

JAXA 静止衛星における低推力軌道制御運用

堀井 道明*, 土性 裕彦*, 森 茂博*, 馬場内 隆男**, 内田 雅士**

Low Thrust Orbit Maneuver Operations for JAXA Geostationary Satellites

By

Michiaki HORII*, Hirohiko DOSHO*, Shigehiro MORI*, Takao Babauchi**
and Masashi UCHIDA**

Abstract : Geostationary satellites need yearly velocity increment of 40 ~ 50m/s for the north-south (NS) station keeping. JAXA's recent satellites are adopting low-thrust and high Isp(specific impulse)engines such as DC arc jets and ion engines for the NS station keeping. This paper reports the operation results of such NS maneuvers for the Data Relay Technology Satellite (DRTS) and the Engineering Test Satellite-VIII (ETS-VIII).

Key words : 静止衛星, 南北軌道保持, DC アークジェット, イオンエンジン, DRTS, ETS - VIII

1. はじめに

静止衛星の南北軌道保持は、年間40~50m/s の速度補正を行うことで達成される。衛星が大型化すると、このための推進薬量も増加することとなる。近年 DC アークジェットやイオンエンジンを用い、その高比推力特性を活かした重量効率のよい推進系が採用されている。本報告では、JAXA において低推力推進系を南北軌道保持に適用した例として、DRTS における DC アークジェットによる軌道保持状況、ETS-VIII におけるイオンエンジンによる軌道保持状況について報告する。

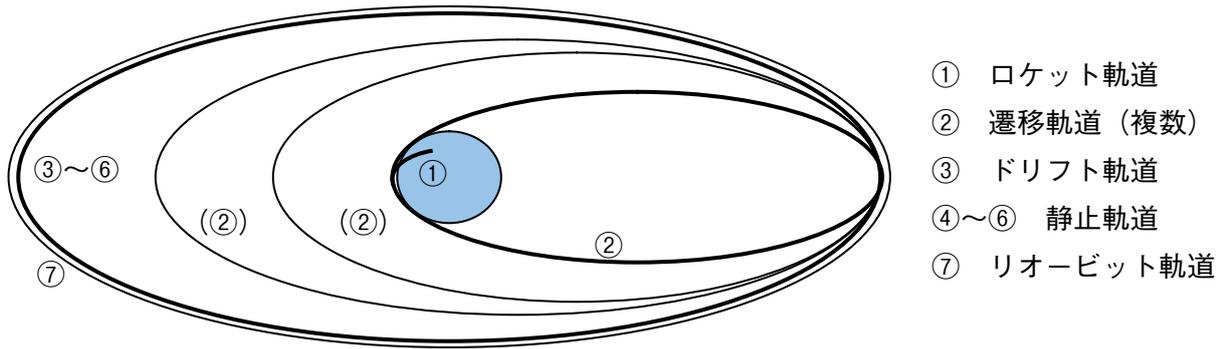
2. 静止衛星の南北軌道保持制御

静止衛星における軌道制御全体を概観して、南北軌道保持の占める割合を見ることとする。静止衛星がロケットによって投入される軌道から静止軌道まで移行し（軌道投入）、静止軌道に到達した後の軌道位置を維持し（軌道保持）、ミッションを終えた後に静止軌道外への軌道変更（リオービット）する各軌道運用の全体の模式図を図1に示す。

これらの軌道を移行したり、あるいはそこに留まるための軌道制御量の概略値を表1に示す。これまでのJAXAの静止衛星においては、低推力・高比推力推進系の出番はこの表中の南北軌道保持にある。南北保持には、年間40~50m/s の速度増分を必要とするので、例えば10年間（ETS-VIII）だと400~500m/s になる。これを通常の比推力の推進系で運用すると燃料が膨大な量になるのを高比推力効果で抑えようとしている。

