

M-Vロケットの姿勢制御（CNE）

田村誠*，中谷一郎*，川口淳一郎*，久保田孝*，齋藤宏*
江西達也**，齋藤一晶**，後藤晋一**，大地一嘉**，黒河明広**
西潟義明**，浅野秀夫**，秋岡大作**，林房男**，大塚浩仁***，内田洋***

1. はじめに

M-Vロケットは、慣性航法誘導装置（ING：Inertial Navigation and Guidance）を第3段計器部に搭載し、第1段から第3段までの3軸姿勢制御を行っている。本稿では、5号機以降のINGについて、改良の履歴および飛翔結果を記述する。INGの概要については[1]、[2]を参照されたい。

2. 研究開発の概要

M-Vロケットは、多様なミッションに対応するため、衛星・探査機毎に機体の仕様変更がある。INGも、ミッション要求、機体の仕様変更に合わせて毎号機種々の改良を加えてきた。表2-1に代表的なING改良の履歴を示す。また、各ミッション毎に最適な制御系シーケンスが組み立てられており、表2-2にM-V-5号機以降の制御系シーケンスの内容と設定の根拠をまとめている。

INGの代表的な改良の内、5号機で行われた3件を除けば全てソフトウェアで対応できている。このことから、搭載ソフトウェアは、M-Vロケット各号機のミッション要求に良く対応できており、ソフトウェア設計方針、構成は適切なものであったと考えている。

3件のハードウェアの改良の内、FOGの耐角振動特性の改善は、1号機の振動試験でFOGへの角振動入力に対し角度ドリフトが発生したことを受けて実施した。角度ドリフトの原因は、FOGとその周辺回路を含むループの特性にあることは明確であった。1号機から4号機までは、運用に問題のないレベルまで角度ドリフトを抑えるような回路定数の調整を行うことで対応した。

一方で、ING開発の初期に比べ半導体技術の進歩があり、改修の目処が立ったため、5号機への反映を目標に改修を実施した。この改修の結果、飛翔時に想定されるFOGへの角振動入力に対し、従来の1/10以下の角度ドリフトに抑えることが可能となった。

* The Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) / JAXA
** Mitsubishi Precision, Co., Ltd.
*** IHI Aerospace Co., Ltd.

表2-1 ING改良の履歴

ロケット	主な改良点 (改良方法)	内容
5号機	SJブローダウン対応 (S)	SJブローダウン化に伴いSJ制御計算部を全面改修
	2段TVC制御論理変更 (S)	LITVCからMNTVCへの変更に伴い制御論理全面改修
	角速度制御機能追加 (S)	6号機以降のミッションで必要となる角速度制御機能追加
	誘導アルゴリズムの改修 (S)	ミッションに対応した誘導論理に改修 (計算のみ)
	アンテナ切替制御論理実装 (S,H)	地上支援系の電波受信状態が最良になるアンテナの選択機能追加
	ショックマウント特性改良 (H)	機器毎に搭載環境に合わせた最適なショックマウントを再設計
6号機	FOGの耐角振動特性の改善 (H)	FOG周辺電子回路を改修し角振動環境下での角度ドリフトを改善 従来の1/10以下を実現
	角速度制御機能の実証 (S)	衛星分離前後に角速度制御を初めて採用
	誘導アルゴリズムの改修 (S)	ミッションに対応した誘導論理に改修 (計算のみ)

改良方法 S: ソフトウェアの変更による, H: ハードウェアの改修による

表2-2 M-V-5号機以降の制御系シーケンス

	M-V-5号機以降の計画時点のシーケンス					M-V-1号機及びM-V-5号機以降のシーケンス設定の根拠				
	M-V-1	M-V-5	M-V-6	M-V-7	M-V-8	M-V-1	M-V-5	M-V-6	M-V-7	M-V-8
1段TVC、P/Y制御開始 1段B1SMRC、ロール制御開始	X+3.0s	1号機と同じ				ランチャをクリアする時刻	1号機と同じ			
1/2段分離、2段点火	X+75.0s	1号機と同じ				1段制御力のトリム能力の限界時刻と空力外乱に対する2段24LiTVCによる2段制御能力から設定	2段TVCのM25MNTVCの制御仕様をX+75sの動圧での分離が可能な仕様に設定して、1号機と同じ時刻としている。			
1/2段分離後のTVC、P/Y制御開始 2段SMRC、ロール制御開始	X+75.6s	X+75.7s	5号機と同じ			LITVCを用いた、空力外乱とFITHにおける横方向外乱に対する制御整定能力から設定。	1/2接手に非開傘方式を採用したことで十分な分離クリアランスを確保するために制御開始時間を延長。かつ分離後のM25TVCによるFITH時の外乱と空力外乱に対して姿勢誤差許容値として設定。			
2段SMSJ制御開始	X+150.5s	X+139.5s	5号機と同じ			燃速のばらつきに対して、TVC制御とSMSJ制御の併用区間を設けた。	M25モータへの変更による時間の変更			
2段TVC制御終了	X+157s	X+152s	5号機と同じ			M24モータ燃焼時間97sに対応して設定	M25モータへの変更により燃焼時間78sに合わせて時刻設定			
2段レファレンスチェンジ	X+172s	X+152.5s	5号機と同じ			2段燃焼終了後の姿勢整定時間で設定	2/3段分離時刻をX+200sに前倒しにするためにレファレンスチェンジ時刻を早めた。			
NF分離	X+197s	X+186s	5号機と同じ			レファレンスチェンジ終了後のレート条件がNF分離時の要求を満足する時刻に設定	M-V-1号機と同様に、NF分離におけるレート条件が満足する時間に設定			
2/3段分離	X+213s	X+200s	5号機と同じ			分離後の残留推力及び分離クリアランスから設定	1号機と同じ			
3段点火	X+218s	X+205s	5号機と同じ			飛行計画から3段点火秒時を設定	飛行計画から3段点火秒時を早めた。時刻は、2段のレファレンスチェンジの収束時刻の限界から設定。			
3段SJ制御開始	X+214s	X+201s	5号機と同じ			分離完了後の3段点火直前の3軸制御	1号機と同じ			
3段制御開始	X+219s	X+205.5s	5号機と同じ			2/3段分離時はSJのバルブを止め衝撃の影響緩和を図る。分離後の制御開始時点と1s後と設定	無制御区間を短縮して姿勢誤差の増大を防ぐために、制御開始時刻を分離から0.5s後と短縮して設定			
3段SJ制御開始	X+318s	X+306s	5号機と同じ			燃速のばらつきに対して、TVC制御とSJ制御の併用区間を設けた。	3段燃焼時間の変更に伴い時刻を変更	5号機と同じ	5号機と同じ	5号機と同じ
3段TVC制御終了	X+332s	X+315s	5号機と同じ			3段燃焼終了時刻に合わせてTVC制御終了	3段燃焼時間の変更に伴い時刻を変更	5号機と同じ	5号機と同じ	5号機と同じ
3段レファレンスチェンジ	なし	X+317s	X+347s	6号機と同じ		4段燃焼開始時の姿勢に保持	KM燃焼開始時の姿勢に変更	衛星分離時の要求姿勢に変更		
スピンモータ点火	X+333s	X+359s	なし	なし	なし	4段KM点火前の3段でのスピニアップ	1号機と同じ	なし	なし	なし
3/4段分離	X+339s	X+370s	なし	なし	なし	スピン分離	1号機と同じ	なし	なし	なし
4段点火	X+343s	X+374s	なし	なし	なし			なし	なし	なし
4段燃焼終了	X+414s	X+468s	なし	なし	なし			なし	なし	なし
衛星分離	X+477s	X+610s	X+1307s	X+510s	X+519s	4段の残留推力の低下後に分離	1号機と同じ			
衝突回避マヌーバ	なし	X+612s	X+1314s	X+511s	X+524.7s	なし	4段のヨータンブラーによる衝突回避	SJによる衛星との衝突回避マヌーバを実施		
コンタミ回避マヌーバ	なし	X+619s	X+1352s	X+551s	X+564.7s	なし	ヨータンブラー終了直後のタンブルモータによる回避	SJによる衛星に対するコンタミ回避マヌーバを実施		
3段スピニアップ	X+333s	X+359s	X+1451s	X+5000s	X+5100s	最終姿勢のスピニアップ安定化	1号機と同じ			
3段CN終了	X+350s	X+359.1s	X+1461s	X+5040s	X+5140s		サブペーロードの実験終了まで運用			

3. 成果の概要

3.1. M-V-5号機飛翔結果

3.1.1. 概要

INGは発射前および飛翔中を通し正常に動作し、ロケットを探査機打ち出し方向に姿勢制御することができた。機体コンフィギュレーション変更に対応し今回から新たに導入した新機能（SJブローダウン化対応、M25対応及びアンテナ切替等）についても正常に動作することが確認できた。INGタイムシーケンスおよび設定した姿勢プログラマを表3.1-2、表3.1-3に示す。

3.1.2. 初期設定

3.1.2.1. ランチャ設定角

ランチャ設定は次の通りであった。

AZM=90.2deg, ELV=80.8deg

3.1.2.2. ING初期姿勢角

誘導座標系におけるING初期姿勢角は、ピッチ及びロール角については加速度計出力より求めた値を使用した。また、ヨー角についてはランチャ設定方位角に補正値を加えた値（方位角補正値）を使用した。方位角はIMU（Inertial Measurement Unit）とランチャ間にミスアライメントがあるため、ランチャの設定方位角をそのまま使用することができない。そこで、ヨー軸まわりにミスアライメントがある場合、IMUが検出するロール角はランチャ上下角とカップリングすることを利用し、ヨー軸まわりミスアライメントを最小二乗法により推定した。表3.1-1にING-ランチャ角度読合せデータを示す。

表3.1-1 ING-ランチャ角度読合せデータ

実施日	No.	ランチャ・レゾルバ [deg]	ING 上下角 [deg]	ING ロール角 [deg]
フライト当日 (2003.5.9)	1	77.98	77.815	-0.165
	2	79.01	78.924	-0.086
	3	80.00	79.919	-0.081
	4	82.00	81.923	-0.077
発射角設定	5	80.80	80.711	-0.089

これより、方位角補正値を Δ AZM= - 0.79degとした。

表3.1-2 INGタイムシーケンス

M-V-5号機(MUSES-C) INGタイムシーケンス表

E-time	RnT+	SEQID	ACT	EMV1	EMV2	SJ	AHT	Target	タイマ	備考	R0受信	R0停止	A3	A4	M14	B1SMRC	M25	B2SMRC	SMSJ	N34	SJ	
-48.0		00 01	00	00	00	00	0	0		● NAVスタート												
-32.0		01 02	11	11				1		S1制御計算開始 S1=1												
-15.1								2											rc=0			
-13.0			12-13					3		駆動チェック用プログラム (SPGG点火)			No Action	No Action					rc=1.4	rf=0		
-10.0			14-15					4		駆動チェック用コマンドリセット									rc=7.0			
-9.5								5		駆動チェック終了												
0.0								1		(第1段点火)												
3.0			16-17	12				6		M14MNTVCG B1SMRC制御開始 (B1SMRC点火)												
5.0		01 02						7		A3A4受信モード 1=1 (コマンドR0-A4アーシング)	No Action	No Action						rc=3.4				
7.0								8		R1TVCGコマンドリセット変更												
8.0			18-19					9														
11.0								9														
13.0								10														
23.0								11														
25.0			20					12														
25.0			20					13														
40.0			40					14														
41.0								14														
45.0			55					15														
50.0			60					15														
55.0			70					16														
60.0							2	16														
62.0		01 04						-		第1回R0受信開始	68											
65.0			00					-														
14.0	BST+C	02 01								● B3CNTスタート												
14.5	0.5	02 02								M14MNTVCG B1SMRC制御終了												
14.8	2.8	02 03								1=2段分離制御(ST/CTE)												
14.1	5.1	02 04								2=3段分離制御(B1COMP=0)												
15.0	1.0	02 05	00	00	00			13		スタートID 1=2 (第2段点火) A3A4受信モード 2=1												
15.5	1.5									(B2SMRC点火)												
15.7	1.7	02 06	11	11						M25MNTVCG B2SMRC制御開始												
17.5	3.5		12-13																			
60.0	4.0		27																			
65.0	31.0		37																			
105.0	31.0	02 07								第1回R0停止制御	105											
115.0	41.0		43																			
125.0	51.0	02 08								第1回R0受信終了	125											
135.0	61.0		53																			
135.0	65.0	02 09																				
139.5	65.5	02 0A								(SMSJ点火) A3A4受信モード 2=2	No Action											
147.0	73.0	02 0B			11			16		B2SMRC終了, SMSJ制御開始	147	147										
152.0	78.0	02 0C			21					第2回R0受信開始 M25MNTVCG終了, SMSJ再始動 A3A4受信モード 2=3												
152.4								19														
152.5								20														
166.0	112.0									◇ (NT復帰)												
190.0	116.0				31																	
192.0	118.0	02 0D								第2回R0受信終了												
193.0	BST+C	03 01								● B3CNTスタート												
199.0	4.0									◇ (B3熱電圧始動)												
199.5	4.5	03 02								SMSJ制御終了												
199.9	4.9	03 03								1=2段分離制御(ST/CTE)												
199.7	4.7	03 04								2=3段分離制御(B2COMP=0)												
200.0	5.0	03 05	00	00	00	00				スタートID 2=3 (3=3段分離)												
201.0	6.0	03 06				11				SJコ触制御開始												
203.0	8.0	03 07								M34MNTVCGロック解除												
204.5	9.5	03 08	11			12				SJ停止, M34MNTVCG制御計算開始 (第3段点火)												
205.0																						
208.5	10.5		12-13			20				M34 S/A off (S/A電源コマンド)												
210.0	15.0					5																
218.0	23.0					34																
225.0	30.0		20																			
238.9								21														
237.0	47.0					45		22		◇ (ロール 50 deg)												
243.0	50.0		34-35							◇ (マニピュレータ TV=10V)												
245.0	20.0		45																			
285.0	90.0		55																			
285.0	100.0					59				SJロールローラスト												
355.0	110.0					67				SJコ触制御												
207.0																						
312.0	117.0	03 09								第3回R0停止開始												
313.0	118.0	03 0A								第3回R0受信開始	313											
318.0	121.0	03 0B				16				M25MNTVCG制御終了												
318.9								23														
311.0								24														
316.0	123.0	03 0C								M25MNTVCG再ロック												
326.0	131.0					79																
330.0	135.0							4														
335.0	140.0	03 0D								第3回R0受信終了												
346.0	151.0	03 0E								M34 S/A off												
350.0	0.0	04 01								● B4CNTスタート, L1V15始動												
359.0	3.0									◇ (スピンモータ点火)												
359.1	3.1	04 02								SJコ触制御終了												
368.0	10.0	04 03								(M34 S/A off)												
370.0	14.0									◇ (3/4段分離)												

