

L-4S型ロケットのレーダによる追跡結果

齋藤 成文・浜崎 襄二・水町 守志*
亀尾 要道・関口 豊・市川 満

1. 序

本報は昭和41年9月から、昭和42年4月の間に鹿児島宇宙空間観測所において実験されたL-4S型ロケットのレーダによる航跡標定結果の概略をまとめたものである。また現在鹿児島宇宙空間観測所で使用されているレーダ地上設備とロケット搭載用トランスポンダの概略についても記してある。

2. 地上設備について

地上設備の方式および構造などの詳細は、生産研究[1]および宇宙研報告[2]に報告されているので、ここではその概略を述べる。

現在ロケット追跡用のレーダは二組使用され、いずれも1680 Mc/s帯のもので、それぞれ第1レーダ、第2レーダと呼ばれている。第1レーダは発射点より約300m後方の電波センタ内に設置され、2mφのパラボラアンテナと10kWのパルス送信機を持っている。このレーダは、道川実験場以来使用してきたGMD-1型装置の改良型として、昭和39年12月に設置されてより航跡標定に活躍している。

この装置においては、アンテナ系などのサーボ応答特性の向上、受信機の低雑音化と装置の半導体化がなされ、新型のアナログおよびデジタル記録器の使用、第2レーダとの連係動作装置の付加などにより、従来の装置より性能・信頼性の向上・取り扱い、保守の簡易化が行なわれている。

また第1レーダは外部装置のスレーブとしてコマンドアンテナ、136 Mc/s ドップラ受信機用ヘリカルアンテナ、136 Mc/s トラッキングアンテナ、18 mφ トラッキングテレメータアンテナ等の各種のアンテナを駆動することもできる。

第1レーダの追跡結果は内蔵の計算機により刻々グラフとしてえがかれ、それと並行してコントロールセンタ内にも同様のものがえがかれて、4段目の点火の時間と軌道の監視の資料となっている。

一方第2レーダは発射点側方より約2kmのレーダセンタ内に設置され、4mφのパラボラアンテナと500kWのパルス送信機を持っている。

このレーダは、昭和36年12月に道川実験場に設置され、その後鹿児島実験場に移設され航跡標定を行なっている。この装置は二次レーダ方式で6000km以上の追跡が可能であり、応答を極力急速にして各種ロケットの追跡に十分な能力を持たせてある。また二次レーダと

* 計測部

してのみならず、一次レーダとしても使用でき。その切替えは随時可能であり、地上送信周波数は切替えと同時に受信周波数に変更される。その他偏波を円偏波と直線偏波に切替えることが自動的にできるなどの特徴がある。第1レーダと同様に飛しょう径路のグラフを自動的に描き出すことが可能で、そのグラフはコントロールセンタにもプロットされるようになっている。

第2レーダも 18mφ トラッキングテレメータのアンテナをスレーブすることができる。周波数は第1, 第2レーダ共地上送信周波数は 1687Mc/s, 受信周波数は 1673Mc/s である。

第1表 トラッキングレーダ装置諸元

		第1レーダ	第2レーダ
アンテナ	反射鏡 駆動 走査 走査率 一次放射器 偏波 利得	2mφパラボラ DCプリントモータ コニカルスキャンニング 30 c/s ターンスタイル 左円偏波 22 dB (対直線)	4mφパラボラ 油圧モータ コニカルスキャンニング 12 c/s 円形導波管 水平直線-左円偏波 30 dB (円一直線)
送信部	方式 周波数 送信電力 パルス幅 繰り返し周波数	パルス変調板極管 1687 Mc/s 10 kW 1 μs 250, 267 ⁶ / ₇ c/s	パルス変調マグネトロン 2次レーダ 1687 Mc/s 1次レーダ 1673 Mc/s 500 kW 1 μs 250, 267 6/7 c/s
パラメトリック部	利得 NF 帯域幅	15 dB 2.5 dB 10 Mc/s	20 dB 2.5 dB 10 Mc/s
受信部	周波数 中間周波 総合感度	1673 Mc/s 30 Mc Band 4 Mc/s -100 dBm	1673 Mc/s 30 MC Band 3 Mc/s -104 dBm
指示部	測距最大速度 測距精度 角度追尾最大速度 角度精度	10 km 50 m Az 12°/sec EL 12°/sec 0.1°	20 km 50 m Az 50°/sec EL 30°/sec 0.06°
記録器	アナログ記録機 デジタル記録機 X-Y レコーダ	ドラム回転型ペンレコーダ シンクロシャフトドライブ 方式 R(5けた), Az(5けた), EL(4けた) 5, 10, 30 sec 毎 垂直面	16 mm シネカメラ フォトエンコーダ方式 R(6けた), Az(5けた), EL(5けた) 0.5, 1, 5, 10, 30, 60 sec 毎 垂直・水平面

