

# 1969 年度第 1 次実験

## L 型ロケットの軌道追跡について

野 村 民 也・石 谷 久・関 口 豊  
田之頭 昭 徳・前 田 行 雄

### 1. 序 (目的)

1969 年 8 月, 9 月に行なわれた, L-4T-1, L-4S-4, M-3D-1 号機の飛しょう実験における軌道追跡は, 4mφ または精測レーダによる, 直距離および角度追尾, 沖縄, 内之浦, 勝浦 3 局による 136 MHz ビーコン電波のドップラ周波数, および 18mφ アンテナによる TM の角度追尾等の観測に成功した. 特に運動方程式が簡単に表わせる自由飛しょう時の弾道軌道については十分な観測データが得られているので, すべての情報を用いて弾道軌道の推定を行なえば, かなり精度よく軌道が求められることが期待される. そこで,

- 1) すべての情報を用いて最も確からしい軌道推定を行なう.
- 2) その結果から地上各装置の精度, 誤差等の性質を明らかにし, また, 搭載計器も含めた観測系の誤差を求める.
- 3) 弾道軌道 飛しょう中の機体の運動 (特に微小変動), 各種 event の検討を行なう.

以上のことを目的とした, 総合的なデータ処理法, およびその結果を報告する. これは, あくまでもオフラインのデータ処理として, 最も確からしい運動解析を行なうことになるが, この結果から全体のシステムの誤差が明らかになれば, オンラインで軌道を推定する必要がある場合も, 2, 3 の項の結果からこれらの外乱を除く処理法を検討することも可能になり, そのための誤差解析の第 1 歩としても必要なことと考えられる.

これは, 第 1 図の, ブロック ①, および, ④', ②の途中までを行なっているものと考えられ, 将来④まで完了することを目的とする.

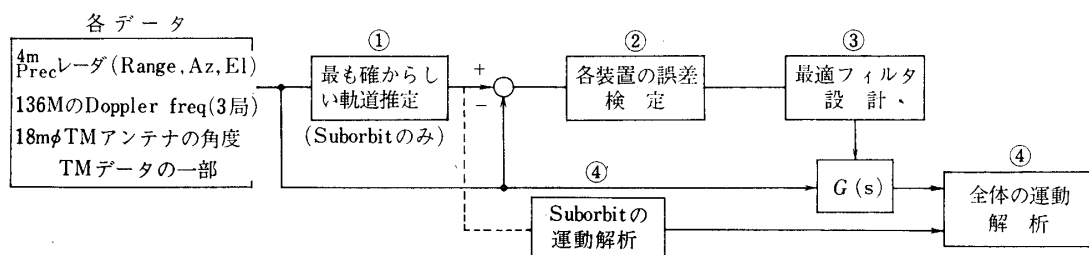


図 1 データ処理流れ

## 2. 搭 載 計 器

SES ノート参照

このうち、軌道決定に用いるか、検討をした機器は次のとおりである。

- 1) 1680 MHz レーダトランスポンダの 4mφ レーダによるレンジ、角度追尾データ\*
- 2) 136 MHz ビーコン電波の沖縄、内之浦、勝浦によるドップラ周波数観測データ
- 3) 300 MHz パイロット電波の 18mφ TM アンテナによる角度データ
- 4) CN の TM データによるスピンの (回転角)

## 3. 生データ (略)

SES ノート参照

## 4. 軌 道 推 定

### 4.1 推 定 法

ロケットに推力のない、いわゆる自由飛しょうにおいては、外力は重力による中心力のみであるから、その軌道はよく知られているように、楕円軌道となり、運動は簡単に六つのパラメータで表現される。

したがって追尾データが誤差を含んでいても、ある程度の誤差の性質に関する仮定を行えば、一般のパラメータ推定の手法により軌道パラメータを推定することが可能になる。

一般にパラメータを  $m$  次元ベクトル  $\mathbf{P}$  で表わすときその推定値は次のアルゴリズムにより、求めることができる [1].

今、 $\mathbf{P}$  から計算される観測推定値を

$$\mathbf{y} = \mathbf{f}(\mathbf{P}) \quad (1)$$

実際の観測値を

$$\mathbf{Z} = \mathbf{f}(\mathbf{P}) + \mathbf{n} \quad (2)$$

とする。

ここに  $\mathbf{y}, \mathbf{Z}, \mathbf{n}$  は、おのおの  $n$  次ベクトル ( $n \leq m$ ) で  $\mathbf{n}$  は観測の誤差を表わすものとする。推定の評価基準として、最小 2 乗評価を考え、次の評価関数、

$$J = (\mathbf{Z} - \mathbf{f}(\mathbf{P}))^t \mathbf{A}^{-1} (\mathbf{Z} - \mathbf{f}(\mathbf{P})) \quad (3)$$

を最小とするパラメータ  $\mathbf{P}$  を推定する。

(2) より

$$J = \mathbf{n}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{n}$$

であるから、 $\mathbf{n}$  が平均  $\mathbf{0}$  の (多次元) ガウス分布に従い  $\mathbf{A}$  が  $\mathbf{n}$  の共分散行列であれば、 $-J$  は、 $\mathbf{P}$  の対数尤度関数となり、最尤推定と一致する。

推定アルゴリズムは、Newton 法にもとづき、固定した  $\mathbf{P}_0$  の回りで、 $\mathbf{y}$  を展開し、第 1 次近似式を

$$\mathbf{y}(\mathbf{P}) = \mathbf{f}(\mathbf{P}_0) + \partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{P} |_{\mathbf{P}_0} (\mathbf{P} - \mathbf{P}_0) \quad (4)$$

とする。適当な  $\mathbf{P}_0$  を仮定し、(4) を仮定すると、観測値  $\mathbf{Z}$  を得たとき、(3) を最小とする  $\mathbf{P}$  は、

---

\* 角度データはスムージングされたものを用いる。

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_0 + (\mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} (\mathbf{Z} - f(\mathbf{P}_0)) \quad (5)$$

で与えられる。ここに  $\mathbf{S}$  は、 $(n \times m)$  次行列で  $S_{ij} = \partial f / \partial p_i$  で表わされ、

$$\mathbf{S} \triangleq \partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{P} | \mathbf{P}_0 \quad (6)$$

により定義される。以下(5)が収束するまで  $\mathbf{P}$  を新しく  $\mathbf{P}_0$  として計算を繰返す。

このようにして推定したパラメータ値  $\mathbf{P}_e$  の期待値、および分散の期待値は、次のようにして求められる。

いま、 $\mathbf{P}$  の真値を  $\mathbf{P}_0$ 、(3)を最小とする  $\mathbf{P}$  を  $\mathbf{P}_e$  ((5)が収束した値) とし、 $\mathbf{P}_0$  の付近、 $\mathbf{P}_0$  と  $\mathbf{P}_e$  の範囲では1次近似により  $\mathbf{y}$  が表わせるとする。(4)、(3)より  $\mathbf{P}_e$  に関しては、

$$[\mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S}]^{-1} \mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} (\mathbf{Z} - f(\mathbf{P}_e)) = 0 \quad (7)$$

が成立し、線形近似の仮定(4)より

$$\mathbf{Z} = f(\mathbf{P}_0) + \mathbf{n} = f(\mathbf{P}_e) + \mathbf{S}(\mathbf{P}_0 - \mathbf{P}_e) + \mathbf{n} \quad (8)$$

と表わせるので、

$$(\mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \{\mathbf{S}(\mathbf{P}_0 - \mathbf{P}_e) + \mathbf{n}\} = 0$$

$$\therefore \mathbf{P}_e = \mathbf{P}_0 + (\mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{n} \quad (9)$$

(9)より  $\mathbf{P}_e$  の期待値は

$$E(\mathbf{P}_e) = \mathbf{P}_0 + (\mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} E[\mathbf{n}] \quad (10)$$

となるので

$$E(\mathbf{n}) = 0 \quad (11)$$

であれば、 $\mathbf{P}_e$  は  $\mathbf{P}_0$  の不偏推定量である。すなわち  $E(\mathbf{P}_e) = \mathbf{P}_0$  となる。

また、

$$\begin{aligned} & E((\mathbf{P}_e - \mathbf{P}_0)(\mathbf{P}_e - \mathbf{P}_0)^t) \\ &= E[(\mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{n} \mathbf{n}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S} (\mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S})^{-1}] \\ &= (\mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} E(\mathbf{n} \mathbf{n}^t) \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S} (\mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S})^{-1} \end{aligned} \quad (12)$$

であり、

$$E(\mathbf{n} \mathbf{n}^t) = \mathbf{A} \quad (13)$$

であれば

$$E((\mathbf{P}_e - \mathbf{P}_0)(\mathbf{P}_e - \mathbf{P}_0)^t) = (\mathbf{S}^t \mathbf{A} \mathbf{S})^{-1} \quad (14)$$

が推定パラメータの共分散行列の推定値を与える。

一般に

$$E(\mathbf{n} \mathbf{n}^t) = \mathbf{C} \quad (15)$$

とすれば、

$$E((\mathbf{P}_e - \mathbf{P}_0)(\mathbf{P}_e - \mathbf{P}_0)^t) = (\mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{C} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S} (\mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S})^{-1} \quad (16)$$

となる。

観測誤差  $\mathbf{n}$  の推定は、このデータからは不可能である ( $E(\mathbf{n}) = 0$  となる推定値  $\mathbf{P}_e$  を得る) が、分散は次のようにして推定される。

いま、誤差  $\mathbf{n}$  の分散を推定するために、

$$\Sigma \triangleq (\mathbf{Z} - f(\mathbf{P}_e))^t (\mathbf{Z} - f(\mathbf{P}_e)) \quad (17)$$

