

# 新型転換炉原型炉炉心圧力管群振動実験研究の開発

Vibration Tests of Pressure Tubes for A.T.R. — Report of Vibration Tests —

飯 尾 博 一\*      加 賀 万 亀 男\*\*      石 崎 幸 人\*\*\*  
Hiromoto Iio      Makio Kaga      Yukihiro Ishizaki

The report describes the vibration tests of pressure tubes for A.T.R. performed by Hitachi, Ltd. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

The tests resulted in clarifying the vibrating characteristics of a partial model of reactor proper containing full scale pressure tubes. Also, the tests produced basic data required for seismic analysis.

## 1. 緒 言

新型転換炉は減速材に重水を使用する圧力管形の原子炉である。原子炉本体の構造は図1に示すとおりである。重水のはいつた炉心タンク（カランドリアタンク）内を224本のカランドリア管ならびに圧力管が縦に貫通し、圧力管内に位置する燃料集合体を高圧沸騰軽水が冷却するもので、発生した蒸気と水とは上方に設けられた蒸気ドラムにおいて分離され、蒸気はタービンへ送られ、水は給水と混合した後、再循環される。

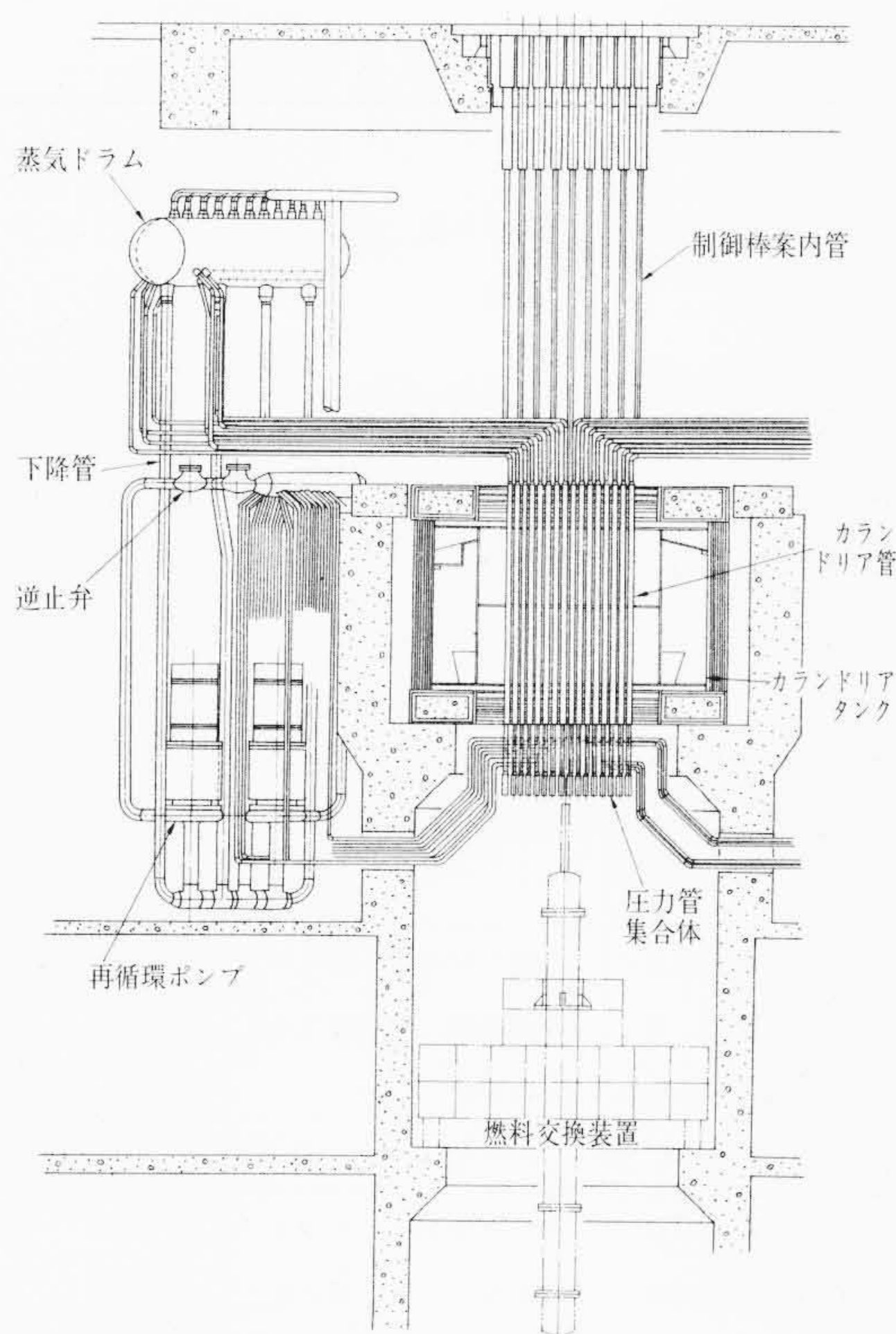


図1 原子炉全体図（立断面）

上記の新型転換炉をわが国のような地震多発国に建設する場合には、この安全性を設計段階で詳細に検討する必要がある。つまり、主要部の基本振動性状を求めるとともに、地震時の応答を正確に評価することが要求される。

このため、ここでは新型転換炉のうちでも耐震上、特に重要と思われる炉心圧力管群を取り上げ、実物に近いモデルを使用して振動実験を行なった。以下にこの実験の概要について述べる。

## 2. 実験の目的

一般に、大形構造物の動的特性を理論的に解明するには幾多の困難な問題がある。特に、新型転換炉炉内構造物は重水中にあるということで、多くの不確定要素を含んでいる。したがって、実物に近いモデルで振動実験を行ない、水中での各種振動特性を把握（はあく）して、空中での特性と比較することは設計基準を作成するうえで大きな意義があり、また、耐震設計を合理的に行なうための近道と考えられる。

このような見地から、できる限り実物に近い形状の実験装置を作って、各種の振動実験を行ない、耐震性に関する各種の基礎設計資料を得るというのが本実験の最大の目的である。

## 3. 実験装置

図2、図3は今回使用した炉心圧力管群振動実験モデルを示したものである。これは1組の圧力管およびカランドリア管、4本の模擬カランドリア管および1本の模擬制御棒案内管を炉心タンクに相当する円筒形容器に入れたものである。模擬カランドリア管は1本の管で、圧力管およびカランドリア管の組を模擬させてあり、カットワイヤショットを入れて、水中での固有振動数が結合系と一致するよう設計した。

各部の外形寸法、材質などは次に示すとおりである。

- (1) 管類 表1参照
- (2) 燃料集合体  
外形、寸法、重量を実物と完全に同じにした集合体 一式
- (3) タンクおよび架台  
内径：800mm、肉厚：9mm、高さ：5,340mm、材質：炭素鋼  
タンクは架台に固定され、架台は振動台に固定される。
- (4) 結合系  
試験用圧力管および試験用カランドリア管はコイルばね3個で結合され、内部に(2)の燃料集合体をそう入してタンク中央部