いずれもパルス繰り返し周波数は 250 c/s であるが、これは距離に換算すると 600 km に相当する。したがってロケットまでの距離が 600 km になると、受信パルスは地上送信パルスとかさなってしまい、その前後数十 km の間は追跡不能になってしまう。そこでこの難点を救うために、別に $267\frac{6}{7}$ c/s のパルス繰り返し周波数（距離にして 560 km 相当）をそなえている。

すなわち 250 c/s の繰り返しを使用して、受信パルスが 600 km に接近したときに $267\frac{6}{7}$ c/s に切替え、600 km を通過したのちまた 250 c/s にもどす。以後 600 km の倍数ごとに同様な操作を繰り返すことにより最大 8400 km までは連続的に追尾することができるので、この装置では十分なものと思われる。

2. トランスポンダについて

現在鹿児島実験場で行なわれているロケット追跡には、ほとんどが二次レーダ方式（すなわちロケットにトランスポンダを搭載し、地上からの電波を受信し、増幅して電波を送り返す方式）を採用している。この方式により地上反射物とロケットの識別、一周波多段ロケット同時追尾（4 項参照）および小型地上設備による遠距離追尾などが可能になる。

トランスポンダの種類を用途別にわけると、小型用、8 L・ラムダ型用、9 M 型用およびロケットゾンデ用の 4 種類にわけられる。小型用は 70 mm ϕ 前後の小型ロケット用で、受信機は超再生検波型のもの、または直接検波型のものが使われている。

8 L・ラムダ型用は直径 150 mm ϕ で、トランスポンダ開発当初からの研究、改良の結晶であり、最も安定し、信頼性の高いものである。

9 M 型用はその計器搭載円筒部に適合するよう直径を 180 mm ϕ とし、高さを 120 mm と低くしたものである。また、それにともない内部構造の改造と受信感度の向上をはかり（第 2 表参照）、より遠距離までの追跡を目指している。

150 ϕ 型、180 ϕ 型それぞれの外観は写真 1, 2 のようなものであり、その回路構成は第 1 図のとおりである。図中の点線内の遅延回路は、一周波多段ロケット追尾用に必要なもので普通の場合には省略してある。

第 2 表 トランスポンダ諸元

	8 L・ラムダ用	9 M 用	MT ゾンデ
受信周波数 (Mc/s)	1687	1687	1673
送信周波数 (Mc/s)	1673	1673	1687
パルス幅 (μ s)	1~1.2	1~1.2	約 2
送信電力 (W)	100	100	約 5
受信感度 (dBm)	-80	-90	-40
自走周波数 (c/s)	200~230	200~230	200 前後
重 量 (kg)	3.2	3.8	1.5
直 径 (mm)	150	180	115
高 さ (mm)	155	120	360

