

L-4S-4 第4段の空力加熱

玉木章夫・雛田元紀

L-4S の第4段は打出しのまゝに姿勢が大きく狂ったため、北東方向へ飛び、電波追跡によれば、北太平洋の海面へ向けて落下したことになる。落下時の状態を推定するため、飛しょう資料にもとづいて大気層突入のさいの空力加熱を計算したが、これによると、ロケットは海面落下よりまゝに温度上昇と動圧とによって破壊、分散して溶けたものと推定される。

L-4S 型第4段の大気層突入のさいの空力加熱については、さきに報告してある [1]。今回の計算も全く同じ方法によるものである。ただ、4号機のばあいには、モータケースがうすくなったこと、ロケットの速度がやや大きくなったことなどで、前の報告と数値のうえでいくらか異なっている。

1. 計算の方法

この段は直径 480mm の球形モータのうえに、円柱に近い形のカバーをもつペイロード部が付いたものであるが、スピンによって姿勢を保ちながら飛ぶので、大気層にはいるさいに、モータの球形部に直接気流が当たる姿勢をとっていると考えられる。したがって球の前面に対する熱伝達の問題として取扱うことができる。

そのくわしい計算式は前報にあるので省略することとし、すじみちだけを示すと、つぎのとおりである。

(1) 表面が金属であることから、表面において解離気体の再結合が十分な速さで行なわれるばあいのよどみ点流れの熱伝達の公式を用いる。ふく射は省略する。

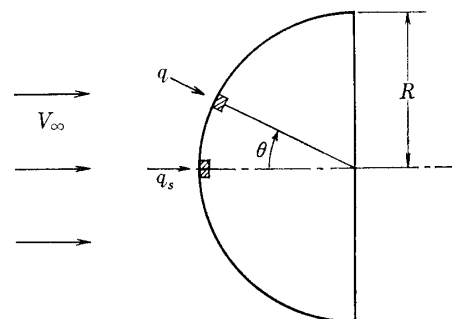
(2) 気流に対向する半球面から熱が入るとし、中心角 θ における単位面積、単位時間当りの伝熱量を q 、よどみ点 ($\theta=0$) のそれを q_s と書くとき、 $q=q_s \cos \theta$ とする(第1図)。

(3) 高度による密度の変化には等温大気を仮定する。

(4) 大気層内の弾道飛行では、軌道と水平とのなす角が一定という近似にもとづいて、速度と高度とを関係づける。

大気層に突入してから物体が受ける全熱量は、大気層突入のはじめ i (高度 100km に達したとき) から、おわり f (速度が十分に小さくなったとき) までの時間積分として

$$Q = \int_i^f \left(\int_s q ds \right) dt \quad (1)$$



第1図 半球

によって与えられる。カッコ内は半球面についての積分である。

Q はつぎのような形に書きなおすことができる。

$$Q = a\chi\bar{Q} \quad (2)$$

a は物体の形にはよらない地球上できまった値をとる定数、 χ は物体の形や質量による量、 \bar{Q} は大気層突入のさいの入射速度と角度によってきまる量である。そして

$$a = 1.878 \times 10^3 \text{ cal/(g cm)}^{1/2} \quad (3)$$

L-4S 第4段を半径 25 cm の球としたとき、 χ の値は

$$\chi = 2.58 \times 10^3 \text{ (g cm)}^{1/2} \quad (4)$$

\bar{Q} はつぎの積分で与えられる。

$$\bar{Q} = \int_0^{\bar{u}_i} \frac{\bar{u}^{3/2} d\bar{u}}{Z^{1/2} \cos^2 \theta_i} = \frac{\sqrt{\pi/2} \bar{V}_i^2}{(\beta r)^{1/4} V(-\sin \theta_i)} \quad (5)$$