* 宇宙航空研究開発機構（JAXA）

** 大興電子通信株式会社



- ① ロケット軌道
- ② 遷移軌道 (複数)
- ③ ドリフト軌道
- ④~⑥ 静止軌道
- ⑦ リオービット軌道

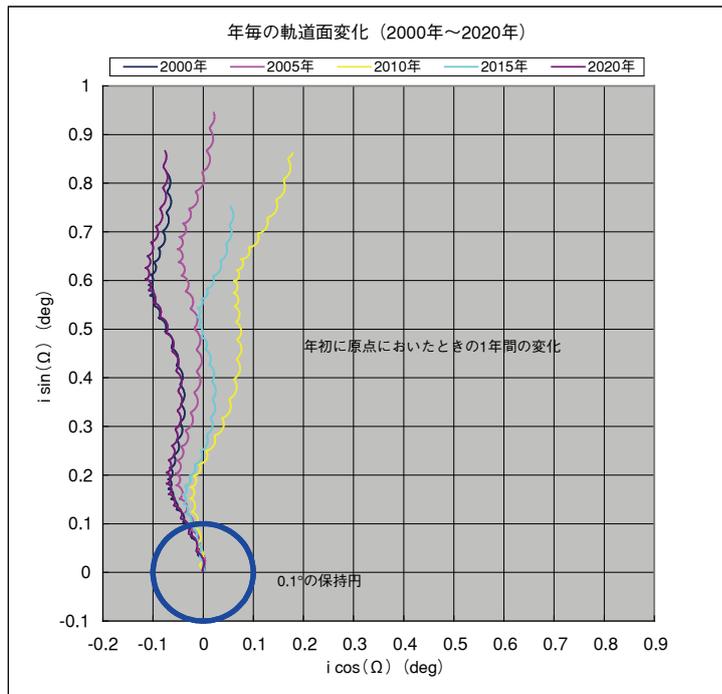
図1 静止衛星の各軌道フェーズ

表1 静止衛星の軌道制御

No	移行軌道	時期	近地点	遠地点	傾斜角	速度	移行速度増分	低推力
①	パーキング軌道	L+ 約12分	250~300km		28.5°	7,750m/s		
②	GTO	L+ 約27分	250km	GEO 高度	28.5°	10,200/1,600m/s	2,400m/s	
③	ドリフト軌道	L+ 約1週間	GEO 高度	〃	0°	3,074m/s	1,800m/s	
④	静止軌道	L+ 1ヶ月	〃	〃	〃	〃	~10m/s	
⑤	東西保持	ミッション期間	〃	〃	〃	〃	~1 (m/s)/年	
⑥	南北保持	ミッション期間	〃	〃	〃	〃	40~50(m/s)/年	○実績
⑦	リオービット	ミッション終了時	GEO+250km	GEO+250km	〃	3,067m/s	~10m/s	

GEO 高度 = 35,786km

南北軌道保持は、月・太陽引力の摂動により軌道面が赤道面からずれてゆくのを抑えるためのものである。万一、そのための軌道制御を行わない衛星があると、その軌道面は、年間1°弱変化し、南北位置の日変動が生じる。この状況を図2に示す。軌道面は赤道面からのずれとして0.1°以内が通常の許容値とされるから、1~2ヶ



年毎の軌道面変化と補正制御量		
年	傾斜角変化	所用 ΔV (m/s)
2000	0.826	44.3
2001	0.856	45.9
2002	0.882	47.3
2003	0.914	49.1
2004	0.938	50.3
2005	0.946	50.8
2006	0.944	50.7
2007	0.944	50.7
2008	0.937	50.3
2009	0.912	48.9
2010	0.881	47.3
2011	0.853	45.8
2012	0.824	44.2
2013	0.787	42.2
2014	0.761	40.8
2015	0.755	40.5
2016	0.76	40.8
2017	0.77	41.3
2018	0.801	43
2019	0.838	45
2020	0.87	46.7