表3.1-3 姿勢プログラマ

No.	X+TIME [s]	Pitch [deg]	Yaw [deg]	Roll [deg]
1	-30.000	80.7667	0.0249	0.00
2	-15.100	80.7667	0.0249	0.00
3	-15.000	75.7667	-4.9751	0.00
4	-10.000	75.7667	-4.9751	0.00
5	-9.900	80.7667	0.0249	0.00
6	3.000	80.7667	0.0249	0.00
7	5.000	77.1787	1.2937	0.00
8	7.000	74.5352	0.8376	0.00
9	11.000	67.9210	0.0017	0.00
10	17.000	62.0745	-0.0050	0.00
11	23.000	57.5143	-0.5148	0.00
12	29.000	54.6305	-0.1149	0.00
13	35.000	52.0020	0.3532	0.00
14	41.000	49.2877	0.8246	0.00
15	50.000	44.5835	0.3213	0.00
16	60.000	40.7714	0.5524	0.00
17	75.000	35.0005	0.5059	0.00
18	80.000	33.6316	0.5009	0.00
19	151.000	16.9619	0.4304	0.00
20	152.400	16.9619	0.4304	0.00
21	152.500	-10.2908	0.3786	0.00
22	200.000	-10.2908	0.3786	0.00
23	205.000	-10.2908	0.3786	0.00
24	209.900	-10.2908	0.3786	0.00
25	210.000	-10.2908	0.3786	20.00
26	211.900	-10.2908	0.3786	20.00
27	212.000	-10.2908	0.3786	-20.00
28	215.900	-10.2908	0.3786	-20.00
29	216.000	-10.2908	0.3786	20.00
30	217.900	-10.2908	0.3786	20.00
31	218.000	-10.2908	0.3786	0.00
32	236.900	-10.2908	0.3786	0.00
33	237.000	-10.2908	0.3786	90.00
34	309.000	-10.2908	0.3786	90.00
35	316.900	-10.2908	0.3786	90.00
36	317.000	-8.5807	0.3818	90.00
37	374.000	-8.5807	0.3818	90.00
38	468.000	-8.5807	0.3818	90.00

3.1.3. 飛翔結果概要

3.1.3.1. 第1段ステージ

(1) M14TVC

M14TVCによるピッチ/ヨー制御はX + 3秒からX + 74.5秒まで行われ、この間の制御動作は全て正常であった。制御中の姿勢角誤差はX + 4秒付近で最大（ピッチ約 + 2.25deg）となり、その後は $\pm 0.5\text{deg}$ 程度の誤差範囲で推移した。

(2) B1SMRC

B1SMRCによるロール制御はX + 3秒からX + 74.5秒まで行われ、この間の制御動作は全て正常であった。制御中のロール誤差角は、X + 9秒付近で最大（約 - 8.0deg）となったが、X + 17秒付近でデッドバンド（ $\pm 3.0\text{deg}$ ）に収束し、その後はデッドバンド内を推移した。SMRC本数削減の影響でロール誤差角の増大を懸念していたが事前の解析の範囲内であった。

3.1.3.2. 第2段ステージ

(1) M25TVC

M25TVCによるピッチ/ヨー制御はX + 75.6秒からX + 152秒まで行われ、この間の制御動作は全て正常であった。制御中の誤差角はピッチの最大はX + 151秒付近で約0.7deg程度、ヨーの最大はX + 148秒付近で約0.3deg程度であった。

(2) B2SMRC

B2SMRCによるロール制御はX + 75.6秒からX + 139.5秒まで行われ、この間の制御動作は全て正常であった。制御中のロール誤差角はX + 106秒付近で最大（約 - 2.3deg）となったが、デッドバンド（ $\pm 2.5\text{deg}$ ）内を推移した。

(3) SMSJ

SMSJによる3軸制御はX + 139.5秒からX + 199.5秒まで行われた。リファレンスチェンジ（X + 152.5秒）後のオーバシュートも小さく制御は正常であった。

3.1.3.3. 第3段ステージ

(1) M34TVC

M34TVCによるピッチ/ヨー制御はX + 204.5秒からX + 315秒まで行われた。制御中の誤差角はM34モータ点火時、ピッチで約 + 0.6deg、ヨーで約 + 0.5degとなったが、X + 208秒にはピッチで約 - 0.05deg、ヨーで約 + 0.03deg程度に収束した。

なお、ピッチ・ヨーともに微小な振動がみられるが、これは探査機の液体燃料によるスロッシングの影響である。

(2) SJ

(a) M34モータ燃焼前3軸制御

SJによるM34モータ燃焼前の3軸制御はX + 201秒からX + 204.5秒まで行われ、この間の制御動作は全て正常であった。制御中のピッチ最大誤差角は約 - 0.4deg、ヨー最大誤差角は約 + 0.2deg、ロール最大誤差角は約 + 0.7degであった。

(b) M34モータ燃焼中ロール制御

SJによるM34モータ燃焼中のロール制御は、

X + 205.5 ~ X + 237秒：ロールハイ制御

X + 237 ~ X + 295秒：ロールハイ間引き制御

X + 295 ~ X + 306秒：ロールロー間引き制御

にて行われ、この間の制御動作は全て正常であった。

(c) M34 モータ燃焼後3軸制御

SJ による M34 モータ燃焼後の制御は、

$X + 306 \sim X + 339.1$ 秒：3軸制御

にて行われ、テレメータで見えている範囲では正常に動作した。

3.1.3.4. RG コマンド

RG コマンドを表3.1-4の通り受信した。

表3.1-4 RG コマンド

コマンド名	受信秒時 (sec)	受信コマンド (pulse)	プログラマ修正期間 (sec)
RC-1	$X + 72.2$	P+1	$X + 105.1 \sim X + 151.1$
RC-2	$X + 166.2$	Y-1	受信直後 $\sim X + 313.1$
	$X + 166.3$	P-1	受信直後 $\sim X + 312.1$
RC-3	$X + 326.2$	Y+1	受信直後 \sim 制御終了
	$X + 326.4 \sim 326.6$	P-3	受信直後 \sim 制御終了

(注意) 受信コマンドの重みは、RC-1 \sim 3 共通で 0.1deg/pulse

3.1.4. 飛翔データ

3.1.4.1. 姿勢制御機能

図3.1-1に飛翔時の機体姿勢角と姿勢制御目標角、姿勢誤差角の履歴を示す。ピッチ、ヨー、ロール軸の全てが、姿勢制御目標角に正しく追従しており、INGの姿勢制御機能が正しく動作していたことがわかる。

3.1.4.2. 航法機能

INGの航法機能の確認として、飛翔中の速度及び位置をテレメータに出力した。ここでは、その妥当性の検証としてレーダデータを基準に比較を行った。

(1) データ比較手順

データの比較は、次の手順で行った。

- (a) レーダデータ (N-系, 慣性系)の速度, 位置を射点座標系 (G-系, 慣性系)に変換する。射点位置は、次を用いた。

射点 経度 : 131.08509216deg

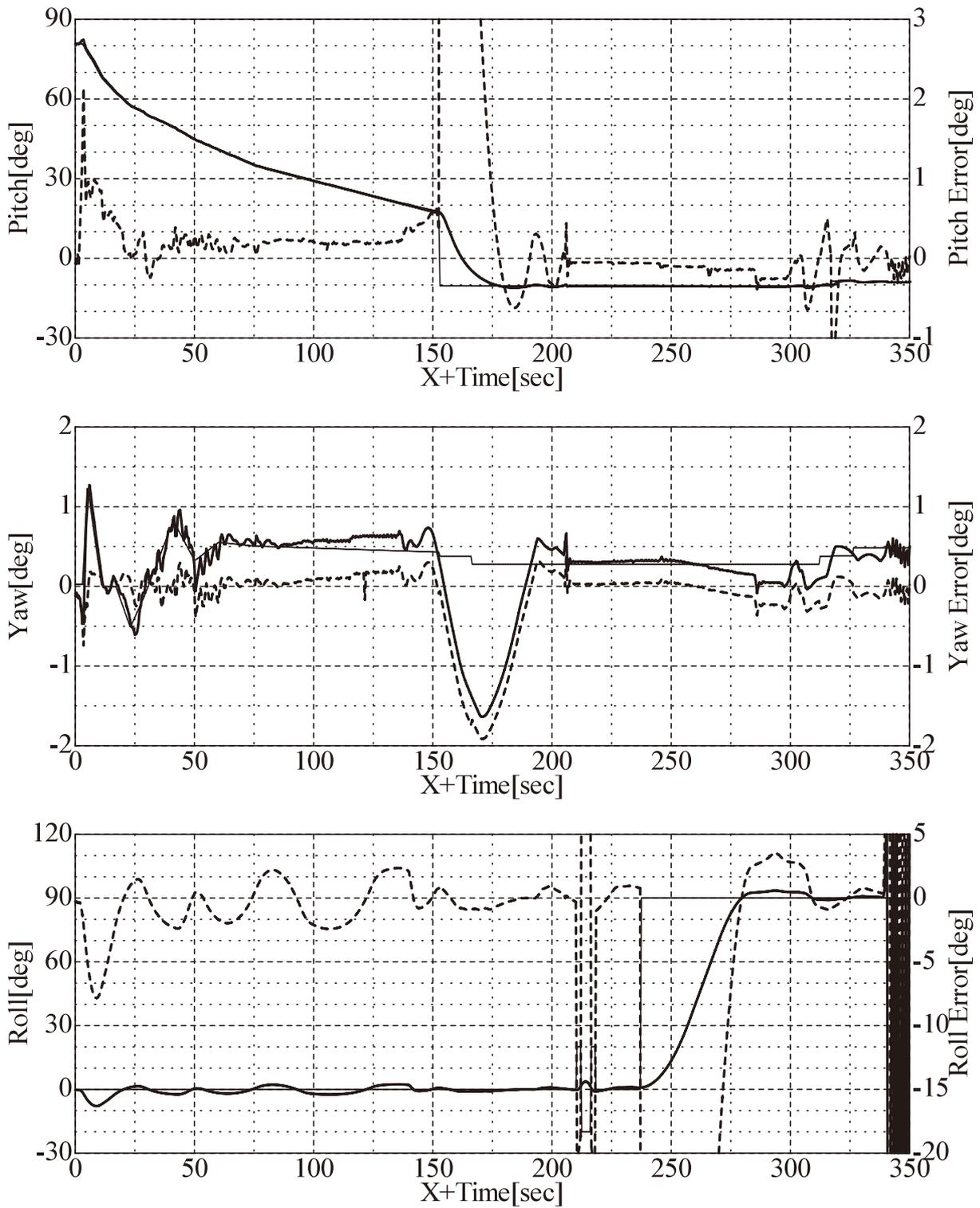
射点 緯度 : 31.24742519deg

射点 高度 : 261.716m

- (b) 位置データの履歴から、INGテレメトリデータ (G-系, 慣性系)の時刻はレーダデータの時刻と比べ80msほど遅れているものと推定できる。これは4号機でも確認された現象で、評価の際はINGテレメトリデータに80msの補正を加えて比較を行った。

(2) 比較結果

図3.1-2に、ING航法データとレーダデータの比較を示す (G-系)。X軸方向は加速度計のスケールファクタ誤差、Y軸方向は発射方位角の設定誤差であると考えられ、その値は+0.13degと推定できる。Z軸方向はごく初期に発生した速度誤差が、航法計算誤差の要因となっているが、初期姿勢角に近いところでは、Z軸方向の加速度はX軸加速度計で計測されている。



(太実線：姿勢角，細実線：姿勢目標角，太点線：姿勢誤差角)