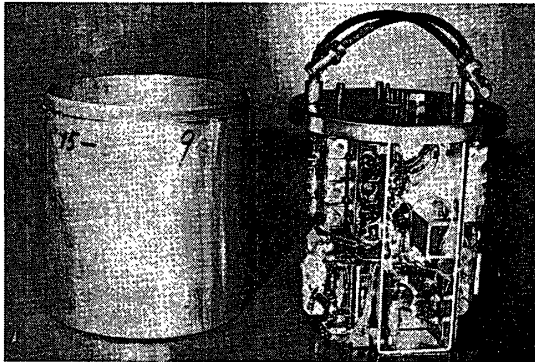


写真1 150φトランスポンダ

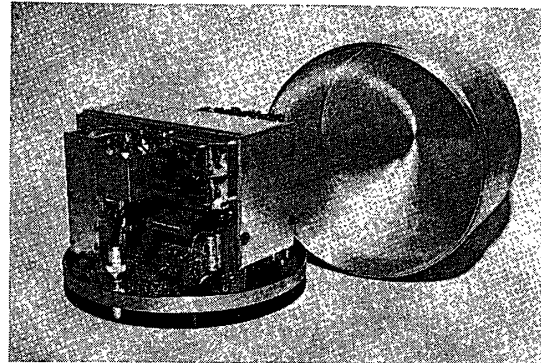
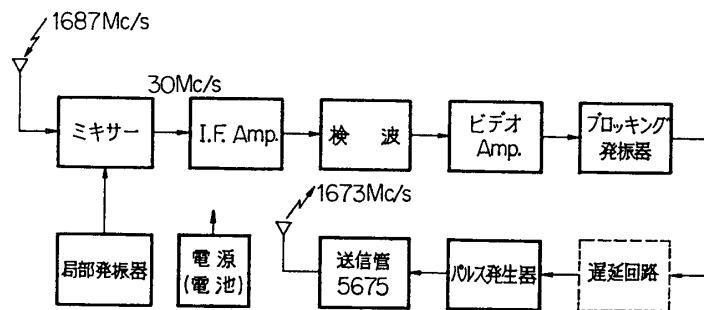


写真2 180φトランスポンダ



第1図 トランスポンダ・ブロック図

4. レーダの連係とデータ処理について

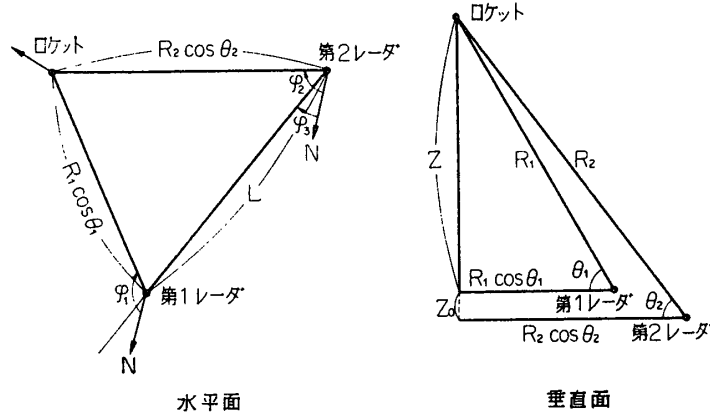
レーダ間の同期と連係 L-3H型では、第3段、第2段は別々に観測装置を搭載し、それぞれが観測を行なっている。したがって2台のレーダがそれぞれの段を追跡しなければならないが、いずれのレーダも同一送信周波数、同一パルス繰り返し周波数を使用している関係上次のような連係が行なわれている。

第1レーダは第2レーダから 15 kc, 250 c/s, $267\frac{6}{7}$ c/s の同期信号を有線で受け、それに同期させる。

第1レーダの原点は第2レーダから送信されたパルスが第1レーダに着いた瞬間を零点 (0 km) とする。

L-3H型ロケットの場合、第1レーダは2段目、第2レーダは3段目のロケットを追跡する。3段目のトランスポンダには 50~100 μ s の遅延回路を入れ、それぞれのトランスポンダからの返信パルスの位置の差により、最初から 2, 3 段目の識別ができるようにしてある。

トランスポンダの同期を取るための地上送信は、原則としてどちらか一方が送信する。第1レーダは送信電波のビーム幅が広いので、最初は第1レーダで送信してトランスポンダの同期を取り、第2レーダが目標を完全に補捉してから、第2レーダが送信するようにしている。2段目、3段目の切断が行なわれ、3段目の加速が行なわれると、両者の飛しょう径路は次第にくずれてくる。したがって3段目を追跡している第2レーダでは、2段目の同期を



