

レトロモータの設計

倉谷 健治・秋葉 鎌二郎

1. 設 計

L-4 T-1, L-4 S-4 の飛しょう実験において、一度分離された第3段 500 B₃ ロケットのもえがらが上段部に接触または衝突するという事故が生じた。これは主として 500 B₃ ロケットの残存推薬の燃焼, レストリクタ, ボンディング剤がくすぶるために発生する残留推力が 500 B₃ 機体をわずかながらも加速し, いったん分離して先行している上段機体に追いついたためとみられる。

したがってこの対策を立てるには, 500 B₃ ロケットの残留推力を推定する必要があるが, 実機についてこれを測定することは設備の点で不可能であるので, 文献値をもとに, つぎのような推定を試みた。

J. A. Morris [1] は 500 B₃ とほぼ同程度の大きさの X-248 ロケットについて残留推力を実験的に求めている。その結果を図 1 に Morris として示す。Morris は時間の原点を見かけ上の燃え切り時刻にとったが, この結果を 500 B₃ にも適用しようとする, 当然時間の原点が問題となる。500 B₃ では高真空下での燃焼実験が行なわれていないので, 大気圧燃焼での燃え切り時刻+7sec から Morris の測定値にのるとした。

というのは, L-4 T-1 の加速度に関するテレメータ解析の結果によるとタイムシーケンス 129sec 以降 (大気圧下での燃え切り時刻に当る) の圧力減衰は

$$P/P_c = e^{-t/\tau}, \quad \tau = 1.6 \text{ sec} \quad (1)$$

で表わされる。大気圧下での燃え切り時刻では $P_c = 1 \text{ kg/cm}^2$, この時点での高真空下での推力はスロート面積 $A_t = 90 \text{ cm}^2$ 推力係数 $C_F = 1.55$ とすると

$$F = P_c \cdot A_t \cdot C_F = 140 \text{ kg}$$

となる。それゆえこの時点より Morris の原点まで, (1) 式にしたがって圧力が減衰し, 推力もこれに比例して減衰すると考えると, $140 \text{ kg} \rightarrow 2.3 \text{ kg}$ になるには

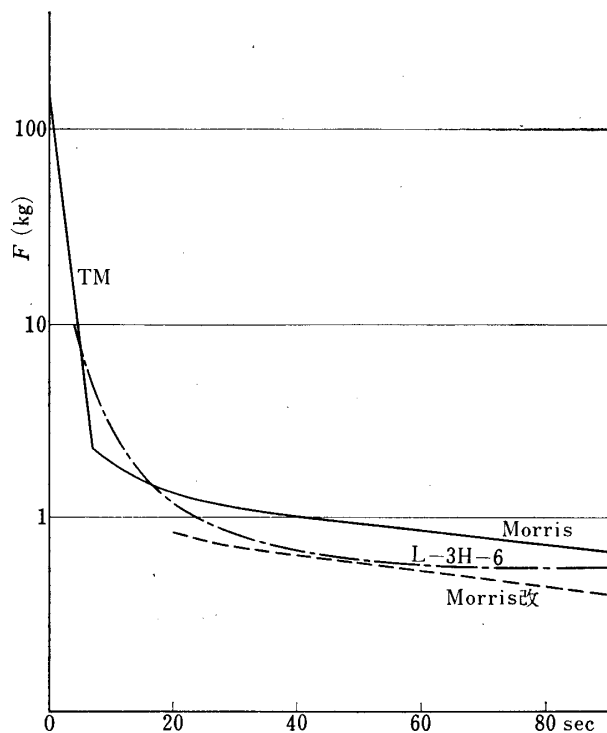


図 1

$$t/\tau=4.11$$

したがって $t=6.6\text{ sec}$ を要するからである。

次に図1の残留推力をもつロケットによる追突をさけるために、推力 F' 、持続時間 t' sec のレトロモータを付加するとし、その容量を求めよう。今 500 B₃ ロケットの残留推力を $F\text{ kg}$ とし、Morris の測定値にのる時刻を B₃ 大気圧燃え切り時刻+7 sec=136 sec

t_1 : B₃ 切離し

t_2 : レトロモータ噴射開始

t_3 : 480 S (第4段) 点火

とすると、500 B₃ が、480 S 点火までに追突しないためには、B₃ の切離しがスプリングにより相対初速 $V_0=1.5\text{ m/sec}$ で行なわれていることから

$$V_0[t_3-t_1] + \frac{1}{2} \frac{F'g}{W}(t')^2 + \frac{F'g}{W}t'[(t_3-t_1)-t'] > \int_{t_1}^{t_3} \left(\int F g dt \right) dt / W \quad (2)$$

