

図-5.5 (1)-(3) 振動挙動の記録例 (4 特型)

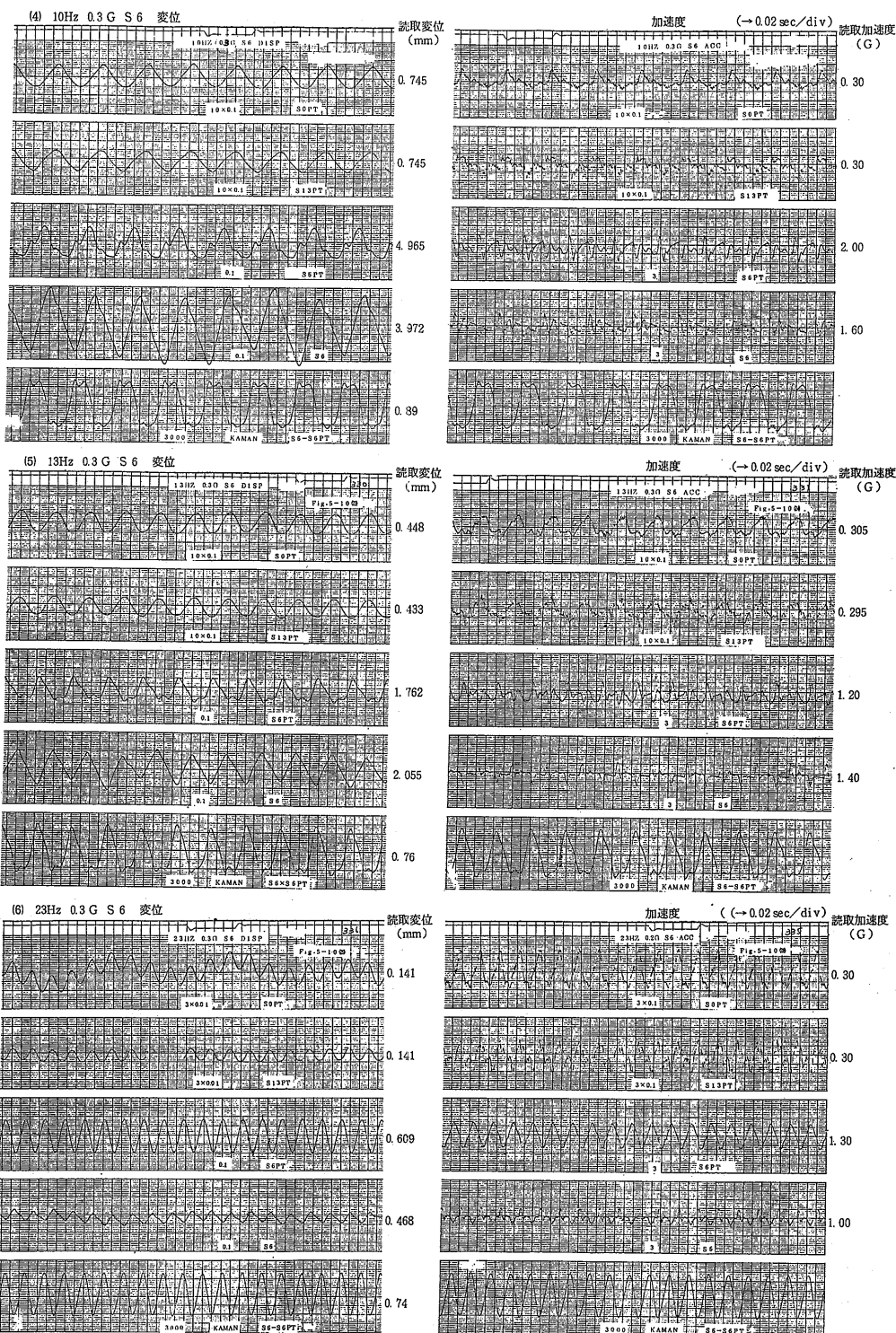


図-5.5(4)-(6) 振動挙動の記録例 (4 特型)

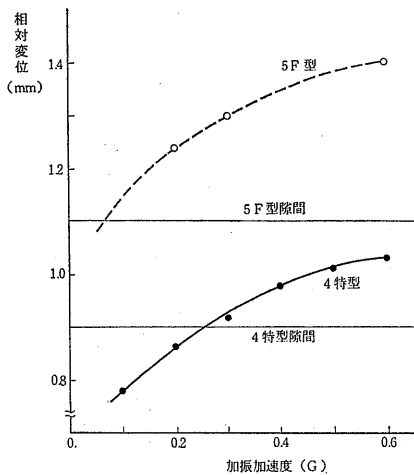


図-5.6 加振加速度と相対変位の関係

一サ外径と圧力管内径の実測値から求めた片側隙間である。4特型では計算上 0.26 G 以下ではスペーサが圧力管に接触しないことになる。しかし、図-5.5 における相対変位、加速度の波形から明かなように、相対変位が 0.9 mm 以下のケースでも衝突している。その主な原因は圧力管の中心位置からの燃料集合体の偏心（前後方向あるいは左右方向）によるものである。

燃料集合体および圧力管の固有振動数は比較的低く、ペン書きオシログラフにより、その挙動を忠実に記録できる。しかし、スペーサ間の燃料棒（燃料バンドル）の固有振動数および衝撃波の振動数はその範囲を超えているため、シンクロスコープによる波形の観察を行った。

図-5.7 は燃料棒の振動挙動を撮影したものである。上段の波形は S6 と S7 の中間点における燃料棒の振動変位波形を示し、下段は S6 の振動変位波形を示す。両波形の縦軸は任意単位であるが、同一レンジで撮影されており、上・下波形の比較により燃料棒の振動変位の大小を求めることができる。燃料棒は 370 Hz 前後で共振し、その振幅は S6 点の約 2.5 倍に達している。地震時の挙動が問題となる約 30 Hz 以下の振動数に対しては、5, 10, 30 Hz の例で見られるように、スペーサの振動変位と同一値であり、特に有意な振動は観測されていない。

図-5.8 はスペーサと圧力管の衝突による振動波形を記録撮影したものである。上段には S6 点の相対変位波形を示し、下段に S6, S6PT の加速度または変位波形を示す。撮影時の計器読取値は次表の通りであ

る。相対変位の波形には特に高い周波数成分は見られない。ペン書きオシログラフの記録と同一振動加速度 (0.5 G) での記録波形はほぼ同一の波形が得られている。変位の波形についても同様である。S6PT の加速度波形にはペン書きオシログラフの記録より高い周波数成分の波が見られるが、衝撃加速度の大きさの比較では最大 12% の差が見られた程度である。但し、シンクロスコープによる加速度波形の記録撮影の場合も約 500 Hz 以上の周波数成分を減衰させるための CR 回路を挿入している。

図-5.9 は振動挙動に関する実験データから S6 点の振幅、位相について整理したものである。変位比は S6, S6PT の変位を S0PT (S13PT) との比の形で示したものである。位相角についても同様である。相対位相角は S6 と S6PT の位相差を示したものである。

圧力管は 7 Hz と 23 Hz にピークがある。7 Hz のピークは圧力管と燃料集合体の一体化されたものとして得られる固有振動数の計算値 6.8 Hz に近い。23 Hz のピークは圧力管の 1 次共振の実測値に等しい。（圧力管単純支持時の固有振動数計算値 19.5 Hz）

燃料集合体は 7 Hz, 11 Hz にピークがある。7 Hz のピークは圧力管の振幅増大によるものである。11 Hz のピークは燃料集合体の 3 次共振によるもので、圧力管との位相差が 90° となっている。振動加速度 0.6 G での振幅がスペーサと圧力管との隙間に相当する振動数は 11.6 Hz であり、燃料集合体と圧力管の衝突音のなくなる振動数 11~13 Hz 以上と一致する。

5.1.3 振動変位波形

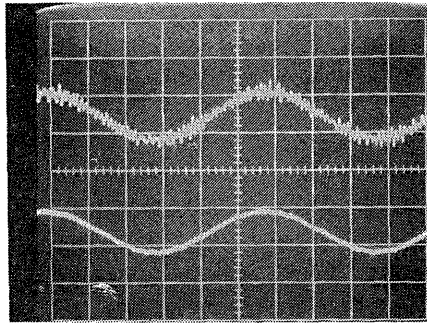
振動変位波形を詳細に調べ、解析計算の妥当性を評価するため、燃料集合体および圧力管の変位波形を高速シネカメラで近接撮影し、画像の解析処理を行った。

実験のケースには 5F 型および 4 特型について、それぞれ表-5.1 に示すケースを選定した。加振加速度は「ふげん」の耐震計算による最大加速度値 0.503 G を参考とし、0.6 G を選び、振動試験機の振幅制限条件から低い振動数では 0.3 G とした。振動数は 5.1.1, 5.1.2 の実験データに基づき 6 点毎とした。計測点は大きな衝撃加速度の得られている S6, S8, S10 の 3 点とした。

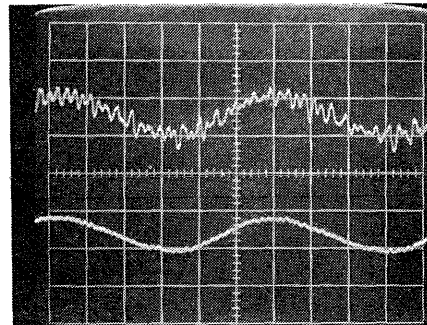
撮影の様子および撮影フィルムの一部は写真-3.3, 3.4 および図-3.4 に示したとおりである。

撮影したフィルムは圧力管および燃料集合体の位置を 16m/m フィルム解析器で、1 コマ毎に読取り、実

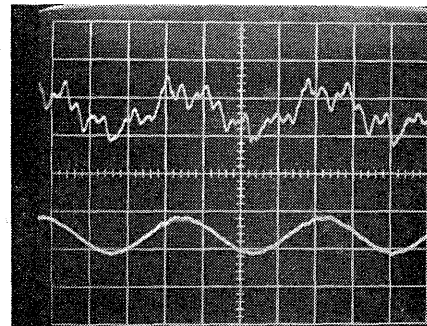
図-5.7 シンクろ過コーナ撮影波形 (燃料棒の振動変位)



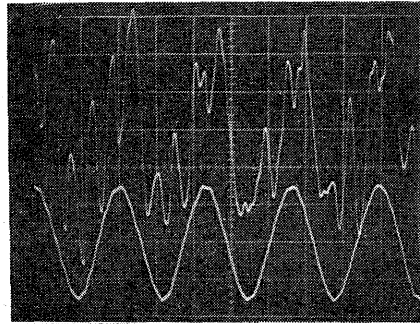
5 Hz SWEEP 20 ms 0.5 V/DIV



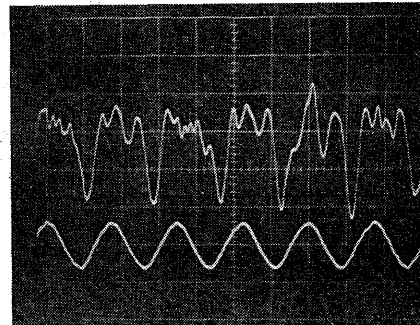
10 Hz SWEEP 10 ms 0.5 V/DIV



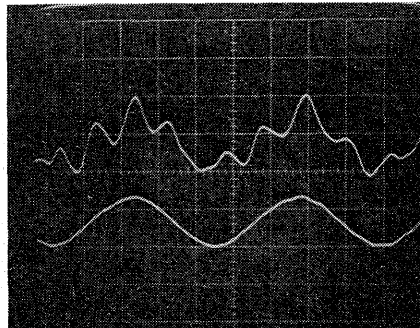
30 Hz SWEEP 10 ms 0.5 V/DIV



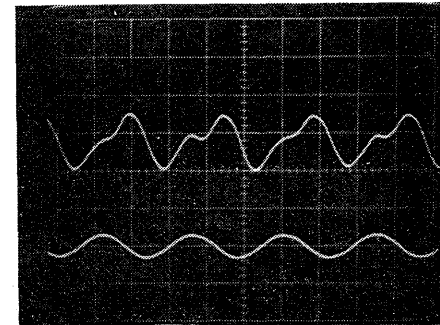
87 Hz SWEEP 5 ms 0.5 V/DIV



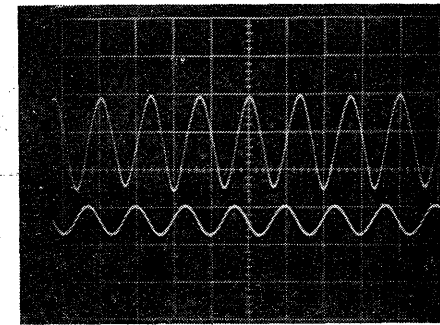
107 Hz SWEEP 5 ms 0.5 V/DIV



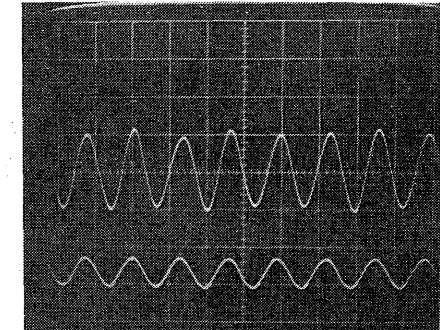
115 Hz SWEEP 2 ms 1 V/DIV



208 Hz SWEEP 2 ms 1 V/DIV

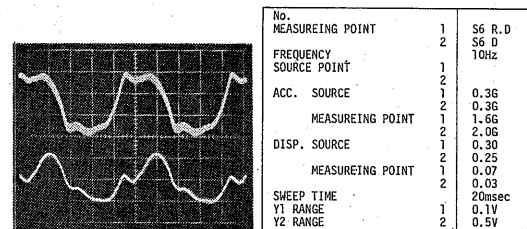
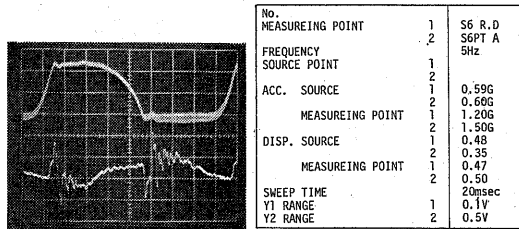
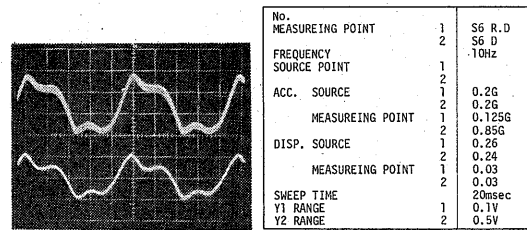
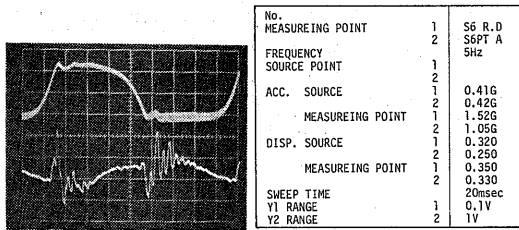
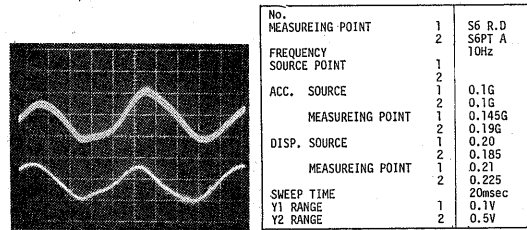
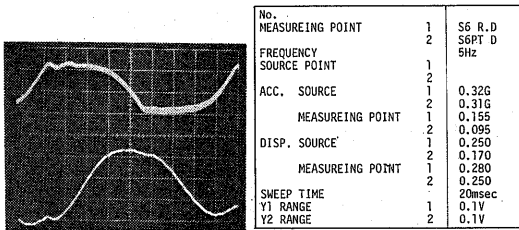
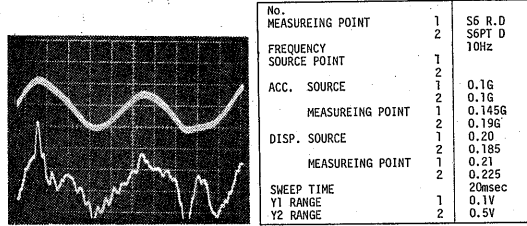
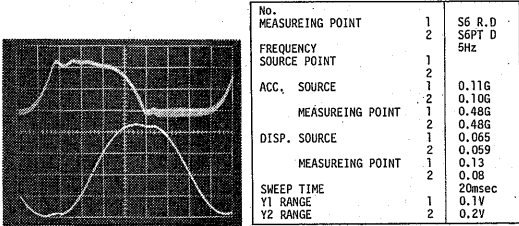


