

図-4.8 燃料集合体のたわみモデル

表-4.2 燃料集合体の固有振動数

		$\alpha L=0$ (Hz)	$\alpha L_{EXP}$ (Hz)	$\alpha L=\infty$ (Hz)
計算値	保持力最大	3.84	4.87~5.40	8.70
	保持力最小	0.372	0.473~0.523	0.844
実測値	大 振 幅		2.94→1.6	
	小 振 幅		2.94	

(注)  $\alpha L_{EXP}$  の計算値は  $\alpha L=1.725\sim 3.10$  に対する値を示す。

は、4.1 節の実験により、 $\alpha L$  値が荷重（たわみ量，振幅に相当）の大小に関係なく、ほぼ一定値であることが明らかにされている。

そこで、燃料集合体のたわみモデルを 図-4.8 の如くに想定し、その固有振動数を求めた。その結果を表-4.2 の計算値欄に示す。同表において  $\alpha L_{EXP}$  は 4.1 節の実験データより得られた  $\alpha L$  の平均値 1.725~3.10 に対するものである。「保持力最大」はスペーサにより燃料棒相互間の距離が一定に保たれ、さらに、スペーサの燃料棒保持力が無限大で燃料棒とスペーサの接触点が移動しないケースである。この時の断面二次モーメント  $I$  は燃料棒の束を剛体とみなして求められる。 $(I \cong 1.45 \times 10^6 \text{ mm}^4)$  「保持力最小」は燃料棒相互間の距離は一定に保たれるが、スペーサの保持力がゼロで、燃料棒はスペーサ間を自由に伸び縮みできるケースである。この時の  $I$  は燃料棒の数とその断面二次モーメントの積に相当する。 $(I \cong 3.67 \times 10^4 \text{ mm}^4)$

固有振動数の実測値は振幅約 30 mm で約 1.6 Hz, 2 mm 以下で 2.94 Hz であり、 $\alpha L_{EXP}$  の計算値の範囲

内にある。末端の支持条件  $\alpha L=1.725\sim 3.10$  一定とし、振動数の実測値から燃料集合体の  $I$  を逆算すると 図-4.9 のとおりとなる。この実測値は燃料集合体の中央部での初期たわみ量が 100 mm 以下での減衰振動波形についてのものであるが、図-4.6 の関係を更に大振幅の領域まで拡張すると、その  $I$  は振幅約 190 mm で保持力最小時の値にまで低下する。

中央集中荷重による燃料集合体中央部のたわみ量は荷重 40 kg に対して約 100 mm であり、その  $I$  は 図-4.9 における振幅 100 mm の時の値に近い。また、この時の最外周燃料棒上でのスペーサ支持点の移動量 (図-4.8  $O_1 \leftrightarrow O_1'$  に相当) はスペーサ間隔 260 mm の部分で約 0.64 mm であり、たわみに寄与する被覆管の伸びの項はその 1/20 以下である。この移動量は 4,070 mm の上・下タイプレート間で約 10 mm に相当し、両タイプレートは約  $12^\circ$  傾斜することになる。

一方、中央集中荷重による歪量の測定時 (図-4.4 参照, 10 kg 以下) におけるたわみ量からの推定値 (上・下タイプレート部に設けられている案内ばねのたわみによるものを除く) は  $I \cong (2\sim 3) \times 10^5 \text{ mm}^4$  であり、

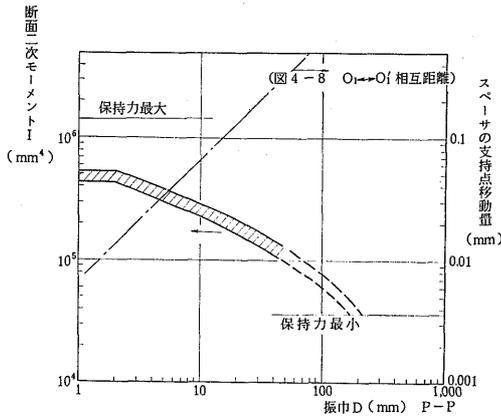


図-4.9 振幅と断面二次モーメントの関係

図-4.9 の値に近い。

以上、燃料集合体の振動特性を解明するための実験および解析を行い、次の事項を明らかにした。

- (1) 固有振動数は振幅に依存し、振幅 2mm 以下では 2.94 Hz 一定である。それ以上の振幅では振幅の増大につれて振動数が減少する。
- (2) 減衰係数比は、振幅の減少とともに減少し、振幅 3mm 以上では  $\zeta=0.08\sim 0.15$  である。3mm 以下では振幅の減少につれて急激に減少し、2mm では  $\zeta=0.03$  である。
- (3) 燃料集合体の断面二次モーメント  $I$  は、振幅あるいはたわみ量に依存するものと推定される。その推定値は中央部のたわみ量(振幅)が 10mm の時  $I=(2\sim 3)\times 10^5 \text{ mm}^4$ 、100mm の時  $I=(6\sim 8)\times 10^4 \text{ mm}^4$  である。

