

寸法	14 mmφ × 29 mmH
重量	35 g
数量	6 ケ

2) チャージアンプ振動計

型式	I MV VM-4203 型
測定周波数範囲	
加速度	5 Hz~10 kHz
速度	5 Hz~300 Hz
変位	5 Hz~70 Hz
測定範囲	
加速度	0.1~300 G, 8 レンジ
速度	1~3,000 cm/s, 8 レンジ
変位	0.3~100 mm, 6 レンジ
出力	0~5 mA/20 Ω 負荷
数量	6 チャンネル

(2) トラッキング・フィルタおよび位相差計

トラッキング・フィルタは周波数フィルタおよび同期周波数変換器からなり、超低周波掃引発振器（振動試験機）の発振周波数を基本波とし、振動計の出力波形の中から基本周波数成分のみを取り出す周波数分析器である。その主要目は、次のとおりである。

1) フィルタ

周波数範囲	5 Hz~5 kHz
チャンネル数	2 チャンネル
入力電圧	最大 10 V P-P
入力インピーダンス	50 kΩ
帯域幅	5 Hz
出力 DC 出力	最大 5 V 振幅の対数に比例
IF 出力	最大 5 Vrms 30 kHz 位相及び振幅が分析値に比例
出力インピーダンス	1 kΩ
直線性	±1.5 db 以内
雑音	-60 db

2) 同期周波数変換器

周波数範囲	5 Hz~5 kHz
入力電圧	0.1~10 Vrms
出力周波数	30 kHz (5 Hz~5 kHz)
出力電圧	5 Vrms
安定度	±1×10 ⁻⁵

製作社 I MV 社

位相差計はトラッキング・フィルタからの2個の変調出力より、その位相差を求め指示記録するためのもので、その主要目は、次のとおりである。

周波数範囲	5 Hz~30 kHz
入力電圧	5 mV~10 V
精度	±2° 以内
出力電圧	±3 V (指示計フルスケール時)
出力インピーダンス	10 kΩ
入力インピーダンス	100 kΩ
指示	0~±180° } 2レンジ切換 0~360° }
製作社	I MV 社

(3) 指示・記録計類

計測値の指示・記録および計測値の較正のため、筐体には次の機器が組込まれている。

X-Y レコーダ	2 ペン 横河 3078-01 型
ペン書きオシログラフ	6 ペン 三栄測器 レクチホリ
シンクロスコープ	2 現象 岩通 SS-5157M 型
デジタル電圧計	積分型 横河 2805 型 直流電圧ユニット 横河 2832 型 交流電圧ユニット 横河 2835 型
周波数カウンタ	岩通 FC-5131 型

3.2.2 非接触型振動変位計

圧力管内での燃料集合体の変位量「相対変位」を計測するため、KAMAN 社製非接触型振動変位計を用いた。この変位計は渦電流を利用し、ターゲットまでの距離を検出する非接触型のピックアップと、その電気出力を mm 単位の距離に変換し、指示する変位計からなっている。その主要目は、以下のとおりである。

(1) 構成

ピックアップ	1 ケ
前置増幅器	1 台
変位指示計	1 台

(2) 仕様

- 1) ピックアップおよび前置増幅器

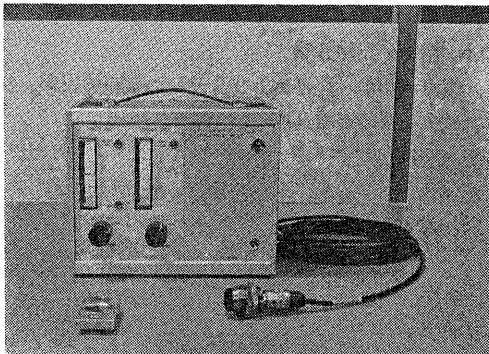
型式 KAMAN 社
MODEL KD-2300-2S

直線最大変位 2.5mm
測定最大変位 2mm (±1mm)
直線性 0.5%/F.S. 以内
再現性および分離能 約 0.01%/F.S.

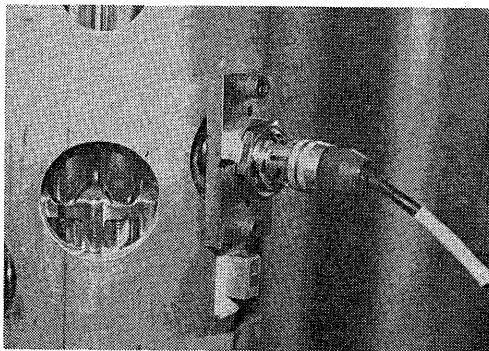
2) 変位指示計
動的変位計
測定範囲 0~±1mm
レンジ ±10, ±30, ±100, ±300, ±1,000 μF.S.

周波数範囲 5Hz~10kHz
出力 ±1V/F.S. または 5mA/F.S.
カットオフ周波数 5Hz H.P.F.

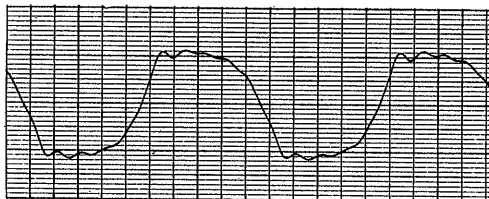
静的変位計
測定範囲 0~±1mm
レンジ ±10, ±30, ±100, ±300, ±1,000 μF.S.
出力 ±1V/F.S. または 5mA/F.S.
カットオフ周波数 5Hz L.P.F.