370 Hz SWEEP 2 ms 1 V/DIV



380 Hz SWEEP 2 ms 1 V/DIV

(注) 上段 燃料棒の振動変位; 下段 スペーサの振動変位



(注) R.D; 相对変位, D; 変位, A; 加速度

図-5.8 シンクロスコープ撮影波形 (変位, 加速度, 相对変位)

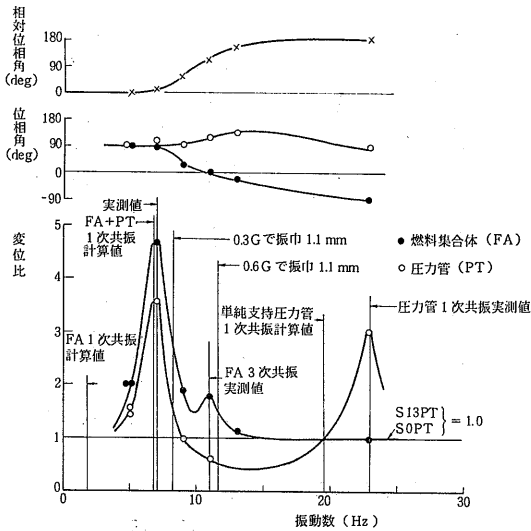


図-5.9 振動挙動

寸への換算，速度と加速度の算出，相対値の算出などのデータ処理および作図は電子計算機で行った。

実験結果の1例を図-5.10 および 図-5.11 に示す。同図において記号□，縦軸目盛 (X1) は圧力管を示し，記号○，(X2) は燃料集合体を示す。無記号，(X2-X1) は相対値を示す。DISPLACEMENT (変位) は1サイクルの平均位置を点0とし，圧力管および燃料集合体の振幅波形を示したものである。DISPLACEMENT (X2-X1) は相対変位を示し，燃料集合体と圧力管の変位から算出したものである。速度 (V1), (V2), (V2-V1) および加速度 (A1), (A2), (A2-A1) の図についても同様である。

これらの波形において，変位等の絶対値は比較的スムーズな曲線を描いているが，相対値は滑らかさに欠ける。その主な原因は読取誤差によるものである。即ち，16m/m フィルム解析器の最小目盛 25/1,000mm は圧力管等の振幅に対して 5Hz, 0.3G の場合，約 1/1,000 であるのに対し，相対変位では約 2/100 となり，読取誤差が波形の滑らかさに影響を及ぼす。

図-5.10 における変位波形は 5Hz の場合圧力管と燃料集合体が同相で振動し，7Hz で燃料集合体が僅かに遅れ，11Hz では約 90° の遅れとなり，13Hz では逆相となる。

相対変位の波形は 5Hz のものが典型的である。燃料集合体が圧力管に衝突し，スパーサばねがたわむ。このケースでの相対変位の最大値は 2.70mm (P-P) であり，圧力管との隙間より 0.50mm (P-P) 大きく

表-5.1 正弦波による振動実験条件 (高速度シネカメラ)

振動数 (Hz)	加速度 (G)	標準燃料	特殊燃料
5.0	0.2	S 6	
		S 8	
		S 10	
7.0	0.6	S 6	
		S 8	
	0.3	S 10	
		S 6	S 6
		S 8	S 8
		S 10	S 10
7.1	0.3		S 6
			S 8
	0.6		S 10
			S 6
			S 8
			S 10
9.0	0.3	S 6	S 6
		S 8	S 8
	0.6	S 10	S 10
			S 6
			S 8
			S 10
11.0	0.3		S 6
			S 8
	0.6		S 10
		S 6	S 6
		S 8	S 8
		S 10	S 10
13.0	0.6	S 6	
		S 8	
	0.3	S 10	
			S 6
			S 8
			S 10
23.0	0.3		S 6
			S 8
	0.6		S 10
		S 6	S 6
		S 8	S 8
		S 10	S 10

振れている。この時，スパーサばねに加わる力は 図-4.17 から約 26kg と推定される。

スパーサばねの反発力により燃料集合体はいったん圧力管から離れる。この時の隙間は片側で 0.078mm である。その後再び圧力管に接触し，それを繰り返す。

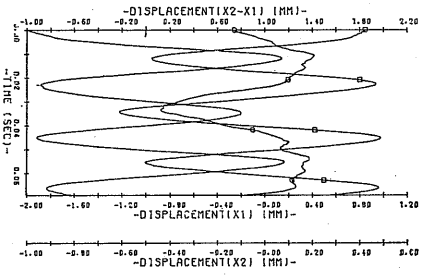
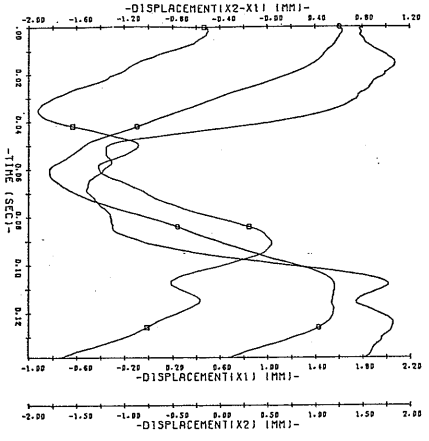
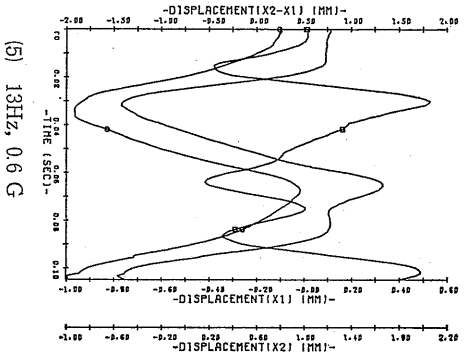
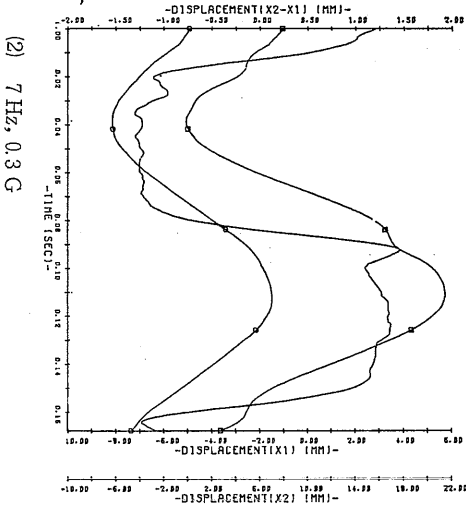
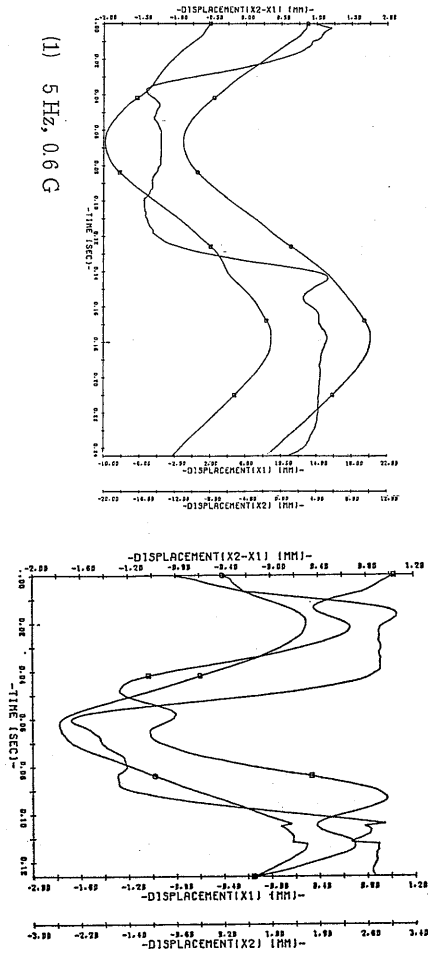


図-5.10 S6点の変位波形

(172)

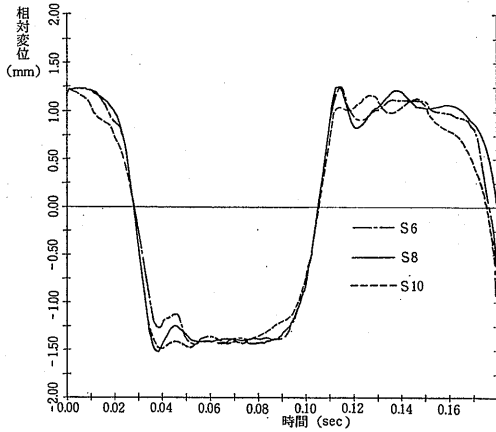


図-5.11 各点の相対変位 (5F型 7Hz 0.6G)

7Hz および 9Hz では最初の衝突が S6 以外の部分で起る。図-5.11 はその 1 例を示したものである。同図における相対変位の最大値は、

- S6 2.73 mm (P-P)
- S8 2.76 mm (P-P)
- S10 2.65 mm (P-P)

であり、最初の衝突は S8 点で発生する。

加速度の波形には燃料集合体と圧力管がほぼ同相で振れる 7~8Hz の成分が含まれている。これは燃料集合体と圧力管が一体となって振動する場合の一次共振によるもので、図-5.9 の実測値と一致する。

5F型 についての変位、加速度の最大値 (P-P) は表-5.2 の通りである。同表における振動数の欄は、フィルムに記録された内臓タイムマーカ信号から算出した値である。加速度の欄は上・下タイプレート部の圧力管の加速度を加速度計で計測した値を示す。圧力管、燃料集合体および相対値の欄は撮影フィルムから求めたものである。圧力管の最大加速度は 9Hz, 0.3 G 時に S8 点で生じ、その最大値は 2.89 G である。燃料集合体の最大加速度は 11 Hz, 0.6 G 時に S8 点で

表-5.2 変位および加速度の最大値 (P-P)
(5F型, 高速度シネカメラ撮影)

計測点	振動数 (Hz)	加速度 S13PT SOPT (±G)	圧力管		燃料集合体		相対値	
			加速度 (G P-P)	変位 (mm P-P)	加速度 (G P-P)	変位 (mm P-P)	加速度 (G P-P)	変位 (mm P-P)
S 6	4.72	0.604 0.592	3.09	18.82	2.73	21.18	3.99	2.70
	7.35	0.296 0.296	3.60	10.08	3.23	13.16	5.77	2.76
	9.09	0.300 0.300	2.86	1.95	1.76	3.03	4.20	2.59
	10.99	0.609 0.609	3.09	2.24	2.96	4.12	5.61	(2.76) 2.53)
	14.08	0.598 0.598	2.91	0.95	2.12	1.70	4.65	2.79
	22.73	0.600 0.600	8.98	2.20	1.71	0.65	8.59	2.09
S 8	6.67	0.296 0.296	3.47	9.78	3.42	12.33	5.48	2.78
	8.93	0.300 0.300	5.77	1.78	2.05	2.80	7.30	2.80
	10.42	0.609 0.609	2.53	2.34	4.29	4.76	4.49	3.12
	12.66	0.598 0.598	4.76	1.02	2.90	1.67	5.26	2.61
	22.99	0.600 0.600	3.47	2.28	1.51	0.37	4.49	2.41
S 10	6.90	0.296 0.296	2.99	8.33	2.79	11.11	4.42	2.76
	9.71	0.300 0.300	2.44	1.63	2.43	2.89	4.54	2.67
	10.31	0.609 0.609	1.96	1.69	3.04	4.33	2.14	2.86
	12.82	0.598 0.598	2.09	1.07	1.63	2.02	3.72	2.56

注 23Hz (約) の値は数サイクルについての P-P 値を参考値として示したものである。

生じ、その最大値は 2.15 G である。この時の相対変位も最大値 3.12 mm を示し、スパーサばねには約 53 kg の力が作用する。

なお、表-5.2 における圧力管、燃料集合体、相対値の欄の加速度、変位は両振幅 (P-P 値) を表わす。高速度シネカメラによる記録波形は対称形でないケースが多く、また 23 Hz の波形のように数サイクルの周期で移動しているものもあり、片振幅値での表示が厳密さに欠ける場合が多い。そこで、このような場合、P-P 値と注記のうえ両振幅値を使用する。

5.2 地震波による振動実験

解析計算コードの妥当性を評価するとともに、地震時のふげん燃料の健全性を確認するため、地震波による振動実験を実施した。

実験計測の方法は正弦波による振動実験の場合と同一である。地震波の再現には地震波再現システム (3.3 節参照) を用いた。実験条件およびパラメータは、次のとおりであり、合計 24 ケースの実験を行った。

入力波	TAFT 波, EL CENTRO 波
原点番号	50 (圧力管の上部固定点) 56 (圧力管の下部固定点)

方 向	X方向 (プラントの南北方向) Y方向 (プラントの東西方向)
計測点	S6, S8, S10
加振倍率	1.0

ここで、加振倍率 1.0 は、ふげん炉の耐震計算において TAFT 波の X 方向、質点番号 50 の点の応答波形 (TAFT M24X-50) の最大加速度 0.503 G を基準とし、地震波再現システムのゲインを設定した値である。従って、他の地震波の場合には加振倍率 1.0 でも、その最大加速度は 0.5 G に満たない。

計測には加速度計、非接触型振動変位計による計測と高速度シネカメラによる撮影を併行して行った。

ペン書きオシログラフの記録の 1 例を図-5.12 に示す。同図において、記録チャンネルの略号と記録データの関係は、次のとおりである。

記録紙の送り速度は 5 目盛/sec であり、最上段に 1 秒間隔のタイムマークが記録されている。ch. 2 の相対変位は 図-3.3 による補正が必要であり、目盛は概略値を示すものである。ch. 3 および ch. 4 の加速度波形には相対変位が (+) または (-) の最大値附近でパルス状の衝撃波が発生しているのが見られる。これ

