

L-4T-1, L-4S-4 の第3段と姿勢制御部との相対運動

玉本章夫・長友信人・雛田元紀・松尾弘毅

L-4T-1 および L-4S-4 の飛しょう実験は、それぞれ昭和44年9月3日および9月22日に行なわれた。L-4T-1 の実験は、各段ロケットの燃焼、切離し、第4段点火の前の姿勢制御など、一連の動作が正常に行なわれ、L-4S-4 に対する予備実験としての目的を達したと考えられたので、引きつづいて L-4S-4 の実験に進むことになったのである。

しかし、L-4T-1 の実験データをくわしくしらべた結果、第3段モータが燃焼終了後上段部から切離されたのちに、再びこれに接触した形跡がテレメータ記録のうえに認められた。これは第3段モータの燃えがらが、高真空下の燃焼に特有な残留推力によって加速されて上段部に追付いたものと解釈され、つぎの L-4S-4 についての対策が必要となった。当時の結論としては、第3段の燃焼終了から切離しまでの時間を引きのばすことによって、上段部との再接触は避けられるということになり、この方針で L-4S-4 の実験が行なわれたのである。その結果は、上段部の姿勢制御がほぼ終了した時点で第3段モータ部の追突がおこり、この実験は失敗に終わった。

本文は、L-4T-1 において見られた第3段と姿勢制御部の接触から、両者の切離しののちにおける相対運動について行なった考察と、L-4S-4 の実験後における検討を取りまとめたものであり、内容は「L-4T-1, L-4S-4 (昭和44年9月) 実験報告」(昭45.1, 宇宙航空研究所) そのままである。L-4S-4 の実験の結果から見て、当時残留推力に対してとった対策は適当でなかったので、本文はいわば失敗の記録ともいえるべきものである。その後ラムダあるいはミューロケットにおける残留推力の実測によるデータの積み重ねがあり、また地上試験、軌道解析などについても本文よりは詳細な研究が行なわれてすでに報告されているが[1],[2] ここではラムダ計画の経過として、当時のままの報告としたことをおことわりしておきたい。なお L-4S-4 のあとに行なわれた L-3H-6, L-4S-5 における残留推力の実測についてはこの特集号に報告があることを付記する[3]。

1. 再接触の原因

第3段モータを B_3 、姿勢制御を CN と略記する。

L-4T-1 のテレメータ記録によれば、

B_3 -CN	切断: 発射後	134.9 s
デスピコンモータ	点火:	137.0 s
B_3 -CN	接触:	144.0 s

であった。

切断用スプリングの力から計算される B_3 -CN の分離速度は 1.45 m/s で、 B_3 の重量 132

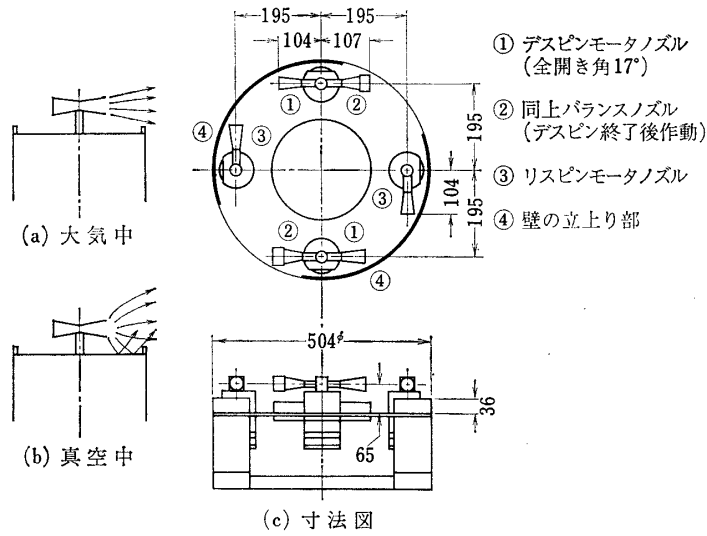
kg, CN の重量 256 kg より, B₃-CN 系の重心から見ると, それぞれの速度は