非接触型振動変位計



ピックアップの圧力管への取付け状況 (下は加速度計ピックアップ)



相対変位記録例

写真-3.8 非接触型振動変位計

KAMAN 社製の変位計はデュアルタイプで、主要目に示す如く、被測定物が平板の場合に極めてよい直線性が得られるが、燃料集合体のように複雑な形状の被測定物の場合にはその直線性が期待できない。このような場合、被測定物と検出器の距離に対する出力電圧の関係を実測し、それを校正曲線として測定値に補正を加える必要がある。

校正は非接触型振動変位計を圧力管に取付け、圧力管に設けた孔を利用して外部から燃料集合体の位置を変化させ、両者間の距離と変位計出力電圧の関係ができるだけ直線状になるよう、出力特性を調整し、最終的な校正曲線とする。圧力管と燃料棒の間隔の測定に

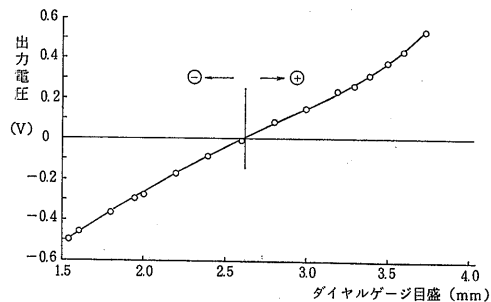
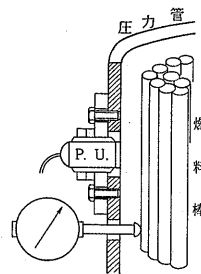
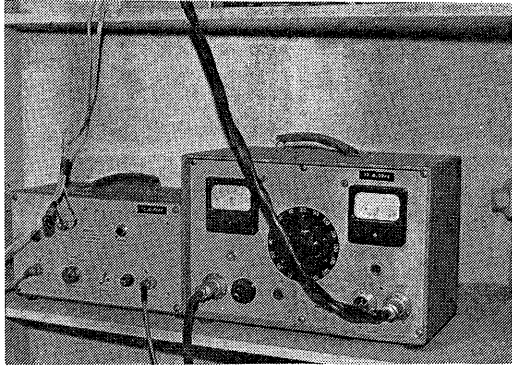


図-3.3 非接触型振動変位計の校正曲線

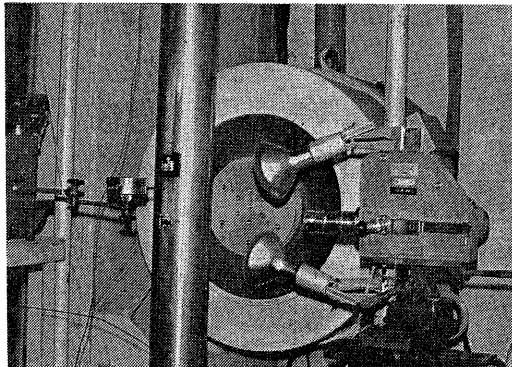
はダイヤルゲージを用いた。得られた較正曲線を 図-3.3 に示す。

3.2.3 高速度シネカメラによる振動変位測定

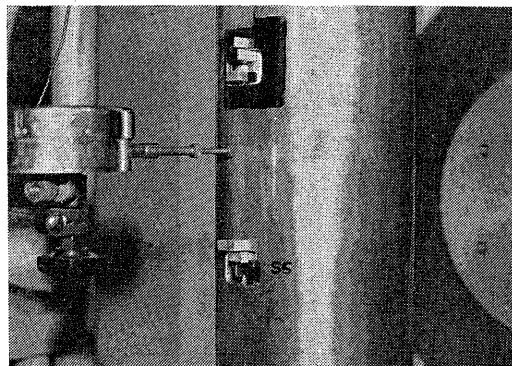
燃料棒および圧力管の振動変位を調べる方法として、JOHN H. WADDEL, INC. の HIGH SPEED CAMERA MODEL 16-1 による高速度シネカメラ撮影を行った。このカメラは 10,000 コマ/秒 の高速度



高速度シネカメラ (電源およびタイマー)



高速度シネカメラによる撮影



被写体部

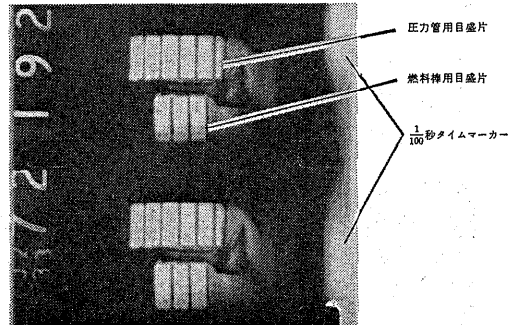
写真-3.9 高速度シネカメラによる振動変位の撮影

撮影が可能なプリズム回転式のカメラで、ASA 400 KODAK 7224 型 16m/m ロールフィルムを使用する。

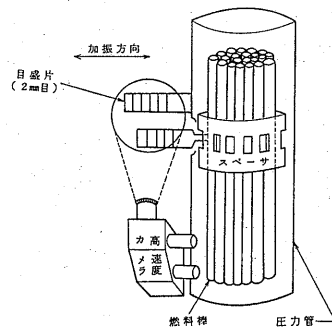
高速度シネカメラによる振動変位の撮影は、S6, S8 および S10 の 3 点について実施した。(図-4.4 参照)。圧力管および燃料棒の振動は、2mm 間隔の目盛をつけた高さ 10mm, 幅 5mm のアルミニウム製目盛片をそれぞれに接着し、その先端部の拡大画面を毎秒約 2,500 コマの速度で、16m/m 100ft フィルムに連続撮影する。

