 3/4, pp. 33-41, Sept./Dec., 2003.
- 5 橋本幸雄, "S帯コンバータ部,"通信総合研究所季報 技術試験衛星 W型特 集, Vol. 49, Nos. 3/4, pp. 43-46, Sept./Dec., 2003.
- 6 上野健治, "給電部の構造,"通信総合研究所季報技術試験衛星 W型特集, Vol. 49, Nos. 3/4, pp. 47-55, Sept./Dec., 2003.
- 7 野田浩幸, 佐野和彦, 浜真一, "高精度時刻基準装置(HAC),"通信総合研究所季報技術試験衛星 W 型特集, Vol. 49, Nos. 3/4, pp. 89-94, Sept./Dec., 2003.
- 8 小園晋一,平良真一,橋本幸雄,井出俊行,山本伸一,"ETS-‴搭載移動 体衛星通信システムー電気性能試験ー,"信学会総合大会,B-3-12, pp. 343, March 2003.
- 9 小園晋一, 渡邉宏, 佐藤正樹, 山本伸一, 平良真一, "ETS- 证移動体通信

高出力中継器性能評価実験

用中継器の軌道上初期性能,"信学会ソサイエティ大会, BS-2-1, pp." S-12"-"S-13", Aug. 2007.

10 佐藤正樹,織笠光明,藤野義之, "軌道上におけるETS- س衛星の大型展開 アンテナ放射パターンの評価,"信学会論文誌 (B), Vol. J94-B, No. 3, pp. 344-352, 2011.



川崎和義 (かわさき かずよし)

ワイヤレスネットワーク研究所宇宙通信シス テム研究室主任研究員 衛星通信

> 国立研究開発法人情報通信研究機構発行の技術情報誌「情報通信研究機構研究報告」 Vol.60 No.1 2014年10月発行の記事を、筆者及び情報通信研究機構の承諾を得て掲載 しています。体裁、内容を一部加筆修正しています。