4.3 強制振動特性

強制振動外力に対する燃料集合体の特性を調べる実験には、上・下タイププレート部をタイププレート加振治具で上下2台の振動子に固定し、両振動子を同相で水平方向に加振し、燃料集合体各部の周波数応答を計測する方法を用いた。

周波数応答特性の1例を図-4.10に示す。同図において、S6/S0は加振点S0の加速度に対する計測点S6の加速度の比を db 表示したものである。この計測点は燃料集合体の中央部に近い位置にあり、奇数次の共振点で規則正しくピーク値が表われている。S3/S0およびS4/S0は偶数次の共振点でピークの得られる点についてのものである。

これらのグラフから得られた高次共振の振動数  $f_n$  は、表-4.3 および 図-4.11 のとおりであり、

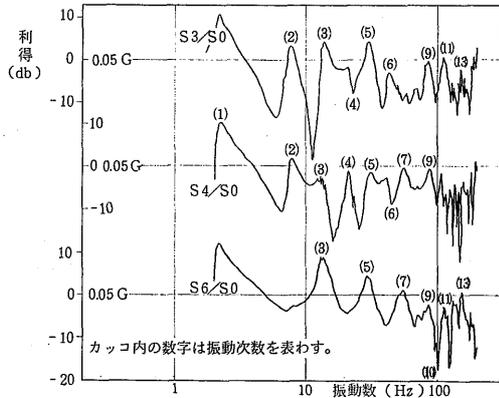


図-4.10 燃料集合体の周波数応答特性 (5F型)

$$f_n = f_0(\beta_n L)^2 \approx 0.098 \left\{ \left( n + \frac{1}{2} \right) \pi \right\}^2 \quad (19)$$

で表わすことができる。

振動数方程式の根  $(\beta_n L)$  が  $(n+1/2)\pi$  のケースは端末支持条件  $\alpha L$  が無限大に相当し、タイププレートの部分が振動子に完全に固定されている状態を示す。

固有振動数に振幅依存性があることが明らかになっているため、振動加速度をパラメータとし、0.01, 0.03, 0.05 G の3ケースについての掃引振動試験を行い、その影響について調べた。ここで、加速度 0.05 G

表-4.3 S6点の共振振動数と利得

共振	振動数 (Hz)	利得 S6/S0 db
1次	2.2	12.5
2次	7.4	
3次	13.5	9.5
4次	22	
5次	30	5.0
6次	43	
7次	55	1.5
8次	70	
9次	84	-2.0
10次	100	
11次	113	-2.0
12次	135	
13次	155	1.0

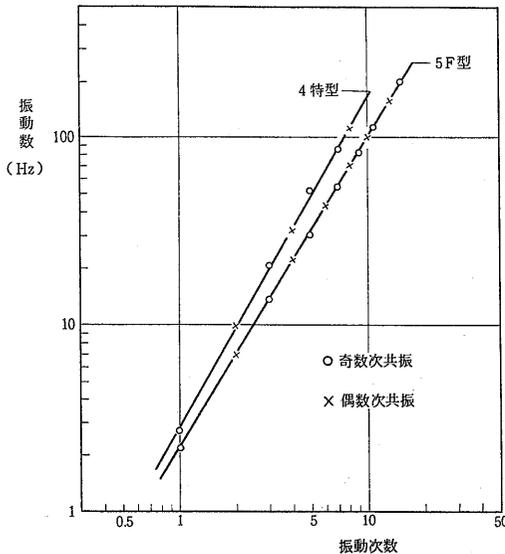


図-4.11 燃料集合体の振動モード

は1次共振時のたわみ量が過大にならないように選んだ値である。その際のたわみ量は自由振動試験時の初期計測波形の振幅値に近い。また、0.01 G はトラッキング・フィルタへの入力信号が非共振点で過小とならない限界値として選んだものである。

これらの実験により得られた周波数応答からは、加振力の大小による有意な差は認められなかった。それは、固有振動数が明らかに上昇する領域の振幅が 2~3mm 以下であること、および、共振点での振幅倍率が 4~6 倍に達することからも明かなように、更に 1桁~2桁小さな加振力のもとでの実験を必要とすることを意味している。

燃料集合体が圧力管に挿入された状態での振動試験の結果については 6.1 節で述べる。

以上、燃料集合体の上・下端を振動子に取付けた状態で、燃料集合体単体の強制振動試験を行い、次の事項を明らかにした。

- (1) 0.5~200 Hz の振動外力に対する燃料集合体の周波数応答特性を得た。
- (2) 加振加速度 0.01~0.05 G の 1 次共振振動数およびその利得は、2.2 Hz および 4~6 倍である。
- (3) 高次共振の振動数は、 $f_n = 0.098 \{(n+1/2)\pi\}^2$  で表わされる。

