

M-V型ロケットの推進性能

高野雅弘, 嶋田 徹, 堀 恵一, 徳留真一郎, 羽生宏人

1. 序

M-V主推進系は, 第1段(B1) M-14, 第2段(B2) M-24, 第3段(B3) M-34の各新規開発固体モータにより構成され, ミッションに応じて最終段(KM)が付加される. KMを除く全段に推力方向制御(TVC)装置と非常破壊(SO)装置が装備され, B3とKMには, 伸展コン式伸展ノズルと投棄式後方着火点火モータが採用されている.

補助推進系として, B1可動ノズル推力方向制御(MNTVC)のターボポンプ駆動用固体ガスジェネレータ(SPGG), B1・B2推力飛翔中のロール制御用固体モータ(SMRC), B2燃焼終了後の3軸制御用固体モータサイドジェット(SMSJ)およびB3燃焼終了後スピン・モータ(SM)の各固体モータ/ガスジェネレータが装備されている.

以下では, M-V主推進系と補助推進系の詳細, M-V-1, 3, 4号機の主な飛翔結果について述べる.

2. 主推進系

2.1 各段モータの諸元

代表例として, 表-1にM-V-3号機の各段モータの性能・重量諸元を示す. 表中の燃焼特性は, 同号機の各モータに充填された推進薬の燃焼速度実測値に対応する. 各段モータの概要図を図-1~4に, M-V-1号機の真空推力・モータ内圧予測曲線を図-5~8に示す. 図-5~8中, 破線で示される3本は各々推進薬の規格最大値, 中央値, 最小値に対応するもので, 各段モータの地上燃焼試験データに基づく予測曲線は実線で示されている. 特に第3段については, M-V-1号機のみM-34aモータが使われ, M-V-3号機以降, 衛星打ち上げ能力を向上させる目的で, 当該平行部を120mm延長して推進薬を約700kg増量したM-34bモータが使用されている.

M-14燃焼曲線の尾部が長く棚引いているのは, 意図的にスライバ燃焼期間を延長する7光芒ギア型グレイン形状設計を採用した結果である. それによって, 飛翔性能向上のため有効燃焼時間の短縮を図りつつ, 点火後70sに実行されるファイア・イン・ザ・ホール(FIH)方式によるB1・B2段間分離の瞬間までB1MNTVCによる有効な姿勢制御が保証される. M-24のグレイン形状設計は, 7光芒ギア型での体積充填率の向上とスライバ燃焼期間の短縮が図られている. 充填薬量の多いM-14の2セグメントとM-24のグレインは新開発の直填低温硬化成型法によって製造されている. フィラメント・ワインディング(FW)製ケースに対応した直填加圧硬化成型法によるM-34グレインの9光芒2ラディアル・スロット内孔形状は, 徹底して高体積充填率と燃焼時間短縮を追求した成果である.

表1 M-V各段モータ主要性能・重量諸元 (M-V-3号機)

モータ名称		第1段	第2段	第3段	キックステージ
モータ名称		M-14	M-24	M-34b	KM-V1
寸 法 諸 元	全長(収納時/伸展時) (m)	13.73	6.83	3.61/4.29	1.57/1.97
	最大径/代表径 (mmφ)	2.61/2.50	2.56/2.50	2.23/2.19	2.18/1.18
	ケース材料	HT-230M, HT-150	HT-230M, HT-150	CE-FRP, FW	CE-FRP, FW
	保証内圧 (MPa)	5.88	5.88	5.88	5.49
	推進薬	BP-204J	BP-204J	BP-205J	BP-205J
	ノズルスロート (mmφ)	745.0	400.0	190.0	88.5
	初期開口比	10.3	30.8	96.0	92.2
燃 焼 特 性 *1	真空比推力 (s)	274	287	302	298
	燃焼速度 (mm/s)	9.12	9.16	7.22	7.18
	有効燃焼時間 (s)	50.3	70.0	97.7	69.7
	全燃焼時間 (s)	96.9	96.6	102.5	73.0
	平均真空推力 (kN)	3854	1245	327.6	56.98
	最大真空推力 (kN)	3874	1324	373.6	65.21
	平均モータ内圧 (MPa)	5.09*3	5.26	5.41	4.37
	最大モータ内圧 (MPa)	5.49*4	5.60	5.65	5.03
質 量 特 性 *2	推進薬	71.885	31.251	10.788	1.3707
	モータケース	5.669	1.841	0.350	0.0483
	インシュレーション類 (×10 ³ kg)	1.447	0.325	0.137	0.0262
	ノズル	3.321	0.803	0.380	0.0490
	点火器	0.085	0.085	0.019	0.0021
	その他	0.446	0.069	0.010	0.0005
	総重量 (×10 ³ kg)	P,P有り 82.85 点火後 82.82 P,P無し 10.94	34.37 34.34 3.09	11.68 11.66 0.88	1.497 1.495 0.124