が成立すればよいことになる。ここに W は 500 B₃ の空重量、 g は重力の加速度である。

今、この式を計画された飛しょうシーケンスにあてはめると

$$t_1=150-136=14=t_2, \quad t_3=500-136=364\text{ sec}$$

であり、図1より積分して $\int \left(\int F dt \right) dt \sim t$ の曲線を求めておけばただちに、レトロモータに要求される能力 $F't'$ が求められる。すなわち(2)式は $(t_3-t_1) \gg t'$ ゆえ

$$F't' > \frac{\int \left(\int F dt \right) dt}{t_3-t_1} - \frac{WV_0}{g}$$

となり、 $W=140\text{ kg}$ 、 $t_3-t_1=350\text{ sec}$ 、 $V_0=1.5\text{ m/sec}$ を用い

$$F't' > 117-21=96\text{ kg}\cdot\text{sec}$$

がえられる。一方採用を計画しているレトロモータはL用デスピノモータで、推薬重量と燃焼時間は、

$$W_p=300\text{ gr}, \quad t'=5\text{ sec}$$

$A_e/A_t=43.5$ 、4 torr での実測 $I_{sp}=238\text{ sec}$ 、したがって全力積 $F't'=71.4\text{ kg}\cdot\text{sec}$ であるが切離し部分の構造上の制限からノズルを短縮して $A_e/A_t=3.5$ とするため $I_{sp}=197\text{ sec}$ に低下し、したがって1個当りの全力積は $59\text{ kg}\cdot\text{sec}$ 、しかも 500 B₃ の重心位置を通る方向に噴射させる関係から、推力軸を機軸に対し 22° 傾けるので、有効な全力積は

$$59 \times \cos 22^\circ = 55\text{ kg}\cdot\text{sec}$$

となり、最低2個のレトロモータを要するという結論が導かれる。

以上で概略の設計が固まったので、Morris の実験値を実際に発生した L-4 S-4 の衝突例と比較して、その妥当性を検討することとした。今 500 B₃ の残留推力を $F\text{ kg}$ 、B₃ 空重量

を W kg とし、大気圧下での燃え切り時刻を時間の原点として、各シーケンスを表わすことにし、まず B_3 が追い付いた距離 R_1 を求めると

$$R_1 = \int_{t_1}^{t_s} \left\{ \int_{t_1}^{t_s} F g dt \right\} dt / W$$

で与えられる。ここに

$$t_1: B_3 \text{ 切離し} = 20 \text{ sec}$$

$$t_s: B_3 \text{ と } 480 \text{ S の衝突時刻} = 80 \text{ sec}$$

である。一方スプリング力によって突き離されたまま保たれる距離 R_2 は、上段部のデスピ
ンモータによる減速効果の寄与を考えると

$$R_2 = v_0(t_s - t_1) - \frac{1}{2} v_{DS} \Delta t - v_{DS} [(t_s - t_1) - (t_D - t_1)]$$

で示される。ここに

v_0 : スプリングによる相対速度

v_{DS} : デスピンモータによる減速

t_D : デスピンモータ作動終了時刻 = 28 sec

Δt : デスピンモータ燃焼秒時 = 6 sec

である。したがって $R_1 = R_2$ が成立するには、 $v_{DS} = 0$ としても、500 B_3 の残留推力は Morris の値の 63% となる。それゆえ、55 kg·sec の全力積をもつレトロモータ 4 個の安全率は

$$S. F. = 55 \times 4 / (96 \times 0.63) = 3.6$$

と L-4S-4 の衝突例からは推定される (L-4T-1 では切離し時刻が早いので今回の設計資料として利用できなかった)。また、このようにして修正した残留推力の値は図 1 中に Morris-改として示してある。

