

3 重伝熱管の振動特性評価

(研究報告)

2003年2月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2003

3重伝熱管の振動特性評価 (研究報告)

大平 博昭*、荒 邦章*
堀 徹**、此村 守**

要 旨

高速炉の実用化戦略調査研究の中で、ナトリウム冷却大型炉のコストパフォーマンス向上策として 2 次系の簡素化が検討されている。2 次系の簡素化案としては、鉛ビスマス熱媒体チューブ・3 重管型蒸気発生器の採用が検討されている。本蒸気発生器の伝熱管は、水管(内管)とナトリウム管(外管)の間に鉛ビスマスを封入し、内管と外管の間には隔壁管を設けて片側管の破損時の影響を緩和する 3 重管方式が採用されている。

本研究では、間隙部に非圧縮性流体が封入された3重伝熱管の振動特性について、内/外/隔壁管の流体連成による影響、伝熱管支持ピッチや試験体長さの影響、3重伝熱管ギャップの影響、及び隔壁管リブ形状の影響を評価するとともに、振動解析結果の妥当性を確認することを目的として3重伝熱管を用いた振動試験を実施した。

試験の結果、気中では微小振動領域で3管の変位に差が生じたものの、水中では微小振動領域から3管が一体で振動し、リブ仕様の差による振動特性の差は生じなかった。またギャップが小さい場合は3管の変位がより良く一致した。したがって、間隙部に非圧縮性流体が封入された3重伝熱管の構造上の分離は困難であることがわかった。さらに、これらの振動試験結果を評価するため振動応答解析を実施し、各振動試験ケースでの固有振動数、振動モード、及び応答変位についてまとめ、振動試験結果と比較したところ、試験結果と解析結果は比較的良い一致を示すこと、及びギャップ量の影響についても、全体的な挙動は解析で再現できることがわかった。

以上の結果から、本研究において流体連成効果を考慮した振動解析は妥当と考えられ、同モデルを用いて実施した昨年度の実機3重伝熱管振動特性評価の結果は妥当と判断できることがわかった。

* 大洗工学センター 要素技術開発部 次世代機器研究グループ

** 大洗工学センター システム技術開発部 FBR システムグループ

Vibration Tests of Triple Wall SG Tubes

H. Ohira*, K. Ara*

T. Hori**, M. Konomura**

Abstract

In order to realize a fast reactor of commercial size, several plant concepts simplified secondary sodium system are studied. Among these, a steam generator (SG) with triple wall tubes is studied in this report. In this SG, lead-bismuth is filled between the annular part of an inner and an outer tubes. A separating tube is additionally inserted between the two tubes. For the design studies, it is necessary to apply the vibration characteristics of these triple wall tubes.

In this study, six cases of vibration tests were performed with triple wall tubes in order to evaluate the vibration characteristics. The test parameters included the rib shape, the gap size, the support pitch and the fluid filled between the gaps. The numerical analysis for the vibration responses were also performed to evaluate the natural frequency, the vibration modes and the response displacements. The following results were obtained from the above tests and numerical analysis:

- (1) When the gaps were filled with water, the inner, the outer and the separating tubes showed almost the same displacements in all vibration frequencies, while different displacements were measured in the regions of smaller displacements in the case gaps were not filled with water,
- (2) The displacements of the three kinds of tubes with the narrow gaps were closer to each other than those of three tubes with the standard gaps, and
- (3) Since the results of the numerical analysis agreed well with those of the vibration tests in all the test cases, the analytical models for the vibration were estimated to be reasonable.

* Innovative Component System Research Group, Advanced Technology Div., OEC

** FBR System Engineering Group, System Engineering Technology Div., OEC

目 次

要 旨	i
Abstract	ii
目 次	iii
図・表リスト	iv
第1章 緒 言	1
第2章 実施内容	2
第3章 3重伝熱管の振動特性試験	
3.1 試験条件の設定	4
3.2 試験装置	5
3.3 振動特性試験体	7
3.4 試験方法	7
3.5 振動試験結果	8
第4章 振動特性解析	
4.1 目的	11
4.2 解析条件	11
4.3 解析結果	12
4.4 評価	12
第5章 まとめ	14

図・表リスト

表

表 2-1	試験パラメータ	15
表 3-1	伝熱管仕様	16
表 3-2	流力振動による振動振幅の評価(3管の剛性考慮)	17
表 3-3	流力振動による振動振幅の評価(外管の剛性のみ考慮)	18
表 3-4	振動特性試験用計測器(レーザドップラー振動計)	19
表 3-5	振動特性試験用加振器(電磁式加振器)	20
表 3-6	振動特性試験 試験ケースと試験条件	21
表 3-7	ケース 1-1 の振動試験結果	22
表 3-8	ケース 1-2 の振動試験結果	23
表 3-9	ケース 1-3 の振動試験結果	24
表 3-10	ケース 2 の振動試験結果	25
表 3-11	ケース 3 の振動試験結果	26
表 3-12	ケース 4 の振動試験結果	27
表 3-13	参考試験結果	28
表 4-1	リブ模擬バネ定数	29
表 4-2	解析ケース	30
表 4-3	固有振動数及び刺激係数一覧	31
表 4-4	周波数応答解析結果(計測点の変位応答)	32
表 4-5	固有振動数の比較	33
表 4-6	バネ定数のパラメータ解析結果	33
表 4-7	変位の比較	34

図

図 2-1	水中振動試験装置の概念	35
図 2-2	試験装置概要	36
図 2-3	試験ケース	37
図 3-1	支持スパンと流力振動による振幅の関係	38
図 3-2	3重伝熱管振動特性試験装置	39
図 3-3	3重伝熱管振動特性試験装置状況(1)	40
図 3-4	3重伝熱管振動特性試験装置状況(2)	41
図 3-5	3重伝熱管振動試験体支持構造	42
図 3-6	3重伝熱管振動試験体 計測孔/導排水孔構造	43
図 3-7	3重管振動試験体 A (内外面螺旋リブ付き隔壁管)	44
図 3-8	3重管振動試験体 C (内外面直線リブ付き隔壁管/標準ギャップ)	45
図 3-9	3重管振動試験体 D (内外面直線リブ付き隔壁管/狭小ギャップ)	46
図 3-10	3重管振動試験体 E (竹節型スペーサ付き隔壁管)	47
図 3-11	試験ケースと供試体及び試験目的	48
図 3-12	供試体 A の気中振動特性(支持スパン 1m)	49
図 3-13	供試体 A の水中振動特性(支持スパン 1m)	50
図 3-14	供試体 A の水中振動特性(支持スパン 2m)	51

図 3-15	供試体 C の水中振動特性	52
図 3-16	供試体 D の水中振動特性	53
図 3-17	供試体 E の水中振動特性	54
図 4-1	解析モデル	55
図 4-2	材料物性値(端栓付ピン支持)	56
図 4-3	材料物性値(3管独立ピン支持)	57
図 4-4	支持条件(端栓付支持ピン)	58
図 4-5	支持条件(3管独立ピン支持)	59
図 4-6	モード図(ケース 1 内外螺旋リブ バッフル板ピッチ 1m 気中試験)	60
図 4-7	モード図(ケース 2 内外螺旋リブ バッフル板ピッチ 1m 水中試験)	61
図 4-8	モード図 (ケース 2' 内外螺旋リブ バッフル板ピッチ 1m 水中試験 端部3管独立支持)	62
図 4-9	モード図(ケース 3 内外螺旋リブ バッフル板ピッチ 2m 水中試験)	63
図 4-10	モード図(ケース 4 内外直線リブ(標準ギャップ) バッフル板ピッチ 1m 水中試験)	64
図 4-11	モード図(ケース 5 内外直線リブ(狭小ギャップ) バッフル板ピッチ 1m 水中試験)	65
図 4-12	モード図 (ケース 6 内外竹節型リブ バッフル板ピッチ 1m 水中試験)(1/4)	66
図 4-12	モード図 (ケース 6 内外竹節型リブ バッフル板ピッチ 1m 水中試験)(2/4)	67
図 4-12	モード図 (ケース 6 内外竹節型リブ バッフル板ピッチ 1m 水中試験)(3/4)	68
図 4-12	モード図 (ケース 6 内外竹節型リブ バッフル板ピッチ 1m 水中試験)(4/4)	69
図 4-13	モード図 (ケース 6' 内外竹節型リブ バッフル板ピッチ 1m 水中試験)	70
図 4-14	周波数応答解析結果(計測点の変位応答)(1/2)	71
図 4-14	周波数応答解析結果(計測点の変位応答)(2/2)	72
図 4-15	変形図 周波数応答解析(1/2)	73
図 4-15	変形図 周波数応答解析(2/2)	74

第1章 緒言

高速炉の実用化戦略調査研究では、ナトリウム冷却大型炉のコストパフォーマンス向上策として2次系の簡素化が検討されている。この2次系の簡素化概念の候補として、鉛ビスマス熱媒体チューブ・3重管型蒸気発生器(以後、3重管SG)が、経済性及び安全性の観点から選択され、平成13年度から開始されたフェーズ2において設計研究が実施されている。本設計研究において上記の3重管SGの成立性を評価するためには、伝熱管破損時の安全シナリオの検討、鉛ビスマスリーク対応の明確化、3重管SG概念構築等多くの解決すべき課題を有している。

平成13年度には、要素研究において上記3重管の内管及び外管と隔壁管との間隙を確保するためのリブ(スペーサ)形状を螺旋型、直線型、及び竹節型の3種類に絞込み、伝熱管の試作を行うことにより、これらのリブ形状が隔壁管に加工可能であることを確認した。一方、設計研究では上記3重伝熱管の振動挙動に関する解析評価を行い、上記3種類のリブ形状について、内管/外管/隔壁管の間隙部に鉛ビスマスを封入した場合には3管が一体となって振動するとともに、内外管の発生応力比は大差ない結果が得られた。しかし、上記の解析モデルはこれまでに検証が行われていなかったため、実験結果により解析モデル及び結果の妥当性を確認する必要がある。

以上から、本研究では上記の3種類のリブ形状を持つ3重伝熱管の間隙部に非圧縮流体が封入された場合の振動特性を、昨年度に試作した3重伝熱管振動特性試験により把握するとともに、本実験結果と解析結果とを比較し、本解析モデル及び解析結果の妥当性を確認することを目的としている。

第2章 実施内容

2.1 目的

平成13年度に「3重伝熱管の製作性評価」¹⁾において3重伝熱管の試作を行い製作性の評価を行った。本報告では、試作した上記の3重伝熱管を用いて気中及び水中における振動試験を実施し、3重伝熱管の間隙部に非圧縮性流体が封入された場合の、内／外／隔壁管の流体連成による影響、伝熱管支持ピッチや試験体長さの影響、3重伝熱管ギャップの影響、及び隔壁管リブ形状の影響を評価するとともに、振動解析結果の妥当性を確認することを目的としている。

2.2 3重伝熱管の振動特性評価

(1) 試験内容の検討

主として以下の項目を検討し、振動試験の詳細内容を検討する。

(a) 試験体構造

- ・3重伝熱管試験体上下部固定端構造
- ・3重伝熱管計測孔位置と寸法、加工法
- ・3重伝熱管試作リブ付き管のギャップについての評価

(b) 試験装置

- ・試験水槽改造設計(試験体、計測器及び加振器取合構造)
- ・3重伝熱管試験体上下部固定構造
- ・3重伝熱管試験体中間部固定構造(バッフル板支持構造、支持架台構造)
- ・バッフル板実機模擬構造(ギャップ模擬の可否検討)

(c) 計測手法

- ・水中(アクリル窓越し)における3重管内部振動計測精度
- ・計測器支持架台構造と計測孔位置微調整機構

(2) 試験装置の設計・製作

上記の(1)で検討した詳細内容に基づき、試験装置の設計・製作を行う。図2-1及び図2-2に試験装置の概念を示す。

(3) 気中・水中振動試験

図2-3に示した試験ケース(4ケース)について、振動特性試験を実施する。ケース1については気中試験及び水中試験を実施する。その他のケースは水中試験のみ実施した。表2-1に試験パラメータを示す。

(4) 試験結果の評価

レーザードップラー振動計により測定された振動特性データをスペクトル分析して固有振動数と減衰率について評価するとともに、測定された振動速度を積分処理して振動変位を求め、固有振動数との関連性について評価する。

また、内／外／隔壁管の流体連成による影響、伝熱管支持ピッチや試験体長さの影響、3重伝熱管ギャップの影響、及び隔壁管リブ形状の影響を評価する。

(5) 振動特性解析

上記(3)に示した各試験ケースにおける振動試験結果と振動解析結果とを比較・評価し、振動解析モデルの妥当性を確認する。

第3章 3重伝熱管の振動特性試験

3.1 試験条件の設定

ここでは、実機3重管SGでの条件で発生する伝熱管振動を検討し、3重伝熱管の振動特性試験の試験条件を設定した。

(1) 評価式

軸流(並行流)中に置かれた円筒の流動振動振幅(y)は、次の Paidoussis の式(3-1)を用いて評価した。

$$\frac{y}{D} = 5 \times 10^{-4} K \alpha_1^{-4} \left(\frac{u^{1.6} \varepsilon^{1.8} \text{Re}^{0.25}}{1+u^2} \right) \left(\frac{D_h}{D} \right)^{0.4} \left(\frac{\beta^{2/3}}{1+4\beta} \right) \quad (3-1)$$

ただし、 Re はレイノルズ数、 D は円筒径、 D_h は等価直径、及び α_1 は円筒の無次元1次固有値を表し、ピン支持円筒の場合は $\alpha_1 = \pi$ 、完全固定円筒の場合は $\alpha_1 = 4.73$ である。また、 K は非常に静かな流れの場合には1、工業レベルの流れの場合には5となる定数である。さらに、上式(3-1)で用いた無次元流速(u)、細長比(ε)、質量比(β)は、それぞれ式(3-2)、(3-3)及び(3-4)で定義した。

$$u = \sqrt{\frac{\rho A}{EI}} UL \quad (3-2)$$

$$\varepsilon = L/D \quad (3-3)$$

$$\beta = \frac{\rho A}{\rho A + m} \quad (3-4)$$

ここで、 ρ は流体の密度、 A は円筒断面積、 E は円筒の縦弾性係数、 I は円筒の断面2次モーメント、 U は流体の速度、 m は円筒単位長さ当りの質量、及び L は支持スパンである。

(2) 評価条件

円筒の流動振動振幅を求めるための伝熱管仕様は、表 3-1 に示す寸法とし、式(3-1)の計算では支持スパンをパラメータとした。また、伝熱管の単位長さ当りの質量については、3管の質量と間隙部の鉛ビスマスの質量を合計した値とし、伝熱管の剛性については、3管の剛性を考慮した場合と、外管のみの剛性を考慮した場合の2種類について評価した。

(3) 評価結果

3管の剛性を考慮した場合を表 3-2 に、外管のみの剛性を考慮した場合を表 3-3 に示す。また、支持スパンと振動振幅の関係を図 3-1 に示す。図から、実機で想定される支持スパン 1 m 程度では、流力振動による振幅は $4 \mu\text{m}$ 程度の非常に微小な振幅となった。また、外管のみの剛性を考慮して、隔壁管と内管の剛性を期待しない場合は、振幅が約 1.4 倍の値となった。いずれにしても通常の実機条

件での流力振動振幅は、 μm のオーダーであることがわかった。一方、支持板1枚が欠落等により機能喪失した場合を想定すると、支持スパンが 2 m となるが、この場合は通常の振幅に対して、約 10 倍の振幅 (3管の剛性考慮した場合で $44\ \mu\text{m}$ 、外管のみの剛性を考慮した場合で $62\ \mu\text{m}$) となることがわかった。

(4) 共振振幅

非常に厳しい条件として、何らかの原因で流力振動により伝熱管が共振した場合を想定し、伝熱管の最大変位量を次式で評価した。

$$X_{\max} = \frac{\alpha P_{\max}}{4\pi\delta_e m f^2} = \frac{\alpha\rho_s C_L U^2 D}{8\pi\delta_e m f^2} \quad (3-5)$$

ここで、 α は変換係数 (両端支持で一様荷重の場合 1.270)、 ρ_s はナトリウム側密度、 C_L は揚力係数、 δ_e は管の対数減衰率である。また、 f は式 (3-6) で定義される固有振動数である。

$$f = \frac{\alpha_1^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (3-6)$$

式 (3-5) より、実機3重管の共振振幅は約 $1.1\ \text{mm}$ が得られた。この値は、通常の流力振動の振幅と比較して、2桁以上大きい値である。

(5) 試験条件の設定

以上の検討結果から、実機で想定される振幅範囲は保守側に見ても数 μm から $1\ \text{mm}$ の範囲であることがわかった。一方、伝熱管の振動状況は、3重伝熱管の内管-隔壁管、隔壁管-外管の間のギャップ ($0.5\ \text{mm}$ または $0.6\ \text{mm}$) を中心に変化すると想定されるため、振動試験条件として振幅は、3重伝熱管のギャップ値を中心に、パラメータとし、微小振幅での振動挙動と、共振時などの異常振動時の振動特性に対するデータ取得を目標として設定した。

3.2 試験装置

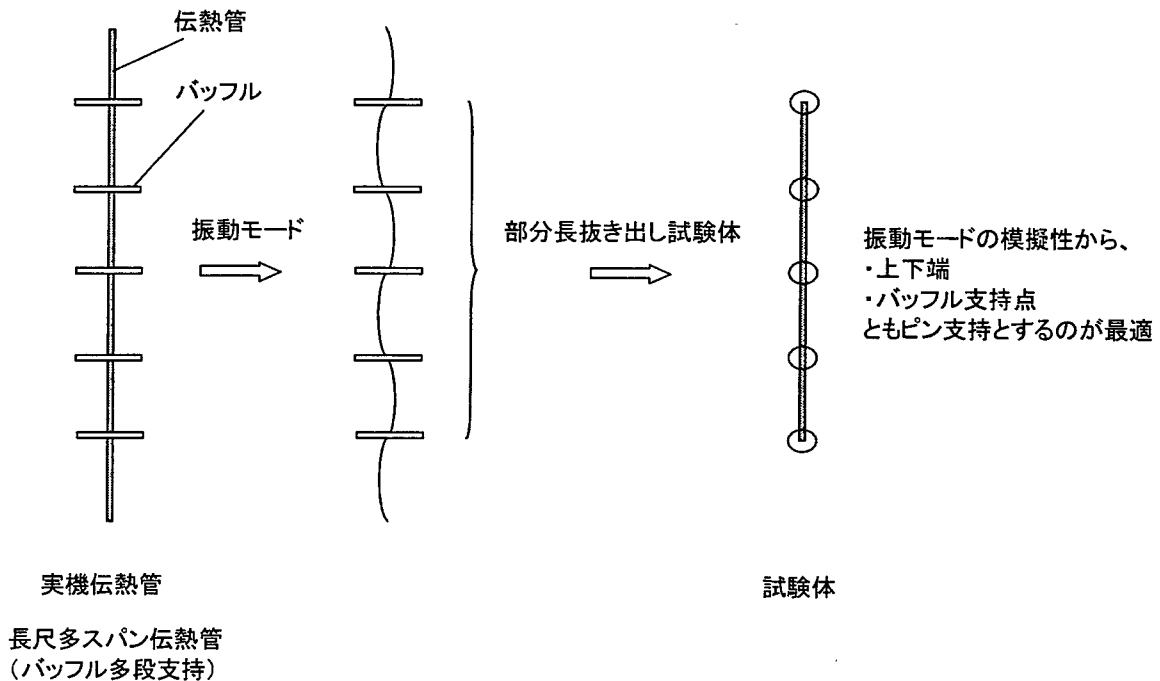
3重伝熱管振動特性試験に使用した試験装置を図 3-2 に示す。水中振動特性を計測することを念頭に試験体全体を水中に設置するための水槽及び試験体支持構造物と計測器支持架台、加振器支持架台等で試験装置を構成した。

水槽は内寸が $600\ \text{mm}$ の角型、高さ約 $4800\ \text{mm}$ のステンレス製で必要箇所はアクリル窓を設けて内部が観察できる構造とした。また、試験体支持構造物は水槽中心部に3重伝熱管供試体を支持する機能を有し、試験体上下の固定支持板、3段のバッフル板を設置した。なお、3段のバッフル板は取外し可能な構造とした。

計測器支持架台及び加振器支持架台は水槽側構造物と別架台に設置され、スパン長変更の試験ケースに対応できるように上下に可動構造とした。以上の試験装置の状況を図 3-3 及び図 3-4 に示す。

(1) 試験体の支持方式

実機伝熱管は長尺多スパン(バッフル多段支持)であり、下図のような振動モードが最も生じ易いと考えられる。しかし、本試験体は実機伝熱管の一部を抜き出した体系となるため、振動モードをできる限り実機の条件に近づけるための支持条件とする必要がある。したがって、下図に示したように、試験体の上下端及びバッフル支持点ともにピン支持方式を採用することとした。



具体的な3重伝熱管上下端部支持構造及びバッフル板支持構造を図 3-5 に示す。上下端は供試体端栓部に設けた支持ピン(ピボット先端球面 SR1 mm)と試験装置側のピボット受け(球面 SR5 mm)により、また、バッフル板支持は外周 3 方向から止めネジ($\phi 6$ mm 平面)により支持した。

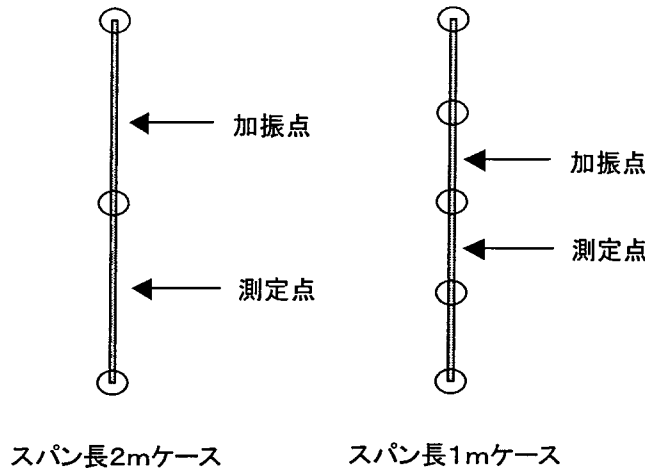
(2) 試験体の単体構造

試験体の上下端支持構造をピン支持とするため、3重伝熱管は上下端を端栓で一体化構造とした。また、3重伝熱管隔壁管及び内管の振動計測用の計測孔を加工した。内管計測孔は外管、隔壁管を貫通し、内管表面に達する $\phi 5$ mmの穴で隔壁管計測孔は外管を貫通する $\phi 5$ mmの穴である。なお、穴の底面はレーザドップラ速度計の反射信号が安定するように平面加工を施した。

一方、3重管各ギャップ内部に水を導入し、排出するための導水孔を上下端部に設けた。試験体上端部の導水孔は、排気孔として機能するよう設けたものである。試験体に設けた振動計測孔、排気/排水/導水孔の状況を図 3-6 に示した。

(3) 加振点、測定点

加振点及び測定点は、下図に示した支持点間の中央とした。



3.3 振動特性試験体

3重伝熱管振動特性試験に供試する試験体とその使用目的を以下に示す。

- (a) 内外面螺旋リブ付き隔壁管(標準ギャップ)仕様
 - ・今回実施する振動特性試験のリファレンスケースとして使用する供試体で、3重伝熱管の振動特性における流体連成の影響、伝熱管支持ピッチの影響、リブ形状の影響を確認する(図 3-7)。
- (b) 内外面直線リブ付き隔壁管(標準ギャップ)仕様
 - ・3重伝熱管の振動特性におけるリブ形状の影響、伝熱管ギャップの影響を確認する(図 3-8)。
- (c) 内外面直線リブ付き隔壁管(狭小ギャップ)仕様
 - ・3重伝熱管の振動特性における伝熱管ギャップの影響を確認する(図 3-9)。
- (d) 外面竹節型スペーサ付き隔壁管、内管(標準ギャップ)仕様
 - ・3重伝熱管の振動特性におけるリブ形状の影響を確認する(図 3-10)。

試験ケースと供試体の関連を図 3-11 にまとめて示す。計測点が2段となるのは、伝熱管支持ピッチの影響を確認する試験においてバッフル板支持スパンを変更した場合の振動モードの変化に対応するためである。

3.4 試験方法

(1) 計測器

3重伝熱管振動特性を計測するレーザドップラー振動計仕様を表 3-4 に示す。レーザドップラー振動計は、供試体振動計測孔にビーム照射位置を合わせられるよう、上下・左右可動のステージ上に固定して使用した。

(2) 加振器

3重伝熱管を加振する電磁式加振器仕様を表 3-5 に示す。3重伝熱管供試体と加振器間はコネクティングロッドにより連結し、水槽壁の貫通部はベローズを使用する。

(3) 試験条件

3重伝熱管振動特性試験条件を試験ケースごとにまとめて表 3-6 に示す。

(4) 測定方法

3重伝熱管振動特性試験は、試験条件に合わせて供試体、試験装置を設定後、供試体を所定の加振力で周波数掃引加振し、振動速度(振動振幅)応答を計測した。また、強制加振の振動周波数は、約 100Hz までの掃引とし、振動速度(振動振幅)/周波数応答特性を求める。3重伝熱管実機条件での通常の流力振動振幅は数 μm オーダーと微小であることが推定された。したがって、試験では、この結果を参考にして、微小振幅条件を中心とするが、加振力を増加し測定可能な範囲で振幅レベルをパラメータとして、周波数掃引により卓越振動周波数(固有振動数)を計測した。

3重伝熱管の外管(Na管)、中管(隔壁管)、内管(水管)個々の振動特性を計測するため、それぞれの管にレーザービームが到達するように計測孔が3箇所設けられている。試験ではこれら3段の計測孔に合わせてレーザドップラ振動計を移動し計測を繰り返した。なお、水中試験における水温は常温(上水道水)とした。

3.5 振動試験結果

3重伝熱管の周波数掃引加振による振動振幅/周波数応答及び振動特性の結果を試験ケースごとに以下に示す。

(1) 試験ケース 1-1

供試体 A の気中における振動試験結果を表 3-7 及び図 3-12 に示す。本供試体は内外螺旋リブ形状を有する標準ギャップ仕様の3重伝熱管である。図(a)では、共振振幅が約 0.5 mm 以下の微小振動領域では、内/中/外管の共振周波数に差が生じるものの、共振振幅が大きくなると 3 管は一体振動を起こし、その固有振動数は約 41Hz となった。また、図(b)における加振力に対する共振振幅の大きさは、内管 \geq 中管 \geq 外管の傾向、すなわち内管の方が振れやすい振動モードであり、加振力 3 kgf において内管 1.6 mm に対し外管 0.9 mm であった。

(2) 試験ケース 1-2

供試体 A の水中における振動試験結果を表 3-8 及び図 3-13 に示す。ケース 1-1 の伝熱管と同仕様にも拘わらず、共振振幅が約 1 mm の時の固有振動数は約 38Hz に低下した。また、3重伝熱管のギャップ内の水による流体連成効果により、振動振幅が小さい領域から3管一体振動を示した。本結果をケース 1-1 の結果(図 3-12)と比較すると、外管の共振振幅は気中及び水中で大きな差はなかった(例えば、加振力 3 kgf において気中・水中とも約 0.9 mm)ものの、内管の共振振幅は大きく低下(例えば、加振力 3 kgf で気中約 1.6 mm、水中約 1.1 mm)した。なお、同一加振力での共振振幅の大きさは気中と同様に内管 \geq 中管 \geq 外管の傾向であった。

(3) 試験ケース 1-3

供試体 A において支持スパンを 2 m とした場合の、水中振動試験結果を表 3-9 及び図 3-14 に示す。本結果とケース 1-2 の結果(図 3-13)を比較すると、支持スパンが 1 m (ケース 1-2) の場合には共振周波数が約 38Hz であったのに対して、支持スパンを 2 m とすると共振周波数が約 13Hz に低下すること、支持スパンが 1 m 及び 2 m にかかわらず 3 管は一体振動を示すことがわかった。また、加振力が 0.5

kgfの時、支持スパンを1 mとすると外管の共振振幅は0.16 mm、支持スパンを2 mとした場合には1.16 mm と、同一加振力における共振振幅は支持スパン長に従い増加する結果となった。

(4) 試験ケース 2

供試体 C の水中における振動特性を表 3-10 及び図 3-15 に示す。本供試体は内外直線リブ仕様であり、本結果と内外螺旋リブ仕様の結果(ケース 1-2、図 3-13)を比較すると、螺旋リブ付き隔壁管、及び直線リブ付き隔壁管の両方で共振周波数に優位な差は生じていないことがわかる。また、同一加振力ではわずかに螺旋リブ仕様の方が共振振幅が大きい傾向となったものの、顕著な差とはならなかった。

(5) 試験ケース 3

供試体 D の水中における加振力と共振周波数及び振動振幅の特性を表 3-11 及び図 3-16 に示す。本供試体は内外直線リブ付き狭小ギャップ仕様の3重伝熱管である。本結果と内外直線リブ付き標準ギャップ仕様の結果(ケース 2、図 3-15)を比較すると、直線リブ付き隔壁管の標準ギャップ(ノミナル値 0.1 mm ギャップ)と狭小ギャップ(ノミナル値 0 mm ギャップ)による共振周波数に明らかな差は生じていないことがわかる。標準ギャップ仕様では水の流体連成効果により 3 管が一体振動をしているが、3 管の共振振幅には小さい差があるのに対して、狭小ギャップ仕様では 3 管の共振振幅は完全に一致しており、完全な一体構造物として振動していることがわかる。また、同一加振力では完全な一体振動をしている狭小リブの方が共振振幅が大きい傾向となった。

(6) 試験ケース 4

供試体 E (竹節型リブ)の水中における振動特性を表 3-12 及び図 3-17 に示す。竹節型リブ仕様の伝熱管では、加振力が 1 kgf 以上において外管の共振振幅が小さい傾向にあるものの、供試体 A (螺旋リブ)及び供試体 C (直線リブ)の結果(それぞれ、図 3-13 及び図 3-15)を比較すると、共振周波数は 3 管ともほぼ同じ特性であることがわかる。したがって、本仕様の伝熱管も 3 管が一体となって振動することがわかった。また、上記 3 種類のリブ形状による振動特性に相違は認められず、共振周波数は何れのリブ付き隔壁管も約 38Hz となった。さらに、同一加振力では、わずかに直線リブが共振振幅が小さい傾向にあるものの顕著な差は生じなかった。

