

レーダによる L-4T-1, L-4S-4 号機の追跡結果

齋藤 成文・浜崎 襄二・石谷 久
関口 豊・市川 満

1. はし が き

L-4T-1 号機ロケットの総合的機能試験と共に姿勢制御、および第4段打出しの精度試験ということで、第4段の飛しょう径路を標定するために、トランスポンダを従来の第3段のほかにも、第4段にも搭載して発射された。

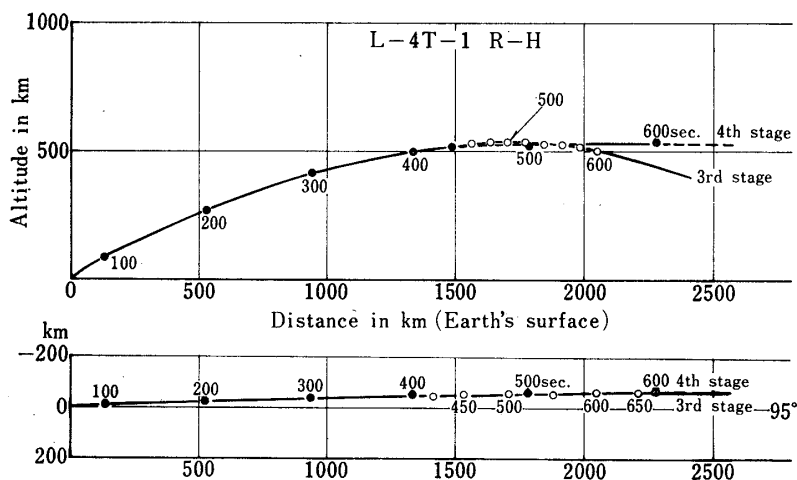
L-4S-4 号機では、従来の L-4S 型と同様、トランスポンダは第3段にのみ搭載している。

いずれにおいてもレーダは 1,680 MHz 帯のもので地上装置は従来から使用している 2mφレーダと 4mφレーダである。

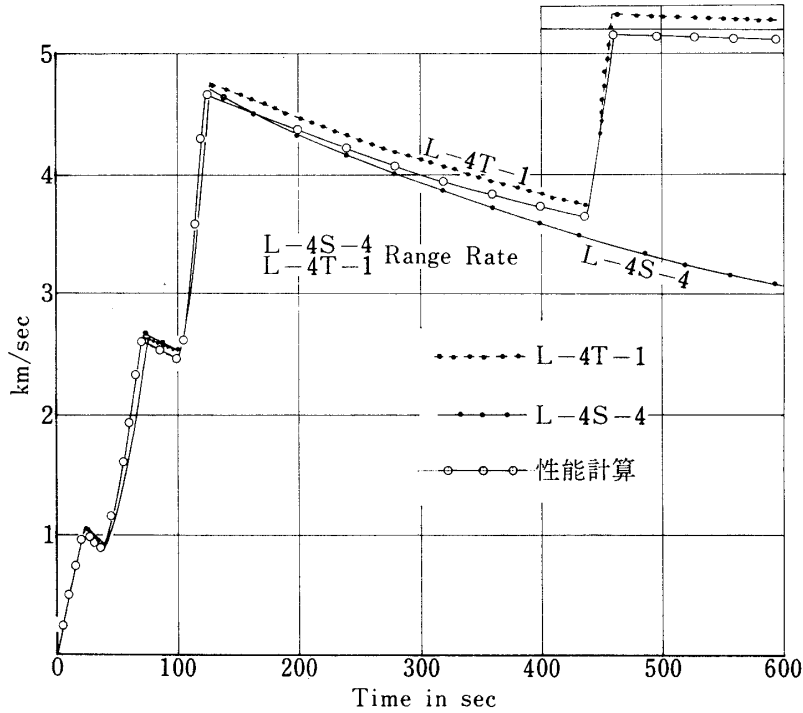
2. レーダ追跡結果

2.1 L-4T-1 号機

L-4T-1 号機は昭和44年9月3日、11時10分仰角 65.5°、方位角 94.0° で発射された。レーダトランスポンダは第3段 (CN 部) と第4段に搭載され、発射からレーダ見通し外に見えなくなるまで正常に作動した。2mφレーダは発射から見通し外になるまで第3段の追跡を正常に行なった。4mφレーダは420秒まで第3段の追跡を行ない、第4段点火時刻を予測するため、精測レーダ用のコンピュータに、デジタル変換装置を介してデータを入力しリアルタイムにデータ処理を行なった。