なる量を考える.

$$\begin{aligned} E(\Sigma) &= E[(\mathbf{n} + S(\mathbf{P}_0 - \mathbf{P}_e))^t (\mathbf{n} + S(\mathbf{P}_0 - \mathbf{P}_e))] \\ &= E(\mathbf{n}^t \mathbf{n}) - 2E[\mathbf{n}^t S(\mathbf{P}_e - \mathbf{P}_0)] + E[(\mathbf{P}_0 - \mathbf{P}_e)^t S^t S(\mathbf{P}_0 - \mathbf{P}_e)] \end{aligned} \quad (18)$$

(9) より

$$\begin{aligned} \begin{cases} E[\mathbf{n}^t S(\mathbf{P}_e - \mathbf{P}_0)] = E[\mathbf{n}^t S(S^t A^{-1} S)^{-1} S^t A^{-1} \mathbf{n}] \\ E[(\mathbf{P}_0 - \mathbf{P}_e)^t S^t S(\mathbf{P}_0 - \mathbf{P}_e)] = E[\mathbf{n}^t A^{-1} S(S^t A^{-1} S)^{-1} S^t S(S^t A^{-1} S)^{-1} S^t A^{-1} \mathbf{n}] \end{cases} \\ K \triangleq S(S^t A^{-1} S)^{-1} S^t A^{-1} \end{aligned} \quad (19)$$

とおくと

$$E(\Sigma) = E[\mathbf{n}^t (1 - K)^t (1 - K) \mathbf{n}] \quad (20)$$

簡単のため, いま, 各データの誤差は独立であり, また定常的で, 分散は一定であると仮定し,

$$E(n_i n_j) = \sigma_i^2 \delta_{ij} \quad (21)$$

とする.

この場合には,  $A$  として対角行列のみをとるので, 単位をこの対角要素の平方根で基準化すると,  $A$  を  $\mathbf{E}$  と考えて良く, 式が簡単になる. このとき (19) は,

$$K = S(S^t S)^{-1} S^t \quad (19)'$$

で表わされる.

$\mathbf{Z}$  の内, 直距離とか方位角など, 同種のデータのみの部分ベクトルを考え,  $S$  も対応する部分行列のみを考えるものとする.

(20), (19)' より

$$\begin{aligned} E(\Sigma) &= E[\mathbf{n}^t (1 - S(S^t S)^{-1} S^t)^t (1 - S(S^t S)^{-1} S^t) \mathbf{n}] \\ &= E[\mathbf{n}^t \mathbf{n}] - E[\mathbf{n}^t (S(S^t S)^{-1} S^t) \mathbf{n}] \end{aligned}$$

したがって, (21) の仮定より,  $n'$  をデータのサンプル数  $\sigma^2$  をそのデータの分散とすると

$$E(\Sigma) = n' \sigma^2 - \sigma^2 \text{trace}[S(S^t S)^{-1} S^t] \quad (22)$$

$$\text{trace}[S(S^t S)^{-1} S^t] = \sum_{i=1}^m \left[ \sum_{k,l} S_{ik} (S^t S)^{-1}_{kl} S_{ie} \right]$$

$$= \sum_i \left[ \sum_{k,l} S_{ik} S_{ie} (S^t S)^{-1}_{kl} \right] = \sum_{k,l} (S^t S)_{kl} (S^t S)^{-1}_{kl} = m$$

$$\therefore \left[ \sum_j A_{ij} A_{ij}^{-1} = 1 \text{ より } \text{trace}[S(S^t S)^{-1} S^t] = \sum_k 1 = m \right]$$

より (22) は

$$E(\Sigma) = n' \sigma^2 - m \sigma^2 = (n' - m) \sigma^2 \quad (22)'$$

となり, 分散  $\sigma^2$  の不偏推定量  $\hat{\sigma}^2$  は

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\Sigma}{n - m} \quad (23)$$

であることが示される.

実際に (4) が成立しないと, (14) または (16) は成立しないが, このようなときは, 推定計算, したがって推定値自体意味を失うことになる.

なお,

$$\Phi = [\mathbf{Z} - \mathbf{f}(\mathbf{P}_e)][\mathbf{Z} - \mathbf{f}(\mathbf{P}_e)]^t$$

なる量を考えると, この期待値は,

$$\begin{aligned} E((\mathbf{P}_0 - \mathbf{P}_e)\mathbf{n}^t) &= -E[(\mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{n} \mathbf{n}^t] = -\mathbf{K} E(\mathbf{n} \mathbf{n}^t) \\ E(\mathbf{n}(\mathbf{P}_0 - \mathbf{P}_e)^t) &= -E(\mathbf{n} \mathbf{n}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S}(\mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S})^{-1}) = -E(\mathbf{n} \mathbf{n}^t) \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S}(\mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S})^{-1} \end{aligned}$$

であるから,

$$\begin{aligned} E(\Phi) &= E[\mathbf{S}(\mathbf{P}_0 - \mathbf{P}_e)(\mathbf{P}_0 - \mathbf{P}_e)^t \mathbf{S}^t] + E(\mathbf{S}(\mathbf{P}_0 - \mathbf{P}_e)\mathbf{n}^t + \mathbf{n}(\mathbf{P}_0 - \mathbf{P}_e)^t \mathbf{S}^t) + E(\mathbf{n} \mathbf{n}^t) \\ &= \mathbf{S}(\mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{C} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S}(\mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^t - \mathbf{S}(\mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{C} - \mathbf{C} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S}(\mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^t + \mathbf{C} \\ &= [\mathbf{S}(\mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} - \mathbf{E}]\mathbf{C}[\mathbf{A}^{-1} \mathbf{S}(\mathbf{S}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^t - \mathbf{E}] \end{aligned}$$

となり, この量から  $\mathbf{C}$  を推定することも可能である.

このようにして,  $\mathbf{P}$  を推定するうえで, 次の点に注意が必要である.

### 1) 最尤推定となり得るか

この推定の評価基準は, 仮定した (誤差の共分散行列)  $\mathbf{A}$  による Norm (3) であるので, 一般に誤差が平均 0 の gauß 分布であると仮定されれば最尤推定と考えられる. 系統誤差がなんらかの方法で取り除かれればレーダのデータは, 必ず低域フィルタを通った出力と考えられるので, 中央極限定理より正規分布に近いものと考えられる.

したがって,  $\mathbf{A}$  さえ正しく誤差の共分散行列を仮定できれば, かなり確からしい推定が行なえる.

実際には真値が不明なので,  $\mathbf{A}$  も推定しかできないが, ある程度の事前情報から推定したあと, その結果の推定分散を用いて  $\mathbf{A}$  を修正し, これが収束すれば前のアルゴリズムと同様に真値に近附いたと考えてよい.

### 2) 仮定が十分満足されているか.

特に問題なのは,  $E(\mathbf{n}) = 0$  の仮定であり, これが満たされないときは不偏推定にもならない.

この場合にはオフセットとして  $\Delta \mathbf{Z}$  を考えると, これも一つのパラメータとなり, (1) は,

$$\mathbf{y} = \mathbf{f}(\mathbf{P}) + \Delta \mathbf{Z}$$

となるから, (5) は,

$$\Delta \mathbf{Z} = \bar{\mathbf{n}} \quad (24)$$

のとき収束し, 評価関数 (3) を最小とする. したがって, 他の仮定がすべて満たされている場合に (3) を最小とする  $\Delta \mathbf{Z}$  を求めれば, これが (24) を満足してオフセットを除くことができる.

$$\mathbf{n}' = \mathbf{n} - \Delta \mathbf{Z} \quad (25)$$

については, 平均 0 の誤差と考えてよい.

系統誤差としては, オフセットのほか, 一様に変化する量がある場合, 特に光の屈折が考えられるが, これは一つの系の観測から検出することは不可能である. (平均を 0 とするように変化した推定値が得られるので, 等価的なオフセットとして除くことはできるが, 軌道が少しゆがむ). これについては, 定量的な量は物理的な検討によらなければならない, 残さ

れた問題と考えられる。

以上の修正により決定されるパラメータは最尤推定値として得られるものであるから、それ以上の情報のないとき、最終的なものと考えてよい。

したがって、レーダなど一つの系から軌道推定を行なう場合には、これで十分な推定を行なったと考えられる。

#### 4.2 レーダによる推定結果

以上の軌道推定法により、4mφ レーダの直距離、方位角 (Az)、上下角 (El) データから推定した、L-4S-4、L-4T-1 号機 B<sub>3</sub> の推定軌道 6 要素は次の通りである。このうち角度データは、スピンによる乱れが大きいのので、Smoothing したものをを用いた。

軌道計算に当って用いた定数は、文献 1 により次のとおりである。

$$\pi = 3.1415926535$$

地球赤道半径 = 6378.160 km (偏平率 1/298.3 の完全な回転楕円体と仮定)

重力定数 =  $(6378.160)^3 \times (0.07436574/60)^2 \text{ km}^3/\text{sec}^2$

自転速度 =  $2\pi/86164.091 [\text{sec}^{-1}]$

地球の偏平性による軌道の摂動は Suborbit では精度以下なので無視する。計算は 14 けたで行なう。評価関数としては、直距離、角度の分散をおのおの 0.01 km, 0.1° と仮定し、それに対応する A を用いた。