*1 充填推進薬の線燃焼速度実測値に対応する値。

*2 TVC/UN 関連およびノズル伸展アクチュエータ(投棄分)を除く実測値

「その他」のみ推定値。M-14は外部インシュレーションおよび保護カバーを含まない。

*3 有効総圧 P_{eff} *4 モータ前部内圧 P_{fwd}

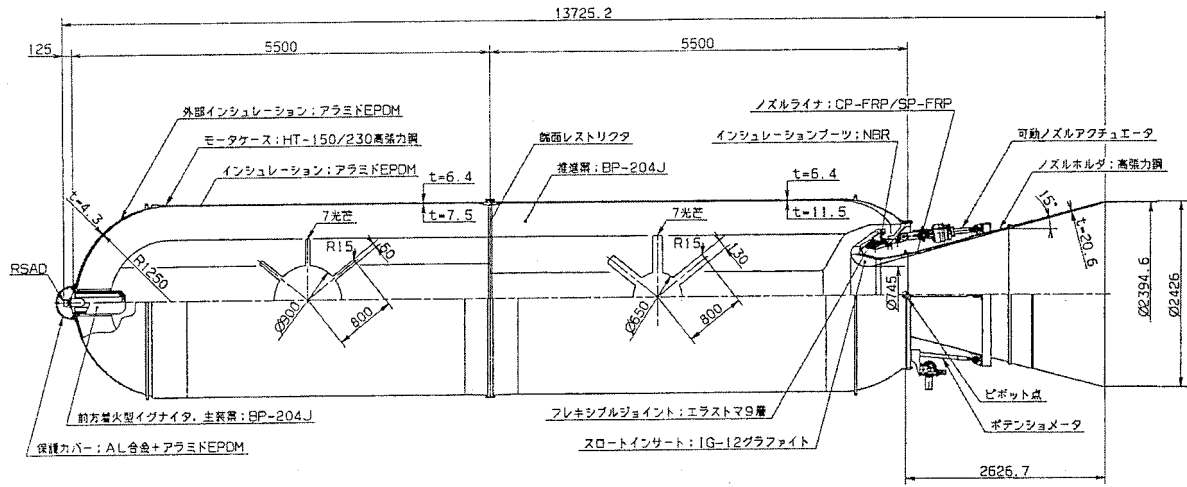


図-1 第1段 M-14モータ概要図

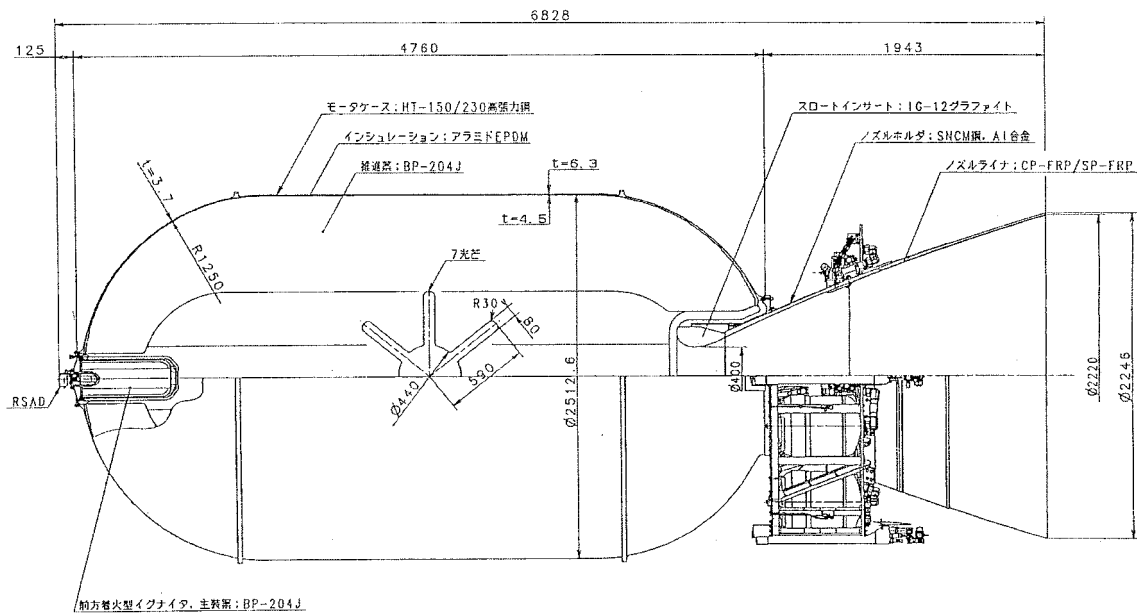


図-2 第2段 M-24モータ概要図

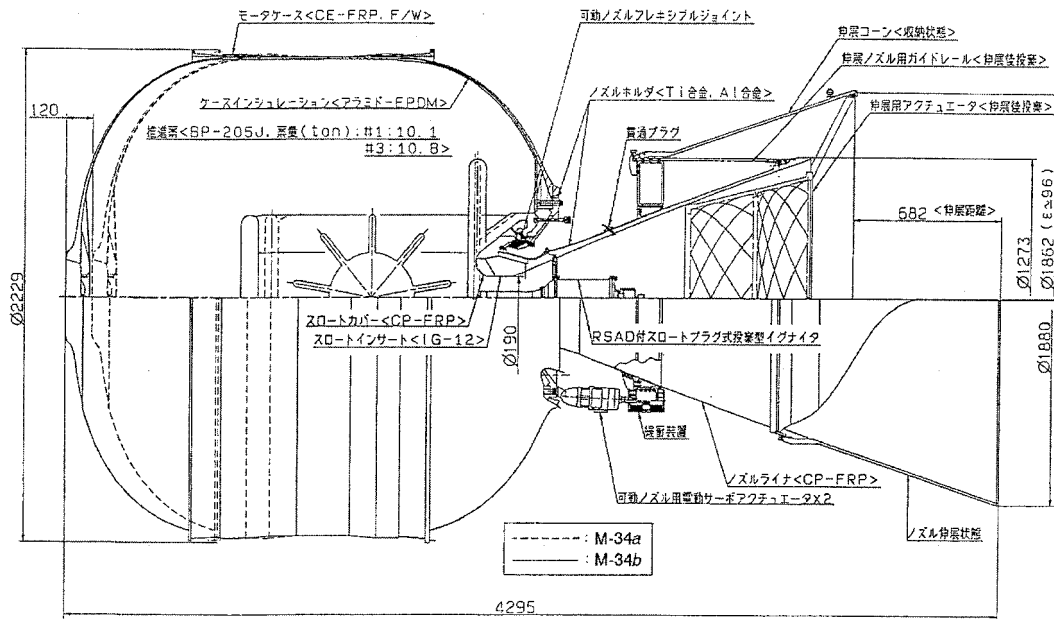


図-3 第3段 M-34モータ概要図

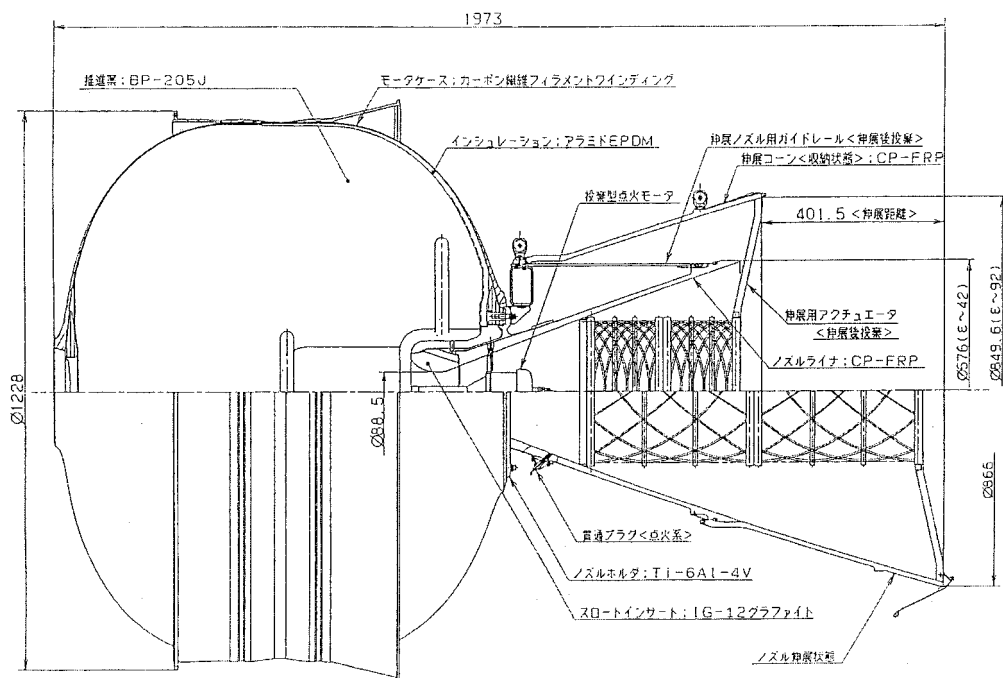


図-4 キック・ステージ KM-V1 モータ概要図

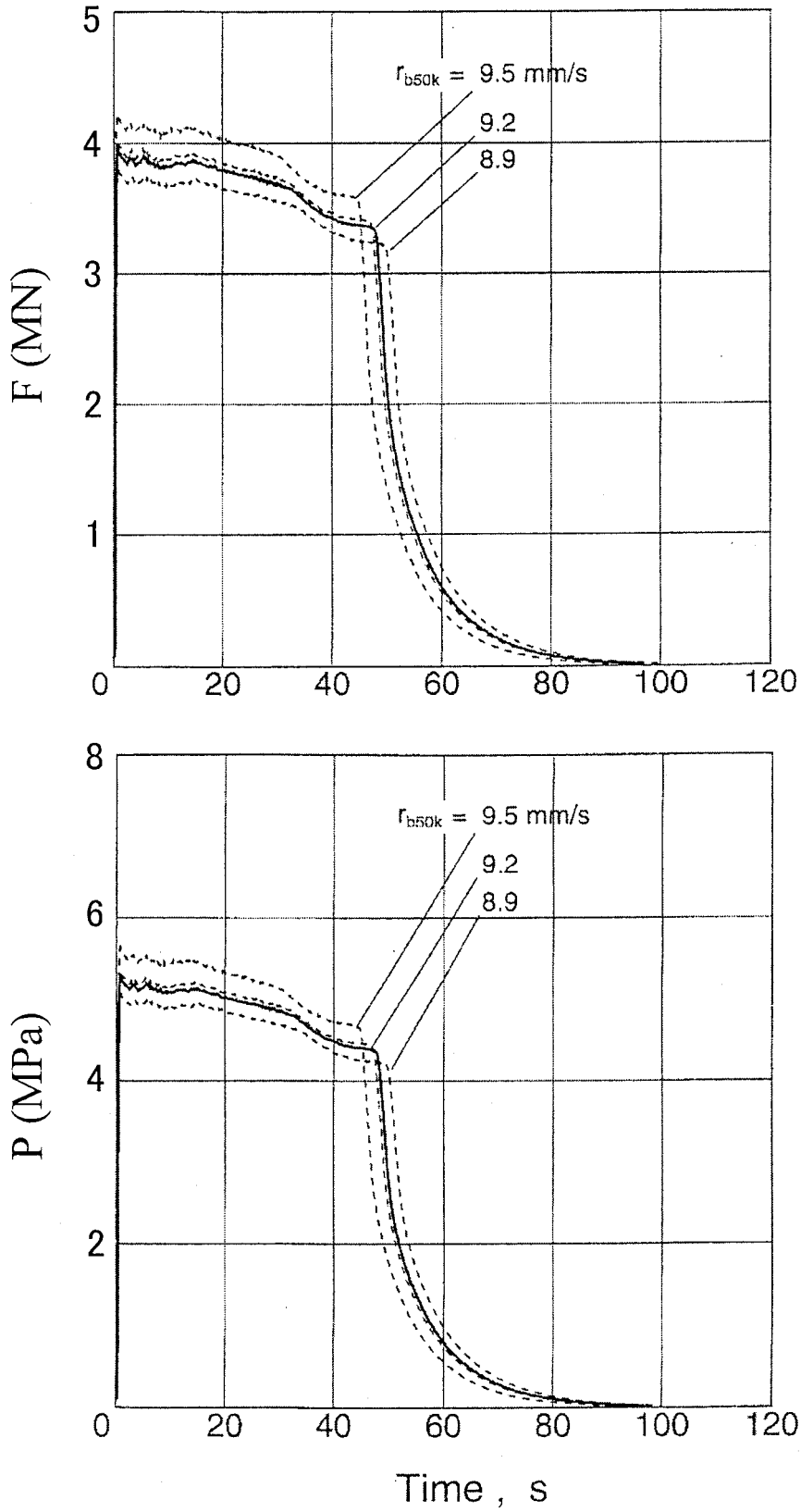


図-5 第1段 M-14モータの真空推力・モータ内圧推定曲線

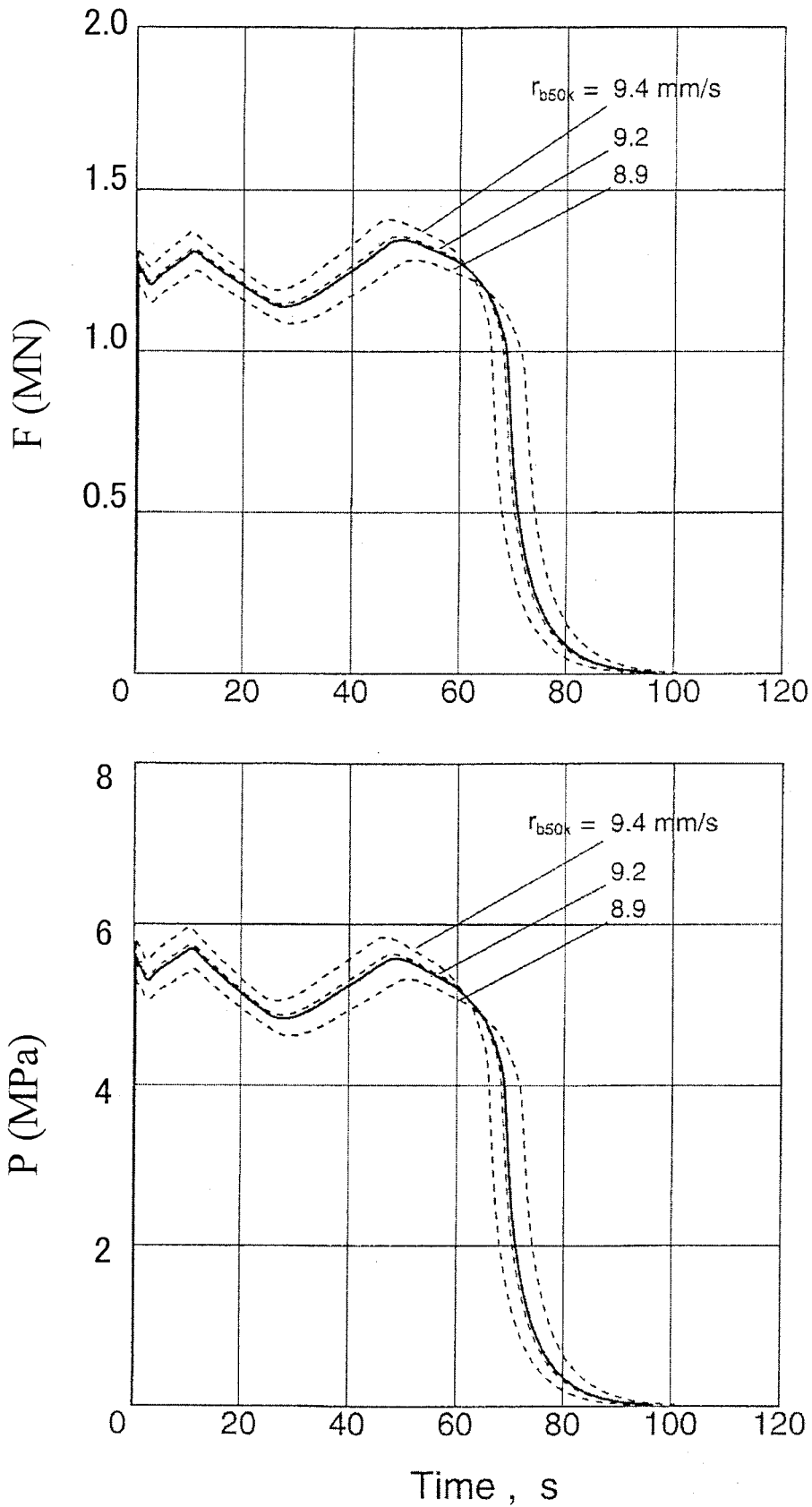


図-6 第2段 M-24モータの真空推力・モータ内圧推定曲線

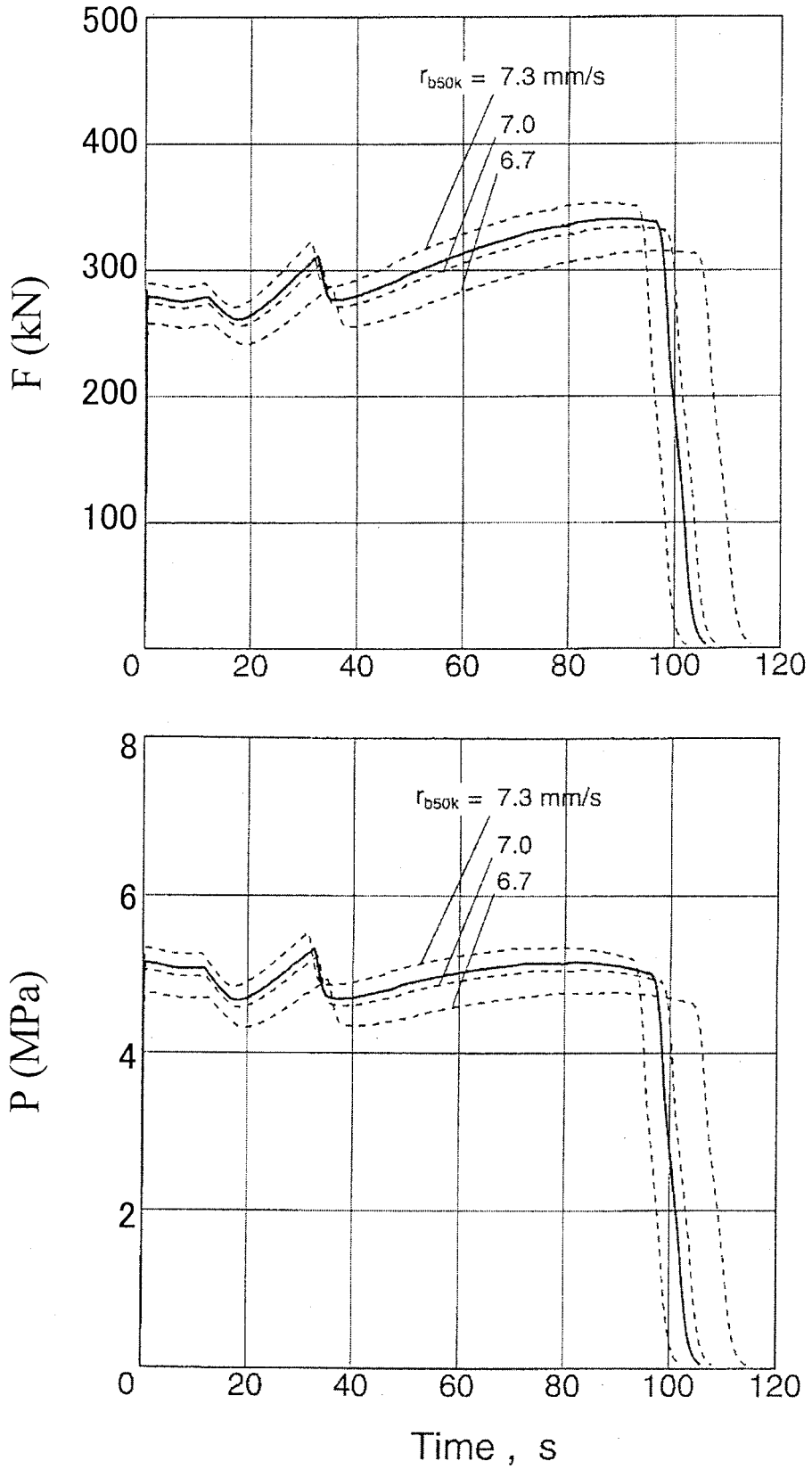


図-7 第3段 M-34a モーターの真空推力・モーター内圧推定曲線

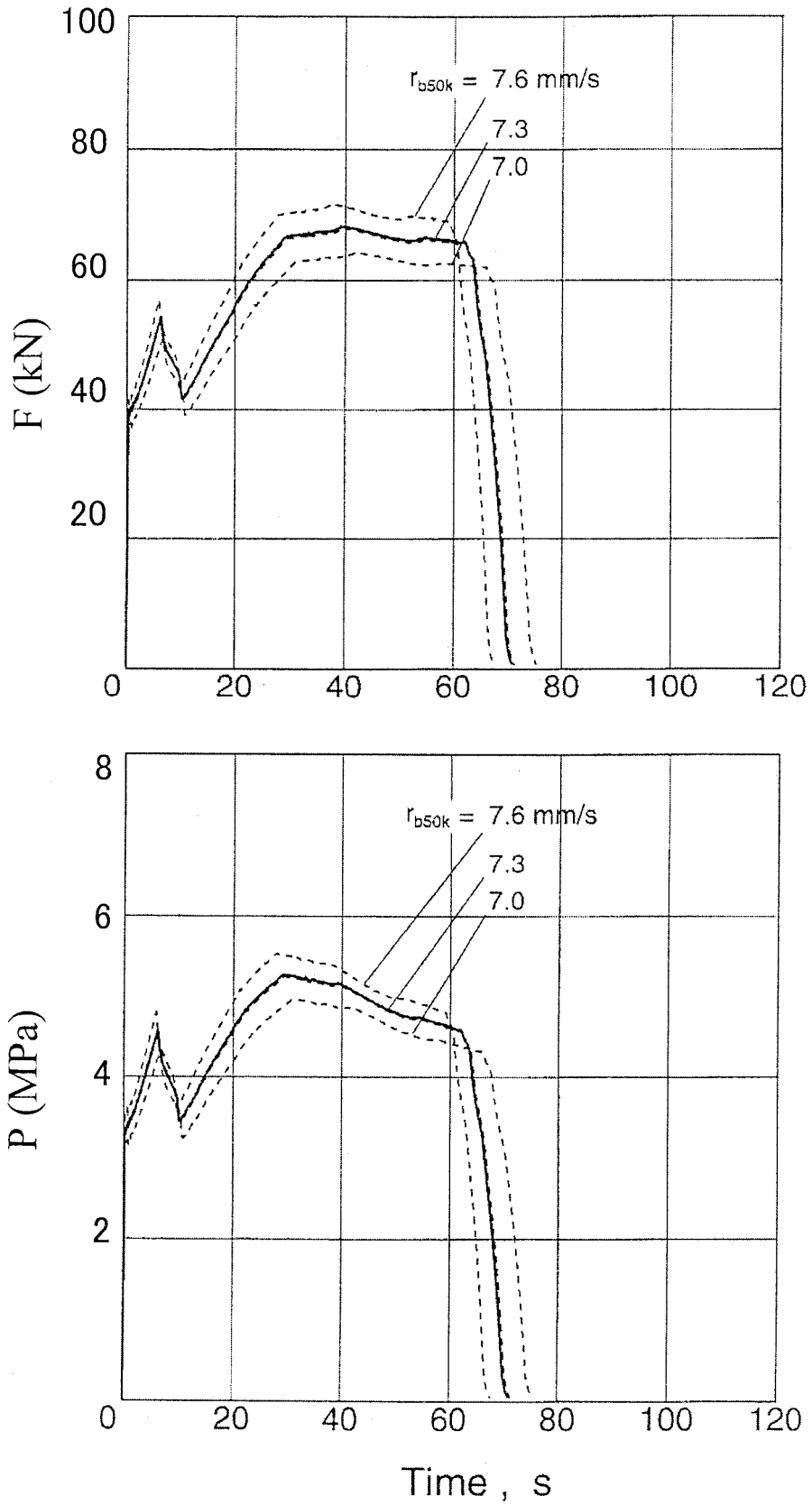


図-8 キック・ステージ KM-V1 モータの真空推力・モータ内圧推定曲線

2.2 推進薬

M-V主推進系に使用される推進薬の基本組成および標準燃焼特性を表-2に示す。

B1, B2には高燃速・高Al充填率のBP-204Jを, B3, B4にはAlの燃焼完結性を高めた高Al充填率推進薬BP-205Jを使用している。M-V-1号機搭載のM-34aモータに充填されたBP-205Jには国産の高品位球形Alが使用されていたが, その製造中止に伴い, M-V-3号機以降のM-34bモータにはKM-V1モータに使用されているものと同じ輸入高品位Alが使用されている。

表-2 M-V主推進系推進薬の基本組成および標準特性

推進薬名称	BP-204J	BP-205J
組成(質量%)		
酸化剤 AP (NH_4ClO_4)	68	68
粘結剤 HTPB	12	12
助燃剤 Al	20	20
燃焼触媒 Fe_2O_3	0.3~0.5 (外割)	-
密度(@20°C/50°C) (g/cm^3)	1.82/1.80	1.81/1.80
線燃焼速度特性 ^{*1}		
線燃焼速度 ^{*2} (mm/s)	9.2±0.3	7.0±0.3(M-34a) 7.3±0.3(KM-V1)
圧力指数 -	~0.4	~0.3
燃焼ガス特性 ^{*3}		
断熱火炎温度 (K)	3529	3531
平均分子量 (g/mol)	29.66	29.51
平均比熱比 -	1.165	1.166
適用モータ	M-14モータ M-24モータ 各段点火モータ	M-34モータ KM-V1モータ

*1 4.90MPa, 20°Cでの規格値

*2 BP-205Jの燃焼速度はAPの粒度配合により調整

*3 4.90MPaでの凍結平衡値

2.3 ケース・インシュレーション

M-V 各段モータのケース・インシュレーションには、M-3 SII型までのアスベスト入り NBR および同 IR 系素材を廃して、アラミド繊維充填 EPDM (アラミド/EPDM) 系素材の薄板積層方式が適用されている。アラミド/EPDM 系インシュレーション材の諸特性値をアスベスト/IR 系と比較して表-3 に示す。この素材変更は、高性能の追求だけでなく、発癌物質であるアスベストの使用を廃する積極的意図による。