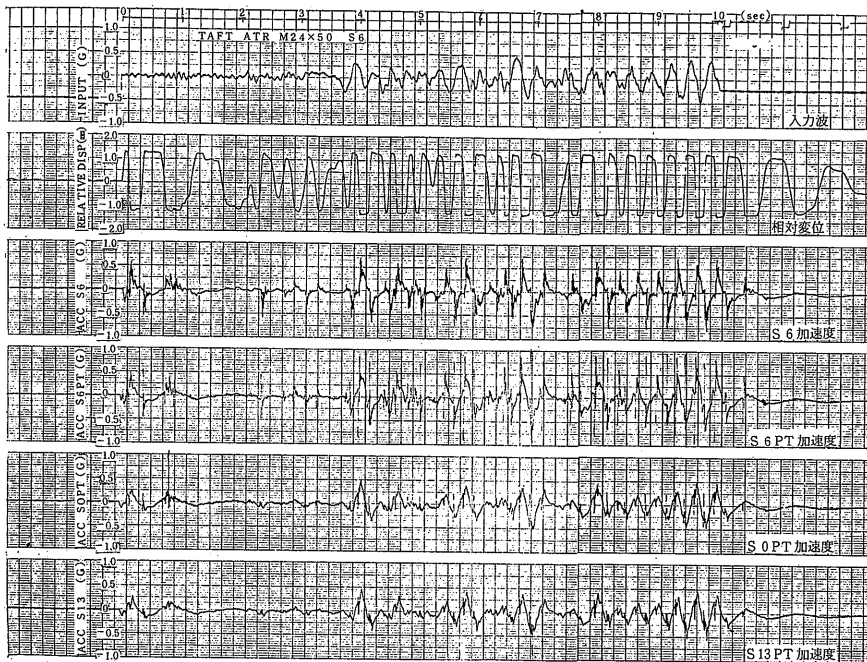


図-5.12 地震波の振動実験記録 (1) S6 点

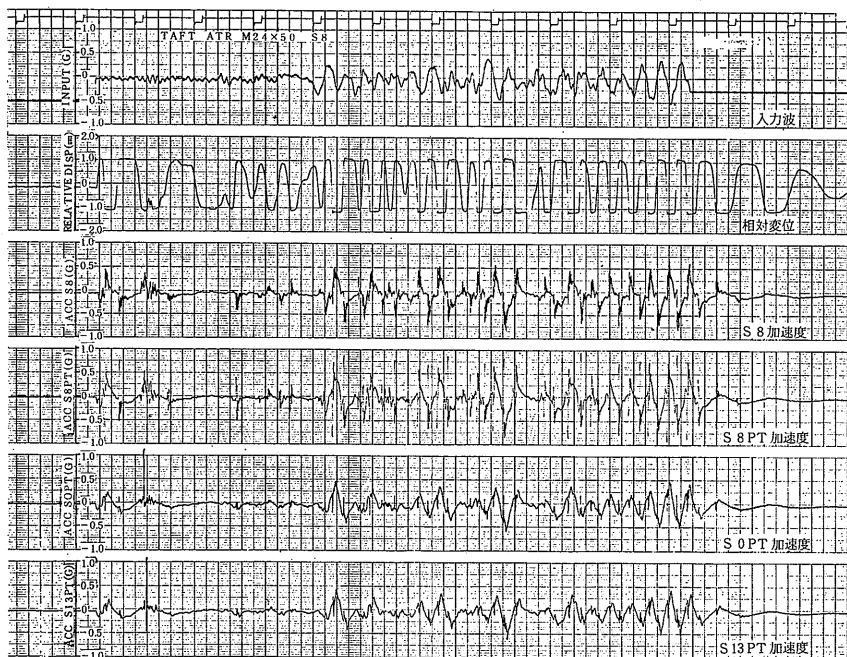


図-5.12 地震波の振動実験記録 (2) S8点

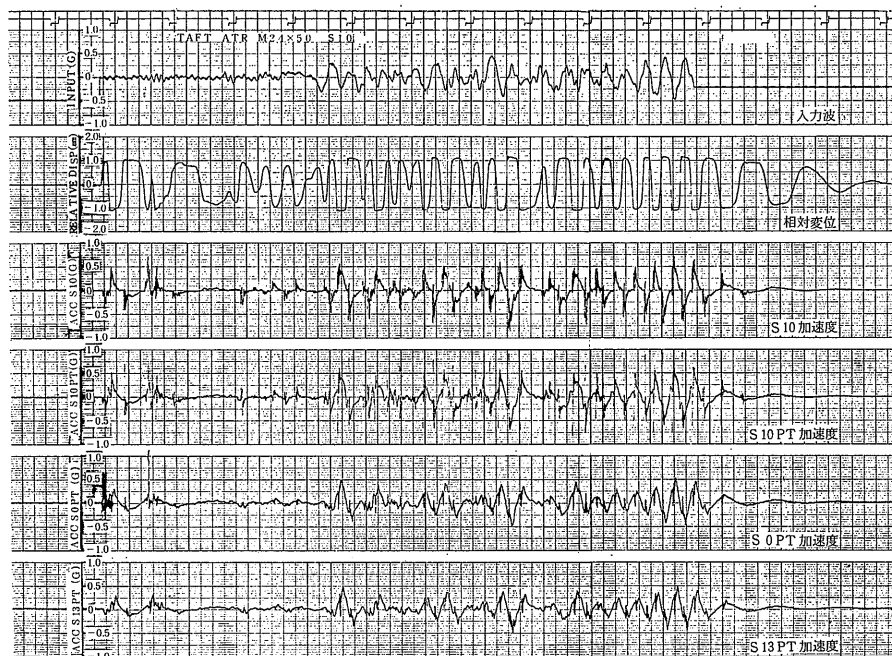


図-5.12 地震波の振動実験記録 (3) S10点

表-5.3 S6, S8, S10 点の加速度の最大値

	入力データ		発 生 時 刻 T ₁ (sec)	燃料集合体絶対加速度			圧力管絶対加速度					相 対 加 速 度			ス ト ッ パ ー
	T ₁ (sec)	ACC (G)		S6 (G)	S8 (G)	S10 (G)	S6PT (G)	S8PT (G)	S10PT (G)	S0PT (G)	S13PT (G)	S6PT -S6 (G)	S8PT -S8 (G)	S10PT -S10 (G)	
TAFT ATR M24X-50	3.92	0.30	3.95	0.65	0.60	0.55	-0.80	-0.75	-0.80	0.50	0.50	-1.45	-1.35	-1.35	※
	6.62	0.45	6.70	0.80	0.65	0.60	-0.75	-0.80	-0.70	0.35	0.40	-1.55	-1.45	-1.30	
	6.81	-0.40	6.85	-0.80	-0.90	-0.85	1.00	0.90	0.80	-0.55	-0.65	1.80	1.80	1.65	
	9.3	-0.40	9.45	-0.65	-0.65	-0.75	1.00	0.85	0.95	-0.40	-0.50	1.65	1.50	1.65	
	9.55	0.45	9.60	0.65	0.65	0.70	-0.95	-0.95	-0.80	0.50	0.50	-1.60	-1.60	-1.50	
	9.70	-0.50	9.75	-0.75	-0.70	-0.75	0.85	0.95	0.90	-0.50	-0.50	1.60	1.65	1.65	
TAFT ATR M18Y-50	3.90	0.35	4.02	0.70	0.8	0.55	-0.80	-0.80	-0.75	0.45	0.50	-1.5	-1.60	-1.30	※
	4.10	-0.25	4.20	-0.70	-0.65	-0.70	0.85	0.95	0.80	-0.40	-0.40	1.55	1.60	1.50	
	6.63	0.50	6.70	0.60	0.55	0.60	-0.80	-0.80	-0.75	0.35	0.40	-1.4	-1.35	-1.35	
	6.80	-0.40	6.90	-0.95	-1.05	-0.85	1.00	0.95	0.70	-0.80	-1.00	1.95	2.00	1.55	
	9.39	-0.45	9.50	-0.70	-0.65	-0.75	1.00	0.90	0.90	-0.50	-0.55	1.7	1.55	1.65	
	9.55	0.45	9.70	0.70	0.60	0.70	-0.90	-0.90	-0.90	0.55	0.60	-1.6	-1.50	-1.60	
El-Centro ATR M24X-50	2.07	-0.45	2.15	-0.60	-0.60	-0.50	0.40	0.40	0.10	-0.45	-0.35	1.0	1.00	0.60	※
	2.25	0.40	2.40	1.10	1.70	1.00	-0.85	-0.90	-0.85	1.20	1.20	-1.95	-2.60	-0.85	
	2.40	-0.40	2.57	-0.70	-0.70	-0.70	0.50	0.45	0.55	-0.50	-0.45	1.2	1.15	1.25	
	2.62	0.45	2.80	0.60	0.55	0.50	-0.60	-0.70	-0.50	0.25	0.25	-1.2	-1.25	-1.00	
	4.30	-0.30	4.50	-0.40	-0.40	-0.45	0.10	0.05	0.05	-0.25	-0.20	0.5	0.45	0.50	
	5.03	0.30	5.25	0.65	0.60	0.80	-0.50	-0.55	-0.55	1.20	0.50	-1.15	-1.15	-1.35	
El-Centro ATR M18Y-50	2.25	0.45	2.37	1.40	1.50	0.90	-0.90	-1.10	-0.80	1.20	1.20	-2.30	-2.60	-1.70	※
	2.37	-0.50	2.55	-0.75	-0.75	-0.70	0.40	0.45	0.55	-0.50	-0.50	1.15	1.20	1.25	
	2.55	0.40	2.73	0.60	0.50	0.50	-0.55	-0.60	-0.30	0.25	0.25	-1.15	-1.10	-0.80	
	4.35	-0.25	4.45	-0.45	-0.40	-0.40	0.25	0.15	0.05	-0.25	-0.20	0.70	0.55	0.45	
	5.10	0.25	5.17	0.60	0.65	0.75	-0.35	-0.45	-0.20	1.20	0.45	-0.95	-1.10	-0.95	
	9.35	-0.15	9.50	-0.70	-0.60	-0.50	0.55	0.70	0.75	-0.20	-0.15	1.25	1.30	1.25	
TAFT ATR M24X-56	3.90	0.25	4.02	0.80	0.65	0.55	-0.85	-0.85	-0.45	0.40	0.40	-1.65	-1.50	-1.00	※
	4.10	-0.20	4.20	-0.60	-0.65	-0.50	0.55	0.65	0.35	-0.35	-0.30	1.15	1.30	0.85	
	6.65	0.40	6.75	0.60	0.70	0.55	-0.75	-0.75	-0.70	0.35	0.40	-1.35	-1.45	-1.25	
	6.82	-0.40	6.92	-0.75	-0.70	-0.75	1.00	0.95	0.65	-0.50	-0.80	1.75	1.65	1.40	
	9.57	0.40	9.55	0.70	0.65	0.65	-0.90	-0.90	-0.80	0.50	0.50	-1.60	-1.55	-1.45	
	9.70	-0.45	9.71	-0.70	-0.65	-0.75	0.95	0.95	0.95	-0.45	-0.50	1.65	1.60	1.70	
TAFT ATR M18Y-56	3.92	0.30	4.02	0.75	0.70	0.55	-0.90	-0.90	-0.60	0.40	0.40	-1.65	-1.65	-1.15	※
	4.08	-0.25	4.20	-0.60	-0.60	-0.55	0.65	0.75	0.35	-0.35	-0.30	1.25	1.35	0.90	
	6.64	0.45	6.75	0.60	0.65	0.60	-0.80	-0.75	-0.75	0.35	0.35	-1.40	-1.70	-1.35	
	6.80	-0.40	6.90	-0.85	-0.75	-0.75	0.95	0.95	0.65	-0.50	-0.90	1.80	1.70	1.40	
	9.40	-0.40	9.50	-0.70	-0.70	-0.75	0.95	0.85	0.95	-0.40	-0.50	1.60	1.55	1.70	
	9.55	0.40	9.70	0.70	0.70	0.70	-0.95	-0.95	-0.80	0.50	0.45	-1.65	-1.65	-1.50	
El-Centro ATR M24X-56	2.05	-0.40	2.10	-0.50	-0.50	-0.50	0.30	0.25	0.10	-0.35	-0.35	0.85	0.75	0.60	※
	2.25	0.35	2.40	1.40	1.35	0.90	-0.70	-0.70	-0.50	0.85	1.20	-2.10	-2.05	-1.40	
	2.40	-0.35	2.55	-0.70	-0.70	-0.65	0.20	0.25	0.35	-0.45	-0.45	0.90	0.95	1.00	
	4.70	-0.20	4.80	-0.55	-0.60	-0.60	0.85	0.80	0.65	-0.15	-0.15	1.40	1.40	1.25	
	9.62	-0.25	9.80	-0.60	-0.50	-0.40	0.70	0.65	0.20	-0.10	-0.10	1.30	1.15	0.60	
	9.76	0.10	9.95	0.55	0.50	0.45	-0.65	-0.75	-0.65	0.20	0.20	-1.20	-1.25	-1.10	
El-Centro ATR M18Y-56	2.05	-0.40	2.10	-0.50	-0.50	-0.50	0.30	0.25	0.25	-0.40	-0.35	0.80	0.75	0.75	※
	2.25	0.35	2.40	1.30	1.60	0.95	-0.85	-0.80	-0.75	1.10	1.15	-2.15	-2.40	-1.70	
	2.45	-0.35	2.55	-0.80	-0.75	-0.70	0.55	0.55	0.70	-0.50	-0.50	1.35	1.35	1.40	
	4.72	-0.10	4.82	-0.60	-0.60	-0.55	0.75	0.80	0.60	-0.20	-0.15	1.35	1.40	1.15	
	9.70	-0.15	9.80	-0.65	-0.60	-0.45	0.75	0.75	0.40	-0.10	-0.10	1.40	1.35	0.85	
	9.85	0.10	9.95	0.50	0.50	0.40	-0.60	-0.70	-0.50	0.20	0.20	-1.10	-1.20	-0.90	

(注) ストッパー欄の ※ 印は、振動子とストッパーが衝突した箇所を示している。

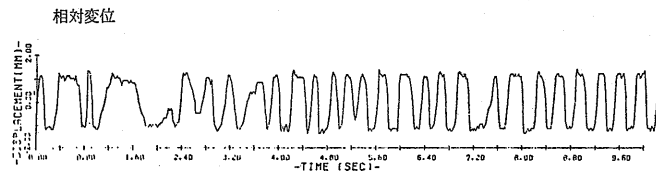
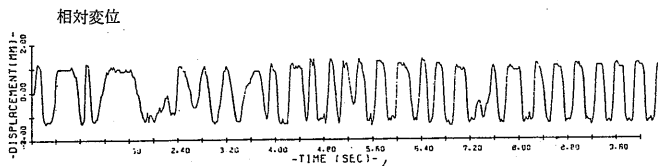
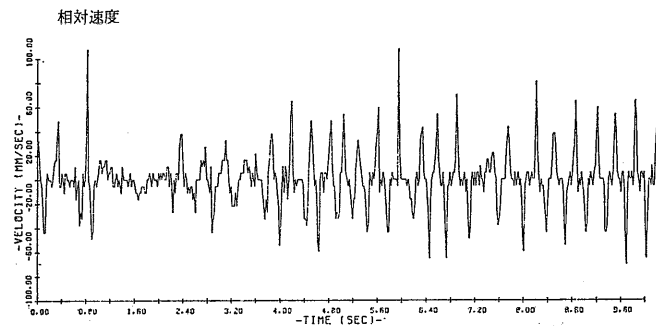
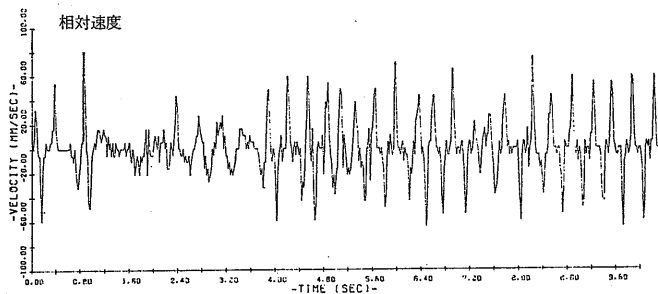
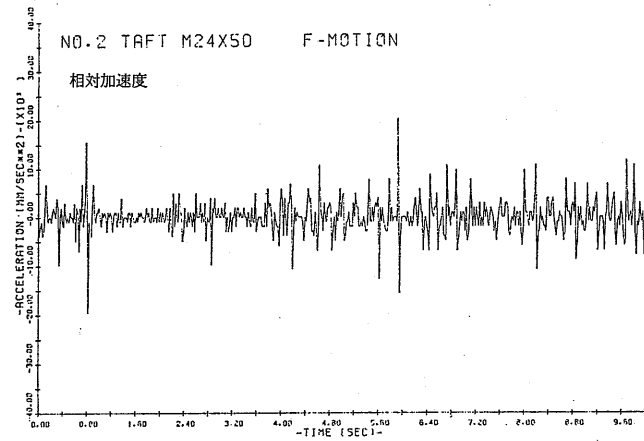
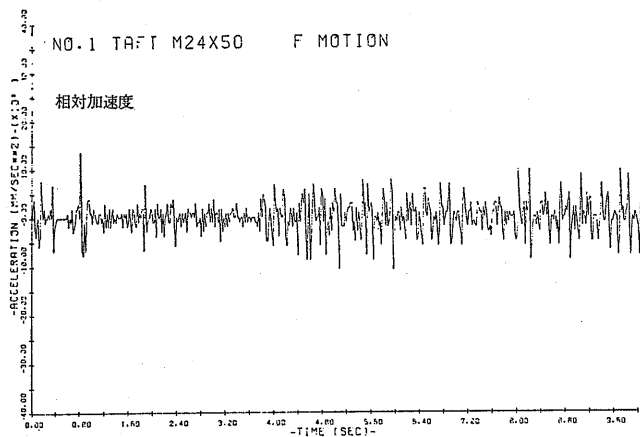


