科学観測用ロケットの発展の経過*

4. 構 造

森 大吉郎**・中 野 旭**

1. 序

わが国の科学観測用ロケットは一貫して固体推進薬を用いて来たので、その構造（切離し等の機能装置を含む）も自ら固体ロケットに則した特長を持っている。ここでは昭和30年以來の20年間の発展の経過について、“発展の経過 1、総説”¹⁾のあった区分けに従って構造の関係で特色のあるものについて述べる。

2. ペンシルとペビー

ペンシルとペビーはロケット打上げ実験の皮切りとしての意義をもつが、構造の分野では特に注目すべきものはない。ただランチング（発射）の方法について、機体に小さなスリッパを接着し、これによってレール上を滑らせて発射する実験が池田健先生²⁾によって行われ、その後のランチャ設計の基礎となっている。

3. カッパ1型から6型まで

(1) カッパ1型 (K-1) と3型 (K-3)

K-1は直径12.8 cm、長さ2.2 m、重量38 kgで、はじめて超音速で飛んだロケットであるが、構造の分野でも未開の技術の開拓に苦心が下記のように払われた。

モータ・ケース：マカロニ形状のダブル・ベース推進薬の燃焼による高温高压ガスがケースの内壁をなめるので、ケース材料にはクロモリ耐熱鋼を用いたが、それでも開発段階の地上燃焼実験で点火後1～2秒で

溶断破裂する例が相次いだ。内壁に接着貼付する断熱剤の開発に苦労の末、“渡辺式耐熱塗料”³⁾が出現し、漸くエンジンとして実用に漕ぎつけた。

尾翼：K-1-2号機で光学観測用に第1図のように発煙筒をジュラルミン製板翼に取り付けて飛ばしたところ発射後1.5秒の音速に近い速度において、尾翼が飛び散り、エンジンはタンブリングを起こして墜落した。原因は翼の遷音速曲げ振りフラッタと思われる。発煙筒による固有振動数⁴⁾の低下は第1表の如くである。

K-1-5号機からは翼にアンテナを内蔵させるため、桐板をコアに、アルミニウム合金またはステンレス鋼板の表皮をビス・接着剤で結合したサンドイッチ翼が池田先生・古田敏康君⁵⁾により設計され、生産技術研

第1図 K-1型用尾翼

第1表 尾翼の振動特性

振動形態	振 動 数					
	尾翼を胴体に取り付けた場合（飛しょう状態）				尾翼を基盤に固定した場合	
	並 型	発煙筒つき	並 型	スリットつき	並 型	発煙筒つき
曲 げ 1 次	46 cps	34 cps	117 cps	90 cps	72 cps	47.5 cps
振 り 1 次	170	72	360	205	190	89
曲 げ 2 次	205	156	510	248	238	172

* 昭和51年7月7日原稿受理 Development of Launch Vehicles for Space Observation

** 東京大学宇宙航空研究所 Daikichiro Mori and Akira Nakano

研究所の工作室で作られ無事に飛んだ。

カップ3型のメイン尾翼は空力加熱を予想してステンレス板を用いたが、三浦公亮君⁶⁾の熱計算を裏付けるように飛しょう時には最高温度 220℃ が実測された。ロケットの飛しょう時における空力加熱の国内における認識はこれがはじめてであろう。

計測：トランジスタ製抵抗線歪み計器を胴部に締め、翼面に歪みゲージを貼付して、翼の曲げ荷重と振動を計測する試みがはじめて富田文治・莊司敦君⁷⁾により K-1 および K-3 型で実施された。

ランチャ：K-1 用のランチャは定置式で1段式のレール上に機体を載せるだけの簡単な方式で、接着式スリッパを用いた。発進時の拘束が少ないので少し危惧感があったが、実際のランチャは至極正常であった。

K-3 では“tip-off”を防ぐために2段レールとし、第2図のようにブームの旋回と上下角づけを手動でハンドルとギヤで行う便利なジブ牽引式ランチャが池田健先生により設計され、日本建鉄 KK で製作された。

(2) カップ5型と6型

機体の曲げ剛性：5型では1・2段接手に翼をはめる切込みが深くあって曲げ剛性が弱く、機体曲げ振動数が 15 c/s で、ボディ・フラッタあるいはダイバーゼンスが心配された。計算では良いとなっているが、心配だといわれると実験上の裏付けも少ないので、小田原評定が2回あった。福田所長の決による実施は“総説”¹⁾に述べたとおりであるが、光学観測を担当されていた丸安隆和先生の言によると“今までで一番キレイな飛び方”であった。この実験は2段式ロケットが成立するか否かの瀬戸際であり、“神を念じて、眼をつぶって射つ”といった言葉がどこかピツタリする肌合いであった。