写真-3.9 に高速度シネカメラによる撮影の状況、アルミニウム製目盛片の取付状況および高速度シネカメラ駆動電源部の写真を示す。また、図-3.4 には圧力管および燃料棒の動きを撮影する部分の概念図および高速度シネカメラにより撮影された 16m/m フィルムの拡大写真を示す。同図において、上側の目盛片は圧力管に接着したのもであり、下側の目盛片はスペーサの位置で外周の燃料棒に接着したものである。各目盛片の等間隔の縦線は、2mm 間隔で引いた目盛線である。

写真-3.10 は、16m/m フィルムの画面を拡大し、70 コマ約 0.003 秒間の運動を連続的に示したものである。同図において、①の 10 コマの間では、圧力管



撮影フィルム拡大写真



撮影状況の概念図

図-3.4 被写体部

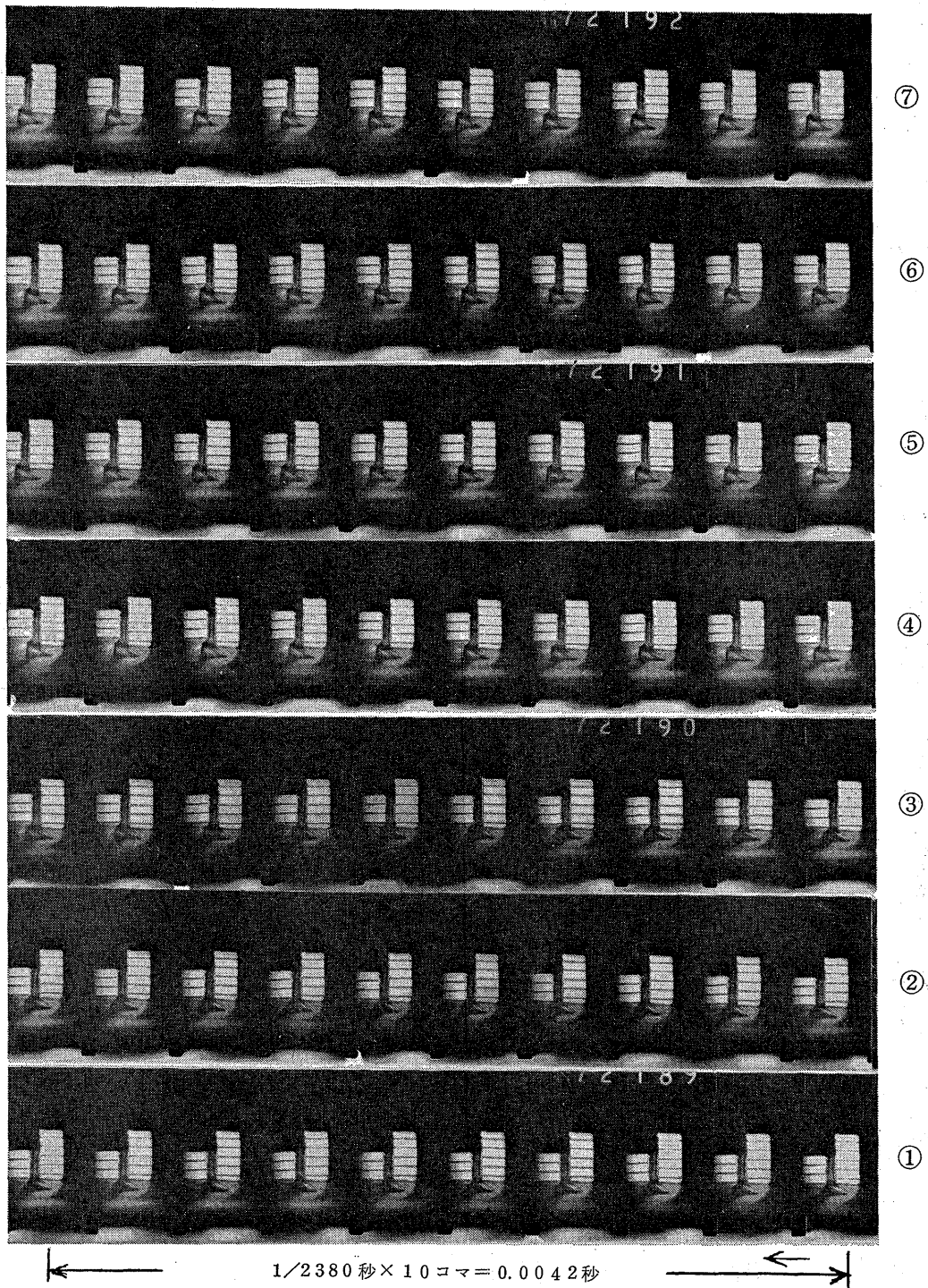


写真-3.10 高速度シネカメラによる撮影フィルム例

と燃料棒は、約 0.1 目盛変位し、約 48mm/sec の相対速度で動いている。最も相対速度の大きな ③ の部分では、10 コマの間で、0.3 目盛移動し、142mm/sec の相対速度となっている。

