

3F12 「しずく」の A-Train 軌道投入について

○佐々木俊崇, 中村涼, 山元透, 河野功, 伊藤徳政, 杵野正明, 中川敬三 (JAXA)
卯尾匡史 (NEC), 田中貴美恵 (NEC 航空宇宙システム)

The ascent plan of SHIZUKU(GCOM-W1) for insertion into
the Afternoon Constellation(A-Train)

Toshitaka Sasaki, Ryo Nakamura, Toru Yamamoto, Isao Kawano, Norimasa Ito, Masaaki Mokuno,
Keizo Nakagawa (JAXA), Masashi Uo (NEC) and Kimie Tanaka (NEC Aerospace Systems, Ltd.)

Key Words: SHIZUKU, A-Train, Control Box, Fleet Envelope, Morning Constellation, ZOE

Abstract

“SHIZUKU” (GCOM-W1) was launched by H-IIA rocket from Tanegashima Space Center on May 17th 2012 (UTC), performed four orbit raise maneuvers and two inclination maneuvers, and joined the A-Train on June 28th 2012 (UTC).

The ascent plan of “SHIZUKU” is composed of three steps. During the step 1, test maneuvers, orbit raise maneuvers and inclination maneuvers are performed. During the step 2, “SHIZUKU” performs no maneuvers and adjusts a phase angle between Aqua and “SHIZUKU”. During the step 3, orbit raise maneuvers for insertion of “SHIZUKU” into the A-Train are executed.

This paper will describe the outline of ascent plan, the comparison of ascent plan with other A-Train satellites and the results of actual ascent maneuvers.

1. はじめに

「しずく (GCOM-W1)」は、H-IIA ロケットにより 2012 年 5 月 17 日 16 時 39 分 (UTC) に種子島宇宙センターから打ち上げられた。「しずく」のロケット投入軌道は、他 A-Train 衛星との干渉が起きないように、A-Train 軌道高度よりも 29km 低い高度をノミナル軌道とし、軌道傾斜角についても相乗り衛星の観測軌道要求を考慮して設定した。このため、4 回の増速軌道制御と 2 回の軌道傾斜角制御を実施し、6 月 28 日 (UTC) に「しずく」を A-Train 軌道に投入することに成功した。

また、「しずく」は、A-Train 軌道投入制御計画を目的毎に 3 つのステップに分割し、打上げ日の変更になっても衛星のチェックアウトスケジュールが影響を受けないように、ステップ 1 とステップ 3 の軌道制御日を固定し、軌道制御を行わないステップ 2 の期間を調整することで、打上げ日変更の影響を吸収する方式を採用した。

本資料は、「しずく」の A-Train 軌道投入制御計画の概要を他 A-Train 衛星 (CALIPSO, PARASOL) の投入制御計画と対比して説明するとともに、A-Train 軌道投入時に考慮しなければならない制約と、それらに基づいて立案した投入制御計画の詳細について

説明する。また、打上げから A-Train 軌道投入が完了するまでの、A-Train 軌道投入に関する実運用結果について説明する。

2. A-Trainの概要

2012 年 9 月現在、A-Train に参加している衛星は Aqua, Aura, CALIPSO, Cloudsat, 「しずく」、OCO-2 の 6 衛星である。このうち、Aqua, Aura, CALIPSO, Cloudsat, 「しずく」は軌道上で A-Train を構成しており、OCO-2 は打上げ前の衛星である。A-Train に参加する衛星同士は、ほぼ同じ時刻に同じ地域を観測することが可能となり、衛星に搭載されているセンサの科学的価値の向上につながる。

A-Train を構成する衛星の軌道は、回帰パラメータを日周回数: 15, 回帰日数: 16, 日移動数: -7 とする太陽同期準回帰軌道 (フローズンオービット) である。A-Train 衛星とコンステレーションを構成するためには、太陽同期準回帰性 (a, i) と離心率ベクトル ($e \times \cos \omega$, $e \times \sin \omega$) を一致させ、昇交点赤経 (Ω) と緯度引数 (ϕ) を調整することにより、最適な地上軌跡を実現する必要がある。