\* 動力炉核燃料開発事業団  
\*\* 日立製作所機械研究所  
\*\*\* 日立製作所日立工場

に固定される。

(5) 振動台

振動台としては電源開発株式会社土木試験所の大形振動台を使用した(表2参照)。

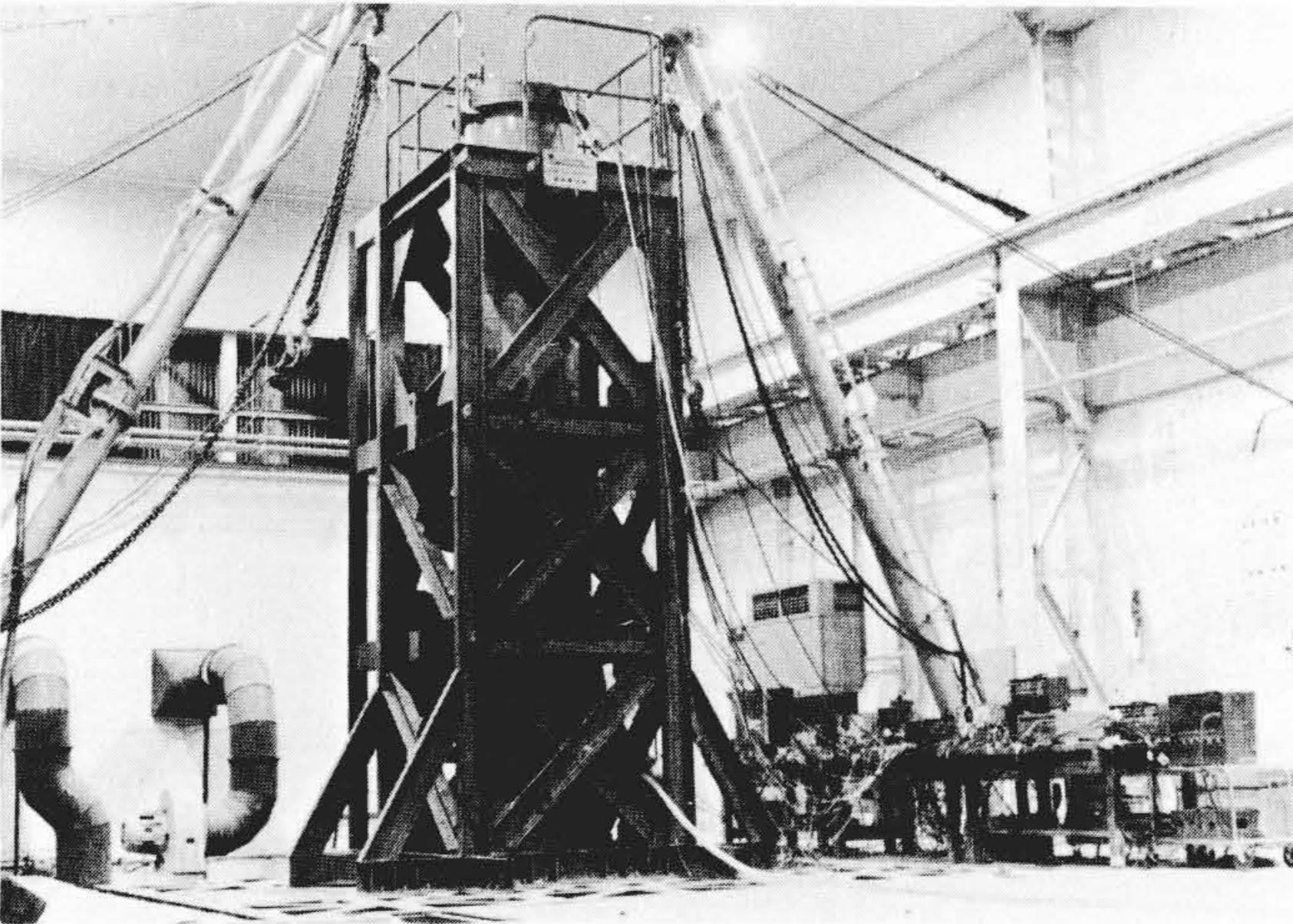


図2 実験装置全体

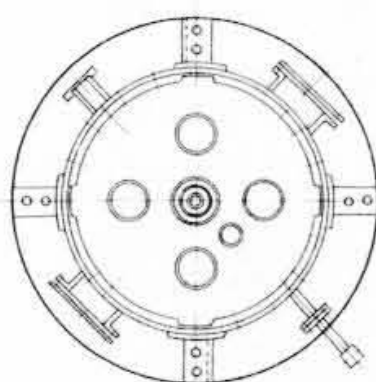
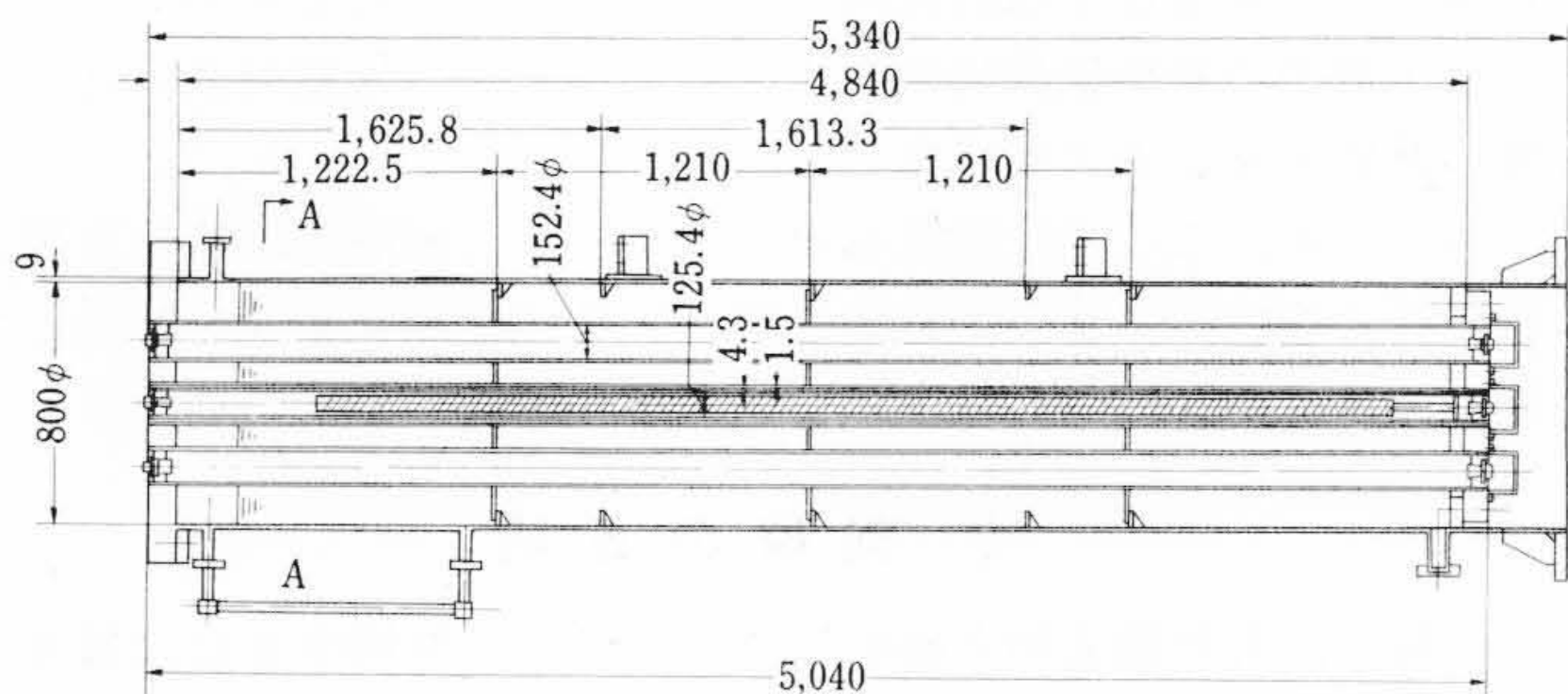


図3 炉心タンク模型

表1 管類の外形寸法および材質

| 管名         | 外径<br>(mm) | 肉厚<br>(mm) | 長さ<br>(mm) | 材質        | 本数<br>(本) |
|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| 試験用圧力管     | 126.4      | 4.3        | 4,940      | ジルコニウムニオブ | 1         |
| 試験用カランドリア管 | 152.4      | 1.5        | 4,940      | ジルカロイ-2   | 1         |
| 模擬カランドリア管  | 152.4      | 2.0        | 4,940      | ステンレス鋼    | 4         |
| 模擬制御棒案内管   | 105.0      | 4.0        | 4,940      | ステンレス鋼    | 1         |

表2 振動台仕様

| 項目      | 諸元                  |
|---------|---------------------|
| 振動台の大きさ | 約 5,000×5,000mm     |
| 最大積載重量  | 約 22 t              |
| 駆動方式    | 低速、高速ともアンバランスマス加振方式 |
| 振動数範囲   | 低速加振 5～35Hz         |
|         | 高速加振 17～50Hz        |
| 最大振動加速度 | 低速加振 無負荷 ±4.0G      |
|         | 22 t 負荷 ±1.6G       |
|         | 高速加振 無負荷 ±0.5G      |
|         | 22 t 負荷 ±0.2G       |

4. 実験方法

前項に述べた各装置を用いて、各種の振動実験を行なった。実験の項目としては、まず外管の固有振動数、振動モードおよび減衰定数などの基本振動性状を測定することを考えた。これは、今回の実験装置が大形であり、しかも、結合状態が特殊であるため、境界条件を正確に把握することが重要な問題のひとつであるとの判断によるものである。また、各管は最終的には水中におかれるので、水中における振動性状がどのようなものであるかを把握するとともに、管相互の連成作用を解明することが最も重要である。以上のことから全体の実験項目を表3のように定めた。

これらの実験はおもに振動台上で行なう強制振動実験であるが、このほかに可能なものについては自由振動実験も行なった。表4は各実験項目で行なう測定の内容および目的を示したものである。

表3 実験項目一覧表

| 実験名   | 実験対象                             |
|-------|----------------------------------|
| A-1-a | カランドリア管と圧力管の結合系(空水)              |
| A-1-b | カランドリア管と圧力管の結合系(充水)              |
| A-2-a | カランドリア管と圧力管および燃料要素の結合系(空水)       |
| A-2-b | カランドリア管と圧力管および燃料要素の結合系(充水)       |
| W-1-a | カランドリア管結合系と模擬カランドリア管4本および案内管(空水) |
| W-1-b | カランドリア管結合系と模擬カランドリア管4本および案内管(充水) |
| W-2-a | カランドリア管単体に防振板1枚(空水、充水)           |

表4 測定項目一覧表

| 測定項目                                  | 目的                                        | 実験名                               |
|---------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|
| 打撃時の自由振動加速度の測定                        | 固有振動数、減衰定数の決定                             | A-1-a, A-1-b, A-2-a, A-2-b, W-1-b |
| 段階的に振動数を変化させる強制振動実験で管軸方向の加速度分布を測定     | 振動モードの決定、共振曲線の作製、減衰定数の算出                  | 全実験                               |
| 同上の方法でひずみ分布の測定                        | 管の応力分布の実測                                 | W-1-a, W-1-b                      |
| 共振々動数で強制振動させ、管軸方向の加速度分布を測定            | 基本振動モードの精密測定                              | 全実験                               |
| 段階的に振動数を変化させる強制振動実験で、各管の中央部の加速度を同時に測定 | 各管の位相差、相互の連成効果、相対変化などの測定                  | W-1-a, W-1-b                      |
| 掃引強制振動実験時の各管中央部加速度の同時測定               | トラッキングアナライザを用いて、各管の応答が最大になる振動数および位相差の精密測定 | W-1-a, W-1-b                      |
| 防振板の衝突検出ならびに衝突時の加速度分布測定               | 防振板効果の確認                                  | W-2-a                             |

## 5. 実験結果

### 5.1 カランドリア管本体の基本振動性状

はじめにカランドリア管と圧力管の二重結合系およびこれに燃料要素をそう入した場合の質量効果ならびに剛性効果を知るために、空水時の実験(A系列)を行なった。この実験からは管両端の境界条件の様子を知ることができた。次に、同様の実験を充水時について行なった。これにより、水中での見掛け質量効果ならびに減衰定数が決定できた。