撮影したフィルムについては、16m/m フィルム解析器で、圧力管、燃料棒の位置を 1 コマ毎に読取り、その実寸への換算、速度と加速度の算出、圧力管と燃料棒の相対変位、相対速度と相対加速度の算出などの処理および作図は電子計算機で行った。

3.3 地震波再現システム

地震波形は EL CENTRO, TAFT の 2 波を用いた。これらはふげん炉本体および建家の耐震計算で得られた各地震波に対する圧力管の応答波形である。本実験では、これらの波形を入力波（以下、地震波と略称する）として加振実験を行う。これらの地震波はふげんの建家基礎に最大値が 0.25G の加速度で加わった場合の原子炉各部の応答を計算したものの一部である。地震波は、X 方向（プラントの南北方向）と Y 方向（プラントの東西方向）の 2 ケース、圧力管の上部と下部の 2 ケース、合計 8 ケースについて計算されている。

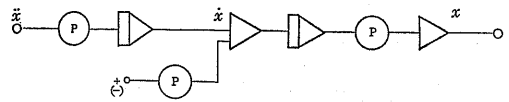
これらのデータには、1/100 秒の時間間隔で 10 秒間の加速度が印字記録されている。この記録を用いて振動試験機を加振するため、次のような信号変換を行った。

- (1) データを制御用小型電子計算機 FACOM-R でアナログ信号に変換し、データレコーダに記録する。
- (2) データレコーダのアナログ信号に含まれる直流成分および極低周波数成分をフィルターで除去する。
- (3) アナログ計算機で加速度信号から変位信号に変換する。
- (4) これを振動試験機の電力増幅器に入力して振動

子を加振する。

振動試験機は動電型の振動試験機で、入力電圧に応じて振動子の位置が変わる電圧 - 位置変換方式であるため、加速度信号を変位信号に変換して入力する必要がある。

加速度信号から変位信号への変換にはアナログ計算機を用いた。演算回路は下図のとおりであり、積分定数 $I_1=I_2=1.0$ である。また、 \ddot{x} の信号に含まれている直流成分が積分されるため、 \dot{x} の点にそれを打ち消すための一定値を入力している。



直流成分除去のために挿入するフィルタのカットオフ周波数は低い程よいが、積分器の制限電圧 (10V)、振動試験機の振幅制限値 $\pm 20\text{mm}$ 内で振動させるため、直流成分を速やかに減衰させる必要がある。これらの条件を満足させる最小周波数として H.P.F.=1.0 Hz を採用した。このフィルタの挿入により、約 2Hz 以下の周波数では位相に差が生ずる。

図-3.5 は地震波再現システムの波形を示したものである。地震波形と出力加速度波形の比較により、直流成分を除去した様子およびフィルタの特性に起因する低い周波数成分の重量されている様子を見ることができる。出力変位波形はアナログコンピュータにより出力波形（加速度）から試験機加振用の変位信号に変換させたものである。

地震波の再現に用いた機器類は、以下のとおりである。

- | | |
|------------|--------------------------------------|
| 1) 制御用計算機 | 富士通、富士電機
FACOM-R
制御出力信号 0~1.0V |
| 2) データレコーダ | TEAC R-511 型 |

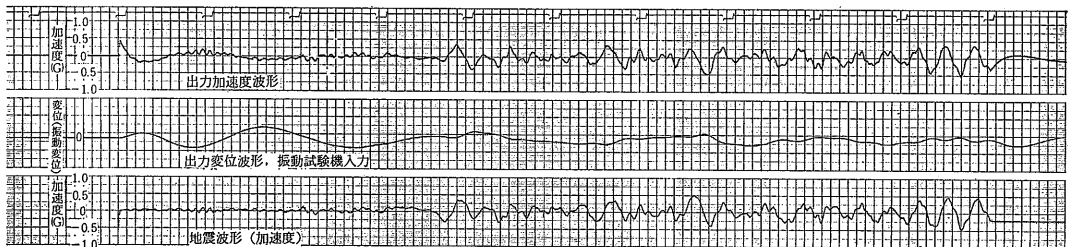


図-3.5 地震波再現システムの出力波形

- 7¹/₂ IPS . . DC~2,000 Hz
45 db
- 3) フィルタ NF 社 FV-602T
H.P.F. 1~16 kHz に改造
L.P.F. 2.5~20 kHz
減衰傾度 42 db/oct
SN 比 70 db
- 4) アナログ計算機 日立 ALS-260 40L
演算電圧 ±10 V
静的確度 0.05% F.S.

写真-3.11 に地震波の再現に用いた機器類（制御用計算機を除く）を示す。

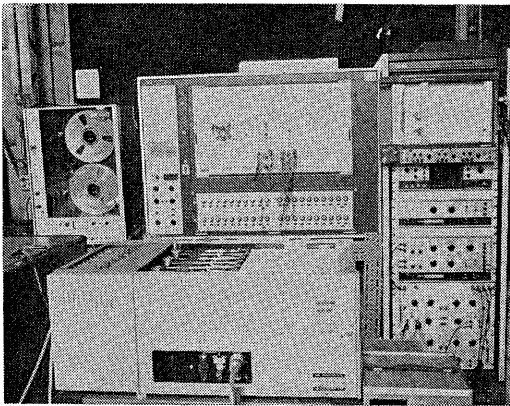


写真-3.11 地震波再現用機器類

4. 燃料集合体の振動特性

ふげん燃料集合体に加わる地震外力は、上・下タイププレートの場合に介して圧力管から伝えられる。スペーサで支持されている各燃料棒の振動系は地震波の周波数成分に対して十分に高い領域（100~500 Hz）にあり、燃料棒がそれに共振するようなことはないと考えてよい。これに対し、燃料集合体の固有振動数はかなり低く（2~3 Hz）、地震波の周波数成分内にある。従って、耐震強度の評価のためには、まず、燃料集合体の振動特性を解明し、その強制外力による圧力管内での挙動を把握する必要がある。