A-Train に参加する衛星には運用保持範囲 (Control Box) が割り当てられており、Control Box は距離を

衛星速度で割った時間（秒数）で規定される。各衛星の A-Train 軌道上配置図を図 1 に示す。

NASA との調整の結果、「しずく」は Aqua の Control Box の中心から 79.5 秒前～259.5 秒前の範囲を Control Box の中心とし、±43 秒（回帰精度換算で±20km）を Control Box の大きさとするのが承認された。また、AMSR2 サイエンスチームから、「しずく」の地上軌跡と Aqua の地上軌跡（WRS-2）と一致させることが要求されているため、「しずく」と Aqua の「昇交点通過平均地方太陽時の差」は「赤道通過時刻の差」と同じ値とした（図 2 参照）。

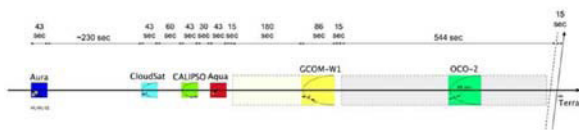


図 1 A-Train 衛星の軌道上配置図
(右：衛星進行方向 下：地心方向)

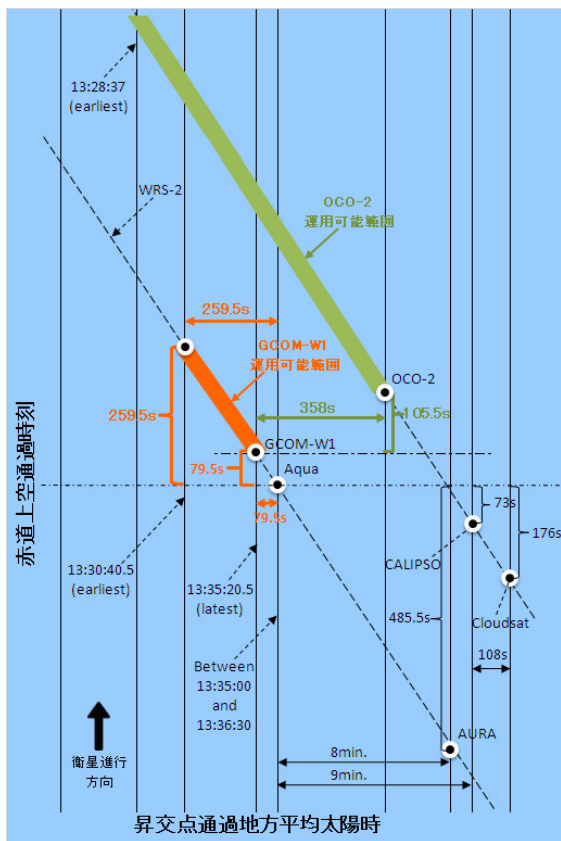


図 2 A-Train 衛星の軌道上配置図
(上：衛星進行方向 右：地球自転方向)

3. A-Train 軌道投入時に考慮した制約³⁾

本章では、「しずく」の A-Train 軌道投入制御計画を立案する時に考慮した制約事項について説明する。

3.1. Fleet Envelope

A-Train 衛星群の軌道高度（＝衛星地心距離（接触）－赤道半径（6378.137km））は、694km～711km の範囲に保持される。この保持範囲を Fleet Envelope とする。A-Train に参加する衛星は、ロケットの投入誤差（ 3σ ）を考慮しても、この Fleet Envelope に±2km のマージンを付加した 692km～713km の範囲に侵入しない軌道を、ロケット投入軌道として採用する必要がある。また、A-Train 衛星群から離脱する場合も、Fleet Envelope ±2km の外となるように軌道制御を実施する必要がある。

3.2. Morning Constellation

Terra 等の衛星から構成され、軌道高度が A-Train と等しく、降交点通過地方平均太陽時が 10 時 30 分付近に保持される Morning Constellation との極域での干渉を回避するために、A-Train に参加する衛星の昇交点通過平均地方太陽時は、13 時 25 分以降としなければならない。

3.3. Zone Of Exclusion (ZOE)

A-Train に参加する衛星には、衛星を中心とする ZOE という領域が設定される。A-Train 衛星は他の A-Train 衛星の ZOE に侵入してはいけない。