#### 4.4 燃料棒の振動特性

燃料棒の振動特性を調べるため、強制振動試験と静

荷重試験を行った。

強制振動試験は、スペーサで支持されている燃料棒の周波数応答を調べ、その振動特性を解明するために実施したものである。

燃料集合体をスペーサ固定治具に取付けて固定し、それを上・下 2 台の振動子で水平方向に加振した。代表的な燃料棒として燃料集合体の横断面の直角方向にある 2 本の燃料棒を選び、各々水平面上の 2 方向についての応答特性を調べた。

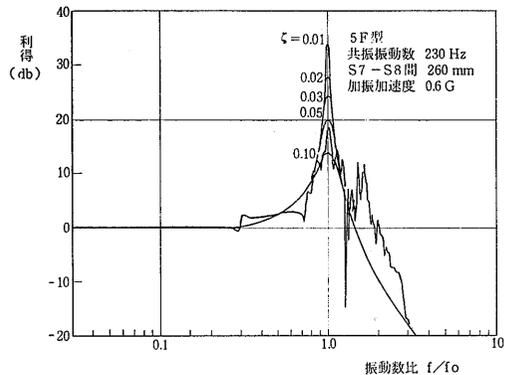


図-4.12 燃料棒の周波数応答特性

振動特性の計測では、燃料棒の加速度と、その上・下にあるスペーサの加速度を計測し、トラッキング・フィルタおよび位相差計を介して、掃引周波数成分についての周波数応答を求める方法をとった。典型的な周波数応答の記録例を図-4.12 に示す。同図において横軸は 1 次共振振動数で規格化したものである。縦軸はスペーサの加速度に対する燃料棒の加速度の比を db 表示したものであり、20db で 10 倍、40db で 100 倍に相当する。細線は減衰係数比  $\zeta=0.01\sim0.1$  の振動性二次要素の系について、周波数応答の計算値を示したものである。共振点でのピーク値は  $\zeta=0.04\sim0.1$  の間にあり平均値は約 0.08 である。周波数応答曲線にはこのような典型的な形の、1つのピークを持つもののほか、相隣るスパンでの共振との関連で、2ヶまたは 3ヶのピークに分かれているものがある。

振動加速度の大小による周波数応答の変化を調べるため、0.05~0.2 G の範囲で振動加速度を変え、その応答特性を求めた。その結果の 1 例を図-4.13 に示す。このケースでの振動数および利得は表-4.4 の通りであり、振動加速度の大小による顕著な差異は認められない。僅かに、1 次共振時の利得が加速度の増大につれて減少する傾向にあることがうかがえる程度で

表-4.4 振動加速度の影響

(Ⅲ-1-2/S2)

ピーク点 振動加速度	ピーク 1		ピーク 2		ピーク 3	
	振動数 Hz	利得 db	振動数 Hz	利得 db	振動数 Hz	利得 db
0.05 G	76	21.0	103	5.5	180	13.0
0.10 G	76	20.5	104	5.0	180	16.5
0.20 G	75	15.5	104	5.0	180	15.5

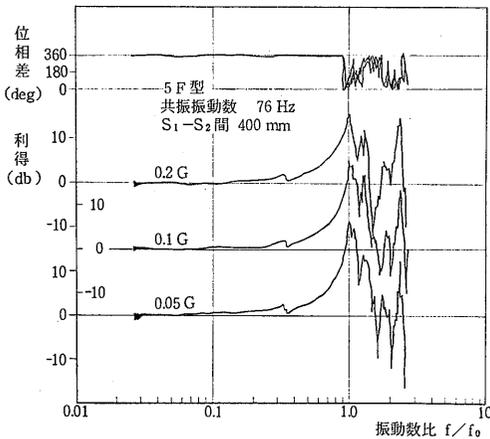


図-4.13 燃料棒の周波数応答特性 (加速度の影響)

ある。

複数のスペーサにより連続梁のような形で支持されている燃料棒の支持条件を求めるため、中央集中荷重による静荷重試験を行った。支持条件  $\alpha L$  の算出には 4.1 節で述べた方法を用いた。中央集中荷重による歪曲線の 1 例を図-4.14 に示す。この図ではスペーサ番号 S7 と S8 の中間点で燃料棒に 1.0, 2.0, 3.0 kg の荷重を加え、その時燃料被覆管に生じる歪量を計測したものである。燃料棒はスペーサのリング素子に設け

られている 2 個の固定ディンプル (径方向 2 点, 軸方向 2 点の 4 点支持) およびばねディンプル 1 個 (1 点支持) で支持されており、荷重の方向によって支持条件が異なる。(図-2.1(2) 参照) 図-4.14 の部分では引張荷重に対して  $\alpha L \approx 4.5$ , 圧縮荷重に対して  $\alpha L \approx 3.9$  の値が得られた。