表-3 M-V 用ケース・インシュレーション材の特性

		アラミド/EPDM	アスベスト/IR
侵食率	(mm/s)*1		
	@50m/s*2	0.19	0.18
	@120m/s*2	0.40	0.40
密度	($\times 10^3 \text{kg/m}^3$)	1.09	1.26
最大応力	(MPa)		
	せん断	12.3	13.6
	引張り	5.88	8.43
最大応力時歪み	(%)		
	せん断	77	61
	引張り	73	346

*1 小型モータによる

*2 ガス流速

2.4 点火器とモータ着火特性

各段モータの点火は、いずれも主装薬に主推進薬 BP-204J の友材が適用されたモータ型点火器 (点火モータ) で実行される。B1, B2 には固定型前方着火方式, B3, B4 にはスロート・プラグ式投棄型後方着火方式が採用されている。それらの着火遅れ τ_{ig} と点火器燃焼ガス流量率の関係を規定する設計基準には、図-9 に示される、推進薬表面への入熱量に関するパラメータとグレイン内孔の機軸方向長さ L_p の関係で整理された相関を使うポート・レングス法が採用されている。ここで、 G_{ig} は点火器燃焼ガス流のグレイン内孔横断面内の質量流速、 T_i は断熱火炎温度、 T_0 は推進薬初期温度を表わす。

各段点火モータの主要諸元を表-4 に示す。ここで M-24 には、FIH 段間分離に対応して着火遅れを最小限に抑える要請から M-14 用器材が共用されている。同器材のプースタは規模が大きいため、従来のペレット型を廃して、装薬に BP-204J の友材を用いるモータ型となっている。各段点火モータ概要図と単体標準内圧曲線を図-10~12 に示す。

射場における発射前組立・整備作業期間の安全を確保するため、KM-V1 を除く全段の点火モータに遠隔操作型機械的安全機構 (RSAD) が装着されている。その概要図を図-13 に示す。

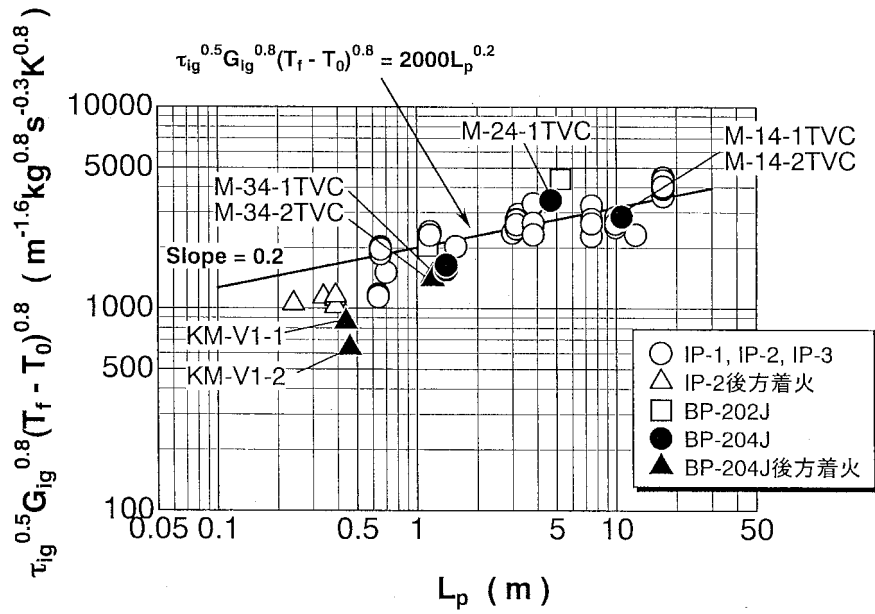


図-9 点火モータ設計基準

表-4 M-V 各段点火モータの主要諸元

適用モータ	M-14, M-24	M-34	KM-V1
型式	固定式前方着火型	投棄式後方着火型	←
ケース材料	SCM鋼+アラミド繊維 充填 EPDM	チタン合金	←
IGブースタ			
助装薬	TAB-4(1.5g)+NAB-O(3ヶ)	←	NAB-IG(0.8g)
主装薬	NAB-2(20ヶ)	NAB-2 (40ヶ)	NAB-1(16ヶ)
ブーストモータ			
主装薬, グレイン形状	BP-204J, 12 光芒		
薬量, kg	0.5	←	←
ノズルスロート径, mmφ	17		
点火モータ			
主装薬, グレイン内孔形状	BP-204J, 15 光芒	BP-204J, 13 光芒	BP-204J, 12 光芒
薬量, kg	32	4.5	0.39
ノズルスロート径, mmφ	86	34	14
点火モータガス流量率, kg/s	16	5.5	0.83
主点火モータ予想着火遅れ, ms	180(M-14)/69(M-24)	29	~20
安全装置	RSAD	RSAD	←
総重量, kg	86	16	1.5

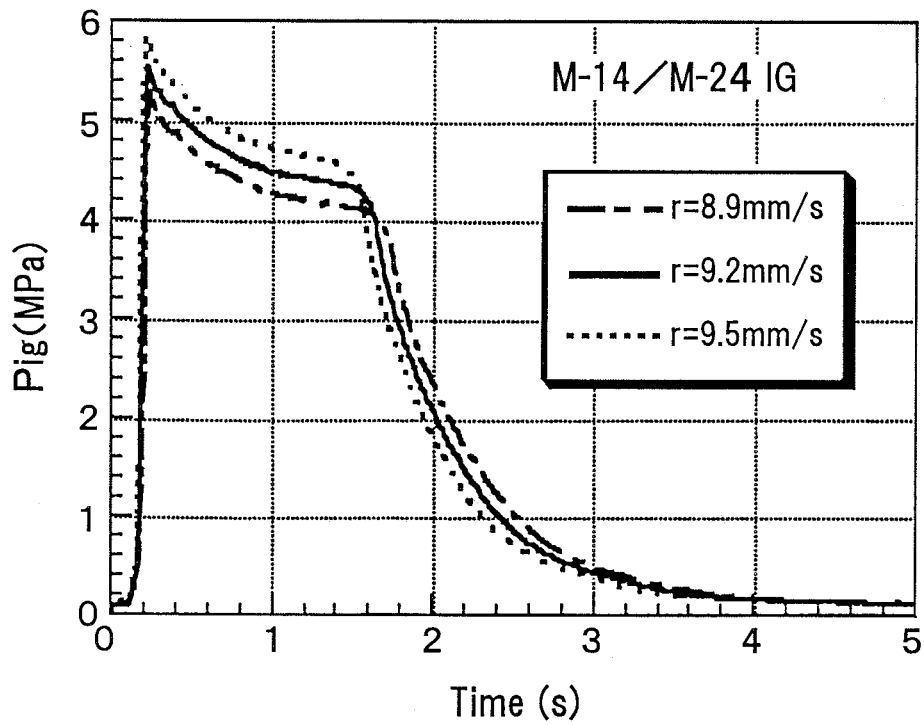
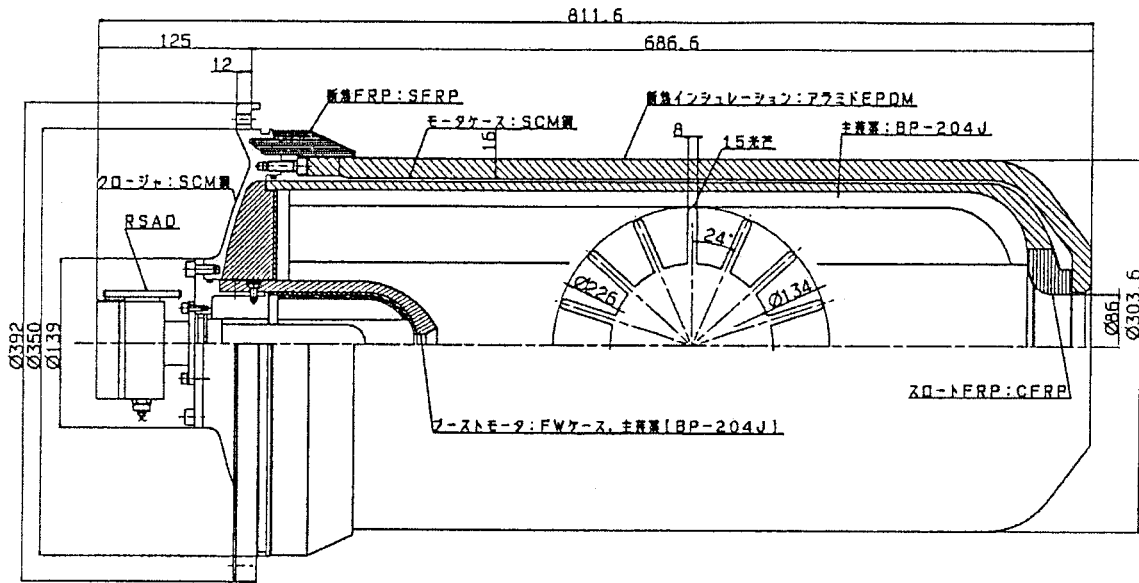


