

# ラムダロケットの第1段切断に 伴う衝撃について

森 大吉郎・富田 文治\*

## 1. 緒 言

ラムダロケットの第一段切離装置は、火薬を用いて接手部を輪切りにする方法で、切離しにおける衝撃はかなり強いが、信頼性の高い方法である。

ラムダ級の2, 3段式ロケット, L-2, L-3, L-3H を通じての計7機においては、本切断装置の作動は完全で、また、切断の際の機体および搭載計器の不具合は皆無であったが、L-4S (4段式) の3号機において、別稿のように、切断による衝撃のため、第4段接手部が故障を起し、事前の切離しが行なわれた。この故障の原因探求と対策の一環として第1段切断時の衝撃測定についての地上試験を実施した。以下にその概要を報告する。

## 2. 試験方法

第1図には、第1段切断装置の概要を示す。火薬をVリング内に充填し、2個の雷管を配置して点火する。火薬の爆発による火焰と圧力をもって接手の最小断面部を溶断する。

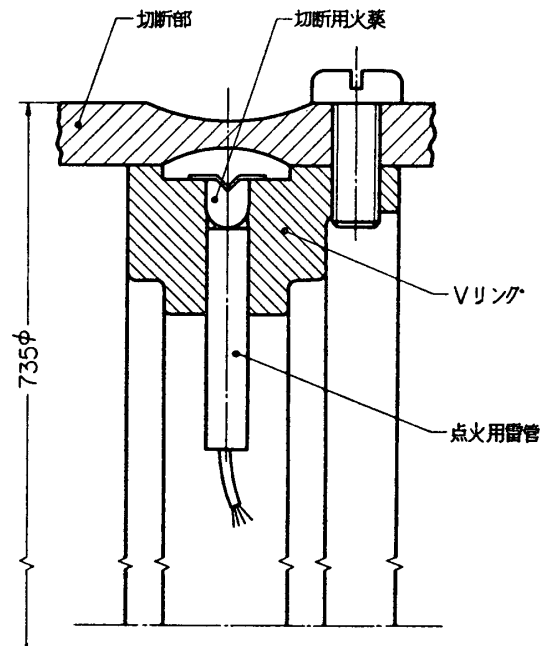
第2段ノズルへの爆風の影響を防ぐために、しゃへい板が設けてある。

第2図には、試験装置を示す。2段以上については、L-4S に外径を相似させた軟鋼製模型を作り、2段と3段のチャンバには、水を充填できるようにした。第4段は集中質量とし、その接手部は実機と同一構造にした。第1段としては集中質量を用いた。

全体は2本つりにし、2, 3段チャンバには水を張って重量を実機に近づけた。

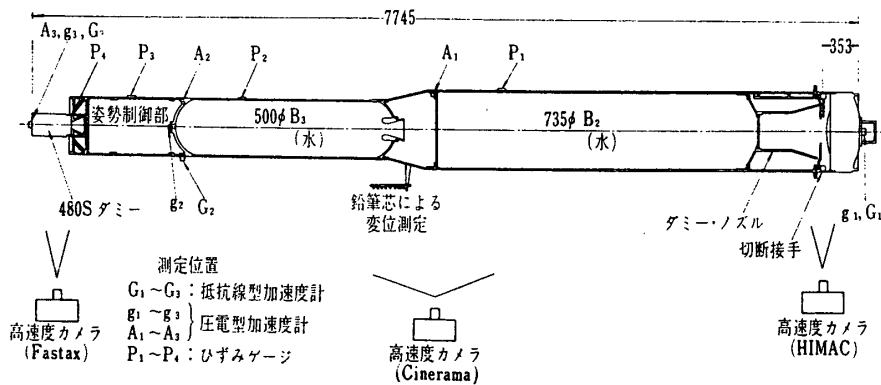
計測位置を第2図に、そのブロックダイアグラムを第3図に示す。加速度計とひずみ計を取付け、なお、変位測定用グリッド(鉛筆のしん)を取付けてある。