燃料棒が多数のスペーサで支持されている場合、スペーサの支持条件が見かけ上大きくなる。そこで、スペーサ数の増加に伴って支持条件がどのように変化するかを調べた。その結果を図-4.15 に示す。同図において、点線はスペーサによる弾性支持の場合を示し、実線は刃型の V ブロックによる単純支持の場合を示す。V ブロックによる支持は 2 個の V ブロックを組み合わせることができる菱形の空間に燃料棒を通し、棒の円周上を 90° 毎の 4 点で支持するもので、ナイフエッジの部分は鋭利な刃型となっている。実験の状況を写真-4.2 に示す。

スペーサ数 (ブロック数) 2 個の場合の  $\alpha L$  値は 2F 型スペーサ (二次試作燃料集合体のスペーサ) による弾性支持の場合に 0.67, V ブロックによる単純支持の場合 0.08 (完全な単純支持の場合  $\alpha L=0$  でなければならない) である。等間隔でその両側にスペーサ等を設け、4 個で支持した場合の  $\alpha L$  値はそれぞれ 3.1 と 3.3 となる。等間隔の 4 点で支持された梁の理

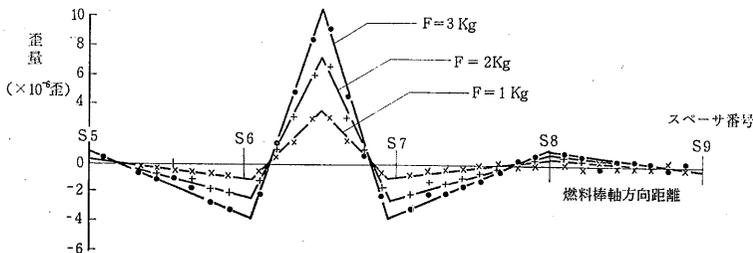


図-4.14 中央集中荷重による燃料棒の歪曲線 (5F 型) (S6-S7 間に引張荷重を加える)

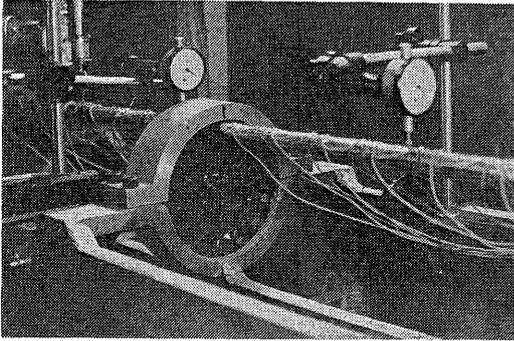
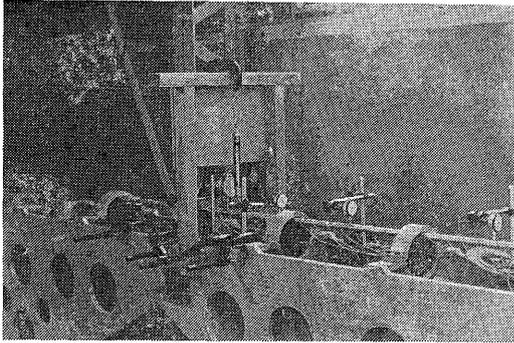


写真-4.2 スペーサ数と燃料棒  $\alpha L$  値との関係の測定

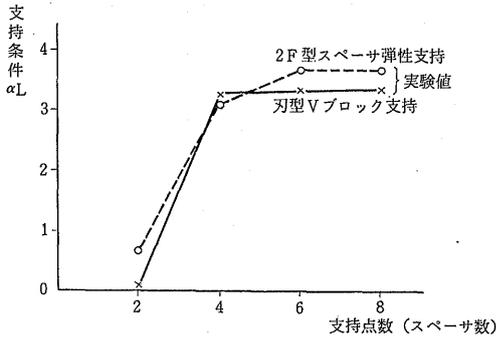


図-4.15 燃料棒支持点数と  $\alpha L$  の関係

論計算による  $\alpha L$  値は 3.0 であり、両実験値は計算値とほぼ一致する。支持個数が更に増加した場合、 $\alpha L=0$  で支持された連続梁では見かけ上の  $\alpha L$  値に有意な変化のないことが証明されている。Vブロックによる実験の結果も同様で、殆んど変化していない。これに対し、スペーサによる弾性支持の場合には僅かな  $\alpha L$  値の向上が見られる。

以上、燃料棒についての強制振動試験および静荷重試験を行い、次の事項を明らかにした。

- (1) 燃料棒の共振動数を求めた。(5F型、スペー

- サ間隔 260 mm で約 240 Hz)
- (2) 周波数応答から求めた燃料棒の減衰係数比は  $\zeta=0.05\sim 0.1$  であり、その平均値は約 0.08 である。
- (3) 応答は 0.05~0.2 G の範囲で、線型であり、振動性二次要素の系で近似できる。
- (4) スペーサの支持条件は、 $\alpha L$  値が極めて小さく、ディンプルに対する荷重の方向により  $\alpha L$  値が変わる。
- (5) 多数のスペーサで支持されている燃料棒の支持条件は連続梁の効果により、見かけ上大きくなり、 $\alpha L=3\sim 4$  に向上している。