燃料集合体のように、剛性の低い長尺の燃料棒を束ね、多段のスペーサで弾性支持しているバンドルの場合、その剛性および振動特性を解析的に求める手法は、まだ確立されていない。そこで、本研究では計算に必要な系の諸定数を実験的に求め、それを計算モデルのインプット・データとした。以下、その概要につ

いて述べる。

4.1 端末支持条件

空气中に垂直におかれた長い棒が振動している場合、その基礎微分方程式は、

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

で表わされる。

棒上の点 x のたわみ y の一般解は、 $y = y(x) \sin \omega t$ とおき、(1) 式を解いて、

$$y(x) = C_1 \sin \beta x + C_2 \cos \beta x + C_3 \sinh \beta x + C_4 \cosh \beta x \quad (2)$$

となる。ここで、

$C_1 \sim C_4 =$ 端末の条件によって決まる定数、

$$\beta = \left(\frac{\rho A \omega^2}{EI} \right)^{1/4}$$

である。

棒の両端が弾性的に支持されている場合、棒の末端にかかる曲げモーメントは末端のたわみ角に比例すると仮定し、両端の境界条件「端末支持条件」(end fixity) を次式で表わす方法が一般に用いられている^{6),7),9)}。

$$\left(\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} \right)_{x=0,L} \cdot L = \pm \alpha L \left(\frac{\partial y(x,t)}{\partial x} \right)_{x=0,L} \quad (3)$$

支持条件の代表的なケースとして、両端単純支持 (both end support) の場合 $\alpha L = 0$ 、両端固定 (both end clamp) の場合、 $\alpha L = \infty$ となり、弾性支持を含む全ての支持条件を $\alpha L = 0 \sim \infty$ の値で表現することができる。以下、これを支持条件または端末支持条件と呼び、 αL 値で表わすこととする。

振動中の棒のたわみ曲線は、正弦状分布荷重が加わる時の棒のたわみに最も近いことが既に明らかにされている。(付録-2 参照)

そこで、振動している棒のたわみ曲線を正弦状分布荷重が加わる場合のものとして仮想し、そのたわみ曲線および振動数を求めると、次式のようになり、 αL 値が既知であれば、それぞれの値を算出することができる。

$$\frac{EI}{F_0} = \left(\frac{L}{\pi} \right)^4 \sin \frac{\pi}{L} x + \frac{\alpha}{\alpha L + 2} \left(\frac{L}{\pi} \right)^3 x^2 - \frac{\alpha L}{\alpha L + 2} \left(\frac{L}{\pi} \right)^3 x \quad (4)$$

$$\omega_n^2 = \frac{EI}{\rho} \cdot \frac{\frac{1}{2} - \frac{8\alpha L}{\alpha L + 2} \cdot \frac{1}{\pi^2} + \left(\frac{\alpha L}{\alpha L + 2} \right)^2 \frac{4}{\pi^2}}{\left(\frac{L}{\pi} \right)^4 \left\{ \frac{1}{2} - \frac{8\alpha L}{\alpha L + 2} \cdot \frac{1}{\pi^2} + \left(\frac{\alpha L}{\alpha L + 2} \right)^2 \frac{\pi^2}{30} \right\}} \quad (5)$$

しかし、任意の構造物について、その αL 値を解析的に求める手法は、まだ確立されていない。

αL 値を実験的に求めるには、固有振動数の実測値から (6) (7) 式を用いて算出するのが一般的である。両式から得られる αL と βL の関係を 図-4.1 に示す。

$$\frac{\beta L}{2} = \frac{\omega_n^{1/2}}{2 \left(\frac{EI}{\rho AL^4} \right)^{1/4}} \quad (6)$$

$$\alpha L = \frac{-2\beta L}{\tan \frac{\beta L}{2} + \tanh \frac{\beta L}{2}} \quad (7)$$

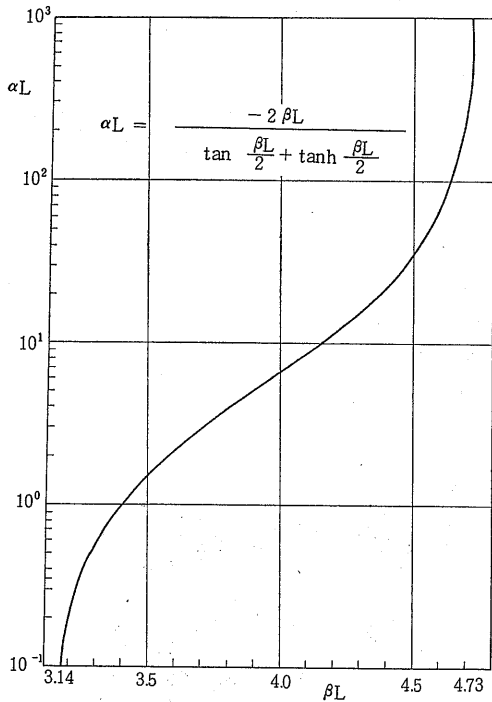


図-4.1 αL と βL の関係

4.2 節で後述する如く、燃料集合体の自由振動の振動数 ($\omega_n/2\pi$) は振幅の増加に伴って小さくなる。それが支持条件 αL 値の変化に起因するものか剛性 EI に起因するものを明らかにする必要がある。