以上の実験結果から得られた基本振動性状ならびに応答の最大値を示したのが表5である。これらの値はいずれも振動台の全振

表5 各実験の基本振動性状および管中央部の最大応答値

| 実験項目                   | 測定項目    | 共振振動数 (Hz) | 最大加速度 (gal) | 基本成分*1 分加速度 (gal) | 測定変位 (mm) | 相対変*2 位 (mm) | 共振曲線より求めた減衰定数 |
|------------------------|---------|------------|-------------|-------------------|-----------|--------------|---------------|
| 空 水<br>燃料なし<br>(A-1-a) | カランドリア管 | 12.5       | 4,394       | 4,394             | 3.75      | 3.75         | 0.037         |
|                        | 圧力管     | 12.1       | 3,906       | 3,906             | 3.32      | 3.55         | 0.061         |
| 充 水<br>燃料なし<br>(A-1-b) | カランドリア管 | 7.27       | 186         | 155               | 0.37      | 0.48         | 0.056         |
|                        | 圧力管     | 7.4        | 246         | 130               | 0.30      | 0.40         | 0.069         |
| 空 水<br>燃料あり<br>(A-2-a) | カランドリア管 | 18.18      | 1,680       | 1,551             | 0.60      | 0.84         | 0.070         |
|                        | 圧力管     | 18.33      | 1,725       | 1,531             | 0.58      | 0.79         | 0.053         |
| 充 水<br>燃料あり<br>(A-2-b) | カランドリア管 | 7.27       | 98          | 71                | 0.17      | 0.31         | 0.104         |
|                        | 圧力管     | 7.42       | 250         | 70                | 0.17      | 0.26         | 0.111         |

注：\*1 基本成分加速度とは、各点の応答加速度記録から振動台の駆動振動数と振動数が同じ成分だけを読み取った値をいう。

\*2 容器の変位分を補正した値をいう。

幅を約1mm一定として、各振動数での管中央の定常応答加速度を測定した結果を整理したものである。振動台—容器系にロッキング振動成分があるので、最終的にはこれを補正した形でまとめている。整理手順を示す一例として充水時の共振点近傍での結果を図4に示した。また、各実験の共振点における規準化した振動モードを図5に示した。図からいずれの場合も管は、はりタイプの振動をしており、しかもカランドリア管と圧力管はほぼ一体となって振動していることがわかった。

振動モードに対応する応力分布を確認する目的で、カランドリア管、圧力管および燃料要素にそれぞれひずみゲージをはりつけて振動ひずみを計測した。振動ひずみと駆動振動数の関係を調べると、傾向としては先に述べた応答変位の場合と同じであった。また、中央部でのひずみ量から応力を算出して、これと管を両端支持として変位量から静的に求めた応力値を比較したところかなりよく一致していた。このことから、実際の場合に管に生ずる応力ははりの曲げの計算から求めてよいということがわかった。

### 5.2 カランドリア管本体の非線形性の測定

今回の装置は管の両端の支持構造の複雑さをはじめとして、二重管構造の結合部および燃料要素のがたなど非線形の要素を多分に含んでいる。また、水中においても水の連成作用は非線形的であるので、この点に関する検討が必要である。この種の厳密な計測は実機規模のものでは特に困難なので、ここでは加振振幅の大小による依存性だけを調べることにした。図6、7はそれぞれの実験について、振動台振幅を1mmおよび0.2mm一定としたときの応答倍率を示したものである。図のように共振振動数、応答倍率ともいずれもかなり差があり、非線形性の強いことがわかる。特