(7) 参考試験

レーザドップラー速度計の出力チェックを行うため、レーザドップラー速度計と非接触微小変位計を用いて試験ケース 1-2 及び試験ケース 4 の外管振幅変位の計測を行った。結果を表 3-13 に示す。表から、周波数掃引試験時のレーザドップラー速度計による計測速度信号を変位に換算した計測値と、非接触変位計により直接計測した計測値は良く一致し、レーザドップラー速度計による変位計測に問題のないことを確認した。

(8) 考察

3 重伝熱管の固有振動数と共振振幅の関係において、共振振幅の増大に伴い固有振動数が低下する傾向が各試験ケースにおいて確認された。3 重伝熱管の振動特性において固有振動数の低下を生じる要因としては、構造的要因と周囲の流体から受ける抵抗力の二つが考えられる。

図 3-12 及び図 3-13 の気中及び水中振動特性の比較から、固有振動数の差は明らかであるが、振

幅の増大に対応して起きる振動数の低下はほぼ同程度であった。したがって、3重伝熱管の固有振動数が振幅増加に伴って低下するのは主に構造減衰と考えられる。

構造減衰は、摩擦のある系では大きくなる傾向にある。3重伝熱管の供試体構造及び試験装置で摩擦が生じ得るのは、内／中／外管の接触と外管の上下及びバップル板位置のピン抑え支持部である。このうち、外管支持部で振動試験中に外管とピンの間に滑りが生じることはほとんどないと考えられるため、主な摩擦要因はリブを介した3重の管の接触による摩擦効果と考えられる。

摩擦による仕事(振動エネルギーのロス)は、 $W \propto F \cdot \delta$ (W :仕事、 F :接触力、 δ :相対変位)の関係にあり、振動振幅が大きいほど F と δ が大きいため、 W が増加して減衰増につながっていると考えられる。このような振動振幅増大に伴う顕著な振動数低下は、3重伝熱管構造特有の挙動と考えられる。

第4章 振動特性解析

4.1 目的

3重伝熱管について隙間に充填した流体の連成効果を考慮し、振動試験結果の評価を行うことを目的として固有値解析及び周波数応答解析を実施した。本章では、この解析についてまとめる。

4.2 解析条件

振動解析の条件は、振動試験条件と同一に設定した。詳細条件を以下に記述する。

(1) 解析モデル

(a) 解析コード : FINAS Ver.14

(b) 使用要素 : 3次元ソリッド

(c) 解析モデル

解析モデル全体図を図 4-1 に示す。

- ① 解析モデル全長 : 4.2 m
- ② バッフル板 : 3枚(1.0 m ピッチ時)、1枚(2.0 m ピッチ時)
- ③ バッフル板ピッチ : 1.0 m、及び 2.0 m
- ④ 伝熱管 : 構造部材(SUS316)としてモデル化する。
- ⑤ 封入流体 : 流体としてモデル化する。水中試験では内管内部の水、外管外部の水も考慮する。
- ⑥ リブ形状 : 1次元線形バネでモデル化する(報告書;「3重伝熱管の製作性評価(JNC TN9410 2002-005)」の解析モデル化方法と同一)。

(d) 物性値評価温度

気中試験、水中試験ともに室温で評価するものとする。入力した材料物性を図 4-2 及び図 4-3 に示す。

(2) 境界条件

(a) 拘束条件

① 支持条件

支持条件を図 4-4 及び図 4-5 に示す。伝熱管上下端は、端栓付ピン支持(リファレンス)と3管独立ピン支持の両ケースに対して解析を行う。端栓付ピン支持は、上下端に SUS 円盤を取り付け、この円盤をピン支持することでモデル化する。また3管独立ピン支持は、3管別々に上下端をピン支持することでモデル化する。さらにバッフル板位置の拘束条件は、ピン支持とする。

② リブ模擬バネ定数

リブ模擬バネ定数を表 4-1 に示す。本値は、上記の報告書に記述した解析モデルの値と同一である。

③ 減衰率

減衰率については、振動試験結果から半値幅法で求め 0.03(バッフル板ピッチ 2 m の場合は 0.06)と設定した。ここで半値幅法とは、周波数と振幅のグラフ上で、共振振幅の $1/\sqrt{2}$ になる点の

周波数を f_1 、 f_2 とし、共振周波数を f_0 とすると、 $(f_2 - f_1)/2f_0$ で求める方法である。

(b) 入力

①加振力

加振力は、外管に 9.8 N(1.0 kgf) (バッフル板ピッチ 2 m 時は 0.98 N(0.1 kgf) とする。加振周波数は、2～100 Hz の掃引を基本とする。掃引ステップは 0.5 Hz とし、掃引範囲は解析時間を考慮し固有値近辺に設定する。

②加振位置

試験で電磁加振機を設置した位置、すなわち下記の位置とする。

- ・バッフル板ピッチ 1 m のとき伝熱管中心から上に 0.5 m の外管
- ・バッフル板ピッチ 2 m のとき伝熱管中心から上に 1 m の外管

(3) 解析ケース

解析ケースを表 4-2 にまとめて示す。

4.3 解析結果

固有値解析結果として、固有振動数及び刺激係数を表 4-3 に示す。また各ケースのモード図を図 4-6 から図 4-13 に示す。一方、周波数応答解析の結果として、応答振幅を表 4-4、変位と周波数の関係を図 4-14、及び共振周波数での応答変位を図 4-15 に示す。

4.4 評価

固有値解析結果と振動試験結果を、比較して表 4-5 に示す。

(1) 全般

1次モードとして想定される弓形の振動モードでの固有振動数と振動試験結果は、良く一致している。刺激係数については、弓形変形のモードで必ずしも最大となっていないが、周波数応答解析結果を見ると弓形の変形モード固有値近辺で共振が生じていることがわかる。計測位置は、弓形モードを想定した位置に設定しており、計測位置の変位で共振を判断しているため、振幅が大きくなる周波数が弓形モードの周波数に等しくなったものと想定される。

全般的に解析結果の方が、共振周波数が高めの結果となっている。そこで板厚のばらつき等の形状不整による影響を検討した。その結果、板厚が設計公差程度のばらつきを有すると想定した場合、固有値で±7%程度の差が生じることがわかった。この差を考慮すると、解析結果と実験結果は、ほぼ一致していると考えられる。

減衰率については、試験結果から求めた 3%(2 m スパンの場合は 6%)の値を用いている。配管の場合で 0.5～2.5%、燃料集合体で 7～10%、蒸気発生器伝熱管の場合で 6%程度を設計値として使用している。設計値は、基本的に保守側の小さな値が採用される。3 重伝熱管の場合は、管とリブの接触による損失及び摩擦による損失が存在し、構造減衰が大きくなる体系であることから考えて妥当な値と考えられる。水中と気中で同一の値となっているが、これは管とリブの接触、摩擦による影響が支配的であるためと考えられる。

(2) 気中試験

3管の変位について、試験では差が観測されているが、解析では3管同一という結果となった。これは加振点での振幅がギャップ量と比較して微小な振幅であり、ギャップの範囲で振動するため、内管一隔

壁管、隔壁管－外管の間に設定したバネ定数が、実際の挙動より過大であったためと考えられる。ギャップ範囲の振動ではバネ定数はゼロでなければならないためである。そこでバネ定数の影響を確認するためのパラメータ解析を実施した。バネ定数を順次小さくした場合の固有値解析結果を表 4-6 にまとめた。これらの結果はバネ定数の影響は小さいことを示しているが、極微小振動で接触が起らなければバネ定数はゼロと見なせることから、接触条件(接触の有無)が、気中試験と解析結果に差が生じる原因の1つと想定される。解析では常時接触を想定したのに対して、実際の試験では接触せずに振動している状態が存在する。水中では封入された水の影響により、このバネ定数の振動特性に与える影響は無視できるものと考えられる。なお、3管の変位の平均値を見ると、試験と解析は良く一致していることがわかる。

(3) 水中試験

(a) 螺旋、直線リブ

水中のケース(解析ケース2、4、5)については、互いに良く一致した。このことは、水中であることによりリブ形状の影響がほとんど無視できることが示されていると考えられる。変位について試験結果と比較して表 4-7 に示す。変位についても解析結果と実験結果は良く一致した。

(b) 竹節型リブ

水中のケースであっても解析ケース6の竹節型については、外管 0.25mm に対して内管 0.42mm と 1.6 倍の差が生じた。一方、振動試験結果ではこのような差は見られなかった。この原因として、竹節型では節が無い非接触部が長いこと、実際の供試体では接触していた可能性が考えられる。節と節の間が接触していた場合を想定した解析を解析ケース6'として実施した。その結果、固有値、振動モード等は他のリブ形状とほぼ同一の結果となり、試験結果の変位とも良い一致を示した。したがって試験では一部接触が生じていたものと想定される。

(c) 支持ピッチ

バッフル板支持ピッチを2mとした解析ケース3については、固有値について試験結果と解析結果の差が3割程度と他のケースと比較して大きく、また解析結果の方が小さい値となった。この原因として2mピッチの試験では、2スパン体系であり片側が端栓で支持されている構造であるため、支持ピッチ 1m のケースと比較して端部の影響を受けやすいことに関係していると想定される。

(d) ギャップ量

解析ケース4及び5において、ギャップ量の差を比較すると、試験では各ケースとも3管の変位が異なったのに対して、解析結果では全ケースで3管がほぼ同一振幅となった。このことは、解析においてギャップの影響が完全には再現できていなかったためと考えられるが、全体的な振動挙動については、解析結果は実験結果を比較的良く再現できたと考えられる。

(e) 両端の支持方法

振動試験では、端栓により両端で3管を溶接固定している。一方、実機伝熱管の一部を取出した供試体と考えた場合、3管は独立で単純支持されていると想定される。実機の支持方法を想定した解析ケース2'と試験体を模擬した解析ケース2の両ケースを比較すると、両者に大きな差はない結果となった。したがって、今回の振動試験結果は、実機伝熱管の一部を取出した挙動を表していると考えられる。

第5章 まとめ

3重伝熱管の振動特性を評価するために、3重伝熱管を用いた水中振動試験を実施した。試験では、リブ仕様(螺旋型/直線型/竹節型)、管-管ギャップ(標準/狭小)、支持ピッチ(1 m/2 m)、及び封入流体(気中/水中)をパラメータとして、全長 4.2 m の SUS316 製 3 重伝熱管を用いた振動試験を行い、以下の結果が得られた。

- (1) 気中では微小振動領域で3管の変位に差が生じたものの、水中では微小振動領域から3管一体振動し、リブ仕様の差による振動特性の差は生じないことがわかった。
- (2) ギャップが小さい場合は3管の変位がより良く一致することがわかった。

さらに、これらの振動試験結果を評価するため振動応答解析を実施し、各振動試験ケースでの固有振動数、振動モード、及び応答変位についてまとめ、振動試験結果と比較したところ、試験結果と解析結果は比較的良い一致を示すこと、及びギャップ量の影響についても、全体的な挙動は解析で再現できることがわかった。したがって、本研究で実施した流体連成効果を考慮した振動解析方法は妥当と判断された。

表 2-1 試験パラメータ

試験ケース	支持スパン	1	2	3	4
リブ形式		内外面螺旋	内外面直線	内外面直線 (ギャップ小)	竹節型
試験体		A	C	D	E
伝熱管材質		SUS316	SUS316	SUS316	SUS316
伝熱管全長(m)		4	4	4	4
気中試験	1.0m	○	—	—	—
水中試験	1.0m	○	○	○	○
	2.0m	○	—	—	—
振幅 ^[注 1]		○	○	○	○
振動解析結果との比較評価		○	○	○	○
流体連成効果の検討		○	—	—	—
リブ形状の比較検討		○	○	—	○
ギャップ効果の比較検討		—	○	○	—
支持間隔の影響比較検討		○	—	—	—

注 1 : 供試体のノミナルギャップ寸法を包絡する振幅を与える

表 3-1 伝熱管仕様

項目	内管 外径×板厚 [mm]	内管－隔 壁管隙間 [mm]	隔壁管 外径×板厚 [mm]	隔壁管－ 外管隙間 [mm]	外管 外径×板厚 [mm]
寸法	$\phi 15.9 \times t1.6$	0.6	$\phi 19.1 \times$ $t1.0$	0.5	$\phi 23.9 \times t1.9$

表3-2 流力振動による振動振幅の評価(3管の剛性考慮)

記号	名称	数値	単位	備考
D	伝熱管(外管)外径	0.0239	m	ケ-スA
t	伝熱管(外管)板厚	0.0019	m	ケ-スA
Di	伝熱管(内管)外径	0.0159	m	ケ-スA
ti	伝熱管(内管)板厚	0.0016	m	ケ-スA
Ds	伝熱管(隔壁管)外径	0.0191	m	ケ-スA
ts	伝熱管(隔壁管)板厚	0.001	m	ケ-スA
A	伝熱管の断面積	0.000449	m ²	π/4D ²
ρ	流体密度	838.9	kg/m ³	Na-472.5°C
ρm	HCM12A密度	7900	kg/m ³	
ρpb	鉛ビスマス密度	10500	kg/m ³	
ρw	水蒸気密度	900	kg/m ³	
m	伝熱管線密度	2.818	kg/m	3重管+Pb-Bi+水
β	質量比	0.118	—	ρA/(ρA+m)
K	係数	5	—	工業環境
E	縦弾性係数	1.66E+11	Pa	550°C-HCM12A
I	断面二次モーメント	1.22E-08	m ⁴	I+I+Is
L	スパン	0.5	m	
Gna	Na流量	3.27E+07	kg/h	
Ddi	3重管SG胴内径	3.89	m	大型炉
n	伝熱管本数	6613	本	大型炉
U	流速	1.214	m/s	Na流速
u	無次元流速	0.02	—	(ρA/EI) ^{0.5} *UL
ε	細長比	41.84	—	L/D
α1	無次元1次固有値	3.14	—	ピン支持円筒
Dh	等価直径	0.0701	m	胴径3.89m
μ	粘性係数	2.47E-04	Pa*s	Na-472.5°C
Re	レイノルズ数	2.89E+05	—	
γ	振動振幅	0.0000040	m	Paidoussisの式
Y	振動振幅	0.00040	mm	Paidoussisの式

表3-3 流力振動による振動振幅の評価(外管の剛性のみ考慮)

記号	名称	数値	単位	備考
D	伝熱管(外管)外径	0.0239	m	ケースA
t	伝熱管(外管)板厚	0.0019	m	ケースA
Di	伝熱管(内管)外径	0.0159	m	ケースA
ti	伝熱管(内管)板厚	0.0016	m	ケースA
Ds	伝熱管(隔壁管)外径	0.0191	m	ケースA
ts	伝熱管(隔壁管)板厚	0.001	m	ケースA
A	伝熱管の断面積	0.000449	m ²	π/4D ²
ρ	流体密度	838.9	kg/m ³	Na-472.5°C
ρm	HCM12A密度	7900	kg/m ³	
ρpb	鉛ビスマス密度	10500	kg/m ³	
ρw	水蒸気密度	900	kg/m ³	
m	伝熱管線密度	2.818	kg/m	3重管+Pb-Bi+水
β	質量比	0.118	—	ρA/(ρA+m)
K	係数	5	—	工業環境
E	縦弾性係数	1.66E+11	Pa	550°C-HCM12A
I	断面二次モーメント	8.00E-09	m ⁴	I
L	スパン	0.5	m	
Gna	Na流量	3.27E+07	kg/h	
Ddi	3重管SG胴内径	3.89	m	大型炉
n	伝熱管本数	6613	本	大型炉
U	流速	1.214	m/s	大型炉
u	無次元流速	0.02	—	Na流速
ε	細長比	20.92	—	(ρA/EI) ^{0.5} *UL
α1	無次元1次固有値	3.14	—	L/D
Dh	等価直径	0.0701	m	ピン支持円筒
μ	粘性係数	2.47E-04	Pa*s	胴径3.89m
Re	レイノルズ数	2.89E+05	—	Na-472.5°C
γ	振動振幅	0.0000056	m	Paidoussisの式
γ	振動振幅	0.00056	mm	Paidoussisの式

表 3-4 振動特性試験用計測器(レーザドップラー振動計)

レーザドップラー振動計		グラフテック (株) AT3100
センサユニット	測定距離範囲	120mm～500mm
	レーザ光源	He-Ne レーザ ・波長 632.8nm ・出力 2mW
	重量	4.2kg
	外形寸法	120(W)*90(H)*430(D)mm
復調ユニット	復調振動周波数範囲	0.5Hz～50kHz
	復調振動振幅範囲	5.6 μ m～10mm (1Hz 時) 56nm～1mm (100Hz 時) 0.56nm～10 μ m (10kHz 時)
	測定速度範囲	35 μ m/s～70cm/s 10cm/s/V レンジ (35 μ m/s～70cm/s) 1cm/s/V レンジ (35 μ m/s～10cm/s) 0.1cm/s/V レンジ (35 μ m/s～1cm/s)
	精度	各レンジとも指示値 \pm 2%以内
	速度出力	フルスケール \pm 10V ただし、10cm/s/V は \pm 7V
	重量	約 7.5kg
	外形寸法	426(W)*148(H)*400(D)mm
共通性能	動作温度範囲	0 $^{\circ}$ C～40 $^{\circ}$ C
	性能保証温度範囲	5 $^{\circ}$ C～35 $^{\circ}$ C
	電源	AC100V \pm 10%

表 3-5 振動特性試験用加振器(電磁式加振器)

電磁式加振器		日本無線(株) JEK-002A
性能	周波数範囲	5Hz~5kHz
	出力電流	0~10Ap-p
	加振力周波数特性	5Hz~5kHz で略平坦
	外部入力信号周波数	5Hz~5kHz (CW 又は掃引波)
	外部入力信号レベル	0dBm (600Ω 及びハイインピーダンス)
	使用温度範囲	5℃~35℃
	外形寸法	<ul style="list-style-type: none"> ・ 電力増幅部 200(H)*480(W)*400(D)mm ・ エキサイタ 最大外径 52mm、長さ 265mm
	重量	<ul style="list-style-type: none"> ・ 電力増幅部 45kg ・ エキサイタ 2kg
	電源	AC100V~5%
加振力	起磁力	最大 800AT (0~800AT 間連続可変)

表 3-6 振動特性試験 試験ケースと試験条件

試験ケース		1	2	3	4
3 重伝熱管供試体	A	【添付図-1】	C	D	E
	隔壁管リブ形式	内外螺旋リブ (標準ギヤップ)	【添付図-2】 内外直線リブ (標準ギヤップ)	【添付図-3】 内外直線リブ (狭小ギヤップ)	【添付図-4】 竹節型リブ (標準ギヤップ)
伝熱管材質		SUS316	SUS316	SUS316	SUS316
伝熱管全長(mm)		外管長 4200	外管長 4200	外管長 4200	外管長 4200
気中試験	支持スパン長 1m	○	-	-	-
水中試験	支持スパン長 1m	○	○	○	○
	支持スパン長 2m	○	-	-	-
流体連成効果の検討		○	-	-	-
リブ形状の比較検討		○	○	-	○
ギヤップ効果の比較検討		-	○	○	-
支持間隔の影響比較検討		○	-	-	-
振動解析による比較評価		○	○	○	○

表 3-7 ケース 1-1 の振動試験結果
 (内外螺旋リブ付き隔壁管型3重管/気中/支持スパン長 1m)

計測対象	試験条件			計測値			備考
	設定加振力 (kgf)	掃引周波数 (Hz)	掃引時間 (min)	共振周波数 (Hz)	振動振幅 (mm _{0-P})		
					加振振幅	共振振幅	
外管	0.05	2~100	5	43.50	0.061	0.028	
	0.1			43.25	0.100	0.045	
	0.5			41.50	0.223	0.099	
	1.0			41.25	0.422	0.198	
	2.0			41.25	1.257	0.638	
	3.0			41.25	1.725	0.883	
中管	0.05	2~100	5	43.25	0.069	0.040	
	0.1			43.00	0.109	0.062	
	0.5			43.25	0.240	0.117	
	1.0			42.5	0.408	0.261	
	2.0			41.25	1.223	0.797	
	3.0			41.25	1.730	1.081	
内管	0.05	2~100	5	43.25	0.075	0.061	
	0.1			43.25	0.106	0.082	
	0.5			42.00	0.223	0.193	
	1.0			41.75	0.427	0.408	
	2.0			41.25	1.243	1.196	
	3.0			41.50	1.809	1.599	

表 3-8 ケース 1-2 の振動試験結果
 (内外螺旋リブ付き隔壁管型3重管/水中/支持スパン 1m)

計測対象	試験条件			計測値			備考
	設定 加振力 (kgf)	掃引 周波数 (Hz)	掃引 時間 (min)	共振周波数 (Hz)	振動振幅 (mm _{0.P})		
					加振振幅	共振振幅	
外管	0.05	2~100	5	40.25	0.045	0.030	
	0.1			40.00	0.092	0.057	
	0.5			39.25	0.281	0.159	
	1.0			38.75	0.487	0.284	
	2.0			38.00	0.964	0.624	
	3.0			37.75	1.394	0.915	
中管	0.05	2~100	5	40.25	0.045	0.032	
	0.1			40.00	0.097	0.066	
	0.5			39.25	0.292	0.195	
	1.0			38.75	0.495	0.332	
	2.0			38.00	0.980	0.698	
	3.0			37.75	1.388	1.050	
内管	0.05	2~100	5	40.25	0.046	0.035	
	0.1			40.00	0.098	0.070	
	0.5			39.50	0.293	0.205	
	1.0			38.50	0.498	0.363	
	2.0			38.00	0.975	0.764	
	3.0			37.50	1.399	1.086	

表 3-9 ケース 1-3 の振動試験結果
 (内外螺旋リブ付き隔壁管型3重管/水中/支持スパン長 2m)

計測対象	試験条件			計測値			備考
	設定加振力 (kgf _{0.P})	掃引周波数 (Hz)	掃引時間 (min)	共振周波数 (Hz)	振動振幅 (mm _{0.P})		
					加振振幅	共振振幅	
外管	0.03	2~100	5	13.75	0.048	0.096	18.25Hz にも共振点
	0.05			13.50	0.096	0.185	
	0.1			13.25	0.178	0.327	
	0.2			13.00	0.300	0.536	
	0.3			13.00	0.476	0.809	
	0.5			12.50	0.741	1.151	
中管	0.03	2~100	5	14.00	0.054	0.088	18.25Hz にも共振点
	0.05			13.75	0.088	0.156	
	0.1			13.50	0.178	0.334	
	0.2			13.00	0.327	0.555	
	0.3			13.00	0.466	0.780	
	0.5			12.50	0.749	1.169	
内管	0.03	2~100	5	14.00	0.049	0.077	18.25Hz にも共振点
	0.05			13.75	0.089	0.150	
	0.1			13.50	0.175	0.307	
	0.2			13.25	0.305	0.520	
	0.3			13.00	0.453	0.718	
	0.5			12.75	0.733	1.061	

表 3-10 ケース2の振動試験結果
 (内外直線リブ付き隔壁管型3重管(標準ギャップ)/水中/支持スパン長 1m)

計測対象	試験条件			計測値			備考
	設定加振力 (kgf ^{0.P})	掃引周波数 (Hz)	掃引時間 (min)	共振周波数 (Hz)	振動振幅 (mm ^{0.P})		
					加振振幅	共振振幅	
外管	0.05	2~100	5	39.75	0.031	0.020	
	0.1			40.00	0.068	0.042	
	0.5			39.25	0.281	0.175	
	1.0			38.75	0.477	0.289	
	2.0			38.25	0.874	0.557	
	3.0			38.00	1.193	0.770	
中管	0.05	2~100	5	39.75	0.032	0.021	
	0.1			40.00	0.077	0.050	
	0.5			39.50	0.285	0.175	
	1.0			38.75	0.474	0.295	
	2.0			38.25	0.887	0.590	
	3.0			37.75	1.276	0.876	
内管	0.05	2~100	5	40.00	0.039	0.026	
	0.1			40.00	0.075	0.050	
	0.5			39.50	0.289	0.193	
	1.0			38.75	0.510	0.339	
	2.0			37.75	0.935	0.668	
	3.0			—	—	—	周波数掃引中レーザ速度計信号が途絶のため、測定不能

表 3-11 ケース3の振動試験結果
 (内外直線リブ付き隔壁管型3重管(狭小ギャップ)/水中/支持スパン長 1m)

計測対象	試験条件			計測値			備考
	設定加振力 (kgf _{0.P})	掃引周波数 (Hz)	掃引時間 (min)	共振周波数 (Hz)	振動振幅 (mm _{0.P})		
					加振振幅	共振振幅	
外管	0.05	2~100	5	40.25	0.062	0.042	
	0.1			40.00	0.128	0.085	
	0.5			39.25	0.361	0.232	
	1.0			38.75	0.571	0.379	
	2.0			38.00	1.139	0.783	
	3.0			37.50	1.624	1.134	
中管	0.05	2~100	5	40.25	0.057	0.039	
	0.1			40.00	0.117	0.078	
	0.5			39.00	0.332	0.220	
	1.0			38.50	0.529	0.365	
	2.0			37.75	1.107	0.786	
	3.0			37.75	1.589	1.151	
内管	0.05	2~100	5	40.25	0.059	0.040	
	0.1			40.00	0.121	0.080	
	0.5			39.25	0.337	0.226	
	1.0			38.50	0.550	0.378	
	2.0			37.75	1.069	0.771	
	3.0			37.50	1.618	1.164	

表 3-12 ケース4の振動試験結果
(外面竹節型スペーサ付き隔壁管型3重管/水中/支持スパン長 1m)

計測対象	試験条件			計測値			備考
	設定加振力 (kgf _{0-P})	掃引周波数 (Hz)	掃引時間 (min)	共振周波数 (Hz)	振動振幅 (mm _{0-P})		
					加振振幅	共振振幅	
外管	0.05	2~100	5	39.75	0.034	0.021	
	0.1			39.75	0.077	0.053	
	0.5			39.25	0.286	0.191	
	1.0			38.50	0.458	0.306	
	2.0			37.75	0.967	0.628	
	3.0			37.50	1.360	0.887	
中管	0.05	2~100	5	39.75	0.037	0.025	
	0.1			39.75	0.091	0.063	
	0.5			39.00	0.287	0.210	
	1.0			38.50	0.468	0.352	
	2.0			37.75	0.971	0.733	
	3.0			37.50	1.286	1.008	
内管	0.05	2~100	5	40.00	0.037	0.023	
	0.1			40.00	0.080	0.052	
	0.5			39.25	0.281	0.200	
	1.0			38.50	0.485	0.353	
	2.0			37.50	0.961	0.723	
	3.0			37.25	1.316	1.033	

表 3-13 参考試験結果

計測対象	試験条件			計測値			備考
	設定加振力 (kgf _{0.P})	掃引周波数 (Hz)	掃引時間 (min)	共振周波数 (Hz)	振動振幅 (mm _{0.P})		
					変位計出力	速度計出力	
試験ケース 1-2: 内外面螺旋リブ付き隔壁管 3 重管 (標準ギャップ) / 水中 / 支持スパン長 1m							
外管	0.05	2~100	5	41.75	0.018	0.018	
	0.1			41.25	0.032	0.034	
	0.5			40.00	0.125	0.133	
	1.0			39.00	0.246	0.261	
試験ケース 4: 外面竹節型スペーサ付き隔壁管型 3 重管 (標準ギャップ) / 水中 / 支持スパン長 1m							
外管	0.05	2~100	5	39.75	0.091	0.021	
	0.1			39.75	0.211	0.053	
	0.5			39.25	0.768	0.191	

較正用変位計仕様:

非接触微小変位計 KAMAN 社製 KD-2300-0.5SU

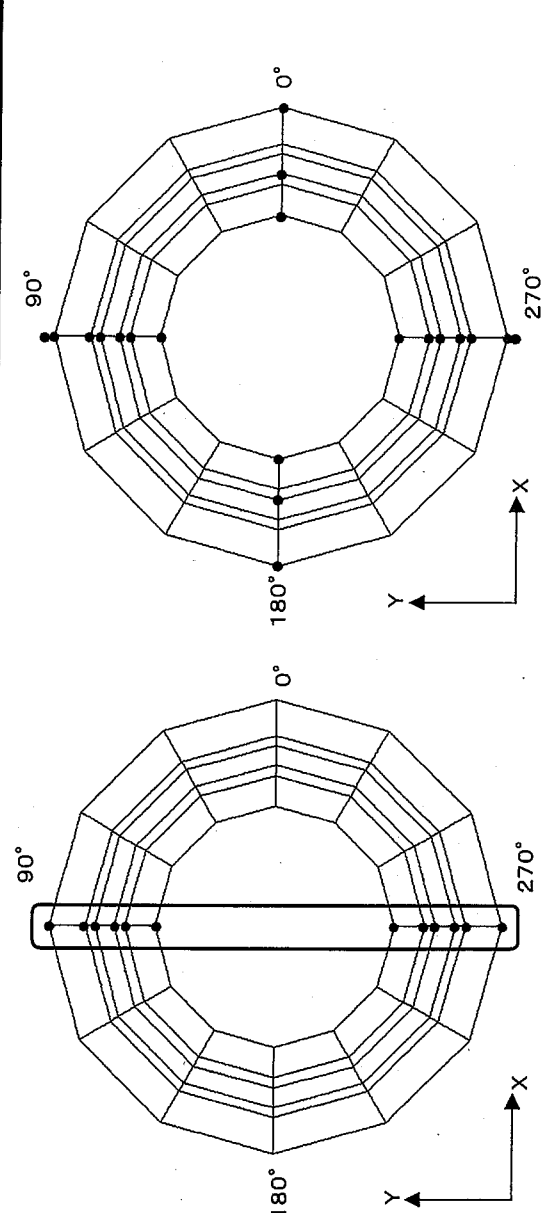
- ・測定基準距離 0.3 mm
- ・計測範囲 ±0.25 mm
- ・周波数範囲 DC±50 kHz
- ・分解能 0.1 μm

表 4-1 リブ模擬バネ定数

リブ仕様	内側リブバネ定数 N/mm	外側リブバネ定数 N/mm	備考
螺旋型	1.0×10^6	1.0×10^6	リブ1本 90° 当り
節型	1.33×10^5	1.29×10^5	リブ1本 90° 当り
直線型 (標準ギャップ)	1.81×10^7	1.70×10^7	リブ1本・1m当り
直線型 (ギャップゼロ)	2.83×10^7	2.66×10^7	リブ1本・1m当り
節型 (節中間部も支持)	6.65×10^4 リブ中間：500	6.45×10^4 リブ中間：500	リブ1本 90° 当り