表 1 ZOE の大きさ

Radial	In-track	Cross-track
±2km	±25km	±25km

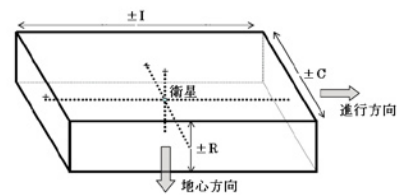


図 3 ZOE の定義

3.4. 軌道制御に関する制約

発生電力に関する制約から、ヨーマヌーバを伴う面外／減速軌道制御（1 バーン）の ΔV 時間は 20 分以下とした。軌道制御用スラスタを 4 本使用する場合、20 分の噴射で、8.5m/s (BOL) ～6.5m/s (EOL) の ΔV が可能となる（軌道制御スラスタを 2 本使用する場合、20 分の噴射で、4.2m/s (BOL) ～3.2m/s (EOL) の ΔV が可能となる）。

複数回のバーンで構成される軌道制御をイベントと定義し、1 つの軌道制御イベントで実施可能な最大 ΔV 量を 14m/s とした。また、増速軌道制御（バー

ン)の最小間隔を1.5周回、面外/減速軌道制御(バーン)の最小間隔を3周回とした。

A-Train 軌道への投入が完了するまでの期間は、定常段階よりも多くの人員を投入することが可能なため、軌道制御イベントの最小間隔を48時間とした。この時間は軌道決定、軌道制御計画立案、及び軌道制御コマンド生成等の作業時間を考慮して設定された値である。

表 2 軌道制御に関する制約

面外/減速制御(1バーン)の最大時間	20分
1つの軌道制御イベントの最大 ΔV 量	14m/s
増速制御(バーン)の最小間隔	1.5周回
面外/減速制御(バーン)の最小間隔	3周回
軌道制御イベントの最小間隔	48時間

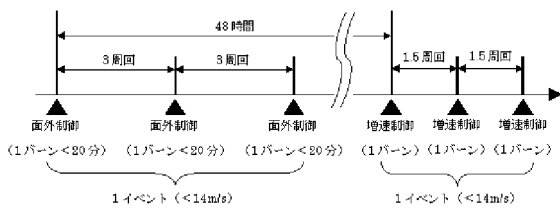


図 4 軌道制御に関する制約

3.5. 相乗り衛星の観測軌道要求

3.1項~3.4項に示した制約に加え、相乗り衛星の観測軌道要求を考慮して、「しずく」のA-Train 軌道投入制御計画を立案した。

4. A-Train軌道投入制御計画

本章では、「しずく」で採用したA-Train 軌道投入制御計画の概要を、他A-Train 衛星(CALIPSO, PARASOL)の投入制御計画と比較して説明するとともに、3章の制約を考慮して立案した投入制御計画の詳細について説明する。

4.1. 他A-Train衛星の投入制御計画との比較

CALIPSO, 2009年12月にA-Trainを離脱したPARASOL, 及び「しずく」のA-Train 軌道投入制御計画の概要を以下に示す。

(1) CALIPSO⁵⁾

CALIPSOは2006年4月28日にデルタ2によりCloudsatとのデュアルローンチで打上げられた。CALIPSOは、Aquaに対し赤道通過時刻で73秒、昇交点通過平均地方太陽時で約9分遅れた位置を運用保持中心としている(地上軌跡はWRS-2から東へ215kmずれている)。

CALIPSOは消費推薬を低減するため、ロケットの打上げ時刻と投入軌道傾斜角を最適化することで、投入軌道の面外成分に誤差がない場合は、軌道面外制御を行う必要のない制御計画としている。また、CALIPSOは最大 ΔV 量の制約から、ロケット投入軌道高度が高めの場合は2回の増速軌道制御で、低めの場合は3回の増速軌道制御でA-Train 軌道へ投入する計画としているが、増速軌道制御のタイミングは、打上げ日とロケット投入誤差により変動する計画となっている。

(2) PARASOL⁶⁾

PARASOLは2004年12月18日にアリアン5により打上げられた。PARASOLは、Aquaに対し赤道通過時刻と昇交点通過平均地方太陽時がともに131秒遅れた位置を運用保持中心としている(地上軌跡はWRS-2)。