高速度カメラは、切断部、第4段接手部および全景を撮るように、3台を配置した。

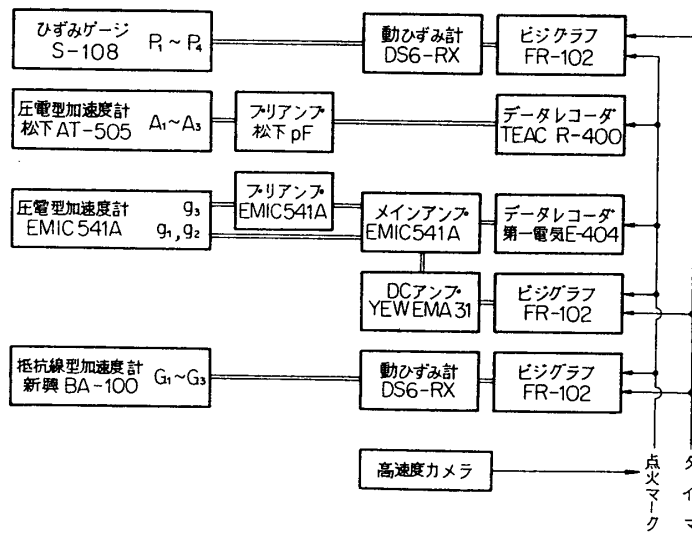


第1図 第1段切断装置

\* 航空力学部



第 2 図 試験装置および計測位置略図



第 3 図 計測系

試験体は、帝国火工品 K. K. 川越工場内の爆破試験場にすえ、記録装置類は試験体より約 20 m 離れたコンクリート製の防爆ドームの中に配置して、約 6 名の計測員が測定と記録に従事した。

### 3. 試験の経過

試験は、昭和 42 年 5 月にはじめ、同年 10 月と 12 月および昭和 43 年 6 月の 3 回に分けて実施した。

試験の内容は、第一には、上段各部に伝はんされる衝撃の実態を把握すること、第二には、切断薬量の減少と機構の改良によって衝撃の軽減化を図ること、の 2 段階に分かれる。

なお、これらの主試験の前後には、長さ 150 mm の平板を用いての基礎試験、直径 300 mm のリングによる予備試験、実機型リングによる簡易作動試験等を、数回にわたって実施している。最初にラムダ 2 型に本装置をはじめて採用する際にも基礎試験を行なっているが、それは主として上記の簡易作動試験であった。

### 4. 実 測 例

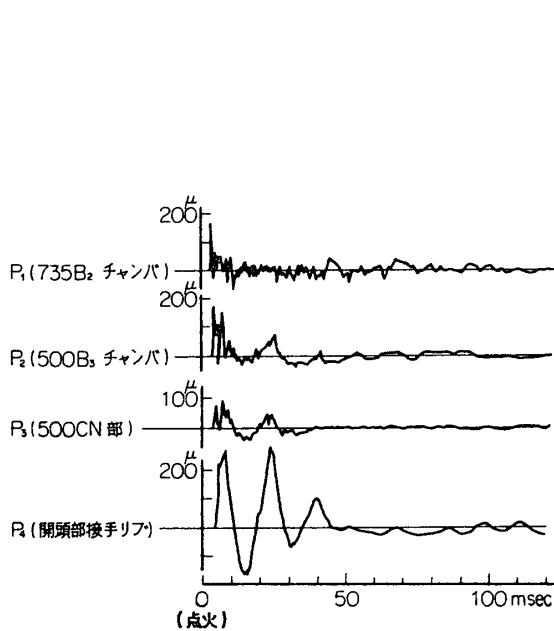
昭和 43 年 6 月に実施した試験を例として選び、その記録を第 4 図に示した。