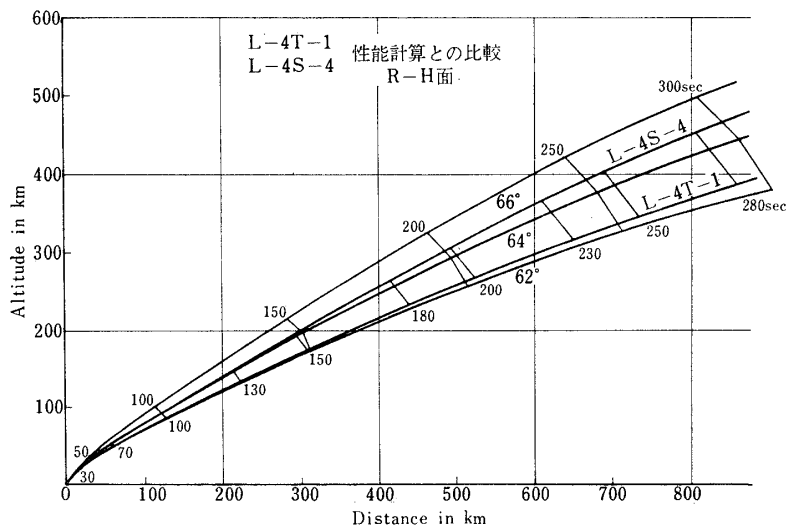


第1図 R-H面に描いた L-4T-1号機の軌跡



第 2 図 レーダから見たレンジレート

その処理された結果は、時々刻々コントロールセンタのデジタル X-Y プロッタに飛しよう径路として記録表示するとともに、数字式のディスプレイ装置には、頂点到達予想時間、頂点高度、第 4 段点火コマンド時間等を表示し、軌道投入に関する資料をリアルタイムで提供した。420 秒以後 4mφ レーダは第 4 段の追跡を行ない、以後見通し外に達するまで約 620 秒間にわたり正常に追跡した。2mφ レーダは引き続き第 3 段を追跡し、これも見通し外になるまで約 660 秒間にわたって正常であった。

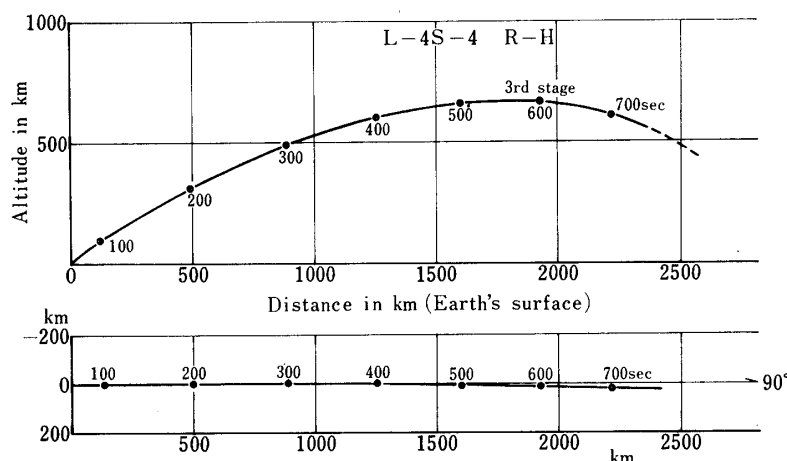


第 3 図 性能計算との比較

第1図は全体の飛しょう径路である。縦軸 R は地球表面からの高度であり、横軸としては、地球表面に沿っての距離がとってある。第2図はレーダから見たレンジレート、第3図は300秒までの性能計算との比較である。

2.2 L-4S-4号機

L-4S-4号機は昭和44年9月22日、11時10分、仰角 64.5° 、方位角 95.0° で発射された。



第4図 R-H面に描いたL-4S-4号機の軌跡

レーダトランスポンダは第3段に搭載され、 $2m\phi$ レーダと $4m\phi$ レーダの2台で第3段が水平見通し外になるまで、約785秒間にわたって正常に追跡した。

第4図は全体の飛しょう径路を示す。第2図にL-4S-4のレーダから見たレンジ・レート、第3図に300秒までの性能計算との比較が示してある。

3. 追跡結果の要約

L-4T-1は左右方向は 93° 線上で上下方向は $62.5\sim 63^\circ$ 発射角相当を非常に安定に飛しょうした。

L-4S-4は第2段までが左右方向 90° 線上、第3段からは 91° 線上を飛び、上下方向は $64.6\sim 65^\circ$ 発射角相当を安定に飛しょうした。

L-4T-1, L-4S-4に搭載されたレーダ・トランスポンダおよび地上のレーダとその付属装置は完全に作動し、所期の目的は達成された。

4. $4m\phi$ レーダの追跡データによる軌道推定

$4m\phi$ レーダによるロケットの観測データは、ロケットのスピンのによる電界強度変化とレーダのスキャンニングとのビートによる角度信号誤差と、ゴニオメータの遅れなどによるレンジの誤差等を含んでいる。ロケットがコースティングを行なっている間、ロケットの運動は、6個のパラメータで表わせる楕円軌道となり、レーダは、各段ごとにコースティング中