図-10 M-14, M-14用点火モータの概要図および単体標準内圧曲線

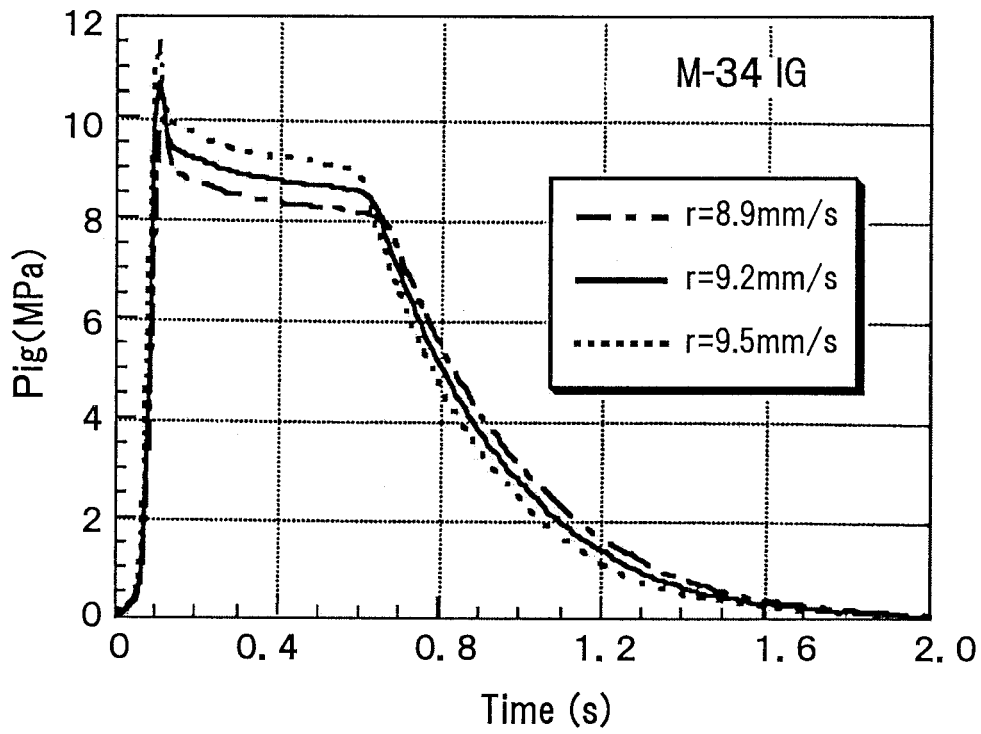
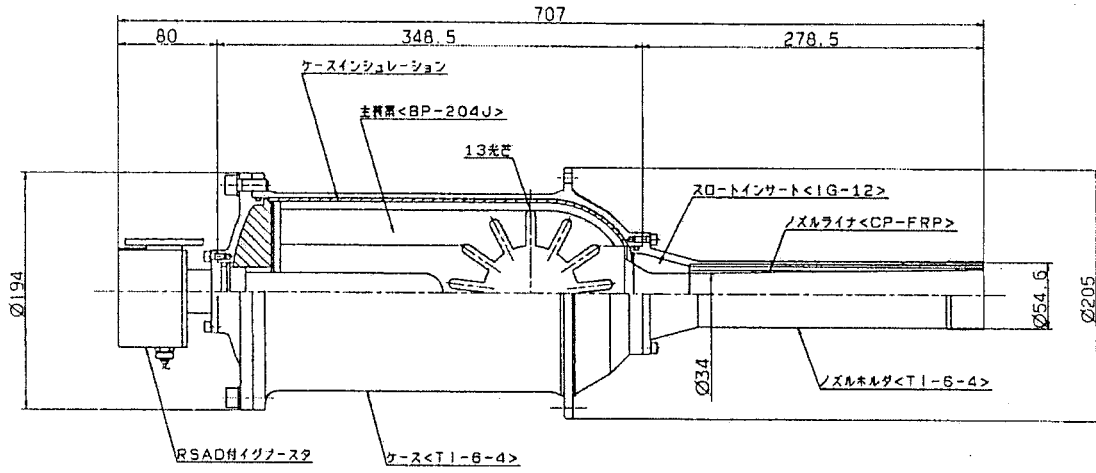


図-11 M-34用点火モータの概要図および単体標準内圧曲線

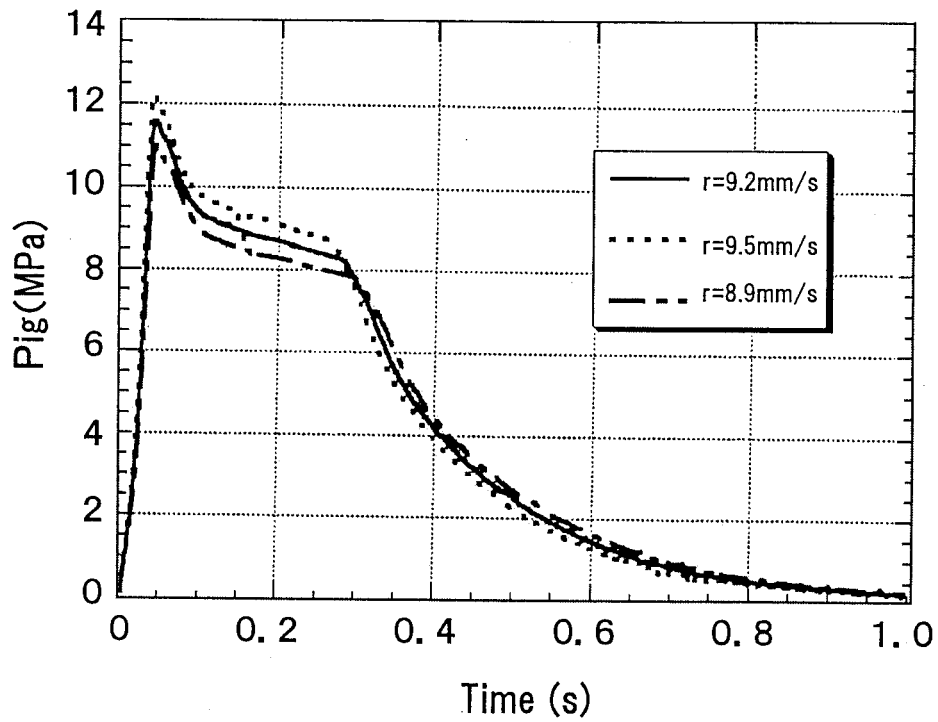
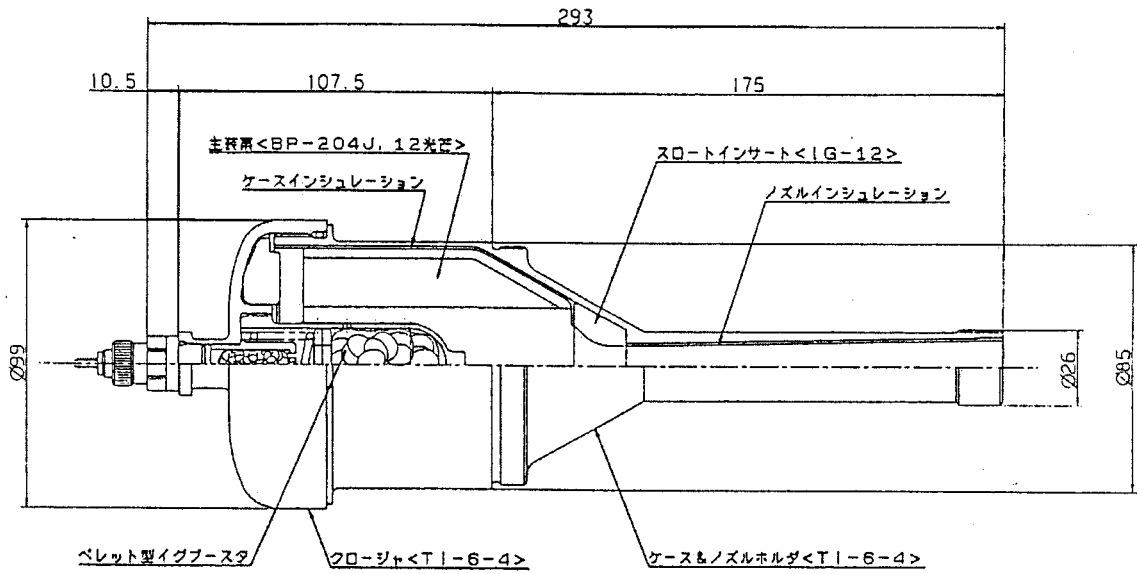


図-12 KM-V1用点火モータの概要図および単体標準内圧曲線

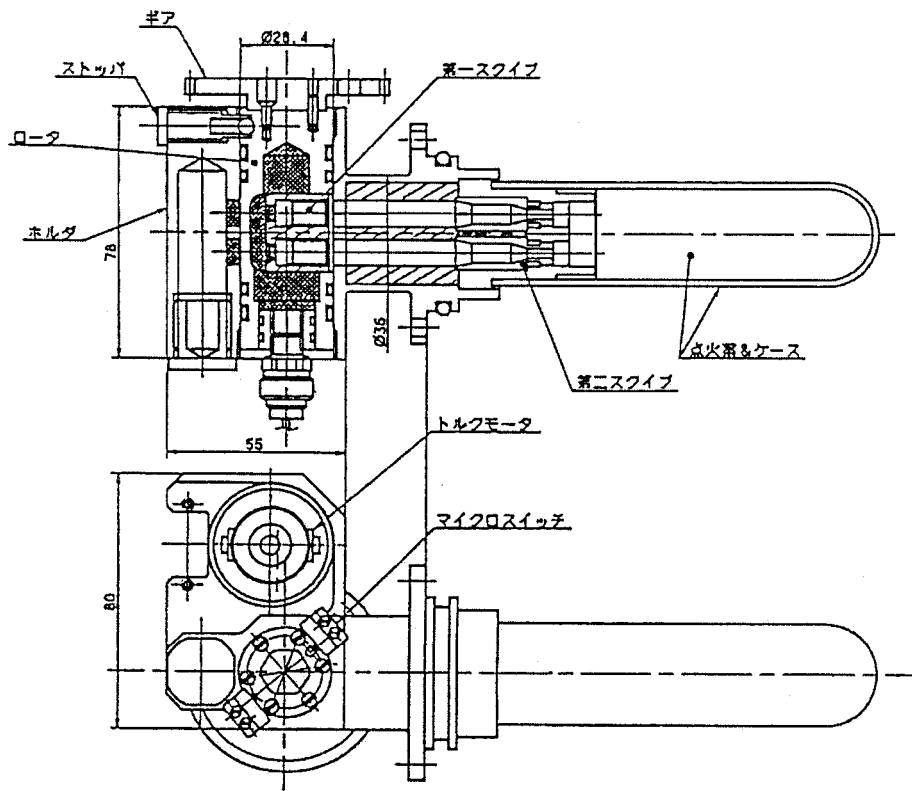


図-13 遠隔操作型機械的安全機構 (RSAD) の概要図

2.5 ノズル設計と推進性能の推定

M-V各段のノズルスロート・インサートには、国産等方性高密度グラファイトIG-12が採用されている。また、M-14モータおよびM-24モータのノズル開口部ライナにはCP (Carbon Phenolic) -FRPとSP (Silica Phenolic) -FRPの混成品を、上段のM-34モータおよびKM-V1モータにはCP-FRPの一体成型品を使用して、高性能と低価格性の両立が図られている。

M-V-1号機各段モータのノズル基本仕様を表-5に、同概要図を図-14~17に示す。M-14には出口開口部半頂角 15° のコニカル・ノズル、M-24にはノズル混相流解析ルーチンによって、アルミナ粒子衝突回避を考慮しつつ比推力特性に対して最適形状設計されたベル/コニカル・ノズルが採用されている。上段のM-34およびKM-V1には、同様に最適形状設計 (M-34:ベル/コニカル, KM-V1:ベル) の伸展コーン (EEC) 式伸展型ノズルが採用されている。特にM-34用ノズルには、スロート・インサートの上流側に、スロート損耗低減を意図したCP-FRP製のアプレタ・キャップが装着されている。図-18にEEC伸展・投棄機構の作動概要図を示す。EECの伸展には、いずれも内装式自己投棄型ダブル・ヘリカルスプリング (DHS) 伸展機構が採用されている。

ノズル開口部内孔形状の設計とモータ比推力の推定においては、M-3SII計画遂行の過程で開発・熟成された、宇宙研独自のノズル混相流解析プログラムが活用された。その中では、混相流損失とノズル内壁面への粒子衝突を考慮しながら、ノズル周囲の空間的な制約条件下でステージ増速度を最大とするノズル開口部最適内孔形状が決定される。M-V型ロケット上段モータの同最適内孔形状設計においては、新たに図-19に示される比推力規定有効平均粒子粒径 D_p と初期ノズルスロート径 D_i の相関が設計基準として用いられた。

表-5 M-V-1号機各段モータのノズル基本仕様

モータ	M-14	M-24	M-34	KM-V1
全長, mm	3350	2566	2409(1727*)	1178(777*)
最大径, mmf	2426	2250	1880	886
型式	可動	固定	伸展, 可動	伸展, 固定
形状	コニカル	ベル	ベル/コニカル	ベル
スロート径, mmφ	745	400	190	88.5
出口径, mmφ	2395	2220	1862	849.6
開口比	10.3	30.8	96.0	92.2
重量, kg	4110	950	370	46.4