図3.1-1 機体姿勢角，誤差角履歴

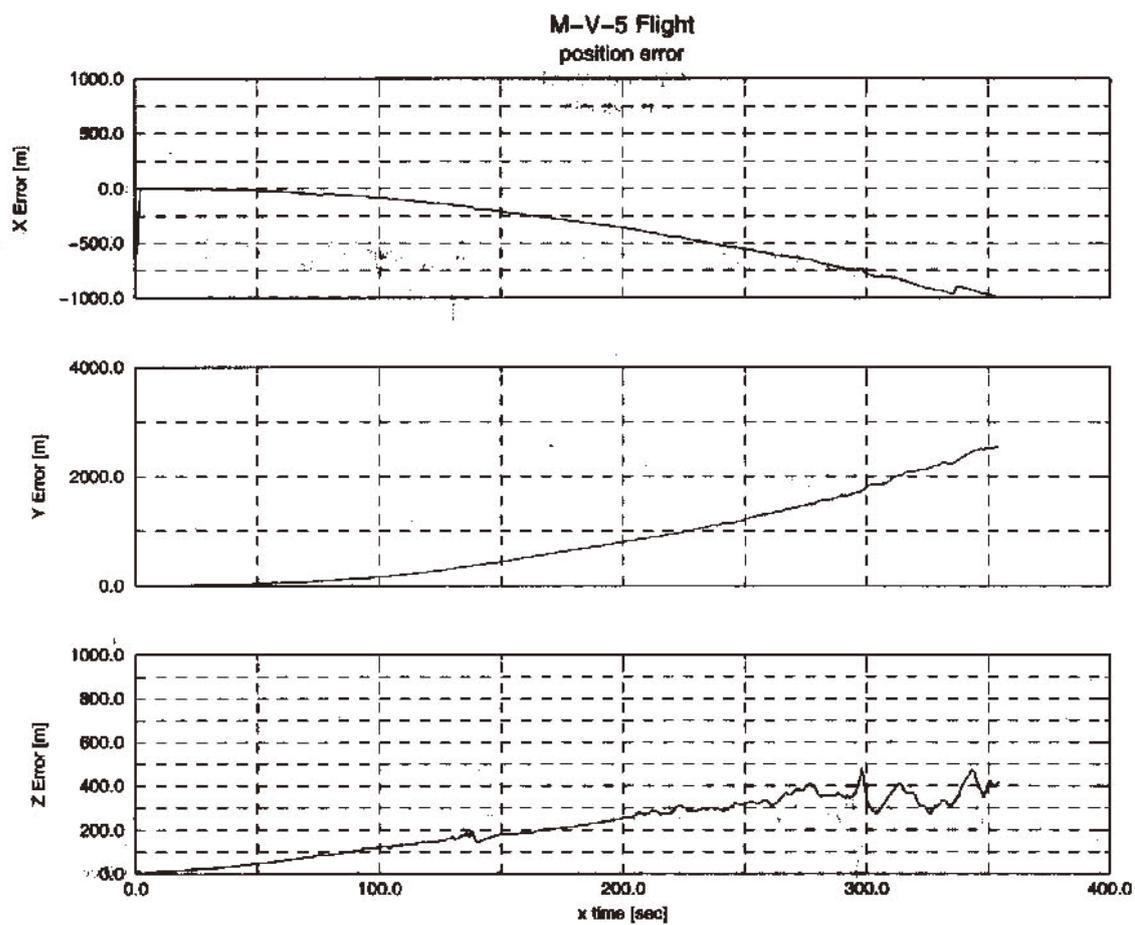


図3.1-2 ING航法データとレーダデータの比較

3.2. M-V-6号機飛翔結果

3.2.1. 概要

INGは発射前および飛翔中を通し正常に動作し、ロケットを衛星打ち出し方向に姿勢制御することができた。また第3段SJでのレート制御および衛星分離後のタンブル姿勢制御についても正常に実施されていることが確認された。INGタイムシーケンスおよび設定した姿勢プログラマを表3.2-2, 表3.2-3に示す。

3.2.2. 初期設定

3.2.2.1. ランチャ設定角

ランチャ設定は次の通りであった。

AZM=87.6deg, ELV=80.2deg

3.2.2.2. ING初期姿勢角

表3.2-1に ING-ランチャ角度読合せデータを示す。

表3.2-1 ING-ランチャ角度読合せデータ

実施日	No.	ランチャ・レゾルバ [deg]	ING 上下角 [deg]	ING ロール角 [deg]
フライト当日 (2005.7.10)	1	78.00	77.947	-1.366
	2	79.00	78.980	-1.503
	3	81.01	80.984	-1.836
	4	82.00	81.993	-2.076
	5	84.01	84.003	-2.762
発射角設定	6	80.21	80.117	-1.705

これより、方位角補正値を Δ AZM= - 1.678degとした。

表3.2-3 姿勢プログラマ (1/2)

No.	X+TIME [s]	Pitch [deg]	Yaw [deg]	Roll [deg]
1	-30.000	80.2000	-0.4085	0.00
2	-15.100	80.2000	-0.4085	0.00
3	-15.000	75.2000	-5.4085	0.00
4	-10.000	75.2000	-5.4085	0.00
5	-9.900	80.2000	-0.4085	0.00
6	3.000	80.2000	-0.4085	0.00
7	5.000	80.1539	-1.3104	0.00
8	7.000	74.1410	-1.7574	0.00
9	11.000	69.9859	1.7601	0.00
10	17.000	66.5151	0.5468	0.00
11	23.000	61.6684	0.9369	0.00
12	29.000	57.7927	0.5112	0.00
13	35.000	53.9385	0.5328	0.00
14	41.000	51.1391	0.6171	0.00
15	50.000	47.1510	0.5575	0.00
16	60.000	42.1181	0.8878	0.00
17	75.000	37.2619	0.9107	0.00
18	85.000	36.1267	1.1279	0.00
19	152.000	27.8367	2.0000	0.00
20	152.400	27.8367	2.0000	0.00
21	152.500	-15.8481	9.0000	0.00
22	207.000	-15.8481	9.0000	0.00
23	207.100	-15.8481	9.0000	90.00
24	347.000	-15.8481	9.0000	90.00
25	347.100	-105.8481	-5.0000	90.00
26	364.000	-167.0000	-5.0000	90.00
27	447.000	-167.0000	-5.0000	90.00
28	447.100	-167.0000	-5.0000	-1.00
29	535.000	-167.0000	-5.0000	-180.00
30	899.000	-167.0000	-5.0000	-180.00
31	899.100	-167.0000	-5.0000	-90.00
32	943.000	-167.0000	-5.0000	0.00
33	1257.000	-167.0000	-5.0000	0.00
34	1257.100	-167.0000	-5.0000	20.00
35	1258.000	-167.0000	-5.0000	20.00
36	1258.100	-167.0000	-5.0000	-20.00
37	1259.000	-167.0000	-5.0000	-20.00

表3.2-3 姿勢プログラマ (2/2)

No.	X+TIME [s]	Pitch [deg]	Yaw [deg]	Roll [deg]
38	1259.100	-167.0000	-5.0000	20.00
39	1260.000	-167.0000	-5.0000	20.00
40	1260.100	-167.0000	-5.0000	-20.00
41	1261.000	-167.0000	-5.0000	-20.00
42	1261.100	-167.0000	-5.0000	0.00
43	1291.000	-167.0000	-5.0000	0.00
44	1291.100	-167.0000	-5.0000	0.00
45	1307.500	-167.0000	-5.0000	0.00
46	1307.600	-167.0000	-5.0000	0.00
47	1314.000	-167.0000	-5.0000	0.00
48	1314.100	-257.0000	-5.0000	0.00
49	1352.000	-257.0000	-5.0000	0.00
50	1352.100	-257.0000	25.0000	0.00
51	1369.000	-257.0000	125.0000	0.00
52	1451.000	-257.0000	125.0000	0.00
53	1451.100	-257.0000	125.0000	0.00

3.2.3. 飛翔結果概要

3.2.3.1. 第1段ステージ

(1) M14TVC

M14TVCによるピッチ/ヨー制御はX + 3秒からX + 74.5秒まで行われ、この間の制御動作は全て正常であった。制御中の姿勢角誤差はX + 6秒付近で最大（ピッチ約+1.9deg）となり、その後は±0.5deg程度の誤差範囲で推移した。

(2) B1SMRC

B1SMRCによるロール制御はX + 3秒からX + 74.5秒まで行われ、この間の制御動作は全て正常であった。制御中のロール誤差角は、X + 10秒付近で最大（約-7.9deg）となったが、X + 18秒付近でデッドバンド（±2.5deg）に収束し、その後はデッドバンド内を推移した。

3.2.3.2. 第2段ステージ

(1) M25TVC

M25TVCによるピッチ/ヨー制御はX + 75.6秒からX + 152秒まで行われ、この間の制御動作は全て正常であった。制御中の誤差角はピッチの最大はX + 151秒付近で約+0.6deg程度、ヨーの最大はX + 151秒付近で約-0.6deg程度であった。

(2) B2SMRC

B2SMRCによるロール制御はX + 75.6秒からX + 139.5秒まで行われ、この間の制御動作は全て正常であった。制御中のロール誤差角はX + 135秒付近で最大（約+2.5deg）となったが、デッドバンド（±2.5deg）内を推移した。

(3) SMSJ

SMSJによる3軸制御はX + 139.5秒からX + 199.5秒まで行われた。リファレンスチェンジ（X + 152.5秒）後のオーバシュートも小さく制御は正常であった。

3.2.3.3. 第3段ステージ

(1) M34TVC

M34TVCによるピッチ/ヨー制御はX + 205.5秒からX + 315秒まで行われた。制御中の誤差角の最大はM34モータ燃焼末期にピッチで約+0.7deg（X + 305秒）、ヨーで約+0.5deg（X + 290秒）であった。

なお、ピッチ・ヨーともに微小な振動がみられるが、これは衛星の液体燃料によるスロッシングの影響である。

(2) SJ

(a) M34モータ燃焼前3軸制御

SJによるM34モータ燃焼前の3軸制御はX + 201秒からX + 204.5秒まで行われ、この間の制御動作は全て正常であった。制御中のピッチ最大誤差角は約+0.4deg、ヨー最大誤差角は約+0.35deg、ロール最大誤差角は約+1.0degであった。

(b) M34モータ燃焼中ロール制御

SJによるM34モータ燃焼中のロール制御は、

X + 205.5 ~ X + 237秒：ロールハイ制御

X + 237 ~ X + 295秒：ロールハイ間引き制御

X + 295 ~ X + 306秒：ロールロー間引き制御

にて行われ、この間の制御動作は全て正常であった。

(c) M34 モーター燃焼後3軸制御

SJ による M34 モーター燃焼後の制御は、

X + 306 ~ X + 442 秒：3軸制御

X + 442 ~ X + 1257 秒：3軸間引き制御，熱対策BBQスピン X + 447 秒～

X + 1257 ~ X + 1261 秒：SJ 昇温

X + 1261 ~ X + 1291 秒：3軸制御（ファインモード）

X + 1291 ~ X + 1306 秒：スピニアップ（ロールハイ，レート制御）

X + 1306 ~ X + 1307.5 秒：SJ 休止（X + 1307 秒衛星分離）

X + 1307.5 ~ X + 1314 秒：デスピン（レート制御）

X + 1314 ~ X + 1401 秒：タンブル制御

X + 1401 ~ X + 1451 秒：3軸制御（ファインモード）

X + 1451 ~ X + 1461 秒：再スピニアップ（レート制御）

X + 1461 秒：SJ 制御終了

にて行われ，テレメータで見えている範囲では正常に動作した。

3.2.3.4. RG コマンド

RG コマンドを表3.2-4の通り受信した。

表3.2-4 RG コマンド

コマンド名	受信秒時 (sec)	受信コマンド (pulse)	プログラマ修正期間 (sec)
RC-1	X+ 72.2	P-1	X+105.1~X+151.1
	X+ 72.3~72.4	Y-2	
RC-2	X+166.2~167.1	P+8	受信直後~X+312.1
	X+166.3~169.8	Y-52	

(注意) 受信コマンドの重みは，RC-1~2 共通で0.1deg/pulse

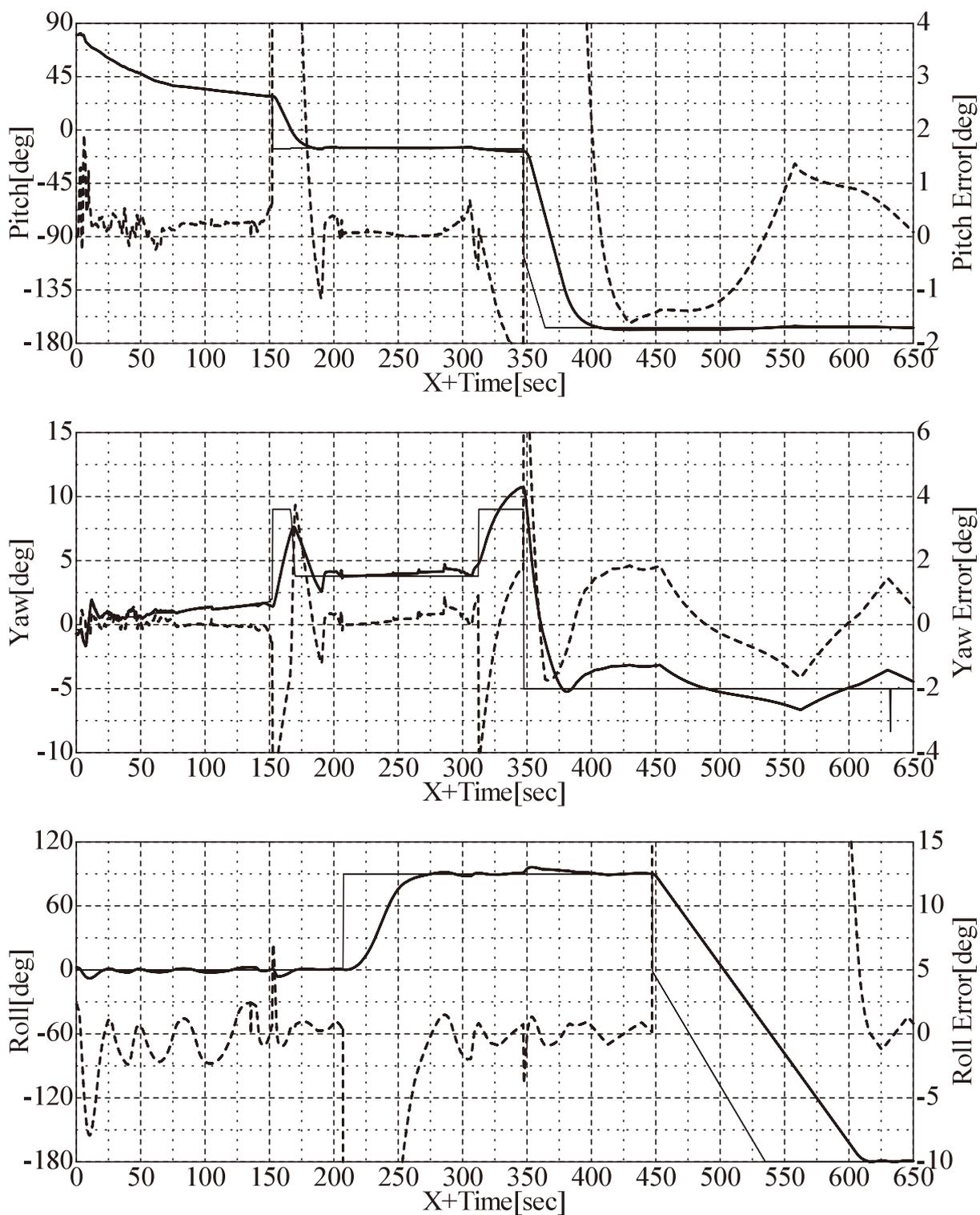
3.2.4. 飛翔データ

3.2.4.1. 姿勢制御機能

図3.2-1に飛翔時の機体姿勢角と姿勢制御目標角，姿勢誤差角の履歴を示す。ピッチ，ヨー，ロール軸の全てが，姿勢制御目標角に正しく追従しており，INGの姿勢制御機能が正しく動作していたことがわかる。