$$\text{CN: } 0.49 \text{ m/s}$$

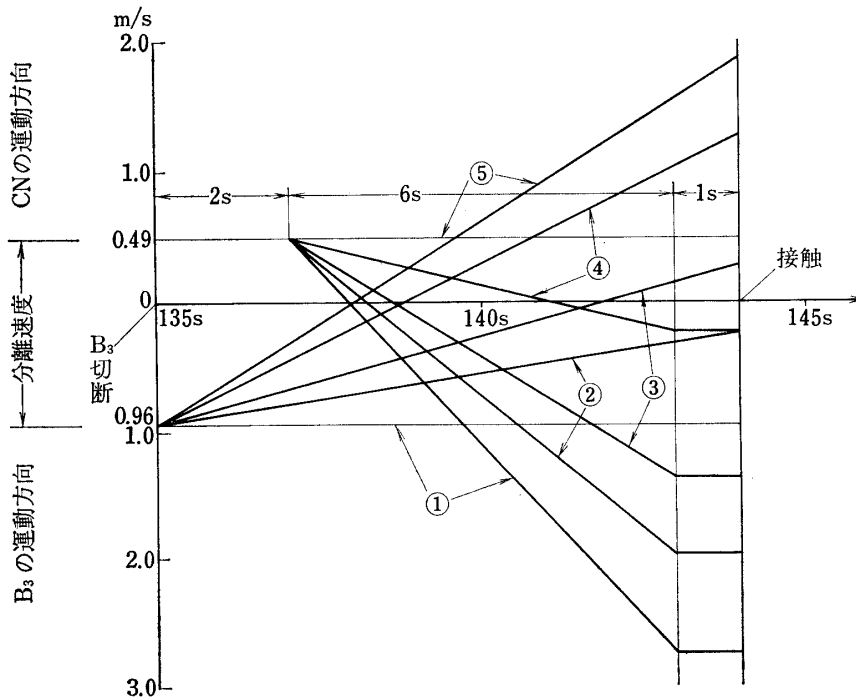
$$\text{B}_3: 0.96 \text{ m/s}$$

となる.

両者が再び接近する原因として, つぎの二つが考えられた.



第 1 図 デスピン, リスピンモータ



第 2 図 B₃-CN の相対速度

(i) B_3 の残留推力による加速: B_3 の切段が燃焼終了の 5 s 後であったが, 外気の圧力がきわめて低い宇宙空間では, モータ内部の残留物の燃焼あるいは蒸発によるガスの排出により, わずかながら推力が残る可能性がある.

(ii) CN 部デスピンの減速: デスピンモータ (リスピンのモータも同じ) は CN 部の上端面上に取り付けられ, 円周方向に噴射する (第 1 図 (c) 参照). 空気のあるところで作動するばあいは同図 (a) のようにジェットは機面に触れないので, 機体縦軸方向には力を生じないが, 高空の真空状態では (b) のようにジェットが側方に広がって機面に当たるために反力を生じ, これが CN 部を減速させる可能性がある.

(i) と (ii) の大きさについて, いろいろな値を仮定して, 切断後 9 s に再び接触するような加速度, 減速度の値の組合わせを求めた結果をつぎの表に示す. これは第 2 図の線図で, 飛行距離 (速度の時間積分) が B_3 , CN の両者で一致するという条件によって求められたものである.

	B_3		CN	
	加速度 (m/s^2)	力 (kg)	加速度 (m/s^2)	力 (kg)
1	0	0	-0.54	13.8
2	0.08	1.1	-0.41	10.5
3	0.14	1.9	-0.31	7.9
4	0.25	3.3	-0.12	3.1
5	0.32	4.2	0	0

表中, 1 はデスピンの減速のみ, 5 は B_3 の加速のみが存在するばあいである. デスピンモータの推力は $13.5 \text{ kg} \times 2 \text{ 個} = 27 \text{ kg}$ であるから, 1, 2 に仮定した CN 部の力は割合からみて明らかに大きすぎるようである. オーダからいえば, 4 のばあいあたりが妥当な値の組合わせと判断される.

2. 実験による数値の検討

以上の二つの事からは, いずれも高真空における燃焼の問題なので, その研究には高真空で排気速度の大きい真空装置が必要である. 当面の問題として, 宇宙研にある $1.3 \text{ m}\phi \times 2 \text{ m}$, 0.07 torr の真空槽を用いて, うえの現象についての実験を行ない, L-4S-4 への対策に役立たせることにしたのである.

(i) 残留推力の問題

つぎの仕様の小型ロケットモータを用い, これを大気中で燃焼させ, 燃焼終了後にこれを真空槽に取り付けて, チャンバ内圧の時間的変化を測定した.

推 薬 重 量: 約 1 kg

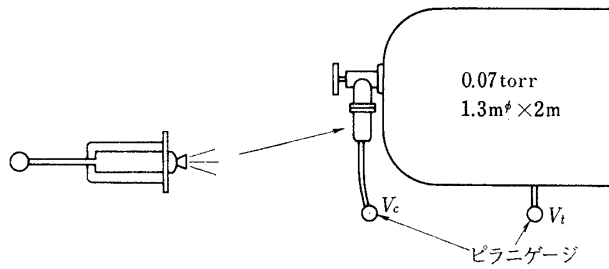
グ レ ン 形 状: $60 \text{ mm}\phi \times 200 \text{ mm}$