図2 静止衛星の軌道面変化と南北制御の必要性

月程度でこの範囲を逸脱し、軌道保持制御が必要とされる。静止軌道速度3,074m/sより、補正マヌーバ量の軌道面変化への感度は約54 (m/s) /degである。

3. DRTS : DC アークジェットによる南北軌道保持の運用状況

データ中継技術衛星 (DRTS) は、2002年9月に打上げられた静止衛星でその南北保持は表2に示すような性能を有するDCアークジェットを用いて行われる。推力レベルとしては、2本同時噴射で0.5N程度であるから極端な低推力というわけではないが、噴射時間が1回25分に制限されており、各回約0.5m/sの速度増分を発生できる。軌道傾斜角の補正量で言えば約0.01°である。スラスターの配置は北面にあるので、噴射タイミングは1日に1回ある。年間約90回の制御実施を必要とするので、食運用期間を除く30週において週4回の噴射を行う[1]。

表2. DRTSの南北制御機能と運用

スラスター	性能値	運用
DC アークジェット	F ~250mN Isp ~500sec 2本×2系が北面取り付け。 若干の傾斜により東西干渉。	衛星質量 M ~1,500kg 静止位置 東経90.75度 (制御頻度) 2本を25分間噴射→0.5 (m/s) /回 ≒ 0.01° /回 →約90回/年→ 食期間を除く30週の運用 → 非食期間中は4回/週の噴射 (東西干渉) 東西干渉成分 -0.0144 (m/s) /回→-0.06 (m/s) /週 重力摂動補償量 (静止位置) -0.02 (m/s) /週 差し引き超過 -0.04 (m/s) /週

また、スラスターの取り付けより、東西成分が発生する。その大きさは表2に示すとおり、重力の東西摂動を補償するための量の約3倍になる。従って、DRTSにおいては南北制御を実施している期間において、東西制御は重力摂動を増大させるかのように増速制御を行うというものになる(図3)。運用において、この東西時保持制御はほぼ計画どおりに問題なく実施されている。

DRTSにおいて、DCアークジェットによる南北軌道保持制御の実施状況を図4に示す、左図は軌道面の位相を表している。保持範囲0.1°の内部において2007年6月の1ヶ月間の保持状況を示す。週4回の制御により、十分に狭い領域に保持されていることが分る。右図は、軌道決定値から評価した ΔV 値を単位時間当たり