表 3-1

軌道パラメータ	L-4 T-1	L-4 S-4
X 時 (UT)	1969.9.3.2 <sup>h</sup> 10 <sup>m</sup> 00 <sup>s</sup>	1969.9.22.2 <sup>h</sup> 10 <sup>m</sup> 00 <sup>s</sup>
Julian 角	14.54070	33.26800
a (km)	4141.143	4112.746
e	0.6663140	0.7103073
$\tau_p$ (X+sec)	-822.8152	-761.6490
$\Omega^\circ$	51.81164	76.5804
$i^\circ$	31.16233	31.0350
$\omega^\circ$	289.8423	285.0449
使用データ	160~430 sec	160~700 sec

このデータにより推定した誤差を第 A-1 図に示す。この推定分散は次のとおりである。

L-4 T-1     $\sigma_r = 0.16 \text{ km}$      $\sigma_{az} = 0.023^\circ$      $\sigma_{el} = 0.107^\circ$

L-4 S-4    0.40 km    0.113°    0.294°

第 A-1 図からも明らかなように、これらの誤差はかなり大きく変動するものや、一様に变化する傾向があって、仮定を満足しているかどうかは疑問である。しかしほかにデータのない場合は、これがレーダデータから決定され得る最も確からしい軌道と考えられる。

#### 4.3 ドップラ観測による推定結果

前節の結果は、レーダのデータの誤差が平均 0 の gauß 分布で、各時点に相関のない場

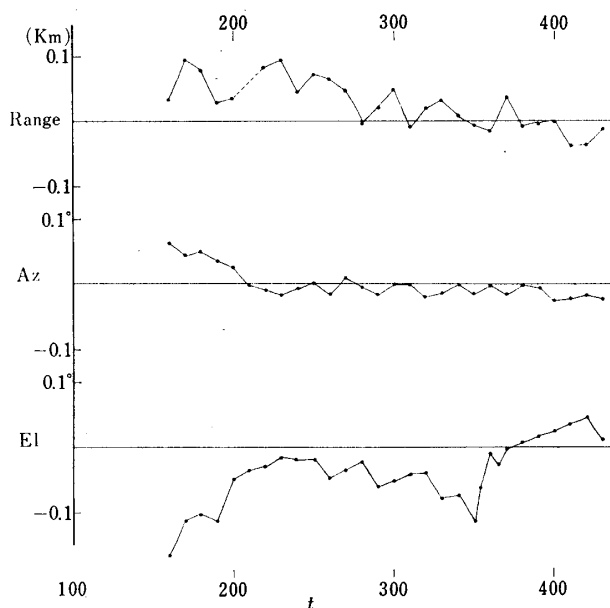


図 A-1 レーダ観測値の推定誤差 (オフセットの補正なし) L4T-1

合、最尤推定値と一致するが、結果からも明らかなように、この仮定は満足されているとはいいがたい。レーダデータのみではこれ以上の検討は不可能であるが、第1次実験ではこのほかに、136 MHz ビーコン電波を、内之浦、沖縄、勝浦の3局で受信した結果があり、これとの照合をとることにより、推定軌道の精度をあげ、より確かな値を得ることが可能である。以下にドップラ周波数の観測値とレーダの観測値との対比を行なって、軌道決定の改善を行なう手法並びに結果を示す。

#### 4.3.1 ドップラ周波数による軌道決定

飛しょう体がスピンをしていない場合、各地点で受ける受信周波数（正確には1秒間に観測される位相回転）は、観測地点が光速にくらべて十分近い場合は

$$f_r(t) = f_0(t)(1 - rr(t)/c) \quad (1)$$

と表わせる。ここに

$f_0$ : 送信周波数（正確には、その前1秒間の送信機の位相回転数）

$rr$ : その地点からみた range rate（正確には range を  $r(t)$  としたとき、 $r(t) - r(t-1)$ ）

$C$ : 光速

実際の受信系統によって記録される周波数  $f_r$  は

$$f_r[\text{Hz}] = \left\{ \frac{f_0[\text{MHz}]\left(1 - \frac{rr}{C}\right)}{f_{\text{set}}[\text{MHz}]} \times 3000 - 2999.3 \right\} \times 10^6 \quad (2)$$

で表わせる。ここに  $f_{\text{set}}$  は  $f_0 \doteq 136 \text{ MHz}$  に近い設定周波数で、特に  $f_0 = f_{\text{set}}$  であれば、 $f_r$  の 700 KHz からのずれが正確に 1 Hz 当り 0.1 m/sec に対応する。受信機の時間の安定度は、 $10^{-9}$  と称されているので、 $f_r$  は  $\pm 1 \text{ Hz}$  以下の精度で受信され、逆に  $rr$  は 0.1 m/sec まで正確に決定されるものと考えられる。

ここで注意しなければならないのは、 $RR$  はあくまでも速度変化を検出するため、推力のある場合の速度変化等に関しては、高い精度で決定できるが、これから軌道決定を行なう場合には十分長い時間の観測を必要とする。

一般の L 型ロケットの  $B_3$  では、 $a \doteq 4,000 \text{ km}$ ,  $|\mathbf{v}| \doteq 4 \text{ km/sec}$  であるから true anomaly  $\theta$  の変化は遠地点付近で、 $\dot{\theta} \doteq 4/4,000 \doteq 10^{-3}$  となり、 $a$  に  $\Delta a$  の誤差があるとしても  $\Delta a = \frac{0.1 \text{ m/sec}}{\dot{\alpha}} \doteq 0.1 [\text{km}]$  程度のドップラ周波数から定められる限界である。同様に、6 要素に対しては、 $10^{-5}$  程度の決定しかできず、これはレーダの直距離の精度  $50 \text{ m}$  にくらべて、同程度またはそれ以下にしかない。

また、 $\partial f / \partial \mathbf{P}$  が小さいため、Newton 法による最適化はきわめて危険であり、Gradient 法では、収束に時間がかかる。したがってレーダと組合せて処理して、はじめて、軌道決定の精度があがる。別に  $f_0(t)$  の推定も問題になりこの誤差の影響は、きわめて大きい。(これについては次項参照)

3 点観測では、その地理的情報が角度情報を与えるため、全体として  $f_0(t)$  速度ベクトルの推定の精度は著しく上がる。これは直距離のみの 3 点観測に近い情報であるから当然の結果であり、直距離の精度は  $100 \text{ sec}$  で  $10 \text{ m}$  以内 (移動は  $400 \text{ km}$  程度) になり、レーダの精度をかなり改善する。また、外乱による速度の微小変動等に関しても、非常に精度良く推定することが可能になる。

#### 4.3.2 送信周波数 $f_0$ の Drift

One way doppler System では、送信周波数  $f_0$  を推定することが最も重要で、これから  $RR$  が計算できる。 $f_0$  は、送信機に十分な安定度のないときは、一般に時々刻々に変化し、各時点ごとに  $f_0(t)$  を求めなければならない。3 局で同時に受信しても、 $f_0(t)$  および 3 個の速度成分は未知数 4 個であるから決定できない。実際には自由飛しょうでは速度成分は独立でなく、さらに  $f_0(t)$  も、物理的、熱的な慣性により前後に強い相関があると考えられ、これを利用して、 $f_0(t)$  および軌道のずれを同時に推定可能と考えられる。

特にレーダなどの直距離を含むデータのある場合には、その地点からの  $RR$  は直距離と強い関係があって、次のように  $f_0(t)$  が推定できる。いま、Coasting 中の直距離データが  $2t$  秒間にわたって観測され、この間適当な Smoothing により、楕円軌道を直距離が  $\pm am$  以内に入る程度にあてはめられたとする。したがって推定軌道より計算した直距離  $r(t)$  と真のパラメータによる真の直距離  $r_0(t)$  は、

$$|\varepsilon(t)| = |r(t) - r_0(t)| \leq a$$

となる。

地球の自転に比べ、ロケットが十分に速く、また東向きに打ち出して軌道面と観測地の自転面がほぼ等しいときには、直距離  $r(t)$  は、ほぼ 2 次曲線で表わせると考えてよい。

同じ面内にあってロケットが十分速いと、 $\mathbf{r}(t)$  をロケットの位置、 $\Delta \mathbf{P}$  をパラメータの誤差として、

$$|\varepsilon| = |\mathbf{r}(t) - \mathbf{r}_0(t)| \doteq \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{P}} \cdot \Delta \mathbf{P}$$



で表わせるから、

$$\ddot{\epsilon} \doteq \frac{\partial \ddot{\mathbf{r}}}{\partial \mathbf{P}} \Delta \mathbf{P} = -\partial \mathbf{y}(\mathbf{P}) / \partial \mathbf{P} \cdot \Delta \mathbf{P}$$

$\mathbf{y}$  は重力加速度

であるが、パラメータによる重力差は、ほとんど一定とみられる。

したがって  $\ddot{\epsilon}=0$ ,  $|e| \leq a$  の場合に、 $|\dot{e}|$  が一番大きくなるのが  $r(t)$  から  $RR$  を計算したときの誤差の上限を与える。

したがって、図のような場合 (または、横軸に対称な場合) が最悪の場合で、このとき range rate の誤差  $|\dot{e}|_{\max}$  は、

$$|\dot{e}|_{\max} \leq 2a/t$$

となる。

特に L 型ロケットの B<sub>3</sub> で、 $a$  が 40 m,  $t=100$  sec と仮定すると、 $|\dot{e}|_{\max} \leq 0.8$  m/sec となる。受信機の精度は 136

MHz に対し、 $\pm 0.5$  Hz 程度とすれば、これより推定する  $rr$  も  $\pm 0.5$  m/sec の精度となり、レーダ (または他の手段) の直距離データを smooth した軌道による  $rr$  の推定でもかなりよい精度が得られることが分かる。