中 子 形 状: キーホール型

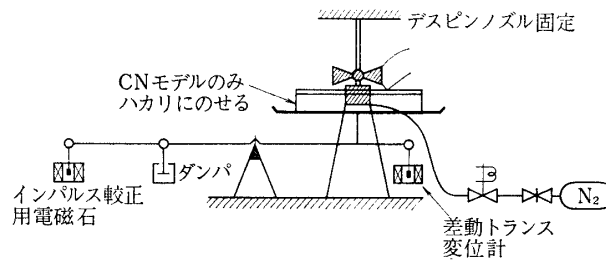
ノズルスロート: 12 mmφ

燃 焼 時 間: 3 s

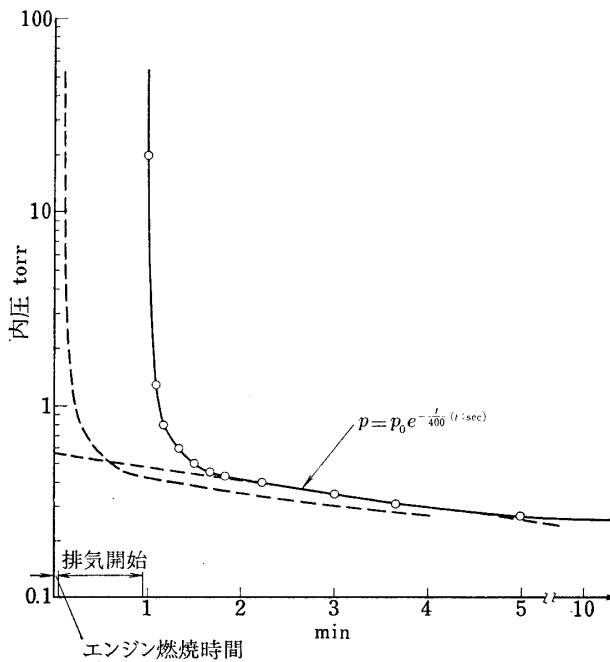
第 3 図は実験装置の略図である. 第 5 図にチャンバ内圧の測定値を示す. この実験では, モータの燃焼が終わってから, これを真空槽に取り付けるまでに時間がかかるので, 燃焼終了直後の圧力状態をはかることができない. しかし, この状態ではすでに内圧が外気圧と等



第 3 図 モータ内圧測定の実験装置



第 4 図 CN 部に働く力の測定



第 5 図 小型モータ内圧曲線

じくなっているので、取付け時間中のガスの漏出は内圧一時間曲線の長時間における傾向には大きな影響を与えないと考えてもよいであろう。この曲線を実際に真空中で燃え終わったばあいに引きなおすのはむずかしい問題であるが、第5図には、取付け時間だけ左へずらしたものを記入してある。時間 t が小さいところでこれが正確でないことはいうまでもないが、 t の大きいところにおける傾向（レストリクタのくすぶりの影響）を知るには役立つと考えた。

燃焼終了直後のチャンバ内圧の減衰に対しては、チャンバ内のガスがノズルを通して真空中に排出されるという考えから、

$$p = p_0 e^{-t/T}$$

という形に近似できるであろう。チャンバ内の状態の変化は正確にはわからないので、ここではむしろ L-4T-1 のテレメータの加速度曲線のすその部分から時定数 T を求め、

$$T = 1.6 \text{ s}$$

を得た。これを用いると、 B_3 燃焼終了直後の加速度は近似的に

$$\alpha_1 = 10 e^{-\frac{t}{1.6}} \text{ m/s}^2 \tag{1}$$

によって表わされる。これが第6図の左上部の実線である。小型モータの内圧曲線を B_3 の加速度に引きなおしたもの（左下部の破線）は上に述べた理由からも当然低すぎるが、このことを考慮に入れて、レストリクタのくすぶりに相当する長時間の加速度の項として

$$\alpha_2 = 0.01 e^{-\frac{t}{400}} \text{ m/s}^2 \tag{2}$$

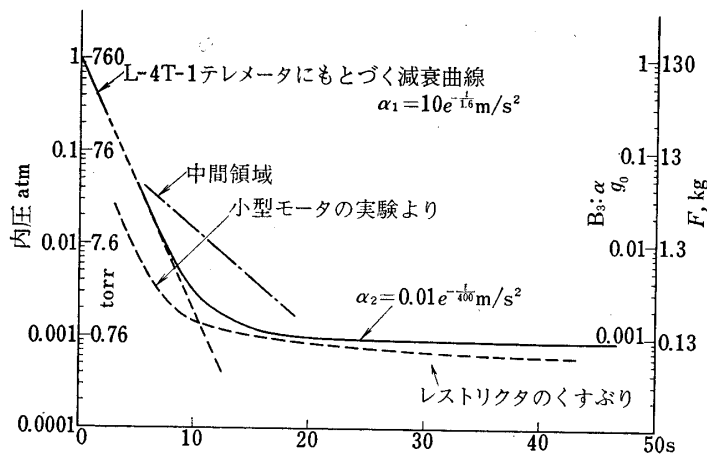
とおき、 B_3 の加速度を

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \tag{3}$$

と考えた。L-4T-1 のばあい、燃焼終了後 5~14s の間（再接触がおこるまでの間）の平均加速度が 0.25 m/s^2 の付近であろうという最初の推測と考え合わせると、実際には α_1 と α_2 とをつなぐ中間領域が図の鎖線のようなところに存在すると考えられる。