図-5.13 TAFT 波の振動実験フィルム解析 (1) S6点

図-5.13 TAFT 波の振動実験フィルム解析 (2) S8点

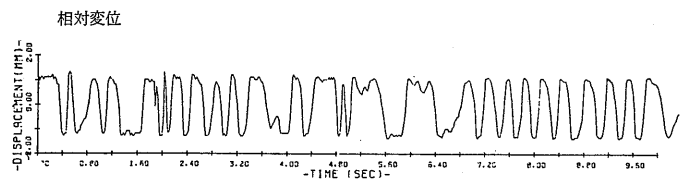
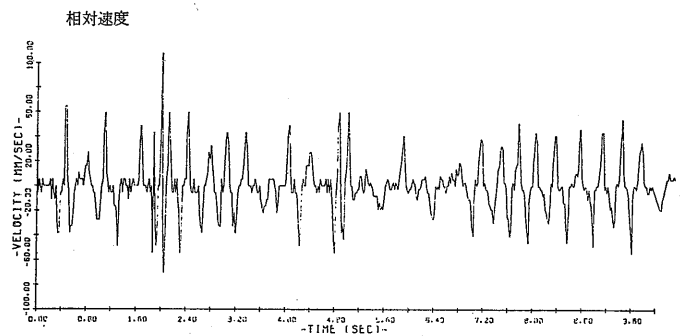
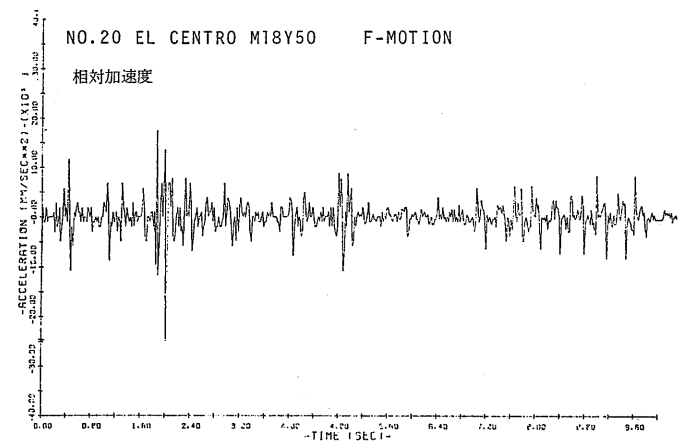


図-5.13 TAFT 波の振動実験フィルム解析 (3) S10点

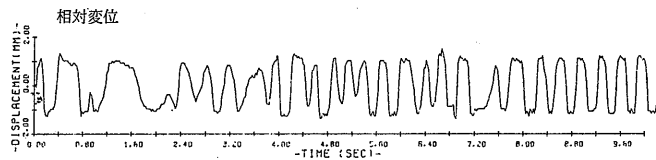
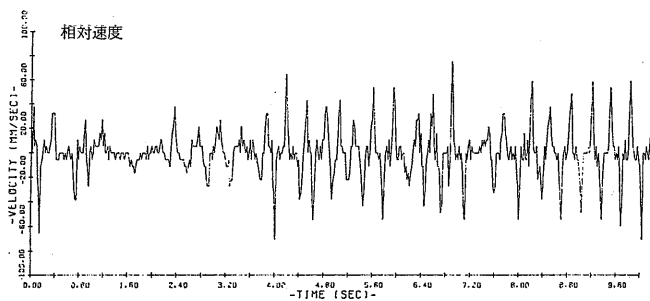
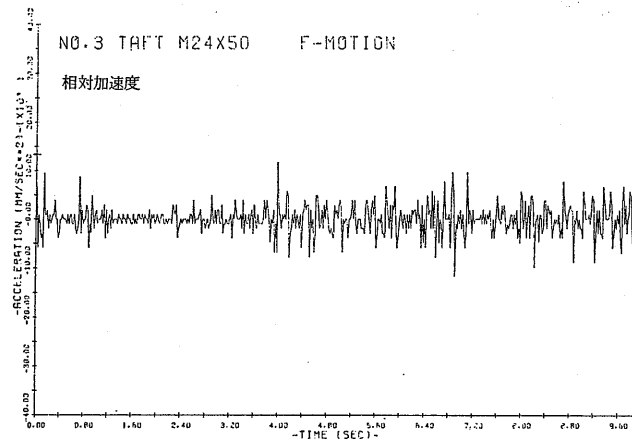
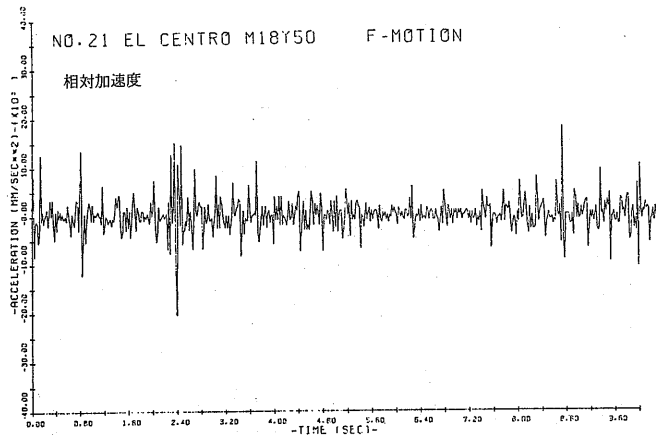
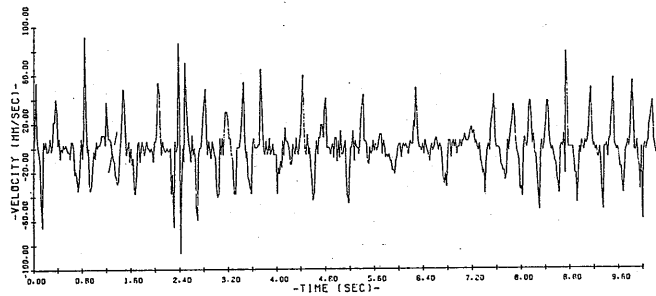


図-5.14 EL CENTRO 波の振動実験フィルム解析 (1) S6点



相对速度



相对変位

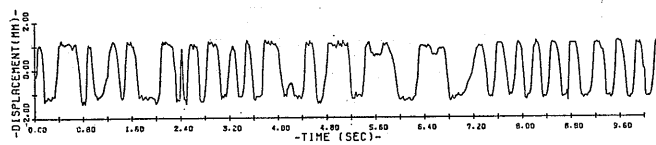
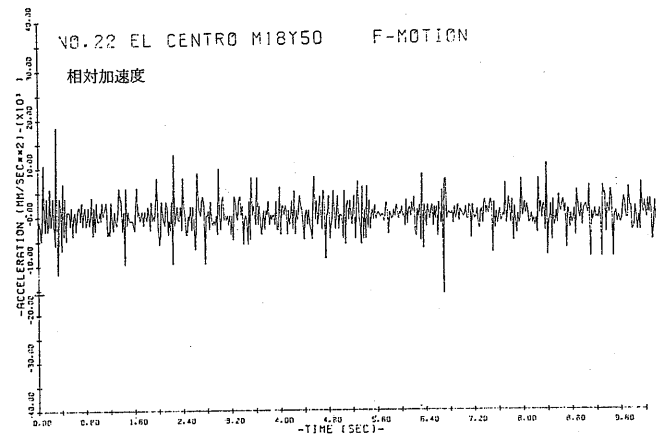
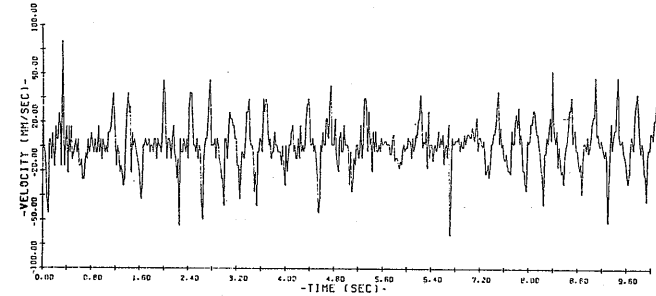


図-5.14 EL CENTRO 波の振動実験フィルム解析 (2) S8点



相对速度



相对変位

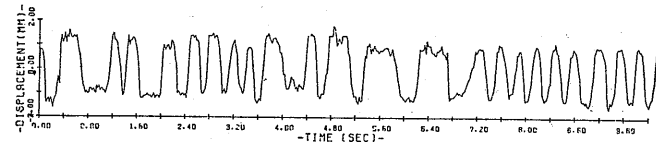


図-5.14 EL CENTRO 波の振動実験フィルム解析 (3) S10点

チャンネル番号	計測値	目盛
ch. 1	INPUT: 地震波	0.5 G/mm
ch. 2	RELATIVE DISP: 計測点の相対変位	1.0 mm/cm
ch. 3	Acc S(): S6, S8, S10 点の加速度	8.5 G/mm
ch. 4	Acc S()PT: S6, S8, S10 点の圧力管の加速 度	0.5 G/mm
ch. 5	Acc S0PT: 加振点 S0PT の加速度	0.5 G/mm
ch. 6	Acc S13PT: 加振点 S13PT の加速度	0.5 G/mm

らの衝撃波は ch. 3 では相対波形と逆の方向に発生し、ch. 4 では同じ方向に発生し、その大きさは前者より大きな値となっている。このような衝撃波の発生はスペーサと圧力管の衝突により生ずるものである。

ch. 5, ch. 6 の加速度波形が同一方向に 1G またはそれ以上のパルス波として発生しているケースがある。このような点では振動変位の絶対値が ± 20 mm の限界を超え、振動子が振動試験機のストッパーに衝突している。従って、実験データの評価、利用に際しては、それに留意する必要がある。

また、予震の部分で、振動開始後 1~2 秒の間に大きな加速度または衝撃波が発生しているケースがある。これは、入力波が -0.5 G からステップ状に 0.0 G となり、 0 G の前後で振動を始めることによるもので、地震波再現システムの時定数のとり方に起因する

ものである。その変位量が大きい場合にはストッパーへの衝突を伴うことになり、この部分についても留意する必要がある。図-5.12 の 0.9 秒後に生ずる ch. 5, ch. 6 に見られるパルス波がこれに相当する。

表-5.3 はこれらの記録データの中から、特に大きな加速度の発生した時間とその大きさを 6 点ずつ示したものである。相対加速度の欄は燃料集合体と圧力管の加速度を単純に加算したものであり、相対加速度の目安として示したものである。これらの実験により得られた燃料集合体の最大加速度（目安値）は、EL CENTRO M24X-50 の S8 点で生じ、 1.7 G である。この時の入力波の加速度は 0.4 G、加振点 S0PT および S13PT の加速度（含衝撃波）は 1.2 G である。S6 点の圧力管の最大加速度 1.00 G は、耐振計算による燃料集合体の中央部付近の圧力管（質点番号 53）の加速度よりかなり小さい。

燃料集合体と圧力管の相対加速度の推定値は、次の通りである。

S6	2.30 G (3.0 G)
S8	2.60 G (2.8 G)
S10	1.70 G (1.7 G)

ここで、カッコ内の数字は後述する解析で得られた計算値を示す。

高速度シネカメラによる撮影フィルムを読み取り、電子計算機で処理・作図したものの 1 例を図-5.13 および図-5.14 に示す。同図において、縦軸の DISPLACEMENT, VELOCITY, ACCELERATION は

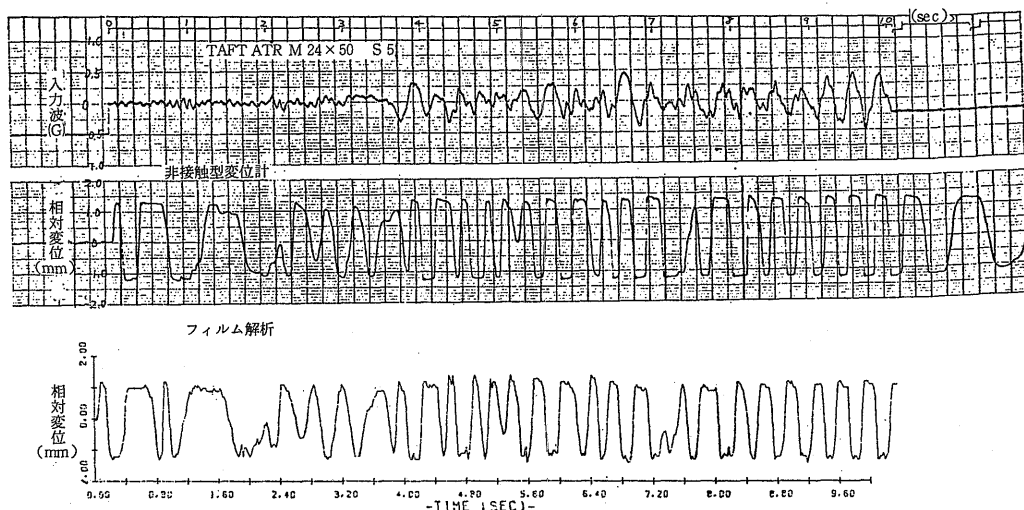


図-5.15 相対変位の計測値の比較

計測点の燃料集合体と圧力管の相対変位, 相対速度, 相対加速度を表わす。

これらの図において, 相対変位の波形にはペン書きオシログラフでは明確にすることができなかった最大変位附近での詳細な波形をつかむことができる。両者の関係の1例として 図-5.12(1) の相対変位と 図-5.13(3) を比較したものを 図-5.15 に示す。両波形は0.9秒の点を除けば極めてよい一致を示している。0.9秒の点でのフィルムの解析に見られる一往復の波は振動子のストッパーへの衝突に伴うもので, 図-5.12(3) にもそれに伴う波が表われている。図-5.14 はストッパーへの衝突回数の多いケースである。(1) 図で3点, (2) 図で2点がそれに該当する。このうち, 0.5秒の点のものは地震波再現システムに起因する衝突で, 2.0秒および4.8秒のそれは地震波の大振幅に起因する衝突である。

6. 動的応答解析

燃料集合体に振動外力が作用した場合の動的応答を計算するため, 解析計算コードを作成した。この解析計算コードは, 規則形状波および不規則形状波に対する燃料集合体の時刻歴応答を解析し, 発生応力等を算出するもので, 耐震性の評価は言うに及ばず, 船体運動に対する船用炉燃料集合体の健全性の評価にも利用できる。

6.1 解析モデルおよび基礎式

本研究において作成した動的応答解析計算コードは, 第4章の実験的研究により得られた諸特性を基にして想定した解析モデル(図-6.1 参照)に対して, 次の仮定のもとに解析を行う。

6.1.1 解析上の仮定

解析上の仮定は, 次の通りである。

- (1) X-Y の2次元問題として扱う。
- (2) 圧力管の固有振動数が, 燃料集合体に比べてかなり高いため, 圧力管を完全剛体と仮定する。
- (3) 燃料集合体を1本の弾性梁と考え, 燃料集合体の回転慣性および剪断力によるたわみ効果を無視する。
- (4) 各スペーサは, 弾性ばねと衝撃吸収素子を含むモデルとする。
- (5) 入力波は燃料集合体の上・下端で, 圧力管に同一波形で伝達される。
- (6) 燃料集合体の上・下タイプレート部にある案

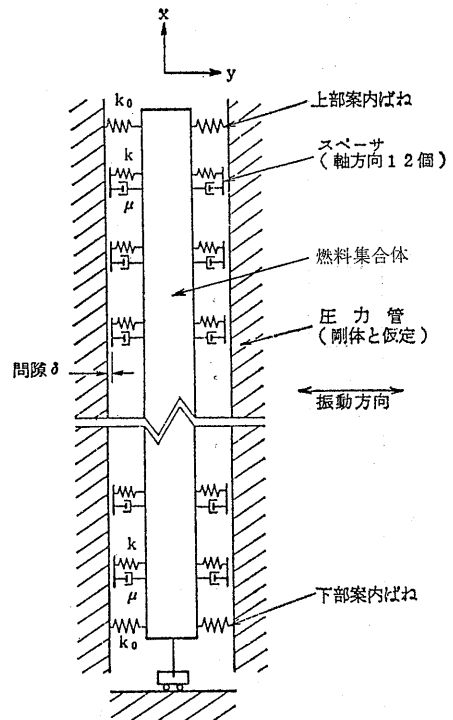


図-6.1 解析モデル

内ばねの変位を考慮する。

連続体である燃料集合体の運動を解析するためのメッシュ分割を 図-6.2 に示す。燃料集合体に動く外力, 慣性力, 減衰力等は, 全て, メッシュの代表点(ノード)に集中荷重として作用するものとする。また, 燃料集合体の長さ(全長)は上・下タイプレートの案内ばね取付位置間の長さとし, 燃料集合体の全質量がこの長さの範囲に一樣に分布しているものとする。