この実験では、内之浦における直距離および 136 MHz ビーコンの  $f_r$  観測が同時に行なわれているので、上の結果より  $f_0(t)$  の推定が  $|\dot{e}|=0.8$  m/sec に対応する周波数、3,000 MHz 換算、8 Hz (136 M 換算 4 Hz 以下) の精度で決定される。

したがって Coasting における直距離が長時間観測できる場合、 $RR$  を観測しても得られることは少ない。反面、短時間  $|\dot{e}| \geq 2a/t$  ( $|\dot{e}|=0.1$ ) の範囲における速度の変動は range rate を用いてはじめて検出できる。特に追突や排気による微小の変動、 $f_0$  の急変等に対する解析は、この観測以外では不可能である。

#### 4.3.3 ドップラ周波数の 3 点観測による速度決定および drift の補正

飛しょう体が完全な coasting に入っている場合、同地点から直距離のほか、range rate の観測をしても新しい情報とはならないが、他の地点の  $rr$  は、その地理的な角度が一つの情報となって、軌道決定やドリフト決定の精度を向上させることが可能となる。ここで、それらの精度を検討する。

いま、レーダなどにより、かなり精度よく楕円軌道を決定したものと仮定し、その精度をドップラ周波数から推定することを考える。(1) より  $f_0(t)$  が求まれば、 $f_r$  より  $rr$  を検出でき、これより軌道を検出できるが、 $f_0(t)$  が不確定な場合には、むしろその軌道から計算した  $rr$  から  $f_0(t)$  を比較し、これが正しく一致するかどうかより、軌道を判定する方が容易になる。(  $f_0(t)$  を仮定しないで済む。 )

いま、推定軌道より計算した  $rr(t)$  を  $rr_i(t)$   $i$ ; 観測地を表わす suffix とすると、 $f_0(t)$  は  $f_r(t)$  より次式で求められる。

$$f_0(t) = \frac{f_r(t) \times 10^{-6} + 2999.3}{3,000 \left( 1 - \frac{rr(t)}{C} \right)} f_{\text{set}} \quad (3)$$

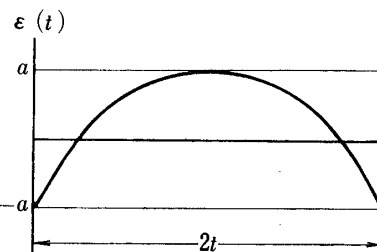


図 2

実際には観測誤差  $\Delta f_r(t)$ , 軌道の誤りによる  $rr(t)$  の誤差  $\Delta rr(t)$  から, この  $f_0(t)$  は, 3局からの計算値が全て一致するとはいえず, 逆にその差より, 次のようにして, 軌道の誤差をある程度検出できる.

いま, 軌道上の速度を  $v$ , 観測地から飛しょう体までのベクトル  $r$  と  $v$  のなす角を  $\theta$  とし, 1 sec の距離の差を速度で近似すると,

$$rr(t) \doteq v \cos \theta$$

であるから, 軌道の誤差により速度成分  $v$  に  $\Delta v$ , 角度  $\theta$  に  $\Delta \theta$  の誤差があるとする,

$$\Delta rr(t) = \Delta v \cdot \cos \theta - v \cdot \Delta \theta \cdot \sin \theta \quad [\text{m/sec}] \quad (4)$$

となる. したがって, (3), (4) から  $f_0(t)$  の推定誤差は, 2 次以上の項を無視して

$$\begin{aligned} \Delta f_0(t) \text{Hz} &= \frac{f_{\text{se}}}{3,000 \left(1 - \frac{rr}{C}\right)} \left[ \Delta f_r + \frac{(2999.3 + f_r \cdot 10^{-6})}{\left(1 - \frac{rr}{C}\right) C} [\Delta v \cos \theta - v \cdot \Delta \theta \sin \theta] \times 10^6 \right] \\ &\approx \frac{\Delta f_r [\text{Hz}]}{22} + \frac{1}{2.2} (\Delta v \cdot \cos \theta - v \Delta \theta \cdot \sin \theta) \end{aligned} \quad (5)$$

このうち, 第 1 項は原理的には  $\pm \frac{1}{22} \text{Hz}$  まで測定可能なはずであるが, Phase lock の時定数, Noise による Count Miss 等により変動する可能性がある. 時計による差は, 定格では  $\pm \frac{1}{22} \text{Hz}$  以内であり仮に誤差があっても一定に出ると推定される.

第 2 項は軌道推定の修正に用いられる. 特に 3 局の観測値がある場合,  $\theta$  が異なるので  $\Delta v$  と  $\Delta \theta$  を分離することができる.

内之浦は一般に  $\theta=0$  であるので,  $\Delta v$  がそのまま観測される. 飛しょう体が完全な楕円軌道であると, 前後の結果から  $\Delta v$  は, 0.1 m/sec 以上 (実際はその数倍) の速度変化が短かい時間に起こった場合に検出でき, 全体として 0.8 m/sec 以上の差は出ないことになる.

これに対し他の 2 局は  $\theta \neq 0$  で, しかも  $\sin \theta$  の符号が変わるので,  $\Delta \theta$  を検出できる.

$f_0(t)$  の誤差を  $\Delta f_0$  とすると,

$$\Delta f_0 \geq \left| \frac{1}{2.2} v \Delta \theta \cdot \sin \theta \right| \quad (6)'$$

までの誤差は検出できるので,

$$|\Delta \theta| \leq \left| \frac{2.2 \cdot \Delta f_0}{v \cdot \sin \theta} \right| \quad (6)$$

の精度で  $\theta$  を検出できる. 特に  $\theta = \frac{\pi}{2}$  付近で  $v = 4 \text{ km}$ ,  $\Delta f_0 = 0.5 \text{ Hz}$  まで推定できれば,

$\Delta \theta \leq \frac{1}{4000} \text{ rad} = 0.015^\circ$  までの精度で速度の方向を求めることができる. 同様に,  $\Delta v$  は,

$$|\Delta v| \leq \left| \frac{2.2 \Delta f_0}{\cos \theta} \right| \quad (7)$$

まで決定でき, 上の条件で  $\theta=0$  では, 1 m/sec まで決定できる.

3 局のデータがあつて、 $\theta$  が異なる場合、 $f_0$  の変化を除いた残りが軌道の誤差、または微小変動を示すので、これより軌道修正を行なうことができる。特にレーダでは角度に偏差のある可能性が強いので、(5)により、これを除くことが可能である。この場合、 $\Delta\theta$  は速度に対して修正されるが、長時間ではレーダの角度そのものの偏差を除くことになる。

切断、衝突、排気の energy による微小異常運動に対しては(5)による  $f_0$  の変化を3局比べたグラフは、ドリフトおよびスピン変化による真の  $f_0$  の変化が大きく、読取が困難であるので次のように  $f_0$  の影響を除くと考えやすい。

いま、なんらかの方法で  $f_0(t)$  を推定し、これと、実際に受信した Doppler freq とから

$$rr_0(t) = \left[ 1 - \frac{(10^{-6} \cdot f_r + 2999.3) f_{\text{set}}}{3,000} \cdot \frac{1}{f_0} \right] C \quad (8)$$

を計算し、これと推定軌道から計算した  $rr(t)$  との差、 $\Delta RR(t) = rr(t) - rr_0(t)$  を計算する。

推定  $f_0$  に  $\Delta f_0$  推定軌道から計算した  $rr(t)$  に  $\Delta rr(t)$  ( $\Delta rr = \Delta v \cos \theta - v \Delta \theta \sin \theta$ ) の誤差があつた場合、まゑと同様に、

$$\begin{aligned} \Delta RR &\doteq \frac{\Delta f_0}{f_0} \cdot C - \Delta v \cdot \cos \theta + v \Delta \theta \cdot \sin \theta \\ &\doteq \Delta f_0 [\text{Hz}] \cdot 2.2 - \Delta v \cdot \cos \theta + v \cdot \Delta \theta \cdot \sin \theta \end{aligned} \quad (9)$$

となる。この場合には  $f_0(t)$  の影響を除かれているので  $\Delta f_0$ ,  $\Delta v$ ,  $\Delta \theta$  のみを拡大して検討することが可能となる。

(9)の誘導

$$f_r = \left[ \frac{f_0(1 + \Delta f)}{f_{\text{set}}} \cdot 3,000 \cdot \left( 1 - \frac{rr(1 + \Delta r)}{C} \right) - 2999.3 \right] \times 10^6$$