第 2 図 補正計算用レーダ関係位置

とることが困難になるので、第 1 レーダも送信を再開する。

原点の補正

トランスポンダに遅延回路が入っている場合の補正はもちろんであるが、そのほかに 2 台のレーダが相互に離れた地点で同時観測している場合、一方が送信し他方が受信のみを行なっているときには、送信を行なっているレーダの測距は、正しい指示値であるが、受信のみを行なっているレーダの測距は、その指示値が見掛けの距離になる。しかしレーダ間の同期が上記のように完全に行なわれている場合には、次のような簡単な式により補正できる。

第 2 図は補正計算するための各レーダの関係配置図である。

第 1 レーダ送信、第 2 レーダ受信のみの場合の補正式

- 第 1 レーダ：指示値そのまま
- 第 2 レーダ

$$R_2 = \frac{1}{2} \frac{(2R - L)^2 - L^2 - Z_0^2}{(2R - L) - L \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_3) - Z_0 \cdot \sin \theta_2}$$

第 2 レーダ送信、第 1 レーダ受信のみの場合の補正式

- 第 2 レーダ：指示値そのまま
- 第 1 レーダ：

$$R_1 = \frac{1}{2} \frac{(2R + L)^2 - L^2 + Z_0^2}{2R + L - L \cdot \cos(180 + \varphi_3 - \varphi_1) - Z_0 \cdot \sin \theta_1}$$

R_1, R_2 ; 第 1 レーダおよび第 2 レーダの真の直距離 (km)

θ_1, θ_2 ; " " の高度角 (度)

φ_1, φ_2 ; " " の方位角 (度)

L ; " " 間の距離 (2.19 km)

Z_0 ; " " 間の高度差 (0.09 km)

R ; " " の見掛けの直距離 (km)

φ_3 ; " " 間の位置補正角 (24.3°)

データの処理について

2 台のレーダ記録装置より読み出したデータをロケット機種により必要に応じて 0.5, 5,

10 秒間隔のデータとして計算機用テープにせん孔し、電子計算機 HIPAC 103 で飛しょう径路の計算を行なっている。

データのばらつきをならすため、現在多項式最小二乗法によるスムージングを行なっている。すなわち等時間間隔のデータを用いて、7 点、3 次式近似で中間の 4 点目の値を決定し次に最初の 1 点目を捨てて 8 点目を読み込み、そのスライドしたデータの 2 点目から 8 点目の 7 個のデータから 5 点目を決定する。以下同様の操作を繰り返してスムージングを行なっている。

このようにしてならされたデータによって直角座標系と極座標系の二系統の計算が行なわれている。

直角座標系は発射点中心における直角座標表示で、ロケットの性能および飛しょう状態を解析するのに便利である。

極座標系はレーダを地球中心座標に変換し、地球の楕円補正を行なって緯度、経度および高度の算定をするものである。これはロケット搭載計器の観測資料の解析に便利のためである。

5. L-4S 型ロケットの航跡標定結果

L-4S 型ロケットの追跡結果の概要は第 3 表にまとめてある。

L-4S 型は 4 段式ロケットであるが、レーダトランスポンダは第 3 段目までの軌道の監視と、第 4 段目の点火の位置と時間を決定するための資料をうることを役目としている。

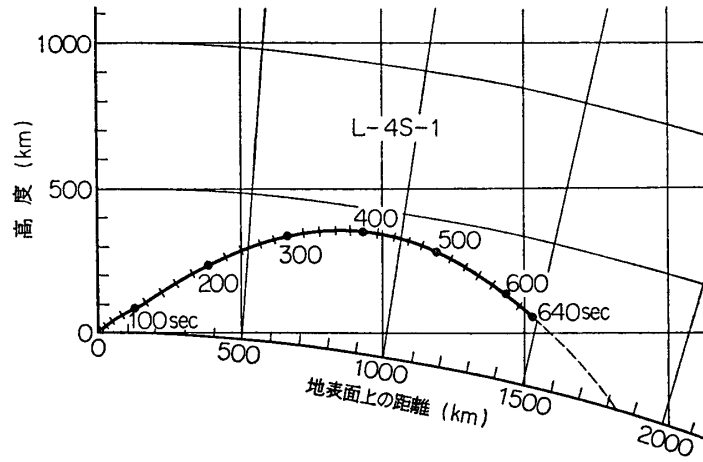
飛しょう中のロケットの状態および性能がどうなっているかを知るために、あらかじめ飛しょう性能計算の結果をグラフに記入しておき、計算値の何度発射相当の飛しょうをしているかが直ちにわかるようにしてある。

