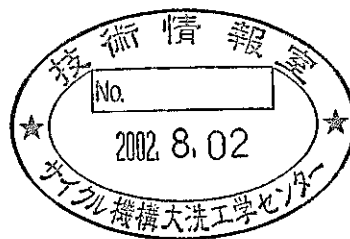


IHX/1次Naポンプ合体機器の伝熱管摩耗量評価 (1)

—ワークレート解析モデルの作成—

(研究報告)



2002年5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
してください。

〒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-ken 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2002

IHX/1次Naポンプ合体機器の伝熱管摩耗量評価(1)

- ワークレート解析モデルの作成 -

(研究報告)

木曾原 直之 *1

井川 健一 *2

要旨

実用化戦略調査研究・Na冷却FBR(アドバンスド・ループ型炉)において冷却系をコンパクト化するために、中間熱交換器(IHX)と1次系機械式Naポンプを合体し、一つの機器とする方策を採用している。このIHX/ポンプ合体機器は中心軸にポンプ、その周囲にIHX伝熱管が配置された構造となっており、1次NaはIHX伝熱管内を下降し、2次Naは管外をジグザグ流で上昇する。

このため、伝熱管はポンプの回転振動や流力振動によって常時振動することになるが、合体機器の成立性を評価する上で最も重要とされるのは、バッフル板との接触摩耗(フレットング摩耗)によって生じる伝熱管の減肉量を把握し、プラント寿命中の健全性を確保しておくことである。特にポンプ回転振動が伝熱管摩耗に及ぼす影響については、これまで機器合体の前例があまりなかったこともあり、JNC内で十分な検討が実施されていなかった。このため、ポンプ回転を励振源とした場合の伝熱管のフレットング摩耗量を評価する解析モデルをFINASを用いて作成し、評価を行った。

解析では、まず合体機器のポンプ軸、隔壁、シュラウド、伝熱管、管板などの振動伝達モデルにより各部の振動振幅や周波数を把握した。次に、これに基づいて伝熱管とバッフル板の接触モデルにより摺動距離及び接触荷重(ワークレート)を算出し、これと伝熱管材料の摩耗定数から伝熱管摩耗量を求めた。この結果、ポンプ振動が励振源の場合、伝熱管摩耗量は許容値よりも十分に小さい値となっていることがわかった。ただし、振動試験による振動伝達メカニズムの解明や、保守的な条件で解析するための十分なパラメータサーベイなど、今後さらに解析モデルの精度向上や詳細な評価を行う必要がある。

*1 大洗工学センター システム技術開発部 FBRシステムGr

*2 原子力システム株式会社

Evaluation on the fretting abrasion of heat-transfer tubes of the Integrated IHX/Primary Sodium Pump (1)

- Workrate analyses model -

Naoyuki KISOHARA*¹ Kenichi IGAWA*²

Abstract

The cost minimization of commercialized FBR plant systems requires the integration of an intermediate-heat-exchanger(IHX) and a primary sodium mechanical pump into one component. The pump is installed in the center of the integrated component and heat transfer tubes surround the pump. Primary sodium flows down inside the heat transfer tubes and secondary sodium flows up outside the tubes in a zigzag.

Therefore, the pump rotation and sodium flow induce the vibration of heat transfer tubes and it leads the tubes to fretting wearing against support plates. Then the tube wearing must be evaluated to confirm its integrity during the plant life span(60 years). However, the knowledge of the pump rotation influence on tube wearing is not sufficiently acquired because the integrated component is a new concept in JNC.

To evaluate the tube fretting wearing ratio due to the pump rotation, a new calculation model of FINAS was composed. In the first place, the beam vibration analysis model of a pump shaft, shells, tube bundle etc. of the integrated component reveals its properties such as frequency, amplitude and vibration mode. In the second place, based on the above mentioned vibration analysis, the frequency and amplitude of abrasion between the tubes and support plates can be obtained by a contact analysis model of FINAS. Eventually, this calculation shows that the tube wearing will not affect the tube integrity during the plant life time. However further evaluation by more detailed analysis and abrasion tests are needed to obtain more accurate results.

*1 FBR system design group · System engineering an technology division
O-arai engineering center

* 2 Nuclear Energy System Inc.

IHX/1次Naポンプ合体機器の伝熱管摩耗量評価(1)
- ワークレート解析モデルの作成 -

目次

1	緒言	1
2	伝熱管摩耗量の評価手法	6
3	固有値振動解析	10
3.1	解析モデル	10
(1)	梁モデルの全体概要	10
(2)	全伝熱管の剛性と距離効果	10
(3)	流体連成モデル	10
(4)	ポンプシーリング部のギャップ	11
(5)	各部のばね定数及び各部の拘束条件	12
3.2	解析結果	12
4	ポンプ励振力による応答解析	32
4.1	解析モデル	32
(1)	応答解析手法	32
(2)	1次ポンプからの励振力	32
4.2	解析結果	33
5	ワークレート解析	43
5.1	ワークレート解析モデル	43
(1)	振動解析とワークレート解析	43
(2)	伝熱管とバッフル板の接触条件	43
(3)	FINASにおける接触モデル	43
5.2	ワークレート解析結果	44
6	伝熱管摩耗量評価	58
7	結言	62
	謝辞	63
	参考文献	64