カップ6型は33年6月にその4号機ではじめて飛しょうが確認されたが、帰りの汽車の中で糸川先生に“34年に打上げ予定の全長の長い K-6-RS 型について

第2図 K-3用ランチャ

は、小型のフラッタ・テスト機であらかじめ試験をして見たいですね”と軽く話を交わしたが、これが運の尽きで、たちまちに案が立てられて実行に移され、10月には、白龍号による石油試掘中の秋田を避けて、水戸・大洗海岸で1/2縮尺のフラッタ・モデル機を飛ばすという破目となった。先生の新奇好みの早い決断と強い実行力とは20年後の現在も変わらないようである。この危ない実験には介添役として玉木章夫先生が来て下さった。

大洗海岸に予定日の早朝にいざ打ち上げようと出かけると、吉山巖君が“今朝方の冷え込みで推薬の温度が低い。これでは打てない”という。止むなく打上げを中止し、集まった地元消防団の方々等にお詫びした上で、町に飛んで湯たんぽを何個か買込み、その夜はこれをロケット梱包箱に入れて保温をし、翌朝漸く発射に漕ぎ着けた。総務担当の下村潤二郎事務官からは“実験主任は、熟慮していったん決めた事項は適確な理由がないかぎり軽々しく変更してはいけない”と心得をさとされた。着水予定区域の両側には沖合を通過しようとした多数の大型漁船が垣根にならぶように揃って停止して発射を待っており、区域の幅が如何にも狭く見えて心細かった。海上保安部より派遣された通信士が通信困難な沖合の巡視艇と懸命に連絡する真摯な姿に感動した。

大洗の実験の一駒だけでもこのような曲折があった訳であるが、この種の試験はその後何回か繰返されて、K-8, 9Lを経てラムダへの機体開発に寄与するところが大きかった。

4. カップ8型と9M型

モータ・ケース：K-8における構造の目玉はモータ・ケース（チャンバ）である。第3図に示す薄肉円筒容器の鋼板溶接による試作の各社への提示が34年4月で、試作品の水圧試験・納入が同8月、推薬をつめた上での秋田・道川海岸での地上燃焼試験が9月と11月、K-7に搭載しての飛しょう試験が同11月であって、そのころの vitality に富んだスピードぶりが窺える。高張力鋼の溶接部強度・真円度・真直度・断面変形・曲げ剛性・断面変化部の応力集中など未知の疑問が数多くあったが、よくこれらを克服して一発で仕上げ⁸⁾、かつこれ以後現在に至るまでの17年間に約120機、延べ200本に及ぶ溶接チャンバが実機の飛しょうにおいて一本の故障もないことは主担当メーカである三菱神戸造船所の優れた技術と強い熱意のたまものとして評価されるべきことである。

ノーズ・コーン：科学観測をより充分に実施するために上空でノーズ・コーンを2つ割りにして取り去る

第3図 直径 420 ϕ のモータ・ケース

第4図 K-8, K-9M 用ノーズ・コーン

開頭型ノーズ・コーンは K-8 から使い始めた。火薬を用いたプッシャーで結合用シヤ・ピンを切り飛ばし 30 kg ストローク 87 mm のスプリング 2 本により分離させる方式である。初使用の K-8-2 号機では、前日からセットしたスプリングがクリープしてへたったため完全な開頭ができなかったが、以降はおおむね順調な開頭が続いている。第 4 図は K-8 用とそれを改良した現用の K-9 M 用のノーズ・コーンの機構図である。

切離し：接手は K-5 の苦い経験から曲げ剛性に留意して嵌合部を充分にとったはめ合型接手を採用している。分離力には火薬を使う（第 5 図）。

機体の曲げ剛性：カップ 9 L 型は高度 300 km の記録を目指した 3 段式で細長く、一見してフラッタとダイバーゼンスが心配に見えるが、前述の大洗等のモデル・テストを事前に実施してあったので、発射時の気掛りは少なかった。第 6 図はロケット班・林紀幸君の持つ 9 L の 1/5 縮尺フラッタ・モデル機である。この経験は L-3 の設計にも生かされている。