L-4S-1 号機

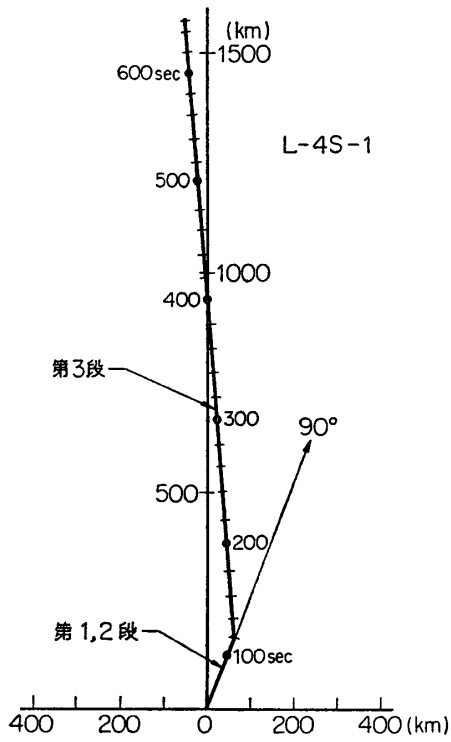
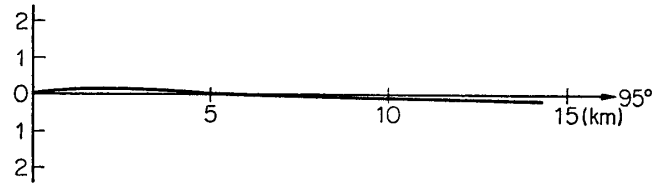
1 号機は昭和 41 年 9 月 26 日、11 時 58 分に風の影響を考慮して仰角 66°、方位角 95°で発射された。レーダトランスポンダは発射 20 分前に電源を入れて点検され、何の異常もな

第 3 表 L-4S 型追跡結果概要

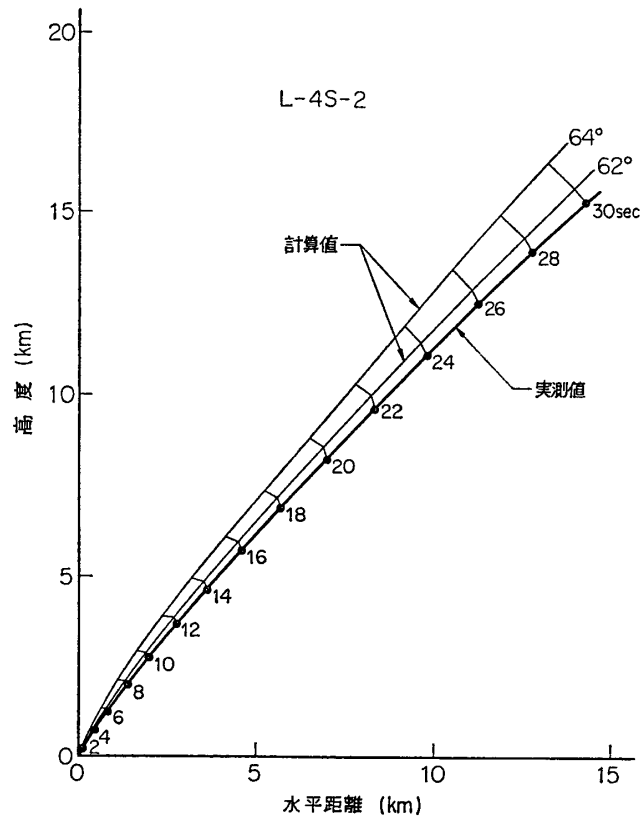
ロケット名称	打上げ 年月日 時 分	天 候 ランチャー点 風向, 風速 (m/s)	発 射 仰 角 方位角 (Deg)	頂 点			着 水 点		備 考
				時間	高度	水平 距離	時間	水平 距離	
L-4S-1	41.9.26	晴 NW 2	66	sec	km	km	650	1518	3 段目 レーダ正常
	11:58		420	418	925.6				
L-4S-2	41.12.20	くもり E 0.5	62	470	468.4	1508.9	610	2021	3 段目 レーダ正常
	11:20		95						
L-4S-3	42.4.13	くもり N 3	64	260	203.5	472.9	454	864.8	レーダ正常 3 段点火せず
	11:40		100						