に空水時の燃料要素の影響が大である。水中では応答値がいずれもかなり小さく、一般的な傾向を把握するまでには至らなかった。

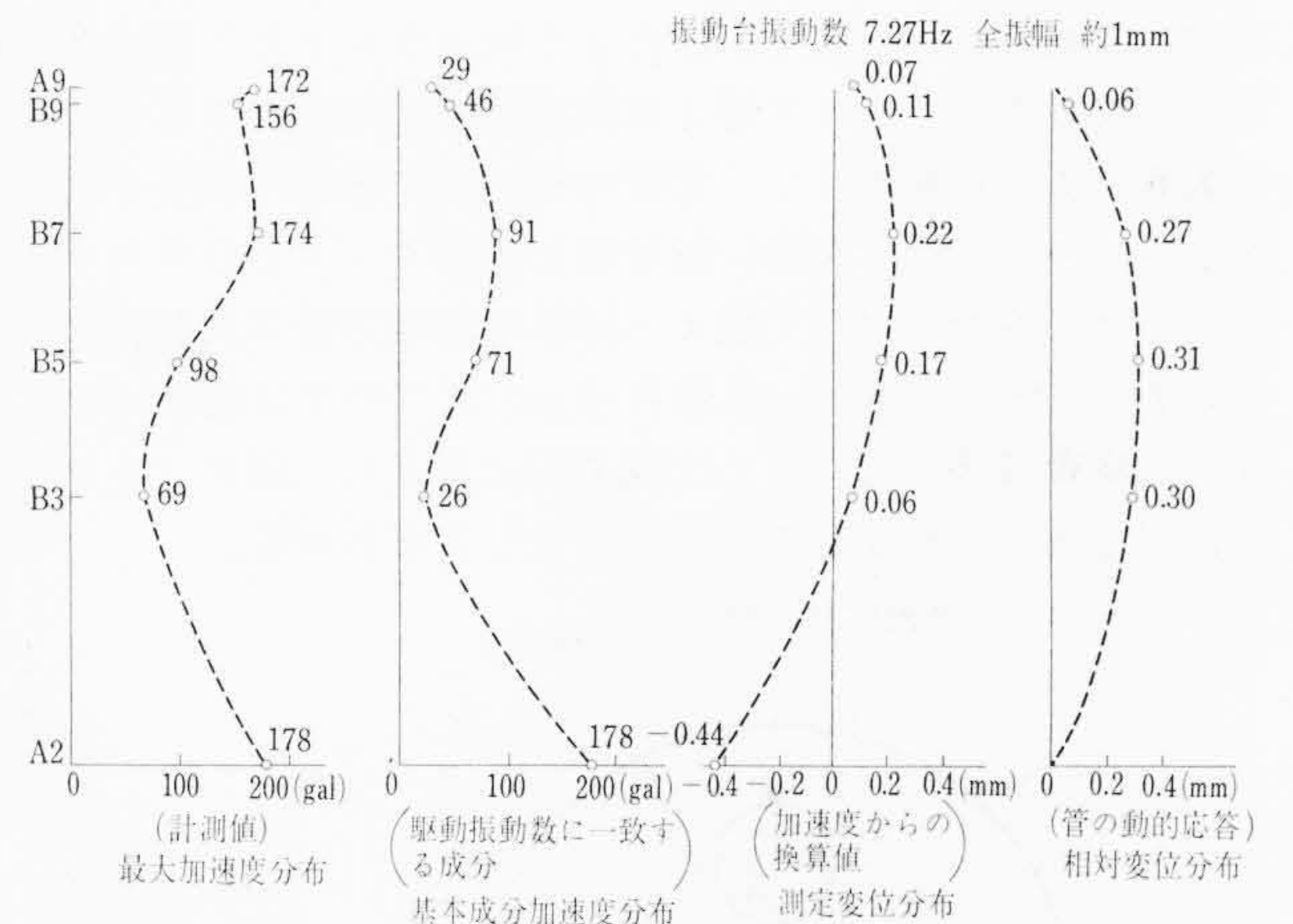


図4 実験A-2-b 共振点におけるカランドリア管の応答

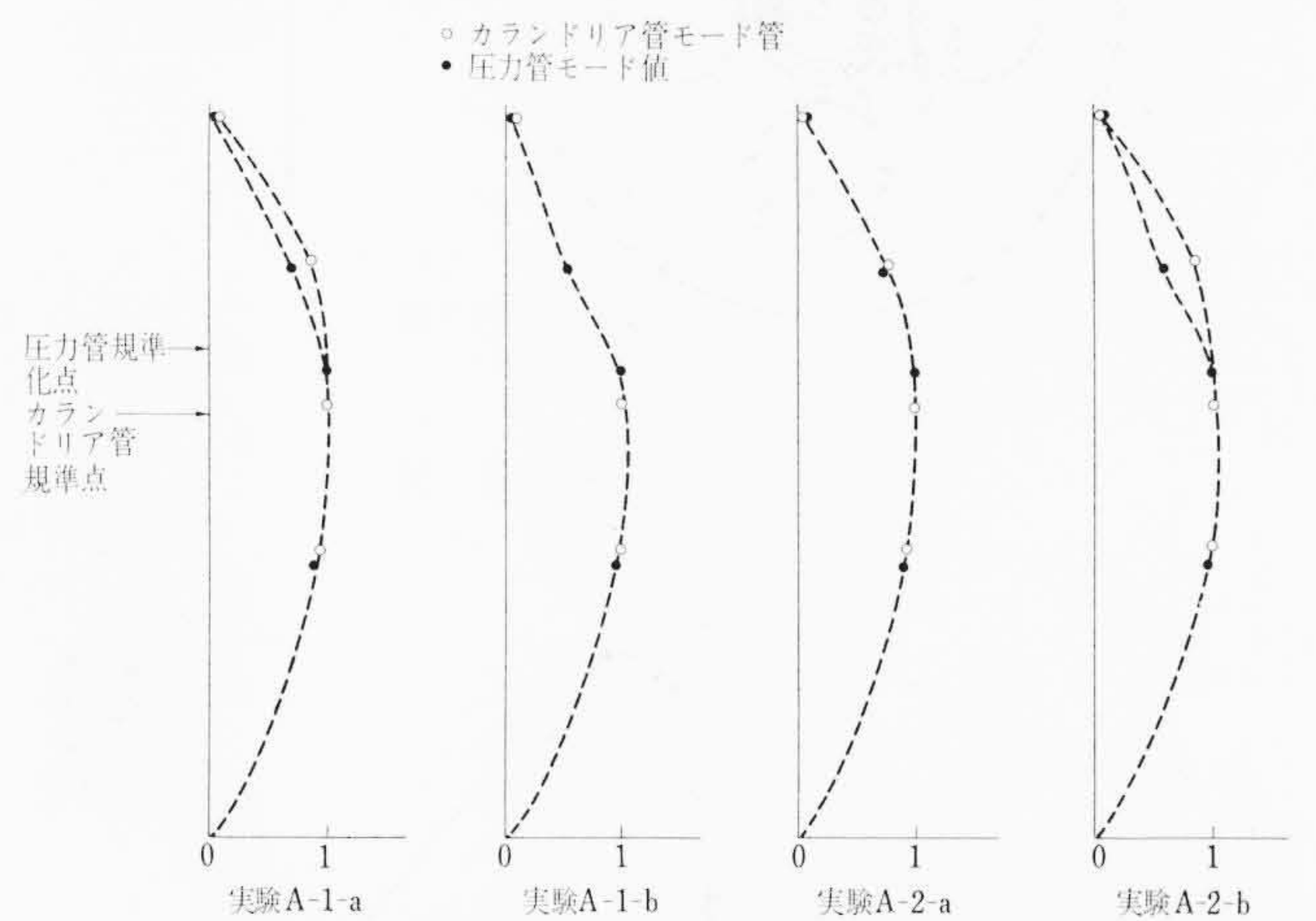


図5 カランドリア管結合系の振動モード

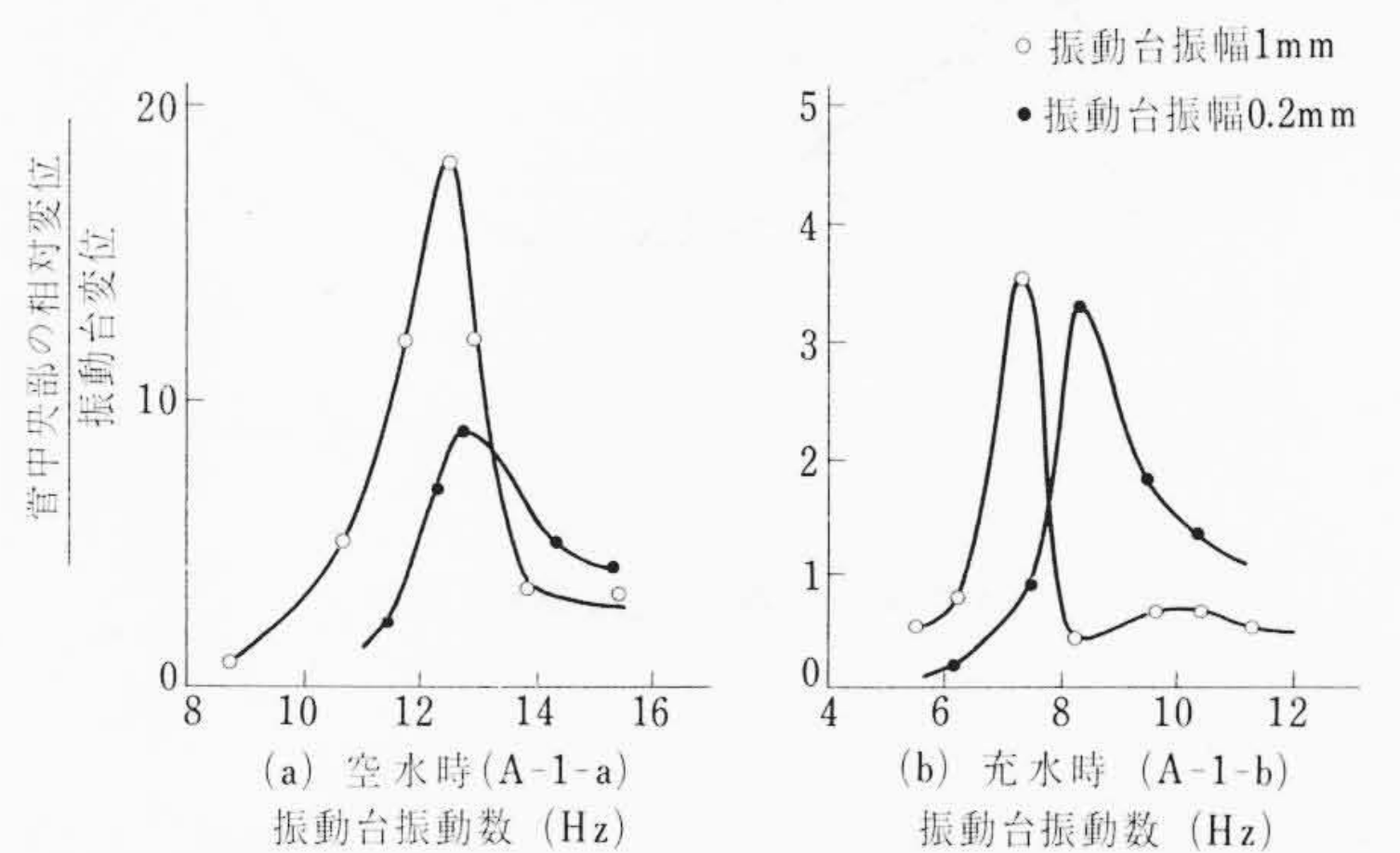


図6 実験A-1 加振振幅を変えたときのカランドリア管の共振曲線 (燃料要素を入れない場合)

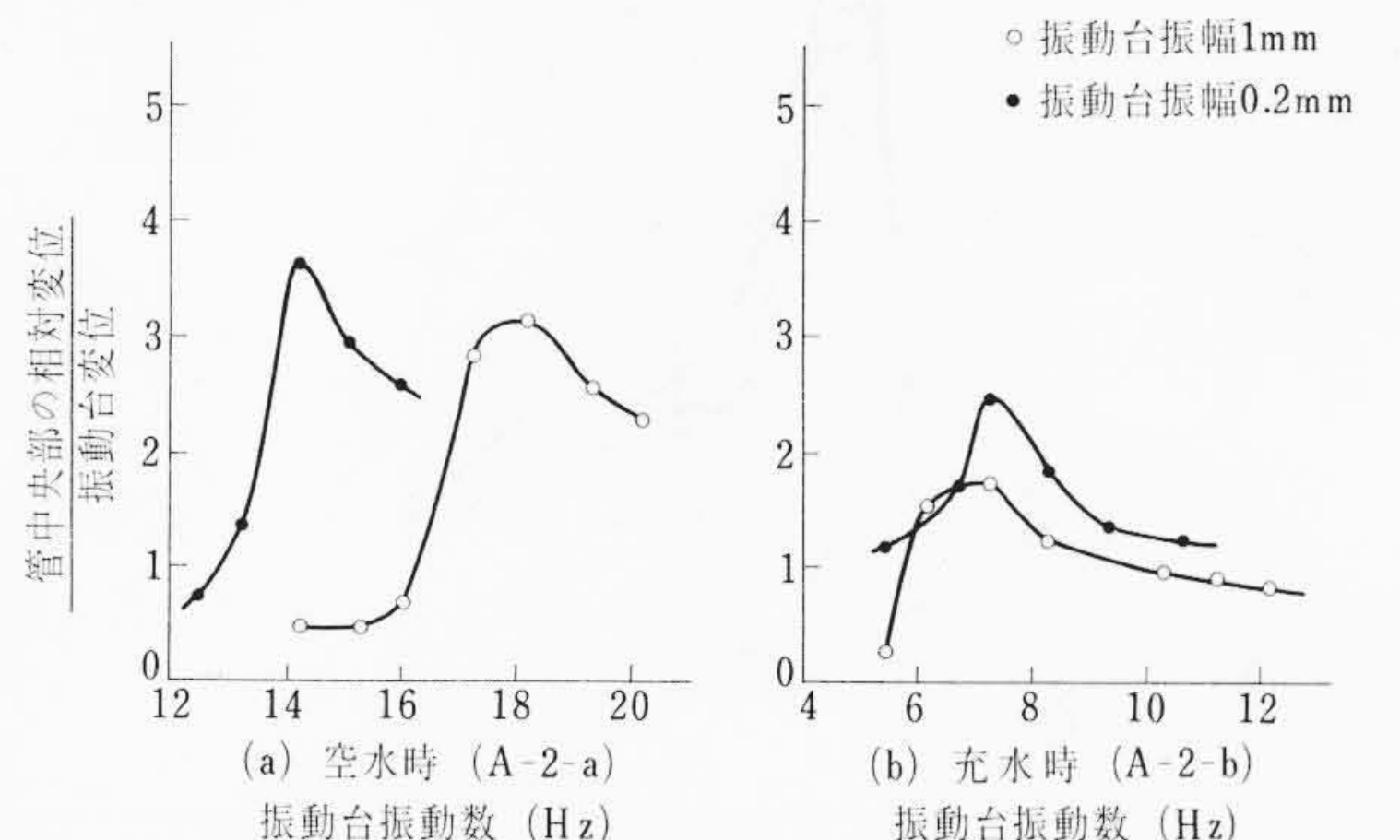


図7 実験A-2 加振振幅を変えたときのカランドリア管の共振曲線 (燃料要素を入れた場合)

### 5.3 管群に関する実験結果

前項の実験結果から、カランドリア管本体の基本的な振動特性が把握できたが、ここではこれが水中で群をなす場合の実験結果について概説する。3で示したようにカランドリア管本体を中心として模擬カランドリア管4本模擬制御棒案内管1本をこの周辺に図8のように配置した。各管の相対的な応答の様子を同時に計測するため、各管中央部に加速度ピックアップとひずみゲージを配置した。各管について図4と同様の整理方法で共振曲線を求めた結果の一例を空水時（実験W-1-a）については図9(a)に、充水時（実験W-1-b）については図9(b)に示した。図のように、水中においてはかなり振動性状が変わることがわかる。