(ii) CN のデスピンのによる減速

同じ真空槽を用い、デスピンモータと同形のノズルに CN 部上端面の模型を組み合わせ、



第6図 B_3 の加速度の予想

ノズルから窒素ガスを噴出させることによって CN 部にはたらく力を求めた。第 4 図に装置の概略を示す。真空度を保つ必要から、パルス方式で力を測定することとし、0.2~1 s 間のガス噴射によって生じる力積によるハカリの変位を、あらかじめ分銅によって検定された較正用電磁石の力積による変位と比較することから力を求めた。

実機と模型との条件の対照はつぎのとおりである。

	実 機	模 型
ガスの種類	燃 焼 ガ ス	窒 素
比 熱 比	1.2~1.25	1.40
温 度	~2500°K	300°K
ノズル圧力膨張比*	500	1000
内 圧 / 外 圧	40atm/10 ⁻⁶ atm	350 torr/0.1~0.3 torr
圧 力 比	>10 ⁷	3000~1000

* ノズル面積拡散比 $A_e/A_t=40$

窒素の流量をはかり、比推力を仮定することから、推力は 126 gr、これに対して CN 部模型にかかる力は 8 gr であった。これは推力の 6.4% に当る。この実験の真空度が実際のばあいほど良くないことから考えて、実際にはもうすこし大きい反力がはたらくとみても、この 2 倍くらいまでであろう。はじめの予測もこれに近い。

3. B₃-CN の相対運動

(i) 直線上の運動と見たばあい。

第 7 図下は CN の減速による B₃-CN の相対速度の減少を示す。デスピンの燃焼は 5~6 s であるので、推力の 7% に当る。力が 5 s はたらくとして

$$0.07 \text{ m/s}^2 \times 5 \text{ s} = 0.35 \text{ m/s} \quad (4)$$

リスピンは、同じ割合の力が 4 s はたらくとして

$$0.055 \text{ m/s}^2 \times 4 \text{ s} = 0.22 \text{ m/s} \quad (5)$$

を標準とし、これらの 2 倍の減速のばあいも記入してある。また第 7 図上は (3) 式による B₃ の速度増加を示す。

B₃ の切断をその燃焼終了から 20 s とすれば、その後の速度の増加は小さく、B₃ と CN が等速になるまでに少なくとも 80 s くらいを要することになる。さらに B₃ が CN に追いつくまでを考えれば、だいたいこの 2 倍近い時間になるものと推定されたのである。

このようなばあいには、重力のわずかな差の影響、B₃、デスピン、リスピンの加速、減速の向きのちがいの影響が効いてくる。

(ii) 2 次元運動

重力場における自由落下の運動方程式は、B₃、CN とともに

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{\mu}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r} \quad (6)$$

で表わされる。μ は引力定数で

$$\mu = 3.986 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$$

である。ここで B₃, CN が微小加速 $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2$ を受けたとすると, B₃, CN の (6) 式からのずれ $\Delta \mathbf{r}_1, \Delta \mathbf{r}_2$ は (6) 式を展開した式

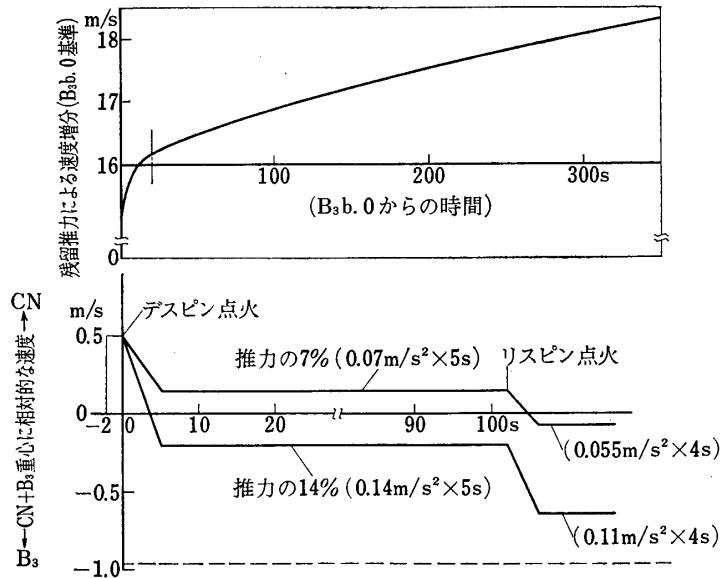
$$\Delta \ddot{\mathbf{r}}_1 = \mathbf{u}_1 - \mu \left(\frac{\Delta \mathbf{r}_1}{r^3} - 3 \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{r} \cdot \Delta \mathbf{r}_1}{r^4} \right) \quad (7)$$