ピギーバック衛星であるPARASOLは、搭載推薬量に対してA-Train 軌道投入に必要な ΔV 量の割合が大きいため、軌道傾斜角にバイアスを与えた状態を長期間維持して昇交点通過平均地方太陽時を制御したり、軌道長半径と軌道傾斜角を同時に制御したりすることでA-Train 軌道投入のために必要となる推薬を低減する制御計画としている。PARASOLは、打上げからA-Train 軌道投入までに、約10ヶ月の時間を要した。

(3) しずく

「しずく」は、3.5項に示す相乗り衛星の観測軌道要求から必ず面外制御を行う必要があるが、ロケット投入軌道誤差が 3σ 、軌道制御誤差が5%の場合でも、打上げ後60日以内に安全にA-Train 軌道に投入可能な計画としている。また、「しずく」は、A-Train 軌道投入制御計画を目的毎に3つのステップに分割し、打上げ日の変更になっても衛星のチェックアウトスケジュールが影響を受けないように、ステップ1とステップ3の軌道制御日を固定し、軌道制御を行わないステップ2の期間を調整することで、打上げ日変更の影響を吸収する方式を採用した。

A-Train 軌道投入制御計画の他衛星との比較を表3に、「しずく」の投入制御計画の概要を表4に示す。

表 3 A-Train 軌道投入制御計画の比較

衛星名	面外制御	投入期間	制御日
しずく	必須	60日以内	固定
CALIPSO	ロケット投入誤差に依存	46日以内	不定
PARASOL	必須	約10ヶ月	不定

表 4 A-Train 軌道投入制御計画の概要

軌道制御	打上げからの経過日	備考
ステップ 1		
増速テスト	Y+3	以下の軌道制御を実施する 「ロケット投入誤差の補正」 「Aqua との軌道傾斜角の一致」 「位相調整高度への遷移」
面外テスト	Y+5	
#1 面外制御	Y+7	
#2 面外制御	Y+9	
#1 面内制御	Y+11	
#2 面内制御	Y+13	
#3 面外制御	Y+15	
#3 面内制御	Y+17	
ステップ 2		
位相調整軌道	N 日間	減速テスト以外の制御は行わない(N=14~37: 打上げ日による)
ステップ 3		
#4 面内制御	Y+17+N	目標高度-4km に投入
#5 面内制御	Y+19+N	ΔV 誤差補正
#6 面内制御	Y+22+N	目標高度-200m に投入
#7 面内制御	Y+24+N	A-Train 軌道に投入

4.2. ロケット投入軌道³⁾⁴⁾

3章で説明した制約を考慮して、表 5に示す軌道要素を「しずく」のロケット投入軌道として設定した。

ロケット投入軌道要素の設定理由を以下に示す。

表 5 ロケット投入軌道要素 (第一昇交点)

打上げ期間 (UTC)	2012 年 5 月 17 日~6 月 29 日	
軌道要素	接触/TOD	平均/TOD
軌道長半径 (km)	7058.484	7049.301
離心率 (-)	0.001150	0.001050
軌道傾斜角 (deg)	98.158	98.164
昇交点赤経 (deg)	打上げ日時による	
近地点引数 (deg)	66.013	89.641
平均近点離角 (deg)	294.138	270.510
昇交点通過平均地方太陽時	13 時 25 分~35 分	

(1) 軌道長半径, 離心率, 近地点引数

3 σ 誤差を考慮しても、ロケット投入軌道が Fleet Envelope ± 2 km の範囲に侵入しないことが A-Train から要求されているため、以下の方法により、ロケット投入軌道の軌道長半径, 離心率, 近地点引数を設定した。

①A-Train 衛星の軌道はフローズンオービットであるため、「しずく」のロケット投入軌道 (ノミナル) の離心率ベクトル (平均/TOD) を $(e \times \cos \omega, e \times \sin \omega) = (0, 0.001050)$ のフローズンオービットとする。

②ロケット投入軌道誤差共分散から、軌道長半径誤差 (Δa) と離心率誤差 (Δe) の誤差楕円を描き、遠地点高度誤差が最も大きくなる Δa と Δe の組み合わせを求める。