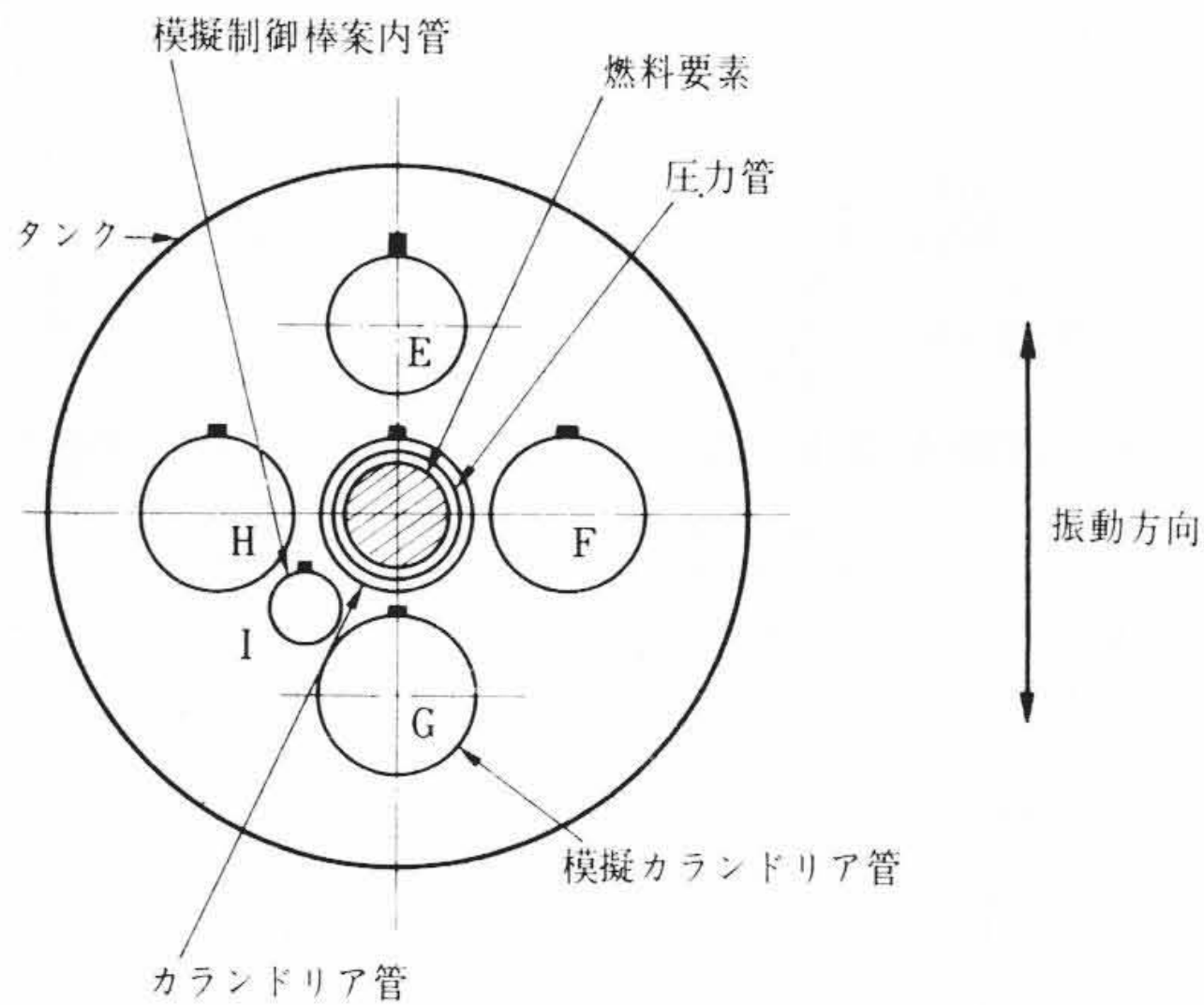


図8 管群配置図

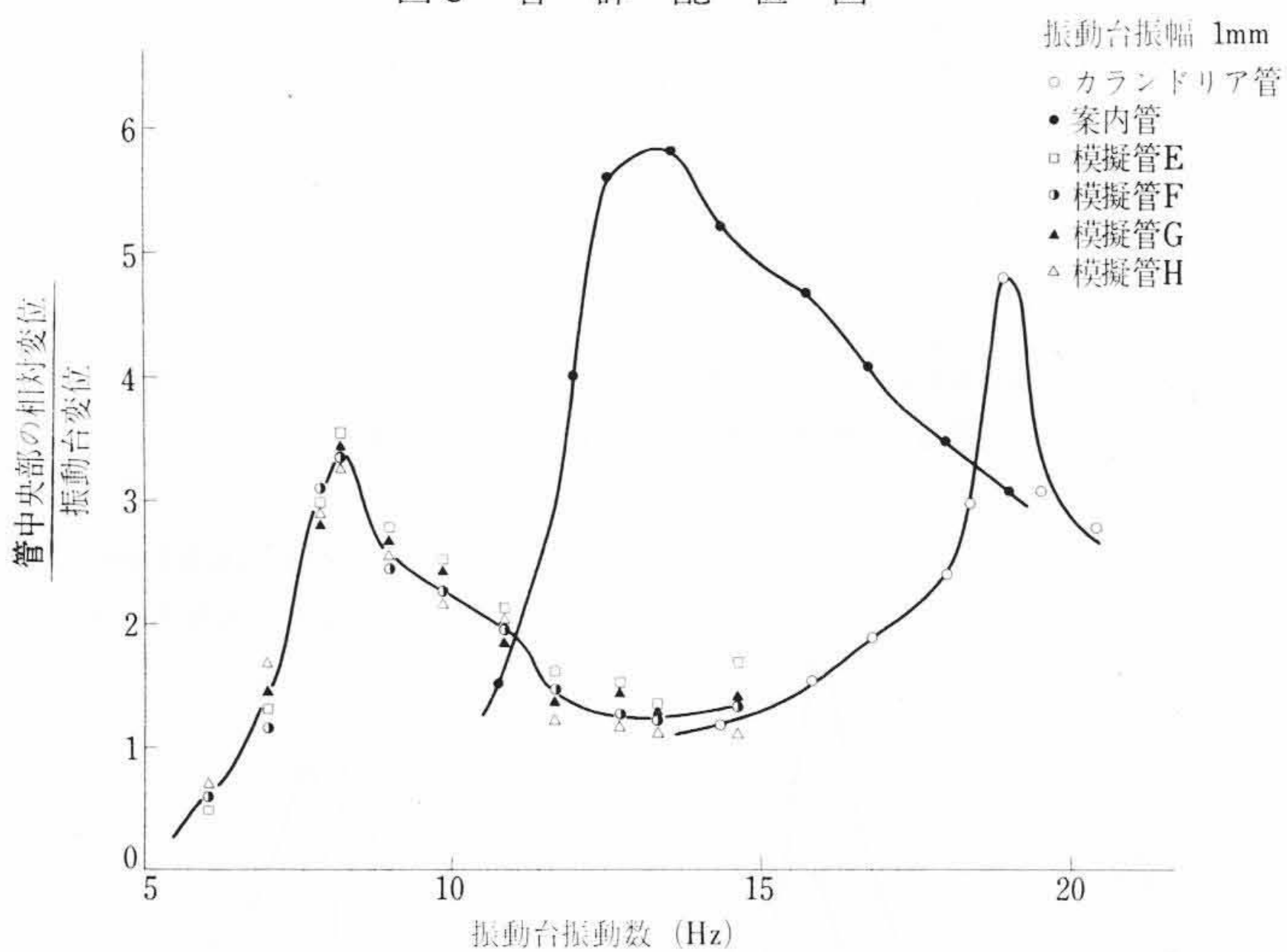


図9(a) 管群の共振曲線(空水)

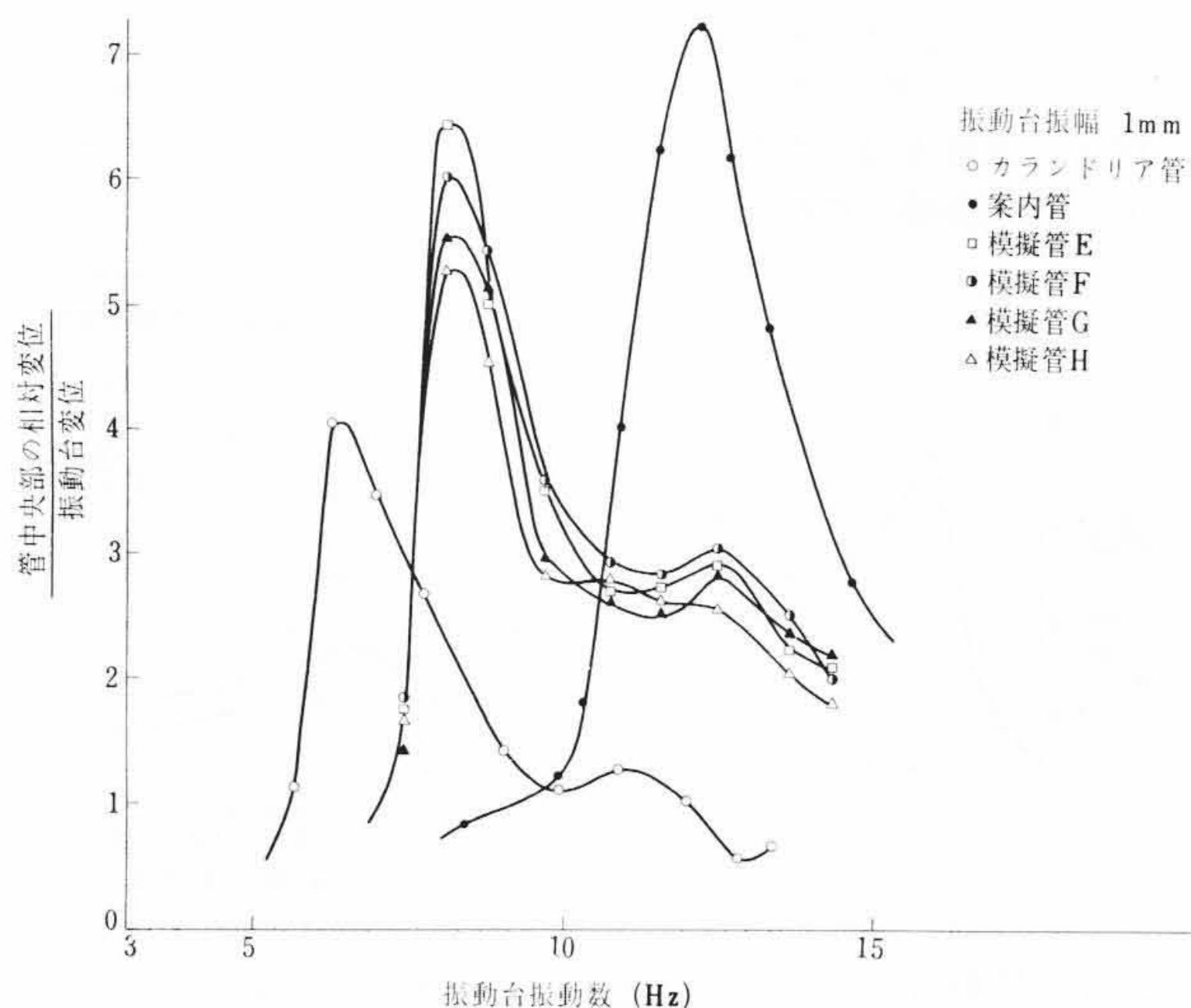


図9(b) 管群の共振曲線(充水)