表4-2 解析ケース

解析ケース No.	試験ケース No.	リップ仕様		試験	バツル板 ピッチ m	内管内部流体	隙間封入流体	外管外部流体	端部支持条件	加振力 k_{ef}	減衰定数
		リップ種類	バネ定数 N/mm								
		内側	外側								
1	1-1			気中	10	空気	空気	空気	3管の端面を同一平面とした支持(ピン支持)	1.0	0.03 (at47.5Hz)
2	1-2			水中	10	水	水	水	3管の端面を同一平面とした支持(ピン支持)	1.0	0.03 (at41.5Hz)
2'	1-2'			水中	10	水	水	水	3管独立の支持	1.0	0.03 (at41.5Hz)
3	1-3			水中		水	水	水	3管の端面を同一平面とした支持(ピン支持)	0.1	0.06 (at10.5Hz)
4	2			水中	10	水	水	水	3管の端面を同一平面とした支持(ピン支持)	1.0	0.03 (at41.5Hz)
5	3			水中	10	水	水	水	3管の端面を同一平面とした支持(ピン支持)	1.0	0.03 (at41.5Hz)
6	4			水中	10	水	水	水	3管の端面を同一平面とした支持(ピン支持)	1.0	0.03 (at41.5Hz)
6'	4			水中	10	水	水	水	3管の端面を同一平面とした支持(ピン支持)	1.0	0.03 (at41.5Hz)



3管独立の支持: ●位置Z方向変位拘束、●位置周方向変位拘束

ピン支持: ●位置固定

表4-3 固有振動数及び刺激係数一覧

次数	ケース1		ケース2		ケース2'		ケース3		ケース4		ケース5		ケース6		ケース6'	
	固有振動数 Hz	刺激係数	固有振動数 Hz	刺激係数	固有振動数 Hz	刺激係数	固有振動数 Hz	刺激係数	固有振動数 Hz	刺激係数	固有振動数 Hz	刺激係数	固有振動数 Hz	刺激係数	固有振動数 Hz	刺激係数
1	53.30	-1.275E-02	44.12	1.481E-06	42.01	1.348E-04	16.28	2.864E-02	46.25	-1.461E-02	46.25	4.625E-02	11.61	1.111E-12	43.89	-1.049E-05
2	59.53	-6.403E-07	44.24	8.678E-07	46.23	5.128E-03	18.61	6.930E-03	58.87	-3.900E-13	38.87	9.656E-12	15.44	1.729E-06	44.03	-1.195E-11
3	74.54	1.533E-07	46.23	-1.459E-02	44.00	-1.692E-07	26.84	-8.511E-10	67.66	-1.714E-04	67.66	1.714E-04	15.63	6.243E-12	46.23	1.450E-02
4	71.92	-1.692E-04	49.79	7.979E-02	46.51	1.397E-02	41.94	-1.168E-05	74.36	8.278E-11	74.36	-8.043E-11	20.00	3.223E-05	48.86	1.256E-03
5	91.85	-2.464E-06	50.58	-2.150E-03	49.40	1.103E-05	44.11	-1.230E-05	92.64	-2.372E-02	92.64	2.372E-02	20.46	3.223E-05	49.14	4.938E-06
6	104.25	-1.780E-06	58.23	2.321E-06	49.77	-1.105E-06	44.42	-7.912E-09	94.15	2.012E-11	94.15	7.423E-11	21.00	-1.055E-05	55.82	3.842E-10
7	106.53	-2.066E-02	58.78	-2.351E-08	58.19	-7.986E-04	49.77	2.115E-04	114.01	1.187E-10	114.01	1.187E-10	21.62	3.280E-13	56.25	-3.252E-13
8	171.48	-6.500E-07	60.24	-1.546E-07	58.32	-5.382E-07	50.90	-7.045E-08	171.22	-1.416E-04	171.22	1.416E-04	22.83	-3.196E-04	58.86	-7.930E-12
9	172.70	1.003E-04	67.64	-1.890E-04	58.66	9.828E-08	53.50	-2.745E-03	180.43	-5.056E-03	180.43	5.056E-03	23.66	6.944E-11	67.65	-1.801E-04
10			68.62	1.110E-04	67.18	1.711E-04	58.24	7.910E-06					28.13	1.098E-04	68.45	1.245E-04
11			71.91	-3.324E-07	69.00	-4.409E-05	60.31	-9.848E-09					29.24	5.602E-12	69.78	7.756E-12
12			72.82	7.625E-07	69.60	1.995E-07	60.79	-7.993E-09					36.41	4.038E-05	72.42	-3.781E-05
13			77.88	1.791E-06	71.82	6.069E-07	68.60	3.875E-04					38.03	8.639E-13	74.32	-6.947E-11
14			80.05	-6.588E-05	76.02	-1.763E-05	71.92	3.442E-07							74.36	7.070E-11
15			80.23	9.528E-06	77.14	2.303E-06	72.90	4.841E-09							77.63	-7.148E-05
16			83.87	2.737E-06	78.79	-2.204E-03	80.03	1.515E-05							77.84	1.228E-04
17			84.74	-3.692E-07	81.18	-6.335E-04	80.22	-1.578E-08							79.31	-1.192E-09
18			90.36	1.483E-03	82.05	-2.838E-07	83.87	5.482E-06							79.61	-3.817E-09
19			91.91	-6.561E-03	82.60	-2.171E-06	84.84	7.501E-09							84.52	4.566E-05
20			92.61	2.275E-02	89.42	-1.664E-04	90.37	7.597E-05							85.06	-6.110E-04
21			96.09	8.286E-06	92.40	-2.327E-02	91.96	-1.775E-04							86.53	-2.040E-09
22			101.61	2.736E-04	93.42	-1.951E-03	94.50	-2.659E-06							86.63	-2.461E-03
23			103.14	3.469E-06	93.82	7.607E-06	96.18	-8.570E-05							87.19	2.123E-03
24			104.48	1.317E-06	101.34	1.041E-05	96.30	-3.349E-07							87.19	-7.081E-07
25							101.55	6.500E-05							87.49	-1.809E-08
26							105.43	-3.188E-06							88.98	-4.584E-09
27							105.72	3.937E-07							92.70	2.348E-02
28							107.54	-6.624E-04							94.13	-7.795E-10
29							110.40	9.209E-07							113.54	-2.639E-04
30																
31																
32																
33																
34																
35																
36																
37																
38																
39																
40																

■: 弓形モード
□: モード図を添付

ケース1: 内外螺旋リブ バッフル板ビッチ1m 水中試験
 ケース2: 内外螺旋リブ バッフル板ビッチ1m 水中試験
 ケース2': 内外螺旋リブ バッフル板ビッチ1m 水中試験
 ケース3: 内外螺旋リブ バッフル板ビッチ2m 水中試験
 ケース4: 内外直線リブ(標準キヤップ) バッフル板ビッチ1m 水中試験
 ケース5: 内外直線リブ(狭小キヤップ) バッフル板ビッチ1m 水中試験
 ケース6: 内外竹節型リブ バッフル板ビッチ1m 水中試験(節中内部に微小バネを考慮)

表4-4 周波数応答解析結果(計測点の変位応答)

ステップ	周波数 (Hz)	変位(mm)														
		ケース2'			ケース4			ケース6			ケース6'					
		内管	隔壁管	外管	内管	隔壁管	外管	内管	隔壁管	外管	内管	隔壁管	外管			
1	37.0	0.083	0.084	0.086	0.132	0.083	0.084	0.083	0.132	0.083	0.083	0.083	0.130	0.083	0.083	0.134
2	37.5	0.093	0.094	0.097	0.142	0.097	0.098	0.096	0.147	0.093	0.093	0.093	0.140	0.093	0.093	0.144
3	38.0	0.104	0.104	0.109	0.155	0.110	0.110	0.109	0.160	0.104	0.104	0.104	0.154	0.104	0.104	0.156
4	38.5	0.119	0.119	0.126	0.170	0.126	0.126	0.126	0.178	0.119	0.119	0.119	0.170	0.119	0.119	0.172
5	39.0	0.138	0.138	0.148	0.190	0.148	0.148	0.148	0.200	0.138	0.138	0.138	0.190	0.138	0.138	0.192
6	39.5	0.164	0.164	0.177	0.215	0.177	0.177	0.177	0.227	0.164	0.164	0.164	0.215	0.164	0.164	0.217
7	40.0	0.199	0.199	0.212	0.248	0.212	0.212	0.212	0.258	0.199	0.199	0.199	0.248	0.199	0.199	0.250
8	40.5	0.242	0.242	0.243	0.285	0.243	0.243	0.243	0.277	0.242	0.242	0.242	0.284	0.242	0.242	0.282
9	41.0	0.282	0.281	0.282	0.311	0.282	0.282	0.282	0.287	0.282	0.282	0.282	0.311	0.282	0.282	0.312
10	41.5	0.291	0.291	0.292	0.296	0.292	0.292	0.292	0.293	0.292	0.292	0.292	0.299	0.292	0.292	0.298
11	42.0	0.262	0.261	0.262	0.262	0.262	0.262	0.262	0.263	0.262	0.262	0.262	0.263	0.262	0.262	0.268
12	42.5	0.219	0.218	0.219	0.186	0.186	0.186	0.187	0.187	0.219	0.219	0.219	0.187	0.219	0.219	0.245
13	43.0	0.182	0.181	0.183	0.138	0.139	0.139	0.139	0.125	0.183	0.182	0.182	0.138	0.182	0.182	0.185
14	43.5	0.155	0.154	0.155	0.103	0.103	0.103	0.103	0.096	0.155	0.154	0.154	0.103	0.155	0.155	0.137
15	44.0	0.135	0.134	0.136	0.080	0.118	0.120	0.120	0.076	0.135	0.134	0.136	0.081	0.135	0.135	0.103
16	44.5	0.121	0.120	0.122	0.069	0.106	0.107	0.107	0.066	0.121	0.120	0.122	0.069	0.121	0.121	0.080
17	45.0	0.111	0.110	0.112	0.069	0.096	0.097	0.098	0.068	0.111	0.110	0.112	0.069	0.111	0.111	0.069
18	45.5	0.100	0.099	0.101	0.080	0.086	0.087	0.087	0.078	0.100	0.099	0.100	0.080	0.099	0.099	0.080
19	46.0	0.084	0.083	0.085	0.092	0.089	0.089	0.089	0.085	0.084	0.084	0.086	0.082	0.084	0.084	0.085
20	46.5	0.061	0.060	0.062	0.093	0.047	0.047	0.048	0.083	0.061	0.061	0.063	0.093	0.061	0.061	0.092
21	47.0	0.038	0.037	0.039	0.080	0.027	0.028	0.028	0.069	0.038	0.038	0.039	0.081	0.037	0.037	0.079

ステップ	周波数 (Hz)	変位(mm)														
		ケース1			ケース3			ケース5			ケース6					
		内管	隔壁管	外管	内管	隔壁管	外管	内管	隔壁管	外管	内管	隔壁管	外管			
1	42.0	0.075	0.075	0.074	0.122	0.080	0.080	0.080	0.126	0.080	0.080	0.080	0.126	0.080	0.080	0.126
2	42.5	0.081	0.081	0.081	0.129	0.101	0.101	0.101	0.148	0.081	0.081	0.081	0.129	0.081	0.081	0.148
3	43.0	0.089	0.089	0.088	0.138	0.135	0.135	0.135	0.183	0.089	0.089	0.089	0.138	0.089	0.089	0.183
4	43.5	0.097	0.098	0.097	0.147	0.147	0.147	0.147	0.241	0.097	0.097	0.097	0.147	0.097	0.097	0.241
5	44.0	0.109	0.109	0.108	0.159	0.159	0.159	0.159	0.296	0.109	0.109	0.108	0.159	0.109	0.109	0.296
6	44.5	0.122	0.122	0.122	0.173	0.173	0.173	0.173	0.335	0.122	0.122	0.122	0.173	0.122	0.122	0.335
7	45.0	0.140	0.140	0.139	0.191	0.191	0.191	0.191	0.356	0.140	0.140	0.139	0.191	0.140	0.140	0.356
8	45.5	0.162	0.162	0.162	0.213	0.188	0.188	0.188	0.332	0.162	0.162	0.162	0.213	0.162	0.162	0.332
9	46.0	0.191	0.191	0.191	0.241	0.149	0.149	0.149	0.241	0.191	0.191	0.191	0.241	0.191	0.191	0.241
10	46.5	0.227	0.227	0.227	0.273	0.127	0.127	0.127	0.273	0.227	0.227	0.227	0.273	0.227	0.227	0.273
11	47.0	0.266	0.266	0.266	0.302	0.116	0.116	0.116	0.302	0.266	0.266	0.266	0.302	0.266	0.266	0.302
12	47.5	0.293	0.293	0.293	0.313	0.111	0.111	0.111	0.313	0.293	0.293	0.293	0.313	0.293	0.293	0.313
13	48.0	0.288	0.288	0.288	0.288	0.111	0.111	0.111	0.288	0.288	0.288	0.288	0.288	0.288	0.288	0.288
14	48.5	0.257	0.257	0.258	0.238	0.119	0.119	0.119	0.238	0.257	0.257	0.258	0.238	0.257	0.257	0.238
15	49.0	0.220	0.219	0.220	0.186	0.135	0.135	0.135	0.186	0.220	0.220	0.220	0.186	0.220	0.220	0.186
16	49.5	0.187	0.186	0.187	0.143	0.168	0.168	0.168	0.143	0.187	0.187	0.187	0.143	0.187	0.187	0.143
17	50.0	0.161	0.160	0.162	0.111	0.195	0.195	0.195	0.111	0.161	0.161	0.162	0.111	0.161	0.161	0.111
18	50.5	0.142	0.141	0.143	0.088	0.193	0.193	0.193	0.088	0.142	0.142	0.143	0.088	0.142	0.142	0.088
19	51.0	0.128	0.127	0.129	0.073	0.170	0.170	0.170	0.073	0.128	0.128	0.129	0.073	0.128	0.128	0.073
20	51.5	0.118	0.116	0.118	0.067	0.151	0.151	0.151	0.067	0.118	0.118	0.118	0.067	0.118	0.118	0.067
21	52.0	0.109	0.108	0.110	0.071	0.135	0.135	0.135	0.071	0.109	0.109	0.110	0.071	0.109	0.109	0.071

ケース1:内外螺旋リブ バッフル板ピッチ1m 水中試験
 ケース2:内外螺旋リブ バッフル板ピッチ1m 水中試験
 ケース3:内外螺旋リブ バッフル板ピッチ2m 水中試験
 ケース4:内外直線リブ(標準キヤップ) バッフル板ピッチ1m 水中試験
 ケース5:内外竹節型リブ バッフル板ピッチ1m 水中試験
 ケース6:内外竹節型リブ バッフル板ピッチ1m 水中試験(節中間部に微小バネを考慮)

※:共振変位

表 4-5 固有振動数の比較

ケース	試験	解析結果*1
螺旋リブ・気中・1m	内管 : 43.25 Hz 隔壁管 : 43.25 Hz 外管 : 43.50 Hz	47.70 Hz (1次)
螺旋リブ・水中・1m	内管 : 40.25 Hz 隔壁管 : 40.25 Hz 外管 : 40.25 Hz	41.37 Hz (1次)
螺旋リブ・水中・2m	内管 : 14.00 Hz 隔壁管 : 14.00 Hz 外管 : 13.75 Hz	10.37 Hz (1次)
直線リブ・水中・1m	内管 : 40.00 Hz 隔壁管 : 39.75 Hz 外管 : 39.75 Hz	41.37 Hz (1次)
直線リブ(ギャップ小)・水中・1m	内管 : 40.25 Hz 隔壁管 : 40.25 Hz 外管 : 40.25 Hz	41.38 Hz (1次)
節型リブ・水中・1m	内管 : 40.00 Hz 隔壁管 : 39.75 Hz 外管 : 39.75 Hz	41.40 Hz (15次)

*1) 振動モードが弓形になるモードの固有値

表 4-6 バネ定数のパラメータ解析結果

バネ定数	1次固有値解析結果 (螺旋リブ・気中・1m)	1次固有値解析結果 (螺旋リブ・水中・1m)
1×10^6 kg/mm	47.7 Hz	41.4 Hz
100 kg/mm	47.6 Hz	41.3 Hz
10 kg/mm	46.7 Hz	27.4 Hz
5 kg/mm	41.6 Hz	19.5 Hz
1 kg/mm	19.8 Hz	———

表 4-7 変位の比較

ケース	項目	振動試験結果			周波数応答解析結果		
		内管	隔壁管	外管	内管	隔壁管	外管
螺旋リブ 気中 1m	共振周波数 (Hz)	41.75	42.5	41.25	47.5		
	加振点振幅 (mm)	0.427	0.408	0.422	0.313		
	計測点振幅 (mm)	0.408	0.261	0.198	0.293	0.292	0.292
螺旋リブ 水中 1m	共振周波数 (Hz)	38.50	38.75	38.75	41.5 [41.0]		
	加振点振幅 (mm)	0.498	0.495	0.487	0.298 [0.267]		
	計測点振幅 (mm)	0.363	0.332	0.284	0.291 [0.249]	0.291 [0.248]	0.292 [0.249]
螺旋リブ 水中 2m	共振周波数 (Hz)	13.50	13.50	13.25	10.5		
	加振点振幅 (mm)	0.175	0.178	0.178	0.335		
	計測点振幅 (mm)	0.307	0.334	0.327	0.342	0.342	0.343
直線リブ 標準ギャップ 水中 1m	共振周波数 (Hz)	38.75	38.75	38.75	41.5		
	加振点振幅 (mm)	0.477	0.474	0.510	0.299		
	計測点振幅 (mm)	0.289	0.295	0.339	0.292	0.291	0.292
直線リブ 狭小ギャップ 水中 1m	共振周波数 (Hz)	38.75	38.50	38.50	標準ギャップに同じ		
	加振点振幅 (mm)	0.571	0.529	0.550			
	計測点振幅 (mm)	0.379	0.365	0.378			
竹節リブ 水中 1m	共振周波数 (Hz)	38.50	38.50	38.50	41.5 (41.5)		
	加振点振幅 (mm)	0.458	0.468	0.485	0.339 (0.298)		
	計測点振幅 (mm)	0.306	0.352	0.353	0.417 (0.292)	0.321 (0.290)	0.254 (0.292)

[] 内は、端部を3管独立でピン支持としたケース(ケース2')

()内は、竹節リブの中間部に微小バネを設けたケース(ケース6')