4.5 スペーサの振動特性

スペーサの外周には突起があり、燃料棒が制限値を超えて圧力管の壁に近づくことを制限している。燃料集合体が圧力管に衝突する際には、この突起が圧力管に衝突し、弾性変形し、衝撃力を緩和する役目を果たす。これをばね要素と減衰要素からなる 1 つの振動系と考えると、スペーサと圧力管の衝突による反発力は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} P &= K(y_i - \delta) + \mu y_i & |y| \geq \delta \\ P &= 0 & |y| < \delta \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

ここで、

- $K$ ; スペーサのばね定数
- $\mu$ ; スペーサの粘性減衰係数
- $y_i$ ;  $i$  番目のスペーサ位置での燃料集合体の変位
- $\delta$ ; スペーサと圧力管の隙間

を表わす。

振動要素としてのスペーサの特性を把握するためには、これらの定数を実測する必要がある。

スペーサのばね定数を求める実験は、次の要領で行った。

燃料棒と同一外径の丸棒 (長さ約 100 mm) をスペーサにさし込み、その両端をフランジで固定する。フランジを治具に固定し、スペーサに静荷重を加える。荷重とスペーサの変位の関係を求め、そのばね定数を算出する。その概念、実験用に製作したスペーサブロックおよび得られた結果を図-4.16、写真-4.3 および図-4.17 に示す。

スペーサの外周に設けられている突起部および各リング素子ディンプル部 (図-2.1 参照) のたわみにより、変位し得る最大値は計算上 1.47 mm である。この範囲での実測値は図-4.17 に実線で示す如く、



写真-4.3 スペーサブロック

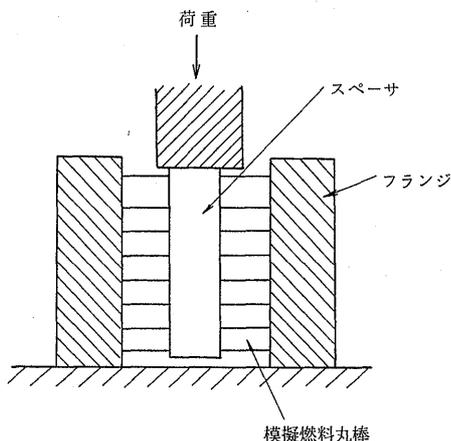


図-4.16 スペーサのばね定数の測定

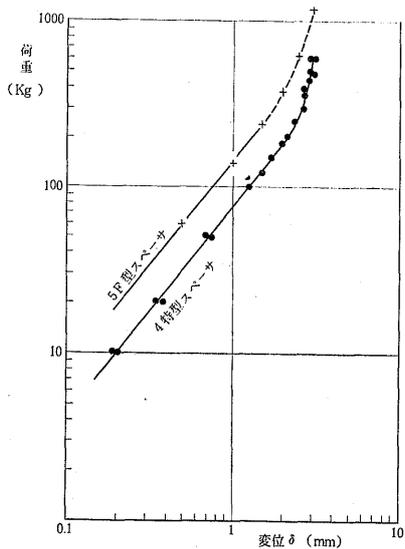


図-4.17 スペーサばねの荷重と変位の関係

$$\left. \begin{aligned} F &= 140\delta^{1.25} && (5F \text{ 型スペーサ}) \\ F &= 75\delta^{1.25} && (4 \text{ 特型スペーサ}) \end{aligned} \right\} (21)$$

$F$ ; 荷重 (kg)  
 $\delta$ ; 変位 (mm)

で近似できる。これを超える領域では突起部などの変形は起り得ず、単位変位置当りの荷重量は無限大となる。実験では燃料模擬丸棒のたわみ、スペーサ全体の変形（ゆがみ）などに起因する僅かな変位が計測されている。

スペーサが圧力管に衝突する際に生ずる反発力は、スペーサに粘性減衰のみが働くものとして、次の要領で求める。

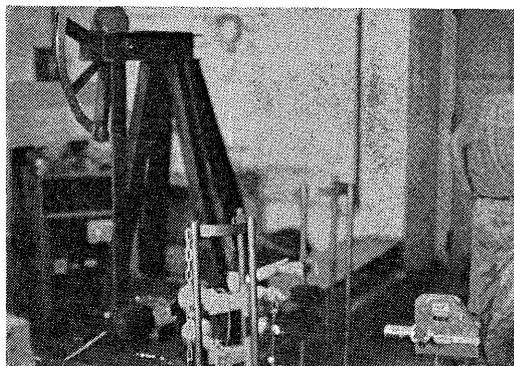


写真-4.4 スペーサの反発係数の測定

図-4.16 に示すスペーサブロックを写真-4.4 に示す振り式衝撃試験機に取付けて固定し、実効質量が燃料集合体と圧力管の質量（スペーサ間）と等価になるような重錘を初期角  $\theta$  から振り下ろし、スペーサに衝突させる。その際の衝撃加速度とはね返り角  $\theta'$  を計測する。