③②の Δa と Δe , 及び近地点引数誤差を考慮しても、遠地点高度が 692km 以下となる「7058.484km (接触/TOD)」をノミナル投入軌道の軌道長半径として設定した。

(2) 軌道傾斜角

「A-Train 軌道の軌道傾斜角」と「相乗り衛星の軌道傾斜角要求」を考慮して、「98.158deg (接触/TOD)」をノミナル軌道の軌道傾斜角として設定した。

(3) 昇交点通過平均地方太陽時

「Morning Constellation の制約」と「相乗り衛星の昇交点通過平均地方太陽時要求」を考慮して、「13 時 25 分~35 分」をノミナル軌道の昇交点通過平均地方太陽時として設定した。

4.3. A-Train軌道上の投入可能範囲¹⁾³⁾

「しずく」の A-Train 軌道上の投入可能範囲を決定する上で考慮した要求事項を以下に示す。

①Aqua に搭載されている AMSR-E の観測幅と「しずく」に搭載される AMSR2 の観測幅 (地表面軌跡) を一致させ、かつ両センサの観測時刻差を 10 分以内とする。(AMSR2 サイエンスチームからの要求)

②打上げ延期のリスクを低減するために、ロンチウインドウを 3 分確保する。(打上げサービスからの要求)

③安全な運用を行うため、Aqua (Control Box の大きさ: ± 21.5 秒) と「しずく」の Control Box 間の間隔を 15 秒以上確保する。(A-Train からの要求)

「しずく」は①~③の要求を満足する、Aqua の赤道通過時刻と昇交点通過平均地方太陽時の 79.5 秒前 ± 43 秒~259.5 秒前 ± 43 秒を、A-Train 軌道上の投入可能範囲として採用した (図 2 参照)。

4.4. 投入制御計画¹⁾²⁾³⁾⁴⁾

A-Train に参加する衛星は、1 日に地球を 14.5625 (=15-7/16) 周回する。太陽同期準回帰軌道を観測軌道とする衛星の打上げ時刻はほぼ一定であるため、衛星分離時刻における「しずく」と A-Train 軌道上の目標投入位置の面内位相差 ($\Delta \phi$) の関係は、16 日周期で変動する (図 5 参照)。

4.2 項と 4.3 項で述べた通り、「しずく」のロケット投入軌道と A-Train 軌道上の運用保持範囲は決まっているため、「しずく」を A-Train 軌道上の所定の位

置に投入するためには、16日周期で変動する面内位相差 ($\Delta\phi$) と、衛星分離から A-Train 軌道投入までの間に変動する昇交点通過平均地方太陽時を、面内/面外制御、及び打上げ時刻を適切に設定することでコントロールする必要がある。

「しずく」の A-Train 軌道投入制御計画の詳細について以下で説明する。

(1) 面内位相差の制御

衛星の平均角速度 (n) は、以下の式で表わされる。

$$n = \sqrt{\frac{\eta}{a^3}}$$

η : 地球重力定数
 a : 軌道長半径

A-Train軌道上の目標投入位置の平均角速度を n_A 、衛星分離からA-Train軌道投入までの各軌道高度における「しずく」の平均角速度を n_i ($i=0, 1, 2, \dots$)、平均角速度 n_i の期間を T_i ($i=0, 1, 2, \dots$) とすると、衛星分離からA-Train軌道投入までの間に吸収する面内位相差 ($\Delta\phi$) は以下の式で表わされる。

$$\Delta\phi = \sum((n_i - n_A) \times T_i)$$

図 5に示す通り $\Delta\phi$ は 16日周期で変動するため、表 4に示す面内制御のスロットを使用して、打上げ後 60日以内に $\Delta\phi$ がゼロになるような面内制御計画 (n_i と T_i の組み合わせ) を打上げ日毎に 16パターン立案した。