今回の実験装置では実験の種類を変えるたびに装置の組替えを行なうので、支持条件を完全に再現することがむずかしく、実験値にかなりばらつきがみられた。また、系全体にがたなどによる非線形性が含まれるので、振動性状を正確に把握することがかなり困難であった。これらのことを考慮に入れて、図9(a), (b)などから応答が最大になる点の振動数ならびに減衰定数を求めたのが表6である。表からわかるように、カランドリア管結合系はかなり複雑な振動特性をもっており、水中では共振振動数が大幅に低下する。この原因については後述する。また、模擬管はどれもほぼ同様の振動性状をもつとともに、水中でもあまり固有振動数が変わらないことがわかった。

次に水中での各管の連成の様子に注目する。先に述べたように管端の支持条件の影響で水中でのカランドリア管と模擬管の固有振動数が一致していないため、図10をみると互いに独立に振動しており、相互作用の効果があまり現われていない。ただ、案内管がかなり激しく振動しており、この振動が他管に若干影響を及ぼしていることがわかる。

表6 管群振動実験結果一覧表

| 振動台振幅<br>(mm) | 試験項目<br>振動定数<br>測定点 | 空 水 時         |       | 充 水 時         |       |
|---------------|---------------------|---------------|-------|---------------|-------|
|               |                     | 共振振動数<br>(Hz) | 減衰定数  | 共振振動数<br>(Hz) | 減衰定数  |
| 1.00          | カランドリア管             | 18.90         | 0.024 | 6.50          | 0.096 |
|               | 圧 力 管               | 18.90         | 0.019 | 6.50          | 0.077 |
|               | 模 擬 管E              | 8.40          | 0.064 | 8.20          | 0.140 |
|               | 模 擬 管F              | "             | 0.077 | "             | 0.120 |
|               | 模 擬 管G              | "             | 0.066 | "             | 0.134 |
|               | 模 擬 管H              | 8.40          | 0.060 | 8.20          | 0.120 |
|               | 案 内 管               | 12.90         | 0.150 | 12.10         | 0.079 |
| 0.50          | カランドリア管             | 15.40         | 0.062 | 7.40          | 0.095 |
|               | 圧 力 管               | 15.30         | 0.056 | 7.30          | 0.079 |
|               | 模 擬 管E              | 9.40          | 0.064 | 8.60          | 0.064 |
|               | 模 擬 管F              | "             | 0.064 | "             | 0.100 |
|               | 模 擬 管G              | "             | 0.064 | "             | 0.082 |
|               | 模 擬 管H              | 9.40          | 0.069 | 8.60          | 0.096 |
|               | 案 内 管               | 13.40         | 0.097 | 12.70         | 0.057 |
| 0.20          | カランドリア管             | 14.50         | 0.052 | 8.20          | 0.120 |
|               | 圧 力 管               | 14.70         | 0.065 | 8.20          | 0.100 |
|               | 模 擬 管E              | 11.10         | 0.171 | 8.90          | 0.190 |
|               | 模 擬 管F              | "             | 0.167 | "             | 0.200 |
|               | 模 擬 管G              | "             | 0.144 | "             | 0.210 |
|               | 模 擬 管H              | 11.10         | 0.162 | 8.90          | 0.340 |
|               | 案 内 管               | 14.70         | 0.056 | 12.30         | 0.089 |

注：（各管中央部での測定結果）

### 5.4 管端支持条件を変えた管群振動実験結果

前節で、水中における管群の連成効果に関する実験結果について述べたが、水中でのカランドリア管結合系と模擬管の固有振動数がずれているので、十分良い結果を得ることができなかった。したがって、ここでは境界条件をより剛にして再実験を行なった。つまり管端の締付けをより完全にし、一部分を溶接してかなり理想に近い形の支持条件とした。

このような条件下で、管の振動性状が先の場合に比べてどのように変わったかの一例を示したのが図10(a), (b)である。図10(a)はカランドリア管結合系（含燃料要素）の空水時の共振曲線である

が、先の場合に比べて固有振動数が約4Hz高くなるとともに、新たに13Hzのところに別の共振点が現われた。このような状態で充水時の応答を測定した結果が図10(b)である。図から支持条件を剛にした場合は水中でのカランドリア管と模擬管の固有振動数がかなり接近しており、互いに影響し合っており、これらの管が一体となって振動していることがわかる。また、支持を剛にすると応答倍率が先の結果の2～3倍になっていることが認められる。

実際の場合は各管の振動特性が同様であるとともに、支持条件も剛になるので、図10(b)のような振動性状をもつものと推定される。図から水中での管群の共振振動数は約9.5Hzであることがわかる。

なお、管の応答倍率が図9(b)などと比較して大きいのは、支持条件のゆるさなどからくるがたの影響がなくなったためと考えられる。また、管によって応答の最大値が異なるのは水中における弾性体の連成振動の特殊性によるもので、管どうしのわずかな固有振動数の違いによりごく一般に起こる現象である。

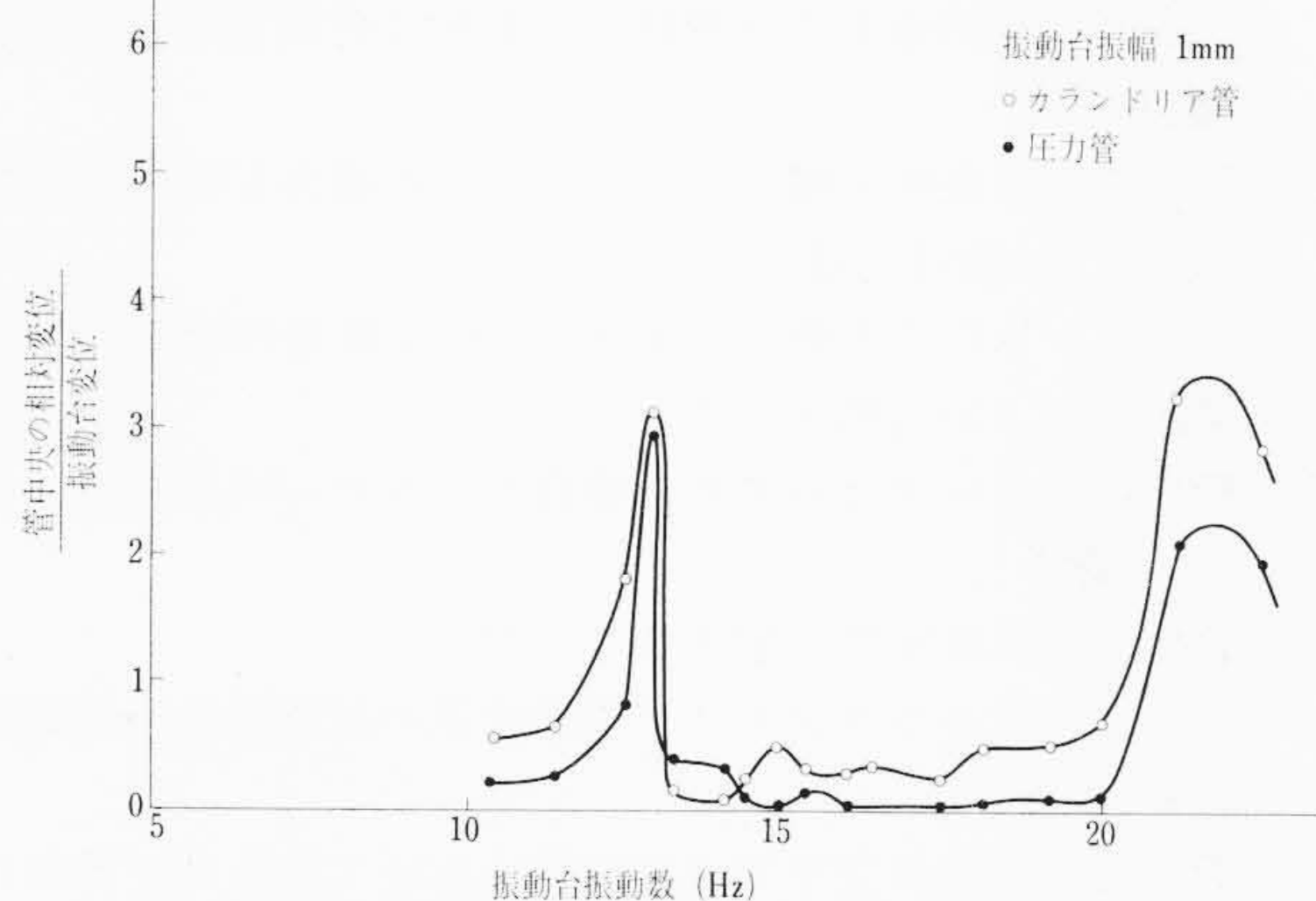


図10(a) 支持条件を剛にした場合のカランドリア管の共振曲線(空水)