スペーサとタイプレートにより、軸方向の移動を許容しながら相互間の間隔を拘束する形で束ねられている燃料集合体の場合、その断面二次モーメントを解析的に算出することができない。それ故 (6) 式の未知数が 2 ケとなり、固有振動数の実測値から αL 値を求めることができない。そこで、本研究においては中央集中荷重による燃料集合体のたわみ、曲げ応力と αL 値

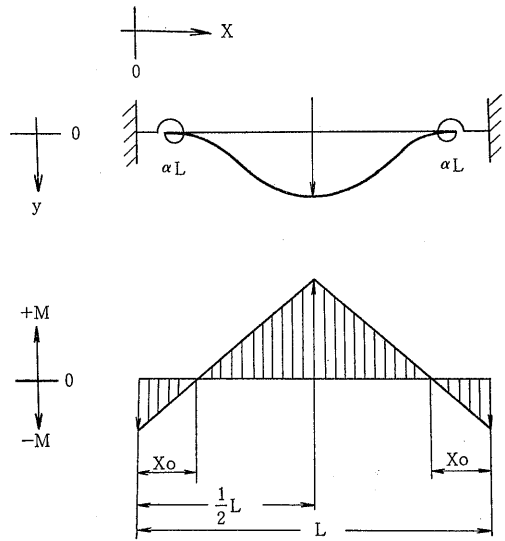


図-4.2 弾性支持棒の曲げモーメント

との関係を導出し、静荷重実験により、その αL 値を求めた。

いま、図-4.2 のように中央集中荷重の作用する弾性支持棒を考えてみる。

$$0 \leq x \leq 1/2L$$

において、

棒のたわみは、

$$\frac{EI}{F} = -\frac{x^3}{12} + \frac{\alpha L}{\alpha L + 2} \cdot \frac{L}{16} x^2 + \frac{1}{\alpha L + 2} \cdot \frac{L^2}{8} x \quad (8)$$

棒の曲げ応力は、

$$\frac{EI}{F} \left(\frac{d^2y}{dx^2} \right) = \frac{\alpha L}{\alpha L + 8} \cdot \frac{L}{8} - \frac{x}{2} \quad (9)$$

で表わされる。その最大曲げ応力は $x=1/2L$ の点で生じ、

$$\frac{EI}{F} \left(\frac{d^2y}{dx^2} \right)_{\max} = \frac{L}{8} \left(2 - \frac{\alpha L}{\alpha L + 2} \right) \quad (10)$$

となる。

支点間距離 L と、 $(d^2y/dx^2)=0$ となる点までの距離 x_0 の比を x_0/L とすると、

$$\frac{x_0}{L} = \frac{\alpha L}{4\alpha L + 8} \quad (11)$$

となり、 x_0/L は αL のみの関数となる。その関係を 図-4.3 に示す。

αL 値が棒の末端にかかる曲げモーメントと傾斜角により定義される値であることから、棒に加わる荷重の分布状態により αL 値が異なる可能性がある。そこ

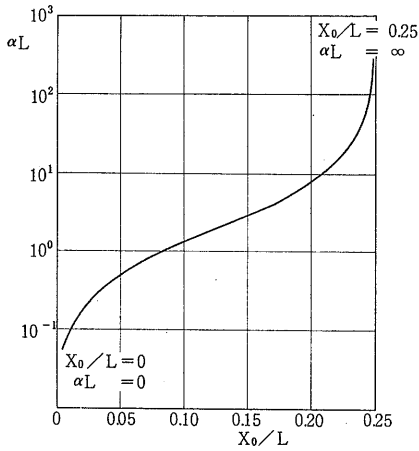


図-4.3 αL と x_0/L の関係

で、棒に加わる応力とたわみの関係および固有振動数の計算値が、振動している棒の場合と仮想した荷重分布の場合とでどのような値となるかを岡崎等の検討結果⁹⁾を利用して比較検討した。その概要を付録-2に示す。この検討により、棒にかかる荷重の分布、棒の変形状態の振動数に及ぼす影響は極めて小さく、本手法により、真の値に極めて近い値が得られることが明らかとなった。

燃料集合体に中央集中荷重を加える実験は、燃料集合体が炉心内にある状態を模擬した支持方法のもとで

行なう必要がある。そこで、上・下タイプレートを短尺の2本の圧力管に挿入し、燃料集合体が鉛直に支持されるよう、両圧力管を架台に固定した。燃料集合体の重量は下部の圧力管に設けたコレット機構で支持した。

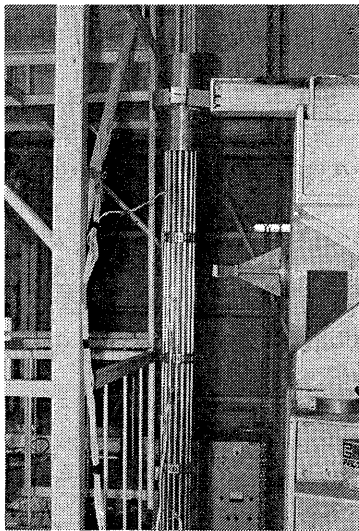
中央集中荷重は燃料集合体の中央部に相当するスペーサに、ばね秤を介して軸に直角な引張荷重として加えた。燃料集合体のたわみ量は荷重点のスペーサについてのみ計測した。