$$\Delta f = \frac{\Delta f_0}{f_0}, \quad \Delta r = \frac{\Delta rr}{rr}$$

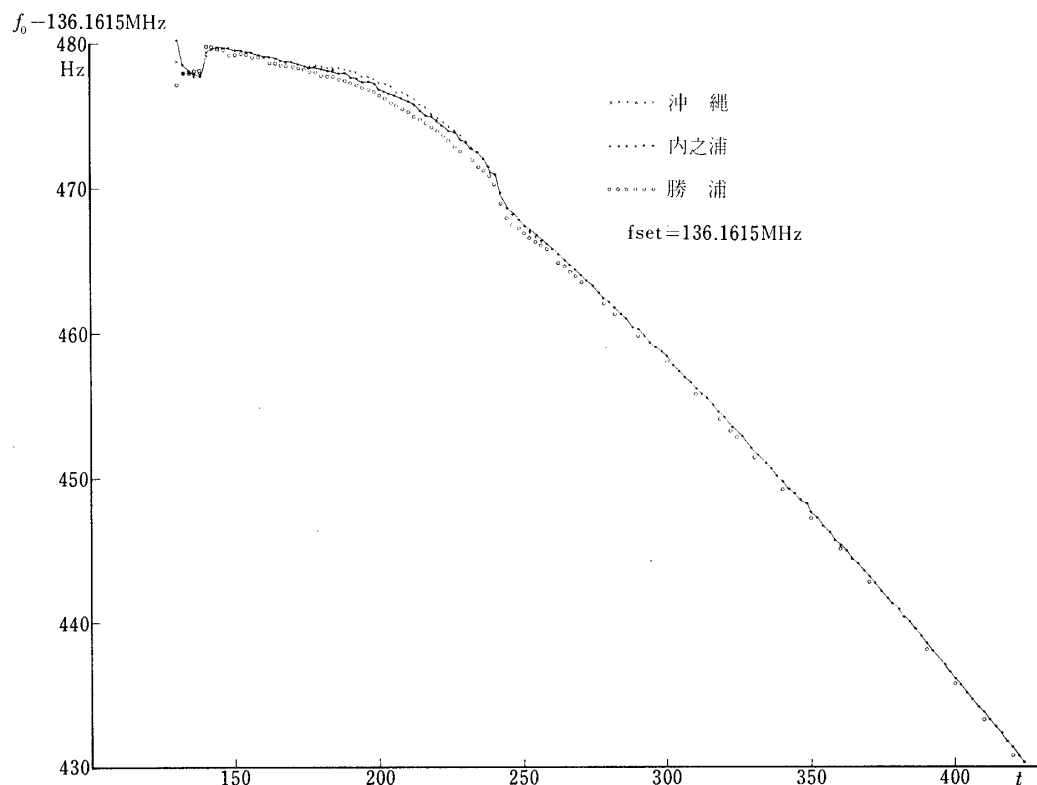
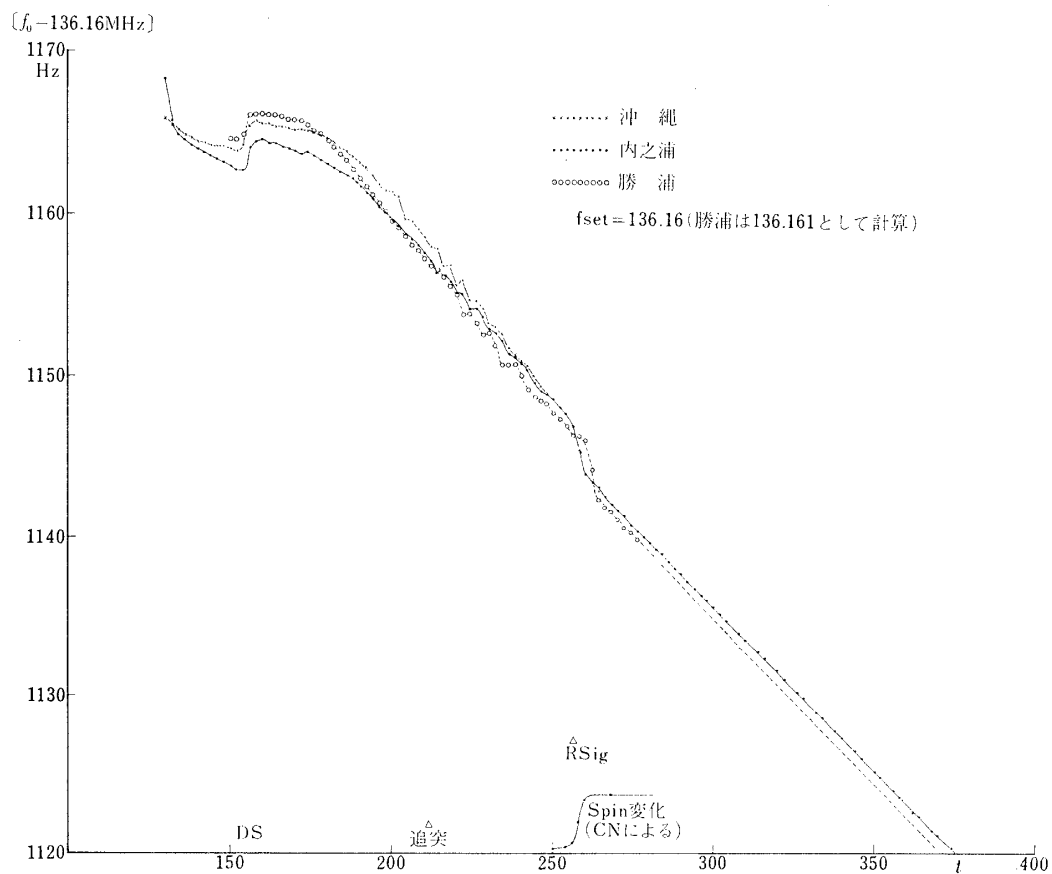
$$\begin{aligned} rr_0(t) &= \left[ 1 - \frac{(10^{-6} f_r + 2999.3) f_{\text{set}}}{3,000} \cdot \frac{1}{f_0} \right] C \\ &= rr(1 + \Delta r) - \Delta f \cdot C - \Delta f \cdot rr(1 + \Delta r) + 0 \left[ \left( \frac{\Delta f_0}{f_0} \right)^2 C \right] + 0 \left( \frac{\Delta f}{f_0} (v + \Delta v \cos \theta - v \Delta \theta \sin \theta) \right) \end{aligned}$$

#### 4.4 推定結果

Doppler freq の観測値に基づく軌道決定の修正を、L-4T-1, L-4S-4 の B<sub>3</sub> に対して行なつた結果は次のとおりである。

レーダのみから推定した軌道要素に対して、4.3.3 (5)式によって求めた  $f_0(t)$  を比較すると、沖縄のデータによる  $f_0$  と勝浦のデータによる  $f_0$  は内之浦のデータによるものからみて、反対側に、ほぼ平行にずれている。この結果は(5)により次のように解釈される。

内之浦の  $rr$  は、4.4.2 に示されるように、 $\pm 0.8 \text{ m/sec}$  以内で推定されるので、これから計算した  $f_0$  は、 $0.6 \text{ Hz}$  以内で真値を示すと考えられる。したがって他の局の  $rr$  は一様にずれていることになり、速度の方向  $\theta$  が狂っていると推定される。これは軌道の角度が一様にずれたもの、すなわち角度オフセットと解釈される。そこでレーダのデータに角度のオフセットを与え、軌道要素を改めて推定し、同じ検討を行なつて  $f_0$  のずれの最も少ない場合の  $f_0$  を第 A-4-1, B-4-1 図に示す。

図 A-4-1 L4T-1  $f_0$  の推定値図 B-4-1 L4S-4  $f_0$  の推定値

L-4T-1 号機の場合は、第 A-4-1 図に示されるように、 $f_0$  は 3 局とも完全に  $\pm 1\text{Hz}$  以内に入り、速度方向に関して  $0.03^\circ$  以内の誤差で求められたことが解る。Az 角、El 角の分散は、大きな誤差を無視した結果、 $0.02^\circ$  以内であるから、角度のオフセット量としても、 $0.03^\circ$  以内に推定されたと考えられる。

これに反して、L-4S-4 号機の場合には同様の方法で  $f_0$  を一致させようとする、 $B_3$  sep から  $B_4$  ig までの [160sec, 450sec] の間のレーダデータでは、いかにオフセットを加えても、 $\pm 1\text{Hz}$  以内にはならない。このときのレーダの誤差および推定  $f_0$  のずれの様子を検討すると、211sec の追突のまえで著しく変化することが明らかで、この前後を一つの楕円軌道であてはめることは不可能なことが示される。(追突の際の energy 変化による軌道のずれがドップラ周波数の観測精度を越えたと考えられる。)

$B_3$  を二つに分けて、前半 [160~210]、後半 [215~450] おのおのについて同様の推定を行なうと、後半部については L-4T-1 号機の場合と同じく、 $f_0$  の推定値が 3 局ともに、 $\pm 1\text{Hz}$  以内に一致するような軌道が求まる。

この結果を第 B-4-1 図に示す。(210 sec 以前のデータについても同じ軌道から  $f_0$  を計算し、それ以前で一致しないことが示される。) 前半については、レーダデータは十分な長さがなく、また DS 前後では誤差の性質が著しく変化するため、4.1 の各仮定からはずれ、Doppler freq 観測値と矛盾のない軌道を推定することは不可能であった。(逆に Doppler freq から推定する