*伸展ノズル収納時全長

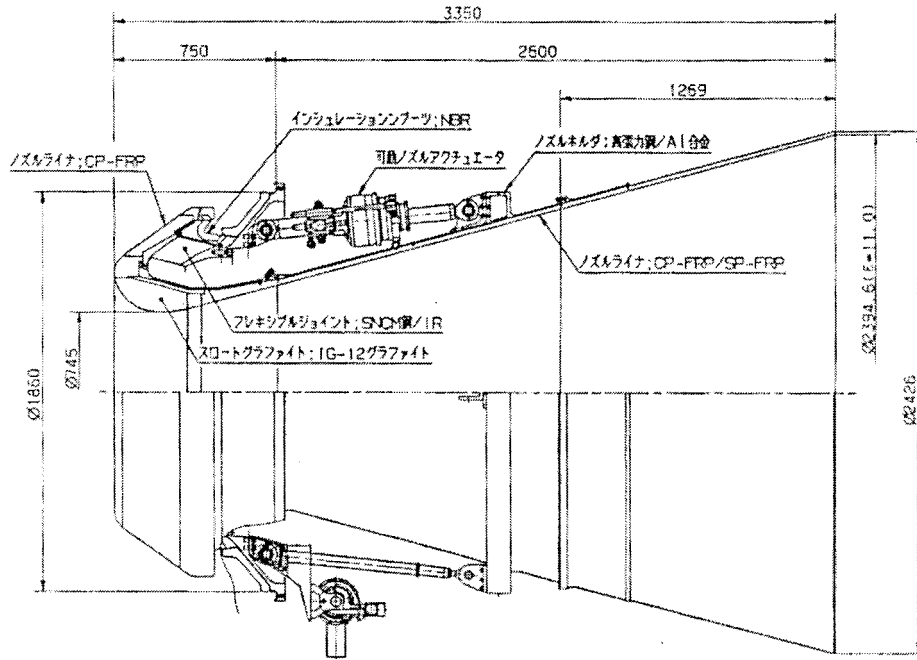


図-14 第1段 M-14ノズルの概要図

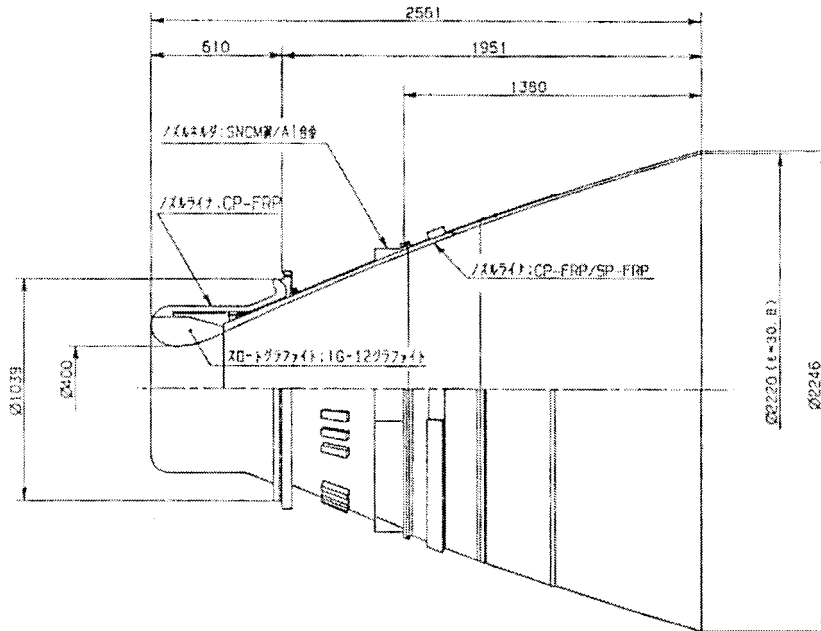


図-15 第2段 M-24用ノズルの概要図

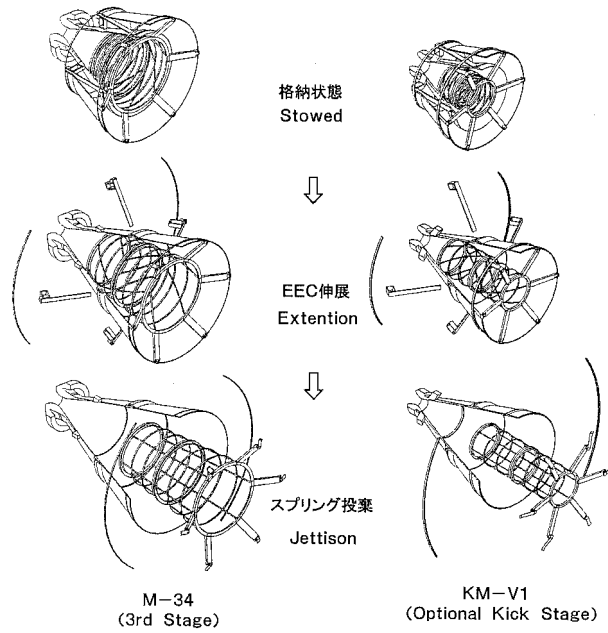


図-18 伸展コーン (EEC) 式伸展型ノズルの伸展・投棄機構作動概要図

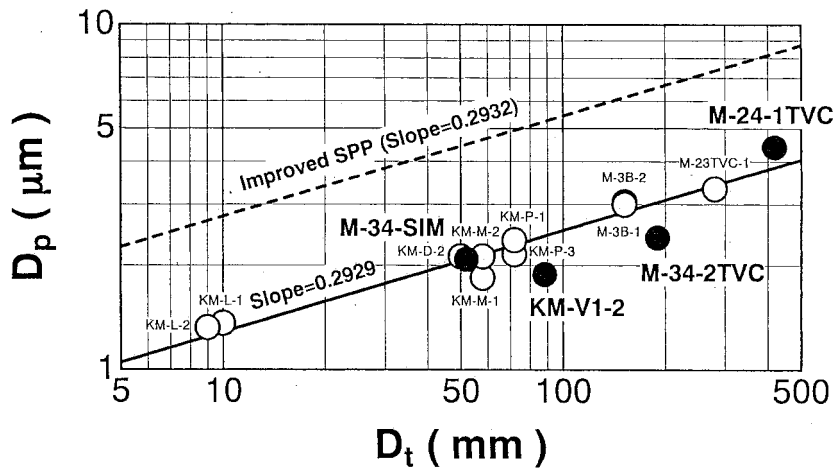


図-19 比推力規定有効平均粒子粒径と初期ノズルスロート径の相関

2.6 残留内圧/推力特性の予測評価

固体モータは、推進薬燃焼終了後も熱容量の大きいノズル埋没部からの熱放射によりケースインシュレーションの熱分解ガスが発生するため、微小な残留推力を発生する。燃焼終了後の段間飛翔シーケンスやモータ分離から上段側モータ点火までの分離シーケンスは、残留推力の減衰特性を考慮して策定される。M-V上段モータに対しては、M-3SII型の飛翔実績に基づき、分離解析に対して十分な安全余裕を持たせるような予測評価が行われている。

M-V-1号機飛翔前においては、従来の推定法が踏襲され、モータ燃焼末期における内圧減衰過程を次の三つの領域に分けて推定された。 P_{r1} は燃速の圧力不感域上限圧力、 P_{r2} は推進薬の着火限界圧力を表わす。図-20、21に示されるように、BP-204Jについては、 P_{r1} が存在せず、 P_{r2} は18kPaである。また、BP-205Jの P_{r1} 、 P_{r2} は、それぞれ45kPa、7.8kPaである。

- ・推進薬スライバ燃焼域： $P > P_{r1}$ ($t < t_{r1}$, $t_{r1} = t_b$)、減衰時定数 τ_p

$$P = P_{r1} \exp[-(t - t_{r1}) / \tau_p]$$

($P = P_{r1}$ となる時刻を燃焼終了時刻 t_b とする)

- ・残推進薬燃焼域： $P_{r1} > P > P_{r2}$ ($t_{r1} < t < t_{r2}$)、減衰時定数 τ_{r1}

$$P = P_{r1} \exp[-(t - t_{r1}) / \tau_{r1}]$$

BP-204Jには推進薬の燃焼特性上この域は存在しない。

- ・残留内圧域： $P < P_{r2}$ ($t_{r2} < t$)、減衰時定数 τ_{r2}

$$P = P_{r2} \exp[-(t - t_{r2}) / \tau_{r2}]$$

ケースインシュレーションの熱分解ガスが要因。

減衰時定数 τ_p は地上燃焼試験データから得られる。また τ_{r1} は、残留推力を大きめに評価して安全な分離シーケンスが策定されるよう M-3SIIでの実績最大値を踏まえて $4.4 \tau_p$ と規定され、同様に τ_{r2} は、M-24モータについて $14.5 \tau_p$ 、M-34モータについて 32s、KM-V1について 37s と規定された。

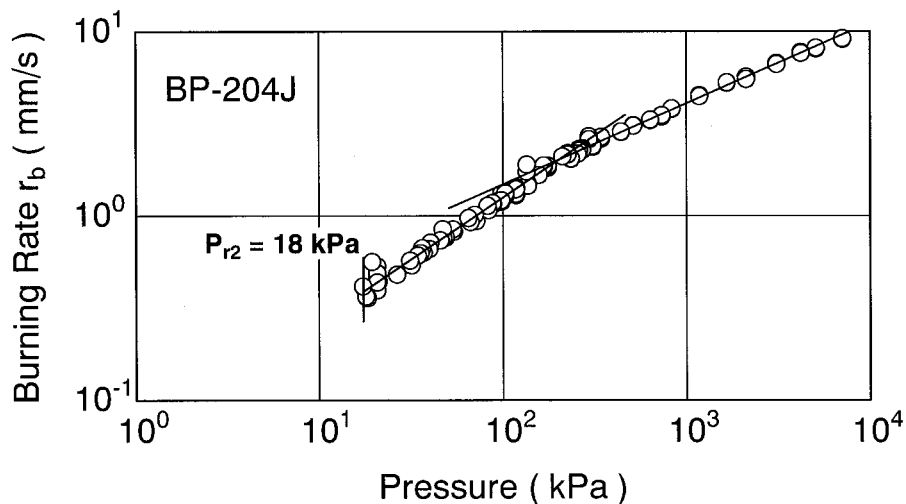


図-20 BP-204Jの線燃焼速度特性

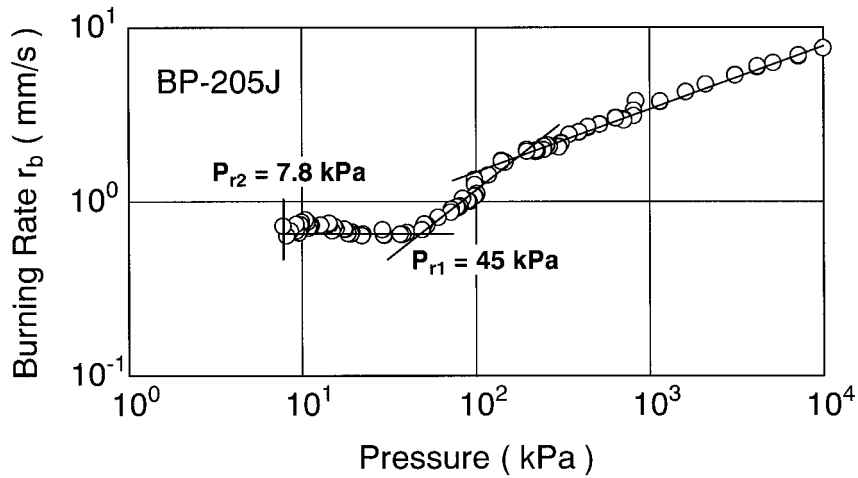


図-21 BP-205Jの線燃焼速度特性

3. 補助推進系

B1 MNTVCターボポンプ駆動用SPGG, B1・B2 SMRC, SMSJ, B3搭載多用途ヒドラジン・サイドジェット(SJ) およびSMがM-V用として新規開発された。本項では、SJを除く固体推進薬を用いる補助推進系について記述する。補助推進系の充填推進薬の組成および燃焼特性については、表-6に一括してまとめた。