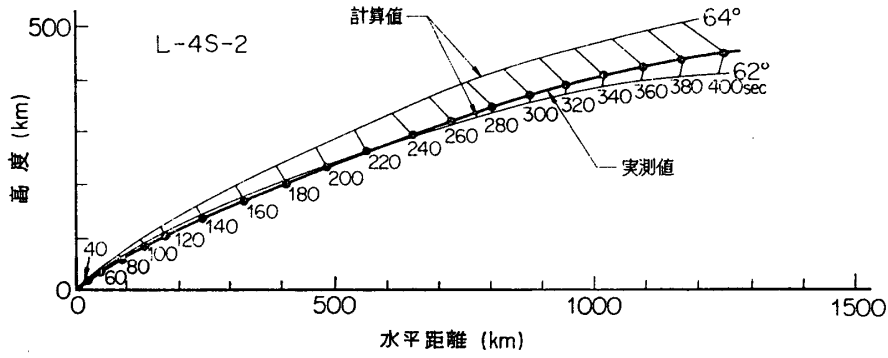
第 3 図 L-4S-1 号機飛しょう径路



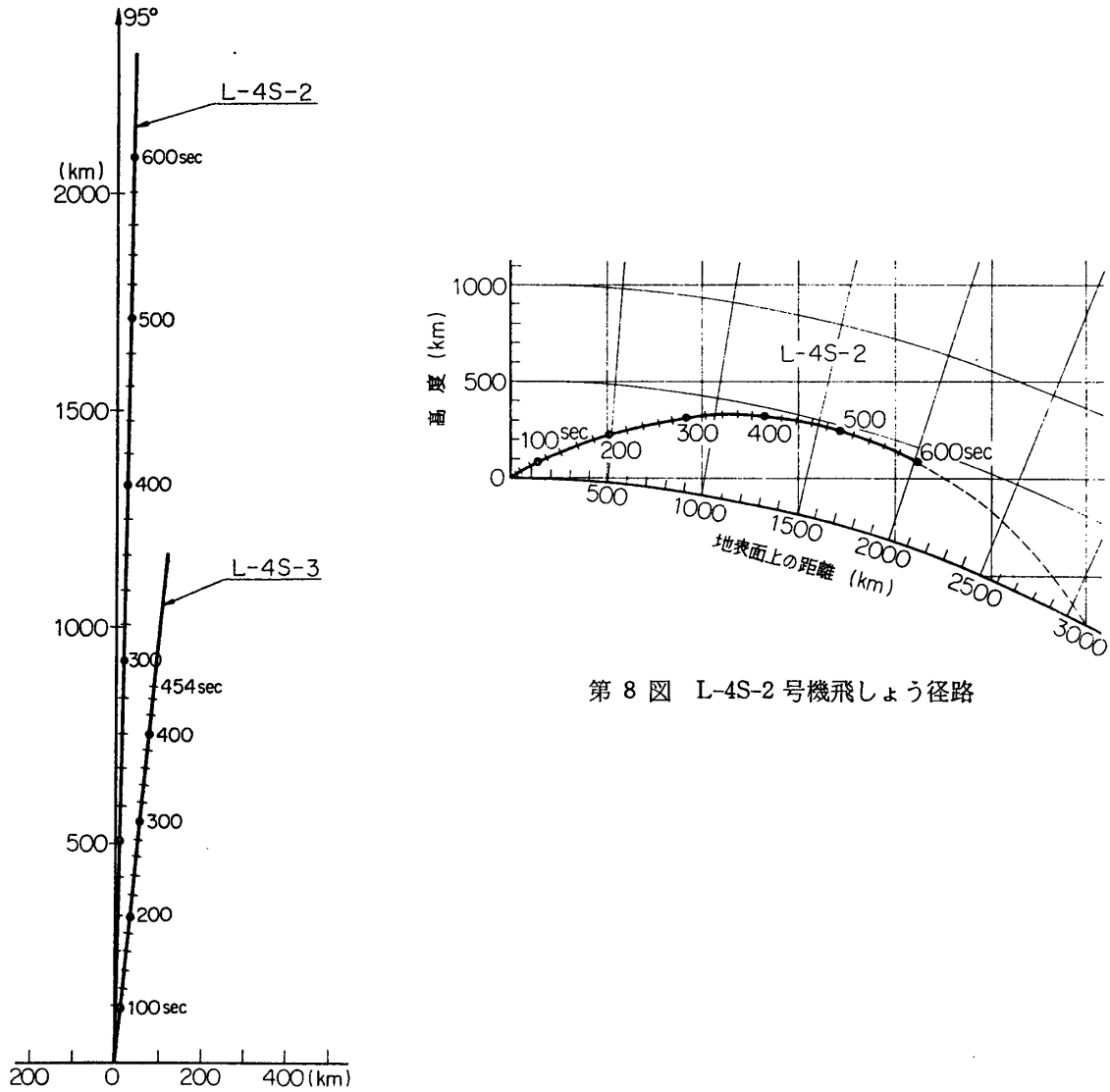
第 4 図 L-4S-1 号機飛しょう径路 (水平面内)