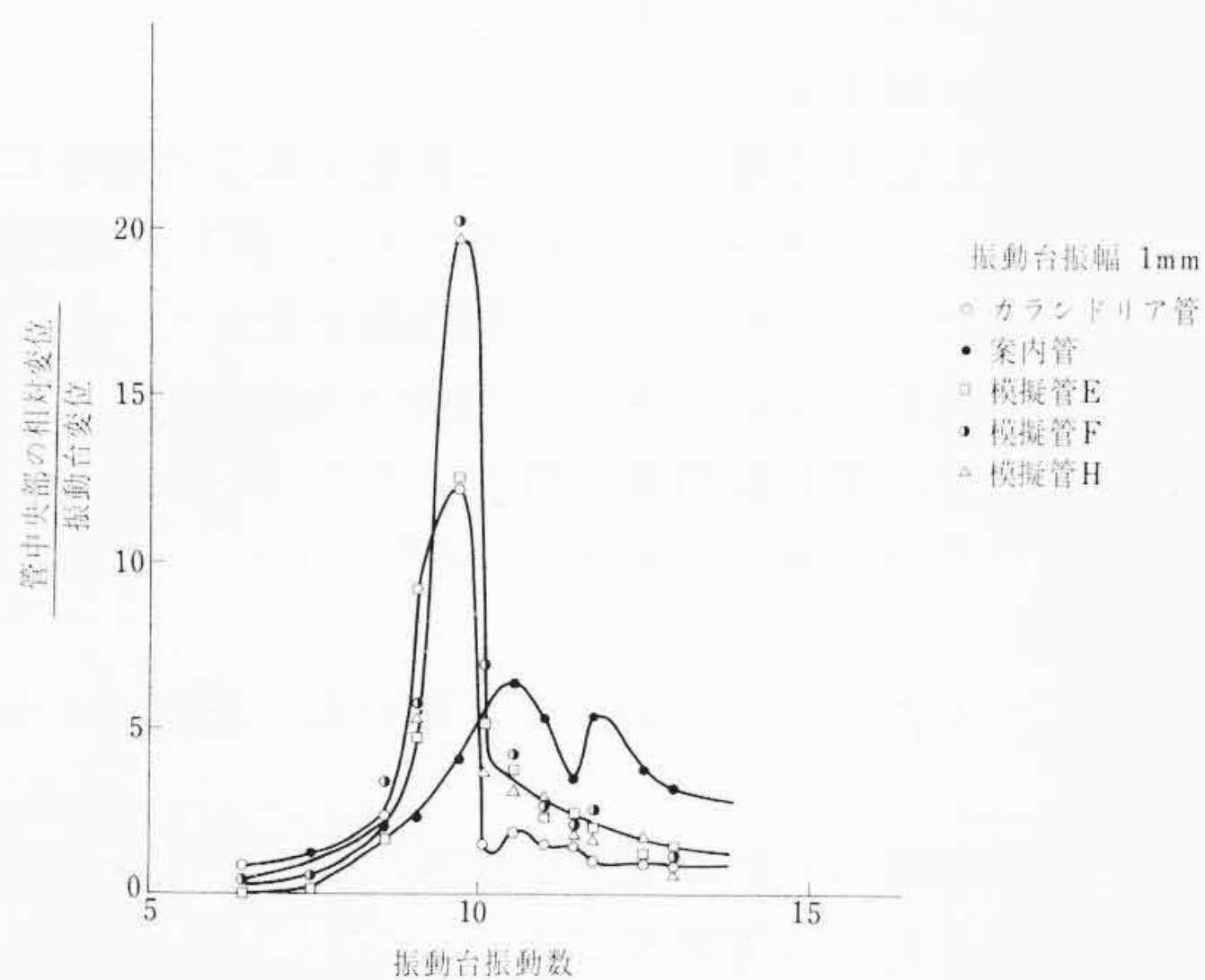


図10(b) 支持条件を剛にした場合の管群の共振曲線(充水)

## 5.5 防振板がある場合の実験結果

防振効果を調べるにあたっては、防振板上で最も管に近い位置にひずみゲージをはり、管が衝突した際の衝撃応力を検出することにより、管の接触状況を調べた。これらの結果から、空中では16Hz以上で接触が起こっていることがわかった。

一方、水中では加振振幅が1mmの場合は約7～9Hz、0.5mmの場合は8Hz前後の狭い範囲だけで接触が起こっている。また、接触の状況は各応答波形から判断できるが、各管の接触時の加速度波形、ひずみ波形ともそれほど大きな乱れはなく、特別大きな値を示すようなことはない。特に水中の場合は接触の仕方がゆるやかである。また、接触の瞬間に高次の振動が現われるようなこと

もなく、ただ基本次の振動の振幅が抑制されるという現象にとどまっている。

図11は防振板の影響下にあるカランドリア管の変位応答を示したものである。図から、管と防振板の間隙(かんげき)は約0.8mmであることがわかる。

以上の事実と図4のモード図から考えて、管の過大な振動を抑制するのに最も効果があり、しかも簡単な方法は管群の中央部に防振板を1枚設けることであると結論できる。

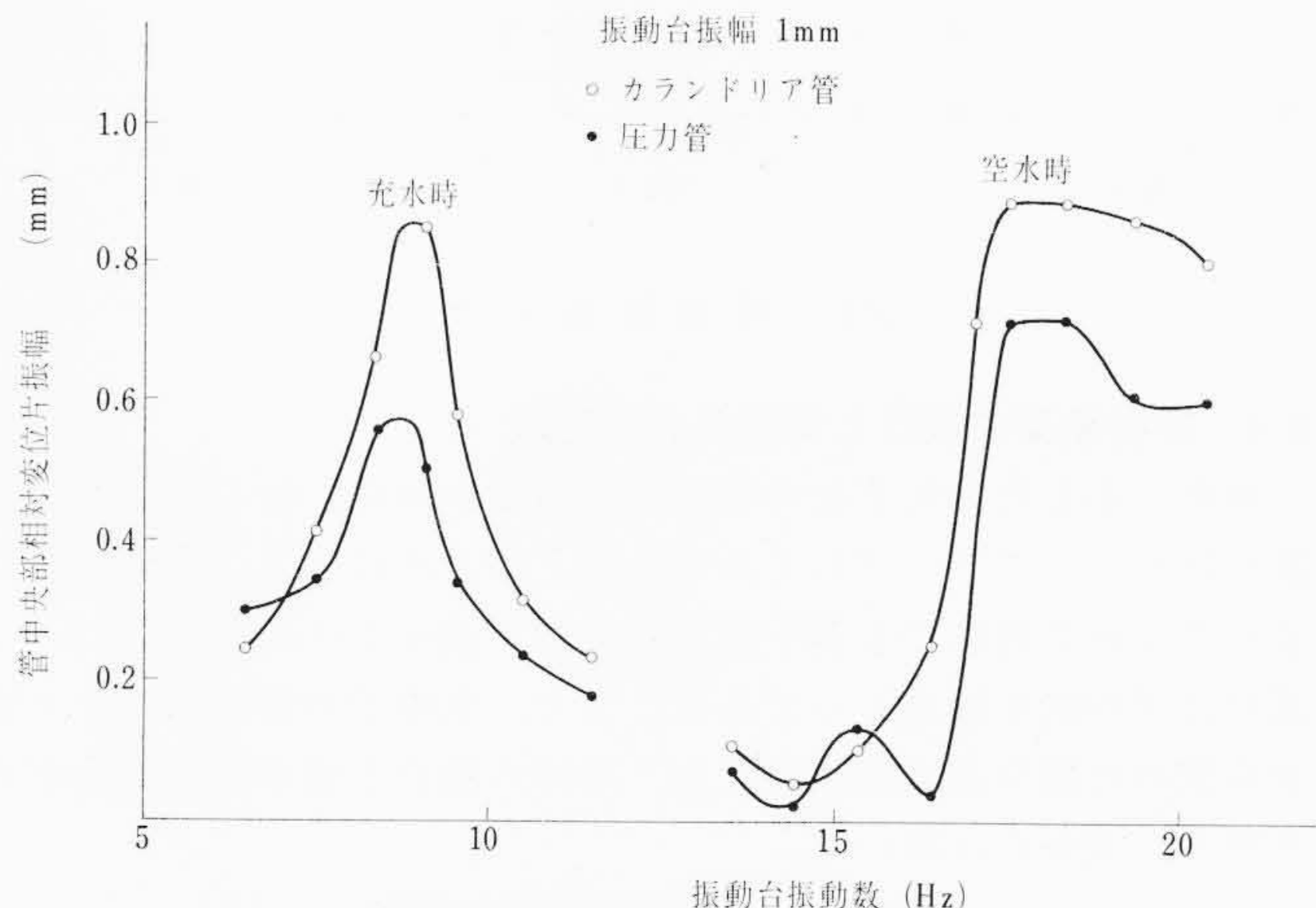


図11 防振板がある場合のカランドリア管の振動

## 6. 実験結果の検討

以上、カランドリア管、圧力管、燃料要素の結合系単体の空中および水中における振動実験の結果、ならびに水中で群をなす場合の連成効果に関する実験結果について述べた。実機の耐震解析を行なうには、まず図面上で空水時の基本振動性状を求めて、この結果から水中で群をなす場合の振動特性を推定することが要求される。

このような見地から、ここでは今回それぞれの実験で得た基本振動性状の関連性について検討するとともに、それぞれに対応する解析モデルによる計算結果と比較して、この妥当性を検討する。

### 6.1 使用する物性値

各管の材質によるヤング率などの物性値は、常温での自由振動実験の結果から求めた。また、燃料要素集合体に関するデータは既知の資料によった。

### 6.2 水中での見掛け質量効果

今回の対象のように縦横比が比較的大きなものに対しては、次式<sup>(1)</sup>が実験ともよく一致することがわかっているのをこれを用いた。

$$m' = \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} \frac{\rho_w}{\rho_m} m \div V_m \cdot \rho_w (b \gg a) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $m'$  = 見掛け質量