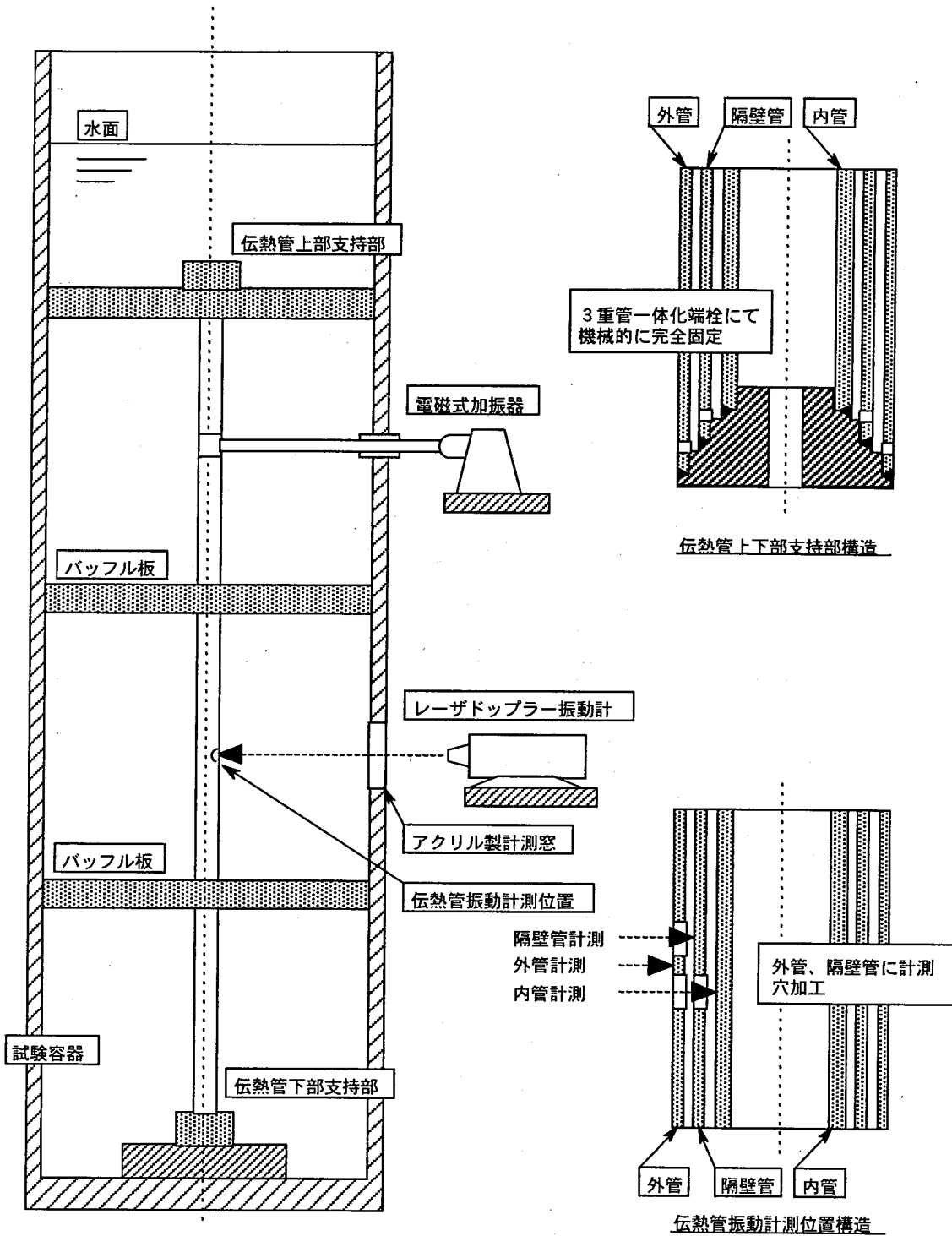


図2-1 水中振動試験装置の概念

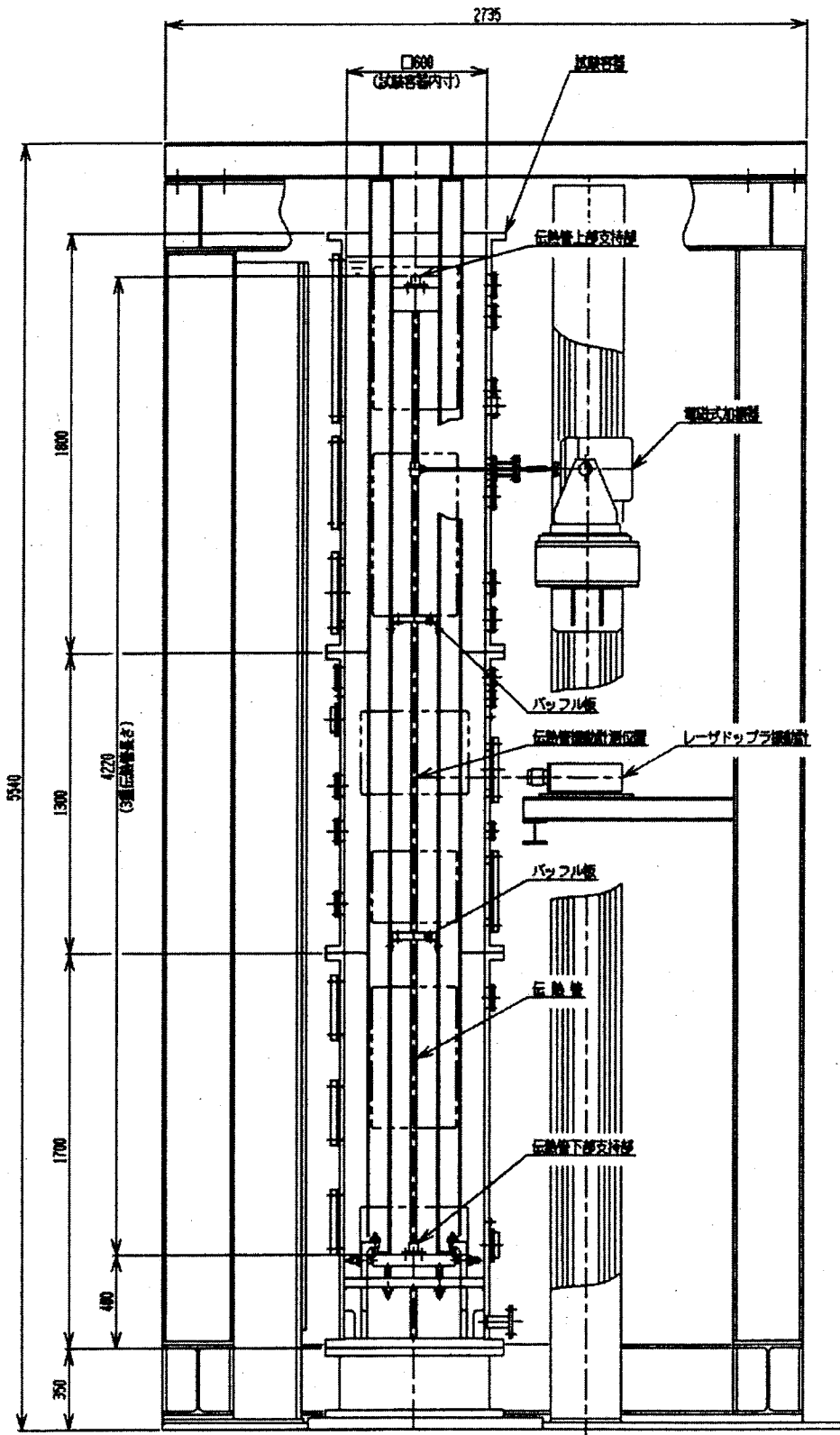


図2-2 試験装置概要

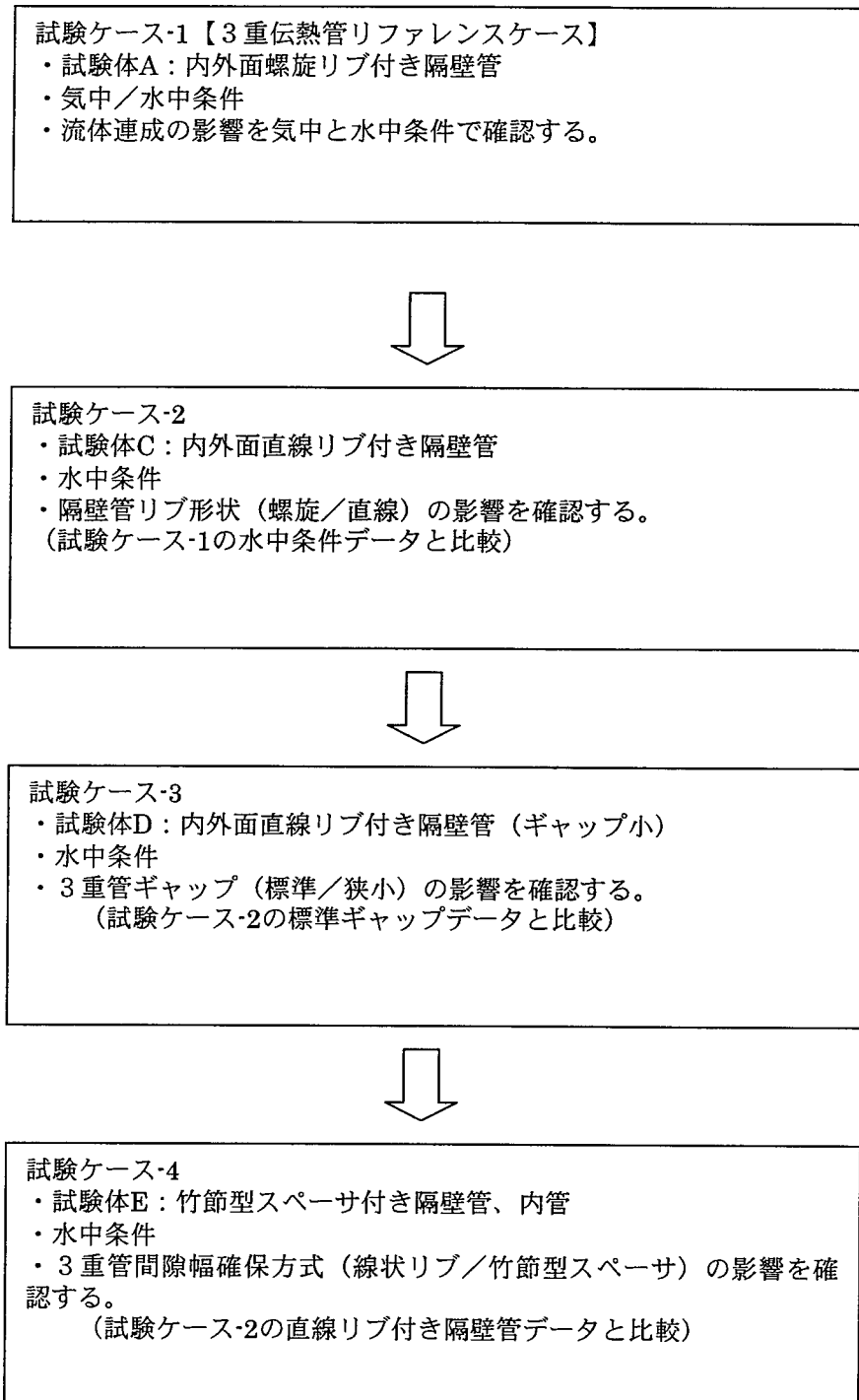


図2-3 試験ケース

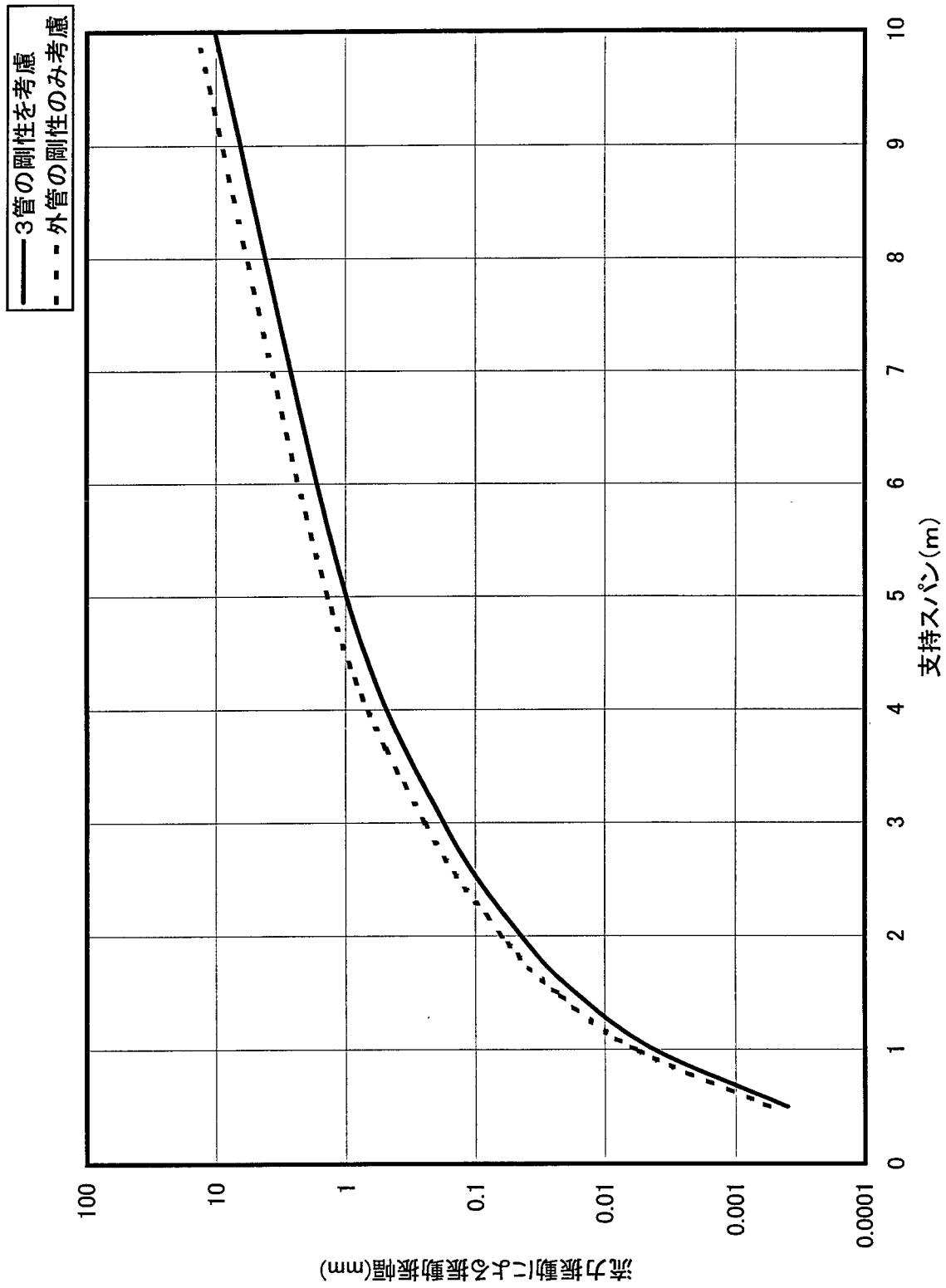


図3-1 支持スパンと流力振動による振幅の関係

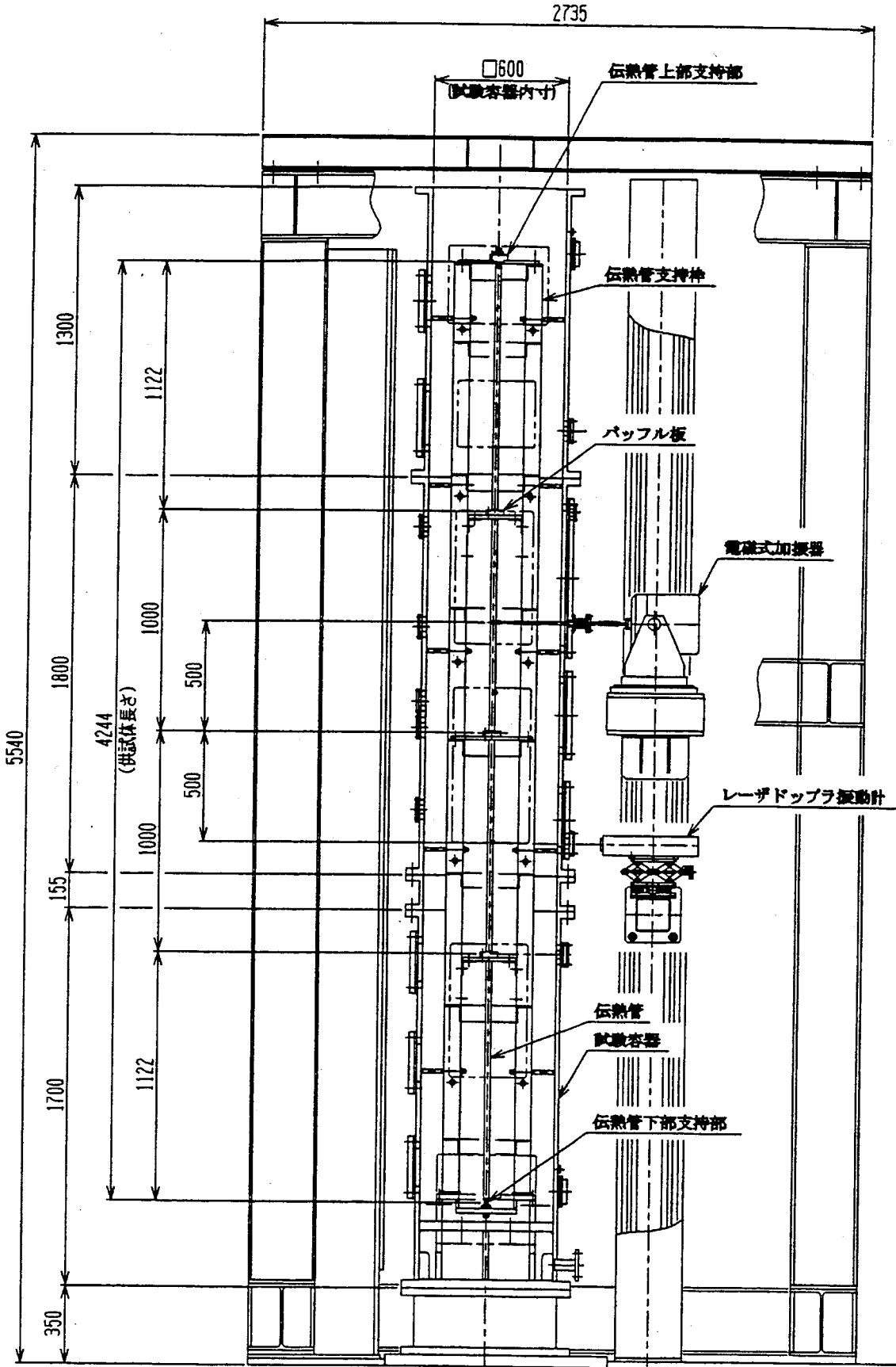


図3-2 3重伝熱管振動特性試験装置

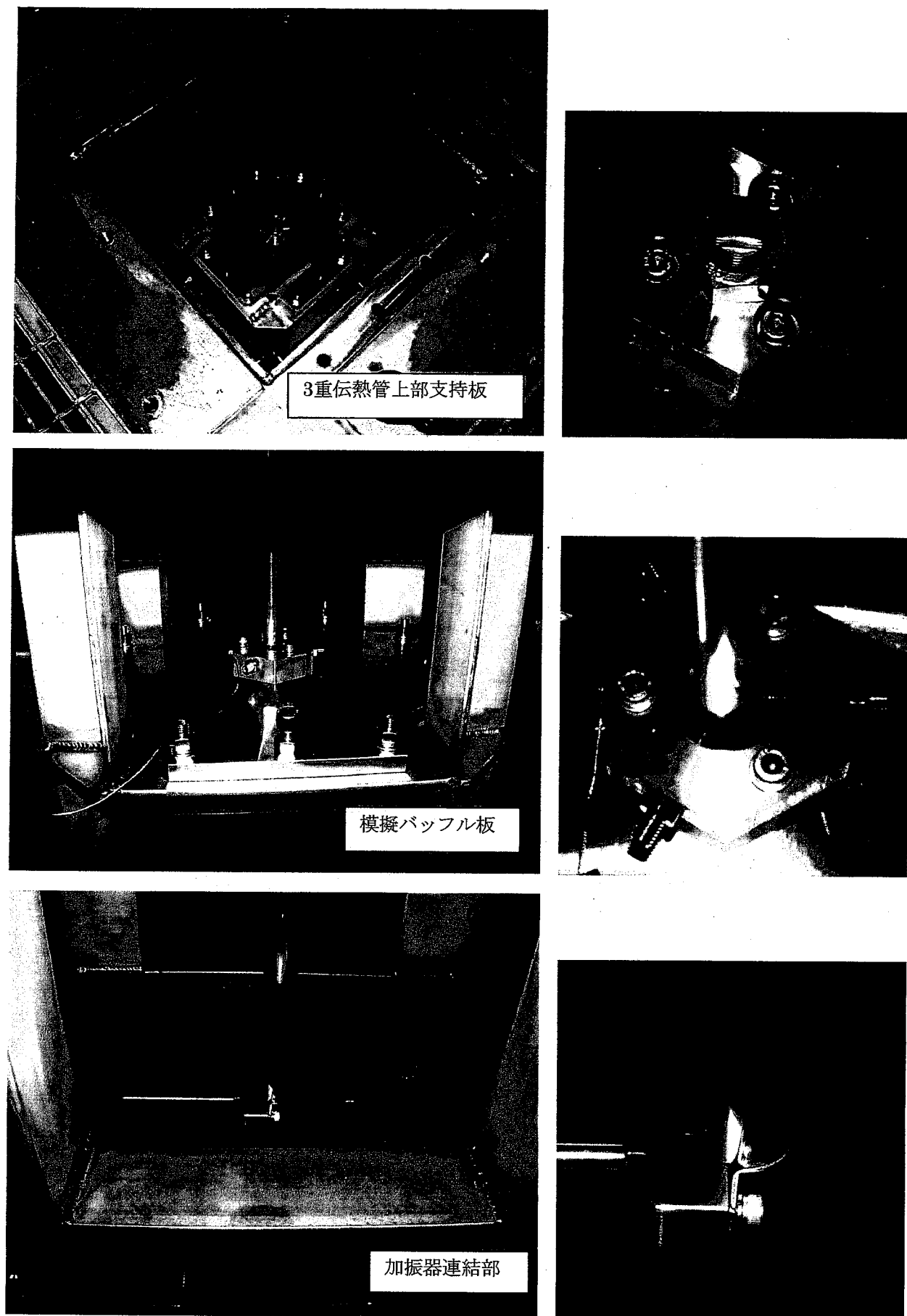


図3-3 3重伝熱管振動特性試験装置状況(1)

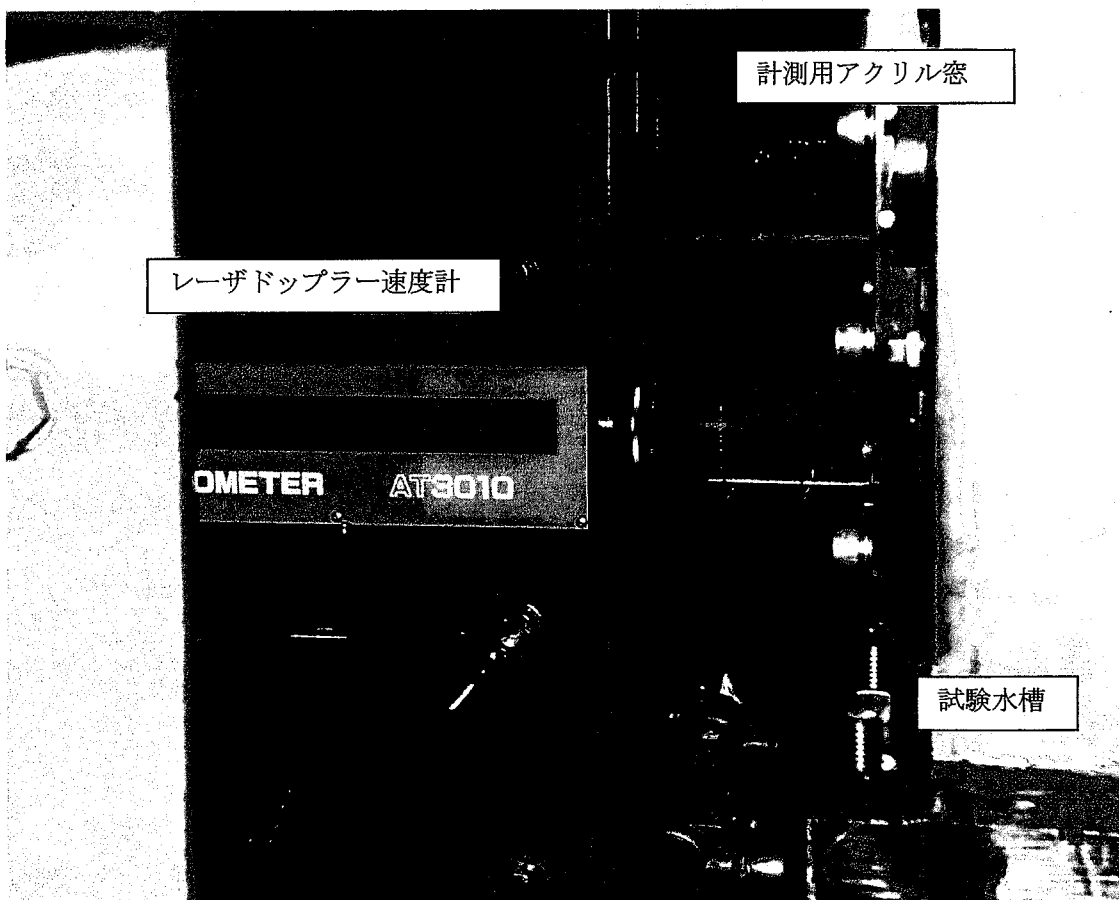
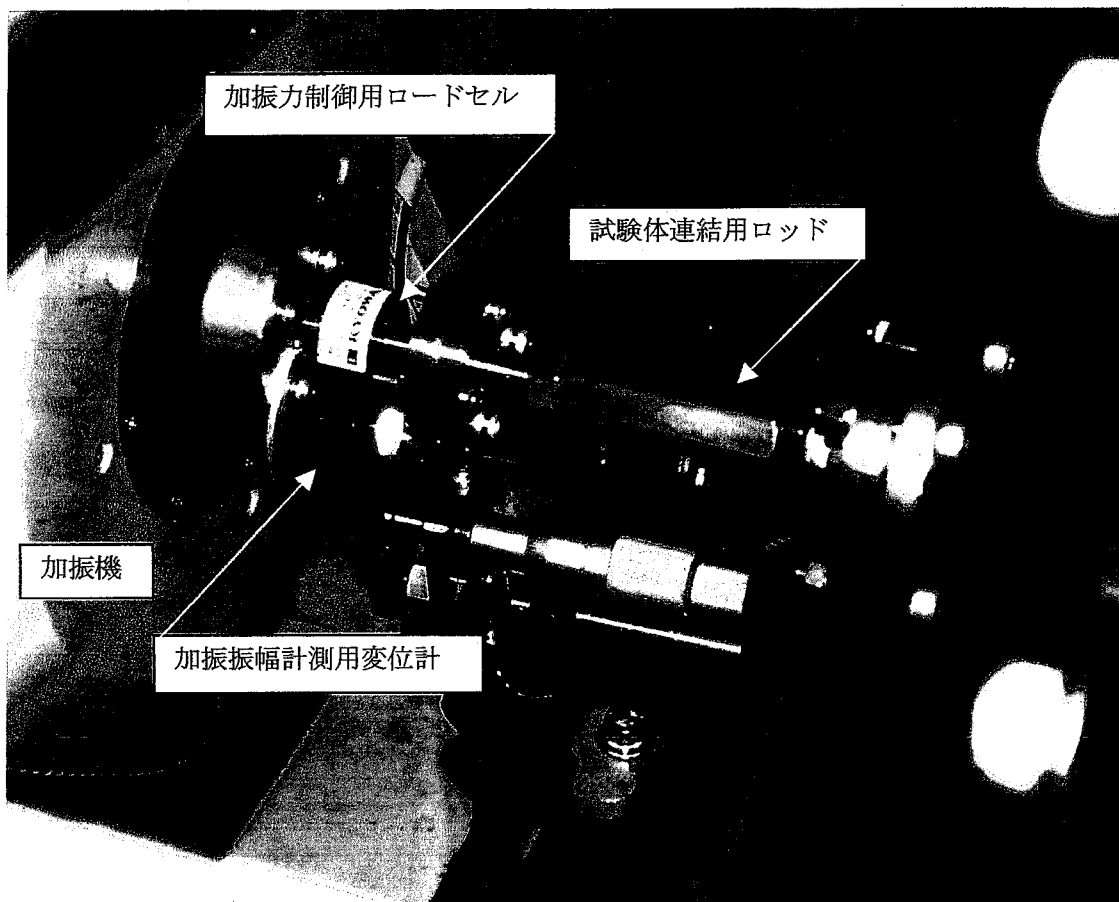
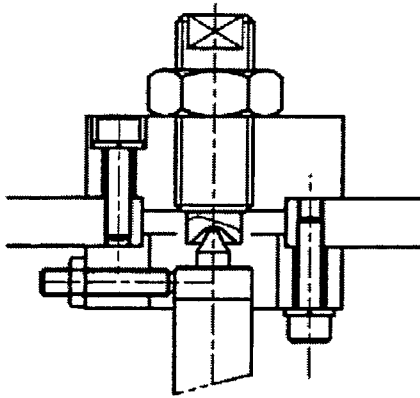
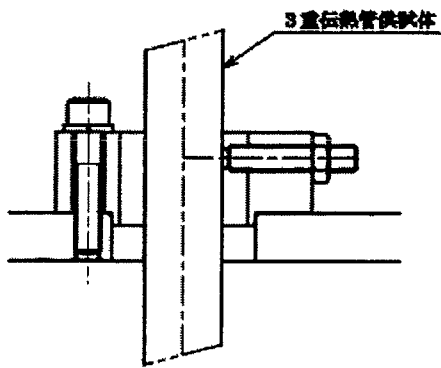


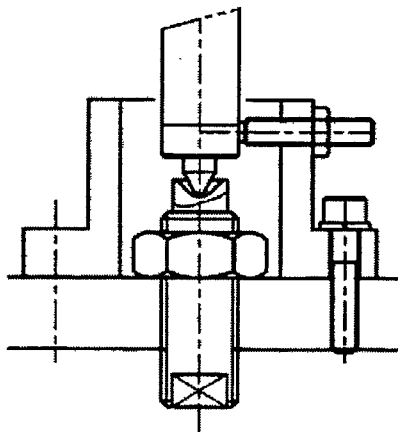
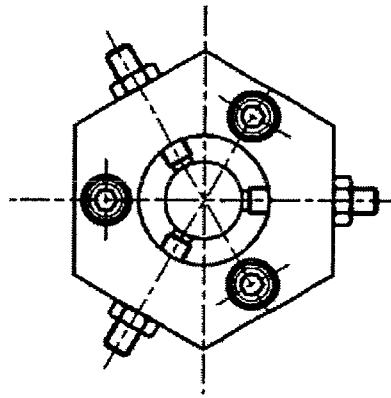
図3-4 3重伝熱管振動特性試験装置状況(2)



上部支持構造

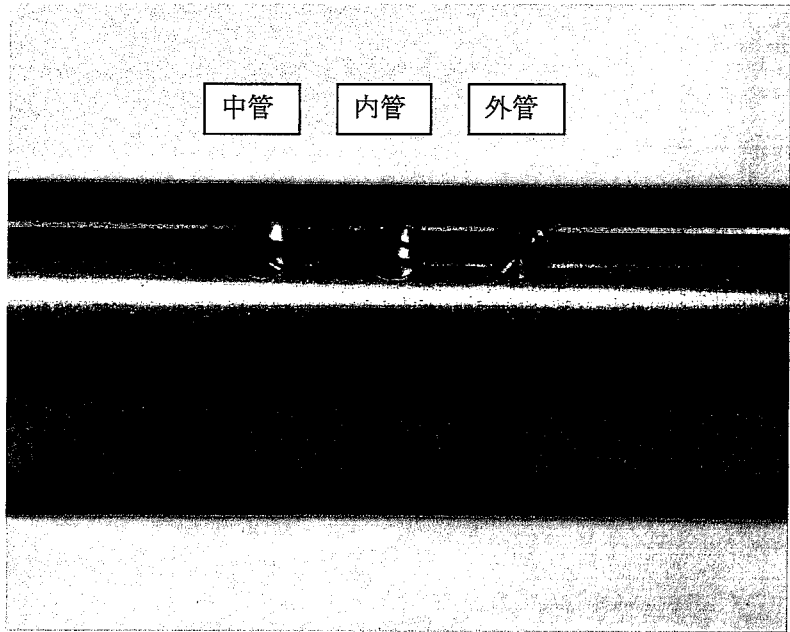
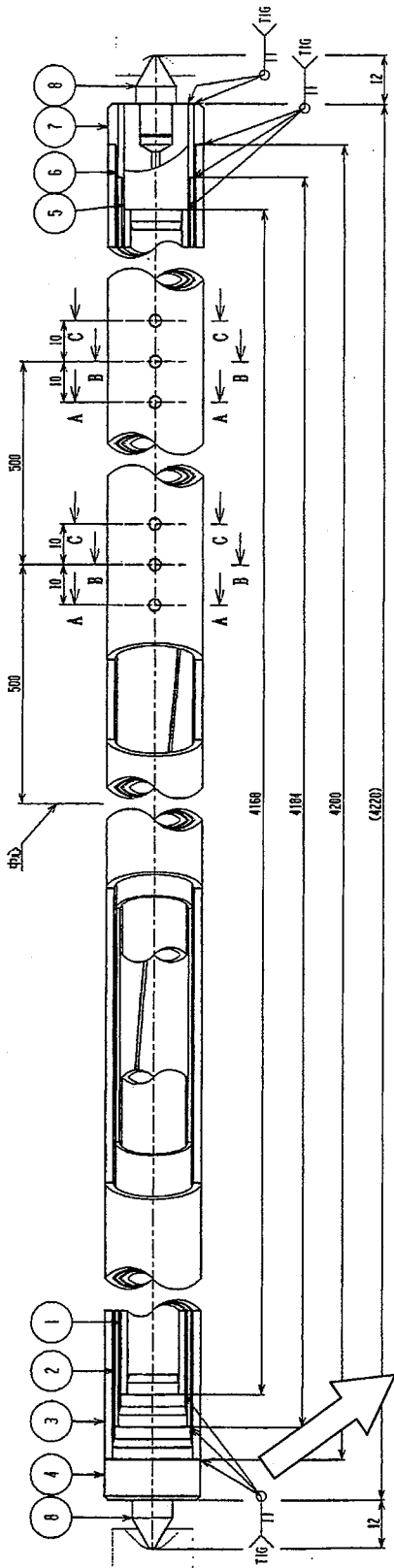


中間部支持構造

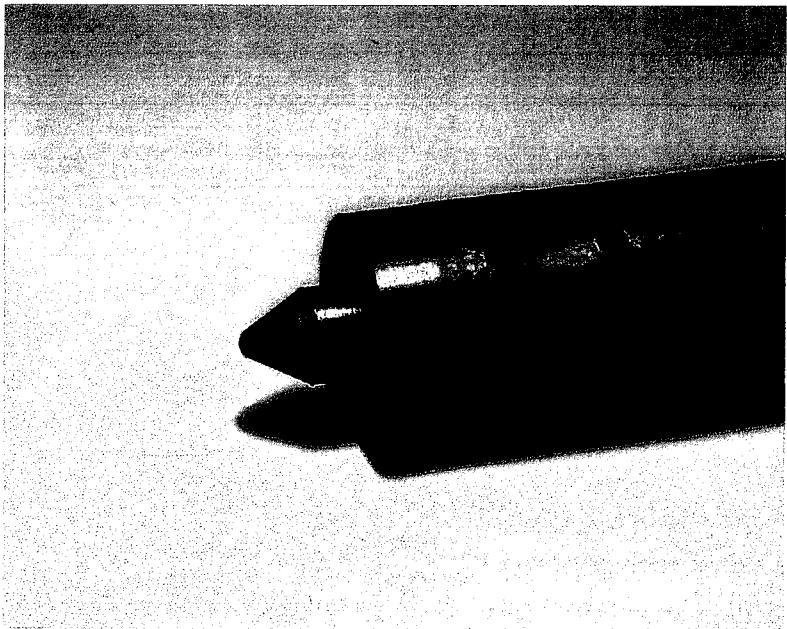


下部支持構造

図3-5 3重伝熱管振動試験体支持構造



3重管(内・中・外管)振動計測孔構造



上部・下部端栓(排気・排水/導水孔)構造

図3-6 3重伝熱管振動試験体 計測孔/導排水孔構造

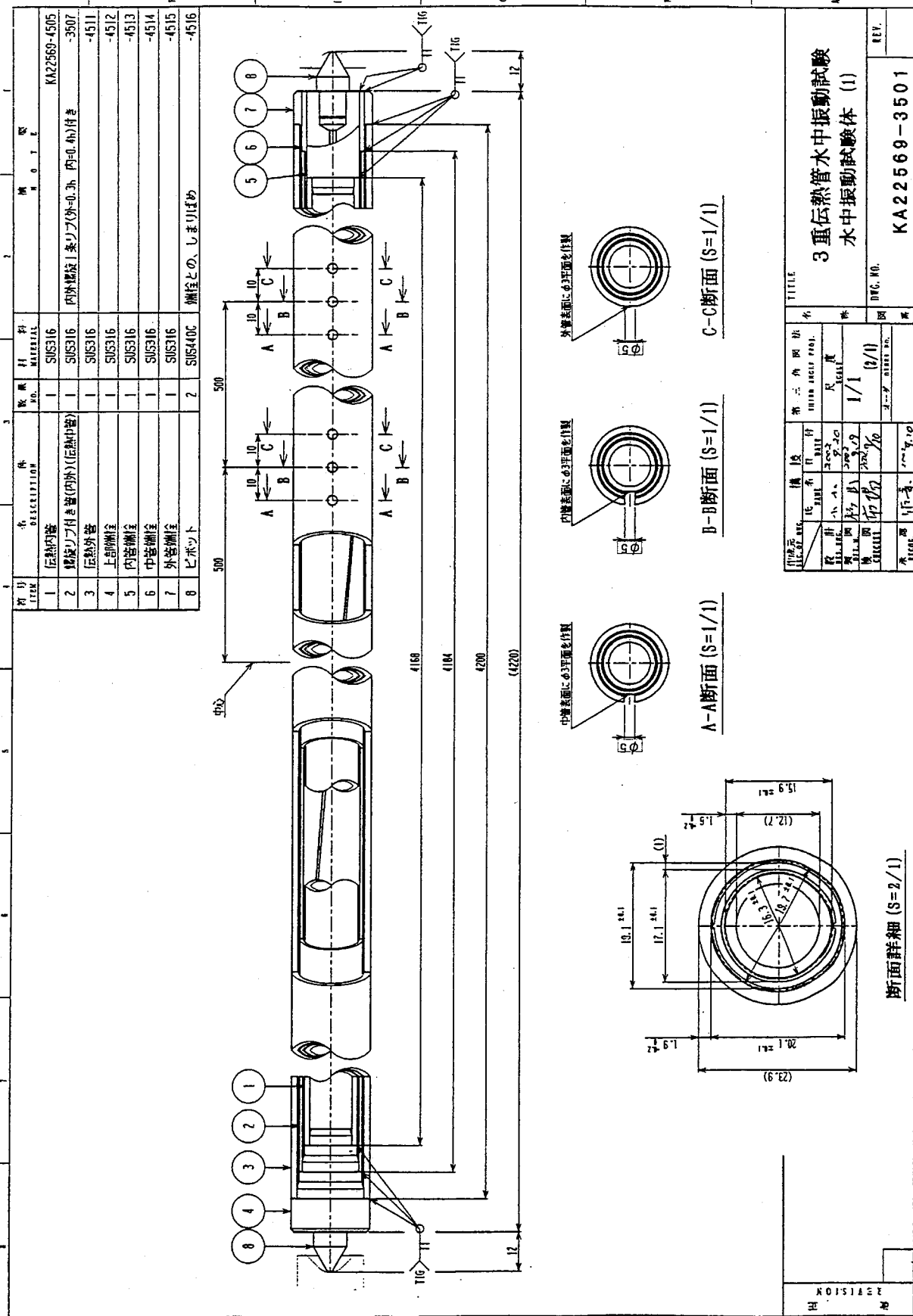


図3-7 3重管振動試験体A(内外面螺旋リブ付き隔壁管)

図名		図号	
3重伝熱管水中振動試験 水中振動試験体 (1)		KA22569-3501	
DATE		REV.	
DRAWN		DATE	
CHECKED		DATE	
APPROVED		DATE	
DESIGNED		DATE	
CALCULATED		DATE	
MATERIAL		DATE	
MANUFACTURED		DATE	
TESTED		DATE	
REVISION		DATE	

FORM NO. 41 NUCLEAR DEVELOPMENT CORP. 図記 二重管・三層管・四層管・五層管・六層管・七層管・八層管・九層管・十層管・十一層管・十二層管・十三層管・十四層管・十五層管・十六層管・十七層管・十八層管・十九層管・二十層管