第 4-a 図には、ひずみの記録を示す。

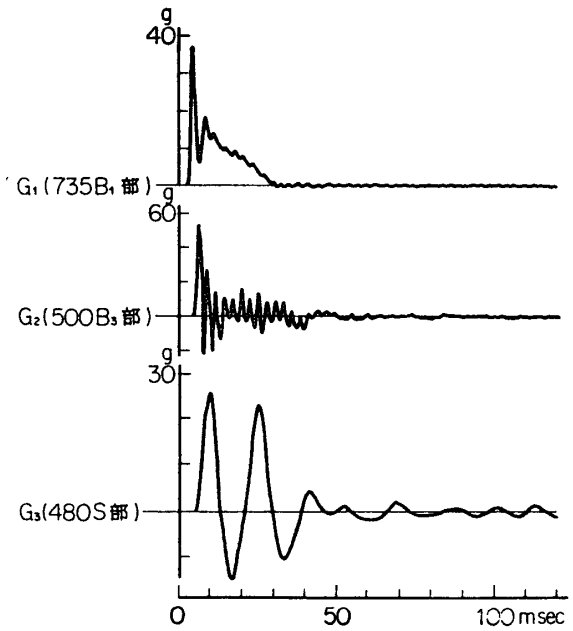
第 4-b 図、第 4-c 図には、加速度の記録を示す。

第 4-d 図には、第 1 段および 480 S の速度と加速度の記録（高速度カメラよりの観測）を示す。

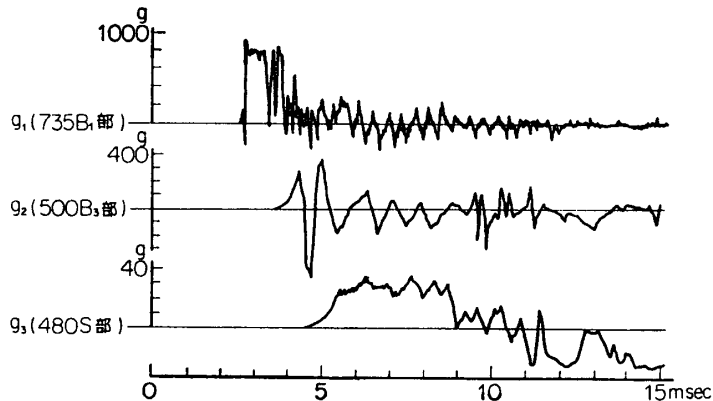
(a) 衝撃波とその伝ぱん 第 4-a 図はチャンバの軸方向ひずみを、第 4-b 図は、抵抗線型加速度計による加速度を記録したものであるが、一見して切断の際の衝撃は「ton-ms」級の短時間の大きな力であることがわかる。そして各点の応答は、この衝撃力を受けたときの弾性体の縦振動として解明すべき範囲にある。



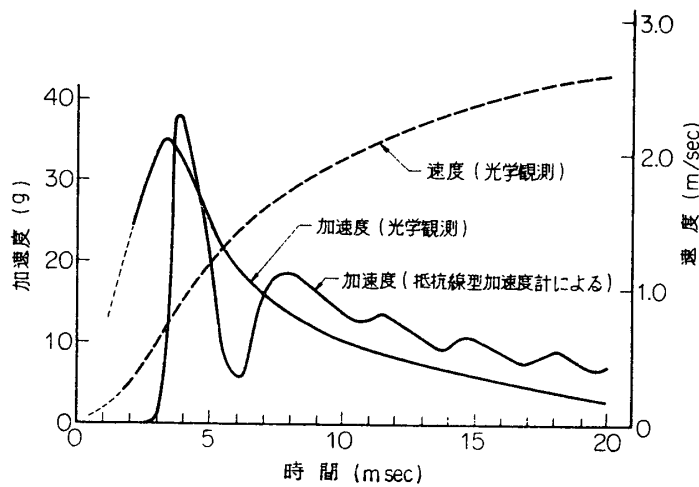
第 4-a 図 ひずみの記録



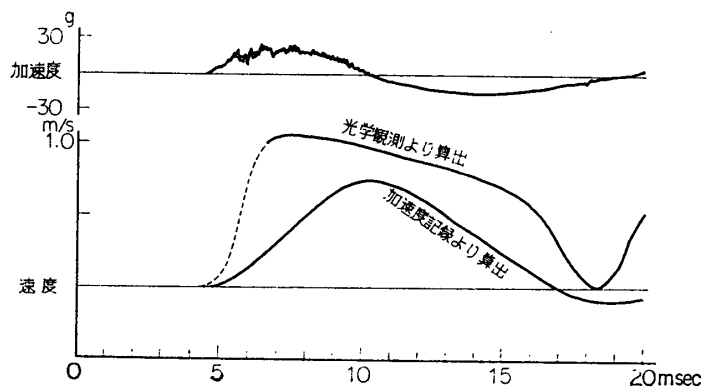
第 4-b 図 加速度の記録



第 4-c 図 加速度の記録 (チタン酸バリウム型加速度計)