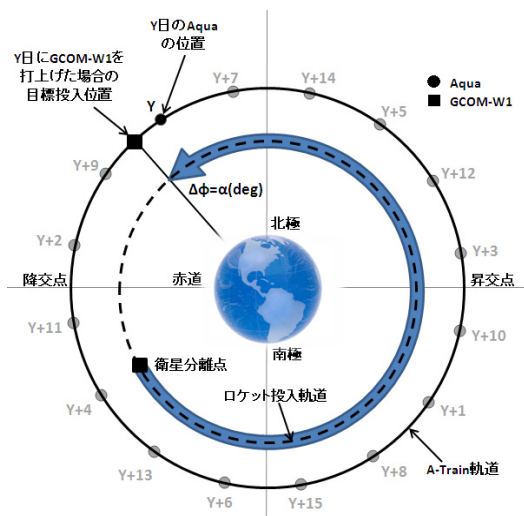


図 5 衛星分離時刻における $\Delta\phi$

表 6 打上げ日と $\Delta\phi$ の関係

打上げ日	$\Delta\phi$ (deg)	打上げ日	$\Delta\phi$ (deg)
Y	α	Y+8	$180+\alpha$
Y+1	$202.5+\alpha$	Y+9	$22.5+\alpha$
Y+2	$45+\alpha$	Y+10	$225+\alpha$
Y+3	$247.5+\alpha$	Y+11	$67.5+\alpha$
Y+4	$90+\alpha$	Y+12	$270+\alpha$
Y+5	$292.5+\alpha$	Y+13	$112.5+\alpha$
Y+6	$135+\alpha$	Y+14	$315+\alpha$
Y+7	$337.5+\alpha$	Y+15	$157.5+\alpha$

(2) 昇交点通過平均地方太陽時の制御

衛星分離からA-Train軌道投入まで期間 ($T = \sum T_i$) の「しずく」の軌道は、太陽同期準回帰軌道ではないため、その間の平均昇交点赤径の変化率は、A-Train衛星のそれと異なる。

平均昇交点赤径の変化率 ($\dot{\Omega}$) は、以下の式で表わされる。

$$\dot{\Omega} = -\frac{3}{2}n \left(\frac{Re^2}{(a(1-e^2))^2} \right) J_2 \cos i$$

- Re : 赤道半径
- e : 離心率
- J_2 : J_2 項
- i : 軌道傾斜角

A-Train軌道上の目標投入位置の平均昇交点赤径の変化率を $\dot{\Omega}_A$ 、衛星分離からA-Train軌道投入までの各軌道における「しずく」の平均昇交点赤径の変化率を $\dot{\Omega}_i$ ($i=0, 1, 2, \dots$)、平均昇交点赤径の変化率が $\dot{\Omega}_i$ の期間を P_i ($i=0, 1, 2, \dots$) とすると、衛星分離からA-Train軌道投入までの間に、目標投入位置に対して変動する昇交点通過平均地方太陽時 (ΔMLT) は以下の式で表わされる。

$$\Delta MLT = \sum((\dot{\Omega}_i - \dot{\Omega}_A) \times P_i)$$

衛星分離からA-Train軌道投入までの期間 $T (= \sum T_i = \sum P_i)$ は、衛星分離からA-Train軌道投入までに吸収する面内位相差 ($\Delta\phi$) に依存するため、表 4に示す面外制御のスロットを使用して、A-Train軌道投入時に昇交点通過平均地方太陽時が目標値となる様な面外制御計画 ($\dot{\Omega}_i$ と P_i の組み合わせ) と打上げ時刻 (衛星分離時の昇交点赤径) を設定した。

(3) A-Train 軌道投入制御計画 (ノミナル)

上記考えに基づき、「しずく」の打上げ前に立案した A-Train 軌道投入制御計画 (ノミナル) を表 7に示す。

表 7 A-Train 軌道投入制御計画(打上げ前ノミナル)

	軌道制御	制御日 (UTC)	計画 (m/s)
ステップ 1	増速テスト	2012/5/20	0.210
	面外テスト	2012/5/22	-0.430
	#1 面外制御	2012/5/24	-4.180
	#2 面外制御	SKIP	
	#1 面内制御	2012/5/28	5.189
	#2 面内制御	SKIP	
	#3 面外制御	2012/6/1	0.281
	#3 面内制御	2012/6/3	4.632
ステップ 2	位相調整軌道	21 日間	
ステップ 3	#4 面内制御	2012/6/24	3.400
	#5 面内制御	SKIP	
	#6 面内制御	2012/6/29	2.010
	#7 面内制御	2012/7/1	0.110