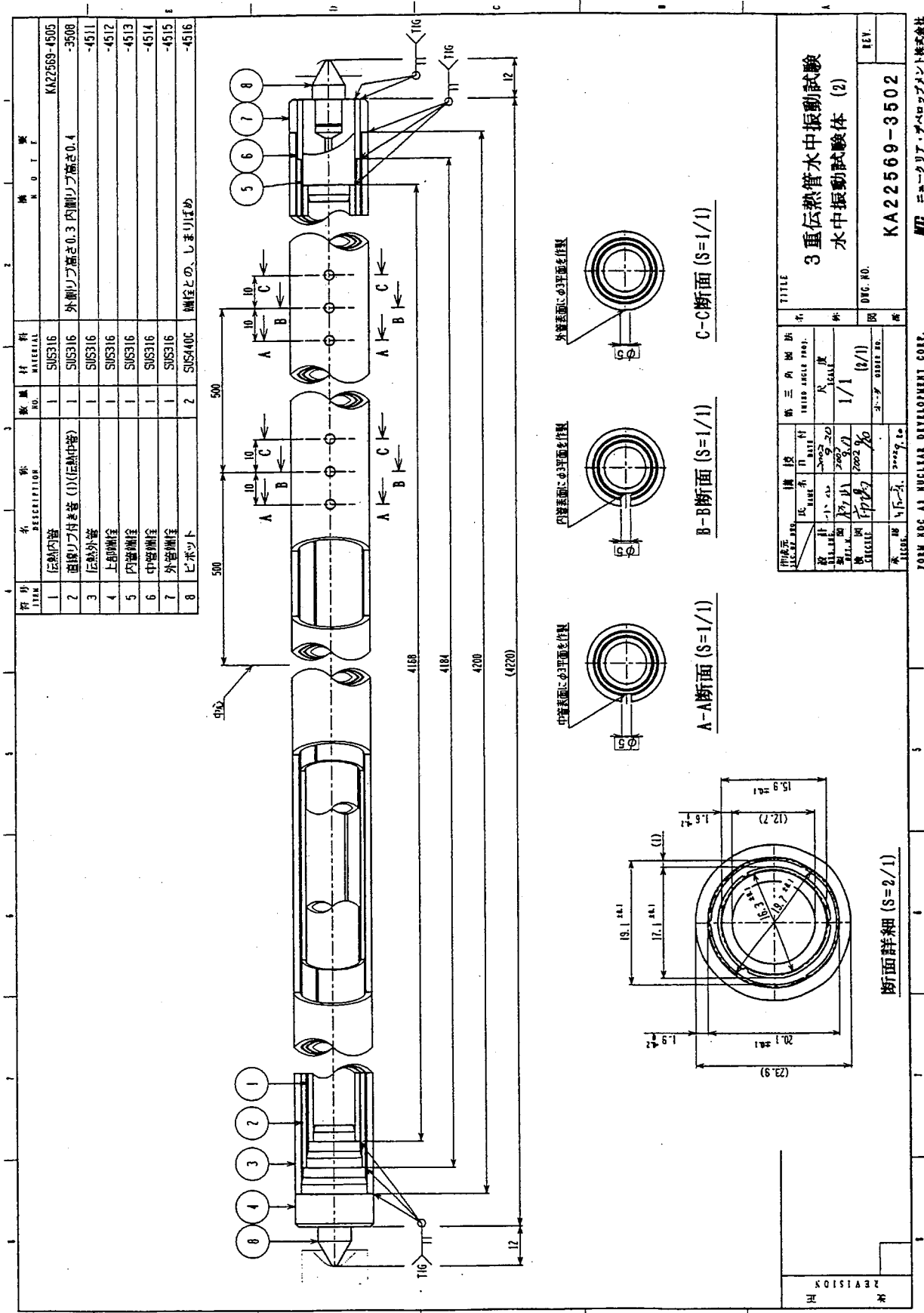
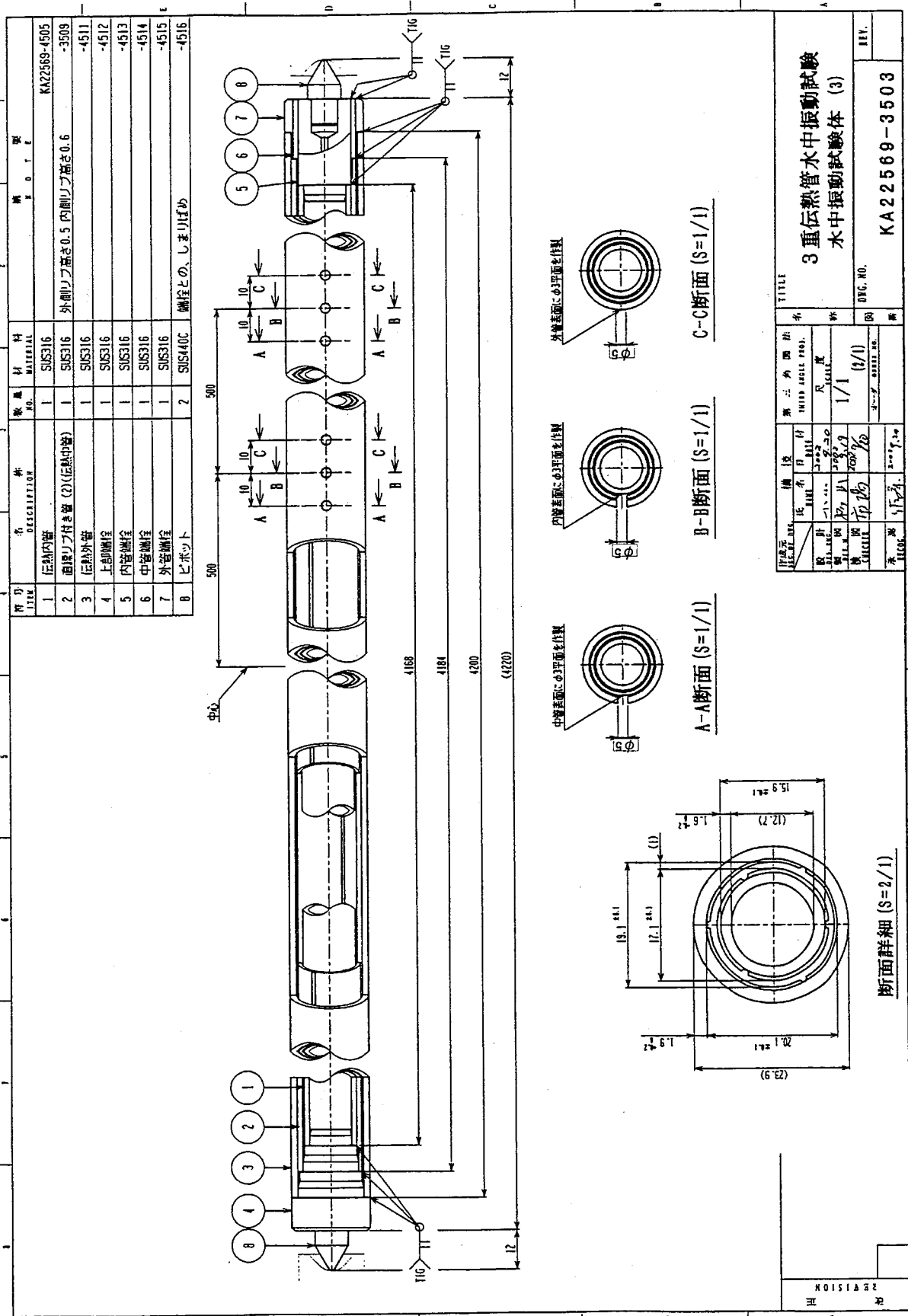


図3-8 3重管振動試験体C(内外面直線リブ付き隔壁管/標準ギヤップ)



図名 DRAWING NO.		図号 DRAWING NO.		図名 TITLE	
1/1	1/1	KA22569-3503	REV.	3重伝熱管水中振動試験 水中振動試験体 (3)	
1/1	1/1	REV.	REV.	REV.	

図3-9 3重管振動試験体D(内外面直線リブ付き隔壁管/狭小ギャップ)

FOR USE AS NUCLEAR DEVELOPMENT CONT. 開発用核燃料開発容器
NEZ ニュークリア・デベロップメント株式会社

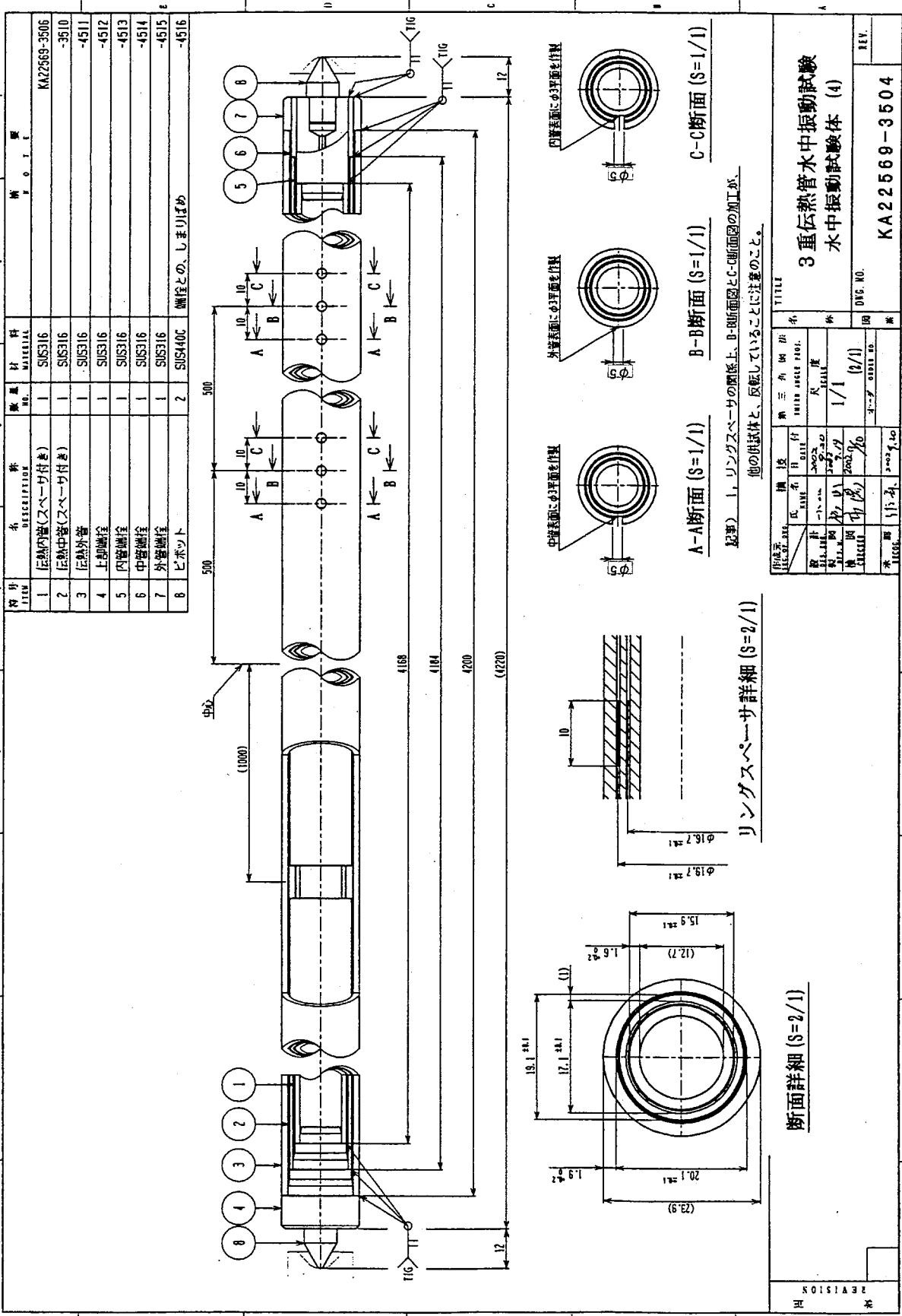


図3-10 3重管振動試験体E(竹節型スペーサ付き隔壁管)

試験ケース-1【3重伝熱管リファレンスケース】

- ・試験体A：内外面螺旋リブ付き隔壁管（標準ギャップ）
- ・気中／水中条件
- ・流体連成の影響を気中と水中条件で確認する。
- ・伝熱管支持ピッチの影響をバップル板間隔により確認する。



試験ケース-2

- ・試験体C：内外面直線リブ付き隔壁管（標準ギャップ）
- ・水中条件
- ・隔壁管リブ形状（螺旋／直線）の影響を確認する。
（試験ケース-1の水中条件データと比較）



試験ケース-3

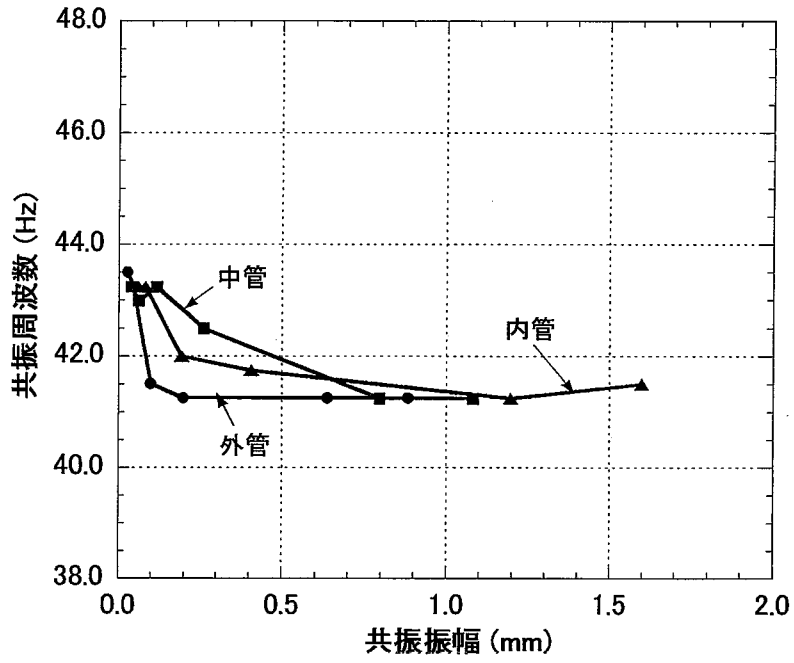
- ・試験体D：内外面直線リブ付き隔壁管（狭小ギャップ）
- ・水中条件
- ・3重管ギャップ（標準／狭小）の影響を確認する。
（試験ケース-2の標準ギャップデータと比較）



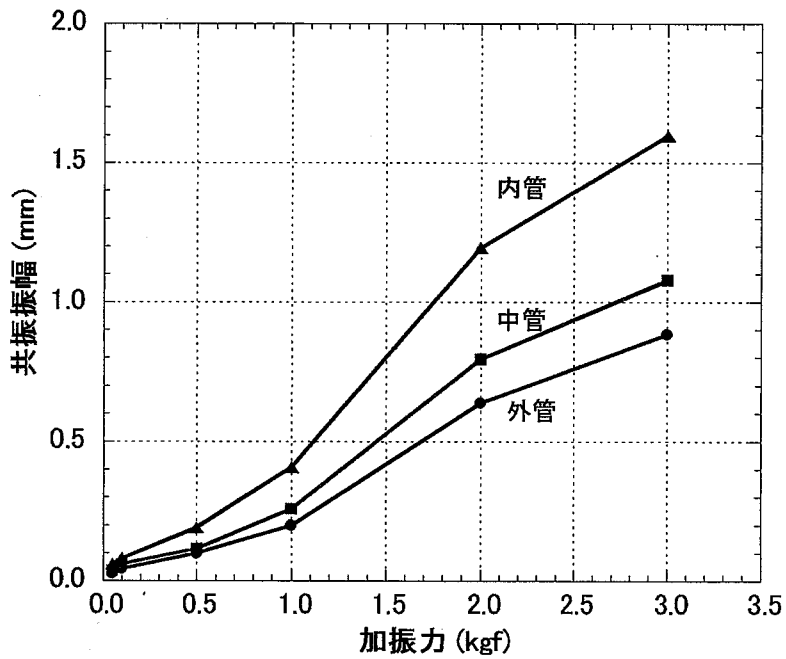
試験ケース-4

- ・試験体E：竹節型スペーサ付き隔壁管、内管（標準ギャップ）
- ・水中条件
- ・3重管ギャップ確保方式（線状リブ／竹節型スペーサ）の影響を確認する。
（試験ケース-1.2の螺旋、直線リブ付き隔壁管データと比較）

図3-11 試験ケースと供試体及び試験目的

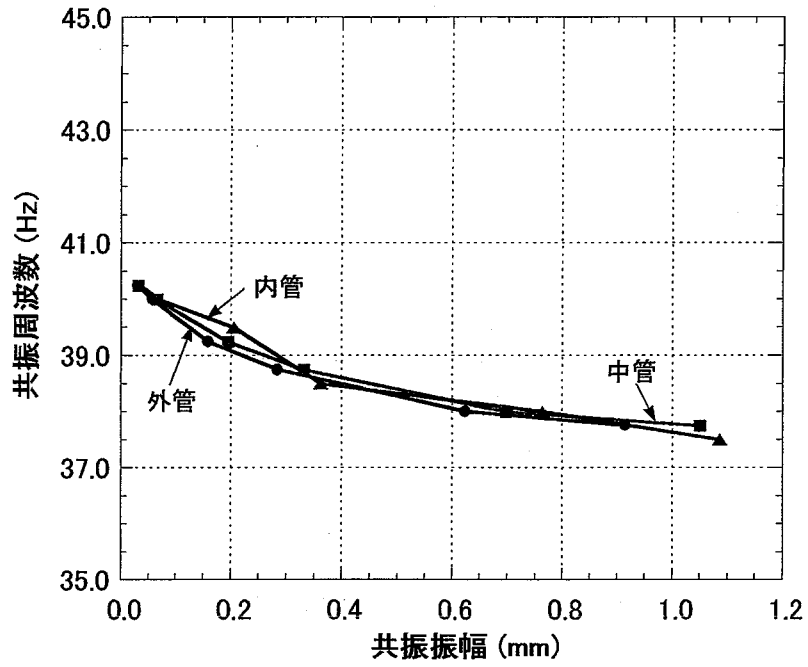


(a) 共振振幅に対する共振周波数

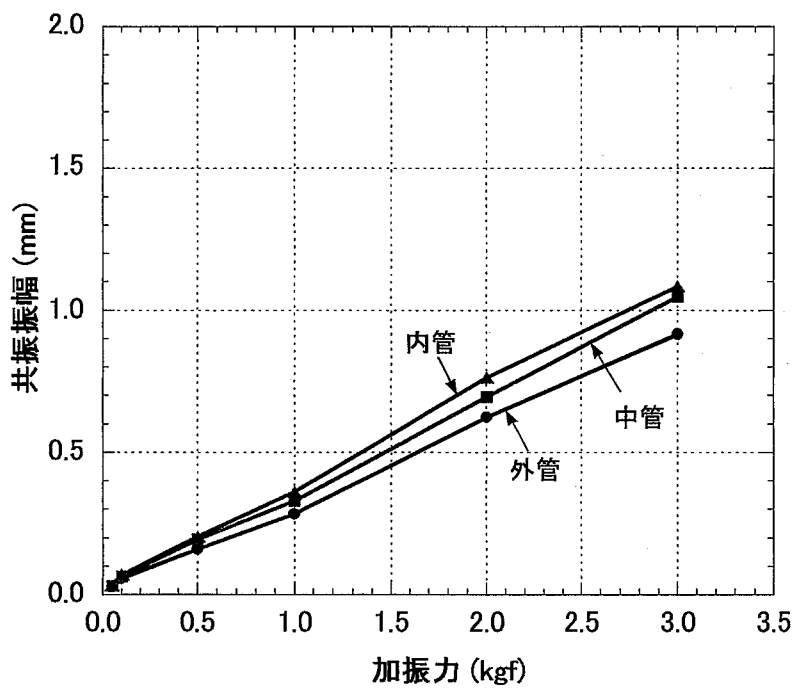


(b) 加振力に対する共振振幅

図3-12 供試体Aの気中振動特性(支持スパン1m)

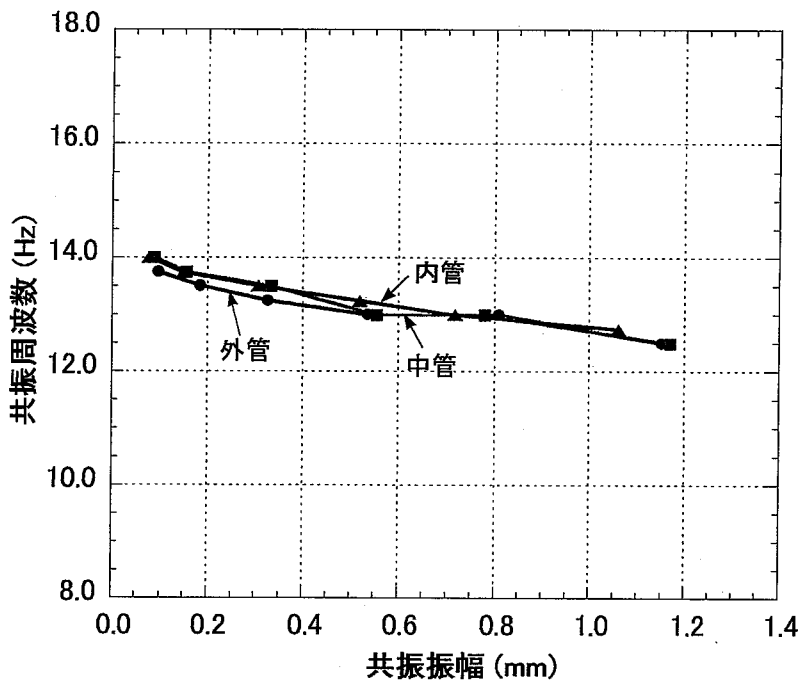


(a) 共振振幅に対する共振周波数

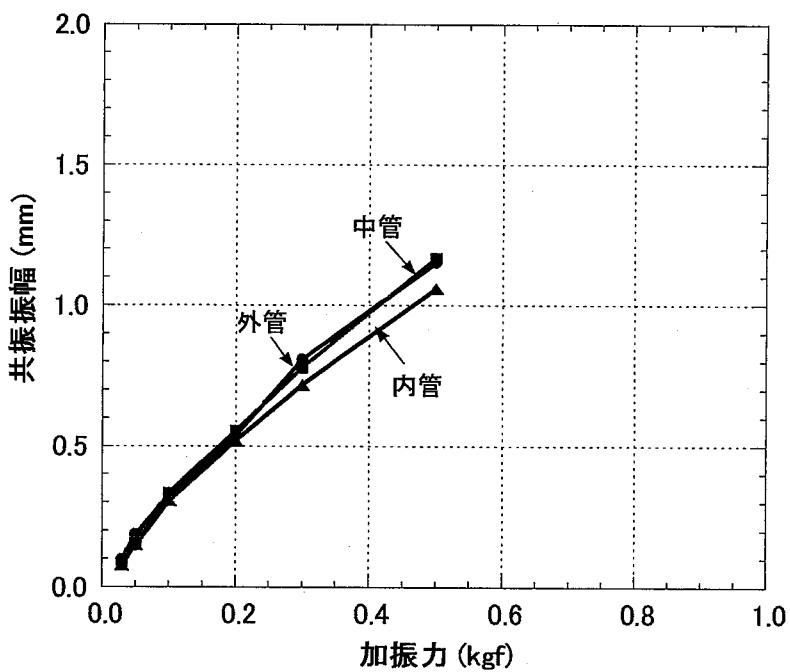


(b) 加振力に対する共振振幅

図3-13 供試体Aの水中振動特性(支持スパン1m)

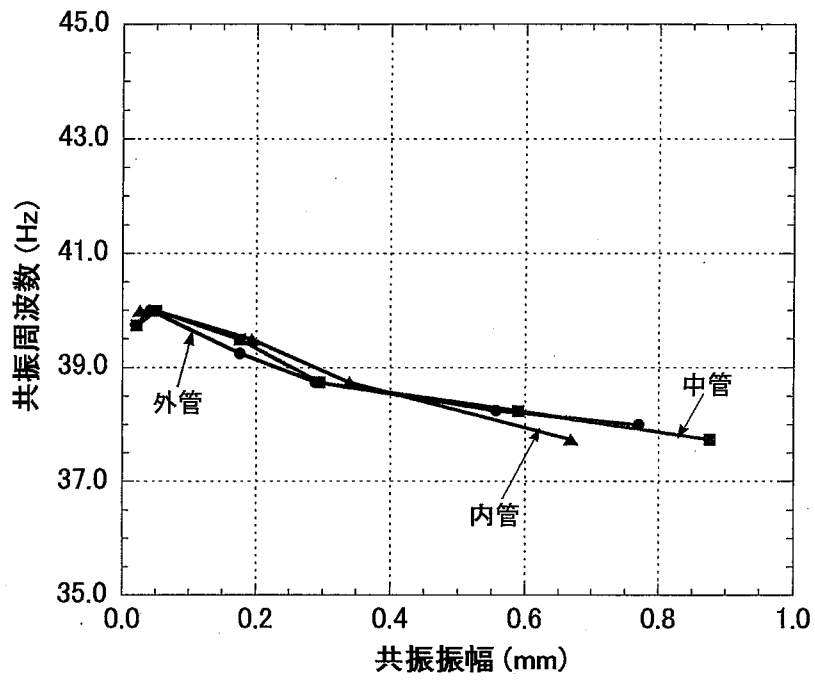


(a) 共振振幅に対する共振周波数

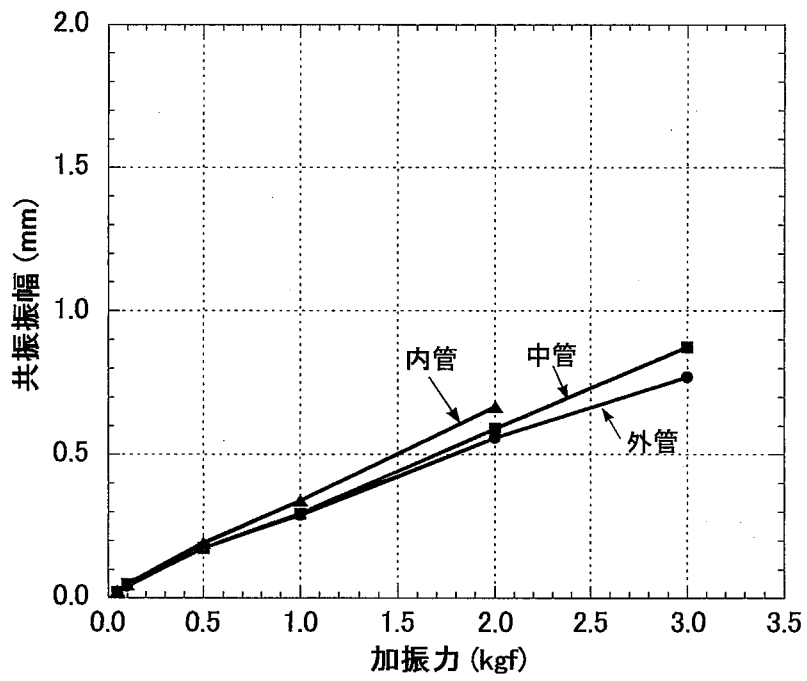


(b) 加振力に対する共振振幅

図3-14 供試体Aの水中振動特性(支持スパン2m)