この方法において、重錘がスペーサと衝突し、離れるまでの運動方程式は、次式で表わされる。

$$\frac{W}{g}\ddot{x} + \mu\dot{x} + Kx = 0 \quad (22)$$

- $\frac{W}{g}$ ; 重錘とスペーサの質量
- $\mu$ ; 粘性減衰係数
- $K$ ; スペーサのばね定数
- $x$ ; スペーサの変形量
- $\tau$ ; 重錘が衝突後スペーサから離れるまでの時間

衝突の前後における速度の比で定義される反発係数  $K_0$  は、摩擦抵抗などのない系において、

$$K_e = \left( \frac{1 - \cos \theta'}{1 - \cos \theta} \right)^{1/2} \quad (23)$$

で表わされる。

実験により得られた反発係数を図-4.18に示す。同図において、衝撃力がある値までは反発係数が約0.4以上のほぼ一定の値を示す。衝撃力がそれ以上になると、反発力が急激に低下し、スペーサは復元力を失い、変形してしまう(4特型では約700kg以上)。後述する解析計算コードによる動的挙動解析では、地震時の衝撃力が230kg未満であり、反発係数は0.4~0.6の領域にある。

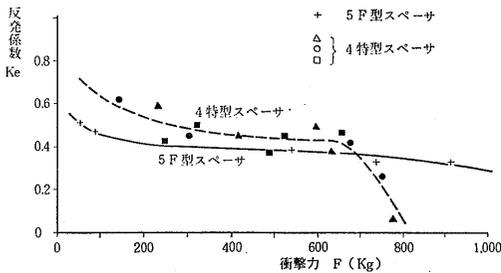


図-4.18 スペーサの反発係数

スペーサの減衰係数は反発力から求めることができる。

粘性減衰力の働く振動の運動方程式(22)式において、 $\mu^2 < 4K(W/g)$  のとき、減衰振動の周期  $T$ 、相次ぐ極値の時間間隔  $\tau$ 、反発係数  $K_e$  および減衰係数  $\mu$  は、次式で表わされる。(付録-3 参照)

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{K}{(W/g)} - \frac{\mu^2}{4(W/g)^2}}} \quad (24)$$

$$\tau = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{K}{(W/g)} - \frac{\mu^2}{4(W/g)^2}}} \quad (25)$$

$$K_e = \frac{x_n + 1}{x_n} = \exp\left(-\frac{\mu}{2(W/g)}\tau\right) \quad (26)$$

$$\mu = \frac{2(W/g)(K \cdot g)^{1/2} \log K_e}{\{\pi^2 + (\log K_e)^2\}^{1/2}} \quad (27)$$

以上、スペーサのばね特性および反発係数を求める実験を行い、次の事項を明らかにした。

- (1) スペーサのばね定数は一定値ではない。(5F型で  $F \approx 140g^{1.25}$ )
- (2) スペーサの反発係数は0.4~0.8であり、衝撃力に依存する。

## 5. 振動実験

耐震強度の確認および解析計算法の妥当性の評価のため、正弦波による振動実験および地震波による加振実験を行った。本章では実験の方法、実験結果の概要について述べ、実験結果の検討、計算値との比較等については7.1節に集約することとする。

### 5.1 正弦波による振動実験

正弦波による振動実験は燃料集集体を圧力管加振治具に収め、その上・下端を所定の振動数、加速度の正弦波で水平方向に加振し、燃料集集体および圧力管各部の振動挙動を計測したものである。

実験はその目的に応じて、(1) 周波数応答を調べる実験、(2) 振動挙動を調べる実験、および(3) 振動変位波形を詳細に調べる実験に分けて実施した。

以下、その方法と得られた結果の概要について述べる。

#### 5.1.1 周波数応答

この実験は燃料集集体および圧力管各部の周波数応答を調べるためのもので、実験条件は次のとおりである。

振動数	2~100Hz, 20分間連続掃引
加速度	0.1, 0.5G
計測点	S0~S13, S0PT~S13PT
計測項目	燃料集集体入り圧力管の応答加速度, 圧力管内燃料集集体の応答加速度, 燃料集集体と圧力管の加速度比

実験の状況は、図-3.2, 写真-3.4, 3.7, 3.8に示したとおりである。写真で見られるように、圧力管には計測用の孔が設けられており、各スペーサに加速度計を接着固定することができる。各加速度計の出力信号はトラッキング・フィルタに入れ、加振周波数成分についての各部の応答曲線をデシベル表示し、X-Yレコーダで作図する。

燃料集集体入り圧力管の応答加速度の計測は、圧力管加振点の加速度と各スペーサ位置での圧力管の加速度の比を求めるものである。圧力管内の燃料集集体の応答加速度の計測は、上・下タイプレートの加速度と各スペーサの加速度の比を求めるものである。

得られた周波数応答曲線の1例を図-5.1および図-5.2に示す。トラッキング・フィルタの同期周波数範囲は5Hz~5kHzであり、同図における5Hz以下での精度は確められていない。本実験では5Hzにおける計測点の加速度を読み取り、その値を基準(0db)