6.1.2 計算の流れ

解析計算コードの計算の流れを 図-6.3 に示す。主な計算手順は, 次の通りである。

- (1) データ入力(カードデータ, 地震データ)
- (2) 初期設定, マトリックス設定
- (3) 初期($t=0$)での加速度, 速度, 変位の計算
- (4) $t=n\Delta t$ ($n>1$)での衝撃力, 加速度, 速度, 変位, 応力の計算
- (5) シミュレーション終了まで(4)を繰返す
- (6) 最大衝撃力, 最大応力のプリント・プロットデータの出力

6.1.3 基礎式

燃料集合体の振動は, 次の振動方程式で表わされる。

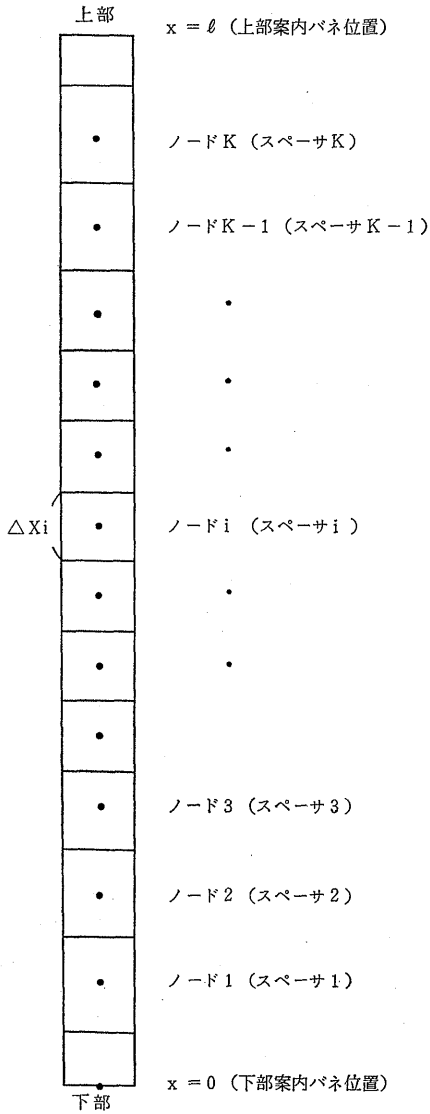


図-6.2 燃料集合体のメッシュ分割

$$\frac{A\gamma}{g} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + C \frac{\partial y}{\partial t} + EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = \frac{A\gamma}{g} \cdot \frac{\partial^2 y_0}{\partial t^2} + P \quad (30)$$

- y : 燃料集合体のたわみ
- y_0 : 地震ベクトル
- EI : 燃料集合体のたわみ剛性
- $A\gamma$: 燃料集合体の単位長重量
- C : 燃料集合体の減衰係数
- g : 重力の加速度
- P : スベサ部での圧力管との衝突による反発力

(182)

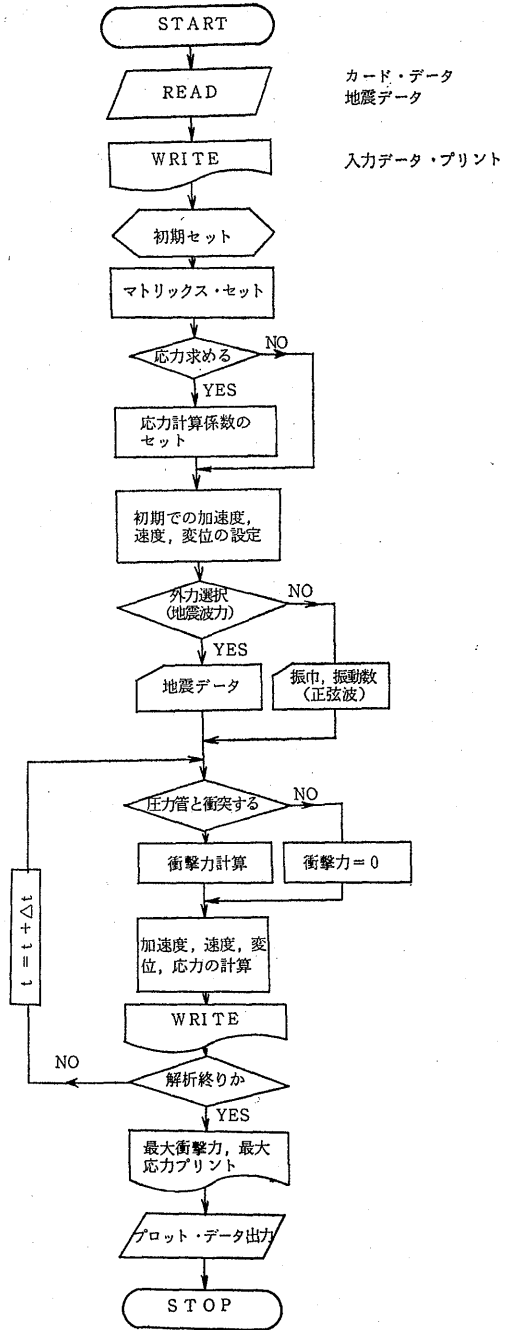


図-6.3 全体の計算の流れ

初期条件

$$\left. \begin{aligned} y(x, 0) &= 0 \\ \frac{\partial y(x, 0)}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

境界条件

燃料集合体上・下端の境界条件は、端での曲げモーメントがたわみ角に比例するとして、次式で与える。

$$\left(\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2}\right)_{x=0,L} \cdot L = \pm \alpha L \left(\frac{\partial y(x,t)}{\partial x}\right)_{x=0,L} \quad (32)$$

ここで、 L は燃料集合体の長さ、 αL は燃料集合体の固有振動数 ω から次式で求められる定数。(端末支持条件)

$$\left. \begin{aligned} \alpha L &= \frac{-2\beta L}{\tan(\beta L/2) + \tanh(\beta L/2)} \\ \beta &= \omega \sqrt{\frac{EIg}{A\gamma}} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

反発力

スパーサと圧力管の衝突による反発力は (20) 式および (27) 式で与えられる。(4.5 節参照)

燃料棒の曲げ応力

燃料棒の被覆管に生ずる曲げ応力は、燃料棒の変形曲率が燃料集合体中心軸の変形曲率と同じであることから、次式で計算する。

$$\sigma = E \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \cdot \frac{D}{2} + \frac{WlD}{8I_R} \quad (34)$$

ここで、 E ；被覆管のヤング率

D ；被覆管の直径

I_R ；被覆管の断面二次モーメント

$\partial^2 y / \partial x^2$ ；燃料集合体の変形曲率

l ；スパーサ・リング素子の固定ディンブル・スパン

W ；燃料棒一本当りの衝突荷重

(34) 式の第 1 項は、燃料集合体の変形曲率によって生ずる応力であり、第 2 項は衝突時にスパーサのディンブル部に付加される局所曲げ応力である。

6.2 数値解法

6.2.1 振動方程式の展開

基礎式 (30) を図-6.2 に示すメッシュの各ノードに適用する。 i 番目のスパーサを含むメッシュの長さを Δx_i とし、(30) 式を整理すると、時刻 t で、

$$\ddot{y}_{t,i} + \frac{b}{a} \dot{y}_{t,i} + \frac{1}{a} \frac{\partial^4 y_{t,i}}{\partial x^4} = f_{t,i} \quad (35)$$

ここで、

$$a = \frac{A\gamma}{EIg}$$

$$b = \frac{C}{EI}$$

$$f_{t,i} = \frac{\partial^2 y_{0,t}}{\partial t^2} + \frac{P_{t,i}}{m}$$

$$m = \frac{A\gamma}{g} \Delta x_i$$

(35) 式をベクトル表示すると、

$$\{\ddot{y}\}_t + \frac{b}{a} \{\dot{y}\}_t + [K]\{y\}_t = \{f\}_t \quad (36)$$

左辺第 3 項の $[K]\{y\}$ は燃料集合体のたわみ項 $1/a \cdot \partial^4 y / \partial x^4$ を行列表示したものである。

(36) 式より、

$$\{\ddot{y}\}_1 + \frac{b}{a} \{\dot{y}\}_1 + [K]\{y\}_1 = \{f\}_1 \quad (37)$$

$$\{\ddot{y}\}_2 + \frac{b}{a} \{\dot{y}\}_2 + [K]\{y\}_2 = \{f\}_2 \quad (38)$$

$$\{\ddot{y}\}_3 + \frac{b}{a} \{\dot{y}\}_3 + [K]\{y\}_3 = \{f\}_3 \quad (39)$$

サフィックス 1, 2, 3 は、それぞれ時刻 $t-2\Delta t$, $t-\Delta t$, t に対応する。

また、 $y(t)$ をテーラー展開すると、

$$\dot{y}(t) = \dot{y}(t-\Delta t) + \Delta t \ddot{y}(t-\Delta t) + \frac{\Delta t^2}{2} \dddot{y}(c) \quad (t-\Delta t < c < t)$$

であるから、 $\dddot{y}(c)$ を $\frac{\dot{y}(t) - \dot{y}(t-\Delta t)}{\Delta t}$ で近似して、

$$\dot{y}(t) = \dot{y}(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2} (\ddot{y}(t-\Delta t) + \ddot{y}(t))$$

これより、

$$\{\dot{y}\}_2 = \{\dot{y}\}_1 + \frac{\Delta t}{2} (\{\ddot{y}\}_1 + \{\ddot{y}\}_2) \quad (40)$$

$$\{\dot{y}\}_3 = \{\dot{y}\}_2 + \frac{\Delta t}{2} (\{\ddot{y}\}_2 + \{\ddot{y}\}_3) \quad (41)$$

同様に、 $y(t)$ についてもテーラー展開して、

$$\{y\}_2 = \{y\}_1 + \Delta t \{\dot{y}\}_1 + \frac{\Delta t^2}{3} \{\ddot{y}\}_1 + \frac{\Delta t^2}{6} \{\ddot{y}\}_2 \quad (42)$$

$$\{y\}_3 = \{y\}_2 + \Delta t \{\dot{y}\}_2 + \frac{\Delta t^2}{3} \{\ddot{y}\}_2 + \frac{\Delta t^2}{6} \{\ddot{y}\}_3 \quad (43)$$

(37)~(43) 式より $\{\dot{y}\}$, $\{\ddot{y}\}$ を消去する。

(1) 初期状態

初期条件により、

$$\{y\}_1 = 0, \quad \{\dot{y}\}_1 = 0$$

(37) 式より、

$$\{\ddot{y}\}_1 = \{f\}_1$$

(40) 式より、

$$\{\dot{y}\}_2 = \frac{\Delta t}{2} (\{f\}_1 + \{\ddot{y}\}_2) \quad (44)$$

(42) 式より、

$$\{y\}_2 = \frac{\Delta t^2}{3} \{f\}_1 + \frac{\Delta t^2}{6} \{\ddot{y}\}_2 \quad (45)$$

(45) 式より,

$$\{\ddot{y}\}_2 = -2\{f\}_1 + \frac{6}{\Delta t^2} \{y\}_2 \quad (46)$$

(44), (46) 式より,

$$\{\dot{y}\}_2 = -\frac{\Delta t}{2} \{f\}_1 + \frac{3}{\Delta t} \{y\}_2 \quad (47)$$

(46), (47) 式を (38) 式に代入して,

$$\begin{aligned} -2\{f\}_1 + \frac{6}{\Delta t^2} \{y\}_2 + \frac{b}{a} \left(-\frac{\Delta t}{2} \{f\}_1 \right. \\ \left. + \frac{3}{\Delta t} \{y\}_2 \right) + [K] \{y\}_2 = \{f\}_2 \\ \left(\frac{6}{\Delta t^2} + \frac{3}{\Delta t} \cdot \frac{b}{a} \right) \{y\}_2 + [K] \{y\}_2 \\ = \{f\}_2 + 2\{f\}_1 + \frac{\Delta t}{2} \frac{b}{a} \{f\}_1 \end{aligned}$$

故に,

$$\begin{aligned} \left(\left(1 + \frac{b}{2a} \Delta t \right) [I] + \frac{\Delta t^2}{6} [K] \right) \{y\}_2 \\ = \frac{\Delta t^2}{6} \{f\}_2 + \left(\frac{\Delta t^2}{3} + \frac{\Delta t^3}{12} \cdot \frac{b}{a} \right) \{f\}_1 \quad (48) \end{aligned}$$

ここで, $[I]$ は単位マトリックスである。(48) 式より,

$$\{y\}_2 = [D]^{-1} \{f\} \quad (49)$$

ここで,

$$\begin{aligned} [D] &= \left(1 + \frac{b}{2a} \Delta t \right) [I] + \frac{\Delta t^2}{6} [K] \\ \{f\} &= \frac{\Delta t^2}{6} \{f\}_2 + \left(\frac{\Delta t^2}{3} + \frac{\Delta t^3}{12} \cdot \frac{b}{a} \right) \{f\}_1 \end{aligned}$$

である。

(2) 第2タイム・ステップ以後

$$\{y\}_3 = \{y\}_2, \quad \{y\}_2 = \{y\}_{t-\Delta t}, \quad \{y\}_1 = \{y\}_{t-2\Delta t},$$

$$\{f\}_3 = \{f\}_2, \quad \{f\}_2 = \{f\}_{t-\Delta t}, \quad \{f\}_1 = \{f\}_{t-2\Delta t}$$

とおき, 初期状態と同様に, (37)~(43) 式より $\{y\}$, $\{\dot{y}\}$ を消去して, 次の結果を得る。

$$\begin{aligned} \left(\left(1 + \frac{b}{2a} \Delta t \right) [I] + \frac{\Delta t^2}{6} [K] \right) \{y\}_3 \\ = \frac{\Delta t^2}{6} (\{f\}_1 + 4\{f\}_2 + \{f\}_3) \\ - \left(\left(1 - \frac{b}{2a} \Delta t \right) [I] + \frac{\Delta t^2}{6} [K] \right) \{y\}_1 \\ + \left(2[I] - \frac{2}{3} \Delta t^2 [K] \right) \{y\}_2 \quad (50) \end{aligned}$$

(50) 式より

(184)

$$\{y\}_3 = [D]^{-1} (\{f\} + [A] \{y\}_1 + [B] \{y\}_2) \quad (51)$$

ここで,

$$[D] = \left(1 + \frac{b}{2a} \Delta t \right) [I] + \frac{\Delta t^2}{6} [K]$$

$$[A] = - \left(1 - \frac{b}{2a} \Delta t \right) [I] - \frac{\Delta t^2}{6} [K]$$

$$[B] = 2[I] - \frac{2}{3} \Delta t^2 [K]$$

$$\{f\} = \frac{\Delta t^2}{6} (\{f\}_1 + 4\{f\}_2 + \{f\}_3)$$

である。

6.2.2 燃料集合体のたわみ項の取扱 (解析的手法)

燃料集合体を一様な弾性梁と仮定しているため, 図-6.4 のモデルで, 燃料集合体に分散荷重が作用した

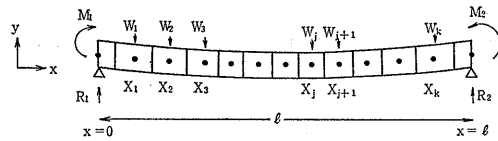


図-6.4 たわみ量の解析的計算モデル

場合の任意点における各時刻におけるたわみ量を解析的に求めることができる。同図において, M_1, M_2 は支持条件によって生ずる曲げモーメント, R_1, R_2 は反力である。また, W_j は x_j ノードに働く分散荷重であり, j メッシュに働く慣性力, 衝撃力, 減衰力等を集中荷重として代表させている。