第4-d-1 図 第1段ダミーの速度と加速度



第4-d-2 図 480S ダミーの速度と加速度

第4-a 図は、第2 図に示すチャンバおよび胴体の各点の軸方向ひずみの記録である。これより衝撃波の伝ば速度を概算すると第1表のごとくなる。鋼材における伝ば速度の計算値  $5100\text{m/s}$  と対応して、波形の崩れや計測系の応答などの誤差要因をあわせ考えると、大略値として、鋼管中の普通の波の伝ばんをしていると認められる。なお4-c 図のチタン酸バリウム型加速度計による加速度の記録から求めた伝ばん速度をもあわせ掲げてあるが、その追従性のよいことから、この方がより正確に伝ばん状況を示していると考えてよい。次に、ひずみ波がチャンバの円周方向に均一と仮定すると、ひずみの値から、伝ばんしている力が計算できる。ひずみの最大値から計算した衝撃力を第2表に示す。第2段チャンバにかなり大きな力が作用するが、その力は、上段に伝わる過程でかなり減衰してゆくことがわかる。

(b) 加速度 加速度の記録の例は、第4-b, c 図であるが、抵抗線型加速度計とチタン酸バリウム型加速度計の記録は絶対値、波形ともはなはだしく相違している。第3表にその主要値を示す。一般的に言えば、抵抗線型加速度計の固有振動数は  $320\text{c/s}$  で使用範囲は  $\text{DC}\sim 200\text{c/s}$ 、チタン酸バリウム型加速度計の使用範囲は  $20\sim 2000\text{c/s}$  で、後者の方が、短時間の現象記録には正確であるといえるが、一方では大きな動きを把握するには不便なこと

第 1 表 衝撃波の伝ぱん

		切断面よりの距離		立ち上り時間		伝ぱん速度*
		mm	mm	ms	ms	m/s
ひずみ	第 2 段チャンバ $P_1$	3,020	(2,670)	3.3	(0.7)	3,820
	第 3 段チャンバ $P_2$	5,370	(5,020)	4	(1.4)	3,590
	姿勢制御部外板 $P_3$	6,220	(5,870)	4.3	(1.7)	3,450
	第 4 段接手リブ $P_4$	6,900	(6,550)	4.8	(2.2)	2,980
加速度	第 1 段ダミー $G_1$	350	( 0 )	2.6	( 0 )	—
	第 2 段鏡板部 $A_1$	3,620	(3,270)	3.35	(0.75)	4,360
	第 3 段鏡板部 $A_2, G_2$	5,970	(5,620)	3.7	(1.1)	5,110
	480 S ダミー $A_3, G_3$	7,390	(7,040)	4.4	(1.8)	3,910

\* 距離および立ち上り時間の ( ) 内の値は、切断面より 350 mm の位置 ( $G_1$ ) における値を基準にしたもの。伝ぱん速度の計算には、この値を用いて (距離)/(立ち上り時間)として点火電流 ON から点火までに要する時間を補正してある。

第 2 表 ひずみより計算した衝撃力

		断面積	最大ひずみ	衝撃力
		cm <sup>2</sup>	$\times 10^{-6}$	ton
第 2 段チャンバ $P_1$		138.5	165	48
第 3 段チャンバ $P_2$		38.5	170	11
姿勢制御部 $P_3$		31.6	100	4.5
第 4 段接手部 $P_4$		7.2*	260	3.9

\* 第 4 段接手部は、円筒でなくて、フランジと 4 本のリブによる支持構造であるので、静的な試験の結果からの軸力—ひずみ特性を用いて衝撃力を算出した。

第 3 表 加速度の最大値

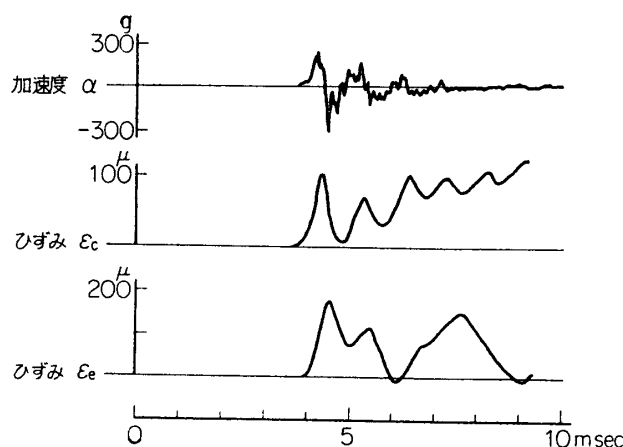
		抵抗線型加速度計		チタン酸バリウム型加速度計	
第 1 段 ダミー	$G_1$	38 g		$g_1$	934 g
第 2 段 鏡板部				$A_1$	980
第 3 段 鏡板部	{ $G_2$	56.2		$g_2$	302
				$A_2$	270
第 4 段 ダミー	{ $G_3$	26		$g_3$	33.5
				$A_3$	20

