

## 誘導制御技術の研究

## Study on Guidance and Control Technology

## ETS-VIII 軌道上実験の検討

## On-Orbit Experiments using ETS-VIII

システム誘導技術グループ	山本昌幸、巳谷真司、大谷崇
構造解析研究グループ	山口功、葛西時雄、井川寛隆
先進制御研究グループ	濱田吉郎
ETS-VIII プロジェクトチーム	池田正文、臼井基文、砂川圭
Spacecraft Guidance, Control and Dynamics Engineering Group	Masayuki Yamamoto, Shinji Mitani, Takashi Ohtani
Structure Research Group	Isao Yamaguchi, Tokio Kasa, Hiroataka Igawa
Advanced Control Research Group	Yoshiro Hamada
ETS-VIII Project Team	Masafumi Ikeda, Motofumi Usui, Kei Sunagawa

## Abstract

This report describes the studies on the on-orbit system identification and attitude control experiments using ETS-VIII(Engineering Test Satellite-VIII). ETS-VIII will be launched by H-IIA launch vehicle in fiscal year 2006. ETS-VIII has large-scale, flexible structure like Large Deployable Reflector or Solar Array Paddle. Using the result of the on-orbit system identification experiments, we can evaluate the on-orbit flexible characteristic and contribute to the control system design for the next flexible satellite. We aim at the establishment of the robust attitude control technology for flexible satellites through these attitude control experiments.

## 1. はじめに

平成18年度打ち上げ予定の ETS-VIII (技術試験衛星Ⅷ型)は、大型展開アンテナ・太陽電池パドルといった大型柔構造物を持つ衛星である。柔構造物の姿勢運動へ与える影響が大きいことを考えると、柔構造特性を正確に測定することは有益である。しかし、衛星全系軌道上形態での柔構造パラメータを地上試験で計測することは不可能である。そこで、ETS-VIII のチェックアウトフェーズ～定常運用初期において衛星全系軌道上形態での柔構造特性のシステム同定実験を計画している。これにより、設計時に見積もった柔構造特性を事後評価し、将来の柔構造衛星の制御系設計に反映できる。また、ETS-VIII の後期利用段階において柔構造パラメータが変動するシステムにも対応可能なロバスト姿勢制御アルゴリズムを適用した姿勢制御実験を行って、将来の柔構造衛星の姿勢制御技術の確立を図る。

本検討は、平成10年度より旧航空宇宙技術研究所と旧宇宙開発事業団の共同研究として実施しており、三機関統合後 JAXA となった現在に至るまで検討を継続している。また、本検討では、システム誘導技術グループの客員として、電気通信大学の木田隆教授を招聘している。

## 2. 研究の概要

## (1) ETS-VIII 軌道上柔構造特性同定実験の検討

平成13年度までに、様々な加振ケースにおけるシステム同定手法について検討した。

平成14年度には、軌道上柔構造特性同定実験における加振ケースについて、衛星シミュレータを用いて地上

評価用データを取得し、同定実験のための加振を行っても衛星が姿勢喪失することのないことを確認した。

平成15年度には、少ないチャンネル数の情報に基づいて衛星の姿勢制御コマンドや状態量を再現するためのツールや、衛星管制情報システム(SCi)とのデータインタフェースツールを整備した。

平成16年度には、柔構造特性同定実験をチェックアウトフェーズで実施するためのチェックアウト手順書(案)を整備し、衛星追跡管制システムの同定実験に関するデータインタフェース試験方法について検討した。

## (2) ETS-VIII 制御実験の検討

平成13年度までに、ETS-VIIIを用いた姿勢制御実験の概念検討を行った。

平成16年度までに、各種姿勢制御アルゴリズムを具体化し、ETS-VIII、ETS-VIなどの柔軟構造衛星モデルに適用してシミュレーションを実施した。

## 3. 成果の概要

### 3.1. ETS-VIII 軌道上柔構造特性同定実験の検討

#### (1) 同定実験概要

打ち上げから定常運用初期において、衛星が加振される前後の時間帯における HK データ、Dwell ダンプデータ、LEM 加速度計データを取得し、これらのデータに基づいて軌道上全系での柔構造特性を同定する。様々な同定実験の結果を比較して、同定手法の評価を行う。また、この同定結果と地上試験に基づく推定結果とを比較し、設計時の柔構造特性の推定手法の評価を行う。さらに、地上での柔構造特性の推定誤差に起因する制御性能劣化が発生するなど、必要な場合には同定結果を用いて制御系のチューニングを行うことができると考えられる。