$x=l$ 点での釣合いにより,

$$Rl + M_1 = \sum_{i=1}^j W_i(l-x_i) + M_2$$

$x_j \leq x \leq x_{j+1}$ の点での曲げモーメントは,

$$\begin{aligned} M &= R_1 x + M_1 - \sum_{i=1}^j W_i(x-x_i) \\ &= \frac{M_2 - M_1}{l} x + \frac{x}{l} \sum_{i=1}^k W_i(l-x_i) \\ &\quad + M_1 - \sum_{i=1}^j W_i(x-x_i) \quad (52) \end{aligned}$$

これより

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 y}{dx^2} &= -\frac{M}{EI} = -\frac{1}{EI} \left\{ \frac{M_2 - M_1}{l} x \right. \\ &\quad \left. + \frac{x}{l} \sum_{i=1}^k W_i(l-x_i) + M_1 \right. \\ &\quad \left. - \sum_{i=1}^j W_i(x-x_i) \right\} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= -\frac{1}{EI} \left\{ \frac{M_2 - M_1}{2l} x^2 + \frac{x^2}{2l} \right. \\ &\quad \cdot \sum_{i=1}^k W_i(l-x_i) + M_1 x \\ &\quad \left. - \sum_{i=1}^j \frac{W_i(x-x_i)^2}{2} \right\} + C_1 \\ y &= -\frac{1}{EI} \left\{ \frac{M_2 - M_1}{6l} x^3 + \frac{x^3}{6l} \right. \\ &\quad \cdot \sum_{i=1}^k W_i(l-x_i) + \frac{M_1}{2} x^2 \\ &\quad \left. - \sum_{i=1}^j \frac{W_i(x-x_i)^3}{6} \right\} + C_1 x + C_2 \end{aligned} \right\} (53)$$

a) $x=0$ で, $y=0$ より

$$C_2 = 0$$

b) $x=l$ で, $y=0$ より

$$C_1 = \frac{1}{6EI} \left\{ (M_2 + 2M_1)l^2 \right. \\ \left. + l^2 \sum_{i=1}^k W_i(l-x_i) - \sum_{i=1}^j W_i(l-x_i)^3 \right\}$$

c) $x=0$ で, $\frac{d^2y}{dx^2} = u \frac{dy}{dx}$, $\left(u = \frac{\alpha}{L}\right)$ より

$$2l(3+ul)M_1 + ul^2M_2 \\ + u \sum_{i=1}^k W_i(l-x_i)x_i(2l-x) = 0 \quad (54)$$

d) $x=l$ で, $\frac{d^2y}{dx^2} = -u \frac{dy}{dx}$, $\left(u = \frac{\alpha}{L}\right)$ より

$$2l(3+ul)M_2 + ul^2M_1 \\ + u \sum_{i=1}^k W_i(l-x_i)x_i(l+x_i) = 0 \quad (55)$$

(54), (55) 式より, M_1, M_2 を求めることができる

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= \frac{ulB - 2(3+ul)A}{DNT} \\ M_2 &= \frac{ulA - 2(3+ul)B}{DNT} \end{aligned} \right\} (56)$$

ここで,

$$A = u \sum_{i=1}^k W_i(l-x_i)(2l-x_i)x_i$$

$$B = u \sum_{i=1}^k W_i(l-x_i)(l+x_i)x_i$$

$$DNT = 4l(ul+3)^2 - u^2l^3$$

任意の点 $x(x_j \leq x \leq x_{j+1})$ でのたわみは, (55) 式に C_1, C_2, M_1, M_2 を代入して次のように求まる。

$$\left. \begin{aligned} y &= \frac{1}{6EI} \left\{ \sum_{i=1}^j W_i x_i(l-x)(-x^2 + 2lx - x_i^2) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=1}^k W_i(l-x_i)x(-x^2 + 2lx_i - x_i^2) + YMT \right\} \end{aligned} \right\} (57)$$

ここで,

$$\left. \begin{aligned} YMT &= \sum_{i=1}^k x_i(l-x_i)((2l-x_i) \\ &\quad - RMT_1 + (l+x_i) \cdot RMT_2) W_i \\ RMT_1 &= \frac{u}{DNT} \{ 3x(l-x) \\ &\quad \cdot [(ul+2)x - (ul+4)l] \} \\ RMT_2 &= \frac{u}{DNT} \{ 3x(l-x) \\ &\quad \cdot [-(ul+2)x - 2l] \} \end{aligned} \right\} (58)$$

(57), (58) 式より各ノード点 $x_j (j=1, 2, \dots, k)$ でのたわみ y_j と, 荷重 $W_j (j=1, 2, \dots, k)$ との関係を表すことができる。

$$\{y\} = [S]\{W\}$$

$[S]^{-1} = [T]$ とおいて,

$$\{W\} = [T] \cdot \{y\} \quad (59)$$

(36) 式の $[K]\{y\}$ との対応は, (36) 式が単位長さに働く加速度の式であることから, $\{W\}$ の各要素 W_i をメッシュの質量 $m_i (m_i = A \gamma \Delta x_i / g)$ で除してやればよい。

$$[K_{ij}]\{y_j\} = \left\{ \frac{W_i}{m_i} \right\} = \left[\frac{T_{ij}}{m_i} \right] \{y_j\}$$

故に, マトリックス $[K]$ の各要素は,

$$K_{ij} = \frac{T_{ij}}{m_i} \quad (60)$$

となる。

燃料集合体の変形曲率により被覆管に生ずる曲げ応力は (52) 式より, 任意の点での曲げモーメントが計算できるので, (34) 式において,

$$E \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \cdot \frac{D}{2} = \frac{M}{I} \cdot \frac{D}{2} \quad (61)$$

と置き換えて計算できる。

6.2.3 案内ばねの取扱い

6.1.3 項~6.2.2 項では, 案内ばねのたわみが考慮されておらず, 燃料集合体の上・下端での変位は常にゼロとしている。これは, 運動方程式の解法が複雑になることを防ぐためと, 案内ばねが比較的弱いものであること, 系全体から見ると, その影響が極めて小さいという理由による。

本計算コードでは案内ばねの効果を次のモデルで考慮する。(図-6.5 参照)

- 1) 燃料集合体を 1 質点と考え, 燃料集合体全体の変位量を計算する。
- 2) 燃料集合体と圧力管は, ばねと衝撃吸収要素で連結されているものとする。
- 3) 案内ばねには初期たわみがあり, 常に圧縮力と

して作用する。

このモデルで計算される燃料集合体の変位は、各スペーサ位置での燃料集合体のたわみ量と合成され、スペーサと圧力管との衝突の判定に利用される。

燃料集合体の運動方程式は 図-6.5 より、次のようになる。

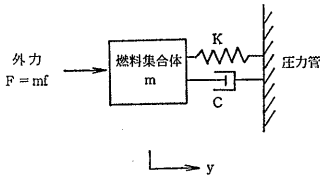


図-6.5 案内ばねモデル

$$m\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = ma \quad (62)$$

ここで、

m ; 燃料集合体の質量

a ; 外力による加速度

C ; 減衰係数

K ; ばね定数 ($=2k_0$)

案内ばねは上・下タイププレートについており、案内ばねのばね定数を k_0 とすると $K=2k_0$ となる。案内ばねの最大変位はスペーサと圧力管の隙間と同一値とする。

(62) 式を 6.2.1 項と同様の方法で解くと、次の様になる。

1) 初期状態 ($t=\Delta t$)

$$\begin{aligned} & \left(m + \frac{C}{2}\Delta t + \frac{\Delta t^2}{6}K \right) y_2 \\ &= \frac{m\Delta t^2}{6} \cdot a_2 + \left(\frac{m\Delta t^2}{3} + \frac{\Delta t^3}{12}C \right) a_1 \quad (63) \end{aligned}$$

2) 第2タイム・ステップ以後 ($t=n\Delta t, n>1$)

$$\begin{aligned} & \left(m + \frac{C}{2}\Delta t + \frac{\Delta t^2}{6}K \right) y_3 \\ &= \frac{m\Delta t^2}{6} (a_1 + 4a_2 + a_3) \\ &+ \left(2m - \frac{2}{3}\Delta t^2 K \right) y_2 \\ &- \left(m - \frac{C}{2}\Delta t + \frac{\Delta t^2}{6}K \right) y_1 \quad (64) \end{aligned}$$

(63) 式の y_2 , (64) 式の y_3 が求める変位である。

なお、船用炉燃料のように燃料集合体の上・下タイププレート部が格子板で固定される場合には、この計算を省略することになる。

6.3 数値解析

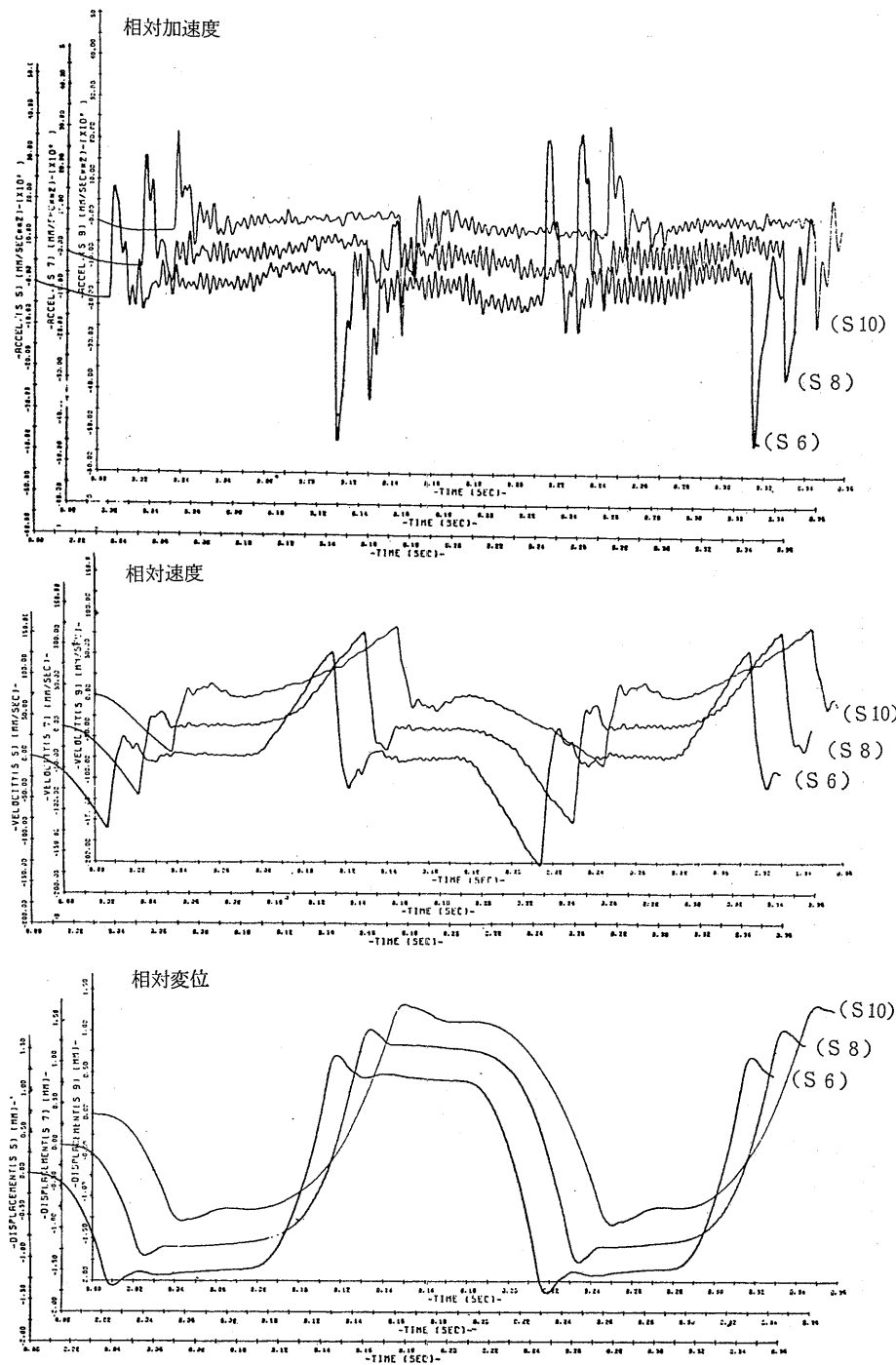
実験により得られたデータ等に基づき、表-6.1 に示

表-6.1 入力データ

	標準燃料 (5F型)	特殊燃料 (4特型)
燃料集合体単位長重量 (kg/mm)	0.05772	0.0340
粘性係数 (kg·sec/mm ²)	1×10^{-5}	1×10^{-5}
燃料集合体断面2次 モーメント (mm ²)	0.4×10^6	0.10×10^6
ヤング率 (kg/mm ²)	7,800	7,800
スペーサ反発係数	0.40	0.52
圧力管とスペーサの 隙間 (mm)	1.10	0.90
燃料集合体数	1	1
燃料集合体上下支点 間長 (mm)	4,237	4,208.5
スペーサの数	12	12
案内ばねのばね定数 (kg/mm)	6.5	6.5
燃料集合体固有振動数 実測値 (Hz)	2.48	2.70
スペーサ位置 (mm)		
S 1	482.0	552.0
S 2	882.0	972.2
S 3	1,282.0	1,312.0
S 4	1,612.0	1,572.0
S 5	1,872.0	1,832.0
S 6	2,132.0	2,092.0
S 7	2,392.0	2,352.0
S 8	2,652.0	2,612.0
S 9	2,912.0	2,872.0
S 10	3,172.0	3,132.0
S 11	3,502.0	3,472.0
S 12	3,852.0	3,812.0
スペーサのばね定数 (kg)		
0 (mm)	0	0
0.5	120	30
1.0	280	70
1.5	480	120
2.0	760	190
2.5	1,240	310
3.0	2,320	580
タイムメッシュ (sec)	1×10^{-4} (5×10^{-3})	1×10^{-4} (5×10^{-3})

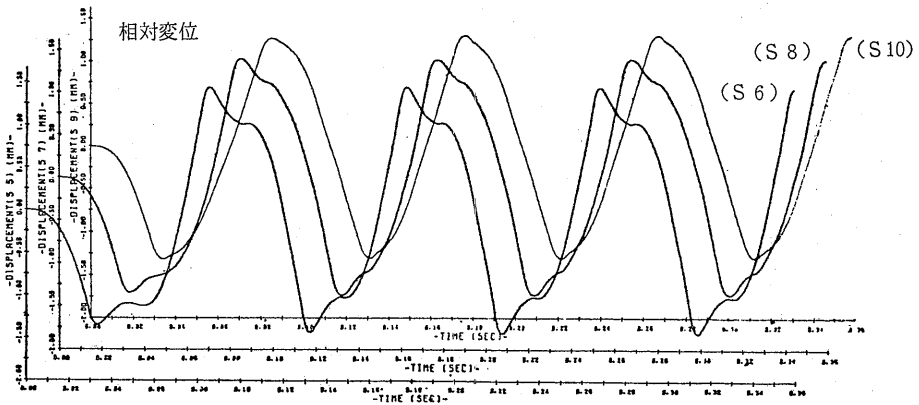
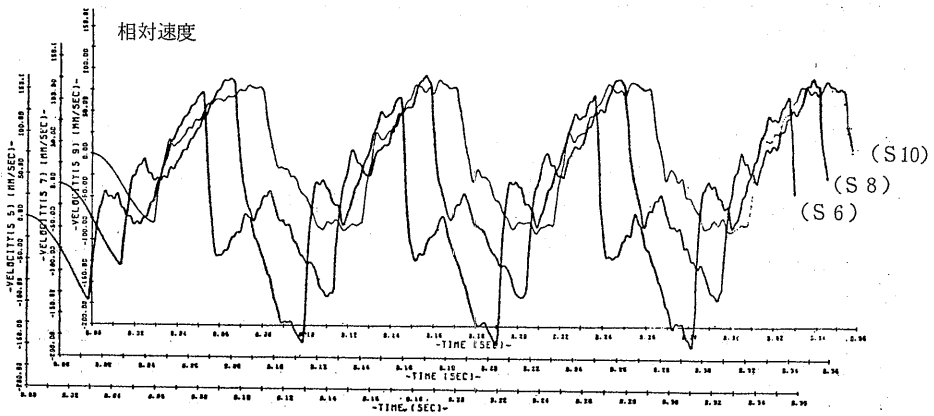
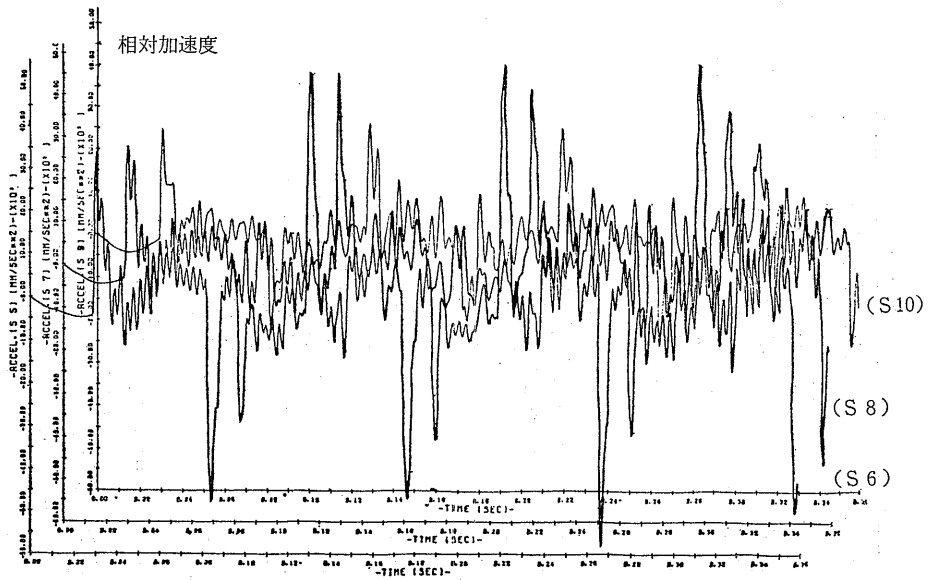
表-6.2 計算のケース (地震波)