その後、L-4S-5 の飛しょう以前に L-3H-6 号機の第 3 段に精密加速度計が搭載され対数増幅器を介して 500 B_3 エンジンの残留推力が計測されたが [3]、その結果は図 1 に L-3H-6 として示されているように、上記の推定値 Morris-改ときわめてよく一致している。しかし、推力が数 kg にまで下る過程での残留推力は、 B_3 切断時刻を適当にうしろへずらせば実際上は問題とならないにしても図 1 で示すよりもっと急激に低下すると思われる。このことは推進の低圧での燃焼速度からも予見されるが、L-3H-6 の実測例でも急激な推力低下がみられることから支持される。それゆえ、大気圧下での燃え切り時刻より数 sec 間の残留推力は図 1 に示した TM 曲線ではなく、L-3H-6 の実測値を基にしたものに修正することを要するが、図 1 の推定値は、ほぼ L-3H-6 の実測残留推力を満足以説明し得たと結論できよう。

一方、60 ϕ 、110 ϕ 小型モータを大気圧燃焼させた直後にスチームエジェクタを備えた高真空系 (10^{-2} torr) につないで、実験的に残留推力を計測し、500 B_3 エンジンに換算する試みが長友によって行なわれた。その詳細はすでに報告されており [2]、Morris の実験値および L-3H-6 の実測値と相似性のきわめて良い結果がえられている。

以上で L-4S-5 用レトロモータの設計に関する記述を終えるが今後の他種エンジンにつ

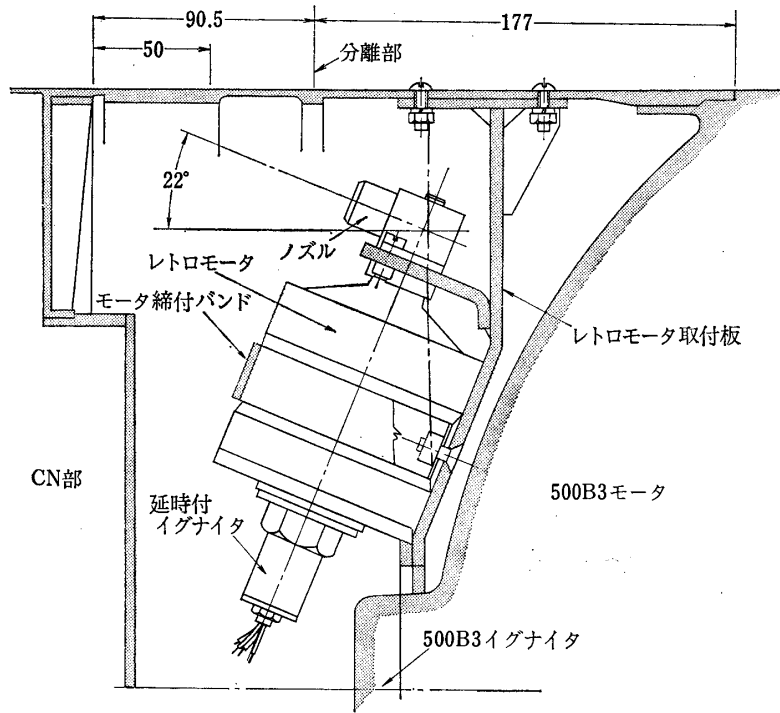
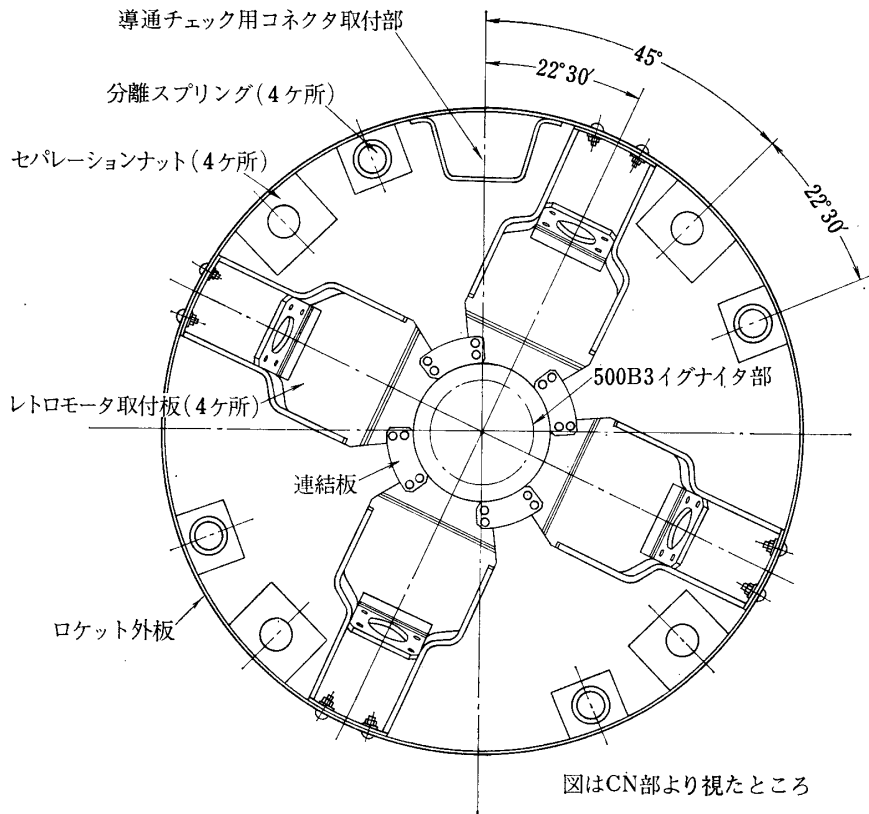