3.2.4.2. 航法機能

INGの位置の計測誤差を，地上の追跡レーダのデータを基準として評価した結果を図3.2-2に示す（G-系）。誤差の要因としては，初期姿勢角誤差あるいは加速度計スケールファクタ誤差が考えられる。



(太実線：姿勢角，細実線：姿勢目標角，太点線：姿勢誤差角)

図3.2-1 機体姿勢角，誤差角履歴

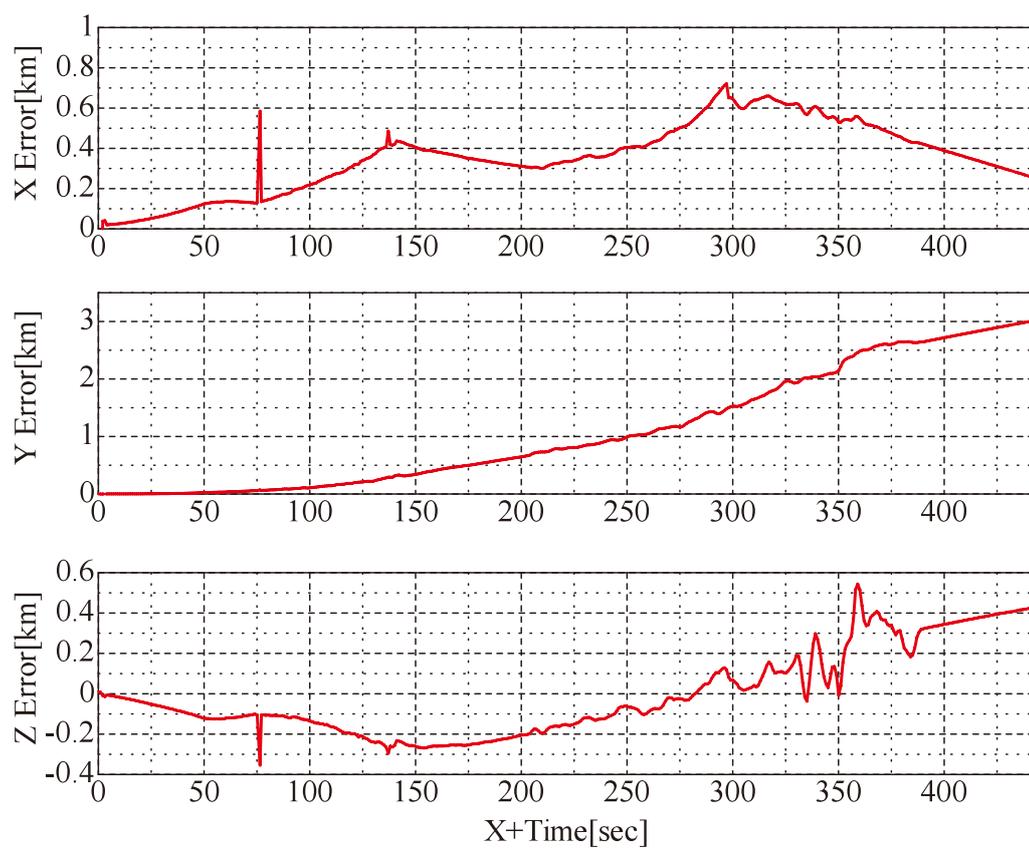


図3.2-2 ING位置誤差（レーダとの比較）

3.3. M-V-8号機飛翔結果

3.3.1. 概要

INGは発射前および飛翔中を通し正常に動作し、ロケットを衛星打ち出し方向に姿勢制御することができた。INGタイムシーケンスおよび設定した姿勢プログラマを表3.3-2、表3.3-3に示す。

3.3.2. 初期設定

3.3.2.1. ランチャ設定角

ランチャ設定は次の通りであった。

AZM=142.97deg, ELV=81.51deg

3.3.2.2. ING初期姿勢角

表3.3-1にING-ランチャ角度読合せデータを示す。

表3.3-1 ING-ランチャ角度読合せデータ

実施日	No.	ランチャ設定角 [deg]	ING 上下角 [deg]	ING ロール角 [deg]
フライト当日 (2006.2.22)	1	78	77.900	-1.114
	2	80	79.931	-1.348
	3	82	81.940	-1.721
	4	83	82.940	-1.956
	5	84	83.948	-2.282
発射角設定	6	81.5	81.436	-1.603

これより、方位角補正値を $\Delta AZM = -1.651\text{deg}$ とした。

表3.3-2 INGタイムシーケンス

X-time	Bnt+	SEQ1 2	ACT	EMV1	EMV2	SJ	ANT	タイム	備考	RG受信	RG修正	A3	A4	M14 ゼロ	B1SMRC オフ	M25	B2SMRC	SMSJ	M34	SJ	
-48.0	00 01	00	00	00	00 00	0		● NAVスタート													
-30.0	01 02	11	11					○ B1制御計算開始 SID=1													
-15.0								○ 駆動子チェック用プログラマ (SPGG点火)			No Action	No Action									
-13.0		12-13						○ 駆動子チェック用コマンドリミッタ							mx=1.4	nf=0					
-10.0		14-15						○ 駆動子チェック終了							mx=0						
0.0						1		○ (第1段点火)													
3.0		16-17	12					○ M14MNTVC.B1SMRC制御開始 (B1SMRC点火)	No Action	No Action											
5.0	01 03							○ A3 A4受信モード 1-1 (コマンドA2-A4アーマーミング)						mx=8V							
8.0		18-19						○ BITVCコマンドリミッタ変更													
20.0						2										ゼロ	オフ	オフ	ゼロ	オフ	
25.0		29																			
35.0		39										SMRC 停止 (1-1)									
40.0		49												mx=10V		オン					
45.0		59																			
50.0		69																			
55.0		79																			
63.0	01 04									63											
65.0		89																			
72.0						3															
74.0	B2T + 0	02 01						● B2CONTスタート													
74.5	0.5	02 02						M14MNTVC.B1SMRC制御終了													
74.6	0.6	02 03						1-2段分離処理(ST/CT=1)													
74.7	0.7	02 04						1-2段分離処理(B1COMP=0)													
75.0	1.0	02 05	00	00	00			○ ステージID 1-2 (第2段点火)													
75.5								○ A3 A4受信モード 2-1													
75.7	1.7	02 06	11	11				○ (B2SMRC点火)													
77.5	3.5	12-13						M25MNTVC.B2SMRC制御開始								mx=10V					
80.0	6.0	23																			
85.0	21.0	33																			
105.0	31.0	02 07								105				コマンド ホールド	オフ		オン				
115.0	41.0	43								125											
125.0	51.0	02 08																			
135.0	61.0	53																			
139.0	65.0	02 09						○ (SMSJ点火)													
139.5	65.5	02 0A			11			A3 A4受信モード 2-2													
150.0					4			B2SMRC終了、SMSJ制御開始													
151.0	77.0	02 0B								151											
151.0	77.0	02 0B						第2回RG受信開始													
152.0	78.0	02 0C			21			第2回RG修正開始													
152.0	78.0	02 0C			21			M25MNTVC終了、SMSJ再起動													
152.0	78.0	02 0C			21			A3 A4受信モード 2-3													
186.0								○ (NFI閉鎖)													
190.0	118.0				31																
192.0	118.0	02 0D																			
192.0	118.0	02 0D						第2回RG受信終了													
195.0	B3T + 0	03 01						● B3CONTスタート													
199.0																					
199.5	4.5	03 02						SMSJ制御終了													
199.6	4.6	03 03						2-3段分離処理(ST/CT=1)													
199.7	4.7	03 04						2-3段分離処理(B2COMP=0)													
200.0	5.0	03 05	00	**	00	00 00		○ ステージID 2-3 (2-3段分離)													
201.0	6.0	03 06				01 01		SJ 3輪制御開始													3輪
203.0	8.0	03 07						M34MNTVCロック解除													
204.5	9.5	03 08	11			01 02		SJ休止、M34MNTVC制御計算開始													
205.0								○ (第3段点火)													
205.5	10.5	12-13				02 03		M34.SJローラH(間引き)制御開始													
207.0								(ローラ 90 deg)													
225.0	30.0	23																			
245.0	50.0	34-35						コマンドリミッタ 7V→10V													
265.0	70.0	45																			
267.0	72.0					03 04		SJローラLo(間引き)制御開始													
285.0	90.0	55																			
306.0	111.0					04 05		SJ 3輪制御													
312.0	117.0	03 09																			
313.0	118.0	03 0A						第3回RG修正開始													
315.0	120.0	03 0B						第3回RG受信開始													
316.0	123.0	03 0C						M34MNTVC制御終了													
318.0	123.0	03 0C						M34再ロック													
335.0	140.0	03 0D						第3回RG受信終了													
345.0	150.0					05 05		レフトスライディング用バチメータ切替													
347.0								レフトスライディング開始													
350.0																					
410.0	215.0	03 0E						M34 S/A OFF													
465.0	270.0					06 06		SJ昇進コマンド(465~469)													
469.0	274.0					07 07		3輪ファイナモード(469~499)													
499.0	304.0					08 08		SJスピニアップ(499~518)													
518.0	323.0					08 09		SJ休止													
519.0								○ (衛星分離)													
519.5	324.5					09 0A		SJスピンドル(519.5~524.7)													
520.0								○ デスピンドル点火													
524.7						0A 0B		3輪ファンブル(524.7~600)Pマヌーバ													
564.7								コンタミ回避マヌーバ													
600.0	405.0					0B 0B	7	ローラデッドハット=5°													
750.0								○ (ソーラーセイルSMT/GPU ON)													
880.0								ソーラーセイル放出に向けてPVX2-8開始													
890.0	695.0					0C 0B		RSAS実験(ローラ制御開始)36°/s													
897.0	702.0					0D 0B		PYデッドハット=50°													

表3.3-3 姿勢プログラマ (1/2)

No.	X+TIME [s]	Pitch [deg]	Yaw [deg]	Roll [deg]
1	-30.000	81.5022	-0.2991	0.00
2	-15.100	81.5022	-0.2991	0.00
3	-15.000	76.5022	-5.2991	0.00
4	-10.000	76.5022	-5.2991	0.00
5	-9.900	81.5022	-0.2991	0.00
6	3.000	81.5022	-0.2991	0.00
7	5.000	81.5022	-1.4956	0.00
8	7.000	78.2426	-0.8411	0.00
9	11.000	74.0355	3.6740	0.00
10	17.000	67.8330	5.9533	0.00
11	23.000	64.5363	7.7290	0.00
12	29.000	62.3427	10.3796	0.00
13	35.000	60.5754	12.0283	0.00
14	41.000	58.5762	14.5169	0.00
15	50.000	53.4310	13.2938	0.00
16	60.000	47.8470	14.9853	0.00
17	75.000	45.2337	16.2956	0.00
18	80.000	43.4785	15.6312	0.00
19	85.000	45.7733	26.0633	0.00
20	90.000	48.5922	33.2821	0.00
21	95.000	49.8840	36.9044	0.00
22	100.000	50.6445	39.2827	0.00
23	105.000	50.2764	40.3629	0.00
24	110.000	49.0051	40.5286	0.00
25	115.000	47.1970	40.0835	0.00
26	120.000	45.1821	39.2657	0.00
27	125.000	43.1985	38.2732	0.00
28	130.000	41.3780	37.254	0.00
29	135.000	39.7735	36.3077	0.00
30	140.000	38.3263	35.4083	0.00
31	145.000	37.0506	34.6941	0.00
32	151.000	35.7480	34.1881	0.00
33	152.400	35.7480	34.1881	0.00
34	152.500	-21.1076	49.1807	0.00
35	205.000	-21.1076	49.1807	0.00
36	207.000	-21.1076	49.1807	0.00
37	207.100	-21.1076	49.1807	90.00
38	309.000	-21.1076	49.1807	90.00
39	347.000	-21.1076	49.1807	90.00
40	347.100	-162.0000	-42.0000	90.00
41	465.000	-162.0000	-42.0000	90.00

表3.3-3 姿勢プログラマ (2/2)