表-6 M-V 補助推進系推進薬の基本組成および標準特性

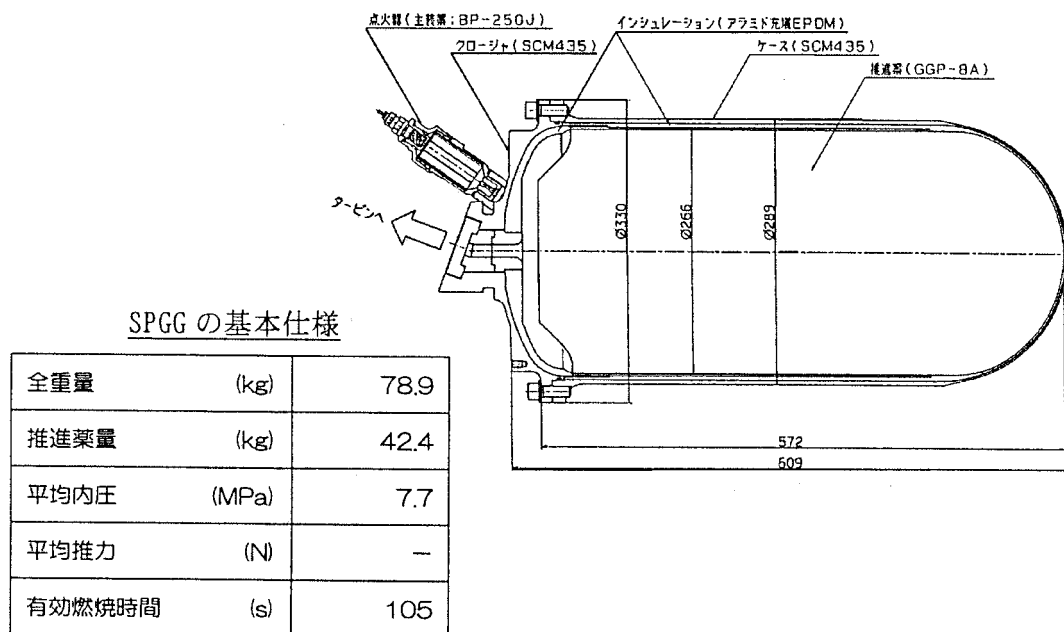
推進薬名称	GGP-8A	GGP-3A	BP-250J	
適用モータ	B1-SPGG	SMRC/SMSJ	スピンモータ	
組成 (質量%)				
酸化剤	AP (NH ₄ ClO ₄)	16	58	82
粘結剤	HTPB	24	23	18
添加物	オキサロ	60	19	—
添加物	オキサミド	2~8 (外割)	—	—
正触媒	0.3 (外割)	0.3 (外割)	—	
負触媒	—	—	0~0.5 (外割)	
密度 (@20°C/50°C) , g/cm ³	1.52	1.55	1.63	
線燃焼速度特性*1				
線燃焼速度 , mm/s	3.8 (6.86MPa)	9.5 (7.85MPa)	5.9 (4.90MPa)	
圧力指数 , —	0.5	0.5	0.37	
燃焼ガス特性*2				
断熱火炎温度 , K	1300	1443	2534	
平均分子量 , g/mol	23.3	19.7	23.1	
平均比熱比 , —	1.23	1.30	1.24	

*1 20°Cにおけるノミナル値

*2 4.90MPaでの平衡凍結理論値

3.1 SPGG

SPGGの概要図と基本仕様を図-22に示す。同器材は、推進薬量42kg、平均内圧7.7MPa、有効燃焼時間105sの大口徑長秒時端面燃焼型ガス発生器で、端面を一様に燃焼させるための初期着火面形状および総燃焼深度の65%に達する深いリリーフブーツが設計上の特徴である。また充填推進薬GGP-8Aは、燃焼ガス温度をターボポンプ保証温度1300K以下に抑えかつ安定燃焼するよう組成が工夫されている。



重量は実測値、他はノミナル燃速時計画値

図-22 B1 MNTVC ターボポンプ駆動用 SPGG の概要図と基本仕様

3.2 SMRC/SMSJ

SMRC モータは、B1 後部筒周りの4個の専用カウリング内に4基ずつ計16基、B2/B3 段間接手周りに2基、B2/B3 段間飛翔期間の3軸制御用 SMSJ モータはB2 ノズル周りに4本装備される。SMRC および SMSJ 用固体モータの概要図と基本仕様を図-23に示す。一基あたりの平均推力は約200N、有効燃焼時間は約88sで、推進薬長(燃焼時間)の違いを除けば、基本的にM-3 SIIのB1 SMRCと同じである。ただし、推進薬種がCTPB系のGGP-3からHTPB系のGGP-3A(特性値は変化無し)に、点火器がNABベレット型からより信頼性の高い点火モータ型(薬種BP-250J)に変更され、またホットガス・バルブ(HGV)のフラップ駆動力がM-3 SIIの器材より強化されている。

SMRC, SMSJ用モータの基本仕様

全重量	(kg)	27.3
推進薬量	(kg)	10.4
平均内圧	(MPa)	7.9
平均推力	(N)	196
有効燃焼時間	(s)	88

重量は実測値, 他はノミナル燃速時計画値

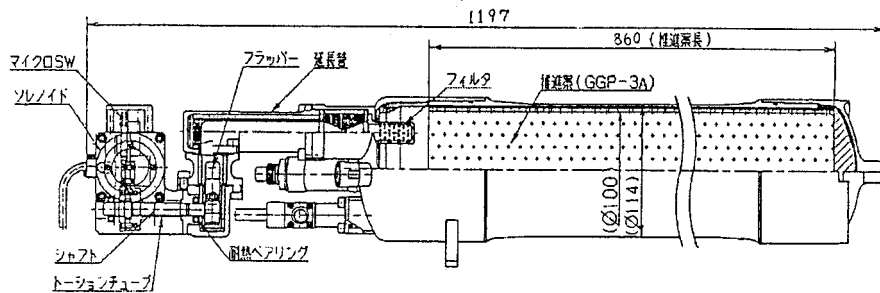
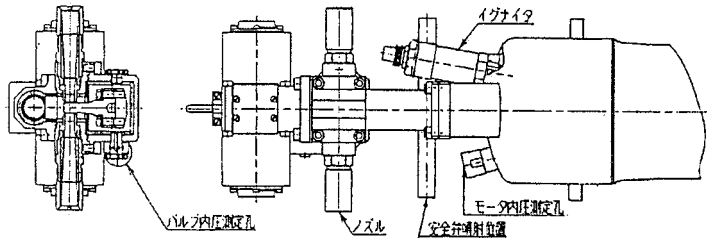
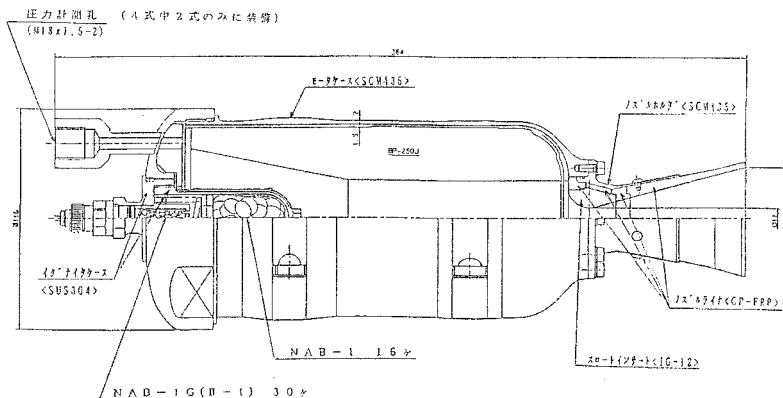


図-23 B1・B2 SRC および SMSJ の単体概要図と基本仕様

3.3 SM

B3/KM段間接手外周部には、最終段スピン安定のための駆動用SMが装着される。図-24, 25にM-V-1, 3号機に適用されたSMの概要図および基本仕様を示す。単体の平均推力は850N, 有効燃焼時間4.8sの小型固体モータで、充填推進薬にはノズル・プルームによる搭載機器類の汚染・損傷を極力回避するために、金属燃料のAlが添加されていないBP-250Jが採用されている。M-V-1号機では4基装備されたが、M-V-3号機ではノズル形状と搭載位置が工夫されたことにより2基でスピニアップ可能となった。

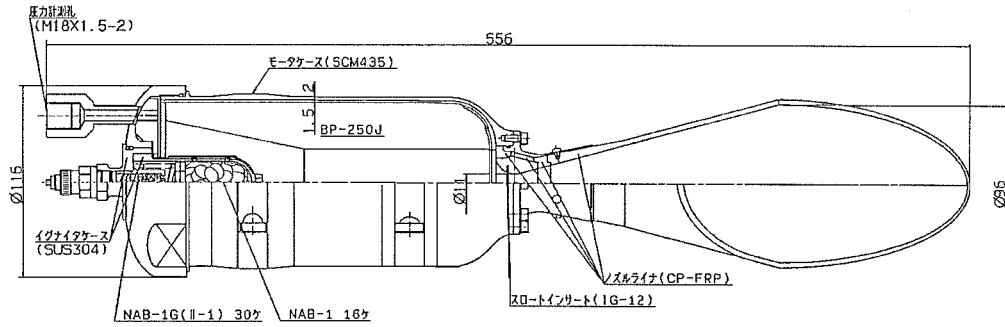


スピンモータの基本仕様

全重量	(kg)	4.69
推進薬量	(kg)	1.60
平均内圧	(MPa)	5.4
平均推力	(N)	853
有効燃焼時間	(s)	4.8

重量は実測値, 他はノミナル燃速時計画値

図-24 固体スピンモータの単体概要図と基本仕様 (M-V-1号機)



スピンモータの基本仕様

全質量	(kg)	4.69
推進質量	(kg)	1.60
平均内圧	(MPa)	5.4
平均推力	(N)	853
有効燃焼時間	(s)	4.8

質量は実測値、他はノミナル燃焼時計画値

図-25 固体スピンモータの単体概要図と基本仕様 (M-V-3号機)

4. モータ非常破壊装置 (SO 装置)

KMを除く各段モータには非常破壊装置 (SO 装置) が装備されている。表-7に示すように、B1にはM-3 SIIのB1-SOと同型のV型成型導爆線 (LSC) を、B2およびB3には、装着自由度の高い円錐型成型爆薬 (CSC)による器材が採用されている。LSC装置の構造を図-26に、新規採用のCSC装置の構造と主要性能を図-27に示す。

各段SO装置の起爆部には、図-28に示すM-3 SIIのB2-SO用遠隔操作型機械的安全機構 (SO-RSAD) が継続使用される。なお、B1/B2段間破壊接手用およびノーズフェアリング (NF) 開頭機構用大型火工品の起爆系にもSO-RSADと同一器材が適用されて、発射前組立・整備作業期間の安全が確保されている。

表-7 M-V用モータ非常破壊 (SO) 装置

	B1	B2	B3
破壊位置	M-14 モータ SEG2 胴部外壁	M-24 モータ 前部鏡板	M-34 モータ 前部
破壊方式	LSC	CSC	CSC
SAD	RSAD	RSAD	RSAD

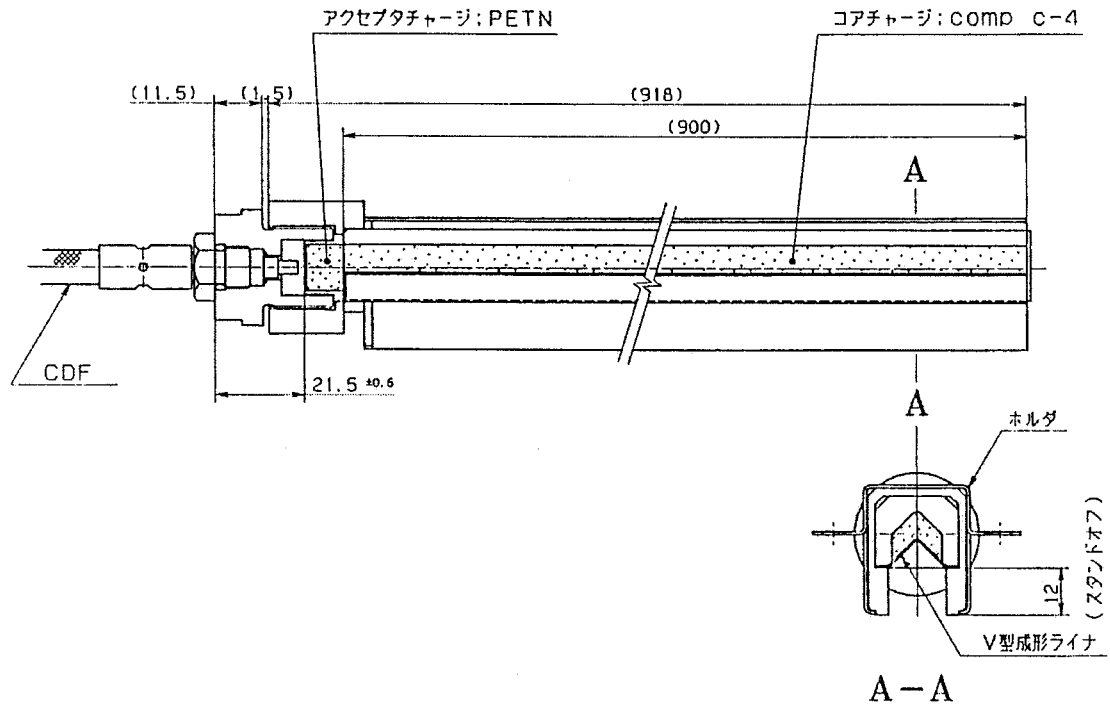
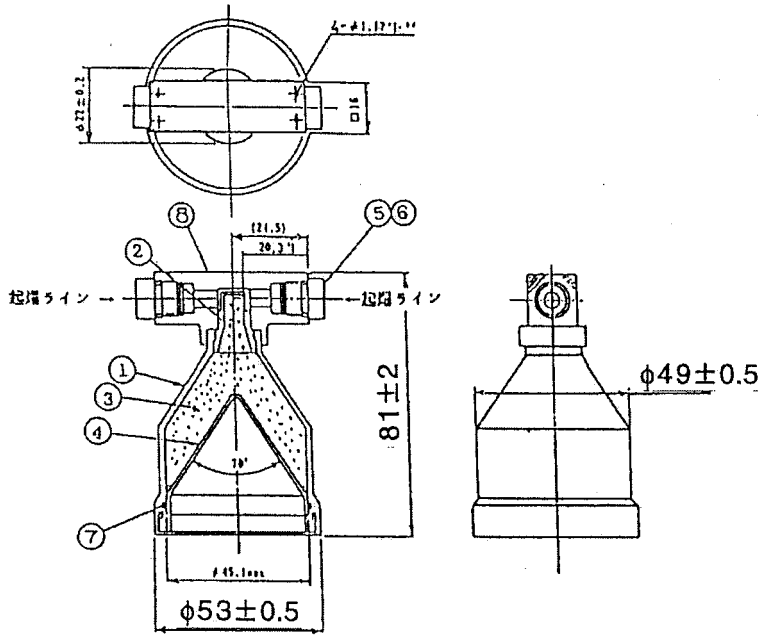