ここで

$$\begin{aligned} Z &= \frac{\rho_* e^{-\beta y}}{2} \sqrt{\frac{r}{\beta}} \left(\frac{\bar{u}}{m/C_D A} \right) \\ &= \sqrt{r\beta} (\sin \theta_i) \bar{u} \ln(\bar{u}/\bar{u}_i) \end{aligned} \quad (6)$$

y : 高度, $-\theta_i$, V_i : 大気層突入のはじめの入射角, 入射速度, r : 地球半径, β : 等温大気としての高度についての密度減少の指数, ρ_* : 地表の大気密度, m, C_D, A : 物体の質量, 抵抗係数, 断面積, また

$$dy/dt = V_\infty \cos \theta_i, \quad u = V_\infty \cos \theta_i, \quad \bar{u} = u/V_c, \quad \bar{V}_i = V_i/V_c,$$

$$\bar{u}_i = \bar{V}_i \cos \theta_i, \quad V_c = \sqrt{gr} \text{ (円速度)}, \quad V_\infty: \text{物体の速度}$$

(6)式は $\theta_i = \text{const}$ の弾道飛行のばあいとの関係式である。

そこで, 高度 100 km を大気層の上端と考えて, 物体がここまで落ちてきたときの速度 \bar{V}_i と角度 θ_i とを与えれば (5) 式より \bar{Q} が求まり, (2), (3) 式より

$$Q = 4.85 \times 10^6 \bar{Q} \text{ cal} \quad (7)$$

によって全熱量 Q が求められる。

2. L-4S-4 の第4段の加熱

モータケースはチタンで, 前報の計算では厚さ 2 mm としたが, 現在のものは厚さ 1.2 mm となっている。ペイロード部カバーは 0.6 mm 厚のアルミニウムであるが, この方は薄いので加熱ははるかにはやく, 250°C 付近で強度がなくなるのでモータケースよりさきにこわれてしまうと見てよい。

厚さ 2 mm, 半径 250 mm のチタン球殻の温度を -50°C から 1630° (融点) まで上昇させるのに必要な熱量を Q_m と書くと,

$$Q_m = C m^* \Delta T$$

$$m^* = \rho_t 4\pi R^2 \tau$$

$$\rho_t = 4.5 \text{ g/cm}^3, \quad \tau = 0.2 \text{ cm}, \quad R = 25 \text{ cm}$$

$$\Delta T = 1630 + 50 = 1680 \text{ deg}$$

$$C = 0.12 \text{ cal/g}\cdot\text{deg}$$

これより

$$Q_m = 1.41 \times 10^6 \text{ cal} \tag{8}$$

となるが, $\tau = 0.12 \text{ cm}$ とすれば

$$Q_m = 0.85 \times 10^6 \text{ cal} \tag{9}$$

となる.

したがって (5), (7) 式から求めた Q を上の Q_m と比較することによって入射体が溶けるかどうかの判別ができる.

実際にはチタンが融点に達しなくても, 700°C 付近になると急速に強度が低下するので [2, 3], 動圧によって破壊し, 小さな破片となることによってさらに溶けやすくなると考えられる. 前報に示したように, Q は曲率半径 R の $3/2$ 乗に比例し, Q_m は R の 2 乗に比例するから, Q/Q_m は R の $1/2$ 乗に逆比例する. したがって小さいものほど溶けやすくなるとみてよい.

Q_m の代わりに, 温度上昇 $\Delta T = 700 \text{ deg}$ を与える $Q_{m'}$ を考えれば

$$Q_{m'} = 0.35 \times 10^6 \text{ cal} \tag{10}$$

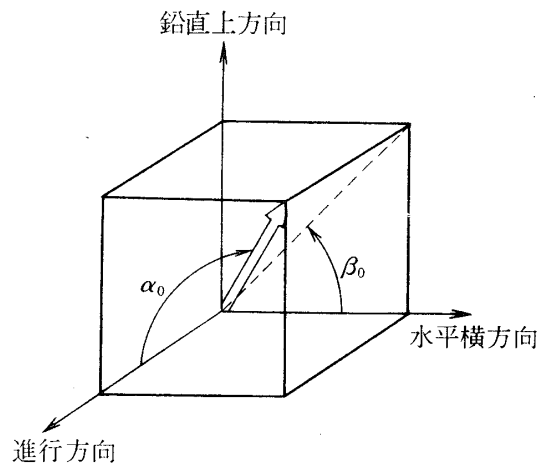
L-4S-4 を上下角 64° , 方位角 95° で発射したばあいを考え, 径路頂点の計画値:

高度 = 570 km

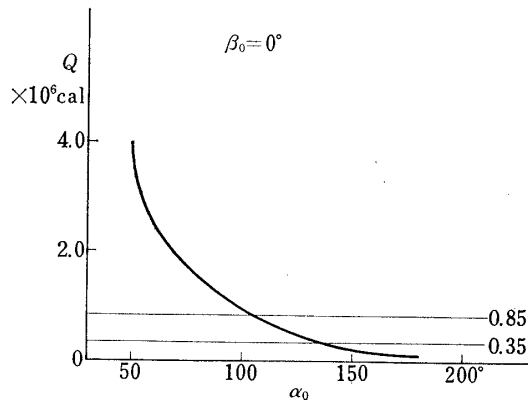
速度 = 3.76 km/s

の状態から, 第 4 段を燃焼させて, $\Delta V = 3.9 \text{ km/s}$ の速度を与えるとする. このばあいに, 第 4 段の姿勢をいろいろに変えて飛ばすよう径路を計算し, 落下のさいに高度 100 km に達したときの速度と入射角を求め, これから前節の Q を計算した結果を示す.

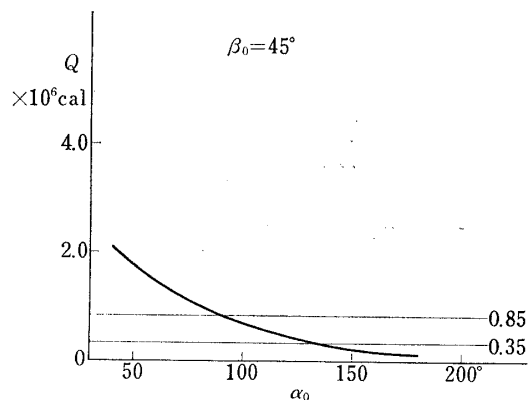
第 4 段点火のさいの姿勢を第 2 図の α_0, β_0 で表わす. $\alpha_0 = 0$ が正常の水平打出しに相当



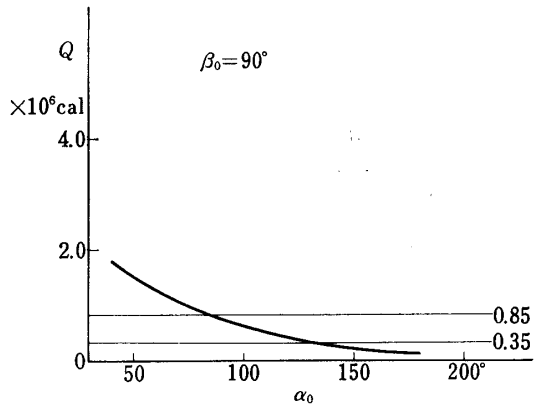
第 2 図 第 4 段の姿勢の表示



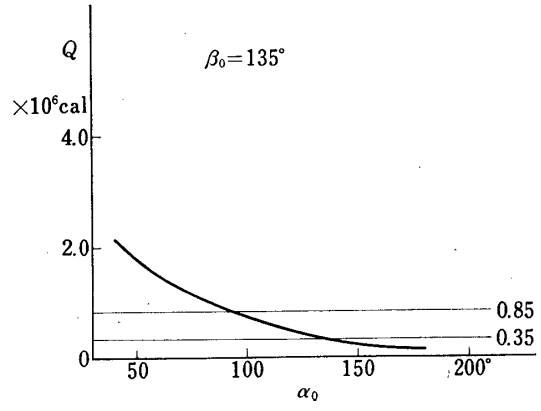
第 3 図 Q 対 $\alpha_0 (\beta_0 = 0^\circ)$



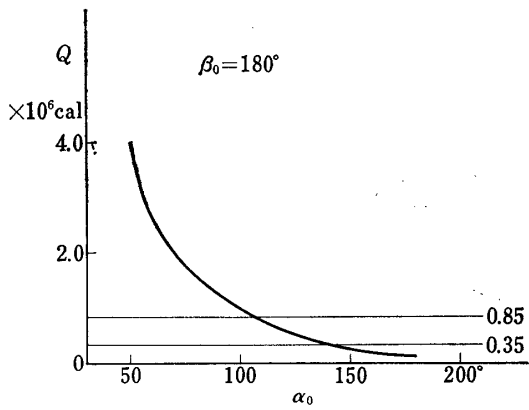
第 4 図 Q 対 $\alpha_0 (\beta_0 = 45^\circ)$