No.	X+TIME [s]	Pitch [deg]	Yaw [deg]	Roll [deg]
42	465.100	-162.0000	-42.0000	110.00
43	466.000	-162.0000	-42.0000	110.00
44	466.100	-162.0000	-42.0000	70.00
45	467.000	-162.0000	-42.0000	70.00
46	467.100	-162.0000	-42.0000	110.00
47	468.000	-162.0000	-42.0000	110.00
48	468.100	-162.0000	-42.0000	70.00
49	469.000	-162.0000	-42.0000	70.00
50	469.100	-162.0000	-42.0000	90.00
51	499.000	-162.0000	-42.0000	90.00
52	499.100	-162.0000	-42.0000	90.00
53	519.500	-162.0000	-42.0000	90.00
54	519.600	-162.0000	-42.0000	90.00
55	524.700	-162.0000	-42.0000	90.00
56	524.800	-124.0000	-35.0000	180.00
57	534.400	-79.0000	-7.0000	180.00
58	564.700	-79.0000	-7.0000	180.00
59	564.800	-57.0000	-28.0000	180.00
60	573.600	3.0000	-49.0000	180.00
61	750.000	3.0000	-49.0000	180.00
62	750.100	103.0000	-35.0000	0.00
63	761.000	103.0000	-35.0000	0.00
64	890.000	103.0000	-35.0000	0.00
65	897.000	103.0000	-35.0000	0.00
66	940.000	103.0000	-35.0000	0.00
67	950.000	103.0000	-35.0000	0.00
68	950.100	103.0000	-35.0000	10.00
69	1050.000	103.0000	-35.0000	10.00
70	1050.100	103.0000	-35.0000	120.00
71	1400.000	103.0000	-35.0000	120.00
72	1700.000	65.5800	-44.5500	95.47
73	2000.000	24.5900	-40.9800	71.57
74	2300.000	-8.2200	-27.5900	57.22
75	2600.000	-34.1800	-10.1600	53.20
76	2900.000	-58.7200	7.2300	57.16
77	3200.000	-86.2100	21.1600	68.68
78	4700.000	-86.2100	21.1600	91.18
79	5100.000	-86.2100	21.1600	91.18
80	5100.100	-86.2100	21.1600	91.18
81	5140.000	-86.2100	21.1600	91.18

3.3.3. 飛翔結果概要

3.3.3.1. 第1段ステージ

(1) M14TVC

M14TVCによるピッチ/ヨー制御はX + 3秒からX + 74.5秒まで行われ、この間の制御動作は全て正常であった。制御中の姿勢角誤差はX + 3秒付近で最大（ピッチ約+1.62deg）となり、その後は±0.7deg程度の誤差範囲で推移した。

(2) B1SMRC

B1SMRCによるロール制御はX + 3秒からX + 74.5秒まで行われ、この間の制御動作は全て正常であった。制御中のロール誤差角は、X + 24秒付近で最大（約+3.8deg）となったが、X + 28秒付近でデッドバンド（±3.0deg）に収束し、その後はデッドバンド内を推移した。

3.3.3.2. 第2段ステージ

(1) M25TVC

M25TVCによるピッチ/ヨー制御はX + 75.6秒からX + 152秒まで行われ、この間の制御動作は全て正常であった。制御中の誤差角はピッチの最大はX + 152秒付近で約-0.4deg程度、ヨーの最大はX + 80秒付近で約-1.2deg程度であった。

(2) B2SMRC

B2SMRCによるロール制御はX + 75.6秒からX + 139.5秒まで行われ、この間の制御動作は全て正常であった。制御中のロール誤差角はX + 120秒付近で最大（約+3.2deg）となったが、その後はデッドバンド（±2.5deg）内を推移した。

(3) SMSJ

SMSJによる3軸制御はX + 139.5秒からX + 199.5秒まで行われた。リファレンスチェンジ（X + 152.5秒）後のオーバシュートも小さく制御は正常であった。

3.3.3.3. 第3段ステージ

(1) M34TVC

M34TVCによるピッチ/ヨー制御はX + 204.5秒からX + 315秒まで行われた。制御中の誤差角はM34モータ点火時、ピッチで約-0.2deg、ヨーで約+0.8degとなったが、その後はピッチ/ヨー共に±0.1degの範囲で推移した。なお、姿勢角誤差の最大は燃焼末期（X + 315秒）でピッチ約-0.7deg、ヨー約-2.0degであった。

(2) SJ

(a) M34モータ燃焼前3軸制御

SJによるM34モータ燃焼前の3軸制御はX + 201秒からX + 204.5秒まで行われ、この間の制御動作は全て正常であった。制御中のピッチ最大誤差角は約+0.4deg、ヨー最大誤差角は約-0.3deg、ロール最大誤差角は約+0.7degであった。

(b) M34モータ燃焼中ロール制御

SJによるM34モータ燃焼中のロール制御は、

X + 205.5 ~ X + 267秒：ロールハイ間引き制御

X + 267 ~ X + 306秒：ロールロー間引き制御

にて行われ、この間の制御動作は全て正常であった。X + 207秒のロール90degマヌーバも正常であった。

(c) M34 モーター燃焼後3軸制御

SJによるM34モーター燃焼後の制御は、X + 306 ~ X + 5140秒にて行われ、テレメータで見えている範囲（480秒付近まで）では正常に動作した。X + 347秒のリファレンスチェンジも正常であった。

3.3.3.4. RG コマンド

RGコマンドを表3.3-4の通り受信した。

表3.3-4 RG コマンド

コマンド名	受信秒時 (sec)	受信コマンド (pulse)	プログラマ修正期間 (sec)
RC-1	X+ 72.3	P-1	X+105~X+151
	X+ 72.3	Y-1	X+105~X+151
RC-2	X+166.3~166.7	P-5	受信直後~X+312
	X+166.3~166.6	Y-3	受信直後~X+312

(注意) 受信コマンドの重みは、RC-1~2 共通で0.1deg/pulse

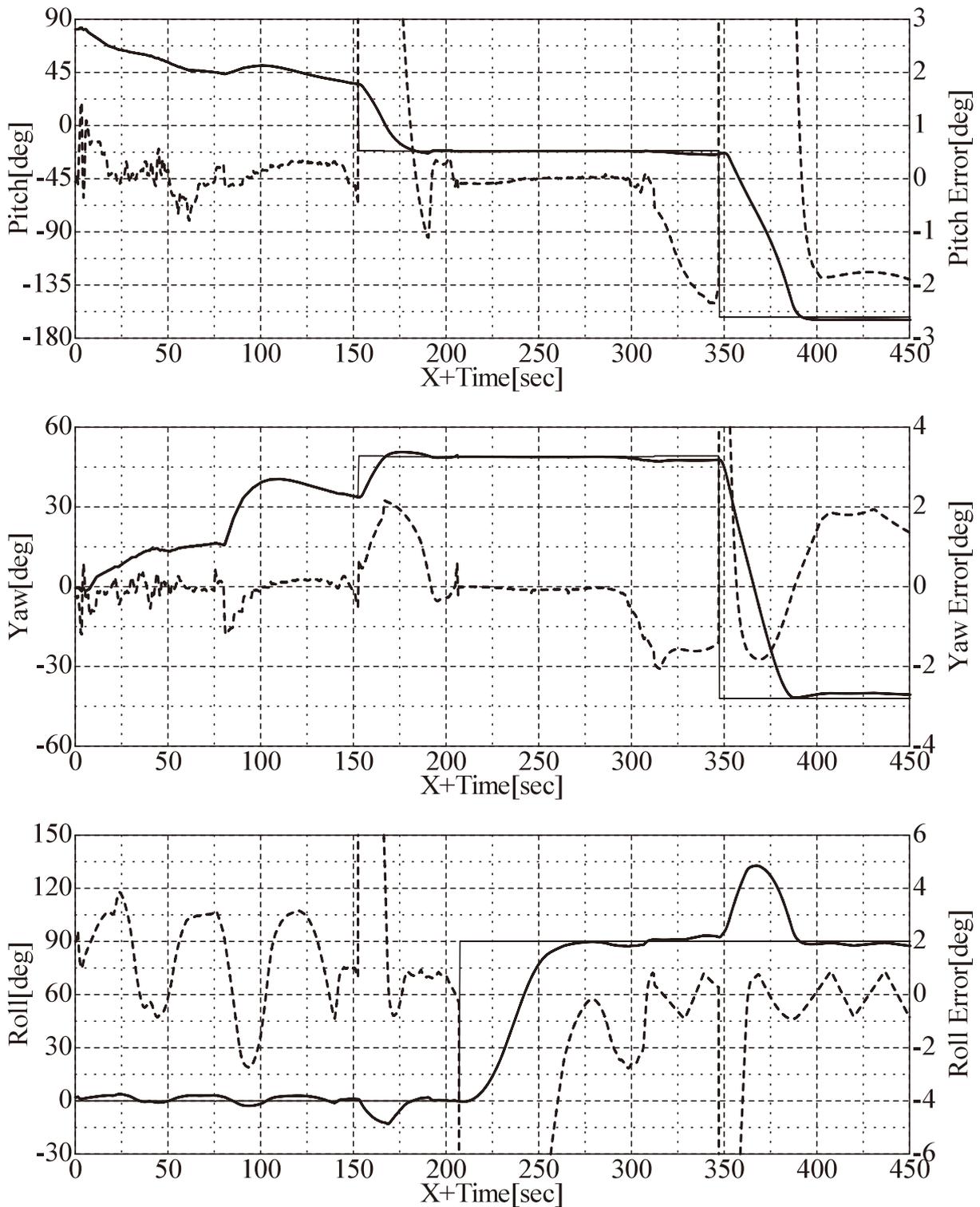
3.3.4. 飛翔データ

3.3.4.1. 姿勢制御機能

図3.3-1に飛翔時の機体姿勢角と姿勢制御目標角、姿勢誤差角の履歴を示す。ピッチ、ヨー、ロール軸の全てが、姿勢制御目標角に正しく追従しており、INGの姿勢制御機能が正しく動作していたことがわかる。

3.3.4.2. 航法機能

INGの位置誤差および速度誤差を、地上の追跡レーダのデータを基準として評価した結果を図3.3-2,図3.3-3に示す (G-系)。コースティング中の速度誤差は一定であり、主に加速中に誤差が増大している。したがって、初期姿勢角誤差あるいは加速度計スケールファクタ誤差が主要因である可能性が高い。スケールファクタ誤差と方位角誤差の推定を行い、スケールファクタ誤差0.4%、方位角誤差0.3% (約0.2度) を補正した位置誤差および速度誤差を図3.3-4、図3.3-5に示す。



(太実線：姿勢角，細実線：姿勢目標角，太点線：姿勢誤差角)