入力波	振動方向	質点番号
TAFT	M24-X	50
	M18-Y	50
	M24-X	56
EL CENTRO	M18-Y	56
	M24-X	50
	M18-Y	50
	M24-X	56
	M18-Y	56



(T) 5F型 5Hz 0.6G

図-6.6 正弦波の計算例



(2) 5F型 11Hz 0.6G
 図-6.6 正弦波の計算例

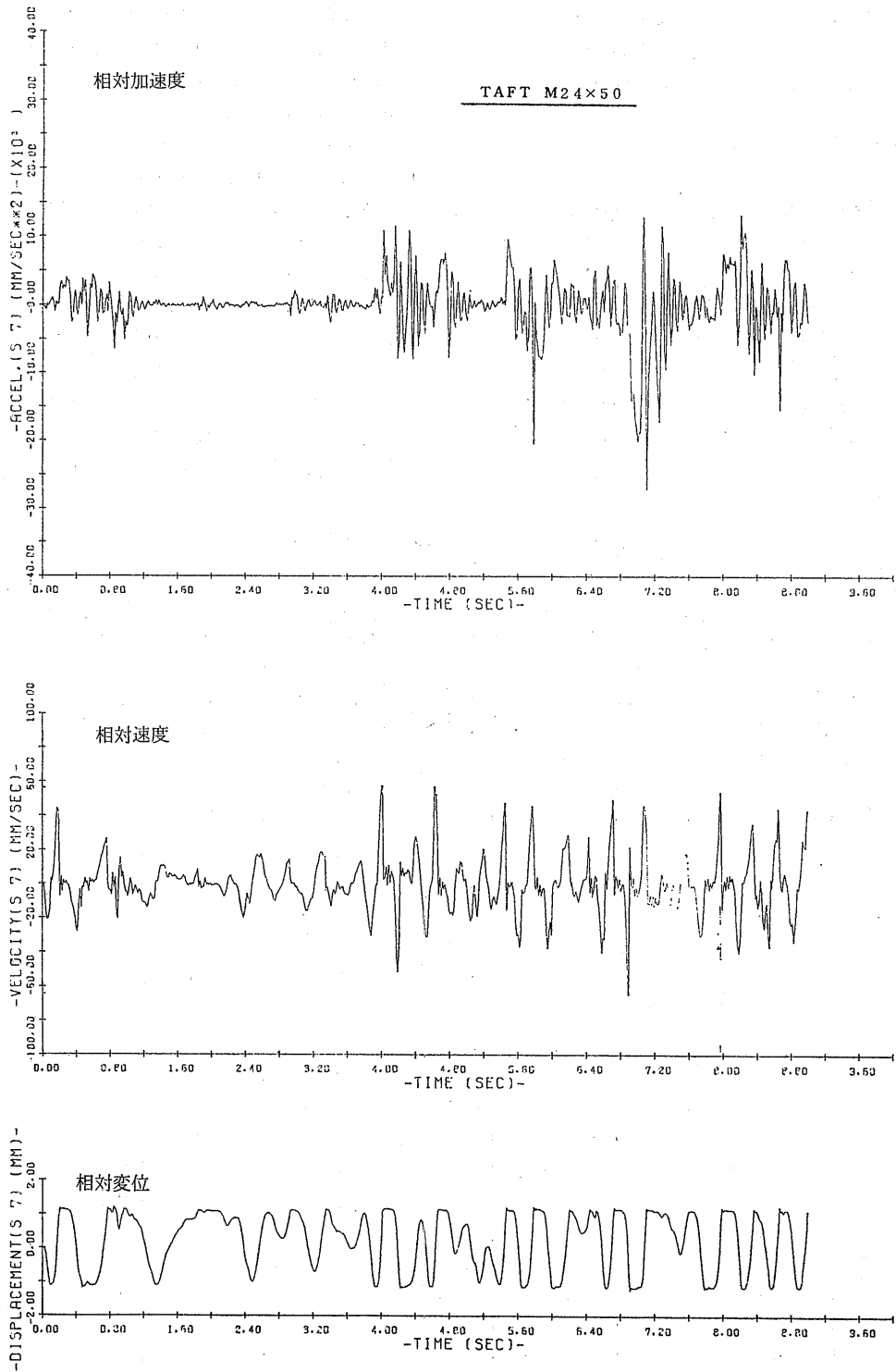


図-6.7 地震波の計算例

す入力データのもとでの数値計算を行った。

まず、解析計算コードの検証のため、表-5.1に示す各ケースについての計算を行い、実験値との比較検討を行った。

地震波についての計算は、表-6.2に示す各ケースについて実施した。

これらの地震波は燃料集合体の上下端位置での圧力管の時刻歴加速度である。それは原子炉本体を60箇の質点と弾性支持梁で構成した質点集中質量モデルで近似し、このモデルに建屋基礎で最大0.25Gの地震波が加わった場合の応答波形である。

ここで、振動方向Xはプラントの南北方向、Yは東西方向の振動波形を表わし、質点番号50は燃料集合体の上端位置の圧力管、56は燃料集合体の下端位置の圧力管を表わす。

計算結果の一例を図-6.6および図-6.7に示す。

図-6.6はS6, S8, S10点の相対変位、相対速度、相対加速度を示したものである。(1)のケースではまずS6点で燃料集合体が圧力管に衝突し、最大変位量は約1.4mmに達する(スペーサばねのたわみ量約0.3mm)。S8, S10点での最大変位量は、約1.35mmおよび約1.3mmである。発生する相対加速度値も同様の傾向を示している。衝突後の相対変位が平坦な(丘または谷の)部分は燃料集合体が圧力管にもたれかかっている状態に対応している。この部分のスペーサばねのたわみ量は各点とも0.1mm程度であり、その押し付け力は8kg前後に相当する。

相対加速度の波形に含まれている高い振動数の小さな波は、軸方向メッシュ分割点の質量と剛性で構成される系の振動であって、5F型で約330Hz、4特型で

表-6.3 S6, S8, S10点の相対加速度

地震波名	S6		S8		S10		地震波名	S6		S8		S10	
	TIME (sec)	ACCEL (G)	TIME (sec)	ACCEL (G)	TIME (sec)	ACCEL (G)		TIME (sec)	ACCEL (G)	TIME (sec)	ACCEL (G)	TIME (sec)	ACCEL (G)
TAFT ATR M24X-50	4.1	1.6	3.7	1.3	4.4	1.3	TAFT ATR M24X-56	4.0	1.4	4.8	-1.4	5.5	1.2
	4.6	1.4	4.6	-1.1	5.5	0.9		5.7	-1.6	5.7	-1.7	5.7	-1.1
	5.8	2.6	6.5	-1.8	5.6	-1.3		5.8	-1.4	6.6	1.5	6.6	1.7
	6.6	1.4	6.7	-1.1	6.5	1.2		6.1	-1.5	6.7	1.5	7.0	1.0
	6.7	-1.2	6.8	1.6	7.5	-1.1		6.6	1.5	6.9	1.6	7.5	-0.7
	7.0	-1.0	7.6	1.3	7.6	0.8		6.9	1.5	7.9	-1.3	7.9	-0.8
TAFT ATR M18Y-50	3.7	1.2	3.7	1.3	4.7	1.7	TAFT ATR M18Y-56	4.1	1.3	4.1	1.4	4.2	-0.6
	4.1	1.5	4.1	1.5	5.9	1.6		4.6	-1.3	6.7	1.6	6.5	0.9
	5.6	-1.8	5.3	-1.5	6.4	1.8		6.7	1.5	6.8	1.5	6.8	1.1
	6.7	1.2	6.6	-1.6	6.6	-1.1		6.8	1.7	6.8	-1.5	7.2	0.8
	6.7	-1.8	6.7	1.1	7.7	-1.0		6.8	-1.3	7.0	1.5	7.7	-0.7
	6.9	-2.3	6.9	-2.8	7.9	1.7		8.6	-1.4	8.2	-1.1	7.9	0.8
El-Centro ATR M24X-50	2.3	3.0	2.2	-1.9	2.2	-1.1	El-Centro ATR M24X-56	2.3	-1.2	2.2	-1.8	1.4	0.8
	2.6	1.9	2.4	2.8	2.5	1.1		2.4	1.0	2.4	-1.3	2.2	-1.4
	2.6	-2.0	2.6	-1.8	2.8	-0.6		2.5	-1.2	2.5	1.6	2.5	-0.8
	2.7	-1.4	2.7	2.0	3.3	0.8		2.6	1.3	2.6	1.5	2.6	0.7
	2.9	1.1	2.7	-1.5	4.3	0.9		2.7	1.5	2.7	1.0	4.3	0.9
	4.5	-1.8	2.9	1.3	5.1	-0.8		4.5	-1.7	5.1	-1.0	5.1	-0.6
El-Centro ATR M18Y-50	2.2	-2.0	2.0	1.4	1.4	-0.6	El-Centro ATR M18Y-56	2.3	1.6	1.9	1.3	2.2	0.7
	2.4	1.1	2.2	-1.2	2.0	0.5		2.4	-1.2	2.3	1.3	2.5	-0.6
	2.5	1.0	2.4	-1.4	2.2	-0.8		2.5	1.7	2.5	-1.9	2.8	0.6
	2.5	-1.6	2.5	1.0	2.5	-0.8		2.5	-1.5	2.5	1.8	4.5	0.8
	3.4	0.9	2.7	1.0	2.7	0.7		4.5	-1.0	4.3	1.1	5.1	-0.6
	4.5	-2.2	3.3	0.9	4.3	0.5		5.2	1.0	4.5	-1.1	8.9	-0.6

約 240 Hz である。

図-6.7 は TAFT 波についての S6 点の時刻歴応答を示したものである。9 秒間の地震波のうち、初めの 3.6 秒が予震の部分である。燃料集合体は初めの 2.3 秒間は中立の位置にあり、S6 点は圧力管に接触しない。本震の部分では圧力管の管壁から管壁への相対移動を繰り返す、中立の位置に留まることは殆んどない。相対加速度は 5.8 秒後に 2.5 G に達している。

各地震波について、大きな相対加速度の発生する時間とその大きさを整理した結果を表-6.3 に示す。最大値は S6 点で 3.0 G (EL CENTRO M24X-50) S8 点 2.8 G (TAFT M18Y-50) S10 点 1.8 G (TAFT M18Y-50) である。

7. 検 討

7.1 実験値と計算値の比較

7.1.1 正弦波入力の場合

正弦波による振動実験の結果(点線)と相対変位の計算値(実線)の比較を図-7.1 に示す。解析計算コードによる計算は、圧力管の中心位置で静止状態にある燃料集合体に正弦波状の振動外力が圧力管から加えられた場合の時刻歴応答を計算するものであり、2 サイクル目以後はほぼ定常的な振動波形となる。

点線は計算値との差が極力小さくなるような位置に実験値を重ね合わせたものである。

5 Hz, 0.6 G のケースでは両波形が極めてよく一致している。燃料集合体の圧力管への衝突によるピーク値は実験値より僅かに高いが、その後には生ずる減衰振動波形、衝突壁面から反対側の壁面への移動の様子など、極めてよい一致を示している。

7 Hz, 0.6 G のケースでは (+) 側の両波形が比較的よい一致を示している。点線の (-) 側では圧力管への最初の衝突が最大変位量より小さな位置で生じている。これは最初の衝突に先立ち、他のスペーサが圧力管に衝突した場合、あるいは、圧力管の斜め方向への衝突に起因するものであり、偏心による後者の効果は計算に組込まれていない。7 Hz, 0.6 G のこのケースでは、S6 点の斜め方向への衝突と S7 点での圧力管への衝突がほぼ同時に同程度の衝撃加速度値で生じており、実験値は両者の影響を受けている。

9 Hz, 0.3 G のケースは最も近似度の悪いケースである。この振動数では燃料集合体を含む圧力管の共振と燃料集合体の 3 次共振の影響を受け、0.6 G の実験ができなかった。

このケースでは相対変位の最大値が S10 点で生じ、S6 点の相対変位は圧力管への最初の衝突より次のピーク値の方が大きい。

図-7.2 は 11 Hz, 0.6 G における S6, S8, S10 点の各波形を比較したものである。S6 点の相対変位は最大変位量に差があるが、波形は全般によく一致している。S8 点では初めの衝突によるピーク値は実験値とよく一致している。次のピークは実験値で顕著なものに対し、計算値では特に高いピークがなく、圧力管にもたれかかる形で移動している。S10 点での両波形は極めてよく一致している。

図-7.2(2) の相対速度は S6 点で実験値と計算値がほぼ一致している。S8, S10 点では計算値が僅かに大きな値を示すが、その波形は全般によく近似波形となっている。(注、S6 点の相対速度は縦軸が他の 2/3 に縮尺されている。)

図-7.2(3) の相対加速度は実験値が比較的滑らかな曲線を描いているのに対し、計算値は高い振動数成分を含む凹凸の激しい波形となっている。その原因は軸方向メッシュ分割点の質量と剛性で構成される系の振動によるもので、メッシュ分割数の拡大あるいは減衰項の導入により平滑化が可能である。この高い周波数成分を取り除いて得られる波形は実験値に近いものになることが同図から推測される。

相対加速度の最大値は実験値より高い値または同等の値を示しているが、これもメッシュ分割点の振動成分が除去されることにより、更に実験値に近づくことが予想される。(注、S10 点の相対加速度は縦軸が他の倍に拡大されている。)

加振振幅が小さく、燃料集合体が圧力管内で“おどる”状態の場合には周期性に欠ける。23 Hz, 0.6 G の実験値は相対変位が 23 Hz で管壁に衝突する振動を繰り返している。計算値にも 23 Hz の脈動が含まれるが、燃料集合体は 4 倍の周期で圧力管内を移動している。図-7.3 参照。

また、振動数 23 Hz は圧力管の共振点であり、S6 PT~S8PT の点では加振振幅の 4 倍前後の振幅に達している。(表-5.3 参照)。解析モデルでは、圧力管を剛体近似しており、その差は大きい。

表-7.1 に実験値と計算値の比較を示す。同表において、 $\delta=1.1\text{mm}$ および $\delta=0.9\text{mm}$ の欄は実験体系についての計算値であり、 $\delta=0.55\text{mm}$ 計算値の欄はふげん炉の公称値に対するものである。