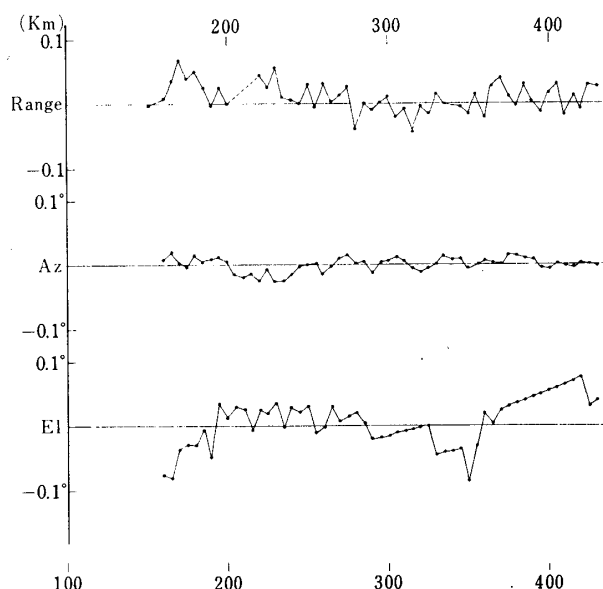


図 A-3-1 オフセット修正後のレーダ観測値推定誤差 L4T-1

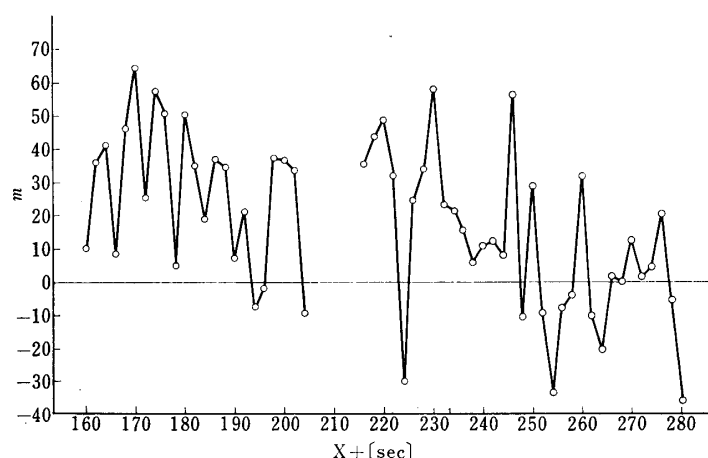


図 A-3-2 Radar Range の推定誤差 (拡大図) L4T-1

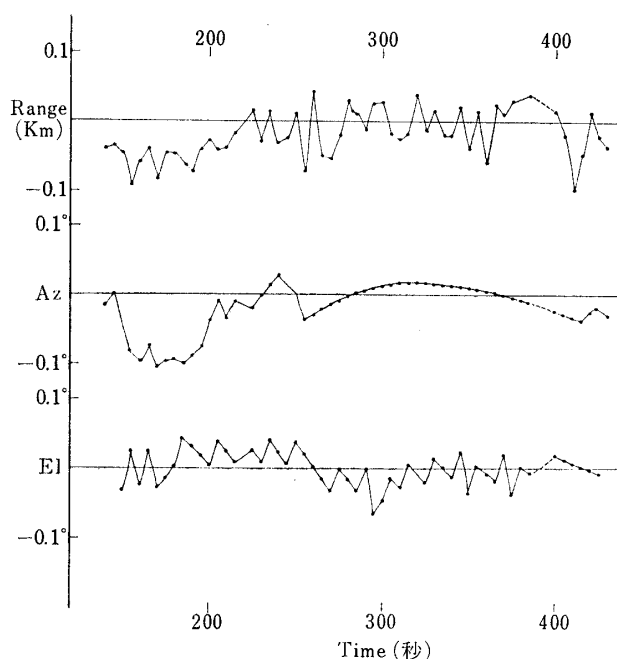


図 B-3-1 OFF SET 修正後のレーダ観測値推定誤差 L4S-4

		L-4 T-1	L-4 S-4
使用データ時間 (X+sec)		160~430	215~450
オフセット量	Az	+0.34	+0.55
	El	0.025	-0.20
評価に対応する 各分散	$\sigma_r$ km	0.03	0.08
	$\sigma_{az}$ °	0.01	0.05
	$\sigma_{el}$ °	0.04	0.05
推 定 分 散	$\sigma_r$ km	0.0433	0.0279
	$\sigma_{az}$ °	0.0117	0.0193
	$\sigma_{el}$ °	0.0396	0.0257

推 定 6 要 素	$a$	4140.6416	4114.0780
	$e$	0.66652474	0.71003656
	$\tau_p$	-822.42108	-762.16440
	$\Omega$	51.292303	76.1566864
	$i$	31.174674	30.99253095
	$w$	290.29106	285.4069288

注 推定6要素を8けたまで示しているのは、その精度が8けたまでであるという訳ではないが、6要素は相互に相関の非常に強いパラメータであるため、ここでけた落ちがあると、全く異なる軌道を与えるためである。実際にはレーダの推定分散の方が実際の軌道と推定軌道との差の目安となる。

ことを検討している。) なお、第 B-4-1 図で [211, 250 sec] でも、各局の推定  $f_0$  が複雑な変化をしているのは、衝突後のタンプリングの影響とみられる。この軌道から推定したレーダの推定誤差は、第 B-3-1 図に示される。

以上の結果は、次表にまとめられ、これがレーダおよび 136 MHz ビーコン電波の観測値から求め得る、最も確からしい軌道となる。なお、第 A-3-1, A-3-2, B-3-2 図における角度誤差はオフセット量を除いたものである。

## 5. 各装置に対する検討

### 5.1 4mφ レーダ

L-4T-1, L-4S-4 号機の各 B<sub>3</sub> の観測における推定誤差 (第 A-3-1, 2, B-3-1 図) から一般に次の結論を得る。

#### 1) 直距離データ

分散は 30~40 m 程度と推定され、オフセットは不明である。(5.5 参照) 誤差に対する周波数成分も、特に顕著な部分はなく、純粋に近い雑音と考えてよい。

#### 2) 角度データ

生データは、スピンの影響によりスキニング周波数とアンテナパターンの変化による、信号の強度変化のビートで大きな変動を (かなり低い周波数) 示す。5 sec おきのデータとして採用する際、このようなデータは危険なので、目視により、振動の中心部 (または、いくらかずらしたものを) を通ると思われる曲線を求め、smoothing したデータを用いたので、第 A-3-1, B-3-1 図に表われる誤差は、smoothing の誤差を表わし装置とは関係がない。したがってオフセットまたはスピンとのビート周波数 (0.5 Hz) よりはるかに低い周波数の部分で、生データの性質を表わしていると思われる範囲の検討を行なう。

#### Az 角

L-4T-1 号機では、18mφ アンテナと並べて smoothing を行なったため、このとき約  $0.25^\circ$  のオフセットを CW 方向に加えてある。その結果にさらに、 $0.34^\circ$  加えた値が推定値とみられるので、レーダの Az 角は、推定軌道から計算される値より約  $0.6^\circ$  CCW の方向の指示を示したことになる。

L-4S では、平均値を smooth したデータを用いているので、 $0.55^\circ$  がそのままレーダの平均値と推定値のずれを表わしている。

以上、二つの場合から 4mφ レーダの Az 角のオフセットは、およそ  $0.5\sim 0.6^\circ$  であったと考えると、ドップラ周波数観測結果ともよく一致する結果を与える。

角度に関するオフセットを与えるものとしては、ギアのガタ、シンクロの位相ずれ、サーボの不感帯や遅れなど物理的、電氣的に多くの可能性があり、なお多くのデータの検討を行なう必要がある。

#### EI 角

EI は L-4T-1 号機では  $0.025^\circ$  下方を示していたことになるが、これは誤差の範囲である。L-4S-4 号機では、 $+0.2^\circ$  上向きのオフセットと推定されるが、多少大きいのでなお検討を要する。

なお、屈折の影響は 350 sec El が  $18^\circ$  程度から現われはじめ、400 sec までの 50 sec に約  $0.05^\circ$  (El  $15^\circ$ ) 程度、上向きにみえることが確認される。L-4S-4 では、B<sub>3</sub> は 430 sec で El  $18^\circ$  のため、特にきわだって現われてはいない。

## 5.2 18mφ アンテナ

第 A-5, B-5 図に推定軌道から逆算した 18mφ アンテナからの推定角度と実測値およびその差を示す。これから角度誤差を検討すると次のようなことがわかる。

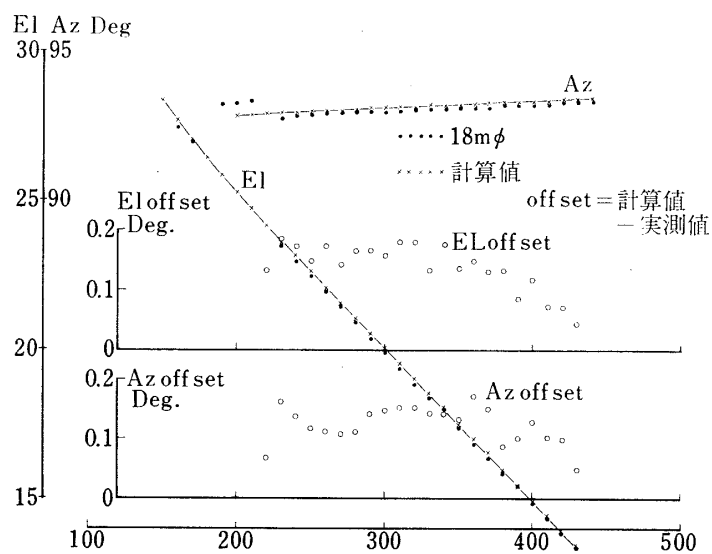


図 A-5 18mφ アンテナの追尾角と計算値 L4T-1

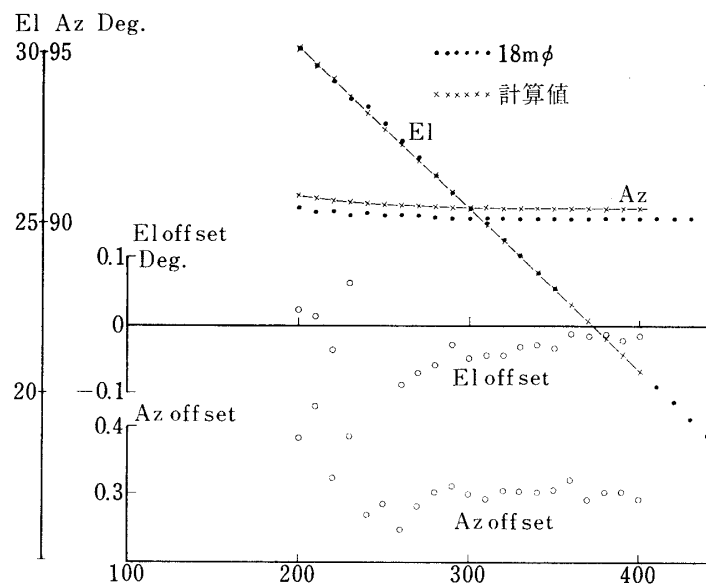


図 B-5 18mφ アンテナの追尾角の計算値 L4S-4



## Az 角

オフセットとして推定される量は、L-4T-1 号機では、CCW 方向に  $0.15 \sim 0.1^\circ$ 、L-4S-4 号機では、CCW 方向に  $0.3^\circ$  程度である。