が往々にある。前者は、大体 200 c/s 以下の固有振動数をもった系の応答、あるいは、全般としての動きを概観するに便利である。

波の伝ぱんにおいて、ひずみ  $\epsilon$  と、局部加速度  $\alpha$  との間には音速を  $c$  として

$$\alpha = c \frac{d\epsilon}{dt}$$

の関係があるから、第 4-b 図の加速度記録から積分して、ひずみを計算できる。これを実測と対比した例を第 5 図に示す。絶対値の対応はあまりよくないが、第 1 波の波形は定性的



第5図 加速度とひずみの対比

加速度 $\alpha$ とひずみ $\varepsilon_e$ は実測値を示す。ひずみ $\varepsilon_c$ は

$$\varepsilon_c = \frac{1}{c} \int_0^t \alpha dt$$

の式を用いて、加速度 $\alpha$ を積分して求めたものである。

には似ている。

(c) 高速度カメラで、第1段ダミーおよび第4段ダミーの動きが撮影されているが、これらより微分して、速度と加速度を求めたのが、第4-d図である。その加速度の値を抵抗線型加速度計による測定値と比較すると、カメラ記録は振動波形までは追従し切れないが、絶対値では大略の対応を示していることがわかる。カメラ記録は、全体の動きを知る上に重要である。

第4-d図より、衝撃により受けた運動量を概算する。

第1段ダミー：重量 1,125 kg, 最大速度 (+20 ms) 2.6 m/s, 運動量 298 kg·s

第2段以降：重量 2,440 kg (水も含む), 最大速度 (第2段チャンバ, +150 ms) 0.79 m/s  
運動量 197 kg·s

(d) 第4段は、下段との結合部が、第2図に示すように、円筒で直結されるのではなく、フランジと支柱で結合されているから、その支持剛性値が低く、一方、第4段自体は剛性が高く、集中質量と考えてよい。そして、支持構造と第4段で形成される振動系の固有振動数は、実測によると、約 65 c/s である。

第4-a, b, c図を見ると、第4段については、このように、下段と比較しては“柔かい結合”であって、65 c/sの固有振動が誘起されていることがわかる。そして、この程度の振動数応答の範囲では、ひずみと、両種の加速度計による計測値は、波形をも含めて大略よい一致を示している。

## 5. 縦衝撃の解析

端面に衝撃を受けた際の弾性棒の縦衝撃としてこの問題を取扱うときに、第一の解析法は連続弾性体として微分方程式を直接に解く方法であろう。すなわち、運動の基礎式は

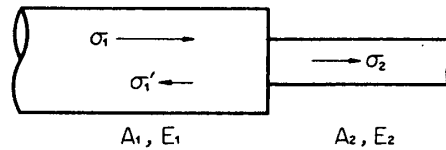
$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

ここに  $u$  は変位,  $E$  は縦弾性係数,  $\rho$  は密度,  $A$  は断面積である. 式 (1) は波動方程式で, 弾性応力波が, 音速  $c$

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [\approx 5, 100 \text{ m/s (鋼)}] \quad (2)$$

で伝はんすることを示している.

断面変化部での入射応力波  $\sigma_1$ , 反射応力波  $\sigma_1'$ , 透過応力波  $\sigma_2$  の間の関係式は



変位の連続より

$$\frac{\sigma_1}{E_1} - \frac{\sigma_1'}{E_1} = \frac{\sigma_2}{E_2} \quad (3)$$

力の連続より

$$A_1(\sigma_1 + \sigma_1') = A_2\sigma_2 \quad (4)$$

である. 式 (3), (4) を解いて

$$A_1\sigma_1' = \frac{1 - \frac{A_1E_1}{A_2E_2}}{1 + \frac{A_1E_1}{A_2E_2}} A_1\sigma_1, \quad A_2\sigma_2 = \frac{2}{1 + \frac{A_1E_1}{A_2E_2}} A_1\sigma_1 \quad (5)$$

となる. すなわち, 断面変化部での力  $A\sigma$  の反射と透過は, そこにおける縦の剛性  $AE$  によって支配されることがわかる.