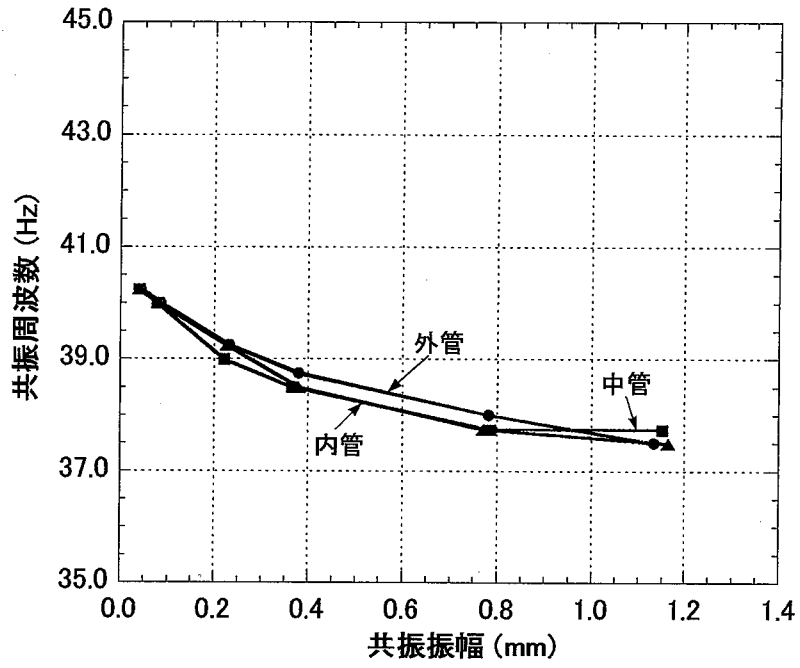


(a) 共振振幅に対する共振周波数

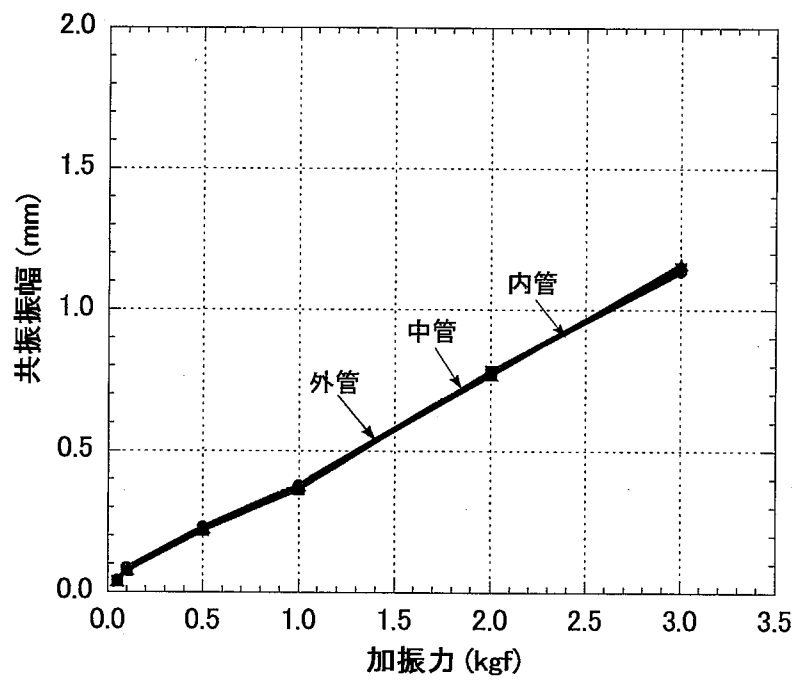


(b) 加振力に対する共振振幅

図3-15 供試体Cの水中振動特性

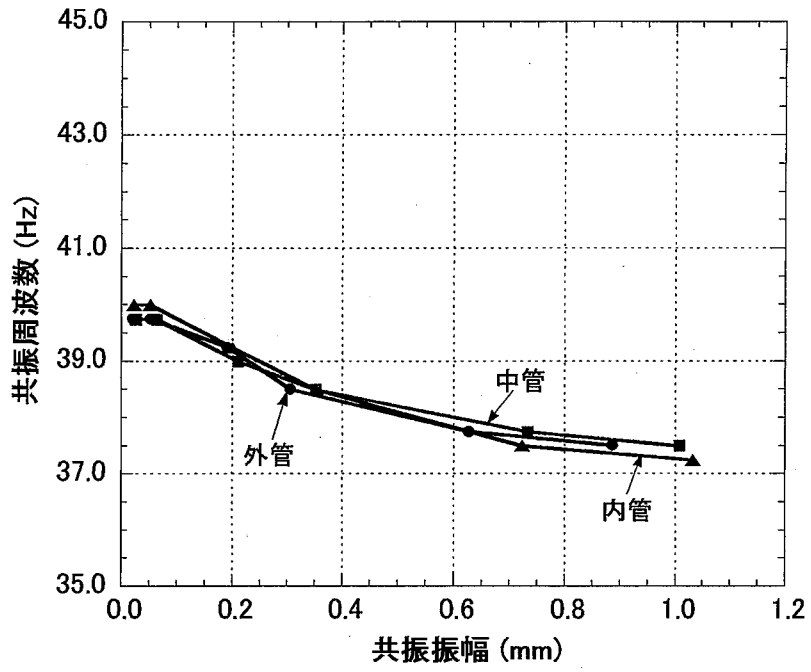


(a) 共振振幅に対する共振周波数

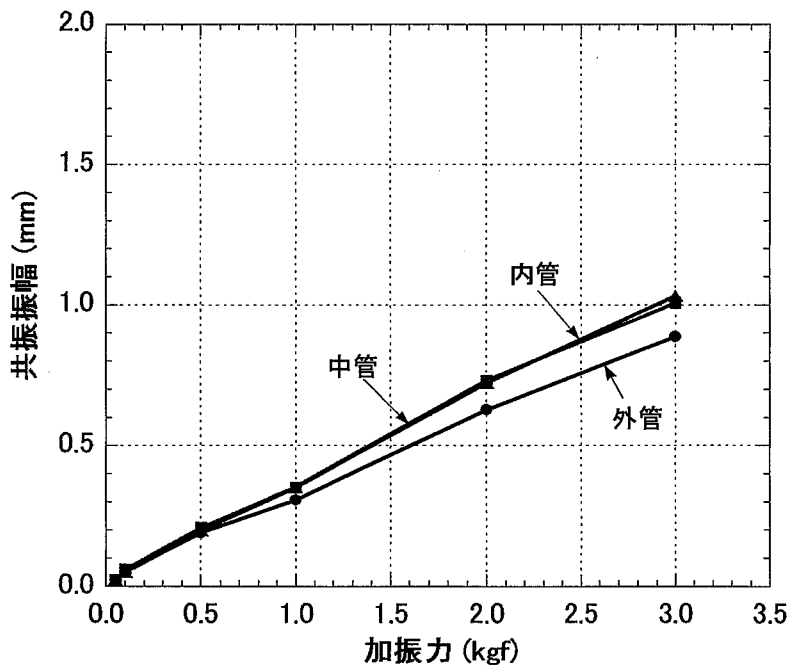


(b) 加振力に対する共振振幅

図3-16 供試体Dの水中振動特性

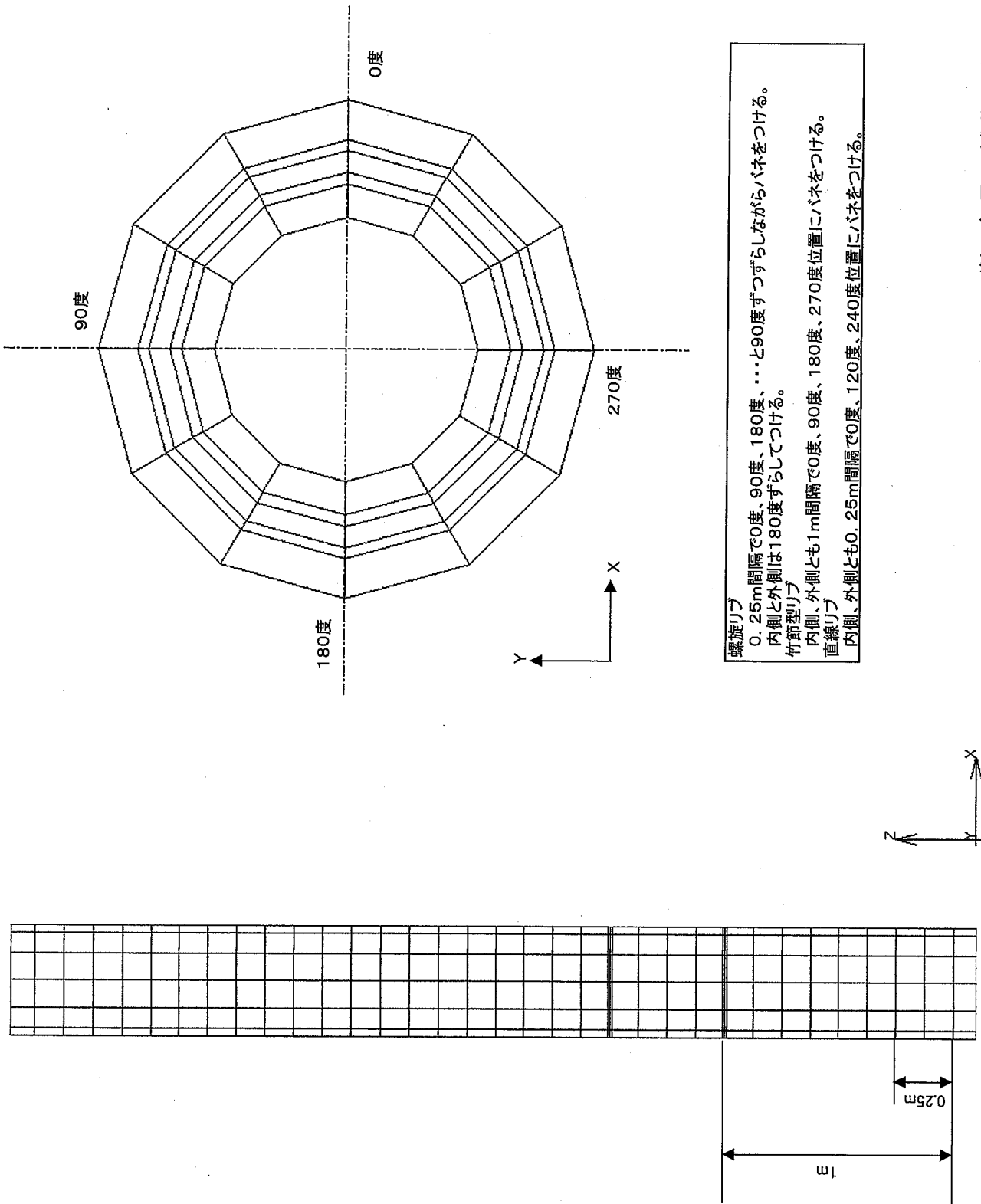


(a) 共振振幅に対する共振周波数



(b) 加振力に対する共振振幅

図3-17 供試体Eの水中振動特性



螺旋リブ
 0.25m 間隔で0度、90度、180度、...と90度ずつしながらハネをつける。
 内側と外側は180度ずらしてつける。
 竹節型リブ
 内側、外側とも1m 間隔で0度、90度、180度、270度位置にハネをつける。
 直線リブ
 内側、外側とも0.25m 間隔で0度、120度、240度位置にハネをつける。

注)モデル図のZ座標値は、デフォルムしている。

図4-1 解析モデル

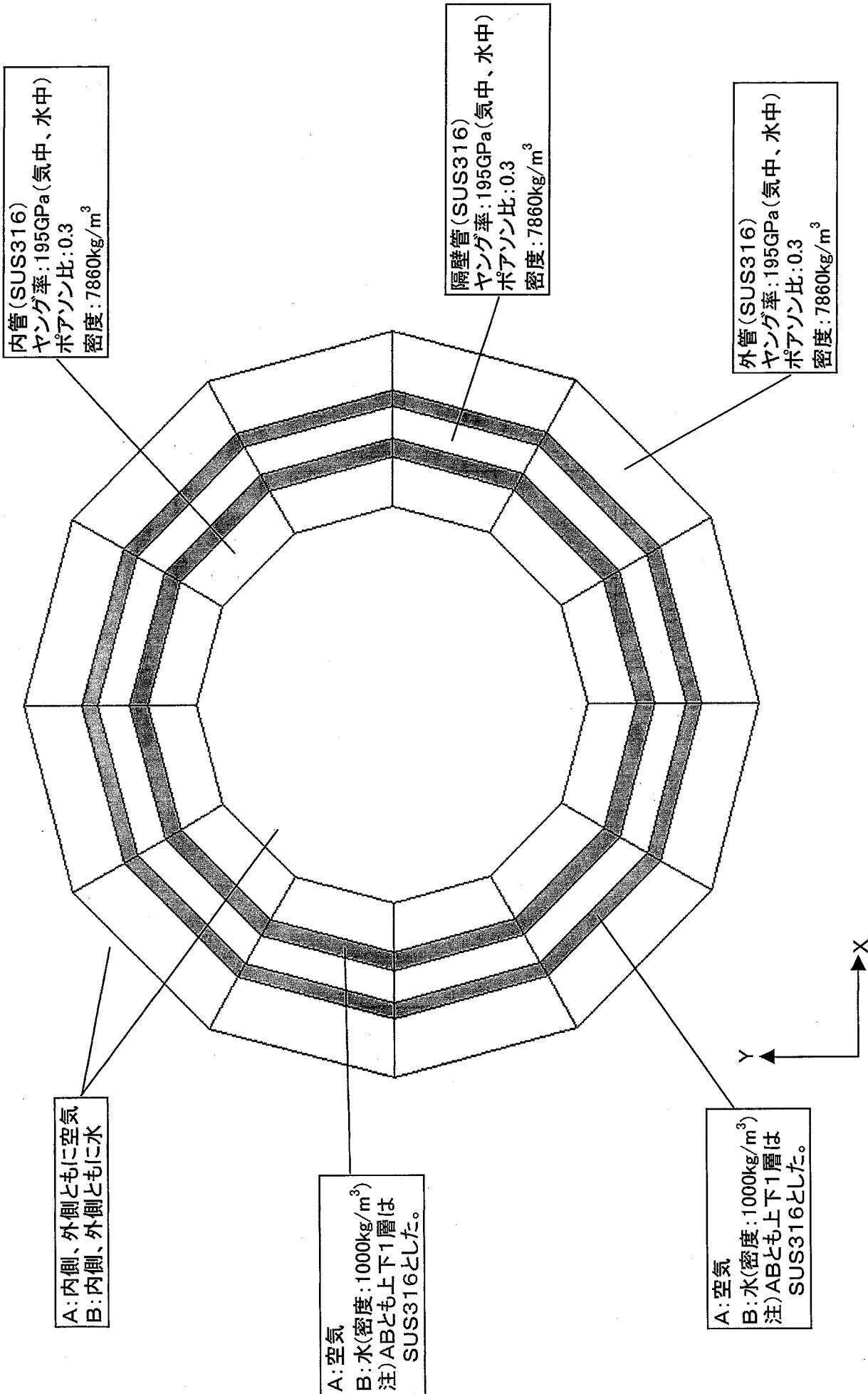


図4-2 材料物性値(端栓付ピン支持)

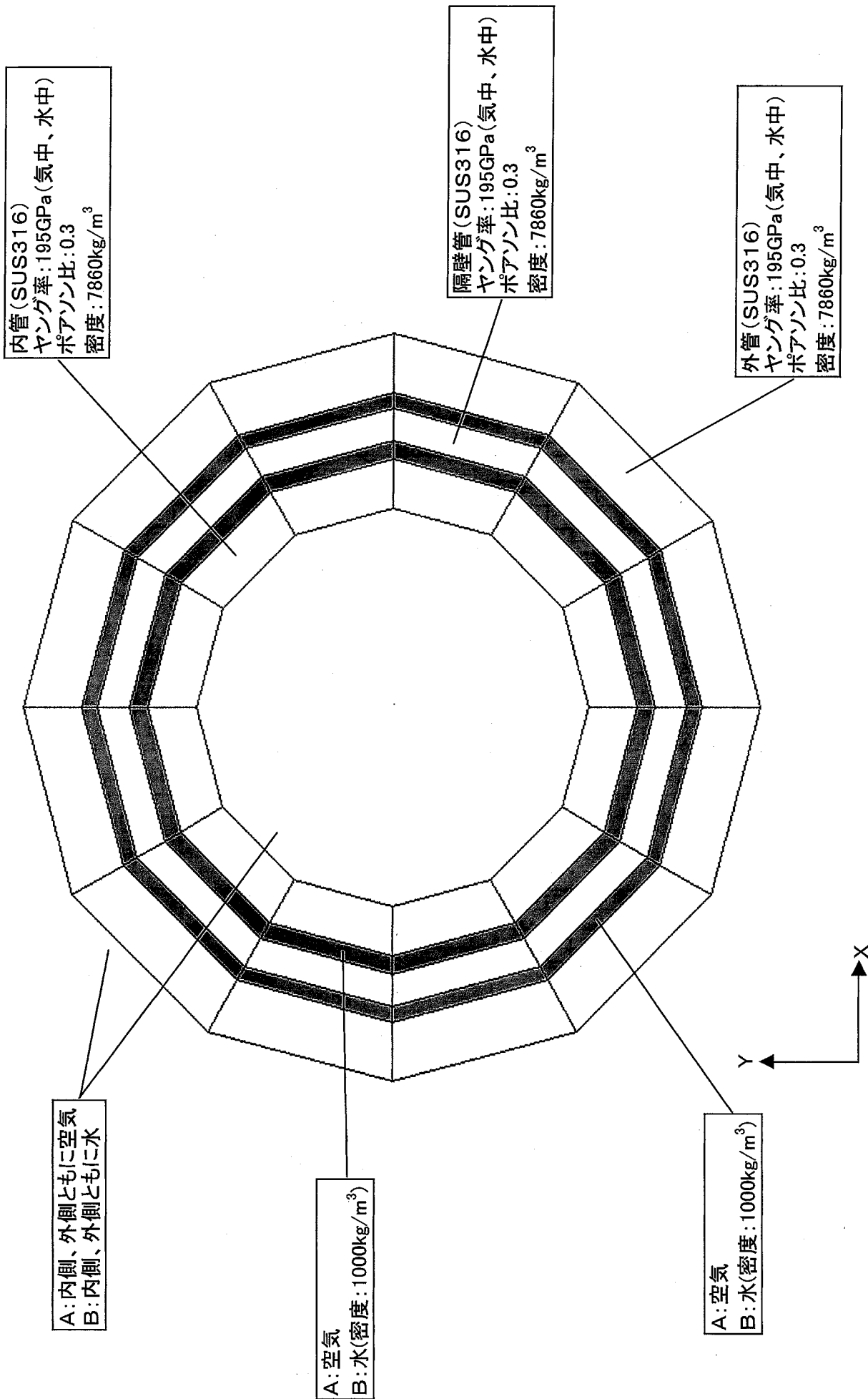


図4-3 材料物性値 (3管独立ピン支持)

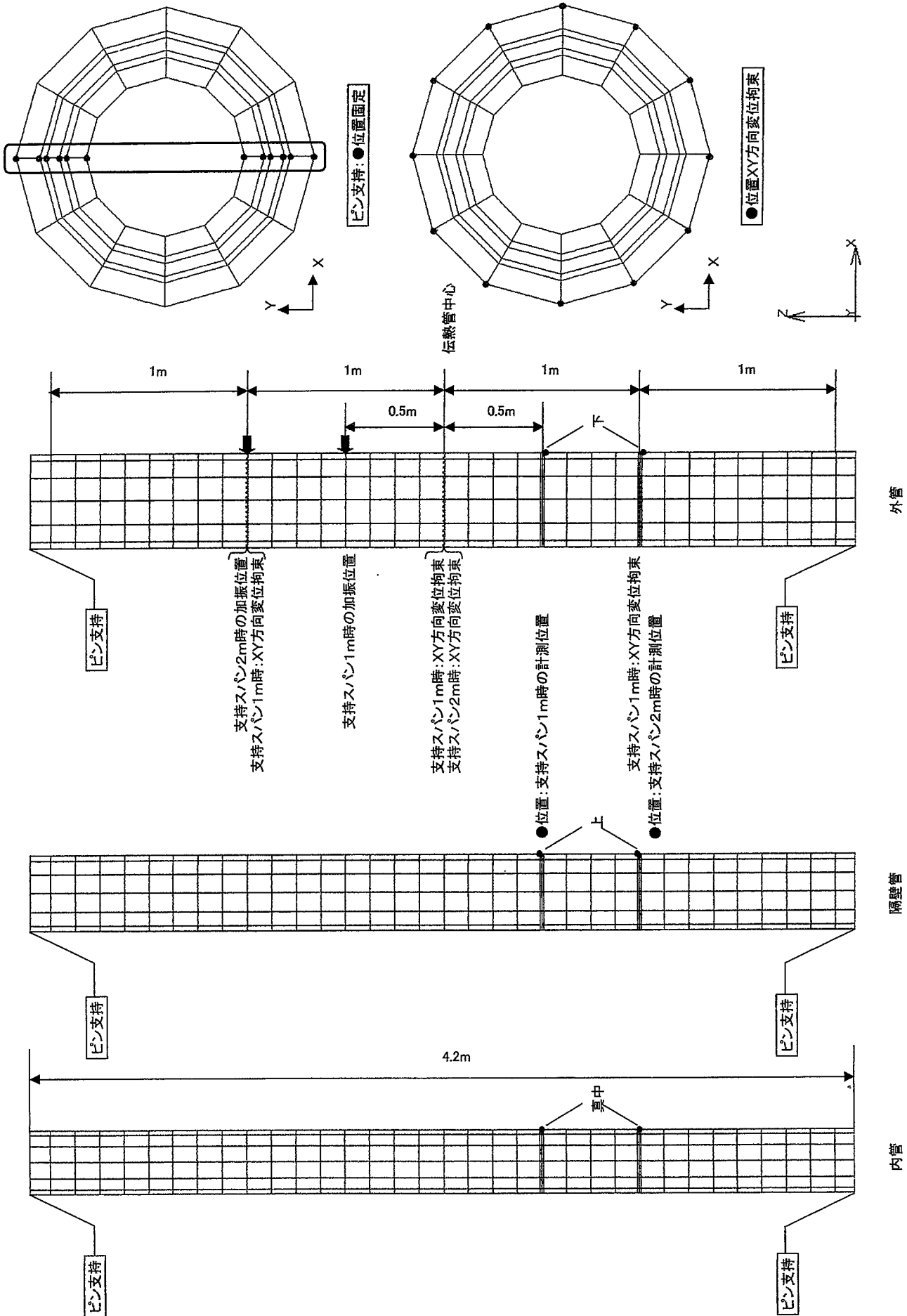


図4-4 支持条件(端縁付支持ピン)

注) モデル図のZ座標値は、デフォルト値である。

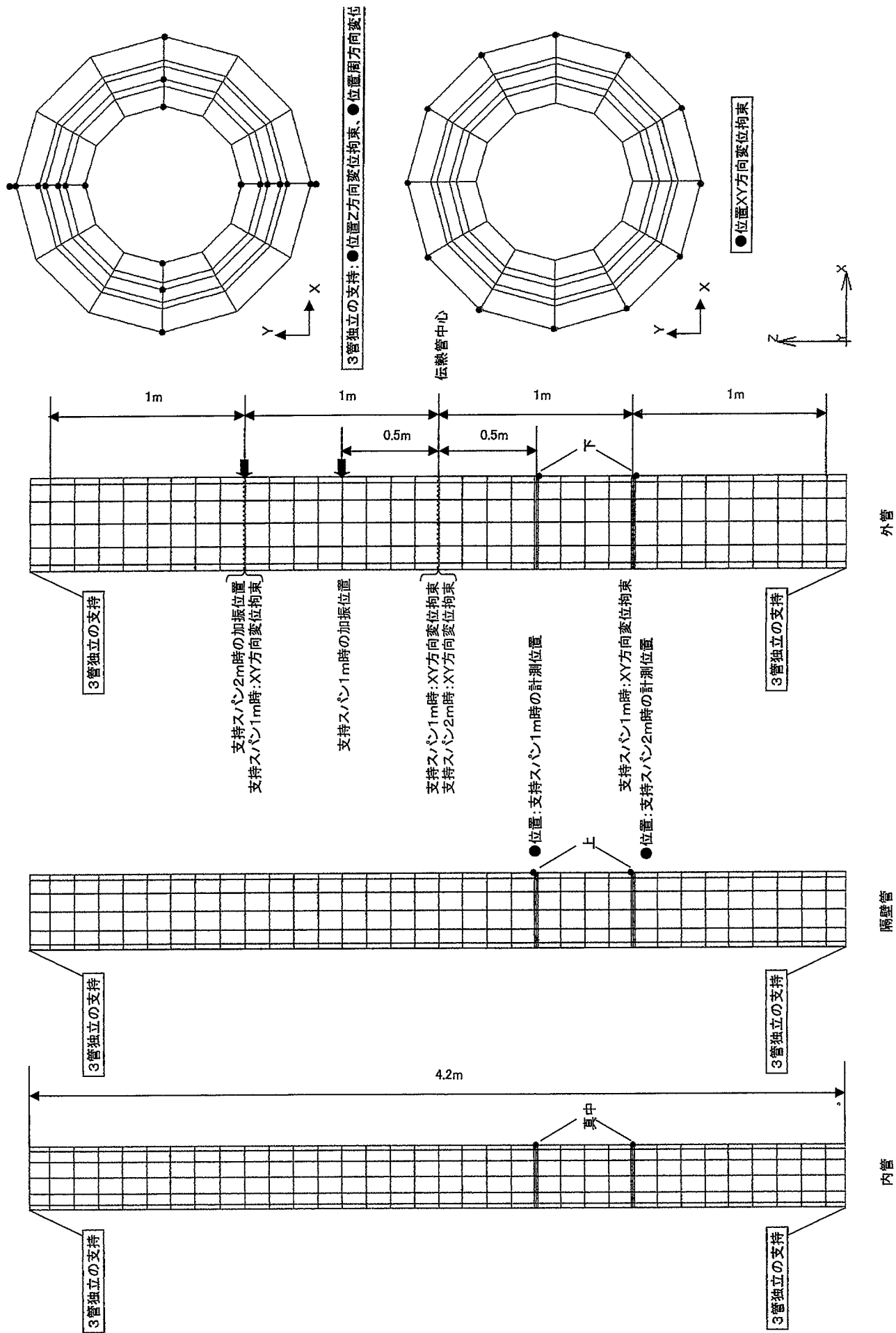


図4-5 支持条件(3管独立ピン支持)

注)モデル図のZ座標値は、デフォルトしている。

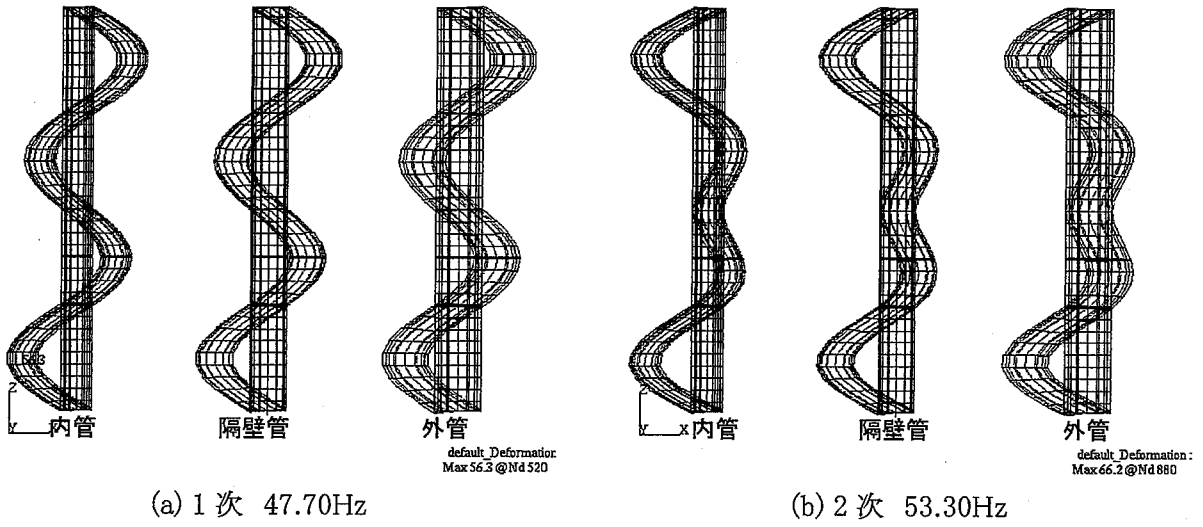
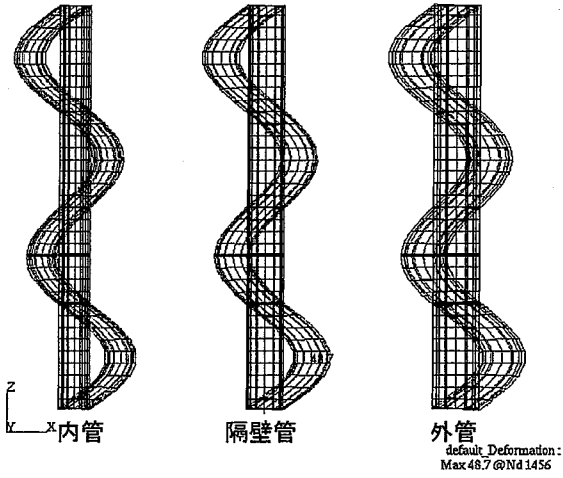
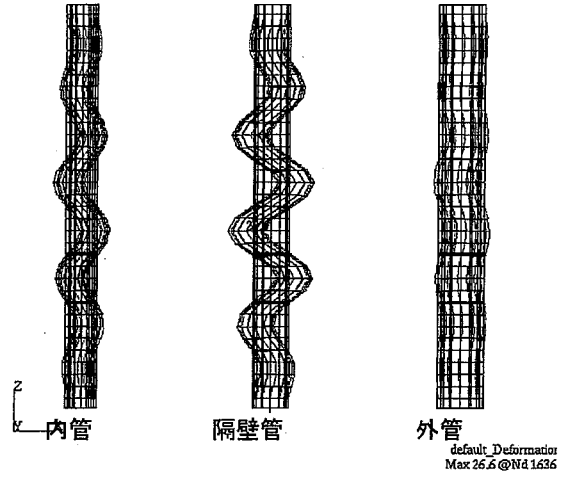


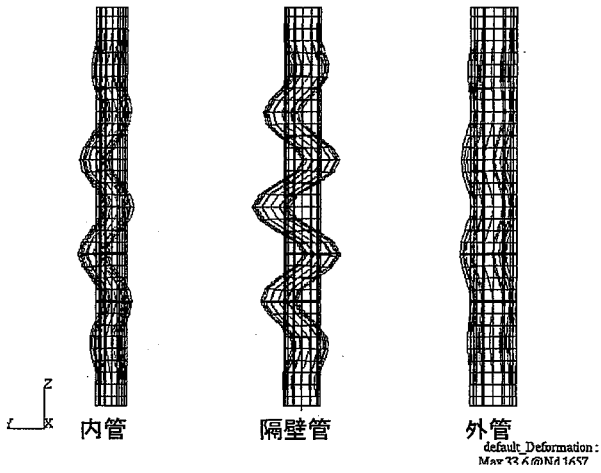
図 4-6 モード図(ケース1 内外螺旋リブ バッフル板ピッチ 1m 気中試験)



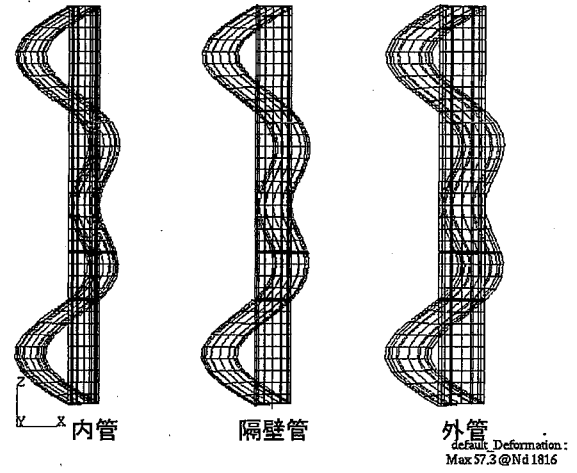
(a) 1次 41.37Hz



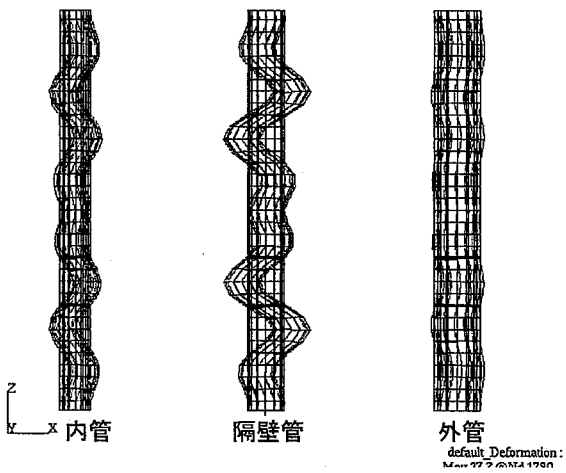
(b) 2次 44.12Hz



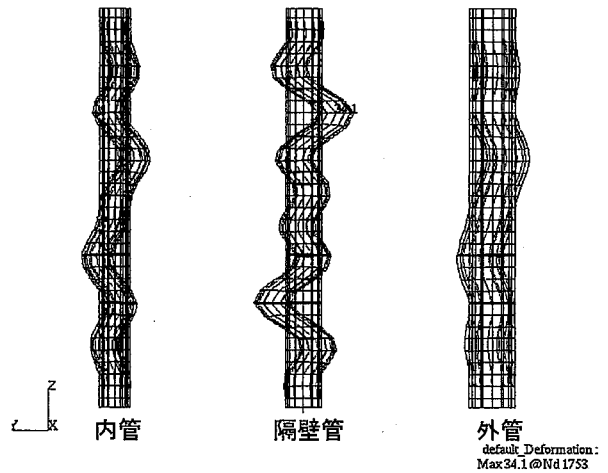
(c) 3次 44.24Hz



(d) 4次 46.23Hz



(e) 5次 49.79Hz



(f) 6次 50.58Hz

図 4-7 モード図(ケース2 内外螺旋リブ バッフル板ピッチ1m 水中試験)