$$\Delta \ddot{\mathbf{r}}_2 = \mathbf{u}_2 - \mu \left(\frac{\Delta \mathbf{r}_2}{r^3} - 3 \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{r} \cdot \Delta \mathbf{r}_2}{r^4} \right) \quad (8)$$

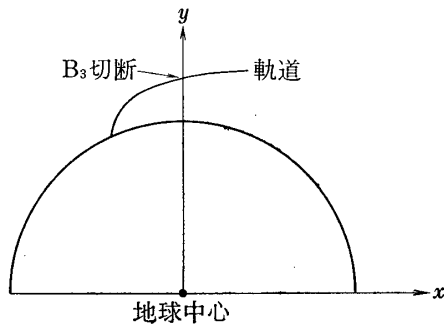
をみたとす。B₃ に対する CN の相対位置 $\Delta \mathbf{r} = \Delta \mathbf{r}_2 - \Delta \mathbf{r}_1$ は (8) から (7) を引いた式

$$\Delta \ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{u} - \mu \left(\frac{\Delta \mathbf{r}}{r^3} - 3 \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{r} \cdot \Delta \mathbf{r}}{r^4} \right) \quad (9)$$

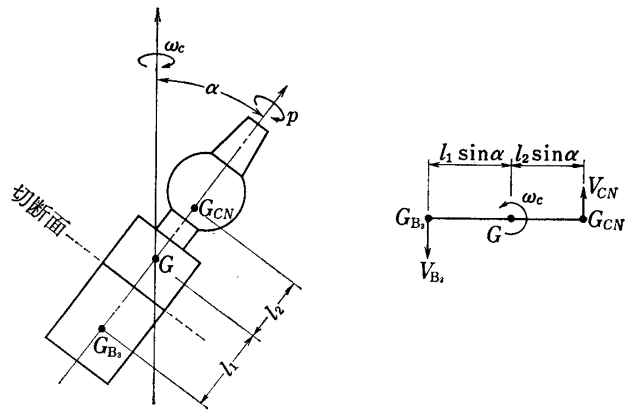
によって求められる。ここで $\mathbf{u} = \mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_1$.



第7図 B₃, CN の相対速度



第8図 座標系



第9図 スピンと首振り運動

平面運動を考え、第 8 図のように地球中心を原点とする直交座標系を用いると、(9)式は

$$\begin{cases} \Delta\ddot{x} = -\mu(x^2+y^2)^{-5/2}\{-2x^2+y^2\}\Delta x - 3xy\Delta y\} + u_x \\ \Delta\ddot{y} = -\mu(x^2+y^2)^{-5/2}\{-3xy\Delta x + (x^2-2y^2)\Delta y\} + u_y \end{cases} \quad (10)$$

となる。 $\mathbf{r}(t)=(x(t), y(t))$ は基準軌道としてわかっているの、切断時の相対速度 $\Delta\dot{x}(0)$, $\Delta\dot{y}(0)$, およびその後の相対加速度 $u_x(t)$, $u_y(t)$ を与えれば (10) 式を解くことができる。

B_3 の加速度は (3) 式で与えられるが、切断後 0~5s の間はやや大きめにとって

$$\alpha = 0.015 \text{ m/s}^2$$

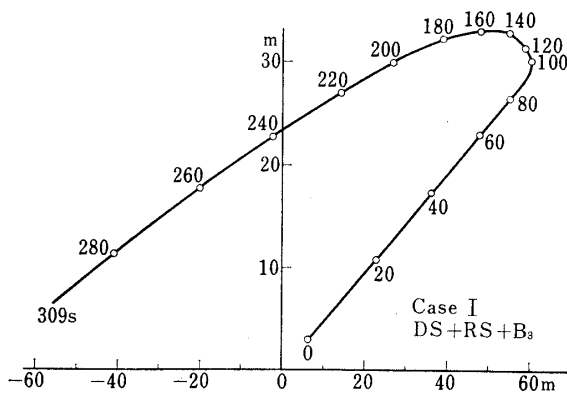
とし、またデスピンの (DS) およびリスピンの (RS) の減速は計算の便宜上、それぞれ切断後 3~5s, 105~107s の間にはたらくとし、その効果は (4), (5) 式と同じ速度変化