燃料集合体の上部を支持した状態および燃料棒に歪ゲージを貼付した状態を写真-4.1に示す。

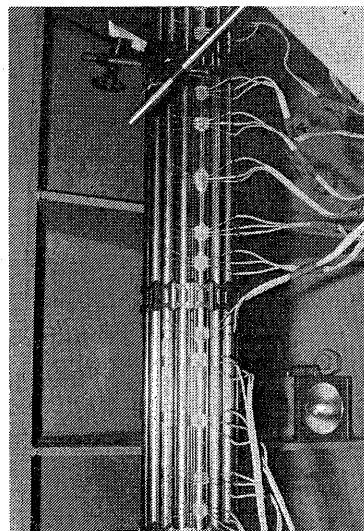
実験により得られた結果の1例を図-4.4に示す。同図において、横軸は燃料集合体の軸方向の距離を表わし、S0~S13は上・下タイプレートおよびスペーサを表わす。 x_0/L 値から(11)式を用いて求めた αL 値は表-4.1の通りである。同表において、全長の欄は燃料集合体を1本の梁または棒と仮想し、案内ばねを支点としてたわむ場合の値である。燃料棒長の欄は、上・下タイプレート間で燃料棒が傾斜するものとした場合の値である。

以上、燃料集合体の支持条件についての実験および解析を行い、次の事項を明らかにした。

- (1) 圧力管に収められ、案内ばねとコレット機構で支持されている燃料集合体の支持条件が、両端支持・両端固定あるいはこれらの組み合わせ

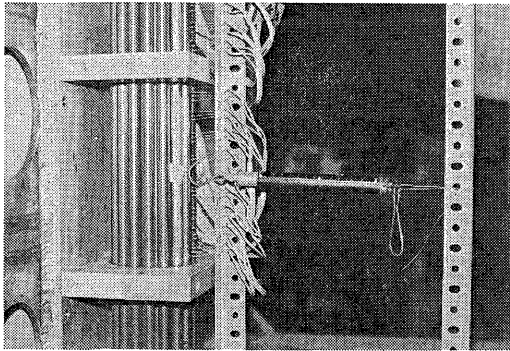


燃料集合体上端部

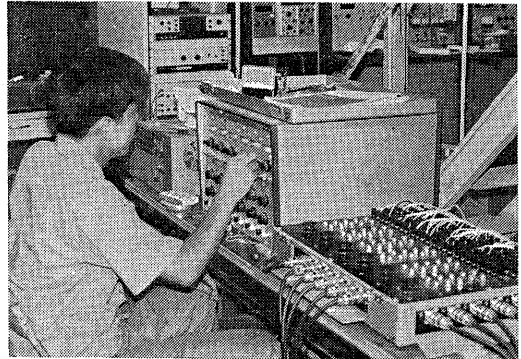


歪ゲージの貼付け状況

写真-4.1 静荷重による歪量の測定
(1) 燃料集合体



燃料棒に静荷重を加えている状況



ストレインメータによる歪量の読取り

写真-4.1 静荷重による歪量の測定
(2) 燃料棒

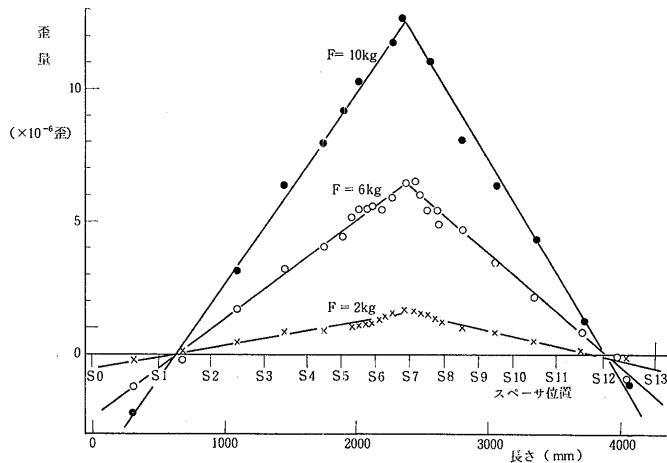


図-4.4 中央集中荷重に対する燃料集合体の歪曲線

表-4.1 αL の実測値

	$L=4,237\text{ mm}$ 案内ばね間長さ	$L=4,070\text{ mm}$ タイプレート間長さ
上端	1.43 (1.10~1.75)	1.52 (1.18~1.85)
下端	3.40 (2.35~4.45)	3.69 (2.60~4.78)
上・下端平均	2.42 (1.75~3.10)	2.60 (1.89~3.32)

(注) カッコ内の数字は実測値の範囲を示す。

せのような単純なものではないことから、弾性支持の概念を取り入れた。

- (2) 静荷重に対する応力分布と支持条件の関係を導出し、燃料集合体の値を求めた。(5F型で $\alpha L \approx 2.42$)
- (3) 燃料集合体の αL 値は、ほぼ一定値であっ