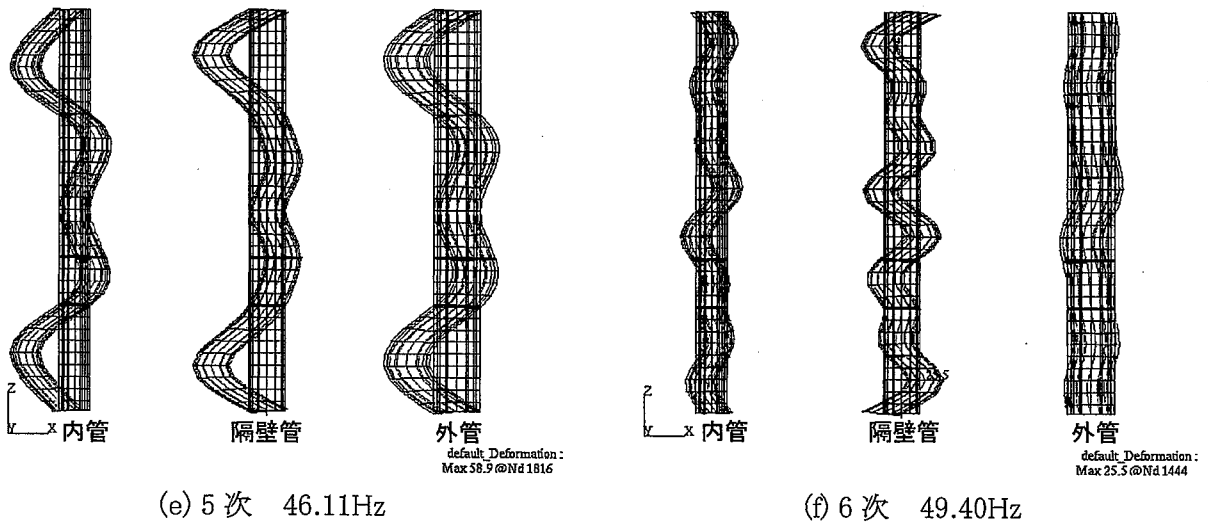
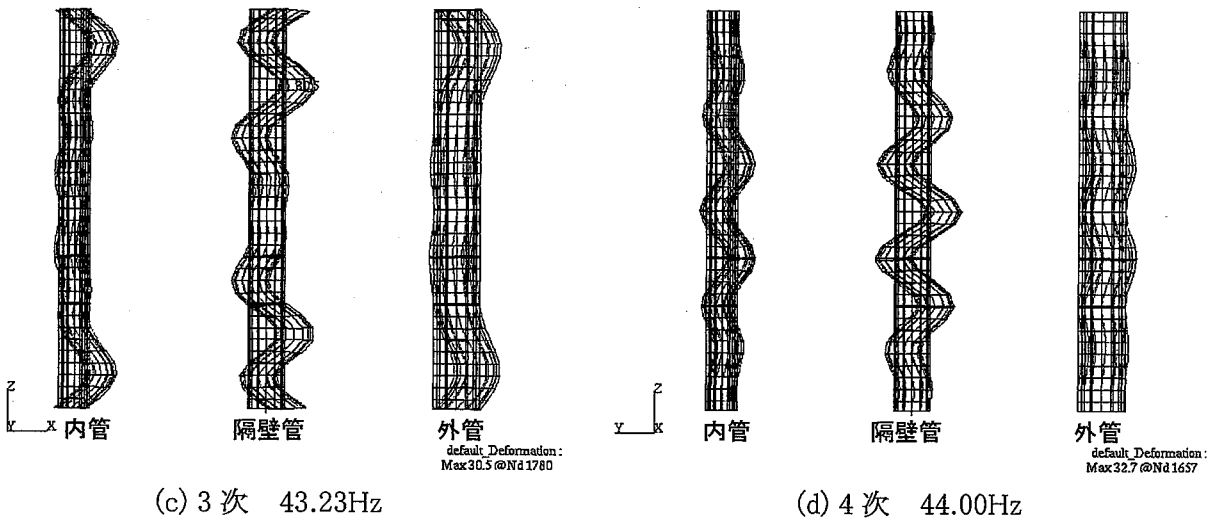
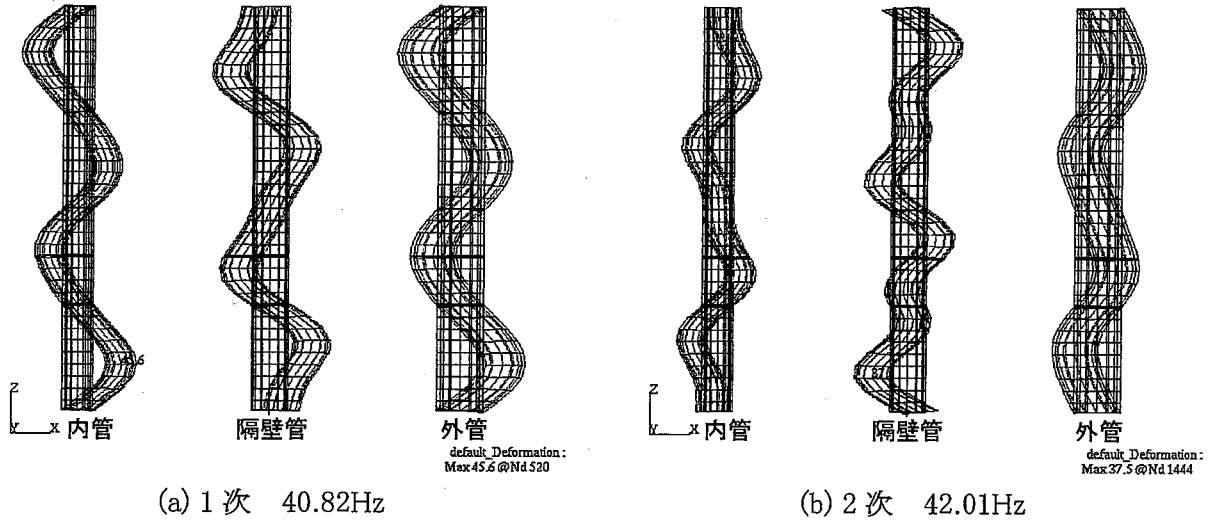
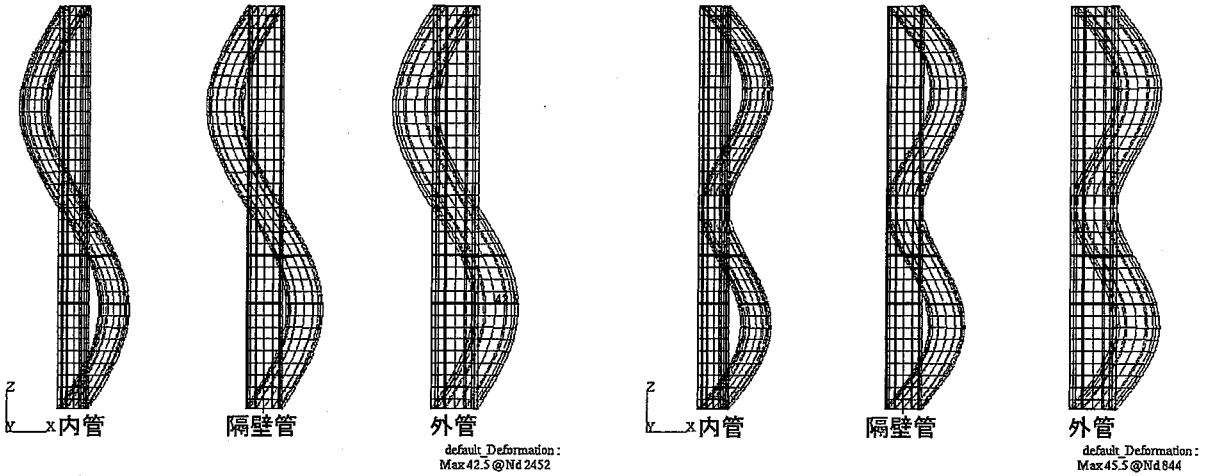
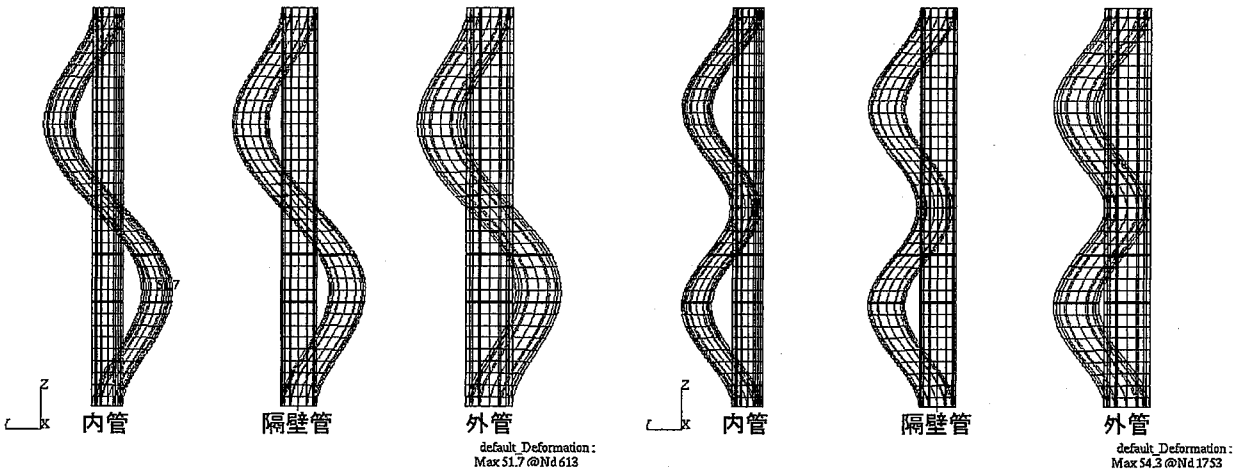


図 4-8 モード図 (ケース2' 内外螺旋リブ バッフル板ピッチ1m 水中試験 端部3管独立支持)



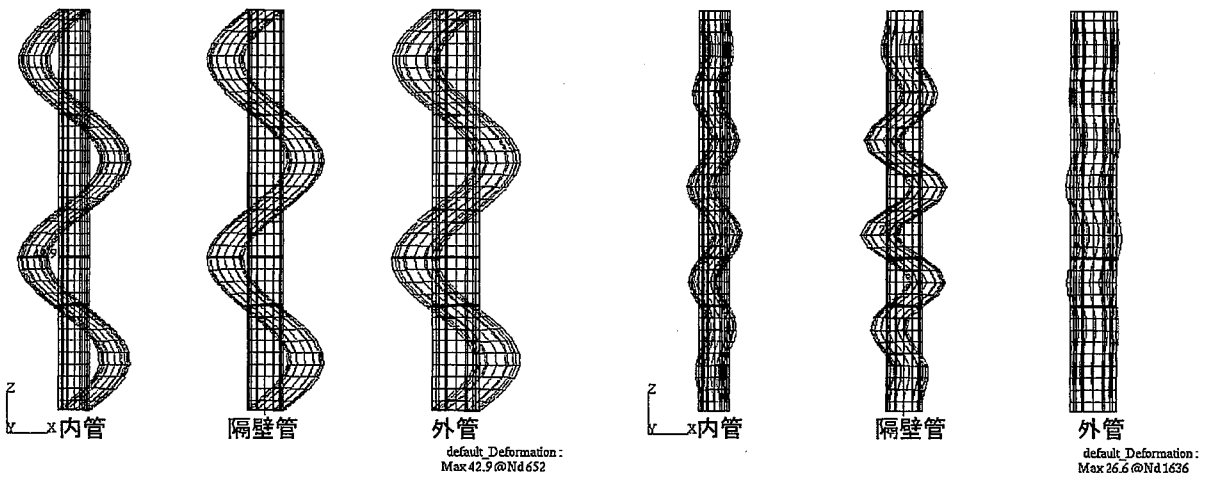
(a) 1次 10.37Hz

(b) 2次 16.28Hz



(c) 3次 18.51Hz

(d) 4次 26.84Hz



(e) 5次 41.94Hz

(f) 6次 44.1Hz

図 4-9 モード図(ケース 3 内外螺旋リブ バッフル板ピッチ 2m 水中試験)

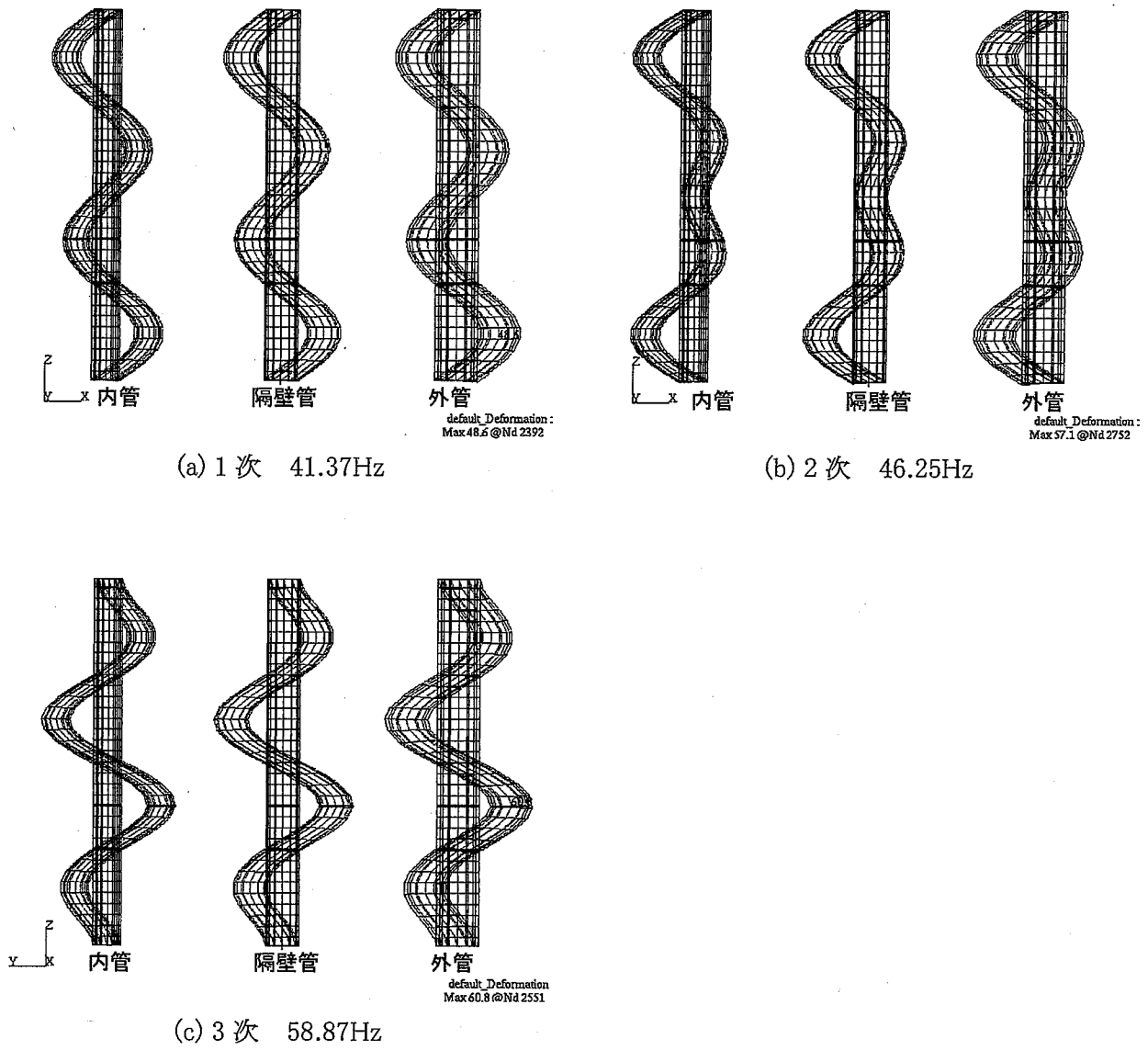


図 4-10 モード図(ケース4 内外直線リブ(標準ギャップ) バッフル板ピッチ1m 水中試験)

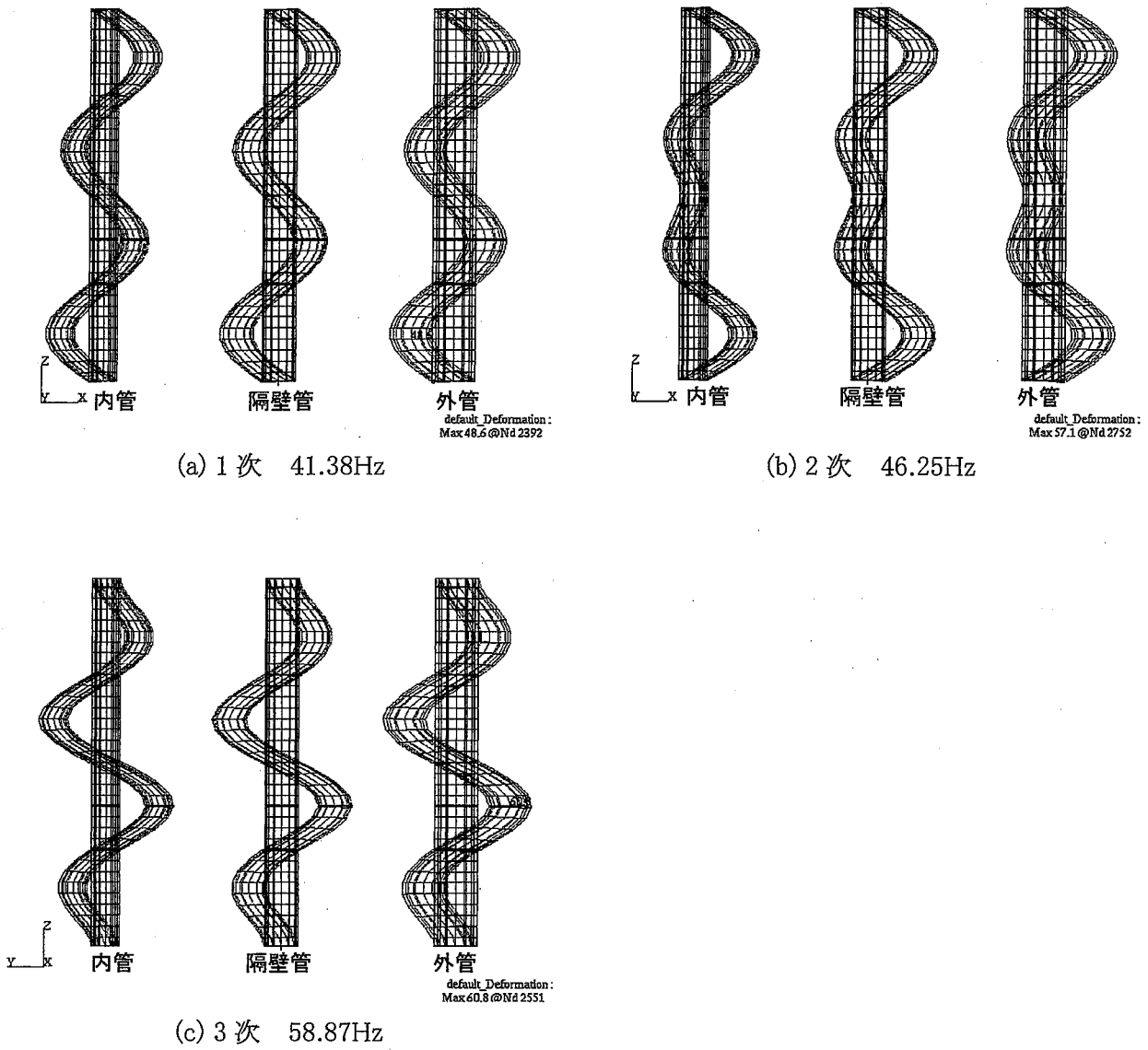


図 4-11 モード図(ケース5 内外直線リブ(狭小ギャップ) バッフル板ピッチ1m 水中試験)

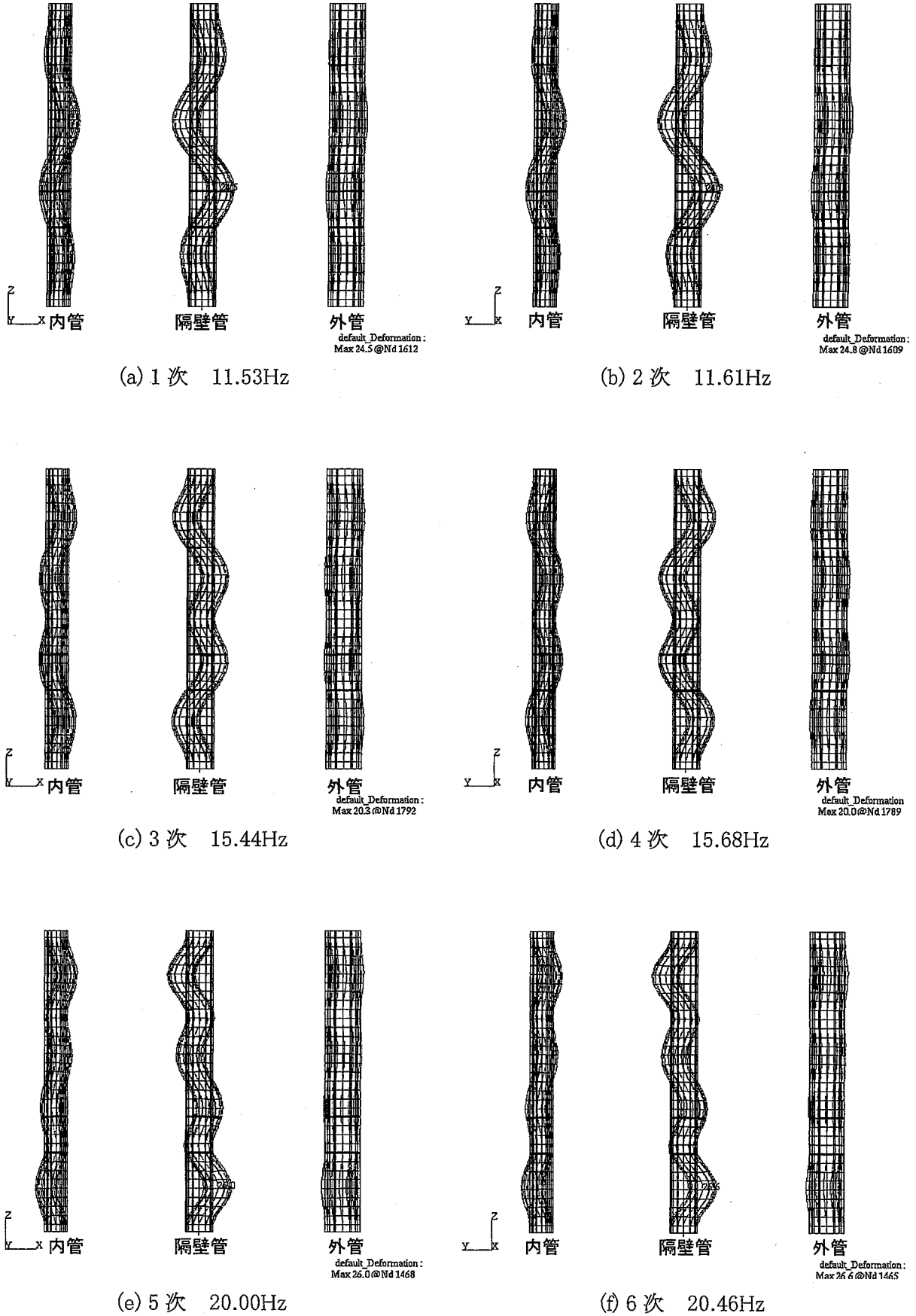


図 4-12 モード図(ケース6 内外竹節型リブ バッフル板ピッチ1m 水中試験) (1/4)

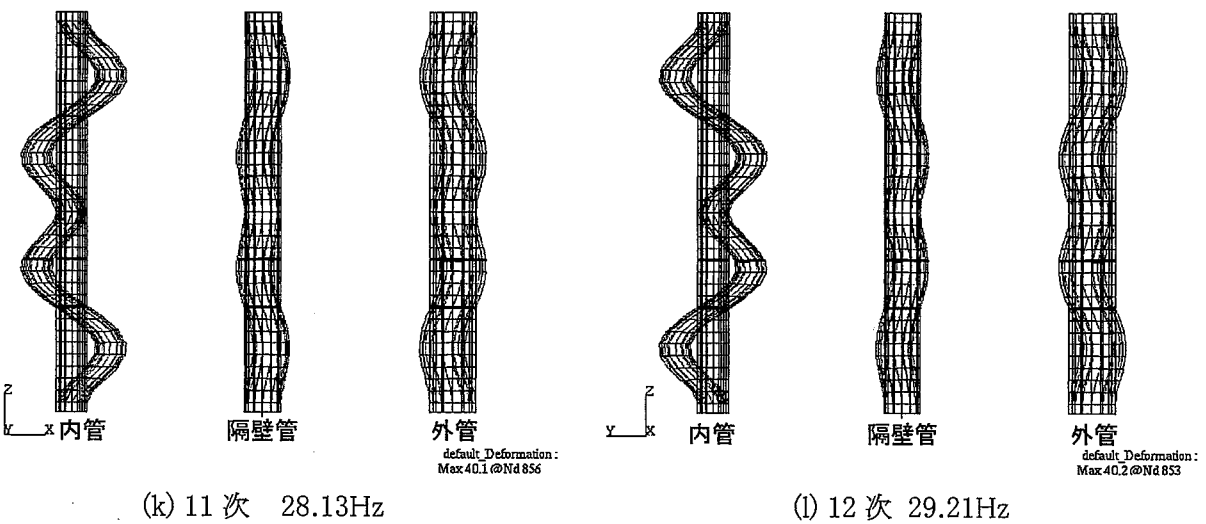
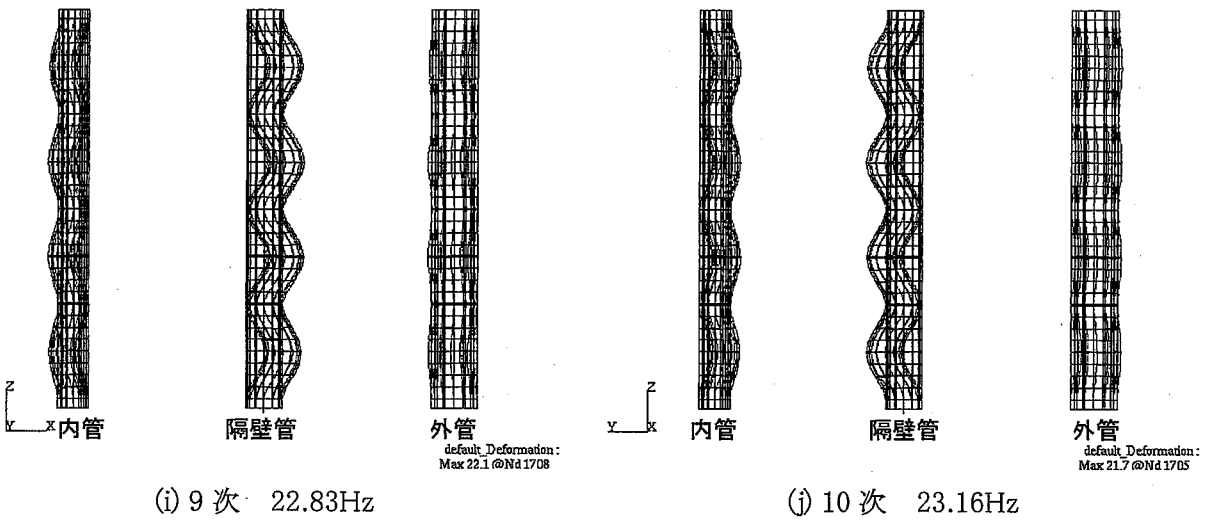
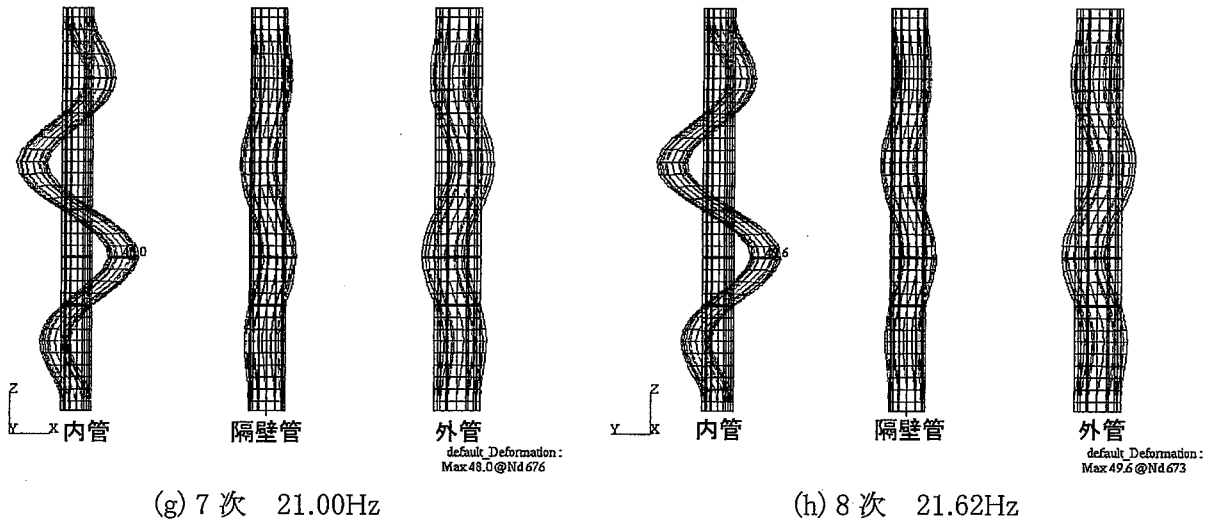


図 4-12 モード図(ケース6 内外竹節型リブ バッフル板ピッチ1m 水中試験) (2/4)