$$V_{DS} = 0.35 \text{ m/s}$$

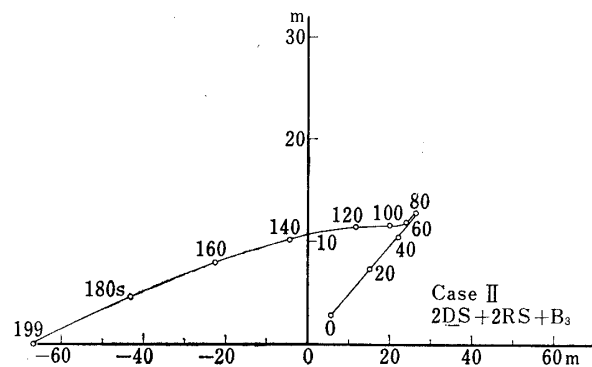
$$V_{RS} = 0.22 \text{ m/s}$$

を標準と考え、これの 2 倍のばあいをも計算した。なお、 B_3 , DS の加速度の方向は 26.5° , RS のそれは -13.5° である。

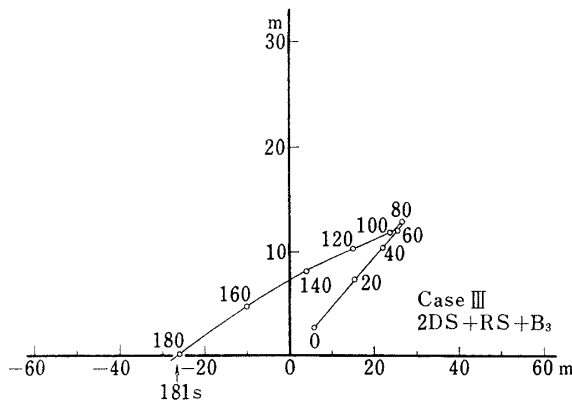
計算結果を第 10 図-1~6 に示す。これらは B_3 から見た CN の位置を示す。曲線に添えた数字は時刻 (s) であるが、切断後 5s を原点としてある。



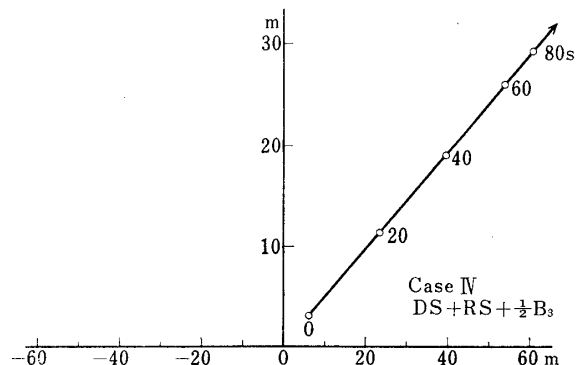
第 10 図-1 B_3 に対する CN の位置 (曲線に付した数字は B_3 切断後 5s からはかった秒時。



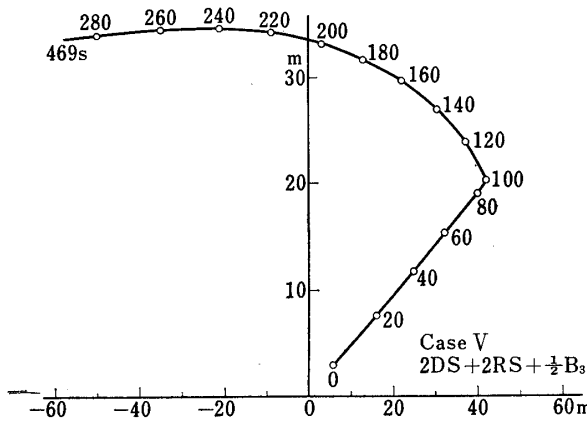
第 10 図-2 B_3 に対する CN の位置 (つづき)



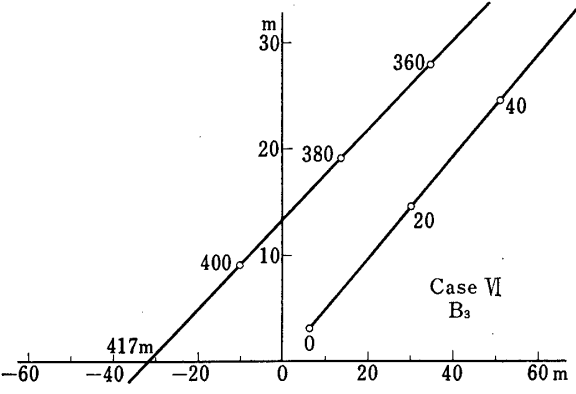
第 10 図-3 B_3 に対する CN の位置 (つづき)