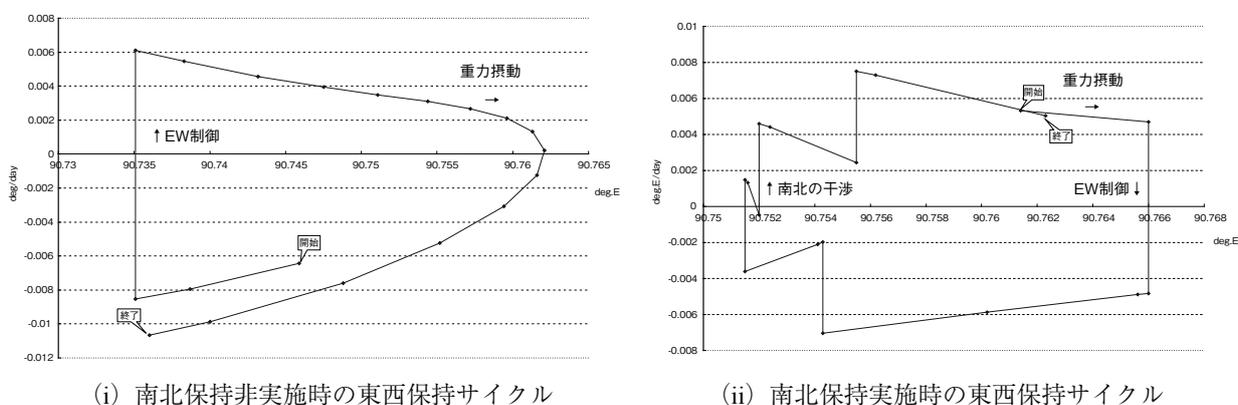
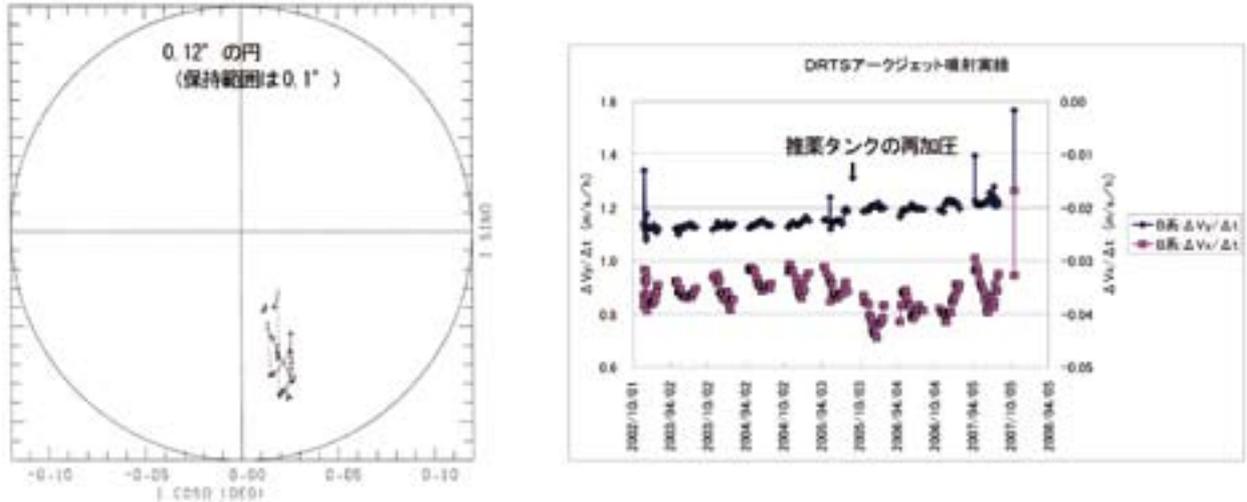


図3 DRTSにおける南北保持の東西干渉

規化して表示している。2002年10月から約5年間の実績である。上側グラフは南北成分、下側グラフは東西干渉成分を表している。途中、推進薬タンクの再加圧が実施されているが、その効果も現れており、問題のない運用が行われている。



(i) 1ヶ月間の軌道面保持位相面図 (2007年6月) (ii) 軌道制御量評価 (2002年10月～2007年10月)

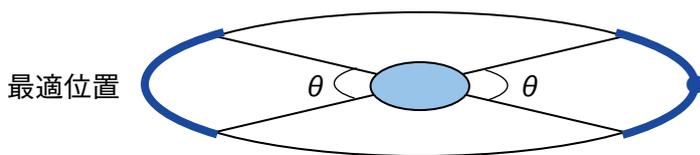
図4 DRTSにおける南北制御の実施状況

4. ETS-VIII：イオンエンジンによる南北軌道保持の運用状況

技術試験衛星Ⅷ型 (ETS-VIII) は、2006年12月に打上げられた静止衛星でその南北保持を表3に示すような性能を有するイオンエンジンを用いて行っている。質量が3トンの衛星に対して推力レベルが0.02Nであるので、低推力と十分に言えるものである。南北に取り付けられているので、1日に2回噴射タイミングがある。噴射時間が1回6時間程度と長時間噴射することで、約0.1m/sの速度増分を発生している。軌道傾斜角の補正量で言えば約0.002°である。年間約450回の噴射回数となるので、運用では2週間1サイクルとしてその間に20回の噴射を行っている。

軌道保持制御の日程配分 (代表パターン)

曜日		月	火	水	木	金	土	日
第1週	東西制御					○	(△)	
	南北制御	○○	○○	○○				○
第2週	東西制御						○	
	南北制御	○○	○○	○○	○	○○	○○	○○



噴射～6時間

$\theta \sim 90^\circ$

効率 $\sin(\theta/2)/(\theta/2) \sim 0.9$

表 3. ETS-VIII の南北制御機能と運用

スラスタ	性能値	運用
イオンエンジン	F ~20mN Isp ~2,200sec 1本×2系が南北面取り付け. 若干の傾斜により東西干渉.	衛星質量 M ~3,000kg 静止位置 東経146° (制御頻度) 1本を6時間噴射→0.1 (m/s) /回 ≒ 0.002° /回 →約450回/年 ≒ 約17回/週 →20回/週の運用 (東西干渉) 取り付け傾斜により NS : Radial : EW ≒ 80 : 60 : 2.6の比率で速度増分が発生する.