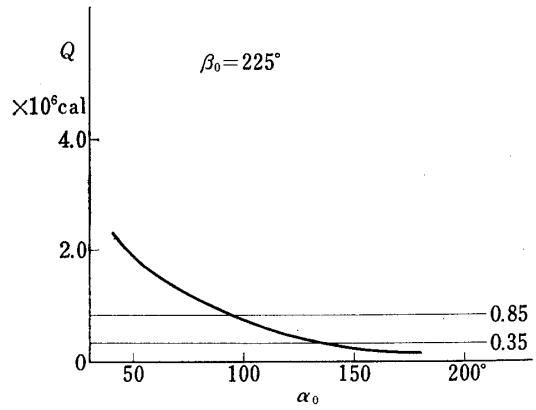
第5図 Q 対 α_0 ($\beta_0=90^\circ$)



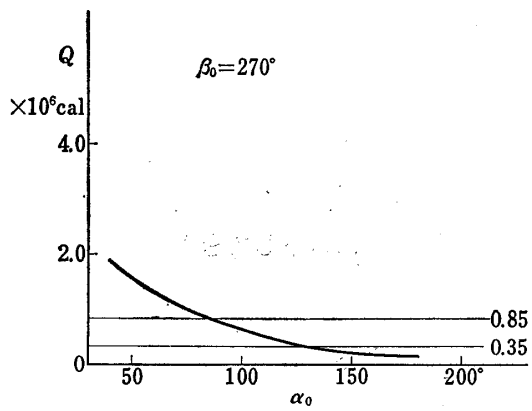
第6図 Q 対 α_0 ($\beta_0=135^\circ$)



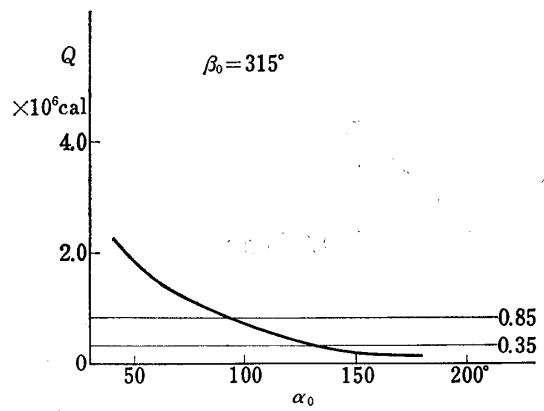
第7図 Q 対 α_0 ($\beta_0=180^\circ$)



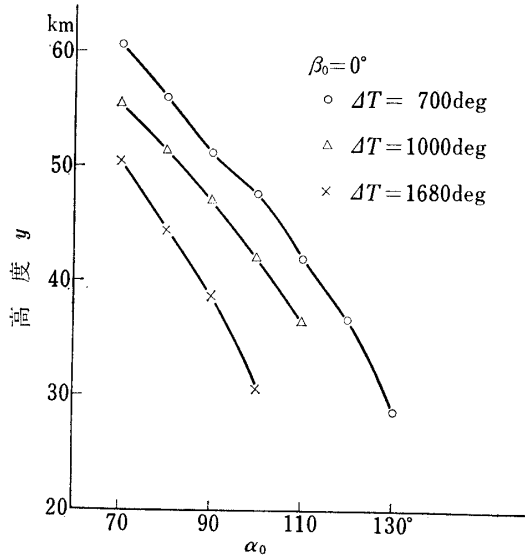
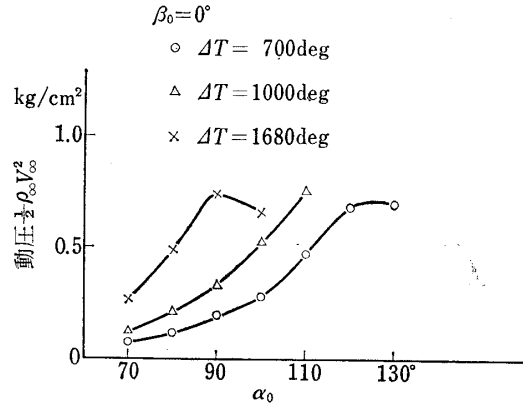
第8図 Q 対 α_0 ($\beta_0=225^\circ$)