5F 型の相対変位および相対加速度について見ると、

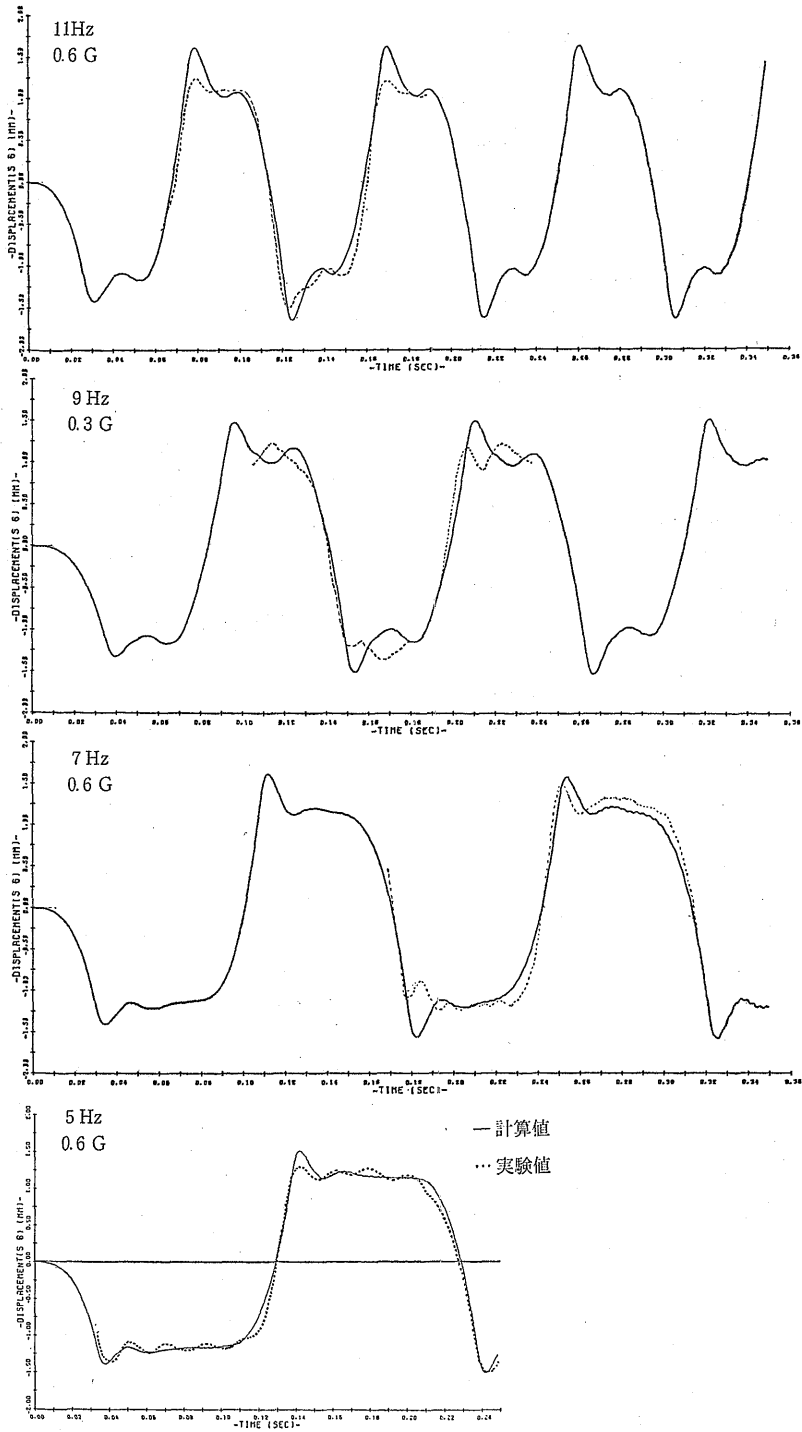


図-7.1 相対変位の実験値と計算値の比較 (5F型 S6)

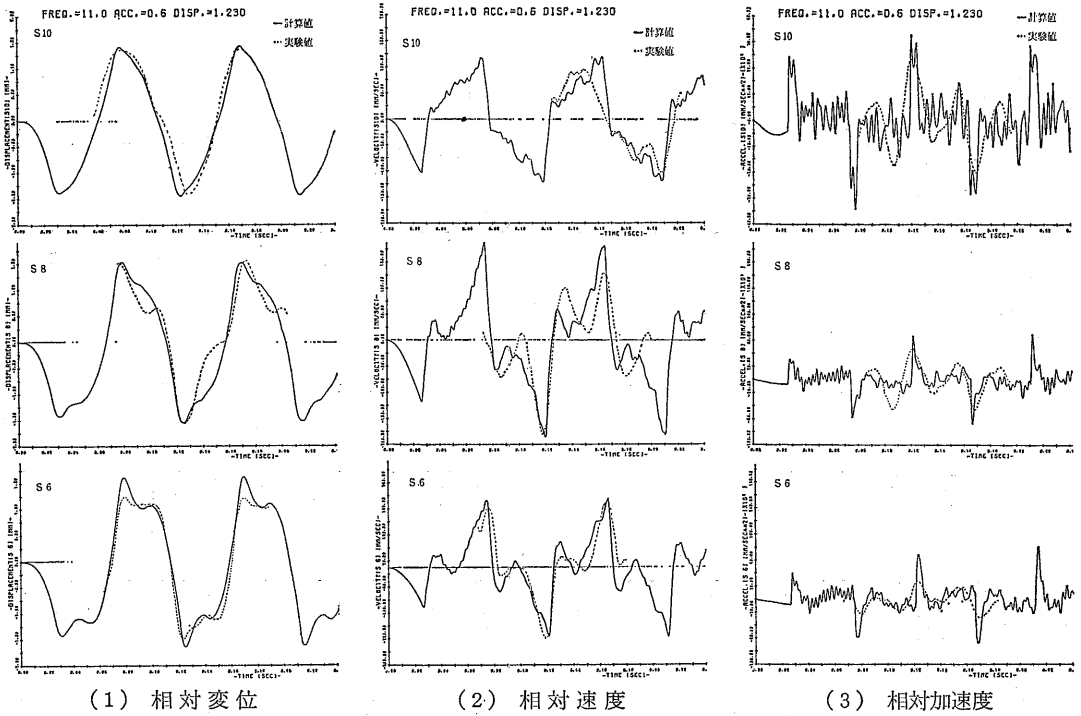


図-7.2 実験値と計算値の比較 (11 Hz 0.6 G)

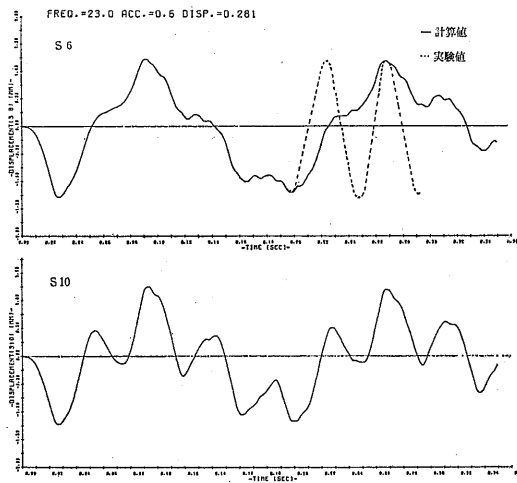


図-7.3 23 Hz 0.6 G の相対変位 (5F型)

次の5ケースで計算値が実験値より小さな値を示している。

- 相対変位 7.0 Hz, 0.3 G, S8 (-0.04 mm)
- 7.0 Hz, 0.3 G, S10 (-0.09 mm)
- 9.0 Hz, 0.3 G, S10 (-0.13 mm)

11 Hz, 0.6 G, S8 (-0.05 mm)
相対加速度 23 Hz, 0.6 G, S6

このうち相対変位について見ると、いずれも S10 および S8 であり、最も振幅の大きい S6 では、常に計算値の方が大きな値または等しい値を得ている。また、7 Hz, 0.3 G, S8 および 11 Hz, 0.6 G, S8 での差 -0.04 mm および -0.05 mm は、寸法精度の誤差範囲内にある。従って、相対変位では S10 での 7 Hz, 0.3 G の -0.09 mm および 9 Hz, 0.3 G の -0.13 mm の2ケースで明らかに計算値が実験値を下まわっていることになる。

相対加速度について見ると、計算値が実験値より小さいのは 23 Hz の1ケースである。この場合の計算値は実験値の 0.76 倍である。これは、前述の如く、圧力管の共振に起因するものであり、その影響については検討を要する問題である。

以上、正弦波による振動実験データとの比較により、次の結果を得た。

- (1) 解析計算値は、相対変位、相対速度、相対加速度ともにより近似波形を示す。
- (2) 相対変位および相対加速度の計算値は、耐震

表-7.1 実験値と計算値の比較(正弦波)

種類	振動数 (Hz)	加速度 (G)	計測点	実験値			$\delta=1.1$ $\delta=0.9$ mm 計算値			$\delta=0.55$ mm 計算値			
				相対変位	相対速度	相対加速度 ($\times 10^8$)	相対変位	相対速度	相対加速度 ($\times 10^8$)	相対変位	相対速度	相対加速度 ($\times 10^8$)	
				(mm)	(mm/sec)	(mm/sec ²)	(mm)	(mm/sec)	(mm/sec ²)	(mm)	(mm/sec)	(mm/sec ²)	
5F型 ($\delta=1.1$ mm)	5.0	0.2	S 6	1.35	158.8	19.6	1.36	95.0	33.8	1.71	89.0		
	7.0	0.3	S 6	1.38		28.3	1.38	121.3		0.86	95.0	40.5	
			S 8	1.39	196.0	28.6	1.35	125.0	78.0	0.71	89.0	41.5	
			S10	1.38	176.0	21.7	1.29	112.0	71.0	0.70	61.0	27.6	
	9.0	0.6	S 6	1.36	206.0	25.0	1.59	192.0	80.0	0.81	206.0		
			0.3	S 6	1.30	158.8	20.6	1.49	177.5	63.5	0.77	112.5	51.0
				S 8	1.40		35.8	1.41	141.3	49.5	0.71	89.0	42.0
	11.0	0.6	S10	1.34	133.8	22.2	1.21	75.0	26.3	0.69	63.0	24.8	
			S 6	1.38	190.0	27.5	1.63	214.0	86.0	0.88	194.0		
			S 8	1.27									
	13.0	0.6	S 8	1.56		22.0	1.51	190.0	69.0	0.74	140.0		
			S10	1.43	115.0	10.5	1.43	120.0	36.5	0.78	111.3		
			S 6	1.40	151.3	22.8	1.64	214.0	86.3	0.81	122.5		
	23.0	0.6	S 8	1.31	122.5	25.8	1.52	200.0	67.5	0.79	135.0		
			S10	1.28	137.5	18.2	1.44	142.5	54.5	0.78	103.8		
S 6			1.05	142.5	42.1	1.22	78.0	32.0	0.81	224.0			
			S 8	1.21	119.3	22.0	1.21	95.0	25.2	0.82	236.0		
			S10				1.20	120.0	44.5	0.86	194.0		
4特型 ($\delta=0.9$ mm)	7.1	0.3	S 6	1.00	95.0	11.6	1.18	117.5	41.0	0.82	87.0	25.2	
			S10	0.93	76.0	11.8	1.04	67.0	28.0	0.74	59.0	9.6	
	0.6	S 6	0.99	123.8	41.5	1.36	202.0	88.0	0.98	167.5	67.0		
		S10	0.97	112.0	15.5	1.19	109.0	32.8	0.80	81.0	18.4		
	9.0	0.3	S 6	0.92	102.0	19.4	1.21	133.8	44.0	0.84	95.0	25.5	
			S10	0.88	85.0	16.9	1.07	65.0	20.0	0.73	56.0	12.3	
	0.6	S 6	1.02	128.8	24.4	1.33	175.0	62.0	0.96	143.8	47.5		
		S10	0.91	110.0	22.0	1.21	115.0	31.8	0.86	97.0	21.2		
	11.0	0.3	S 6	0.78	55.5	3.6	1.26	152.5	45.5	0.84	98.0	32.0	
			S10	0.81	89.0	18.4	1.05	85.0	20.2	0.72	74.0	15.3	
	0.6	S 6	1.01	131.3	28.2	1.38	210.0	94.0	0.96	136.3	50.0		
		S10	0.81	105.0	12.3	1.16	95.0	28.8	0.82	81.0	18.6		
	23.0	0.3	S 6	0.73	105.0	20.8	0.95	28.0	5.9	0.63	41.5	10.8	
			S10	0.77	90.0	12.6	0.76	41.5	9.0	0.61	51.0	12.5	
	0.6	S 6	0.84	146.3	24.6	1.04	96.0	72.5	0.65	148.8	80.0		
S10					0.93	102.0	37.5	0.81	150.0	63.0			
0.9	S10	0.54	137.0	19.9	1.15	190.0	64.0	0.98	156.3	59.0			

- 上ほぼ安全側の値を示す。
- (3) 燃料集合体の圧力管への衝突時に生ずる最大変位量は全般に大きな値となる傾向があり、更に、近似精度を高めるためにはスペーサばね等の取扱いに再考を要する。
- (4) 圧力管の共振点の近くでは、圧力管の剛体近似の効果が顕著に表われ、計算値が実験値を下まわるケースがある。

7.1.2 地震波入力の場合

地震波の実験および計算で得られた相対加速度の最大値は、次のとおりである。

計算値	$27.5 \times 10^3 \text{ mm/sec}^2$	TAFT M24X-50 S8
実験値	$21.5 \times 10^3 \text{ mm/sec}^2$	TAFT M18Y-50 S8
"	$(21.0 \times 10^3 \text{ mm/sec}^2)$	TAFT M24X-50 S8)

また、これを地震波別に見ると、計測点 S6, S8, S10 での最大値の大きさと発生点は表-7.2 の通りである。この表から、加速度の最大値が発生する位置について見ると、

- | | |
|------------------------------------|--------|
| (a) 両者が一致するケース | 10 ケース |
| (b) 他に僅かに高い点があるが、
誤差の範囲で一致するケース | 5 ケース |
| (c) 一致しないケース | 1 ケース |
| 計 | 16 ケース |

となり、EL CENTRO M18Y-56 の (+) 側で最大加速度発生点が一致しないことを除くと、よく一致するか、または、それに近い値 ($0.5 \times 10^3 \text{ mm/sec}^2$, 2~3% の相対的大小の差) を示す点であることがわかる。

相対加速度の大きさについてもほぼ同様の結果であり、TAFT M18Y-50 のケースで実験値の方が大きな値を示している以外は、計算値の方が大きい、または等しい値を示している。

表-7.2 相対加速度の最大値の比較 (地震波)

地震波名	方向	計 算 値		実 験 値		計算値 実験値
		位置	加 速 度	位置	加 速 度	
TAFT M24X50	+	S 8	$27.5 \times 10^3 \text{ mm/s}^2$	S 8	$21.0 \times 10^3 \text{ mm/s}^2$	1.31
	-	S 6 S 8	12.5 (12.0)	S 6 S 8	(11.0) 20.0	
TAFT M18Y50	+	S 8	14.5	S 8	17.5	0.70
	-	S 8	15.0	S 8	21.5	
TAFT M24X56	+	S 6 S 8	(17.5) 18.0	S 6 S 8	16.2 (10.5)	1.00
	-	S 6	19.0	S 6	19.0	
TAFT M18Y56	+	S 8	12.5	S 8	10.7	1.32
	-	S 8	18.5	S 8 S10	(13.5) 14.0	
EL CENTRO M24X50	+	S 6	11.0	S 6	14.0	1.23
	-	S 6	23.5	S 6	19.1	
EL CENTRO M18Y50	+	S 8	18.5	S 8 S10	(18.0) 18.5	1.05
	-	S 8	21.5	S 8	20.5	
EL CENTRO M24X56	+	S 6	21.5	S 6	16.5	1.23
	-	S 6 S 8	(12.0) 15.0	S 6	17.5	
EL CENTRO M18Y56	+	S 8	8.5	S 6 S10	15.5 (12.5)	1.03
	-	S 6	16.0	S 6	15.0	
						平均 1.11