図2 レトロモータの取付け



図はCN部より見たところ

図3 レトロモータ取付板

いても残留推力を推定するためには、残留推力の発生機構を明らかにする必要がある、その一部はすでに報告 [4][5] したが、現在計算を続行中であるので別の機会に述べることにする。

2. 取付構造*

4 個のレトロモータを図 2, 図 3 に示すように 1 枚の取付板に装着し、この取付板を 500 B₃ モータの前の円筒部内にボルト締めする。

取付板は厚さ 5 mm のアルミ合金板で、モータの取付けの調整に必要な金具および補強用リブを溶接してある。500 B₃ モータの点火用ボスを避けて中央には円形の孔をあけ、500 B₃ モータケースとの間隔は最小 5 mm にとってある。

モータのノズルをつかんだフランジを取付板にビス締めし、さらにケースをバンドで固定する。取付板の 500 B₃ モータケースフランジへの固定は 6 mmφ ボルト 4 本 4 組にて行なう。

取付部の最大負荷は軸方向慣性力によるものである。

レトロモータ 1 個の重量を約 3 kg、機軸方向最大加速度を 40 G としての負荷に対する取付ボルト、取付板および円筒殻の強度を吟味しており、なお実機部品については強度試験を実施した。

強度試験はレトロモータ取付部に軸方向の荷重を加え、レトロモータ取付部および機体円筒部合計 19 点のひずみと 4 点のたわみを測定することによって行なわれたが、40 G 相当の荷重に対し、最大発生応力は 1.6 kg/mm² であり、最大たわみも 0.46 mm で強度上問題のないことが示された。

500 B₃・CN 間の切離し接手について大きな変更はないが、レトロモータ取付けに伴い、500 B₃ モータ側のフランジの長さを 50 mm 延長し、また切離し速度を増大させるために、スプリングのストロークを 20 mm 延長した。

レトロモータの取付けに伴う重量の増加は 14.5 kg と見積られる。

この改造により切断時の条件は下表のごとくなる。

	5 号	4 号
最大加速度	CN 4.3 m/sec ²	CN 4.2 m/sec ²
	B ₃ 7.6	B ₃ 8.2
ストローク	60 mm	40 mm
速度	CN 0.63 m/sec	CN 0.50 m/sec
	B ₃ 1.12	B ₃ 0.99
秒 時	0.30 sec	0.24 sec

1972 年 5 月 8 日 原動機部

* 森研担当

参考文献

- [1] J. A. Morris, ARS J., **31**, 1283(1961).
- [2] 長友信人, 荒木哲夫, 橋本保成 宇宙研報告, **7**, No. 1 (A) 34 (1971).
- [3] 林 友直 L-3H-6 メモ 1970 年 1 月 23 日付
- [4] 倉谷健治, 宇宙航行の力学シンポジウム (昭和 45 年 11 月 東大宇宙研).
- [5] 岩間 彬, 祖父江照雄, 第 14 回宇宙科学技術講演会 前刷 p. 101(1971).