図3.3-1 機体姿勢角，誤差角履歴

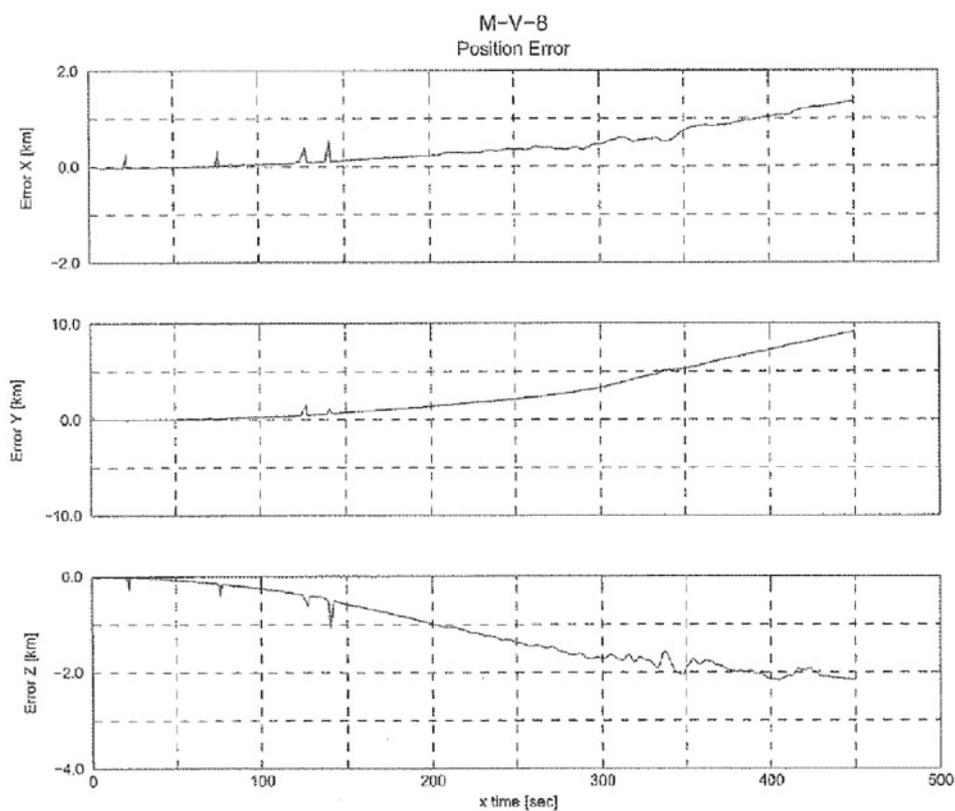


図3.3-2 ING位置誤差（レーダとの比較）

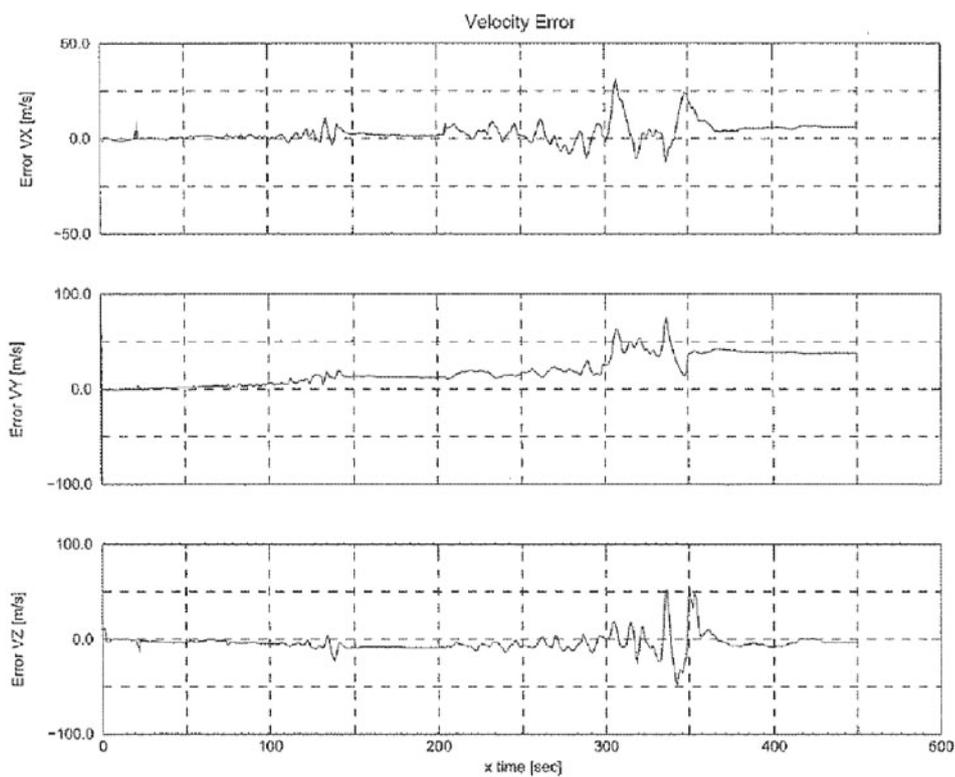


図3.3-3 ING速度誤差（レーダとの比較）

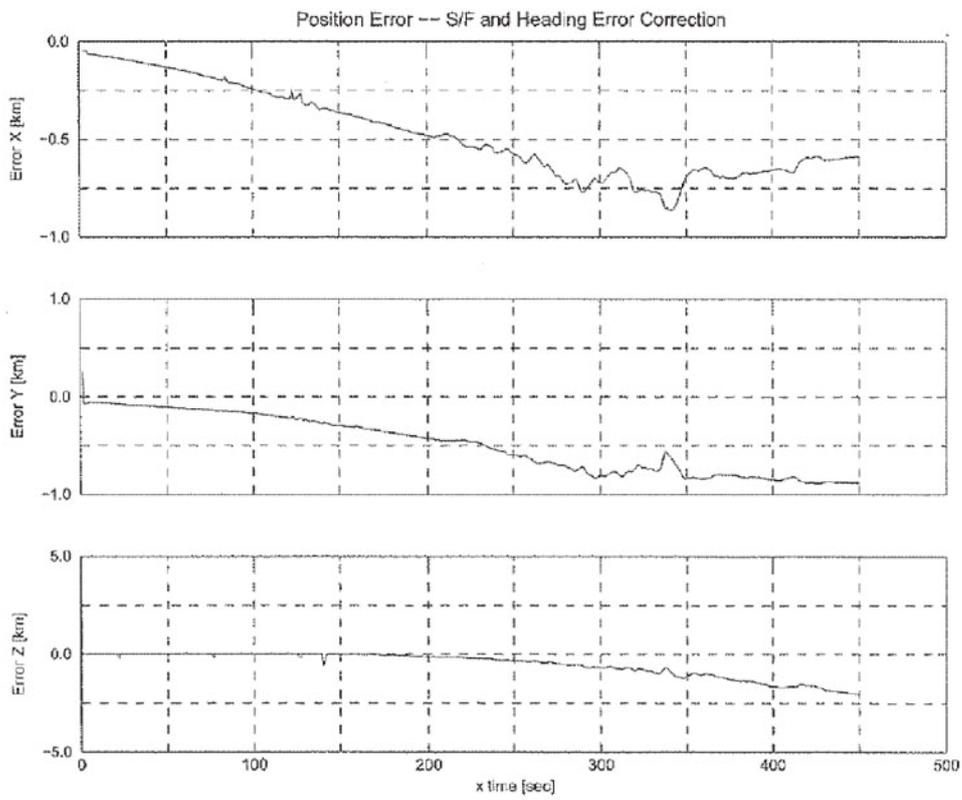


図3.3-4 補正後のING位置誤差（レーダとの比較）

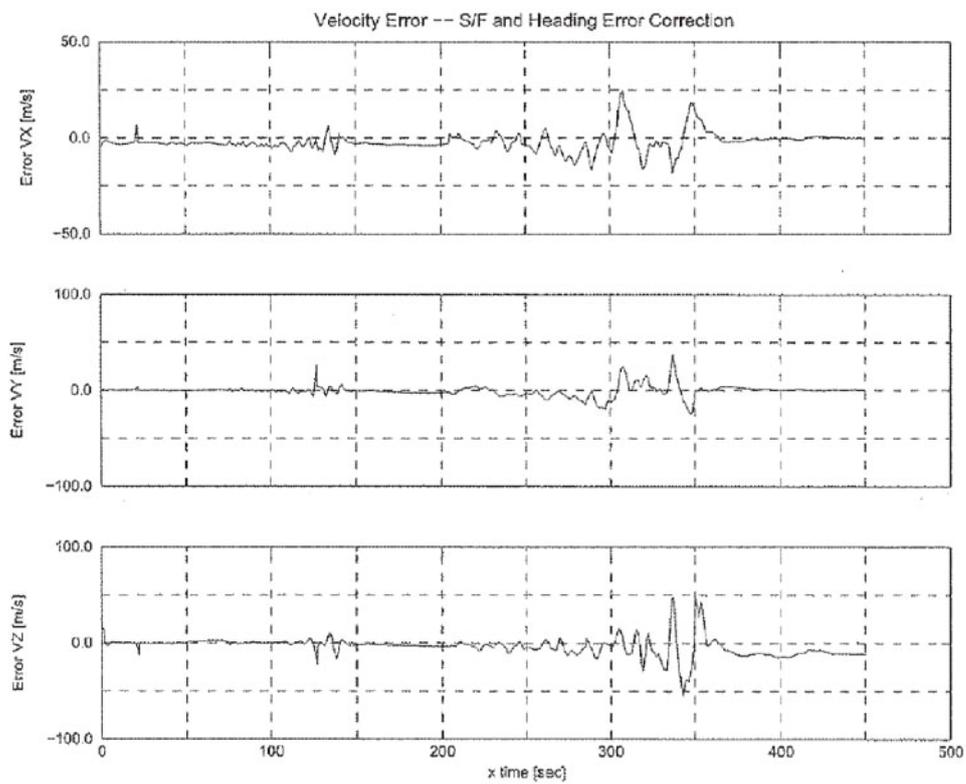


図3.3-5 補正後のING速度誤差（レーダとの比較）

3.4. M-V-7号機飛翔結果

3.4.1. 概要

INGは発射前および飛翔中を通し正常に動作し、ロケットを衛星打ち出し方向に姿勢制御することができた。INGタイムシーケンスおよび設定した姿勢プログラマを表3.4-2、表3.4-3に示す。

3.4.2. 初期設定

3.4.2.1. ランチャ設定角

ランチャ設定は次の通りであった。

AZM= 149.27deg, ELV=82.01deg

3.4.2.2. ING初期姿勢角

表3.4-1にING-ランチャ角度読合せデータを示す。

表3.4-1 ING-ランチャ角度読合せデータ

実施日	No.	ランチャ設定角 [deg]	ING 上下角 [deg]	ING ロール角 [deg]
フライト当日 (2006.9.23)	1	78.00	77.878	-0.727
	2	80.00	79.911	-0.897
	3	81.00	80.918	-0.998
	4	83.00	82.925	-1.261
	5	84.01	83.934	-1.523
発射角設定	6	82.01	81.923	-1.135

これより、方位角補正値を Δ AZM= -1.167degとした。

表3.4-2 INGタイムシーケンス

X-time	BnT+	SEQ1.2	ACT	EMV1	EMV2	SJ	ANT	タイマ	備考	RG受信	RG修正	A3	A4	M14	B1SMRC	M25	B2SMRC	SMSJ	M34	SJ
-48.0		00 01	00	00	00	00 00	0		● NAVスタート	No Action	No Action	No Action	No Action	ゼロ	オフ	ゼロ	オフ	オフ	ゼロ	オフ
-30.0		01 01						○ B1制御計算開始 SID=1												
-15.0		01 02	11	11				○ 駆動チェック用プログラマ (SPGG点火)												
-13.0			12-13					○ 駆動チェック用コマンドリミッタ												
-10.0			14-15					○ 駆動チェック終了												
0.0						1		○ (第1段点火)												
3.0			16-17	12				○ M14MNTVC,B1SMRC制御開始 (B1SMRC点火)												
5.0		01 03						○ A3,A4受信モード 1-1 (コマンドA2-A4アームング)												
8.0			18-19					○ BITVCコマンドリミッタ変更												
21.0						2														
25.0			29																	
35.0			39																	
40.0			49																	
45.0			59																	
50.0			69																	
55.0			79																	
63.0		01 04						第1回RG受信開始	63	第1回 受付	105	125	コマンド'ホールド'	オフ	mx=10V	オン	mx=8V	オン	オン	
65.0			89																	
73.0						3														
74.0	B2T+0	02 01						● B2CONTスタート												
74.5		05 02 02						○ M14MNTVC,B1SMRC制御終了												
74.6		06 02 03						○ 1-2段分離処理(ST/CT=1)												
74.7		07 02 04						○ 1-2段分離処理(B1COMP=0)												
75.0		02 05	00	00	00			○ ステージID 1-2 (第2段点火)												
75.5								○ A3,A4受信モード 2-1 (B2SMRC点火)												
75.7		02 06	11	11				○ M25MNTVC,B2SMRC制御開始												
77.5			12-13																	
80.0			23																	
95.0			33																	
105.0		02 07						第1回RG修正開始												
115.0			43																	
125.0		02 08						第1回RG受信終了												
135.0			53																	
139.0		02 09						○ (SMSJ点火)												
139.5		02 0A						○ A3,A4受信モード 2-2												
139.5		02 0A		11				○ B2SMRC終了, SMSJ制御開始												
151.0		02 0B				4		第2回RG受信開始												
151.0		02 0B						第2回RG修正開始												
152.0		02 0C			21			○ M25MNTVC終了, SMSJ再起動												
186.0								○ (NF開膜)												
190.0					31															
192.0		02 0D						第2回RG受信終了												
195.0	B3T+0	03 01						● B3CONTスタート												
195.5		03 02						○ SMSJ制御終了												
195.5		03 03						○ 2-3段分離処理(ST/CT=1)												
195.6		03 03						○ 2-3段分離処理(B2COMP=0)												
195.7		03 04						○ ステージID 2-3(2-3段分離)												
200.0		03 05	00	**	00	00 00		○												
201.0		03 06				01 01	5	○ SJ 3軸制御開始												
203.0		03 07						○ M34MNTVCロック解除												
204.5		03 08	11			01 02		○ SJ休止, M34MNTVC制御計算開始												
205.0								○ (第3段点火)												
205.5		10.5	12-13			02 03		○ M34,SJローLHi(間引き)制御開始												
225.0		30.0	23																	
245.0		50.0	34-35					○ コマンドリミッタ 7V~10V												
265.0		70.0	45																	
267.0		72.0				03 04		○ SJローLHi(間引き)制御開始												
285.0		90.0	55																	
306.0		111.0				04 05		○ SJ 3軸制御												
315.0		120.0	03 09					○ M34MNTVC制御終了												
316.0		121.0	03 0A					第3回RG修正開始												
317.0		122.0	03 0B					第3回RG受信開始												
335.0		140.0	03 0C					第3回RG受信終了												
345.0		150.0				05 05		○ レッスルスイッチ用パラメータ切替												
351.0							6													
397.0		202.0	03 0D					○ M34再ロック												
410.0							7													
425.0		230.0	03 0E					○ M34 S/A OFF												
456.0		261.0				06 06		○ SJ昇温コマンド(456~460)												
460.0		265.0				07 07		○ 3軸ファインモード(460~509.5)												
509.5		314.5				07 08		○ SJ休止												
510.0								○ (衛星分離)												
511.0		316.0				08 09		○ 3軸タンブル(511~710)マヌーバ												
710.0		515.0				09 09		○ HITSAT用PYRマヌーバ(710~810)												
810.0		615.0				0A 09		○ 3軸ファインモード(810~840)												
840.0		645.0				0B 09		○ HITSAT用撮影用マヌーバ(840~890)												
850.0							8													
890.0		695.0				0C 09		○ 3軸ファインモード(890~950)												
950.0		755.0				0D 09		○ SSSAT用PYRマヌーバ(950~980)												
960.0							9													
980.0		785.0				0E 09		○ 3軸ファインモード(980~1500)												
1260.0							10													
1330.0							11													
1380.0							12													
1500.0		1305.0				0F 09		○ De-orbit用マヌーバ												
1660.0		1465.0				10 09														
1900.0		1705.0				11 0A		○ 待機モード(間引き制御開始)												
4600.0		4405.0				12 0B		○ 3軸ファインモード(4600~5000)												
4680.0							13													
4830.0							14													
5000.0		4805.0				13 0C		○ SJスピニアップ(5000~5040)=30°/s												
5040.0		4845.0	03 0F					○ SJ制御終了												

表3.4-3 姿勢プログラマ (1/3)

No.	X+TIME [s]	Pitch [deg]	Yaw [deg]	Roll [deg]
1	-30.000	82.0000	-0.1000	0
2	-15.100	82.0000	-0.1000	0
3	-15.000	77.0000	-5.1000	0
4	-10.000	77.0000	-5.1000	0
5	-9.900	82.0000	-0.1000	0
6	3.000	82.0000	-0.1000	0
7	5.000	82.0000	-0.5000	0
8	7.000	78.1414	-0.4722	0
9	11.000	73.9746	-0.9369	0
10	17.000	67.4971	-1.3808	0
11	23.000	63.1622	-1.7535	0
12	29.000	59.0460	0.1171	0
13	35.000	56.6715	1.9553	0
14	41.000	52.9353	2.3361	0
15	50.000	48.6962	1.0386	0
16	60.000	44.0990	-1.6155	0
17	75.000	41.1737	0.5059	0
18	80.000	39.0591	-0.5701	0
19	85.000	39.1868	15.7475	0
20	90.000	41.6061	26.4275	0
21	95.000	45.3020	33.7150	0
22	100.000	46.7926	36.8480	0
23	105.000	46.7468	37.8473	0
24	110.000	45.4392	37.4285	0
25	115.000	43.4162	36.1064	0
26	120.000	41.1597	34.2649	0
27	125.000	38.9898	32.2181	0
28	130.000	37.0592	30.1991	0
29	135.000	35.4111	28.3610	0
30	140.000	33.9644	26.6493	0
31	145.000	32.7270	25.2835	0
32	150.000	31.6781	24.3667	0
33	152.400	31.6781	24.3667	0
34	152.500	-19.0881	47.0327	90
35	205.000	-19.0881	47.0327	90
36	207.000	-19.0881	47.0327	90
37	207.100	-19.0881	47.0327	90