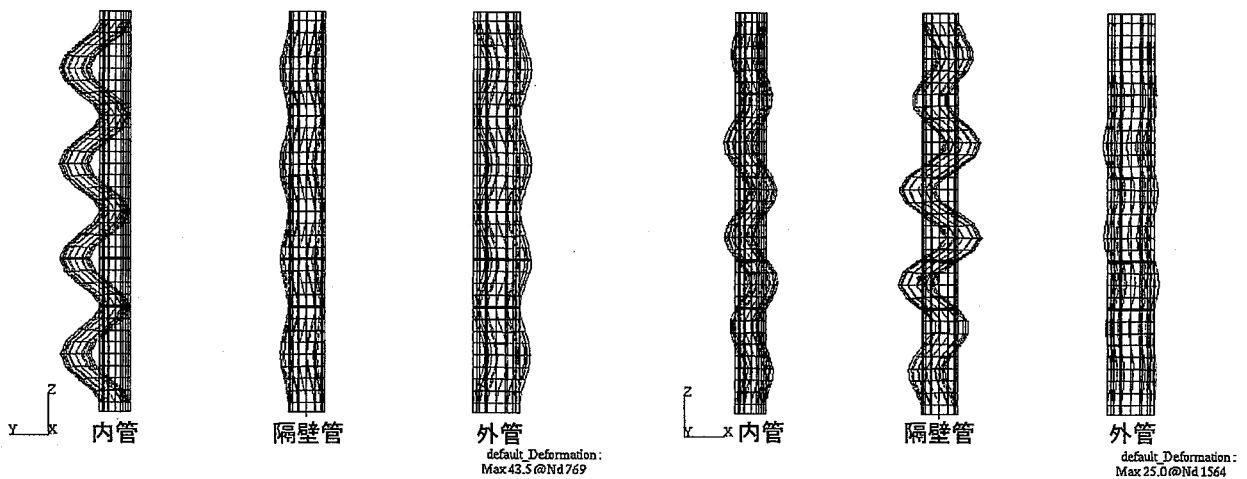
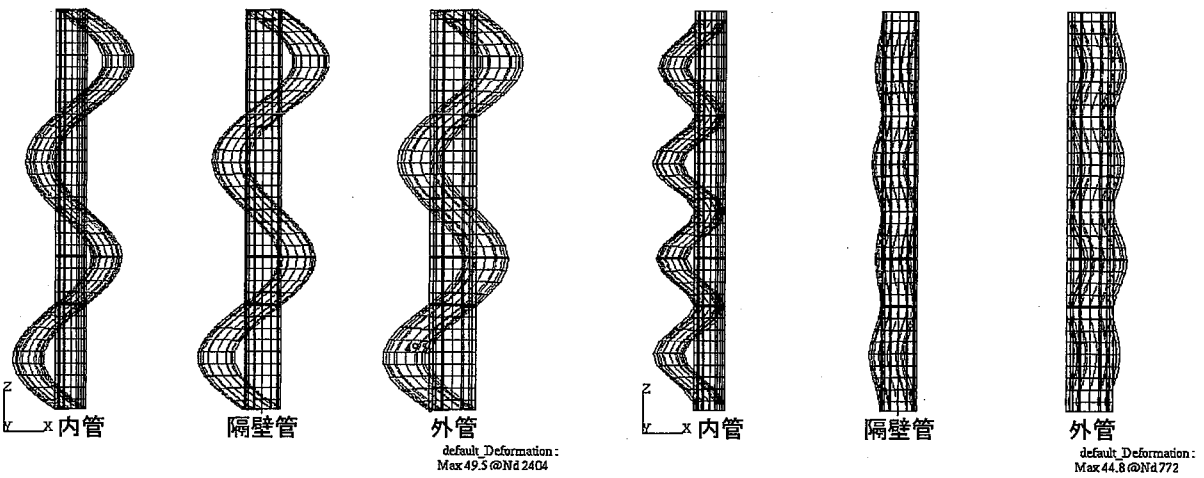
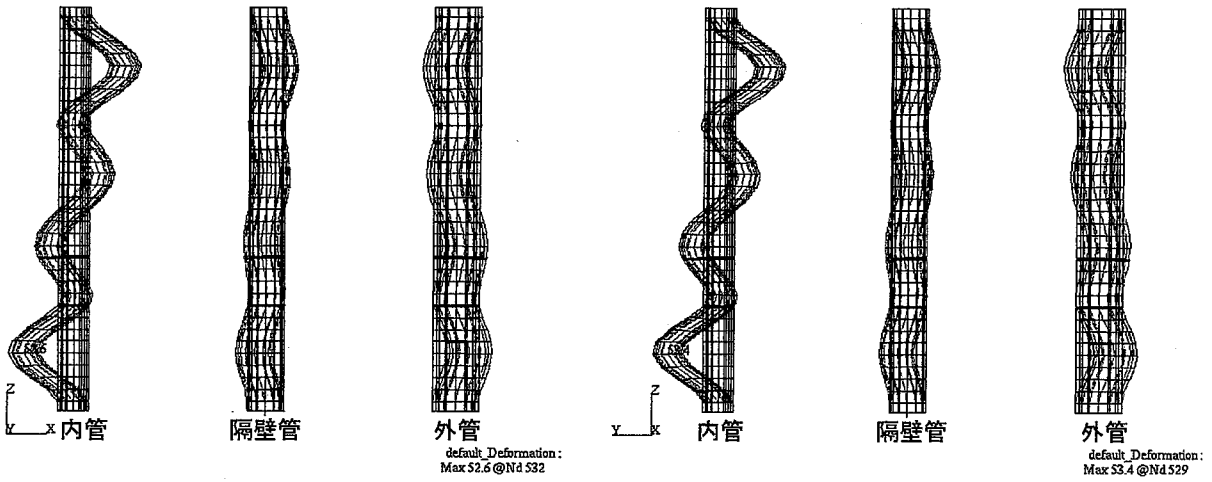


図 4-12 モード図(ケース6 内外竹節型リブ バッフル板ピッチ1m 水中試験) (3/4)

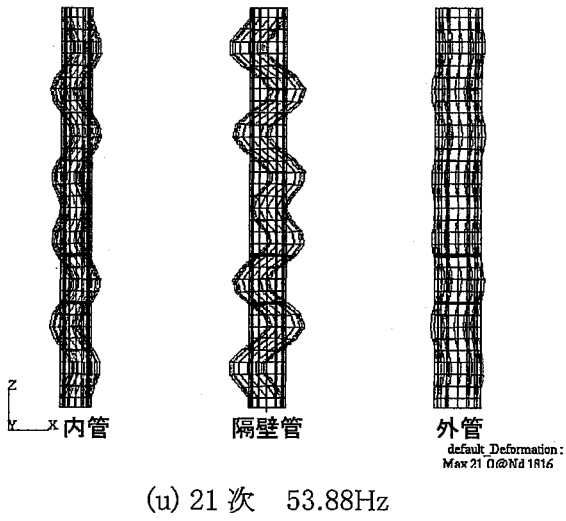
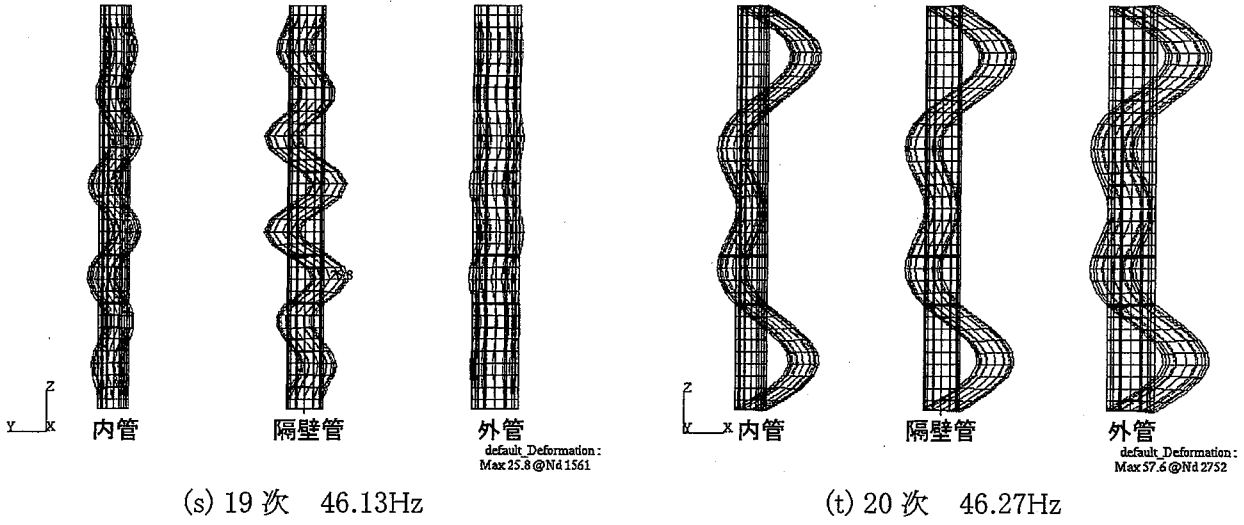
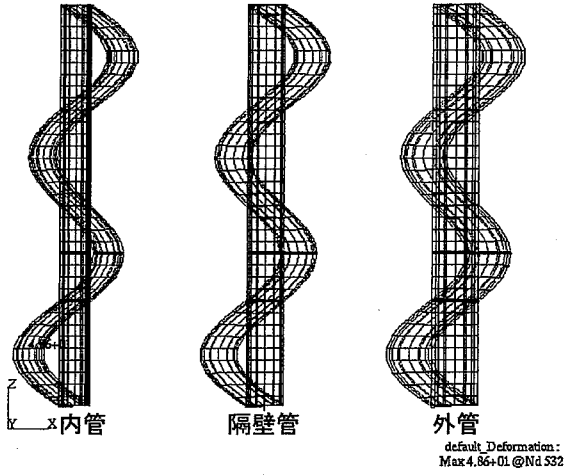
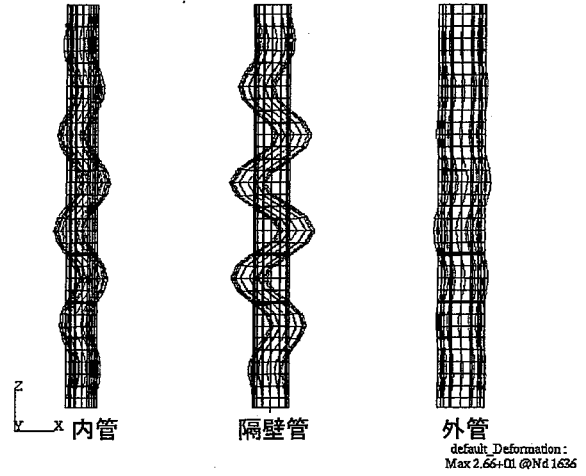


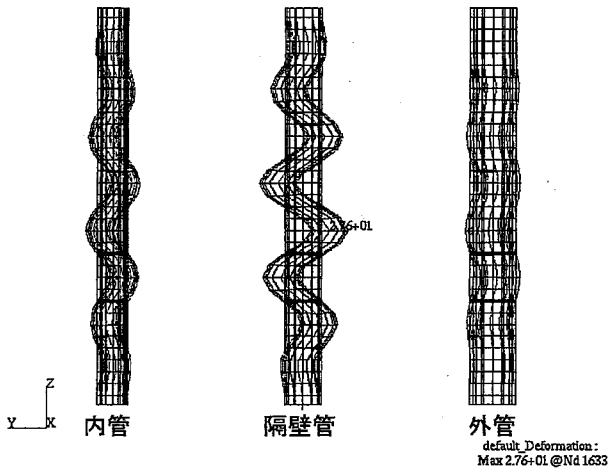
図 4-12 モード図(ケース6 内外竹節型リブ バッフル板ピッチ1m 水中試験)(4/4)



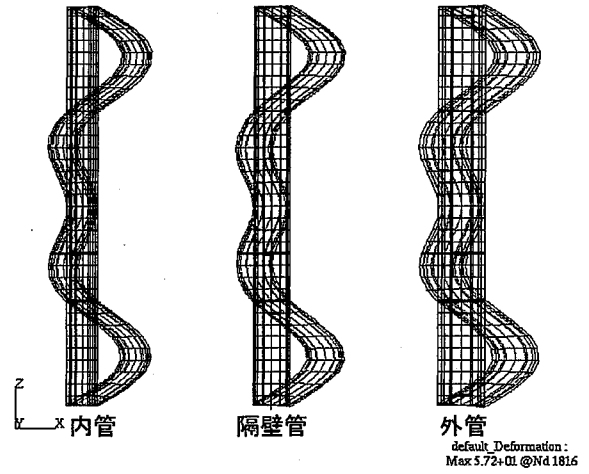
(a) 1次 41.37Hz



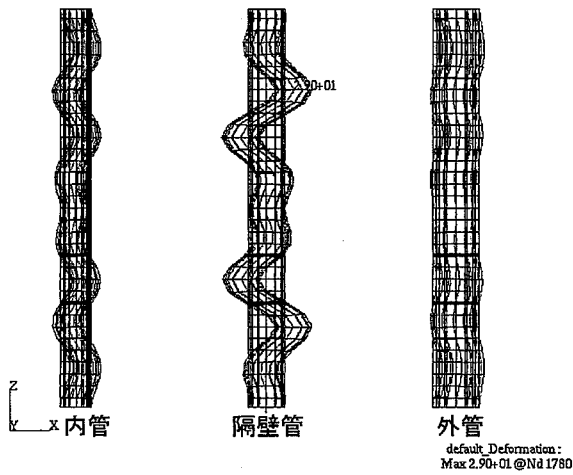
(b) 2次 43.89Hz



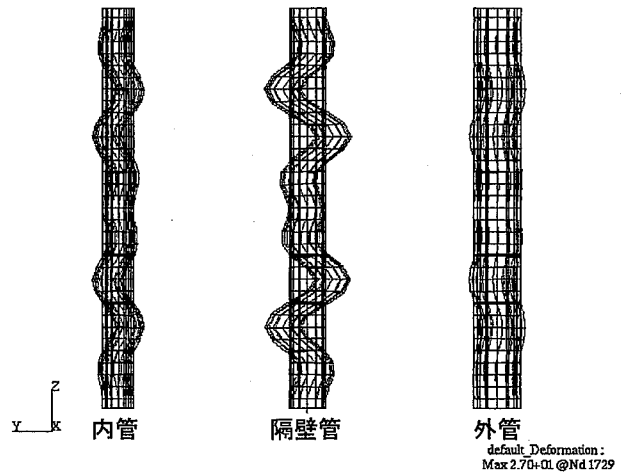
(c) 3次 44.03Hz



(d) 4次 46.23Hz



(e) 5次 48.86Hz



(f) 6次 49.14Hz

図 4-13 モード図(ケース 6' 内外竹節型リブ バッフル板ピッチ 1m 水中試験)

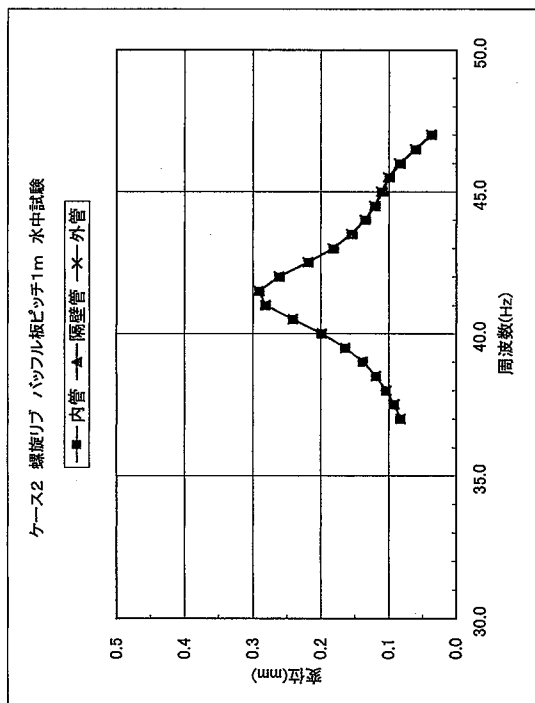
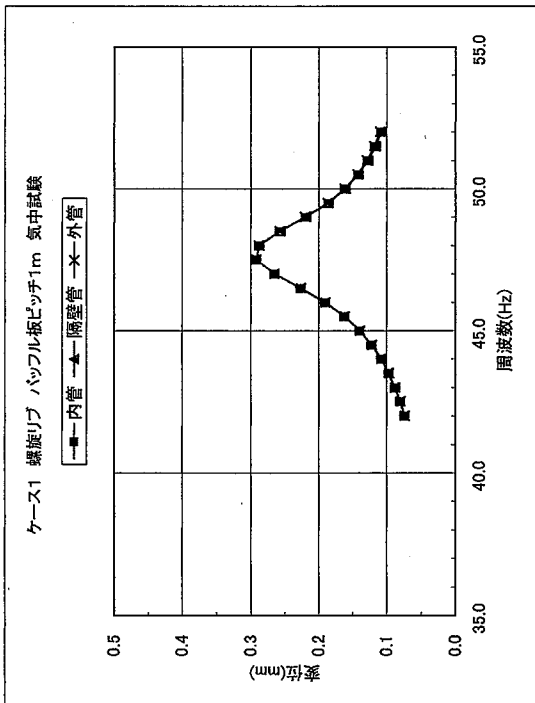
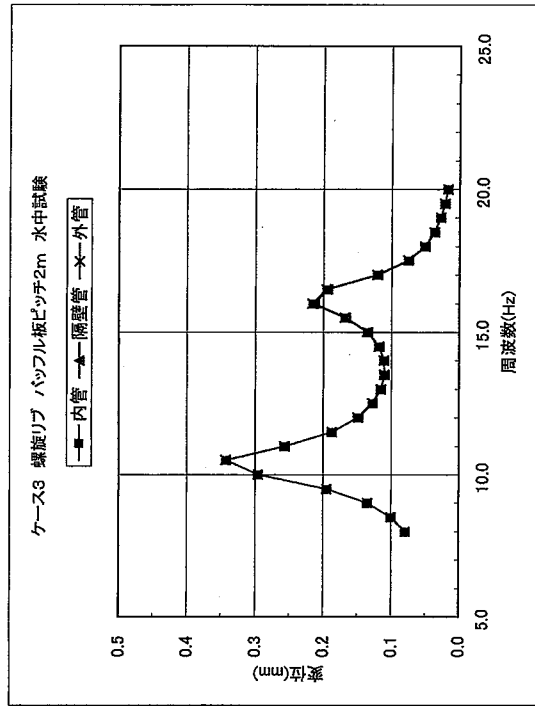
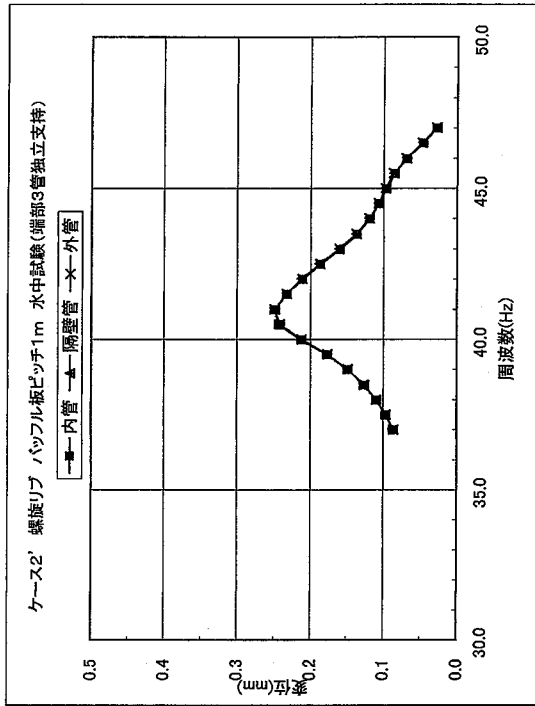


図4-14 周波数応答解析結果(計測点の変位応答)(1/2)

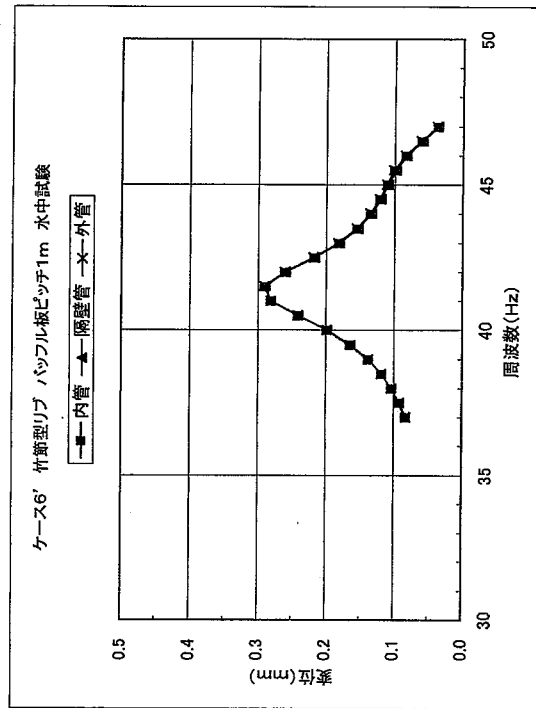
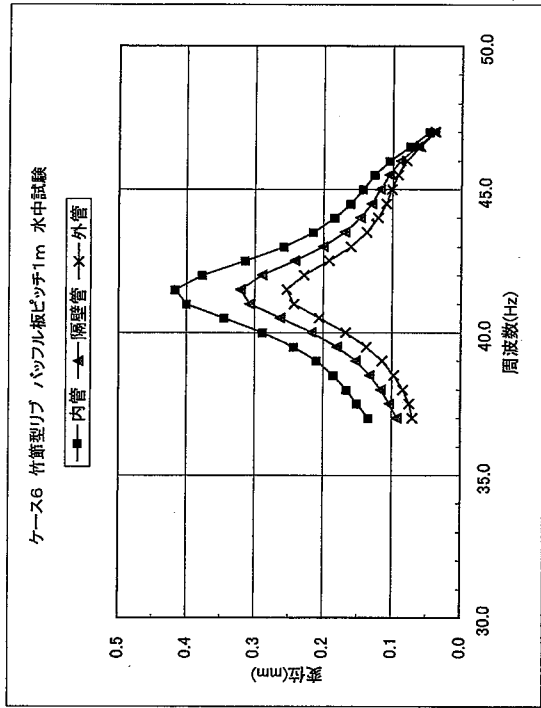
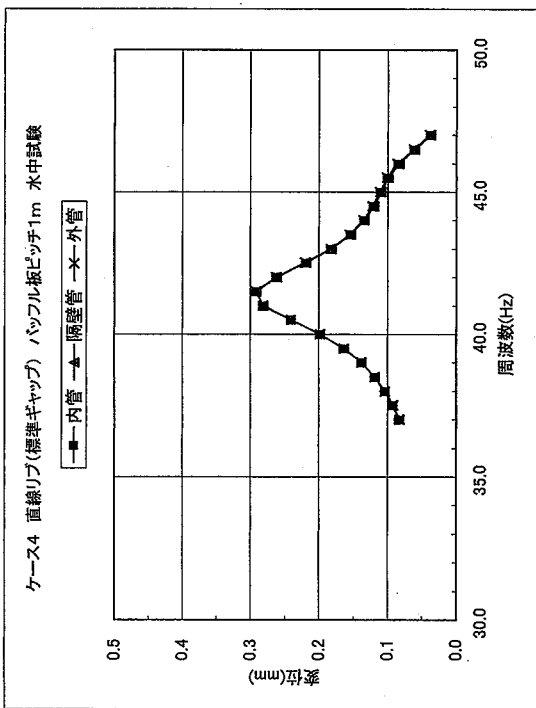
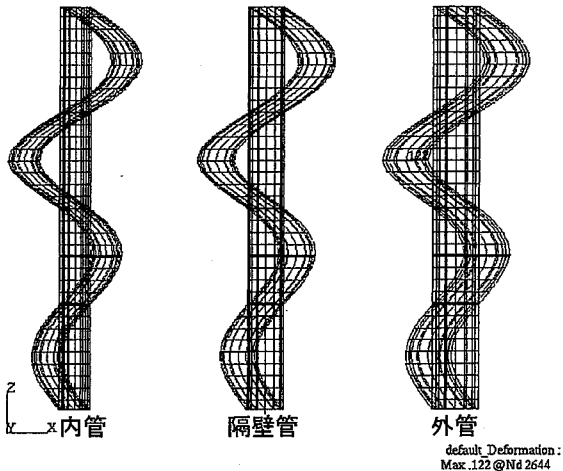
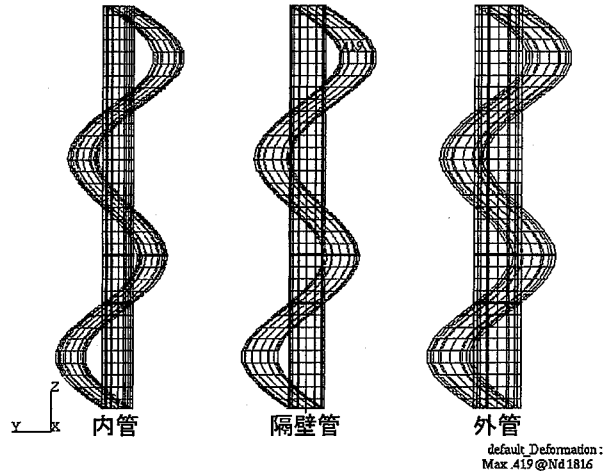


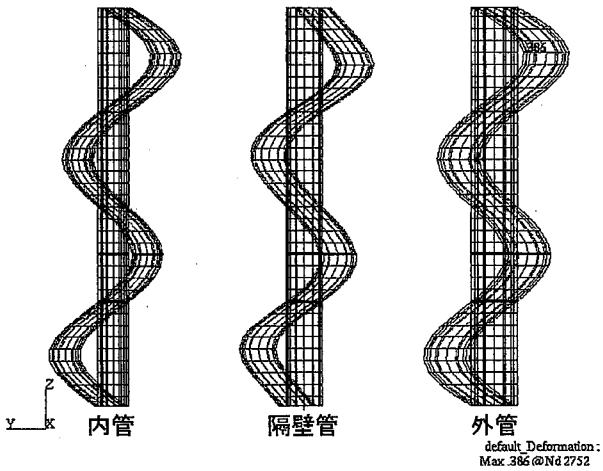
図4-14 周波数応答解析結果(計測点の変位応答)(2/2)



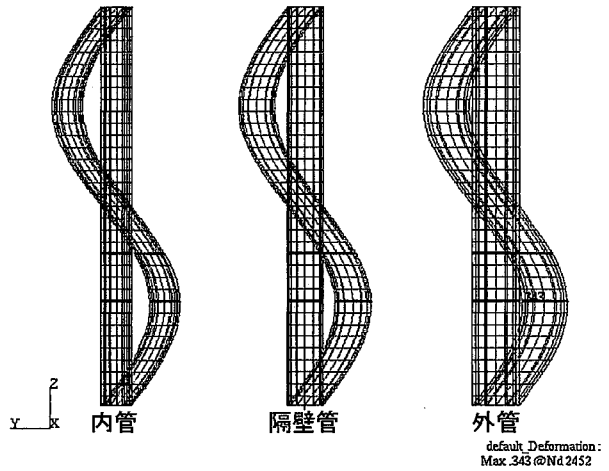
(a) ケース1(内外螺旋リブ バッフル板
ピッチ 1m 気中試験)47.5Hz



(b) ケース2(内外螺旋リブ バッフル板
ピッチ 1m 水中試験)41.5Hz

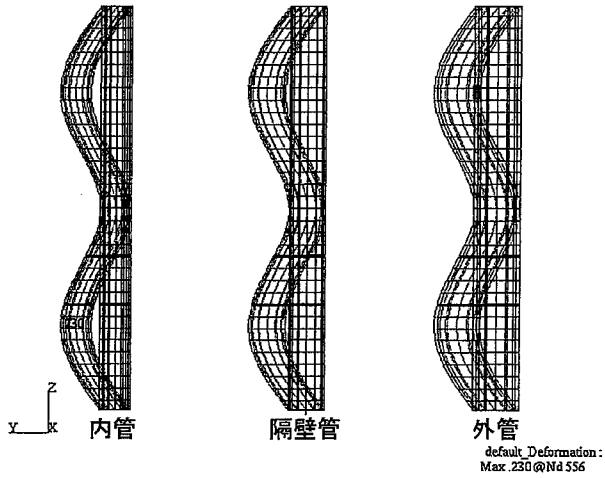


(c) ケース2'(内外螺旋リブ バッフル板
ピッチ 1m 水中試験 3管独立支持)41.0Hz

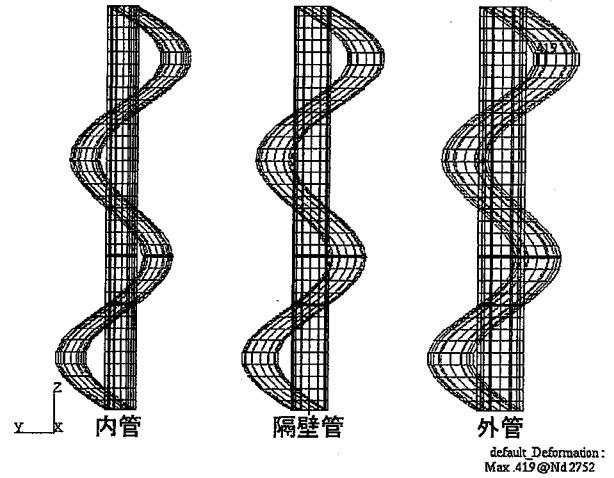


(d) ケース3(内外螺旋リブ バッフル板
ピッチ 2m 水中試験)10.5Hz

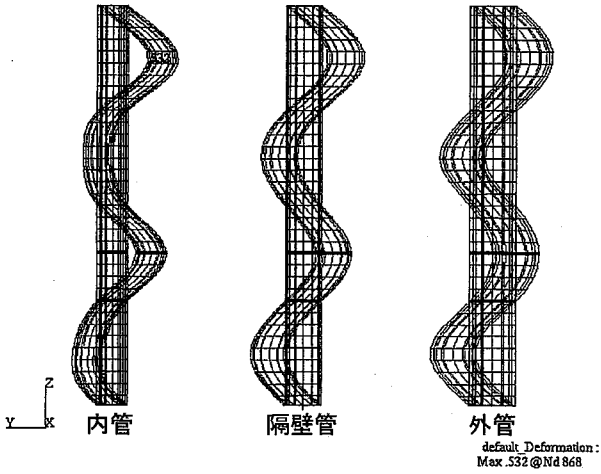
図 4-15 変形図 周波数応答解析(1/2)



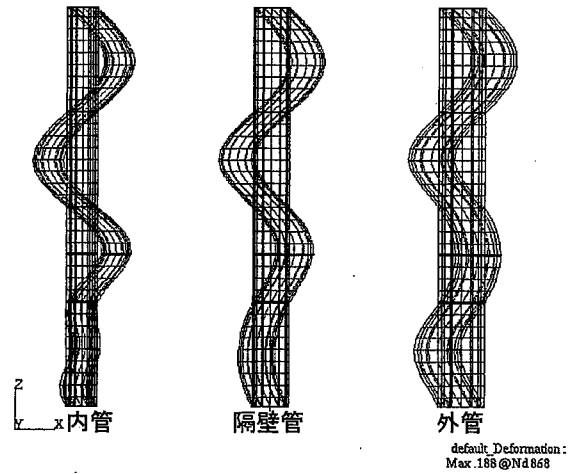
(e) ケース 3(内外螺旋リブ バッフル板
ピッチ 2m 気中試験)16.0Hz



(f) ケース 4(内外直線リブ(標準ギャップ)
バッフル板ピッチ 1m 水中試験)41.5Hz



(g) ケース 6(内外竹節型リブ バッフル板
ピッチ 1m 水中試験)41.5Hz



(h) ケース 6'(内外竹節型リブ バッフル板
ピッチ 1m 水中試験)41.5Hz

図 4-15 変形図 周波数応答解析(2/2)