18mφ アンテナは機体の姿勢差により著しく ( $0.2^\circ$  程度) 観測値が変化する傾向が見えることと、L-4T-1 号機と L-4S-4 号機との違いは、おもに追突による姿勢差だけであるから、観測値の違いは姿勢差による可能性が強い。L-4T-1 号機では姿勢制御中に  $\pm 1^\circ$  以上も変化し、L-4S-4 号機でも  $0.5^\circ$  程度の変化を示しているため姿勢の変化による観測値の変化を定量的に求めることは不可能であるので、なお多くのデータが得られてから再検討を行なう必要がある。

## El 角

El 角については、L-4T-1 号機では  $0.18^\circ$  下向きに、L-4S-4 号機では  $0.04^\circ$  (再スピンの後の平均値で、追突後しばらくはタンブリングで  $0.3^\circ$  程度上向きになる。) 程度上を向いていたと考えられる。

屈折については、やはり L-4T-1 号機のみは 350sec 程度から現われはじめ、400sec までの 50sec に  $0.1^\circ$  程度 (レーダの倍位) 上方に移行している。波長はレーダでは 1680MHz 18mφ アンテナでは 300MHz であるから、この傾向は定性的には矛盾しない。

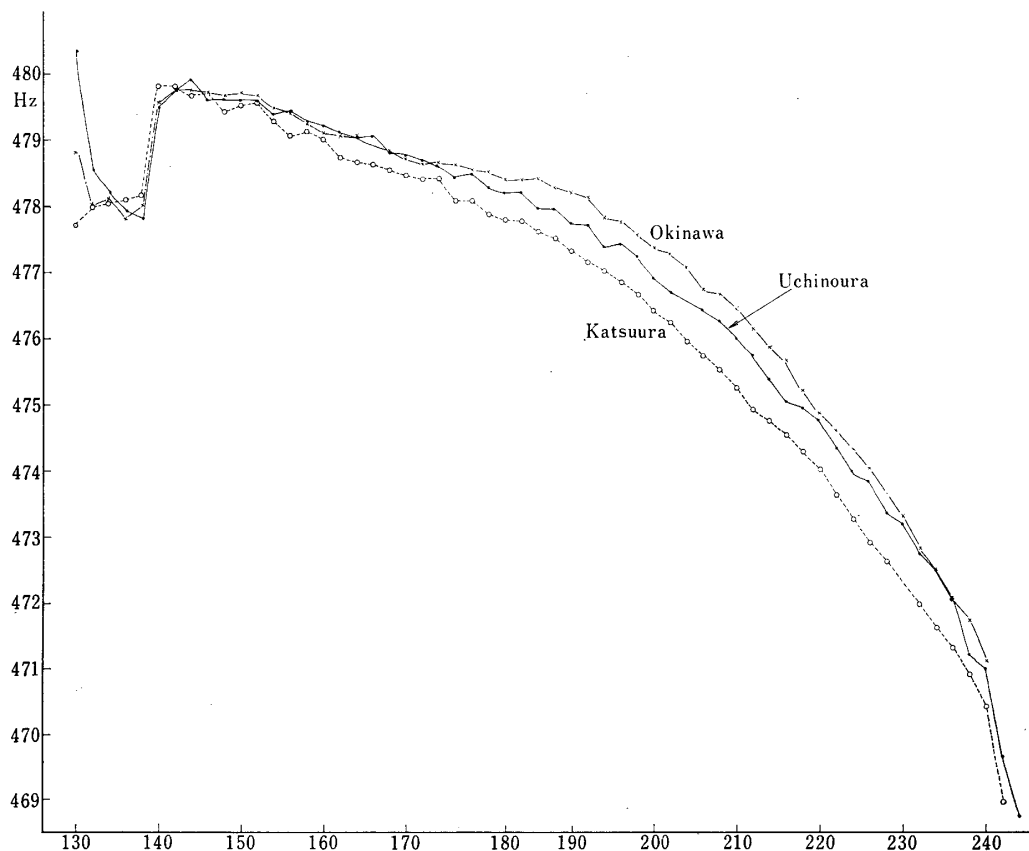
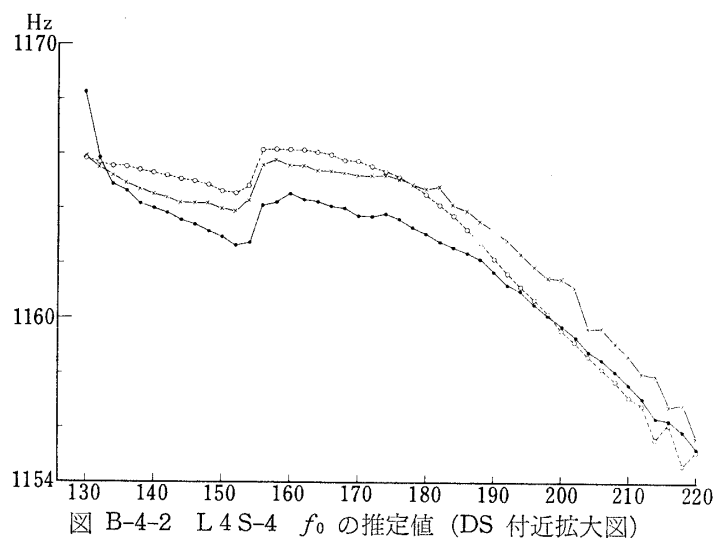


図 A-4-2 L-4T-1  $f_0$  の推定値 (DS 付近拡大図)

図 B-4-2 L4S-4  $f_0$  の推定値 (DS 付近拡大図)

なお、以上オフセットと呼んでいるものは誤差の平均値であり、等価的な量である。レーダに関して、Az 方向は変動の値よりはるかに大きいことから、一般の意味のオフセットと考えられる。

### 5.3 136 MHz ビーコン送信機および受信機

B<sub>3</sub> 飛しょう中における  $f_0$  の推定値は、第 A-4-2, B-4-2 図に示される。3 局からの推定値は  $\pm 1$  Hz 以内で変動しているが、真の  $f_0$  もこの範囲の中にあると推定され、特に内之浦のデータから推定した値が、最も軌道の誤差の影響を受けにくいものと考えられる。

(4.4.2, ただし、完全な楕円軌道にのっている場合に限る。) 第 4 図から、L-4T-1, L-4S-4 号機共通に表われる傾向は次のとおりである。

1) 円偏波で送受信が行なわれるので、DS, RS 時におよそ spin の周波数だけ上下する。spin 時には、これを差引いたものが送信機の  $f_0$  の推定値である。

2) 全体として  $f_0$  は時間とともにほぼ一様に低下している。これは空力加熱の冷却による  $f_0$  の低下と説明されている。

3) DS 後、180(L-4T-1), または 170(L-4S-4) sec までと、それ以後との 3 局の  $f_0$  の傾向はかなり異なっている。機体に働く外力は、CN のエンジンだけであって、軌道を動かす力はなく、姿勢も  $30^\circ$  程度以内の変化であるから、0.1 Hz 以内の影響しかない。アンテナは、かなり柔かい構造であり、10 sec 程度は振動することもあると考えられるので、振動した場合、受信周波数が変化するかどうかにより、その原因になったかかわる。

4) 受信系統については、公称精度 136 MHz 当り 0.05 Hz に対し、実際の受信状態は、 $\pm 0.3$  Hz 程度と考えられる。(DS 後しばらくの間や、追突後のタンブリング等、外乱の大きい部分を除く。) 60 sec に 1 回位  $\pm 2$  Hz 程度の誤差を出す、一般の受信状況は非常によかったものといえる。3 局のうちでは、勝浦局が最も安定している様子である。以上より各局の受信周波数は、大部分のデータが  $\pm 10$  Hz (3000 MHz 換算) 以内に入っていると考えられる。

5) 勝浦局のデータは、RS 後の安定した状態で一様にずれた  $f_0$  を与えている。これは

およそ 0.5 Hz で時計の精度  $10^{-9}$  をはるかに越えているので、軌道の推定誤差とみられる。

軌道が Az 方向に振れていると、地理的条件からの  $f_0$  にも影響し、El 方向の誤差は勝浦による  $f_0$  が、一様に変化する傾向を与える。したがって、長時間にわたり一定の差が出るのは、勝浦からみた角度が一様に差があることと推定され、内之浦からみた range が一定の誤差を持っていた可能性がある。 $v=4\text{ Km/sec}$ ,  $\Delta f_0=0.5\text{ Hz}$  とすると、角度差  $\Delta\theta=0.25\times 10^{-3}$  であり、軌道と勝浦との距離はおおよそ 600 km であるから直距離の差と考えると約 150 m の差になる。地球定数に関しては、地球の半径を 7 けた (1 m) まで、自転による速度は  $10^{-5}\text{ m/sec}$  の精度まで計算しているから無視してよい。位置の差は、地球の偏平性を 4 けたまで用いているので、10 m 以下の誤差となるはずである。直距離のオフセットは数 10 m 以下と考えられ、これに局の位置の算出の誤差 (アンテナと局の位置が異なれば、これも誤差となる。) 等が全体で 150 m 程度になったものと考えられるが、このような誤差は再現性があるはずであるから、さらに多くのデータを得れば検討可能である。この誤差が内之浦からみた角度によると考えた場合、 $0.03^\circ$  以内なので、5 の検討には問題はない。また 1000 km 程度の距離では、電波伝播に要する時間差による速度変化は考えなくてよい。