て、荷重の大小による顕著な差異は認められない。

4.2 自由振動特性

一般に粘性減衰および固体摩擦の作用する系の固有振動数および減衰係数は、自由振動の記録波形から近似的に求めることができる。図-4.5 において固有振動数 $f(\omega/2\pi)$ は実線で示す振動波形 ($e^{-\mu t} \sin \omega t$) とその極大値を結ぶ点線 ($e^{-\mu t}$) の接する点の時間間隔から求めることができる。減衰係数 μ (または減衰の速さと呼ぶ) は、振動波形の隣り合う全振幅を次々に読取り、第 i 番目および $(i+1)$ 番目の振幅の関係を図示し、その勾配などから求めることができる。摩擦力による静たわみ a 、固体摩擦力 F 、固体摩擦損 h_0 、 ζ 、 μ と ω_i との間には、次式の

関係があり、減衰振動波形からそれらの振動定数を求めることができる。

$$x_i = \exp\left(\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) x_{i+1} + 2a\left(1 + \exp\left(\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)\right) \quad (12)$$

$$\mu x = 2\pi \frac{\mu}{\omega} = 2\pi \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (13)$$

$$\zeta = \frac{\log \tan \theta}{\pi} \left\{ 1 + \left(\frac{\log \tan \theta}{\pi} \right)^2 \right\}$$

$$a = \frac{F}{k} = \frac{1}{2} \frac{h_0}{1 + \tan \theta} \quad (15)$$

$$\theta = \tan^{-1} \exp\left(\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) \quad (16)$$

$$h_0 = 2a\left(1 + \exp\left(\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)\right) \quad (17)$$

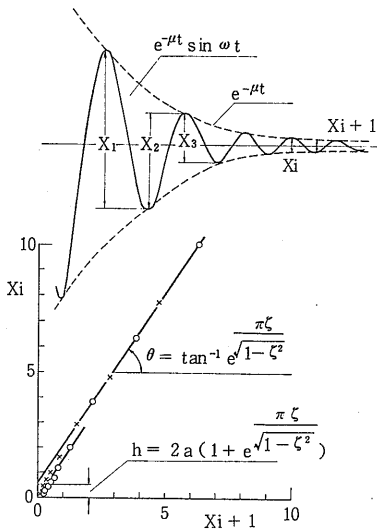


図-4.5 減衰振動波形

自由振動の実験は4.1節に示す装置に燃料集合体を取付け、その中央部に引張荷重を加え、たわみ変位を与えた後、瞬間的に引張力を開放し、燃料集合体に生ずる歪量の変化を電磁オシログラフに記録した。

得られた結果を図-4.6および図-4.7に示す。これらの実験値から以下のことがいえる。

- (1) 振幅の大きい部分の振動数は低く、振幅の減衰につれて振動数が高くなる。
- (2) 振幅の小さい部分の振動数は一定で、その振動が長時間持続する。
- (3) 減衰係数比には固体摩擦の項が含まれており、(図-4.5の h_0) 振幅の大きい部分では、その影響が大きい。

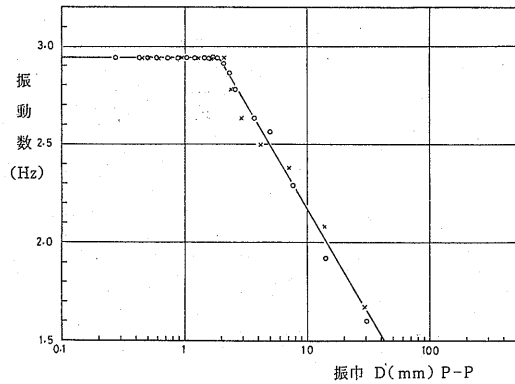


図-4.6 燃料集合体の自由振動振幅と振動数の関係 (5F型)

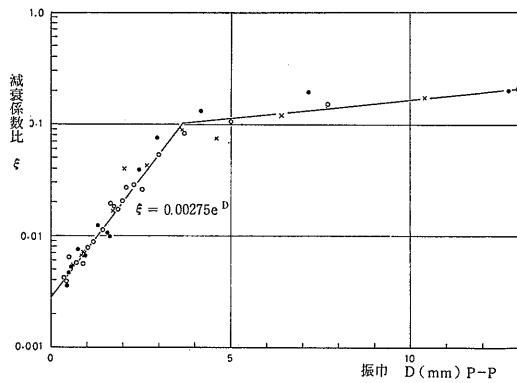


図-4.7 燃料集合体の振幅と減衰係数比の関係 (5F型)

(4) 減衰係数比 ζ は次式で近似できる。

$$\zeta = 0.08 \sim 0.15, \quad D > 3 \text{ mm}$$

$$\zeta = me^{nD}, \quad D \leq 3 \text{ mm}, \quad m = 0.00275, \quad n = 1$$

即ち、この燃料集合体は固有振動数が 1.6 Hz (実測の範囲で) から 2.94 Hz まで変化する減衰係数比の大きな部分 ($\zeta \approx 0.1$) と振動数が一定値 (2.94 Hz) で減衰係数比の減少する部分からなっている。前者から後者への移行は連続的であり、振幅と振動数の間には何らかの関係があるように見える。

いま、自由振動している1本の梁について考えてみる。その振動数 f は、

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{(\beta L)^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (18)$$

で表わされ、物性値と境界条件により決まる。

燃料集合体の場合、これらの定数のうち、振幅 (エネルギー) 依存性のあるものとして、剛性 EI および境界条件 βL が考えられる。このうち、 βL について