第 5 図 L-4S-2 号機飛しょう径路



第 6 図 L-4S-2 号機第 2, 3 段飛しょう径路



第 8 図 L-4S-2 号機飛しょう径路

第 7 図 L-4S-2, 3 号機飛しょう径路 (水平面内)

く発射された。発射後もトランスポンダは正常に作動し以下のような追跡結果が得られた。

第 1 段、第 2 段は正常に飛しょうし、予定の 68° 発射角相当と方位角 90° 線の軌道に乗った。しかし第 3 段目の切断から北へ約 20° 上下方向では上に約 10° の方向変化を示しそのまま飛しょうした。レーダは 650 秒距離 1520 km のところまで追跡しその後は見通し外になった。

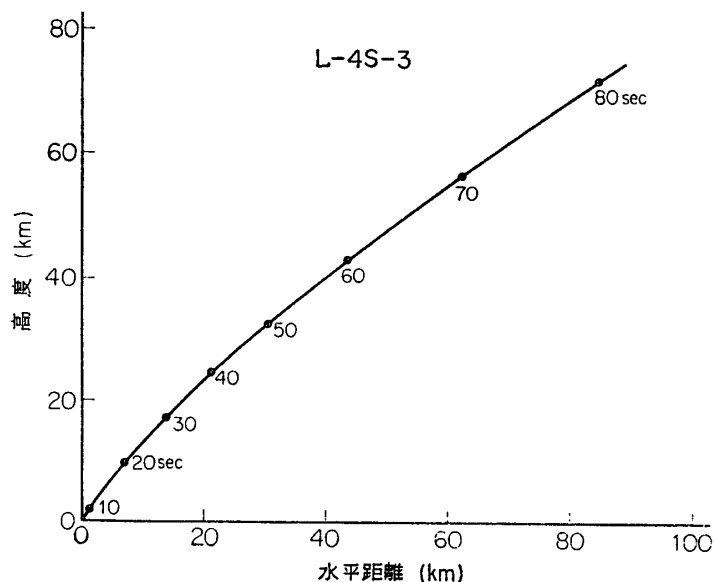
第 3, 4 図に 1 号機の垂直面、水平面の航跡がおのおのえがかれている。

L-4S-2 号機

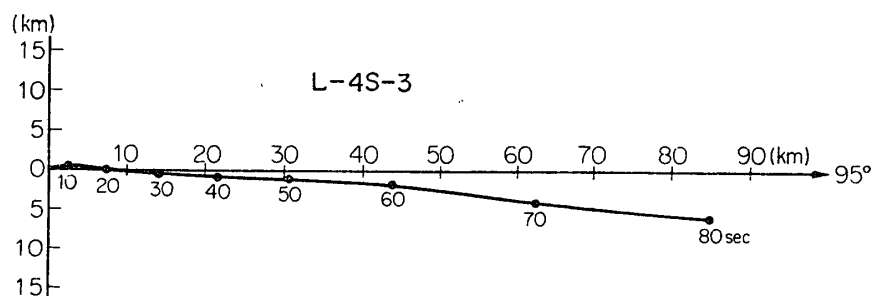
2 号機は昭和 41 年 12 月 20 日、11 時 20 分に仰角 62° 、方位角 95° で発射された。

飛しょう中のレーダトランスポンダは正常であった。その結果によると、第 1, 2 段目は風の影響で予期したとおり仰角 61° 、方位角 95° の発射角相当の飛しょう径路をたどりのち、次第に回復して第 3 段目は予定どおり燃焼終了後で 62° の発射角相当になり何の支障もなく飛しょうした。

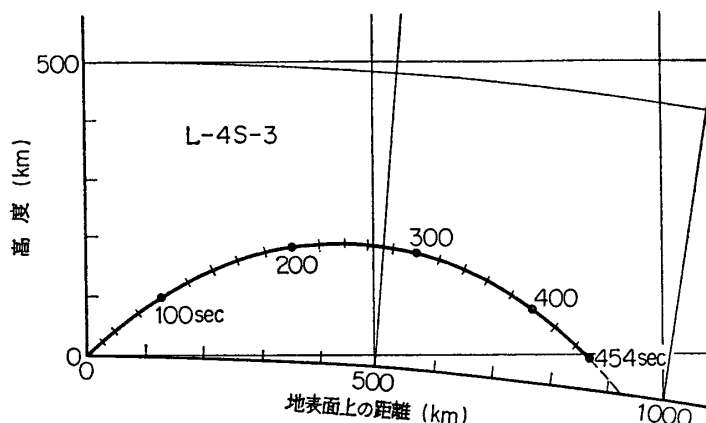
第 5 図に第 1 段目の飛しょう径路、第 6 図に第 2 段、第 3 段目の飛しょう径路がえがかれ



第 9 図 L-4S-3 号機飛しょう径路 (垂直面内)