このほかに  $f_0$  に関しては、次の疑問点がある。

1) L-4T-1 号機の  $f_0$  は全体にゆるい 2 次曲線とみられるが、RS 以後はいくらか直線に近くなっているように見える。このときの  $f_0$  の変化率は、ほぼ L-4S-4 号機の変化率に等しく、それ以前の変化率はかなり小さくなっている。これに反し、L-4S-4 号機では、ほぼ直線的に変化していると考えられる。(210 sec~250 sec の間は、タンブリングにより  $\pm 1\text{ Hz}$  位変動しているが、これはみかけの変化と考えられる。210 sec 以前は軌道が変化しているため、3 局の変化が異なるが、沖縄、内之浦と勝浦の中間値位が真の  $f_0$  とするとほとんど変化はない。)

2) RS, DS では、みかけの  $f_0$  はおよそそのときのスピンの変化だけ急変するが、L-4T-1 号機の場合 DS 後 4.1 Hz 下らず、約 2.5 Hz 程度低下しただけである。すなわち、その前後のドリフトは、 $-0.18\text{ Hz/sec}$  であるのに、240 sec から 250 sec の 10 sec に、スピン変化分、約 4.1 Hz (240 sec ではすでに 0.5 Hz 回転しているのでこれを補正する) を含めて、4 Hz 以下の変化しかなく、この間に発振器のドリフトはなかったことになる。速度が変化したと考えると、1.8 Hz は 4 m/sec に対応し、RS モータの排気による energy と考えることは非常識である。後述のように、244 sec から 250 sec の間、ドリフトの変化は  $-0.18\text{ Hz/sec}$  より小さかった可能性もあり、L-4T-1 号機の場合、なんらかの原因から RS の際ドリフトレートが急変したと推定される。

これに対し、L-4S-4 号機の場合には RS 以前タンブリングでみかけの  $f_0$  が、 $\pm 1\text{ Hz}$  近く上下するため、細かい検討はできないが、スピンの変化 3.7 Hz に比べ、0.5~0.8 Hz 程度の差があり、定性的には同じ傾向にあるが、量は非常に少ない。L-4S-4 号機では RS 後のドリフトは  $-0.2\text{ Hz/sec}$  である。

3) これに反し、DS 時には  $f_0$  の変化は  $\pm 0.3\text{ Hz}$  以内の差で、スピンの変化と一致している。その差は、DS モータの排気によると考えても非常識な値にはならない。

## 6. 機体の運動

前章に示した様に、レーダには誤差が多く長時間の観測データから楕円軌道の推定は可能であるが、各瞬時の速度変化を求めるのは困難である。ドップラ周波数観測は3局同時に観測していることおよび各局の精度が公称 0.1 m/sec であることより各時点の速度変化が精度よく求め得るはずである。

L-4T-1, L-4S-4 では、残留推力による追突が問題になり、飛しょう中の速度変化の細かい検討が必要とされたので、ドップラ周波数の観測から3段飛しょう中の各 event よる機体運動の変化が検討された、この解析はかなり細かくなるので定性的な説明を省き、結論として得られた結果をまとめて示すことにする。

### 6.1 B<sub>3</sub> 燃焼終了および B<sub>3</sub> 切断

第 A-6-1, 2 図より明らかに B<sub>3</sub> 燃焼終了予定の 130 秒以降もかなり残留推力のあることが示される。DS モータによるみかけ上の送信周波数変化を除いた結果の3局のドップラ周波数と、そのときの観測方向から残留推力および切断時の速度変化は次の様に推定された

L-4T-1 時刻 B<sub>3</sub> または B<sub>3</sub>sep による速度増分

130~132	3.7 m/sec
132~134	0.6 m/sec
134~136	0.6 m/sec

L-4S-4 については、軌道推定精度が悪く、2 秒ごとの変化を求めるのは困難であり、次の様な結果を得た。

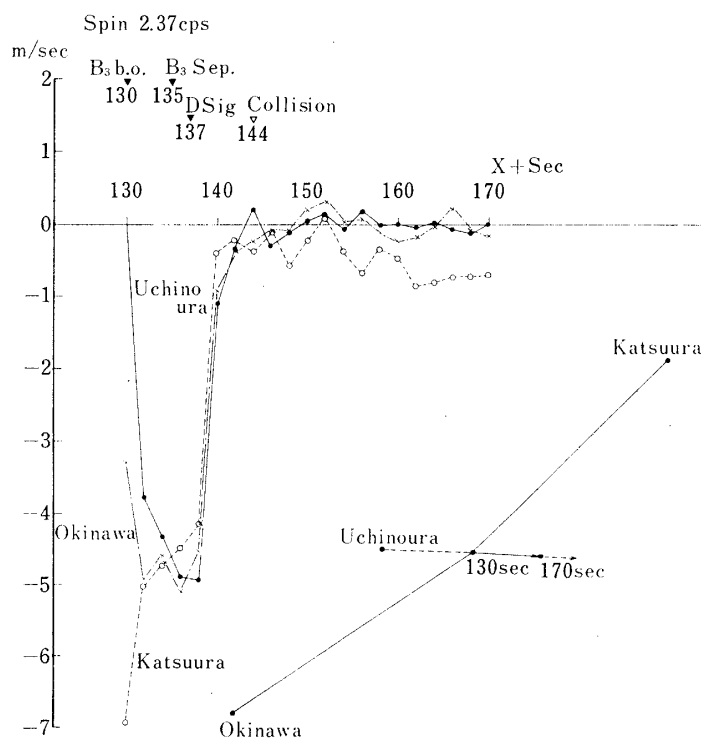
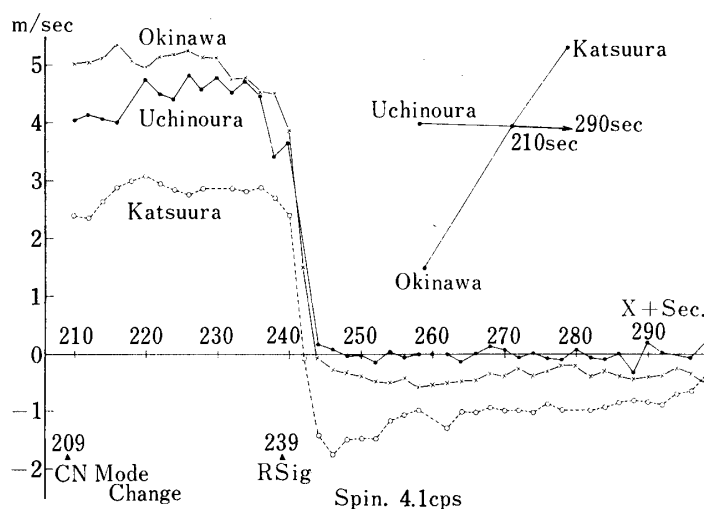


図 A-6-1 ΔRR, B<sub>3</sub> b. o. 付近 L4T-1

図 A-6-2  $\Delta RR$ , RS 付近 L4T-1

130~132	2~5 m/sec
132~152	3~5 m/sec

## 6.2 DS モータ, 追突

B<sub>3</sub> 切断後外力は働かないが, DS モータの排気で速度変化を生じる可能性があり, これを前と同様にして検討する. スピン変化の状況は, TM によりわかるのでその影響を除いた結果が, 速度変化によるものであると期待される. L-4T-1 では続いて B<sub>3</sub> の追突があるので, これを含めた速度変化となる.

L-4T-1 時刻	138	140	142	144 (追突)
$\Delta v$ m/sec	-0.03	-0.24~-0.36	-0.36~-0.49	0.53
$\Delta f$ cps	1.54	0.2~0.25	0.05~0.1	-0.03

L-4S-4 は前と同様細かい検討は不可能であり, およそ 0.6 m/sec 程度後退したと考えることもできるが, 精度は  $\pm 0.4$  m/sec 位なので断定できない.

## 6.3 RS モータ

RS モータによっても速度変化の可能性があり, 前と同様の検討を行なうと L-4T-1 では, 240~260 秒間に, 0.5~0.8 m/sec 前方へ速度を得たという結果を得る, これは一般の予想に反するが, レーダのレンジの推定誤差 (A-3-2 図) もこの結果を否定する様にはみえない, この付近はドリフトも大きく推定は困難であるから, その様な現象が起る可能性のみが示されると考えればよい. L-4S-4 では推定は不可能である.

## 7. あとがき

以上の検討は 69 年度 1 次実験終了後, 2 次実験の開始までの短期間に行なわれたもので, 系統的な考え方や数学的な基礎が不十分であり, その結果も定性的な意味しか持たせられぬものが多い. 特に観測機器のオフセット誤差や屈折の補正等は今後のデータの蓄積を待ってその性質を明らかにしていく必要があるが, その第 1 段階としては, 使用可能なデータをでき

るだけ用いて、飛しょう状況を推定する手法を求めておく必要がある。

本文も、この様な立場からできるだけ多くのデータを用いて、細かい検討を加えようとしたものであり、今後データの蓄積による事前情報の改善や hardware の改善による観測精度の向上とさらに処理手法の改善を行なうことにより、追跡精度や計算能率をあげることが期待される。

1972 年 5 月 8 日 新設部 (工学)