図-26 V型成形導爆線 (LSC) 装置の構造



主要性能

重量	約 150g (薬量 50g)
侵徹性能	スタンドオフ : 180mm
	ターゲット材 : S45C
	侵徹量 : 60mm 以上
	侵徹口径 : 20mm 以上
作動温度範囲	-50 ~ +80 °C

図-27 円錐型成型爆薬 (CSC) 装置の構造と主要性能

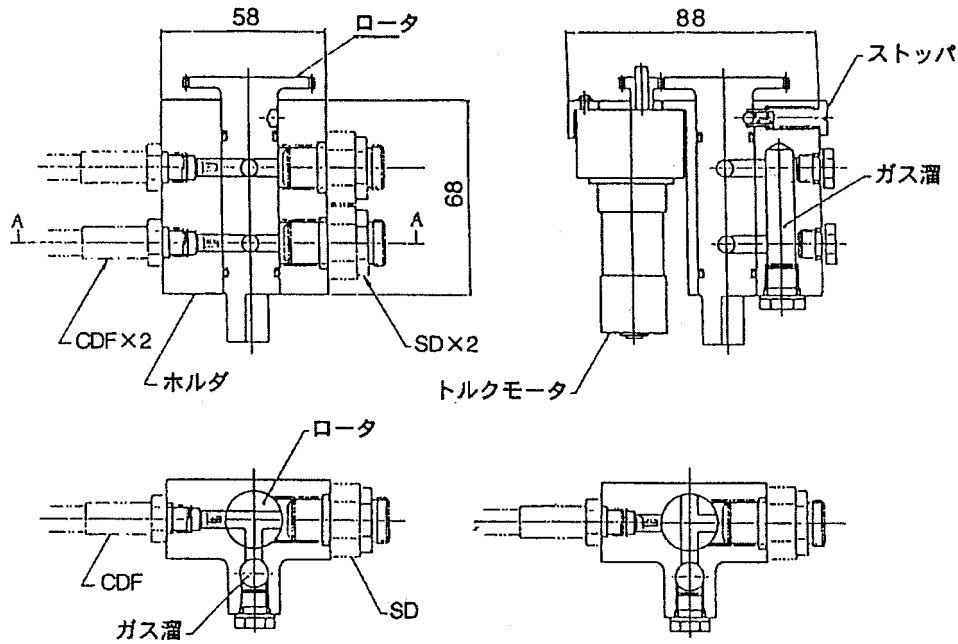


図-28 遠隔操作型機械的安全機構 (SO-RSAD)

5. 飛翔結果

5.1 主推進系各段モータの燃焼特性と真空推進性能

図-29～32にM-V-1号機各段モータの内圧履歴を示す。図中、実線は飛翔実験の結果を、破線は飛翔前予測データを示す。各段とも予測通り正常に燃焼作動したと考えられる。M-14モータの燃焼初期に圧力が著しく上昇しているのは、飛翔実験仕様のモータでは、ブーストモータの内圧が計測されているためである。また表-8に、M-V-1, 3, 4号機の各段質量データと飛翔時軌道データから推定した各段モータの平均真空比推力を飛翔前予測値と併せて示した。ただしM-V-4号機では、第1段モータのノズルスロットインサート破損事故により、第1段、第2段の比推力推定に必要な飛翔データを得ることが出来なかった。これらの推定結果は、地上燃焼試験時の拡散筒破損不具合により飛翔前予測精度が低かったM-24モータを除き、ほぼ計画通りの比推力性能が得られていることを示している。さらに、M-34モータ、KM-V1モータに採用されている伸展ノズルも正常に機能していることが間接的に判断できる。

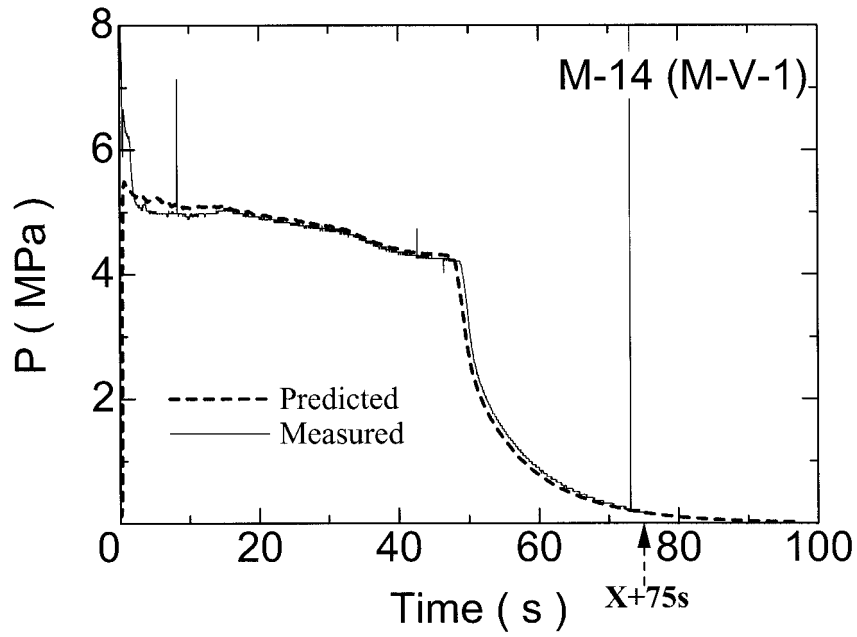


図-29 M-14モータの内圧履歴 (M-V-1号機)

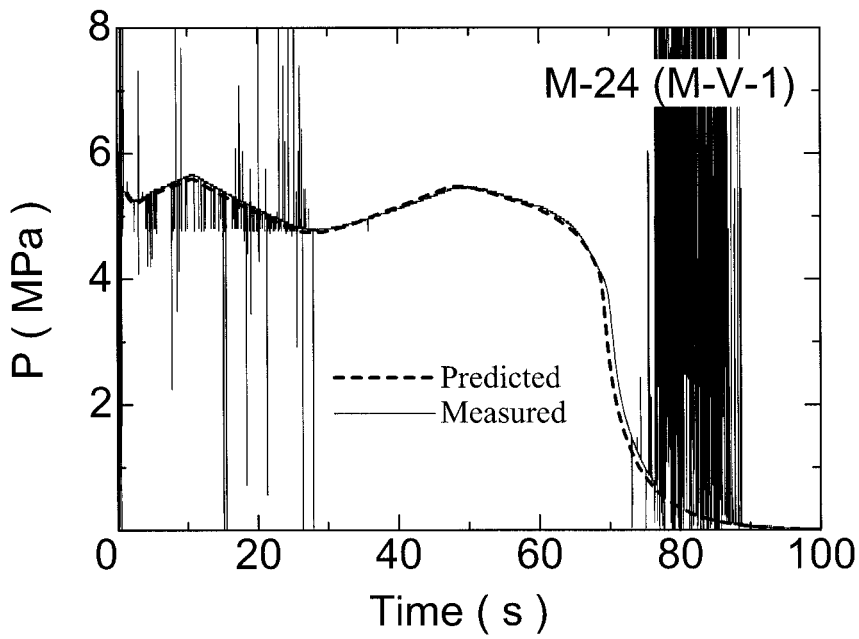


図-30 M-24モータの内圧履歴 (M-V-1号機)

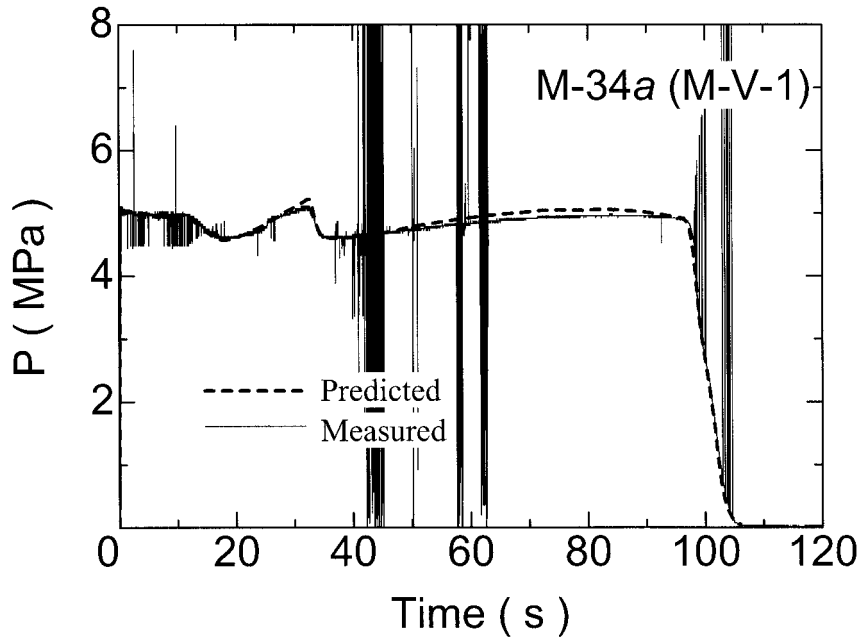


図-31 M-34a モーターの内圧履歴 (M-V-1 号機)

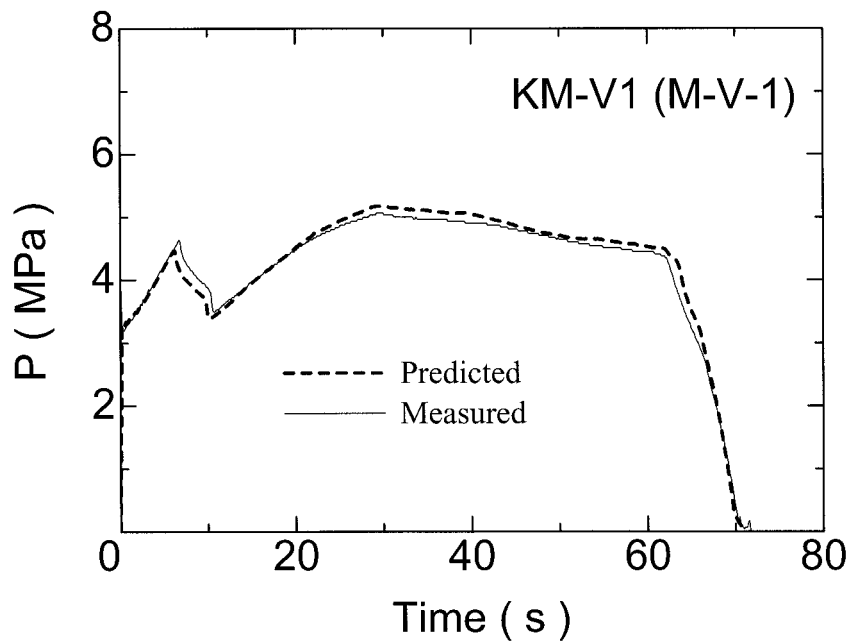


図-32 KM-V1 モーターの内圧履歴 (M-V-1 号機)

表-8 M-V各段モータの平均真空比推力 (M-V-1~4号機)

	M-14	M-24	M-34	KM-V1
飛翔前計画値	274s	287s	302s	298s
M-V-1 解析値	~274s	290.4s	301.4s	299.2s
M-V-3 解析値	~274s	289.9s	300.7s	300.1s
M-V-4 解析値	-	-	301.0s	

5.2 上段モータの残留内圧/残留推力特性

M-V-1号機では、第2~4段、M-V-3号機では第3,4段、M-V-4号機では第3段のモータ燃焼終了後の残留内圧測定が行われた。計測装置は、M-3SII型の上段モータ残留内圧測定に開発されたものを、センサのみ信頼性のより高いものに変更して用いている。

代表的な計測結果として、M-V-4号機のM-34bモータの残留内圧計測結果を図-33に示す。特にM-V-4号機では、衛星(ASTRO-E)搭載の精密加速度計を利用して、第3段燃焼後のステージ加速度が初めて高精度、高分解能で測定された。その測定結果を図-34に示す。計測されたモータ内圧と3段ステージ加速度から、それぞれ下記のように残留推力の履歴を推定する。 F_p はモータ内圧データ依存の、 F_A は加速度データ依存の推定推力を表わす。

$$F_p = C_f P A_t$$

真空推力係数 $C_f = 1.89$ (比熱比 $\gamma = 1.166, P > 0.0795 \text{kgf/cm}^2$)、 1.75 (比熱比 $\gamma = 1.29, P \leq 0.0795 \text{kgf/cm}^2$)、ノズルスロート面積 $A_t = 360 \text{cm}^2$ (燃焼後スロート径 $D_t = 214 \text{mm}\phi$ に対応)。

$$F_A = m_{B3bo} a_x$$

M-34bモータ燃焼終了後の3段ステージ質量 $m_{B3bo} = 3069 \text{kg}$ 。

これらを比較すると、図-35に示されるように良く一致する。推力レベル約100N以下の領域では、両推定データが異なる振る舞いを見せている。それぞれの計測方法の特性と計測データの推力換算分解能(モータ内圧25N、加速度1.5N)から、加速度データ依存の履歴がより真値に近いと判断されている。次号機以降、内圧計測系の信頼性を向上させた上で、再度高精度残留内圧計測と残留加速度計測を行い、確度の高い残留内圧/残留推力データの取得に努めたい。