第9図 Q 対 α_0 ($\beta_0=270^\circ$)



第10図 Q 対 α_0 ($\beta_0=315^\circ$)

第 11 図 温度上昇に対応する高度 $y(\beta_0=0^\circ)$ 第 12 図 温度上昇に対応する動圧 $\frac{1}{2}\rho_\infty V_\infty^2$
($\beta_0=0^\circ$)

する。

β_0 を 0° から 45° おきに変えたとき, α_0 に対して Q をえがいたのが第 3~10 図である。 $\beta_0=0^\circ$ と 180° とは地球の自転によるわずかなちがいだけである。これらの図からみて, $\alpha_0 < 85^\circ$ ならば $Q > Q_m$, また $\alpha_0 < 130^\circ$ ならば $Q > Q_m'$ である。

入射体の速度が V_i からある V_∞ まで下ったときまでにこの物体が受けた熱量は, (5) 式の積分の下限を $\bar{u} = (V_\infty/V_c) \cos \theta_i$ としたものによって計算される。このようにして熱量が Q_m' , Q_m に達するときの高度と動圧を計算した例を第 11~14 図に示す。これらの図には温度上昇が 1,000 deg になる高度, 動圧をも記入してある。

角度によっていくらかちがうが, $\alpha_0 = 120 \sim 130^\circ$ のばあい, 温度上昇が 700 deg に達するのは高度 30~20 km, 動圧は 0.7~1.5 kg/cm² の程度である。

L-4S-4 は発射後 211s において第 3 段の燃えがちらが第 4 段ロケットをふくむ機体に追突したため, 第 4 段打出しの姿勢が狂った。

第 4 段の点火時の高度は 660 km で, そのときの姿勢と, 燃焼終了時の合成速度は観測データから計算して

$$\alpha_0^* = 98.5^\circ, \beta_0^* = 18.5^\circ$$

$$V_\infty^* = 5.215 \text{ km/s}$$

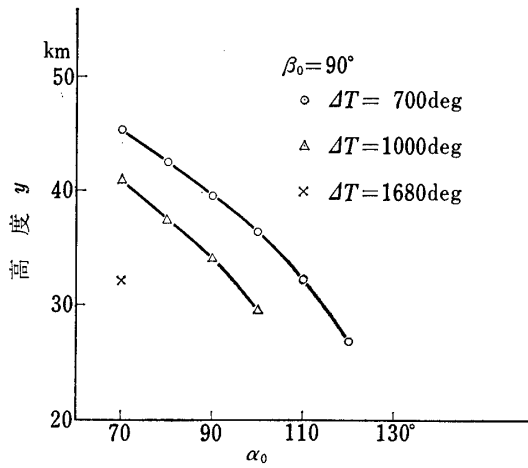
であった。その後の飛しょう径路の計算から, 高度 100 km に落下してきたときの速度と角度を求めると,