本実験で, 2 段目と 3 段目の縦剛性の比は, 接手部での減衰を無視すると

$$\frac{(EA)_2}{(EA)_3} = \frac{A_2}{A_3} = \left(\frac{D_2}{D_3}\right)^2 \approx 2 \quad (6)$$

であるから, 三段目に透過する弾性波の力  $A_3\sigma_3$  と応力  $\sigma_3$  は,

$$A_3\sigma_3 \approx \frac{2}{3} A_2\sigma_2, \quad \sigma_3 \approx \frac{4}{3} \sigma_2 \quad (7)$$

の程度であろうと予想される.

端面の変位が一樣であると仮定すれば, チャンバと推薬 (本実験では水) とに衝撃力が分配されて, その比は  $w, s$  を水と鋼の下添字とすると

$$\frac{(EA)_w}{(EA)_s} = \frac{E_w \pi D^2 / 4}{E_s \pi D t} = \frac{D E_w}{4 t E_s} \quad (8)$$

$$\approx 0.32 \quad (2 \text{ 段目}),$$

$$\approx 0.65 \quad (3 \text{ 段目}),$$

となる. すなわち, 2 段目では, 力の約 1/4 が, 3 段目では約 1/3 が水に分配されることになる.

この衝撃波は水中を音速約 1,500 m/s で伝ぱんして他端に達する。

これらの考察を通じて、衝撃波の伝ぱんと断面変化部での透過と反射、力の分配、あるいは減衰等の吟味ができるが、実際の結果との対比はまだ必ずしもよくはないので、これのみにては不十分の感がある。

第二の解析法は系を区分して、ばねと質点の連続したものとし、lumped mass 系に置き替えての計算である。われわれの例では胴体を第6図のように九つの区分に分け、質量を区分し、その間を有効剛性から算出したばねで結んだ。ただし、最終区間のばねは実機振動実験より求めた値を用いた。

基礎式は

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{u}_1 &= k_1(u_2 - u_1) + f(t) \\ &\dots\dots\dots \\ m_j \ddot{u}_j &= k_j(u_{j+1} - u_j) - k_{j-1}(u_j - u_{j-1}) \\ &\dots\dots\dots \\ m_{n+1} \ddot{u}_{n+1} &= -k_n(u_{n+1} - u_n) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ばね定数  $k_j$  は圧縮剛性  $(EA)_j$  をその区間の長さ  $L_j$  で割ったものである。 $f(t)$  は一端に与えられる外力である。推葉重量の影響をとり入れるため、パラメタ  $\alpha$  をとり、

$$m_j = m_{sj} + \alpha m_{pj} \quad (10)$$

とし、 $\alpha$  を0から1まで変化させた。ただし、 $m_s$ 、 $m_p$  はそれぞれ構造、推葉の質量である。

時間を  $\Delta t$  に区切り、 $t = i\Delta t$  における関係式を式(9)より導くと、

$$\left. \begin{aligned} u_1(i+1) &= 2u_1(i) - u_1(i-1) + \frac{(\Delta t)^2 k_1}{m_1} \{u_2(i) - u_1(i)\} \\ &\quad + \frac{(\Delta t)^2}{m_1} f(i) \\ &\dots\dots\dots \\ u_j(i+1) &= 2u_j(i) - u_j(i-1) + \frac{(\Delta t)^2 k_j}{m_j} \{u_{j+1}(i) - u_j(i)\} \\ &\quad - \frac{(\Delta t)^2 k_{j-1}}{m_j} \{u_j(i) - u_{j-1}(i)\} \\ &\dots\dots\dots \\ u_{n+1}(i+1) &= 2u_{n+1}(i) - u_{n+1}(i-1) - \frac{(\Delta t)^2 k_n}{m_{n+1}} \\ &\quad \times \{u_{n+1}(i) - u_n(i)\} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