表3.4-3 姿勢プログラマ (2/3)

No.	X+TIME [s]	Pitch [deg]	Yaw [deg]	Roll [deg]
38	311.000	-19.0881	47.0327	90
39	347.000	-19.0881	47.0327	90
40	347.100	-19.0881	47.0327	90
41	456.000	-19.0881	47.0327	90
42	456.100	-19.0881	47.0327	110
43	457.000	-19.0881	47.0327	110
44	457.100	-19.0881	47.0327	70
45	458.000	-19.0881	47.0327	70
46	458.100	-19.0881	47.0327	110
47	459.000	-19.0881	47.0327	110
48	459.100	-19.0881	47.0327	70
49	460.000	-19.0881	47.0327	70
50	460.100	-19.0881	47.0327	90
51	511.000	-19.0881	47.0327	90
52	511.100	-59.0000	39.0000	90
53	525.300	-102.0000	7.0000	90
54	551.000	-102.0000	7.0000	90
55	551.100	-80.0000	-13.0000	90
56	569.500	8.0000	-43.0000	90
57	750.000	8.0000	-43.0000	90
58	750.100	115.0000	-50.0000	32
59	840.000	115.0000	-50.0000	32
60	840.100	115.0000	-50.0000	2
61	866.000	115.0000	-50.0000	-128
62	950.000	115.0000	-50.0000	-128
63	950.100	122.0000	-24.0000	-108
64	960.000	122.0000	-24.0000	59
65	1500.000	122.0000	-24.0000	59
66	1500.100	23.0000	-5.0000	59
67	1525.000	22.0000	-4.0000	59
68	1525.100	162.0000	-4.0000	59
69	1542.000	161.0000	-3.0000	59
70	1542.100	30.0000	-3.0000	59
71	1600.000	30.0000	-1.0000	59
72	1600.100	85.0000	-1.0000	59
73	1640.000	85.0000	0.0000	59
74	1640.100	85.0000	0.0000	59

表3.4-3 姿勢プログラマ (3/3)

No.	X+TIME [s]	Pitch [deg]	Yaw [deg]	Roll [deg]
75	1660.000	85.0000	1.0000	59
76	1660.100	85.0000	1.0000	59
77	1800.000	78.0000	6.0000	59
78	1800.100	122.0000	-50.0000	141
79	1900.000	122.0000	-50.0000	141
80	1900.100	122.0000	-50.0000	51
81	2020.000	122.0000	-50.0000	-39
82	2650.000	122.0000	-50.0000	-39
83	2650.100	122.0000	-50.0000	51
84	2770.000	122.0000	-50.0000	141
85	3400.000	122.0000	-50.0000	141
86	3400.100	122.0000	-50.0000	231
87	3520.000	122.0000	-50.0000	321
88	4150.000	122.0000	-50.0000	321
89	4150.100	122.0000	-50.0000	231
90	4270.000	122.0000	-50.0000	141
91	5000.000	122.0000	-50.0000	141
92	5000.100	122.0000	-50.0000	141
93	5040.000	122.0000	-50.0000	141

3.4.3. 飛翔結果概要

3.4.3.1. 第1段ステージ

(1) M14TVC

M14TVCによるピッチ/ヨー制御はX + 3秒からX + 74.5秒まで行われ、この間の制御動作は全て正常であった。

(2) B1SMRC

B1SMRCによるロール制御はX + 3秒からX + 74.5秒まで行われ、この間の制御動作は全て正常であった。ランチャ離脱時の初期レートが従来号機より大きかったため、ロール角誤差はX + 17秒付近で-35deg程度となったが、X + 37秒付近でデッドバンド (±3.0deg) に収束し、その後はデッドバンド内を推移した。

3.4.3.2. 第2段ステージ

(1) M25TVC

M25TVCによるピッチ/ヨー制御はX + 75.6秒からX + 152秒まで行われ、この間の制御動作は全て正常であった。

(2) B2SMRC

B2SMRCによるロール制御はX + 75.6秒からX + 139.5秒まで行われ、この間の制御動作は全て正常であった。

(3) B2SMSJ

SMSJによる3軸制御はX + 139.5秒からX + 199.5秒まで行われた。X + 143秒付近で機体90deg位相のSMSJの安全弁が作動し、この部分の制御力が失われたものと推定されている。リファレンスチェンジ中にSMSJ推力アンバランスによる姿勢の乱れが生じたが、X + 170秒付近でデッドバンド内に収束し、その後はデッドバンド内を推移した。

3.4.3.3. 第3段ステージ

(1) M34TVC

M34TVCによるピッチ/ヨー制御はX + 204.5秒からX + 315秒まで行われ、この間の制御動作は全て正常であった。

(2) SJ

SJによる制御はX + 201 ~ X + 5040秒まで行われ、テレメータで見えている範囲では全て正常であった。

3.4.3.4. RG コマンド

RGコマンドを表3.4.4の通り受信した。

表3.4-4 RG コマンド

コマンド名	受信秒時 (sec)	受信コマンド (pulse)	プログラマ修正期間 (sec)
RC-1	X+72.3~72.5	P+4	X+105~X+151
	X+72.3	Y-1	X+105~X+151
RC-2	X+166.2~166.3	P-2	受信直後~X+316

(注意) 受信コマンドの重みは、RC-1~2 共通で0.1deg/pulse

3.4.4. 飛行データ

3.4.4.1. 姿勢制御機能

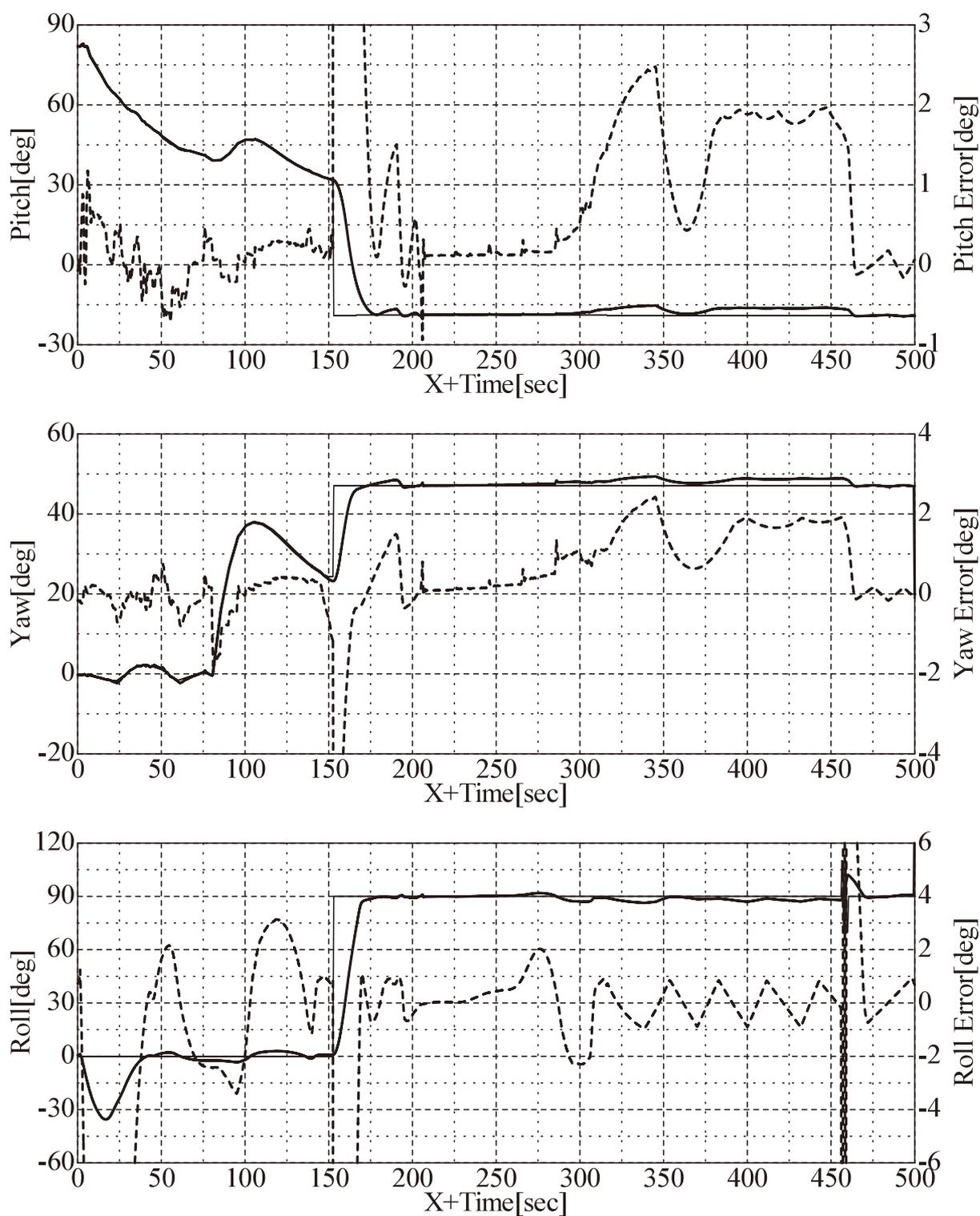
図に飛行時の機体姿勢角と姿勢制御目標角、姿勢誤差角の履歴を図3.4-1に示す。ピッチ、ヨー、ロール軸の全てが、姿勢制御目標角に正しく追従しており、INGの姿勢制御機能が正しく動作していたことがわかる。

3.4.4.2. 航法機能

レーダデータから計算したINGの位置、速度の誤差をそれぞれ図3.4-2、図3.4-3に示す。グラフにはNAV_STARTの遅れによるX - TIMEからING内部のX - TIMEの遅れ時間を、それぞれ0ms、80msとしたものをプロットしている。まず、方位角誤差の推定を行い、この誤差を補正した後での位置誤差、速度誤差をそれぞれ図3.4-4、図3.4-5に示す。

さらに誤差要因を詳細に調べるために、加速度計スケールファクタ誤差と加速度計バイアス誤差の推定を行った。加速度計のバイアスは2次での増加傾向を示す誤差要因であり、Pz方向の2次係数が比較的大きく500 μ G相当となっていた。2次のフィッティング後の残差を図3.4-6に示す。

誤差の発生要因は大きなものから方位角誤差、加速度計非直線性、加速度計バイアスとなっており、後二者については、加速度計のグレードアップにより改善可能である。また、現行の角度読み合わせ方式の方位角設定では、加速度計の性能向上により方位角誤差の低減も期待できる。したがって、IMUの加速度計の性能改善が航法精度向上に有効であると言える。



(太実線：姿勢角，細実線：姿勢目標角，太点線：姿勢誤差角)