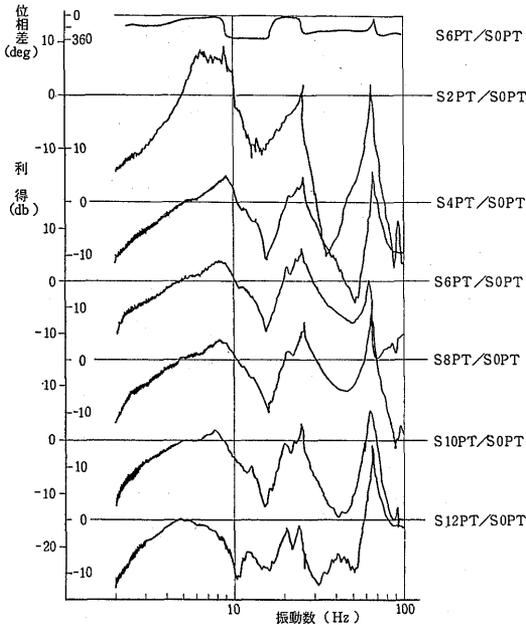


図-5.1 燃料集合体入り圧力管の周波数応答 (4 特型)

として応答曲線を描かせた。

圧力管の応答曲線では 8~9Hz, 約 27Hz, 約 65Hz にピークがあり, 約 15Hz, 35~50Hz にノッチがある。燃料集合体では 8~9Hz, 約 13Hz にピークがある。

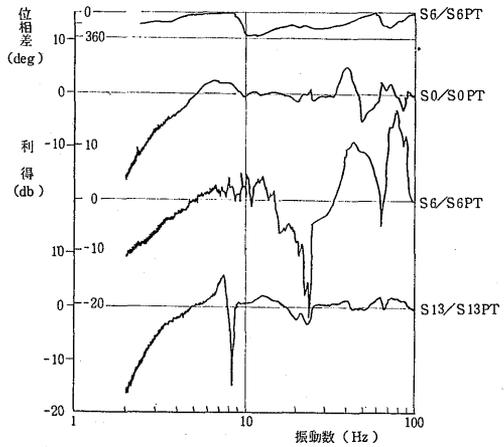


図-5.3 燃料集合体と圧力管の加速度の比 (4 特型)

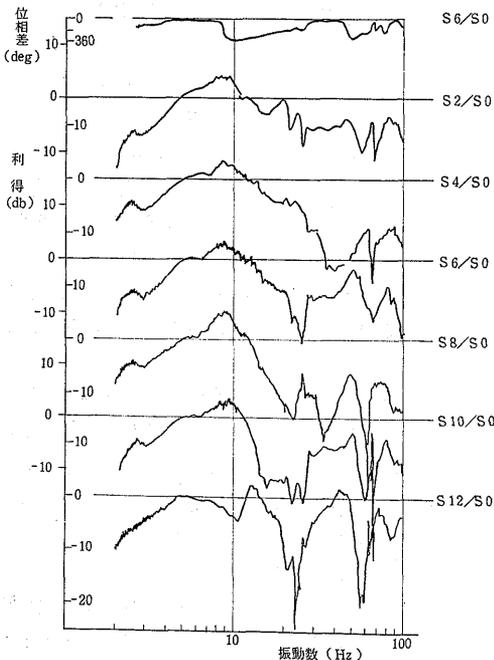


図-5.2 圧力管内燃料集合体の周波数応答 (4 特型)

図-5.3 は燃料集合体と圧力管の加速度比を示したものである。S0 点では 40~50Hz に小さなピーク, ノッチがあり, S13 点では 7~8Hz にピーク, ノッチがある。しかし, S13 点のノッチを除けば上・下端部は圧力管とほぼ同振幅, 同位相で振れていることがわかる。S6 点では約 9Hz の共振点までは圧力管とほぼ同一振幅 (圧力管とスペーサの隙間分だけ燃料集合体の振幅が大きくなる) と同位相で振動する。約 15Hz (圧力管のノッチ点) 以上では逆相となり, 約 26Hz (圧力管のピーク点) 以上では燃料集合体と圧力管の衝突または接触が全くなくなる。この時の燃料集合体への振動外力は上・下タイププレートからのものだけとなり, その振動挙動は燃料集合体の応答特性に近い。

9.2Hz (圧力管の共振点) および 13Hz (燃料集合体の 3 次共振点) における各部の加速度を 図-5.4 に示す。同図における加速度は絶対値で表示したものであり, その中には衝撃加速度が含まれている。

### 5.1.2 振動挙動

5.1.1 の実験により, 燃料集合体と圧力管の加速度が特に問題となる位置および振動数の範囲が明らかになったことから, この実験ではそれらの位置における特定の振動数での加速度, 変位, 相対変位などを実験