ランチャ：K-6 は固定式（向後鉄工所製）であったが、K-8 は牽引式油圧駆動型⁹⁾（東急車輛設計製作）となった。

FRP の応用：FRP の応用についてはかねてから林毅先生に御指導をいただいて進めて来たが、ノズル・スカート部への適用などのほかに、9 M に関連してはメイン・モータ・ケースの耐熱補強にエポキシ・硝子繊維材を巻きつけたり、フェノール樹脂・硝子繊維の積層材によるノーズ・コーンの試作などを行い、この技術は後のラムダ・ミューあるいは性能向上用 1 段式ロケットへ引き継がれている。

またフィラメント・ワインディング・ケースの試作研究も植村・河田¹⁰⁾ 教授を中心に進められ、K-10 型メインに試用して好い成績を収めた。

5. ラムダ (L-2, L-3, L-3 H, L-4 S)

ラムダの構造設計の特色は、次に来るミューを念頭に置いて大型機向けの構想を中型のラムダ・サイズで試した点にある。

モータ・ケース：直径の増大 (420 から 735 mm へ) と抗張力の増加 (85 から 100 キロ鋼へ) の両者を一挙に実施した。

接手：機種発展に即応して各段接手は第 7 図に示すような変遷があり、さながら接手のデパートの観^{11, 12, 13)}がある。これらはすべて東大・日産自動車・日本油脂の共同開発である。

a. 1・2 段接手：第 7 図に示すように TNT 系の成形火薬 (shaped charge) を雷管で起爆して胴体を輪切

第 5 図 はめ合型切離接手 (K-8 1・2 段)

第 6 図 K-9 L 1/5 縮尺のフラッタ・テスト機

りにする方式である。L-4 S-3 の衛星失敗の原因に関連してこの成形火薬の薬量が多すぎて縦方向衝撃が大きいくことを指摘されたが、国内での寡少生産体制では製造設備の制約から溶断と伝爆の信頼性が低下するので薬量低減にも自ら限界があった。このため後期の L-3 H では、ラムダ上段およびミュー下段で習熟したセパレーション・ナット (第 7 図 (b)) 形式へ移行した。

b. 2・3 段接手：L-3 では第 7 図 (c) に示すようにディスク破壊型が採用された。放射状に切込みをもったネジ付きフランジ板の工作はやや面倒で、破断の衝撃も若干大きい。Scout で実用されている例もあり、作動は確実である。L-3 H, L-4 S で第 2 段直径が増大し、“静かな切離し”が要求されるに及んで、第 7 図 (b) に示すセパレーション・ナットの採用に踏

第7図(a) 全周溶断型切離接手 (ラムダ1・2段)

第7図(b) セパレーション・ナット型切離接手 (ラムダ2・3段)

詳細-A

第7図(c) ディスク破壊型切離接手 (ラムダ2・3段)

第8図 ラムダ・ランチャーと L-3 型ロケット

210 mm の S-210 型機でのミスアラインメント負荷の問題がある。

後者ではモータ燃焼末期に横加速度が増大し遂に破壊するという故障が2回相次いで起こった。機体の運動、安定、横荷重、剛性、変形、強度等の総合的解析の結果、この種の機体がミスアラインメント（機体各部の偏心）に敏感で、横加速度を発生し易い特性をもっていることが判った。

接手剛性の強化と接手数数の減少、および推進薬の緩燃速化の両対策によって本機は完成し、以後南極での観測にも愛用されるようになった。

この小型機開発の基本手法は S-310 におけるスピン・ロール共振の解明¹⁴⁾にも適用されて成果を収め高度 200 km をマークする高性能 1 段式ロケットが出現した。小型機用のランチャはユシヤ製作所により軽便な形式のものが製作されている。

7. ミュー (M-4 S, M-3 C)

ミュー計画の構造関係については総論¹⁾の他に解説 (15) (16) も出されているので、ここでは極く概略を述べる。

第9図 BT-310-1

モータ・ケース：下段にはマレージング鋼（抗張力 185 kg/mm²）を開発したのが最大の特色で抗張力が高いだけに溶接・成型・靱性・製品の純度の確保等の諸点の克服に苦心が払われた。

補助ブースタの切離し：燃焼後の補助ブースタを主モータから切離すには上部をセパレーション・ナットで結合し、下部を特殊ピンで支持する方式を採用し、セパレーション・ナットの作動で上部が外れると下部ピンを中心とした回転運動を起こし 35° まで回転すると下部も外れる仕組みになっている。第9図はこのための試験用テスト機である。