スラスタの取り付けより、イオンエンジン噴射に伴い、半径成分と東西成分が発生する。その大きさは表3に示すとおりである。小さいとは言えない半径成分（地心方向）は、1日2回の制御によって互いにキャンセルする。東西成分については、増速する方向で重力摂動を増加させるかのような効果がある。そのバランスをとるために、軌道半径を平均的に0.5km程度大きくした運用を行う（図5）。運用において、ETS-VIIIの東西時保持制御はほぼ計画どおりに問題なく実施されている。

ETS-VIIIにおいて、イオンエンジンによる南北軌道保持制御の実施状況を図6に示す。左図は軌道面の位相を表している。0.1°の保持円の内部において2007年9月の1ヶ月間の保持状況を示す。2週当たり20回の制御により、十分に狭い領域に保持されている。右図は、軌道決定値から評価したΔV値を単位時間当たり正規化して表示している。2007年3月から5月の実績である。上側グラフは南北成分、下側グラフは東西干渉成分を表している。途中、±5°の範囲で調整できる取り付けのジンバル角調整が実施されているが、軌道保持運用においては問題のない運用が行われている。

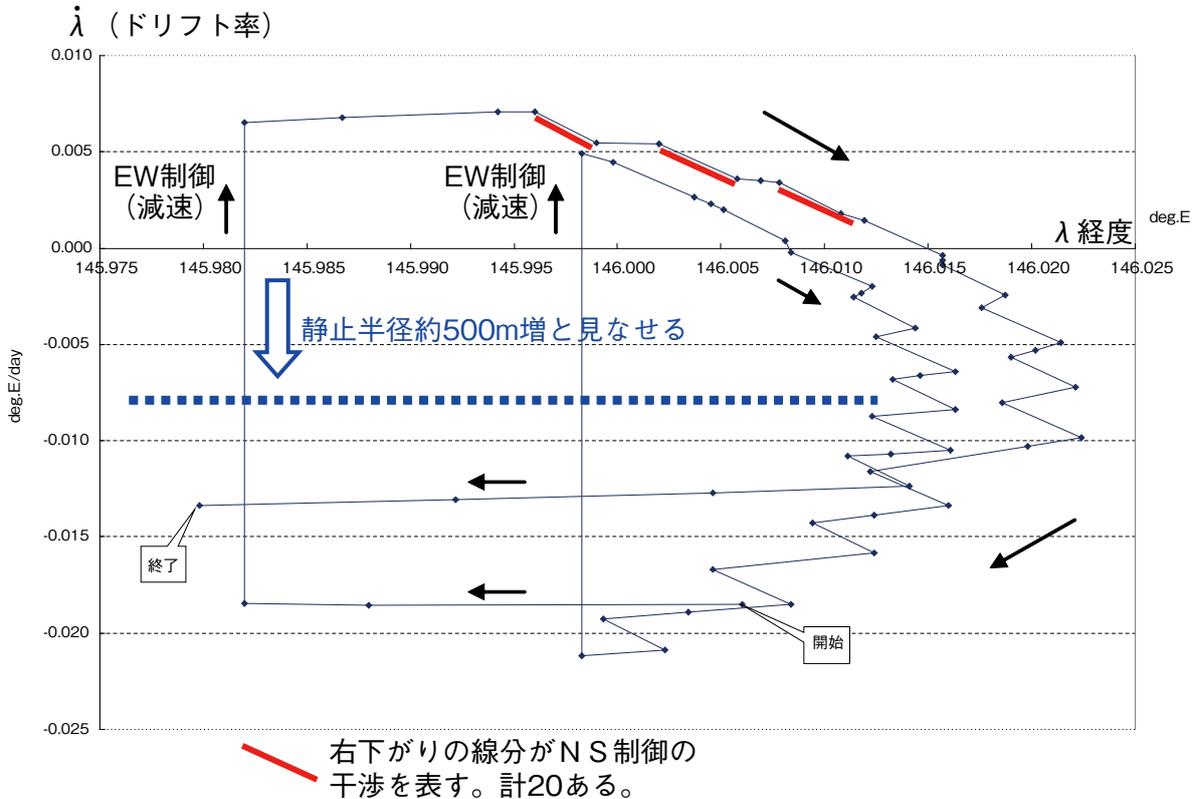