Figure.1 に ETS-VIII のコンフィギュレーションを示し、Figure.2 に機能系統図、Figure.3 に加速度計搭載位置概略図を示す。

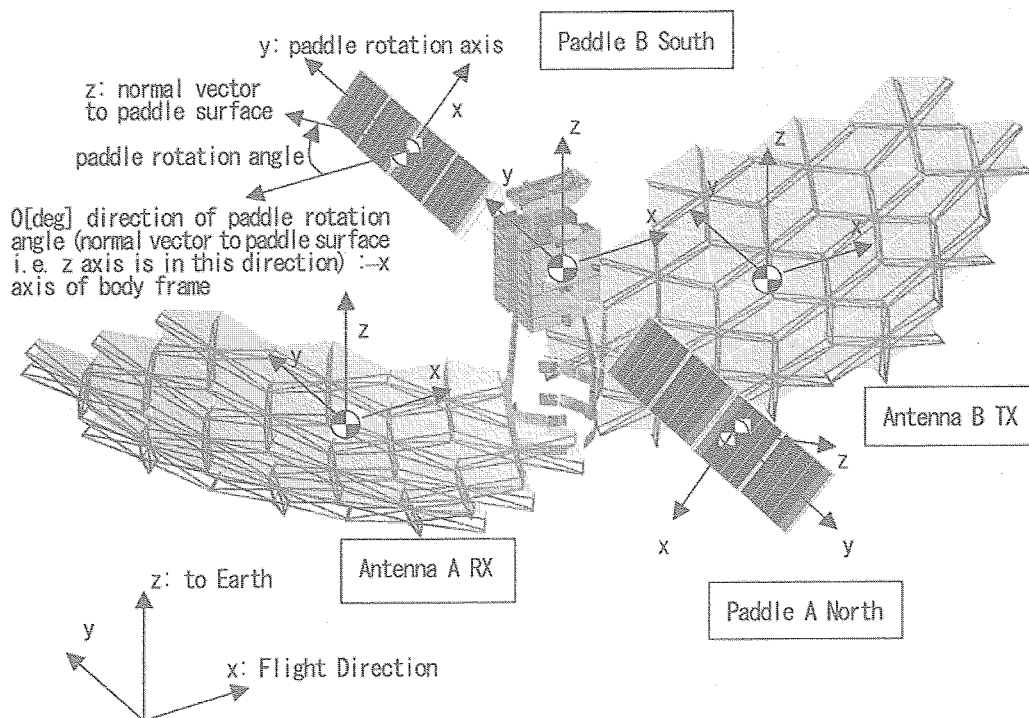


Figure.1 ETS-VIII configuration

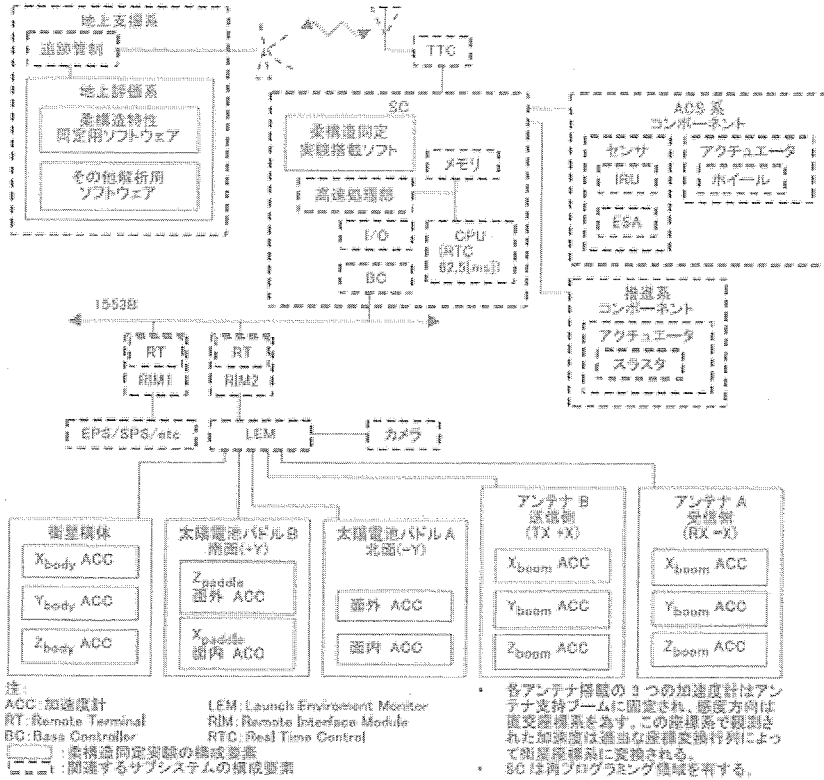


Figure.2 Functional System

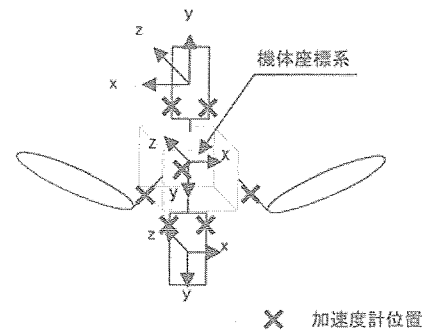


Figure.3 Accelerometer arrangement

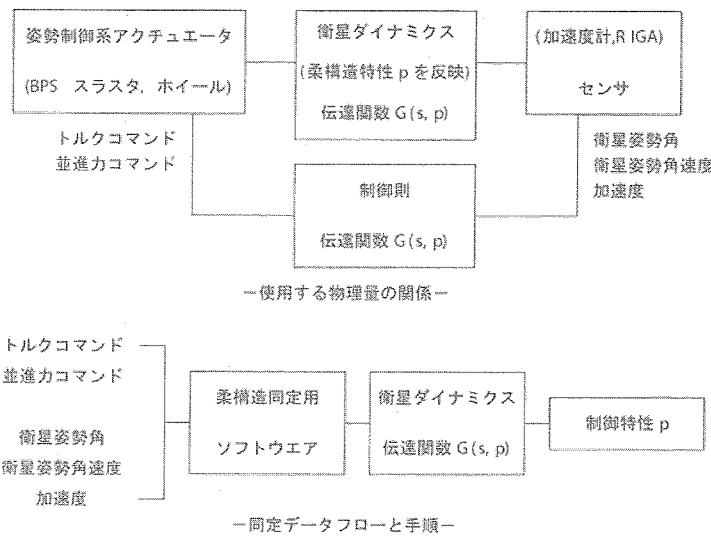


Figure.4 Identification Experiment System

Figure.4 に同定実験システム模式図を示す。柔構造同定のために必要な物理量は、トルクコマンド・並進力コマンド・衛星姿勢角・衛星姿勢角速度・加速度である。これらは、Dwell チャンネルを利用して取得される。三軸制御衛星の同定アルゴリズムでは入力と出力の計 6ch が同定実験に利用できるのが理想である。しかし、Dwell ダンプではテレメトリチャンネルが4チャンネルしかないため、衛星の三軸の推定レート(角速度)とトルクコマンド(静止化軌道制御時はピッチ推定姿勢角)のみを取得する。この Dwell ダンプデータからオフライン処理によって柔構造同定に必要な衛星状態量(トルクコマンド・スラストコマンドなど)を再現して、これらの衛星状態量と LEM 加速度計データを用いて柔構造同定を行う。