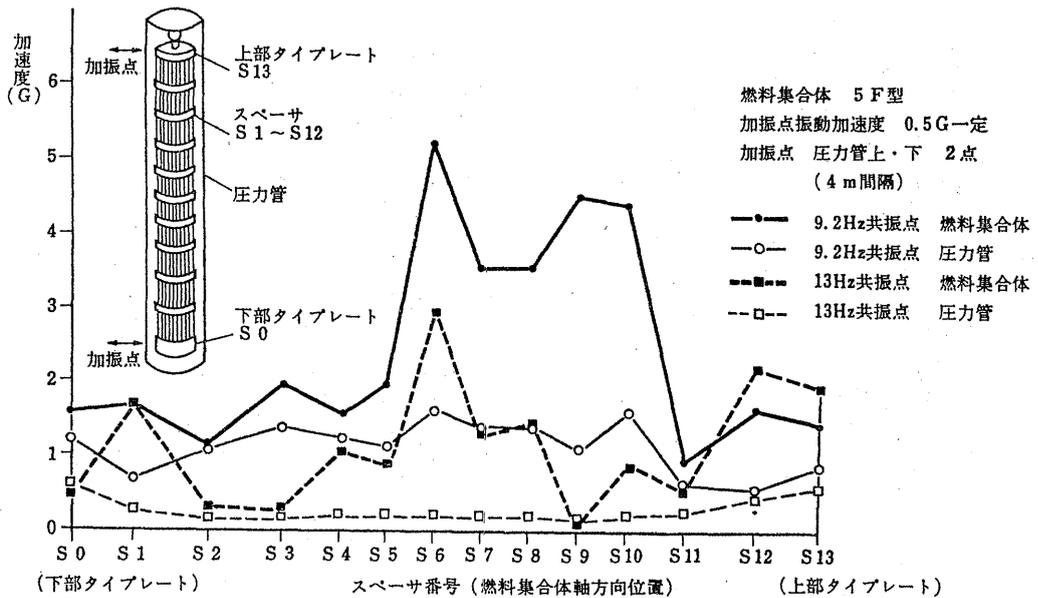


図-5.4 燃料集合体および圧力管の加速度

的に求めた。実験条件は、次のとおりである。

- 振動数 5~13Hz 内の特定振動数の数点
- 加速度 0.1~0.6G, 0.1G 間隔 (部分的に 0.5, 1.0, 1.5G のケース)
- 計測点 S6, S8, S10
- 計測項目 加速度, 変位, 相対変位

加速度の検出には振動計および特殊低域型振動計を用い、相対変位の計測には非接触型振動変位計を用いた。これらの出力信号はペン書きオシログラフおよびシンクロスコープにより記録、撮影した。

ペン書きオシログラフによる記録の1例を図-5.5に示す。同図において、横軸は0.02sec/div目盛である。縦軸は任意単位で、その尖頭値は読取振幅欄および読取加速度欄の通りである。最下段の曲線(KAM AN S6-S6PT)はS6点での燃料集合体と圧力管の相対変位を示したものである。

5Hz, 0.6Gでの振幅は±7mmであり、S6点の振動変位はスペーサと圧力管の隙間よりかなり大きい。相対的に質量の大きい燃料集合体(S6)では正弦波に近い変位波形を示すのに対し、質量の小さい圧力管(S6PT)には燃料集合体の衝突による変位波形の歪が見られる。両者の衝突時には、両者の質量に逆比例し方向が逆の衝撃加速度が発生する。相対変位の波形には衝突後50Hz前後の振動数を有する3~4サイクルの減衰振動波形が発生する。これは燃料集合体が圧力

管に衝突し、はね返された後、両者が数回にわたり接触していることを示すものである。4特型の場合、その振動数は全データにわたり、45~50Hzのほぼ一定値である。

この振動数はスペーサばねとスペーサ間の質量で構成される振動系の固有振動数に最も近い。スペーサ間隔260mmに、単位長重量0.034kg/mmの質量がばね定数Kkg/mmのスペーサで支持されている系を考えた場合、 $K=70\sim90\text{kg/mm}$ で、固有振動数45~50Hzの系となる。スペーサばね定数の実測値は図-4.17の通りであり、4特型の75kg/mmはKの値とほぼ一致する。他方、燃料集合体の剛性EIとスペーサ間の質量で構成される系の固有振動数は約350Hzであり、数倍高い領域にある。

10Hz, 0.3Gおよび13Hz, 0.3Gの振幅は、それぞれ±0.74mmおよび±0.44mmであり、加振点の振幅はスペーサと圧力管の隙間より小さい。振動倍率の高いS6点では引続き両者の衝突が起るが、燃料集合体は衝突エネルギーにより隙間範囲内を自由運動する三角波の変位波形に近づく。そして23Hzではその変位量が小さくなり、静止状態に近づく。

相対変位の測定データから5Hz(一部7Hzを含む)における加振加速度と相対変位の最大値との関係を整理すると図-5.6のようになる。同図における5F型隙間および4特型隙間の線は、それぞれのスペ