第 10 図 L-4S-3 機飛しょう径路 (水平面内)



第11図 L-4S-3号機飛しょう径路

ている。第7図は水平面上の航跡であり全航跡は第8図にえがかれている。

L-4S-3号機

3号機は4月6日の予定であったが天候の都合により延期され昭和42年4月13日、11時40分に風の影響を考慮して仰角 64° 、方位角 100° で発射された。

発射予定時刻は11時10分でトランスポンダはチェックのため15分前に電源を入れ準備は完了した。しかし航空保安の関係で20分延期して発射された。

第1, 第2段目は仰角 66° 、方位角 97° の発射角相当の予定の航路を正常に飛しょうし、トランスポンダも正常に作動した。しかし第3段目の点火に失敗したため、第2段目の航跡をえがきながら内の浦から940 km沖の海上に落下した。

第9, 10図に2段目までの航跡図、第11図に全体の飛しょう航跡がえがかれている。

6. 結 び

鹿児島実験場から発射されたL-4S-1号機から3号機までのレーダによる航跡標定結果を報告した。

現在鹿児島で使用されている2台のレーダの測距装置の改造も終り、おのこのレーダの付加装置も大体完成した。また2台のレーダの連係動作も安定に動き、2台のレーダによる同時追尾も完全に成功した。

全般的に見てレーダとしては何の問題もなく非常に良好な結果を収めた。

1968年10月30日 宇宙工学

参 考 文 献

- [1] 生産研究, Vol. 13 No. 10, Vol. 15 No. 7, Vol. 16 No. 11 各観測ロケット特集号
- [2] 宇宙研報告, 第2巻第1号(B) 観測ロケット特集号
宇宙研報告, 第3巻第1号(B) 観測ロケット特集号