## (2) 同定実験ケース

Table.1 にチェックアウトフェーズでの同定実験ケースについてまとめる。なお、クリティカルフェーズや定常運用段階初期の LEM 加速度計が使用可能な間においても、データ取得機会は存在し、現在調整中である。ただし、クリティカルフェーズにおいては、回線が低速であったり、LEM のモードが軌道上加速度計測モードでないなどの理由で実施できない可能性が高い。定常運用段階初期においては、ホイールアンローディング時、東西軌道制御(ステーションキーピング)時、アレイトリム時、蝕入り・蝕明け時などにおいてデータ取得が可能と考えられ、運用方法について調整中である。

Table.1 Event cases for identification experiment in the check-out phase of ETS-VIII

SOCP 番号	イベント	イベント概要	計測時間	DWELL CH1 割り当て
ACS03	軌道制御 FFトルク調整	定常姿勢制御モードにおいて東西軌道制御のためにスラスタを噴射する。	軌道制御中および 前後 10 分程度	ピッチ トルクコマンド
ACS06	柔構造同定実験支援1 (静止化軌道制御)	ドリフト軌道中の軌道制御モードにおいて静止化軌道制御のためにスラスタを噴射する。	軌道制御中および 前後 10 分程度	ピッチ 推定姿勢角
ACS07	柔構造同定実験支援 2 および BTH 機能確認	定常姿勢制御モードにおいて No.2~9 のスラスタをマニュアル噴射する。	スラスタ噴射中 および 前後 10 分程度	ピッチ トルクコマンド
ACS08	アンローディング パラメータ調整	定常姿勢制御モードにおいてホイールアンローディングのためにスラスタを噴射する。	アンローディング中 および 前後 10 分程度	アンローディング 対象軸 トルクコマンド
ACS12	定常バイアス機能確認	定常姿勢制御モードにおいて、ロール・ピッチ軸を±0.05 度ステップ駆動させる。	姿勢バイアス中 および 前後 10 分程度	姿勢バイアス 対象軸 トルクコマンド