$b$  = 容器半径

$a$  = 丸棒半径

$\rho_w$  = 流体比重

$\rho_m$  = 丸棒比重

$m$  = 丸棒総質量

$V_m$  = 丸棒体積

### 6.3 解析モデル

振動中のカランドリア管—圧力管—燃料要素の結合状態については不確定の要素が多いので支持条件の種類を変えたものも含めて合計12種の多質点モデルを取り上げ、それぞれについて固有振動数と振動モードを求めて検討した。装置の状況や実験結果との対応を考慮するとそれぞれの場合に応じて図12のような3種に集

約される。

く一致している。

## 7. 結 言

以上、新型転換炉炉心圧力管群モデルの振動実験結果ならびに検討結果についてその概要を述べたが、今回の実験を通じて得た結論のおもなものについて下記する。なお、これらの中には本報告では省略した実験データから得られたもの、また、別に行なった小規模モデル実験から得た結論などが一部含まれている。

### (1) 固有振動数に関することから

- カランドリア管と圧力管はほぼ一体となって振動し、管のみの空中における固有振動数は約12Hz、水中では約7Hzである(表5)。
- 二重管に燃料要素を入れるとかなりの非線形が現われ、加振振幅の大きさによって14~18Hzの共振振動数をもつ(図7)。
- 水中でのカランドリア管結合系(含燃料)の固有振動数は約7Hzで管内の水および燃料は近似的に死荷重と考えてよい(表6)。
- 管端の境界条件を剛にするといずれの場合も固有振動数は高くなる(図11, 12)。
- 管単体が水中で振動する場合の見掛け質量の増加は(1)式で算出してよい(別データ)。
- 管の振動モードはいずれの場合もはりの一次振動モードに近い(図5)。

### (2) 応答倍率、減衰定数に関することから

- 水中におけるカランドリア管結合系の減衰定数は約10%である(表6)。
- 管の応答倍率は空中では約20倍くらいであるが、燃料のはいった場合は5倍程度と非常に小さくなる。
- 水中における管の応答倍率は燃料のない場合は約3倍、燃料のある場合は約2倍程度である。しかし、境界条件を剛にすると10倍以上となる(別データ)。

### (3) 管群の振動に関することから

- 管が群を形成する場合、固有振動数が単体の場合に比べて若干低下するが、無視できる程度である(表6, 小規模実験)。
- 管群で管どうし空中での固有振動数が離れている場合は、水の連成効果は少なく、独立に振動する傾向にある(図9)。
- 管群の各管の固有振動数が接近している場合は、共振時に管はすべて同位相で振動する(別データ)。

### (4) そ の 他

- 管に生ずる曲げ応力は通常のはりの式で算出できる(別データ)。
- 防振板は振動の抑制に有効に働き、しかも衝突によって不利な応答を生ずる可能性はない。

本実験より、実機の圧力管群の固有振動数は7Hz前後であることが十分期待され、原子炉本体を支持する原子炉建屋の励振されやすい固有振動数3Hzより2倍以上大きいので共振することはあり得ず、十分耐震性のあることが予想される。現在、本実験で得られたデータをもとに、実機の耐震解析を行ない、さらに圧力、自重などの荷重による応力と組み合わせて構造強度の確認を行なっている。

終わりに本実験を行なうにあたり、多大のご協力とご援助をいただいた動力炉核燃料開発事業団新型転換炉開発本部、日本原子力発電株式会社および電源開発株式会社の原子力室ならびに土木試験所の関係各位に対し、深く感謝の意を表わす次第である。

## 参 考 文 献

- (1) F.Kito: "Principles of Hydro-elasticity" 養賢堂 1970

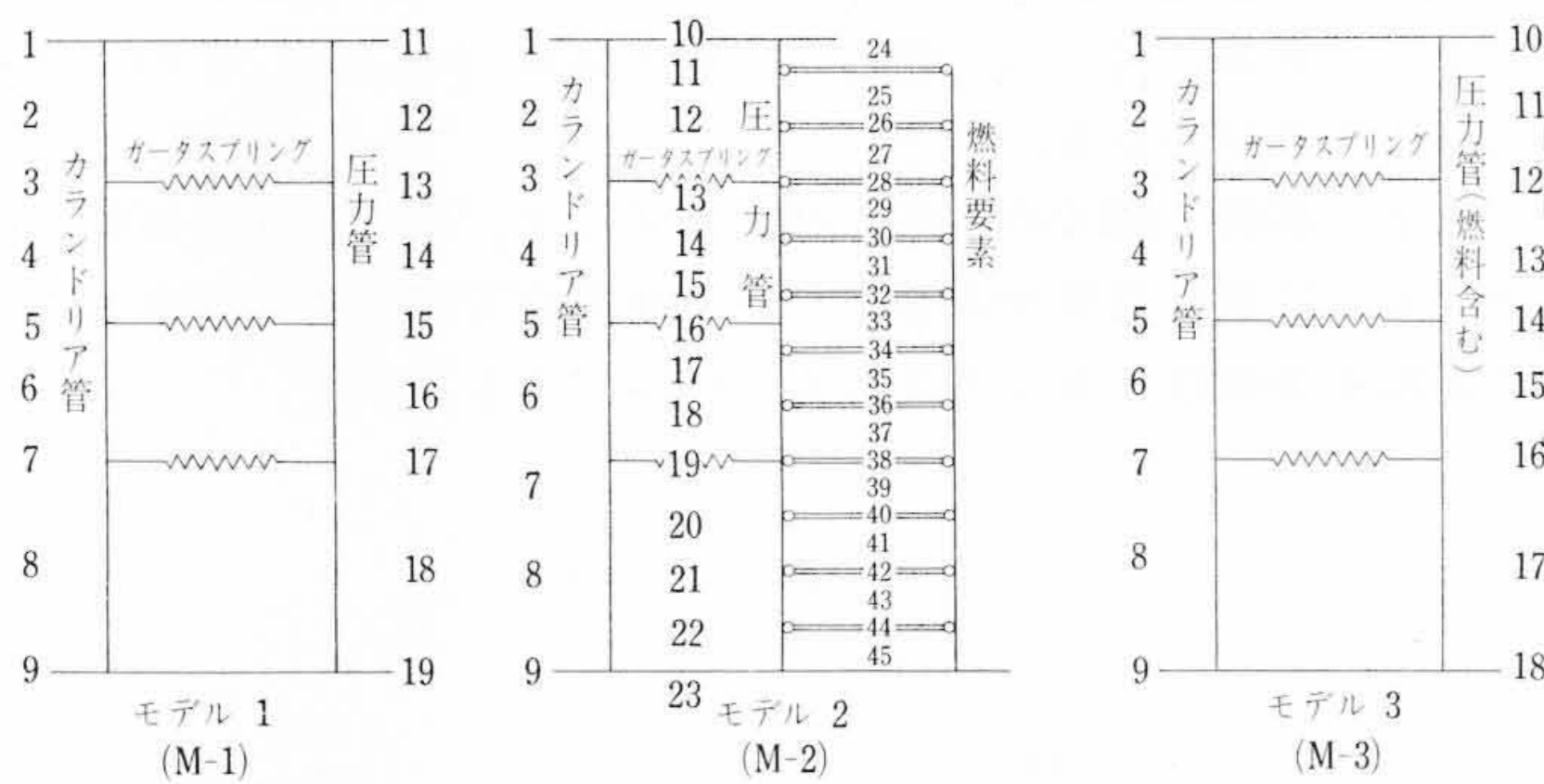


図12 理論解析モデル

## 6.4 解析結果の検討と実験値との比較

前項で示したそれぞれの実験結果のなかから、おもな固有振動数だけをピックアップしてみると表7のようになる。実験項目によっては同じ対象でも若干固有振動数が違っている場合もあるが、表には平均的な値をとってある。また、水中での管群のピーク値から求めた値は連成効果のため、単体の場合と値が違う場合があるので、表からは除いた。

表7 主要固有振動数一覧表

| No. | 構成要素, 周囲状況            | 実験値 (Hz)    | 計算値 (Hz) |
|-----|-----------------------|-------------|----------|
| ①   | カランドリア管・圧力管結合体(空水)    | 12.3        | 12.5     |
| ②   | カランドリア管・圧力管結合体(充水)    | 7.3         | 7.2      |
| ③   | カランドリア管・圧力管結合体+燃料(空水) | 18.3 (14.2) | 15.3     |
| ④   | カランドリア管・圧力管結合体+燃料(充水) | 7.4         | 6.0      |

注: ( )内は小振幅時

まず、①に関してはこの実験とは別にカランドリア管、圧力管の振動実験を行なって正確な材料定数を求め、図14のモデルM-1で計算を行なった。計算結果は両端固定条件で27.1Hz、両端支持条件では12.5Hzであった。管の境界条件は各種実験の結果、支持の条件に近いことがわかっており、実験結果も12.3Hzとなっているので、M-1のモデル化は正しいものと思われる。

②に関してはM-1モデルの管内の水を死荷重として加え、さらに前6.2の見掛け質量を考慮した結果は両端支持とした場合7.2Hzとなり、これも実験結果とよく一致している。

③はかなり重要であるが、図7にもあるように振幅によって実測値にかなりの差が出る。これは結合系の非線形性によるものと思われる。この種のものを線形モデル化するのはむずかしいが、M-2のモデルが最も現実に近いものと思われる。結果は両端支持の場合で15.3Hzとなった。実験値にもかなりの幅があるので、簡単に比較するのはむずかしいが、ほぼ妥当な値のように思われる。

最後に④について検討する。一般に狭いすきまに水を満たした二重構造物は、内部構造の振動が現われにくく、死荷重としてもよいので、この場合はM-3モデルが適用できる。結果は6.0Hzで実験値より若干低い値となった。これらの計算値を表7に実験結果と対比させて示した。

次に、5.4で述べた剛支持の結果について検討する。溶接の結果、上端はほぼ固定に近い状態になっていると思われるので、M-2、M-3の解析モデルで境界条件だけを固定-支持とすると、それぞれ21.0Hz、9.3Hzという結果を得た。実験結果はそれぞれ21.6Hz、9.5Hz(ただし、水中連成データ)なので、比較するとかなりよ