※ 面内制御の符号は、増速方向が「+」

※ 面外制御の符号は、軌道面ベクトルの方向が「+」

5. A-Train軌道投入制御結果

本章では、「しずく」の A-Train 軌道投入制御結果について説明する。

ロケット投入軌道評価の結果、誤差が 3σ よりも十分小さいことが確認できたため、表 4 で計画していた #2 面外制御、#2 面内制御を実施しなくても、「しずく」を A-Train 軌道に投入可能であると判断し、スキップした。

また、増速テスト～#1 面内制御の誤差が 5% 以上の値となっていることに対して、軌道制御期間中のテレメトリを使用して調査を行い、衛星重心オフセットに起因する軌道制御スラストによる姿勢制御（オフモジュレーション制御）と姿勢制御スラストによる姿勢制御が原因であることを確認した。これらの調査結果から、軌道制御期間中の姿勢制御スラストの寄与分 (ΔV_{att}) と軌道制御スラストの効率 (K_{orb}) を算出し、以下に示す式を使用して計画効率 (K_{total}) を求め、その値を使用して #3 面外制御以降の軌道制御を実施することにより、5% 以下の精度で軌道制御が行えることが確認できたため、#5 面内制御と #7 面内制御がスキップ可能であると判断し、予定より 3 日前倒しで「しずく」を A-Train 軌道に投入することに成功した。

$$K_{total} = \frac{K_{orb} \times \Delta V_{plan}}{(\Delta V_{plan} - \Delta V_{att})} = \frac{K_{orb}}{1 - \frac{\Delta V_{att}}{\Delta V_{plan}}}$$

ΔV_{plan} : 計画 ΔV 量

A-Train 軌道投入制御結果を表 8 に示す。

表 8 A-Train 軌道投入制御結果

軌道制御	制御日 (UTC)	計画 (m/s)	実績 (m/s)	効率 (—)
増速テスト	2012/5/20	0.210	0.190	0.903
面外テスト	2012/5/22	-0.430	-0.452	1.051
#1 面外制御	2012/5/24	-1.504	-1.353	0.899
#2 面外制御	SKIP			
#1 面内制御	2012/5/28	6.611	5.589	0.845
#2 面内制御	SKIP			
#3 面外制御	2012/6/1	-0.811	-0.835	1.029
#3 面内制御	2012/6/3	4.625	4.606	0.996
#4 面内制御	2012/6/24	3.382	3.378	0.999
#5 面内制御	SKIP			
#6 面内制御	2012/6/28	1.869	1.863	0.997
#7 面内制御	SKIP			

6. 結論

「しずく」は、2012 年 5 月 17 日 16 時 39 分 (UTC) に H-IIA ロケットにより種子島宇宙センターから打上げられ、4 回の増速軌道制御と 2 回の軌道傾斜角制御を行い、打上げから 42 日経過した 6 月 28 日 (UTC) に、日本の人工衛星としては初めて A-Train 軌道に投入された。

参考文献

- 1) Toru YAMAMOTO: The Ascent Plan of GCOM-W1 to the Afternoon Constellation (A-Train) JAXA-RM-11-014E, 2012
- 2) 山元透: GCOM-W1 の A-Train コンステレーションへの軌道投入計画法, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会 1104, 2010
- 3) 佐々木俊崇: GCOM-W1 の A-Train コンステレーション投入について, 電子情報通信学会技術研究報告, SANE, 宇宙・航行エレクトロニクス 110(92), 139-144, 2010-06-17
- 4) 中村涼: GCOM-W1 の A-Train 参加について, 第 53 回宇宙科学技術連合講演会 2C11, 1088-1093, 2009
- 5) Corinne Salcedo: THE INSERTION OF CALIPSO INTO THE A-TRAIN CONSTELLATION (AAS 05-366), ADVANCES IN THE ASTRONAUTICAL SCIENCES, VOL 123, PART 2, pages 1799-1812, 2006
- 6) Damien Delobette: THE INSERTION OF PARASOL INTO THE A-TRAIN CONSTELLATION (AAS 05-365), ADVANCES IN THE ASTRONAUTICAL SCIENCES, VOL 123, PART 2, pages 1783-1798, 2006