図3.4-1 機体姿勢角，誤差角履歴

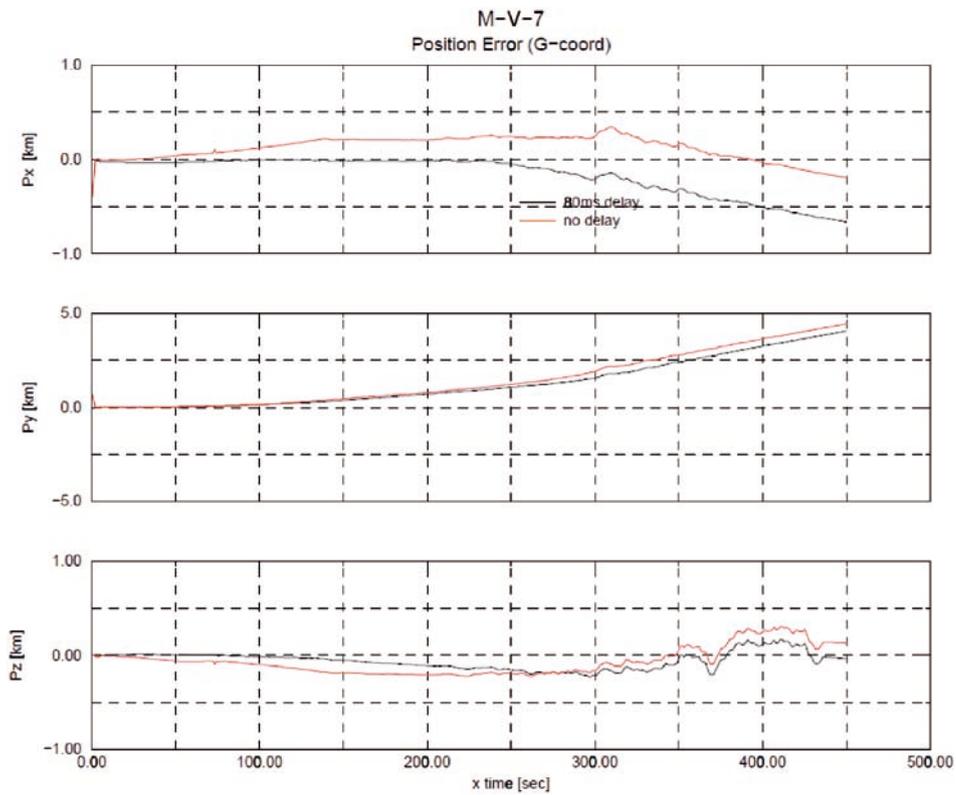


図3.4-2 ING位置誤差（レーダとの比較）

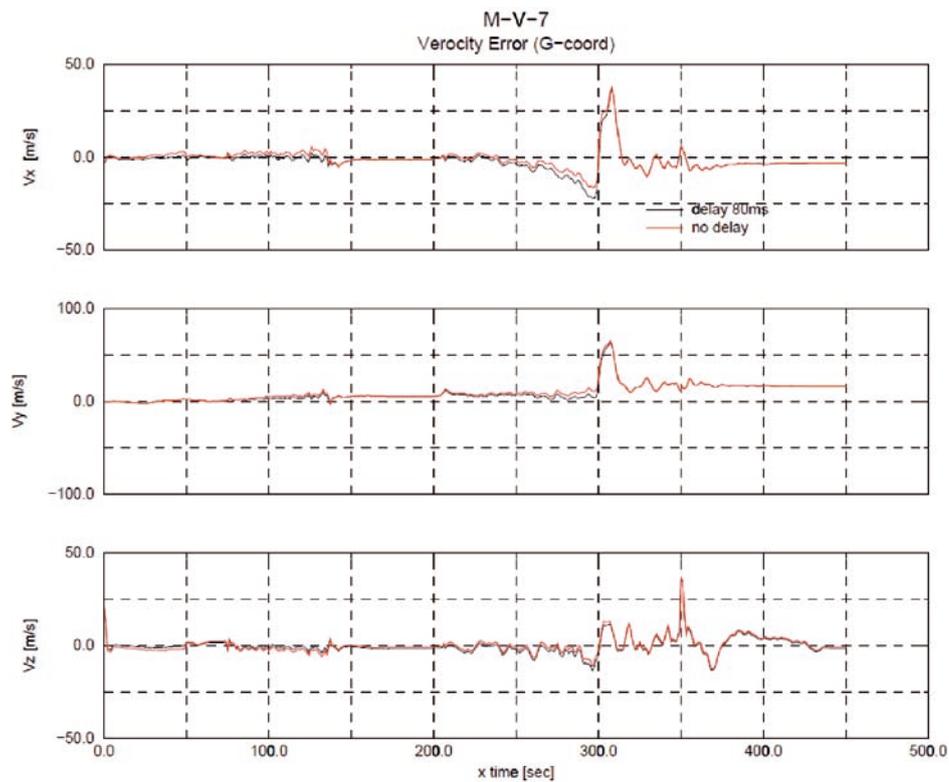


図3.4-3 ING速度誤差（レーダとの比較）

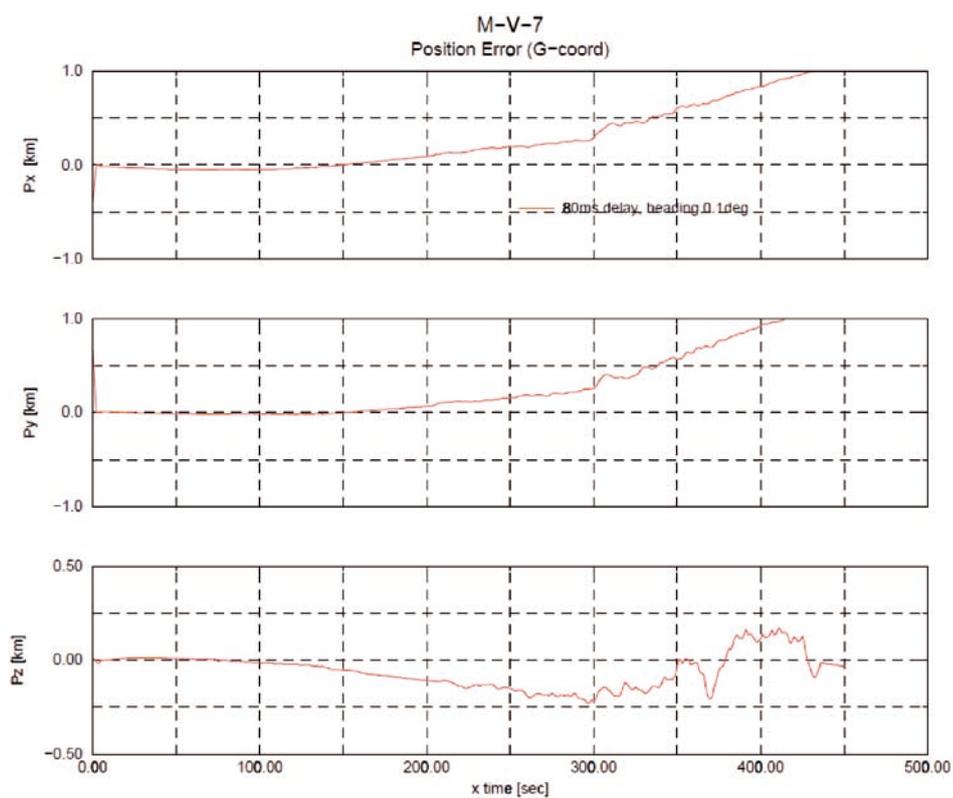


図3.4-4 方位角補正後のING位置誤差（レーダとの比較）

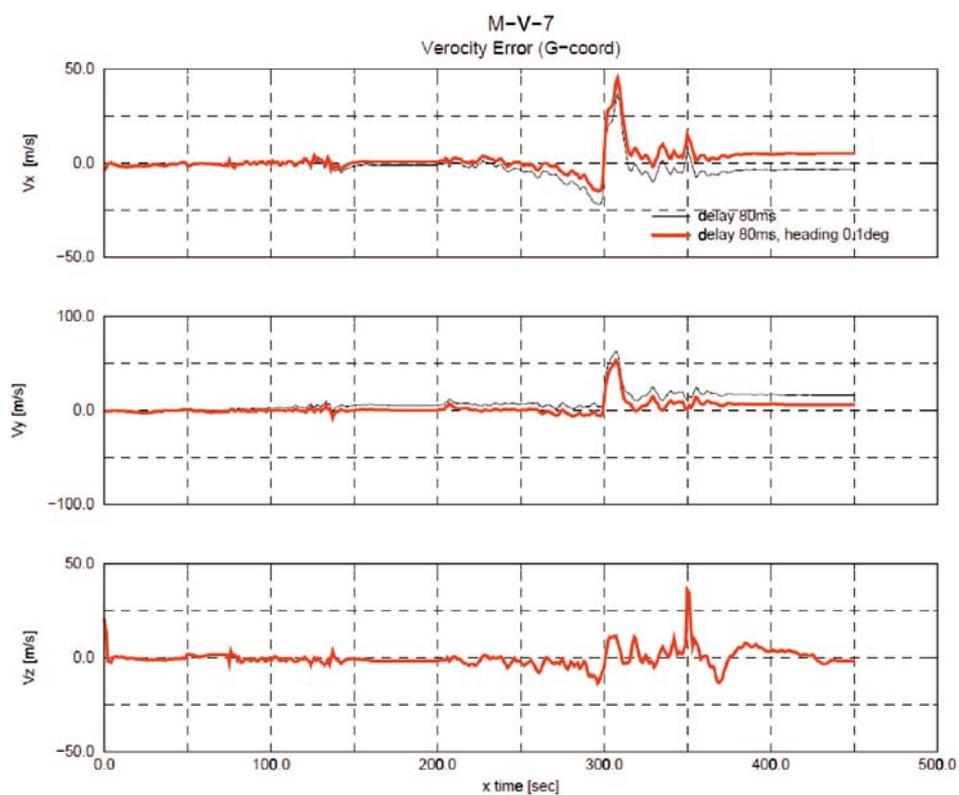


図3.4-5 方位角補正後のING速度誤差（レーダとの比較）

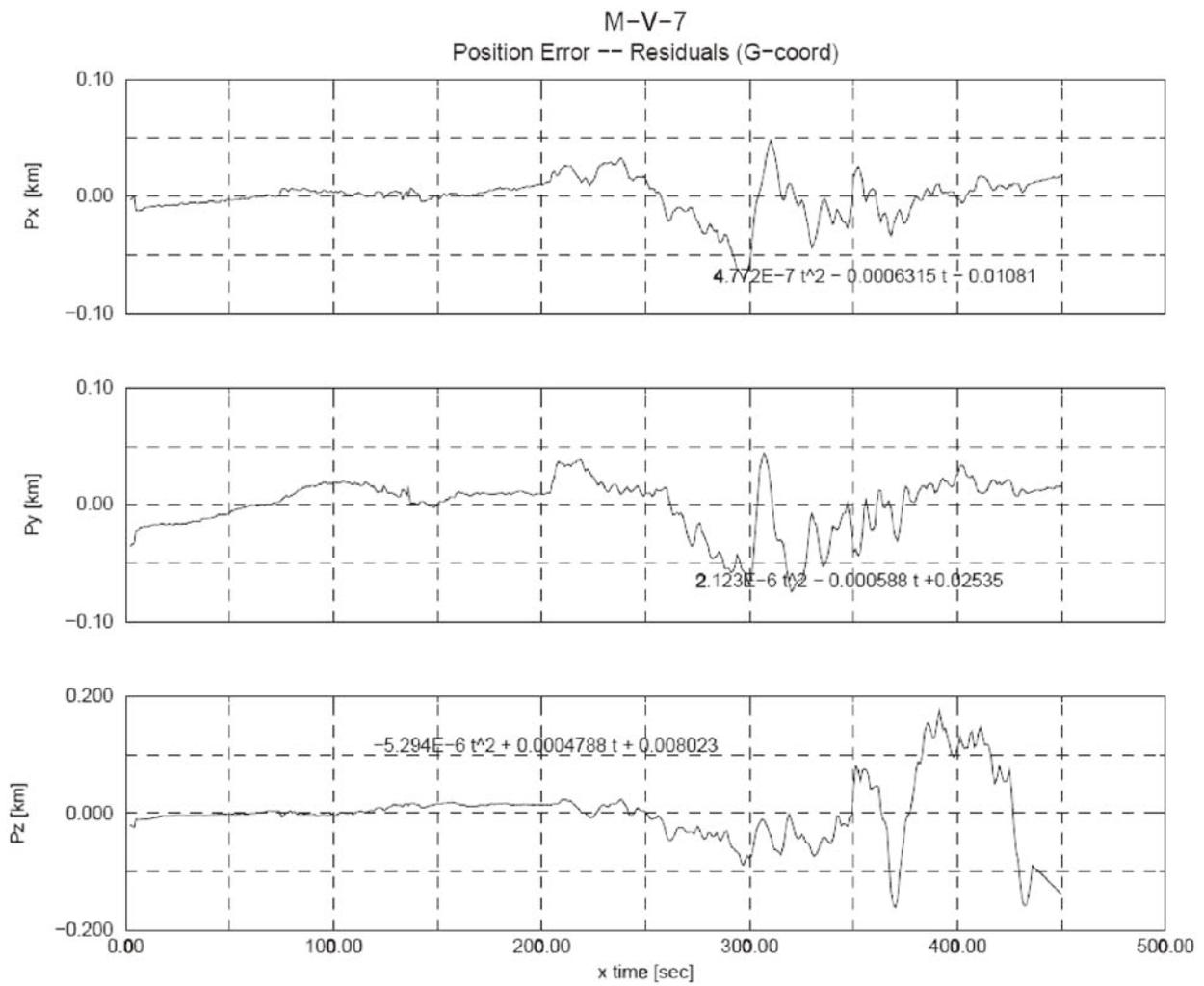


図3.4-6 ING位置誤差残差（レーダとの比較）

4. 次期固体ロケットへの反映事項

(1) 残したいところ

- ・ ソフトウェア/ハードウェア/運用の一体となった開発体制
 - － ハードの問題でもソフトでカバーできる場合がある
 - － ソフト/ハードを直さなくとも運用でカバーできる場合がある
- ・ 衛星毎に大きく異なるミッション設計をインプットデータで実現できているソフトウェアインタフェース
- ・ 1人が複数の役割をこなし、状況の変化にも柔軟に対応できる体制
- ・ 世界で初めて衛星打上げ用ロケットで実用化に成功したFOG技術

(2) 改善すべき点

- ・ センサ（加速度計， FOG）ウォームアップ時間の短縮
- ・ アライメント精度の向上
- ・ 航法精度（加速度計精度）の改善
- ・ パラメータ変更手順の自動化促進
- ・ 機体取付状態での機器健全性チェック方法の改善
- ・ 小型軽量化

(3) 開発・運用で学んだこと

- ・ どのような困難に直面しても決して諦めてはならず、それを乗り越えた者だけが達成感を得られるということ。
- ・ 運用に関わる者は、どんな状況になっても冷静に対応するために常に全体を見渡しながら一步先を考える想像力が必要である。その場で（射場で）問題を解決できなければ意味が無く、中身を熟知していることが重要であるということ。

5. まとめ

M-V ロケット5号機以降の姿勢制御に関する研究開発の概要および飛翔結果について述べた。INGは、各号機の飛翔実験での運用を通して、大きな問題もなく使命を果たすことができた。最後に、関係実験班各位、三菱プレジジョン株式会社、(株)IHIエアロスペースの関係各位に深甚の謝意を表する。

参考文献

- [1] 久保田孝, 斉藤宏, 佐藤忠直, 川口淳一郎, 中谷一郎, 江西達也, 後藤晋一, 斎藤一品, 浅野秀夫, 秋岡大作, 那須讓次, 林房男, “M-V型ロケットの姿勢制御 (CNE)”, 宇宙科学研究所報告特集, 第47号, pp.155-210, 2003.
- [2] 江西達也, 斎藤一品, 後藤晋一, “M-V型ロケット用慣性誘導制御装置”, 三菱プレジジョン技報, Vol.2, pp.37-43, 2006.