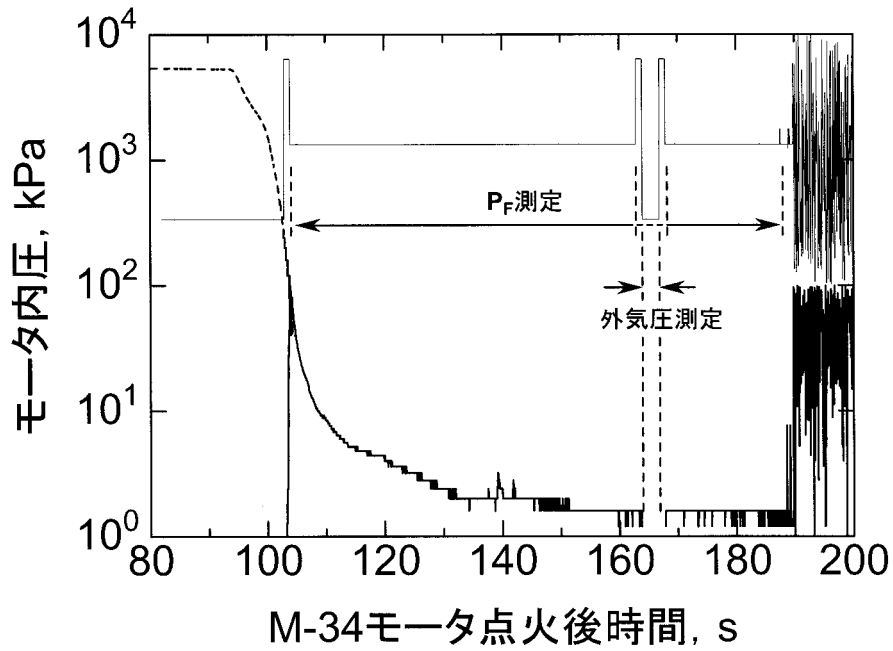


図-33 M-34b モータの残留内圧計測結果 (M-V-4 号機)

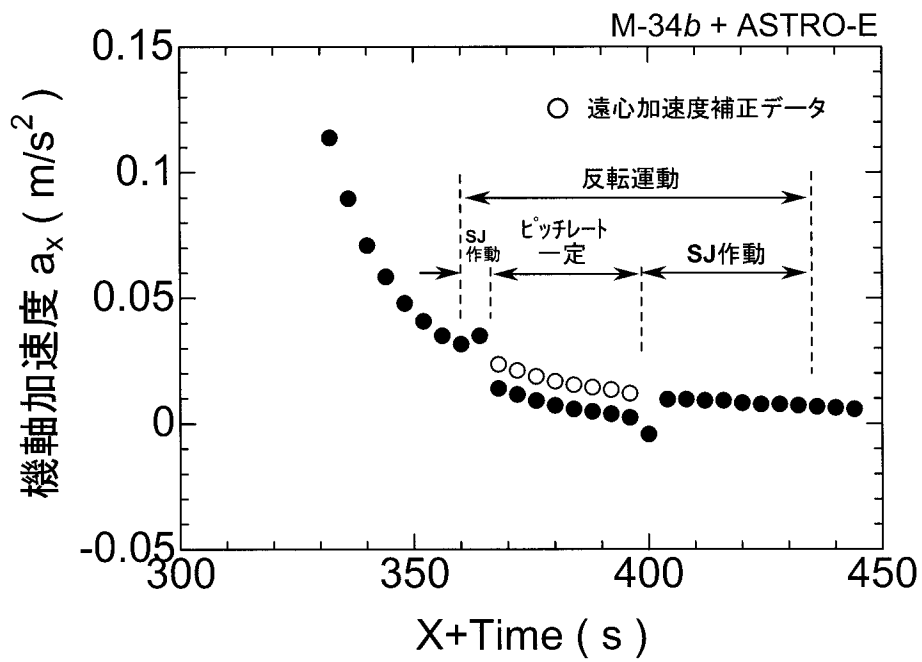


図-34 M-V-4 号機第3段階ステージ残留加速度計測結果

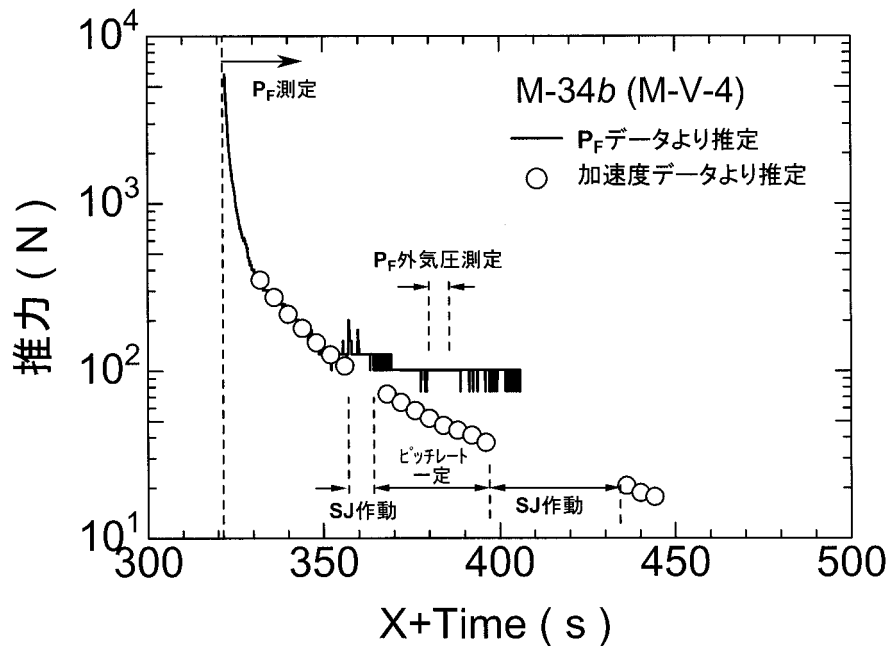


図-35 M-34b モータの残留推力推定結果 (M-V-4 号機)

5.3 補助推進系

M-V 補助推進系用の各固体モータについては、M-V-1 号機搭載の SMRC, SMSJ 用固体モータの異常燃焼不具合を除けば、M-V-4 号機まで正常に機能した。

M-V-1 号機の B1, B2 に計22基搭載されていた SMRC, SMSJ 用固体モータのうち、19基について燃焼圧力が異常に上昇する不具合が発生した。特に B2 に4基搭載されている SMSJ モータ1基については、燃焼半ばで安全弁が作動して燃焼作動が完全に中断した。しかしながら、幸いにも B1, B2 モータのロール制御、B2 モータ燃焼終了後の3軸制御は正常に行われたため大事には至らなかった。

当該事象の原因は、推進薬注型治具に塗布されていた離型材（シリコングリス）が推進薬グレイン外表面の一部に残存し、燃焼レストリクタとの接着が不完全になったため、燃焼ガスがその部分へ進入して燃焼面積を増大させたことによると推定された。この製造方法は、工数削減を意図して M-V-1 号機用の一部器材にのみ適用されたものであったため、M-V-3 号機以降の器材製造では、推進薬グレインの成型において離型材の塗布を行わず離型シートを用いる従前の工程に戻した。その後、SMRC, SMSJ モータについて不具合は発生していない。

5.4 M-V-4 号機における M-14モータのノズルスロートインサート破損事故

M-V-4 号機の飛翔実験では、B1 点火直後より M-14モータのノズルスロートインサート部材が段階的に破壊してゆき、ついにスロート部下流のノズル外壁面から燃焼ガスが噴出して、ノズル周辺に搭載されていた姿勢制御機器が焼損するという事象が発生した。その結果、B1 分離前に機体の姿勢が著しく乱れて大きな速度損失が生じたため、衛星 (ASTRO-E) を周回軌道に投入することができなかった。

このノズルスロートインサート破損不具合の進行状況を最もよく表わしているのが、図-36に示す B1 モータ内圧の履歴とそれに基づいて推定された等価スロート径の履歴である。スロート面積の拡大変化が明確に分かるほどの破損は、25.0s, 38.5s, 41.5s に発生している。特に41.5s には、スロートインサート部材がすべて脱落

したと判断できる程度にまで圧力が低下している。この約10s後、ノズル外周に配置された搭載機器の温度のデータから、ノズル外壁面に穴が開いて高温の燃焼ガスが噴出し、その後の姿勢制御機器の機能障害を引き起こしたと推定されている。打ち上げ後、発射整備塔周りで拾得された多数のグラファイト小片とランチャ滑走時の記録映像に認められる赤熱した細かい飛散物は、当該部材の破損が点火直後から開始したことを物語っている。

これまでほぼ問題なく使用されてきたグラファイト製スロートインサート部材が破壊した原因については、所外専門家を含めた関係者による調査の結果報告を受けた、宇宙科学研究所 M-V-4 号機調査特別委員会および宇宙開発委員会技術評価部会によって、当該部材の内部または表面にクラックなどの欠陥が存在した為である可能性が高いと結論付けられた。今後の対策として、M-V型ロケット各段モータのノズル設計変更を行う方針である。

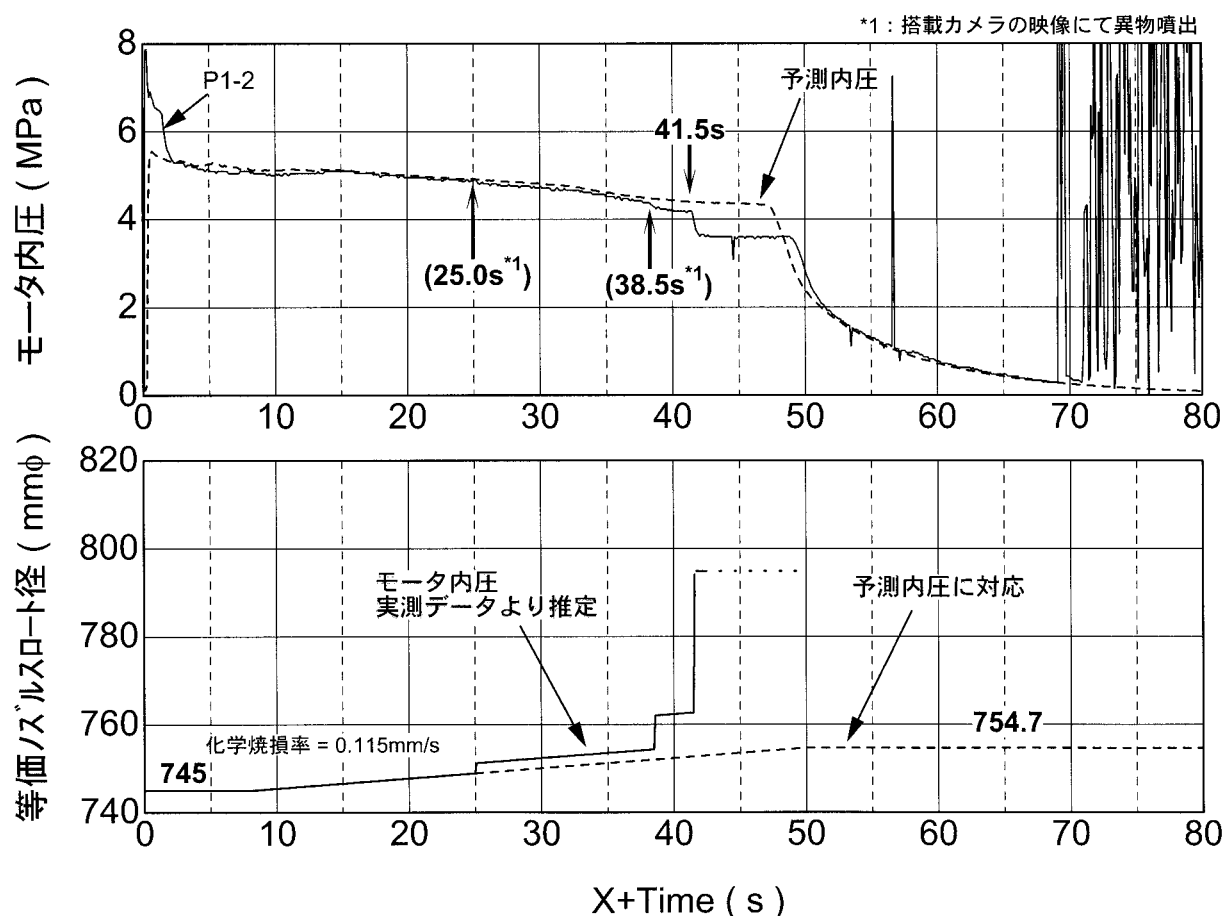


図-36 M-14モータの内圧と等価ノズルスロート径の履歴 (M-V-4号機)

6. まとめ

全段新規開発の M-V 各段モータは、M-V-1, 3, 4号機の飛翔実験が終了した現在、ノズルスロートインサート部材の破損事故に見舞われた4号機の M-14モータを除いて正常に燃焼作動した。また、補助推進系の各固体ガスジェネレータ、固体モータについては、1号機搭載の SMRC, SMSJ モータの際立った燃焼不具合を除けば、機能の健全性が確認されている。