第 10 図-4 B_3 に対する CN の位置 (つづき)



第 10 図-5 B₃ に対する CN の位置(つづき)



第 10 図-6 B₃ に対する CN の位置(つづき)

図が示すように、B₃ の加速がここで考えた程度であれば、B₃ が CN に追い付いたときには、上下の距離ができて、衝突することはないと考えられたのである。

4. スピン切断の影響

B₃ と CN の切断はスピンのある状態で行なわれる。一般にスピンをする機体は多少とも首振りを伴うものである。B₃+CN のばあい、首振りはわずかなものではあるが、それでも切断のさいに、分離した部分が首振り軸に直角方向に相対速度をもつことになる。

B₃+CN が第 9 図に示すように、スピン p 、首振り率 ω_c 、首振り角 α で運動しているとすると、このとき、つぎの式が成り立つ

$$\omega_c = \frac{p}{\cos \alpha} \cdot \frac{I_x}{I_y - I_x} = \frac{p}{\cos \alpha} \cdot \frac{I_x}{I_y} \quad (11)$$

ただし、 I_x : B₃+CN 結合体のロール慣性モーメント

I_y : B₃+CN 結合体のピッチ慣性モーメント

したがって、B₃、CN の重心 G_{B_3} 、 G_{CN} の運動は首振り軸に垂直に、第 9 図の右の図に示すように、

$$\left. \begin{aligned} V_{B_3} &= l_1 \omega_c \sin \alpha = l_1 p \tan \alpha \frac{I_x}{I_y} \\ V_{CN} &= l_2 \omega_c \sin \alpha = l_2 p \tan \alpha \frac{I_x}{I_y} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

ここに l_1 、 l_2 は B₃+CN の重心からそれぞれ CN、B₃ の重心までの距離である。これより、 α が小さいとき、切断後の B₃ と CN の横方向相対速度は

$$\Delta V = (l_1 + l_2) p \alpha \frac{I_x}{I_y} \quad (13)$$

となる。 $l_1 = 1.28 \text{ m}$, $l_2 = 0.66 \text{ m}$,
 $I_x = 1.57 \text{ kg ms}^2$, $I_y = 49.7 \text{ kg ms}^2$,
 $p = 2.5 \text{ rps} = 15.7 \text{ rad/s}$

より, $\alpha=1^\circ$ 当りの ΔV は

$$\Delta V = 0.017 \text{ m/s}$$

となる. L-4T-1 では $\alpha=3^\circ$ 程度であったので, 0.05 m/s 程度の横方向相対速度になる.

実際に切断後 9 s で B_3 が CN に接触した状況から推測すると, 両者は横方向に約 50 cm ずれていたとみてよく, 大体上の数値から予想されるとおりである.

したがって, L-4S-4 も切断後ある程度時間がたてば, 両者は接触しないだけ横方向に離れると考えられたのである.

5. L-4S-4 実験後の考察

実際には切断後 60 s で追突がおこった. ジャイロから得られた姿勢のデータによると, L-4S-4 では B_3 -CN 切断時刻の付近で首振りはいわゆる小さく, この点では L-4T-1 より横方向の運動のない, 良好な切断が行なわれたようである.

60 s において追突したということは B_3 の加速が予想よりかなり大きかったと見るのが妥当のようである. このへんの時刻で追い付くとすれば, 当然直線上の運動として取り扱われるべきもので, 3(ii) のような上下差は出てこないのである.

以上の考えから, L-4T-1 および L-4S-4 の二つのばあいを基礎にして, あらためて B_3 の加速の程度を検討した結果を次節に示す.

6. 追突から推定した B_3 の加速

B_3 -CN 切断以後の B_3 の加速度を

$$\alpha = ae^{-t/b} \quad (14)$$

の形に仮定する. 衝突の条件は B_3 , CN の飛行距離が等しくなるということから, L-4T-1, L-4S-4 に対して, それぞれ

$$ab^2(e^{-t_T/b} - 1) + abt_T = V_0 t_T - \frac{1}{2} V_{DS} \Delta t - V_{DS}(t_T - t_1) \quad (15)$$

$$ab^2 e^{-15/b}(e^{-t_S/b} - 1) + abe^{-15/b} t_S = V_0 t_S - \frac{1}{2} V_{DS} \Delta t - V_{DS}(t_S - t_1) \quad (16)$$

ここで, T, S : L-4T, L-4S を表わす添字

t_T, t_S : 切断時からはかった衝突時刻

t_1 : デスピンの終了時刻

Δt : デスピンの作動時間

V_{DS} : デスピンによる速度減少分

V_0 : スプリングによる分離速度

(16)式には, L-4S-4 の B_3 切断が L-4T-1 より 15 s おくれていることをふくめてある. 上記の諸量に対する数値は,

$$V_0 = 1.45 \text{ m/s}$$

$$t_T = 9 \text{ s}$$

$$t_s = 60 \text{ s}$$

$$\Delta t = 6 \text{ s}$$

$$t_1 = 2 + 6 = 8 \text{ s}$$

とし,

$$V_{DS} = 0.6, 0.4, 0 \text{ m/s}$$

の三つのばあいについて, (15), (16) 式から a , b を求めるとつぎのようになる.