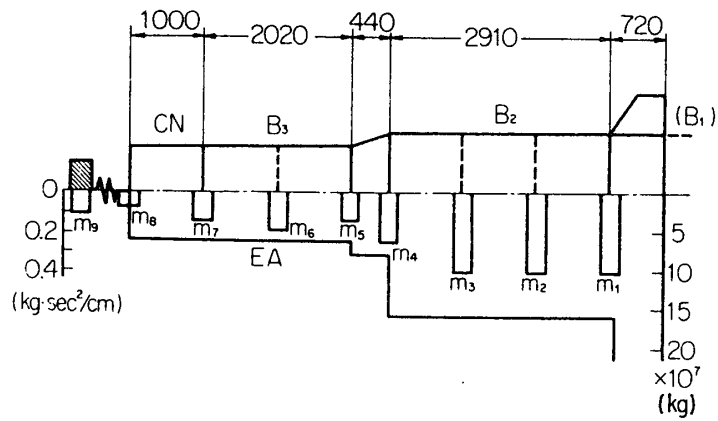
ばね  $s_j$  に作用する力は

$$F_j(i) = k_j \{u_{j+1}(i) - u_j(i)\} \quad (12)$$

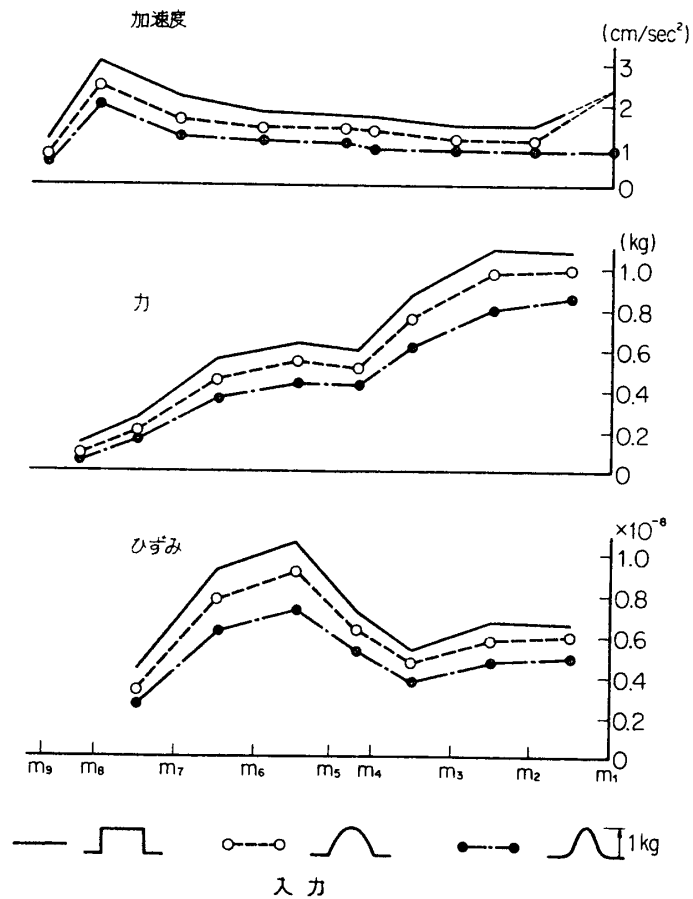
みかけのひずみは、ばね間の距離を  $L_j$  として

$$\varepsilon_j(i) = \{u_{j+1}(i) - u_j(i)\} / L_j \quad (13)$$





第 6 図 胴体分割と質量剛性分布 ( $\alpha=0.5$ )



第 7 図 最大加速度, 力, ひずみ

右端に与えられる力  $f(t)$  として、持続時間 2m sec, 最大値 1kg の3種類(矩形波, 正弦波, 逆正弦波)のパルスを選び, HIPAC 103 によって計算した.  $\alpha=0.5$  のときの各質点の最大加速度, 各区間に作用する最大の力とそのときのひずみを示したのが第7図である. これによると, 伝達される力は漸減するが, 最大加速度は姿勢制御(CN)部上端, 最大ひずみは3段目下端にあらわれることがわかった. このような解析で, 実測値との対応を十分につけることはやはりむずかしい点があるが, 上段の挙動に関してはかなりの確かさで推定することができる.

## 5. むすび

一連の実験により, 下段切断に伴い, 上段にいかなる衝撃が伝ばんされるかについての実測値が得られ, 大略の推定を下すことができるようになったが, なお, 力の分担, 伝ばん, 減衰その他についての詳細は, 今後の研究にまっところが多い.

本実験には, 宇宙航究研究所の多くの所員および職員, ならびに, 日産自動車, 帝国火工品の方々にご協力とご指導をおおいだ. 高速度写真撮影は植村(恒)研究室をわずらわした資料整理には, 八坂哲雄, 若原洋一両君に援助を得た. これらの方々に厚く謝意を表す次第である.

1968年10月31日 宇宙工学