の角度，距離を数十秒間にわたって観測しているので，以上の誤差をある程度除いてパラメータを推定することが可能である。

レーダの誤差を平均 0 と仮定し，最小二乗誤差を評価基準として，各段ごとに軌道推定を行なった結果を第 1 表に示す。

計算方法としては，二乗誤差を最小とするパラメータを，1 次近似によって逐次計算していく Differential Correction を用いる。パラメータを \mathbf{P} 観測値を \mathbf{Z} とすると，計算のアルゴリズムは，次式に示す通りである。(文献 1)

評価関数

$$J = (\mathbf{Z} - f(\mathbf{P}))^t A^{-1} (\mathbf{Z} - f(\mathbf{P}))$$

を最小とするパラメータ \mathbf{P} を推定する。ただし， $\mathbf{Z} = f(\mathbf{P}) + \mathbf{n}$ ，(\mathbf{n} 誤差) である。まず適当な，パラメータの初期値 \mathbf{P}_0 を仮定し，

$$\mathbf{P}_{n+1} = \mathbf{P}_n + (S^t A^{-1} S)^{-1} S^t A^{-1} (\mathbf{Z} - f(\mathbf{P}_n))$$

ここに

$$S = \left. \frac{\partial f(\mathbf{P})}{\partial \mathbf{P}} \right|_{\mathbf{P}_n}$$

により， \mathbf{P}_{n+1} が十分収束するまで計算をくり返す。

誤差が平均 0 のガウス分布であり，A として，誤差の共分散行列を用いることができると，これは最尤推定となる。

\mathbf{Z} としては，4mφ レーダのレンジ，および角度データを用い， $f(\mathbf{P})$ を計算する定数と

第 1 表 L-4 T-1, L-4 S-4 飛しょう軌道

機 体 名	L-4 T-1		L-4 S-4
	3 段目	4 段目	
X 時 (UT)	9 月 3 日 2: 10		9 月 22 日 2: 10
X 時の Julian Angle deg	14. 5407		33. 2680
使用データ時間 (X+) sec	160~430	470~570	160~700
A km	4141. 143	5179. 003	4112. 746
軌道六要素			
e	0. 66631	0. 33287	0. 71031
Tp (X+) sec	-822. 812	-1326. 998	-761. 649
Ω	51. 8116	51. 4351	76. 5804
i } deg	31. 1623	31. 1473	31. 0350
ω }	289. 8423	292. 2047	285. 0449
推定最高点 時刻 (X+) sec	503. 217	527. 572	550. 767
位置 } deg	経度	148. 034	150. 189
	緯度	29. 127	28. 612
高度 km	527. 5	530. 0	661. 2
推定着水地点 時刻* sec	933. 975	1145. 034	1025. 445
位置 } deg	経度	164. 115	181. 895
	緯度	24. 615	16. 917

* 大気の影響無視

しては、*文献1の定数によった。また、地球は完全な回転楕円体と仮定した。

こうして、求められたL-4T-1第3,4段、およびL-4S-4第3段の推定軌道、およびそれから算出した最高点、着水点を、第1表にまとめて示す。

この計算に当っては、レーダの観測値における誤差の平均値は0と仮定している。また、評価基準Aとして、レンジ0.01km、角度 0.1° の分散を仮定し、これに対応する重みづけを行なった。現時点においてはこの結果が最も確からしい値を示しているが、他に飛ばしうろ徑路に関する情報としては、内之浦、沖縄、勝浦、および鹿島において観測した136MHzビーコン電波のドップラ周波数の変化がある。これらのデータと照合をとることにより、推定軌道のより正確な値を求めることができる。

5. L-4T-1号機における第4段ロケットの射出方向

第4段ロケットの射出方向は、射出時における第3段および第4段軌道上の速度の差ベクトルから算出される。第4段の推力の持続時間が十分小さくて、二つの軌道の最短距離による重力差が第4段推力に比べて十分小さいときは、これを簡単にインパルスと仮定して計算できる。

このようにして、第1表の推定軌道の差から計算した第4段ロケットの射出方向および速度増分は、第2表に示す通りである。ここに角度として示されているのは、発射時における発射地点の方位角に換算したものであり、推力をインパルスと近似したことによる計算上の誤差は、 0.01° 以内である。

第2表

	計 算 値	予定値・設定値	差
速 度 増 分(km/s)	1.820	1.720	+6%
上 下 角(度)	-17.14	-16.15	-0.99
方 位 角(度)	92.57	94.10	-1.53

角度はすべて発射地点における水平面基準による。

1972年5月8日 新設部(工学)

* 文献1. "Methods of Orbit Determination" by P. R. Escobal, John Wiley & Sons, Inc. 1965