V_{DS} (m/s)	0.6	0.4	0
a (m/s ²)	0.334	0.355	0.397
b (s)	11.85	12.75	13.95

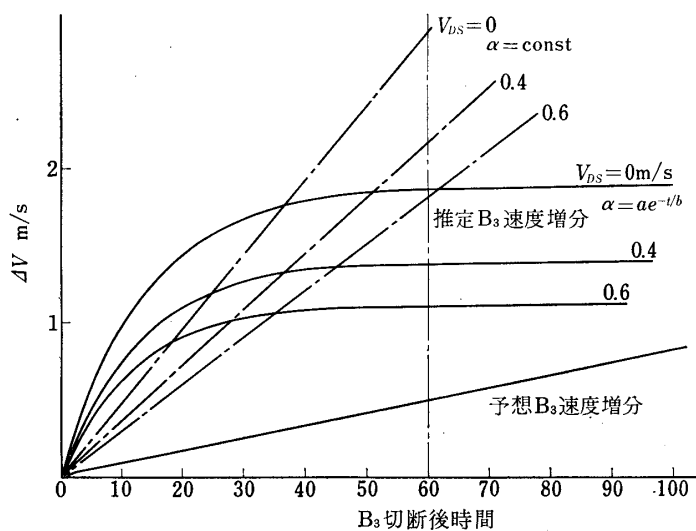
これより, L-4S-4 に関しては, B_3 切断時を基準とした B_3 の加速度が

$$\alpha = 0.094e^{-t/11.85} \text{ m/s}^2; V_{DS} = 0.6 \text{ m/s}$$

$$\alpha = 0.109e^{-t/12.75} \text{ m/s}^2; V_{DS} = 0.4 \text{ m/s}$$

$$\alpha = 0.135e^{-t/13.95} \text{ m/s}^2; V_{DS} = 0$$

となる. これらを用いて L-4S-4 の B_3 切断後の速度増分を計算した結果を第 11 図に示す.



第 11 図 B_3 の速度増分

また, 切断後 $0 \leq t \leq 60 \text{ s}$ の間の加速度を一定値でおきかえたばあいをもあわせて記入してある, これらの曲線から見て, さきの予想加速度に比べて平均として数倍の加速度が加わっていたといえる.

(14) 式の形の加速度を仮定したとき, B_3 と CN の最大距離, 衝突時の相対速度を求めると, つぎのようになる.

	L-4T-1	L-4S-4	L-4T-1	L-4S-4	L-4T-1	L-4S-4
衝突時相対速度 (m/s)	1.26	0.26	1.25	0.33	1.17	0.41
最 大 距 離 (m)	3.0	8.6	3.0	9.3	2.9	11.3
V_{Ds} (m/s)	0.6		0.4		0	

これから見ると、 B_3 と CN はあまり離れることなく、10 m くらいの距離で飛んだことになる。

接触のさいの相対速度はこの計算では、L-4T-1 の方が大きい。接触の衝撃からいえば L-4S-4 の方が大きかったのであるが、その理由は

(i) L-4T-1 の接触時には B_3 、CN の姿勢はほとんど同じで、しかも B_3 が CN の重心付近（アンテナ部）をかすめた程度であったらしいこと、

(ii) L-4S-4 のばあいは、すでに姿勢制御をおえた CN とスピンドルを保ちながら飛ぶ B_3 とは姿勢が大きくちがっているので、突き当たるように衝突したはずであり、その場所と加速度計の搭載場所との関係によっては、大きな加速度が記録されうること、などである。

上記の相対速度は B_3 の加速度が(14)式の形で与えられるばあいのことであるが、もしこれとちがった形であれば相対速度もちがってくる。たとえば加速度が一定のばあいには、L-4T-1 でも L-4S-4 でも衝突時の相対速度はほぼ等しいとみる方が妥当である。

1972年5月8日新設部（工学）

参 考 文 献

- [1] 長友信人・荒木哲夫・橋本保成，モデルロケットの内圧測定による残留推力の予想，宇宙研報告 7巻1号(A)，1971，34～49.
- [2] 秋葉鎌二郎・松尾弘毅，残留推力による衝突の軌道解析，宇宙研報告，同上，50～63.
- [3] 森 大吉郎・今沢茂夫・若原洋一，精密加速度計と残留推力特性，本特集号，641～650.