なお、Dwell の CH2~CH4 にはそれぞれロール、ピッチ、ヨーの推定姿勢角速度を割り当てる。

## 3. 2. ETS-VIII 制御実験の検討

## (1) 制御実験の目的

ETS-VI では、当時最先端の制御理論であったロバスト制御理論の軌道上での実証試験を世界に先駆けて実施し、この分野における我が国の技術力を示すことが出来た。ETS-VI の制御実験で用いた制御則は、 $H_{\infty}$ 制御の設計法のほとんどをカバーしているが、ETS-VI の実験結果は、そのままでは ETS-VIII のような大型衛星には適用できない。残された課題は次の二つである。

- i) 多入力多出力系としての制御系設計
- ii) 太陽電池パドルの回転によるモード・パラメータ変動に対するロバスト安定化

これらの2項目が解決できれば将来予想される大型通信衛星に共通した制御系設計法が確立できると考えられる。

このような制御実験とは別に ETS-VI にも ETS-VIII にも衛星メーカーが設計したバス制御系がある。それらはいずれも PID あるいは進み遅れ補償と高周波数帯域のゲインを低減させるローパスフィルタで構成されている。このような古典的な設計法の限界は1入力1出力系にしか本質的に適用できない点にある。ETS-VIII でさえもロール・ピッチ・ヨーの軸間の動的な干渉が比較的小さいと仮定して、同様の古典的な設計法が使われているが、この考え方はいずれ限界になるであろう。

制御実験での実験項目としては、次にあげるものを想定している。ただし、実際に制御実験を実施する項目については、現在調整中である。

### 1. パラメータ変動に対するロバスト制御

#### (a)ロバストゲインスケジューリング制御

パドル回転による低周波数領域のモーダルパラメータの変動に応じて制御則の(A,B,C,D)行列を変化させる方式である。制御則の各行列はパドル回転角の関数として記述される。

#### (b)受動性を使った制御

衛星本体の姿勢角度と角速度の観測量に $3 \times 3$ の定数行列ゲインをかけてフィードバックする。広域で位相が90度進むようなシステムになる。

#### (c) $\mu$ 設計

高周波数帯域の振動モードとパドル回転による低周波数のモーダルパラメータ変動をモデル誤差としてそれらに対してロバスト安定かつロバスト性能を満たす制御則を設計する。得られる制御器は線形時不変系。

### 2. PID 制御

柔構造特性同定実験において得られたパラメータを用いて、PID 制御ゲインをチューニングし、全系軌道上形態での柔構造特性パラメータを用いた制御系設計の効果について評価を行う。また、この実験結果を上述のパラメータ変動に対するロバスト制御アルゴリズムの比較、評価の対象とする。

### 3. 高速スイッチングマヌーバ

現在、宇宙科学研究本部と国立天文台を中心として構成されている次期スペース VLBI ワーキンググループからスペース VLBI 計画「VSOP-2」が提案されている。VSOP-2 は、ETS-VIII と同じ構造の大型展開アンテナを搭載した電波望遠鏡衛星である。Figure.5 に VSOP-2 衛星の外観を示す。

VSOP-2 では、観測周波数が

高いため、アンテナの指向精度は  $0.005\text{deg}$  以下(ETS-VIII はロール・ピッチ軸  $0.046\text{deg}$ 、ヨー軸  $0.123\text{deg}$  以下)となることが要求されている。さらに、位相補償観測を行うため、高速スイッチングマヌーバ機能が要求されている。たとえば、 $3\text{deg}$  の姿勢変更を所要時間 15 秒で実施してすばやく振動を収束させ、1 分周期で指向方向を往復することを繰り返し、これを数時間に渡って継続するという機能が要求されている。<sup>[3]</sup>

このような高速スイッチングマヌーバ機能を実現するための制御アルゴリズムは新規開発項目であるので、ETS-VIII の制御実験により事前実証することを目指している。