下段用切離し接手：ラムダで開発済みのセパレーション・ナットを大型化して直径 26 φ までを作り、これを 1・2 段間では 6 本用いている。

上段用切離し接手：第10図に示すマルマン・バンドとセパレーション・ナットの組合わせによる接手を開発し、これを上段用に用いた。

開傘型接手：M-4 S の改良機である M-3 C 型では特性向上のため切離し直後に下段側接手部が開く方式¹⁶⁾を開発し、上・下各段に用いた。（第11図）

第10図 マルマン型切離接手（ミュー2・3段）

第11図 開傘型切離接手 (ミュー-1・2, 2・3段)

ノーズ・フェアリング: FRP 積層材によるノーズ・コーンを M-4S に, FRP ハネカム・サンドイッチ材によるノーズ・フェアリングを M-3C に用いた。

球形モータ・ケース: M-4S ではラムダでの開発についてチタニウム合金 (Ti-2Al2Mn) の爆発成型と赤道溶接により, M-3C は 6Al-4V-Ti 材よりの削出しと赤道溶接により軽量ケースの開発が実施できた。フィラメント・ワインディング・ケースの試作とそれによる地上燃焼実験さらには K-10 型での飛ばしも行われた。この技術は発展して CFRP (カーボン)・FW・球形ケースとして M-3H のキック・モータに応用されようとしている。

ランチャ整備塔: ラムダよりさらに大型機の斜め発射であるので, 整備塔と内蔵ランチャの組合わせによるユニークな設計で, 三菱神戸造船所により製作され, 10 年間に 9 機の打上げを滞りなく行った。

8. 結 び

観測ロケットの発展の一断面として構造・強度を中心とした事項について述べたが, 主なものとしてはモ

ータ・ケース・接手・ノーズ・コーンと開頭・機体曲げ強度・剛性・翼フラッタ・ランチャ・新材料等が事項として挙げられ, それぞれが相互に関係し合いながら進歩発展を遂げてゆくところが注目される。

文 献

- 1) 森 大吉郎: 科学観測用ロケットの発展の経過 1, 総説, 航空宇宙学会誌, 24 巻 265 号, 昭 51.2.
- 2) 池田 健, 古田敏康: カッパ・ロケット 128-J 用ランチャについて: 生産研究, 9 巻 3 号, 昭 32.3.
- 3) 戸田康明: カッパ・ロケット・エンジン: 生産研究, 9 巻 3 号, 昭 32.3.
- 4) 森 大吉郎, 吉山 巖: カッパ・ロケットの振動試験結果, 生産研究, 9 巻 3 号, 昭 32.3.
- 5) 池田 健, 古田敏康: カッパ・ロケット翼の強度試験結果について, 生産研究, 9 巻 3 号, 昭 32.3.
- 6) 池田 健, 三浦公亮: 観測用ロケットの空力的加熱, 生産研究, 9 巻 11 号, 昭 32.11.
- 7) 森 大吉郎, 荘司 敦: ロケット搭載用抵抗線歪み計, 生産研究, 9 巻 4 号, 昭 32.4.
- 8) 安藤良夫: 溶接ロケット・チャンバの開発, 生産研究, 15 巻 7 号, 昭 38.7.
- 9) 森 大吉郎, 加藤 温: 8 型用ランチャ, 生産研究, 13 巻 10 号, 昭 36.10.
- 10) 植村益次, 井山向史, 白石勉孝, 野口勉宏: カッパ・ロケット用 FRP ロケット・チャンバの開発, 宇宙研報告, 9 巻 62 号, 昭 48.10.
- 11) 中野 旭, 橋元保雄: ロケットにおける接合と分離, 日本機械学会誌, 第 76 巻第 651 号, 昭 48.3.
- 12) 森 大吉郎, 中野 旭, 橋元保雄: L-4S 第 4 段接手部の構造について, 宇宙研報告, 4 巻 4 号, 昭 43.12.
- 13) 森 大吉郎, 富田文治: ラムダ・ロケット第 1 段切断に伴う衝撃について, 宇宙研報告, 4 巻 4 号, 昭 43.12.
- 14) 秋葉謙二郎, 松尾弘毅: 観測ロケットの発展の経過 (その 2), システム設計とモータの開発 (その 1), 航空宇宙学会誌, 24 巻 266.
- 15) 中野 旭, 橋元保雄: M-4S の構造強度, 宇宙研報告, 11 巻 1 号 (B), 昭 50.3.
- 16) 森 大吉郎: M-3C 型ロケットの開発, 航空宇宙学会誌, 23 巻 257 号, 昭 50.6.