$$V_i^* = 6.127 \text{ km/s}, \theta_i^* = -28.73^\circ$$

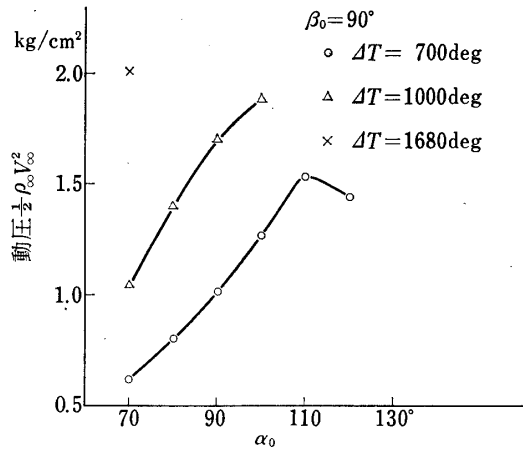
となる。これより, 前節の方法で大気層内で受ける熱量を計算すると,

$$Q^* = 0.95 \times 10^6 \text{ cal}$$

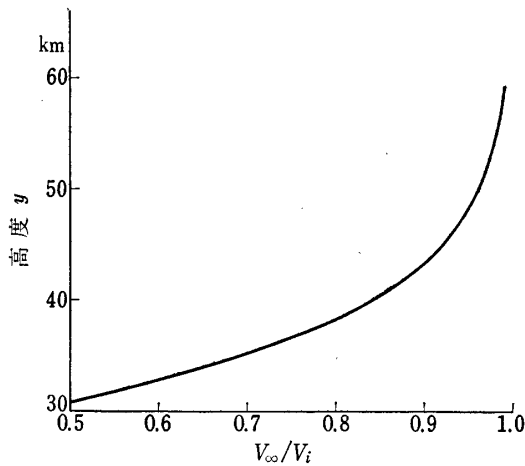
となり, ケースの温度が融点に達するのに必要な (9) 式の Q_m よりいくらか大きい。



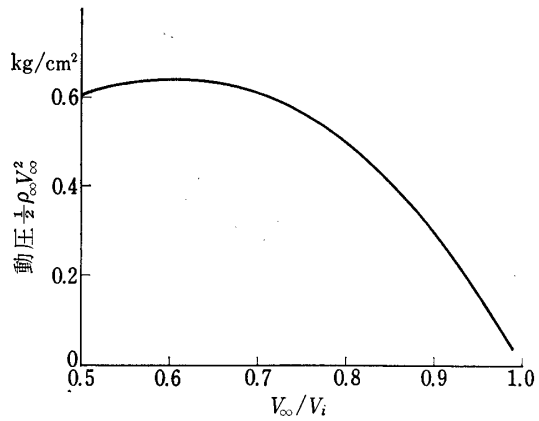
第13図 温度上昇に対応する高度 $y(\beta_0=90^\circ)$



第14図 温度上昇に対応する動圧 $\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2$ ($\beta_0=90^\circ$)



第15図 落下中の速度と高度の関係



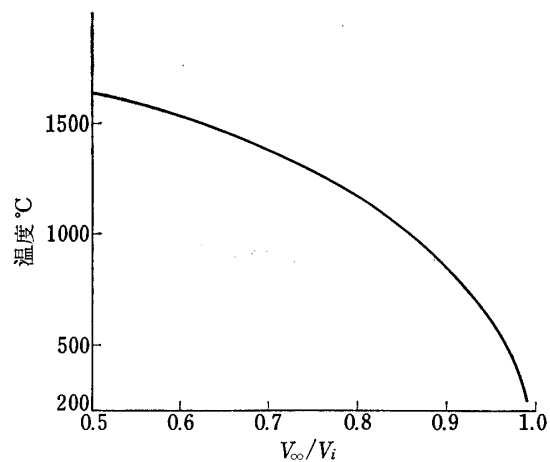
第16図 落下中の速度と動圧の関係

またこのばあい落下中の速度 V_∞/V_i と高度 y , 動圧 $(1/2)\rho_\infty V_\infty^2$ および温度との関係を第15~17図に示す。

高度 50 km よりやや下ったところで、温度は 700° に達し、さらに高度が下るとともに温度は上り、動圧が増大するので、おそらく 40~30 km の高度でこわれ、小さい破片となりながら溶けたものと推定される。

3. むすび

L-4S型第4段の打出しに関連して、落下のさいの空力加熱を計算した。



第17図 落下中の速度と温度の関係

4号機が予期しない時点で姿勢に異常をきたし、北東方向へ飛んだが、これは北太平洋の海面に落ちるまえに破壊、分散しながら溶けたものと推定される。

ここに示した計算からわかるように、第4段はその打出しのさいによほど大きく姿勢が狂わないかぎり、大気突入のさいに溶けるか、少なくともこわれて部分的に溶けながら落下すると見てよい。

もちろん、第4段の姿勢が大きく狂ったばあいには、これに点火しない方がより安全と考えられるので、今後の実験ではテレメータによって第4段の姿勢に異常を認めたならば、ただちにコマンド電波によってこの段の点火を止めるべきものと考えている。

1972年5月8日 新設部 (工学)

参 考 文 献

- [1] 玉木章夫ほか, 宇宙研報告4巻4号B, 1968, 583-600
- [2] 深井誠吉ほか, Sumitomo Light Metal Techn. Rept. Vol. 1, No. 4, 1960
- [3] 鈴木脩二郎ほか, 同上, Vol. 7, No. 3, 1966