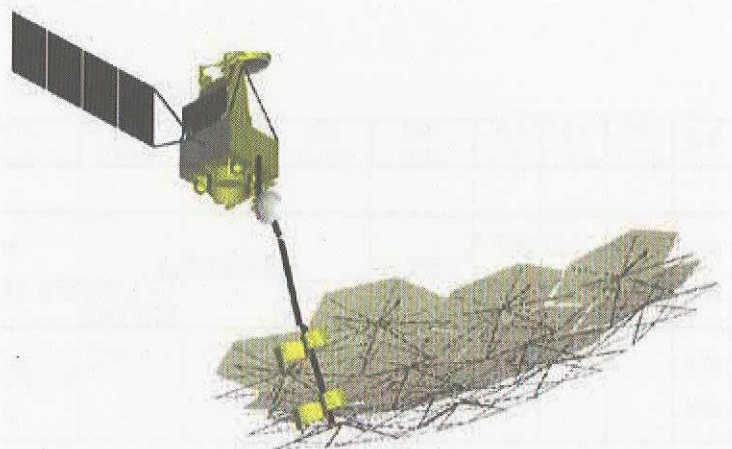


Figure.5 VSOP-2 Configuration

(2)制御アルゴリズムの実装方法

制御アルゴリズムは、制御則計算部のみをスイッチングにより置き換えられるように実装する。これにより、制御実験において異常が発生した時には、既存の故障検知システムを使用して、バス系の制御アルゴリズムに戻せるようにする。なお、制御則計算部の範囲は、姿勢決定フィルタから各軸の姿勢角および姿勢角速度を受け取って、ホイールコマンド分配則計算部へ各軸のトルクコマンドを受け渡すまでである。

制御実験用アルゴリズムは、数種類の状態方程式(A,B,C,D行列)を記憶して、これらから簡単な演算によって制御則を計算できるように設計する。これにより、複数の制御設計手法による設計結果の搭載ソフトウェアへの反映が容易となるように配慮する。

4. まとめ

Table.2に ETS-VIII 軌道上実験検討のスケジュールを示す。

ETS-VIII を用いた軌道上柔構造同定実験については、実験計画の立案、実験手順書(チェックアウト手順書)および同定実験に必要なツールの整備を行ってきた。平成17年度は、引き続き同定実験用ツールの改修・整備を行い、衛星追跡管制システムの同定実験に関するデータインタフェース試験を実施する。これにより、同定実験の運用準備を進め、平成18年度の衛星打ち上げ・実験に備える。

また、ETS-VIII を用いた制御実験については、これまでにパラメータ変動に対する各種のロバスト制御アルゴリズムを検討し、シミュレーションを実施した。平成17年度には、検討中の制御アルゴリズムの改良と完成を目指す。平成18年度から平成21年度にかけては、制御実験用搭載ソフトウェアの作成、試験を実施し、制御実験の運用準備を行い、ETS-VIII 後期利用段階において制御実験を実施する予定である。

Table.2 schedule

年度	1999 (H11)	2000 (H12)	2001 (H13)	2002 (H14)	2003 (H15)	2004 (H16)	2005 (H17)	2006 (H18)	2007 (H19)	2008 (H20)	2009 (H21)	2010 (H22)
								△ 打上			△ 後期利用段階	
同定 実験	← 実験システム設計		← 同定実験	← 実験手順書整備	← ツール改修	← ツール改修	← ツール改修	← ツール改修	← ツール改修	← ツール改修	← ツール改修	← ツール改修
	← 同定アルゴリズム検討 (ソフトウェア試験)		← データ取得	← ツール整備	← ツール整備	← ツール整備	← ツール整備	← ツール整備	← ツール整備	← ツール整備	← ツール整備	← ツール整備
制御 実験					← 制御系設計		← シミュレーション	← シミュレーション	← シミュレーション	← シミュレーション	← シミュレーション	← シミュレーション
							← オンボードS/W作成	← オンボードS/W作成	← オンボードS/W作成	← オンボードS/W作成	← オンボードS/W作成	← オンボードS/W作成
							← 1/F試験	← 1/F試験	← 1/F試験	← 1/F試験	← 1/F試験	← 1/F試験
									← SCLT	← SCLT	← SCLT	← SCLT
											← データ取得	← データ取得
											← 評価解析	← 評価解析

参考文献

[1]NAL-NASDA 共同研究成果報告書:柔構造特性の同定方法及び制御に関する研究,平成13年3月.  
 [2]宇宙航空研究開発機構研究開発報告:柔構造特性の同定方法及び制御に関する研究, JAXA-RR-04-007, 2004年12月.  
 [3]望月、橋本、坂井、村田:VSOP-2 における高速スイッチングマヌーバの検討, 第5回宇宙科学シンポジウム,JAXA, 2005年1月