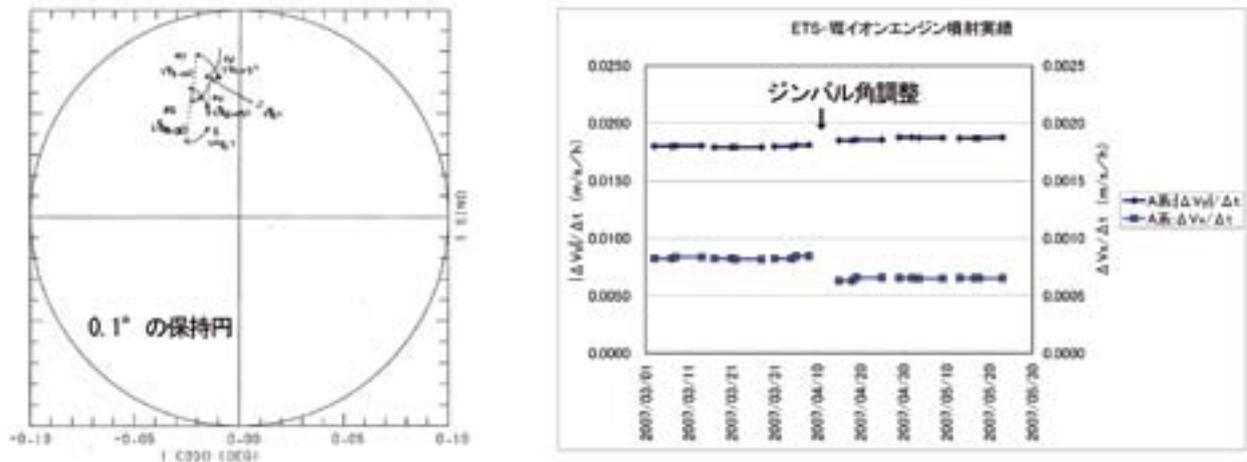


図 5 ETS-VIII において南北制御の干渉を受けた東西保持状況



(i) 1ヶ月間の軌道面保持位相面図 (2007年9月) (ii) 軌道制御量評価 (2007年3月～5月)

図6 ETSにおける南北制御の実施状況

5. おわりに

近年、JAXAにおける静止衛星において採用されている低推力軌道制御の実例として、南北軌道保持運用に採用されているDRTSのアーキジェットによる軌道運用状況、ETS-VIIIのイオンエンジンによる軌道運用状況について報告した。それぞれ、低推力噴射の特徴として高頻度の運用になり、また取り付け各からの東西への干渉も発生するが、 $\pm 0.1^\circ$ の南北および東西保持の規定範囲において問題なく運用されている。今後、2008年の冬期に打ち上げが計画されている超高速インターネット衛星WINDSにおいてもDCアーキジェットによる南北保持が計画されており、これまでの経験をベースに運用を行ってゆく予定である。

参考文献

- [1] 内田, 馬場内, 仁田原, 森, 野中, “データ中継技術衛星 (DRTS) の軌道保持制御”, 計測自動制御学会第20回誘導制御シンポジウム資料, @信州大学, pp.183-190, 2003年10月