[図リスト]

図 1-1	IHX/1 次ポンプ合体機器概念図	2
図 1-2	IHX/1 次 Na ポンプ合体機器概念図 (大型炉)	3
図 1-3	IHX/1 次 Na ポンプ合体機器概念図 (中型炉)	4
図 1-4	IHX/ポンプ機器の比較	5
図 2-1	伝熱管フレットイング摩耗	7
図 2-2	伝熱管摩耗量の算出方法	8
図 2-3	FINAS による伝熱管摩耗量解析フロー	9
図 3.1-1	IHX/ポンプ合体機器構造概念図	19
図 3.1-2	梁要素によるモデル化概念図 (1/3)	20
図 3.1-2	梁要素によるモデル化概念図 (2/3)	21
図 3.1-2	梁要素によるモデル化概念図 (流体連成) (3/3)	22
図 3.1-3	シールリング構造概念図	23
図 3.2-1	固有振動モード (1/8)	24
図 3.2-1	固有振動モード (2/8)	25
図 3.2-1	固有振動モード (3/8)	26
図 3.2-1	固有振動モード (4/8)	27
図 3.2-1	固有振動モード (5/8)	28
図 3.2-1	固有振動モード (6/8)	29
図 3.2-1	固有振動モード (7/8)	30
図 3.2-1	固有振動モード (8/8)	31
図 4.2-1	伝熱管 (1 本管) の変位履歴 (1/2)	36
図 4.2-1	伝熱管 (1 本管) の変位履歴 (2/2)	37
図 4.2-2	伝熱管 (1 本管) の変位履歴	38
図 4.2-3	伝熱管 (1 本管) の変位履歴 (1/4)	39
図 4.2-3	伝熱管 (1 本管) の変位履歴 (2/4)	40
図 4.2-3	伝熱管 (1 本管) の変位履歴 (3/4)	41
図 4.2-3	伝熱管 (1 本管) の変位履歴 (4/4)	42
図 5.1-1	ワークレート解析モデル	45
図 5.1-2	伝熱管とバッフル板の接触条件 (解析条件)	46
図 5.1-3	伝熱管とバッフル板のギャップ方向接触モデル	47
図 5.1-4	伝熱管とバッフル板のギャップ方向及びびすべり方向接触モデル	48
図 5.2-1	伝熱管 (1 本管) の定常時変形状態 (1/4)	49
図 5.2-1	伝熱管 (1 本管) の定常時変形状態 (2/4)	50

図 5.2-1	伝熱管 (1 本管) の定常時変形状態 (3/4)	51
図 5.2-1	伝熱管 (1 本管) の定常時変形状態 (4/4)	52
図 5.2-2	伝熱管 (1 本管) のバッフル板部の変位履歴 (1/4)	53
図 5.2-2	伝熱管 (1 本管) のバッフル板部の変位履歴 (2/4)	54
図 5.2-2	伝熱管 (1 本管) のバッフル板部の変位履歴 (3/4)	55
図 5.2-2	伝熱管 (1 本管) のバッフル板部の変位履歴 (4/4)	56
図 5.2-3	押し付け荷重とワークレート	57
図 6.1	伝熱管摩耗部とその許容摩耗深さ	59
図 6.2	伝熱管に作用するワークレートと摩耗体積の関係	60
図 6.3	伝熱管の摩耗体積と摩耗深さ	61

[表リスト]

表 3.1-1	各部の付加質量	13
表 3.1-2	流体連成付加質量	14
表 3.1-3	構造材料 (12Cr 鋼) 物性値 (1/2)	15
表 3.1-3	ナトリウム比重値 (2/2)	15
表 3.1-4	各部のばね定数	16
表 3.1-5	各部の拘束条件	17
表 3.2-1	各固有振動数	18
表 4.2-1	応答解析結果 (1/2)	34
表 4.2-1	応答解析結果 (2/2)	35
添付 (1/11)	IHX/ポンプ合体機器全体の振動解析モデルデータ	66
添付 (2/11)	IHX/ポンプ合体機器全体の振動解析モデルデータ	67
添付 (3/11)	IHX/ポンプ合体機器全体の振動解析モデルデータ	68
添付 (4/11)	IHX/ポンプ合体機器全体の振動解析モデルデータ	69
添付 (5/11)	IHX/ポンプ合体機器全体の振動解析モデルデータ	70
添付 (6/11)	IHX/ポンプ合体機器全体の振動解析モデルデータ	71
添付 (7/11)	IHX/ポンプ合体機器全体の振動解析モデルデータ	72
添付 (8/11)	IHX/ポンプ合体機器全体の振動解析モデルデータ	73
添付 (9/11)	IHX/ポンプ合体機器全体の振動解析モデルデータ	74
添付 (10/11)	IHX/ポンプ合体機器全体の振動解析モデルデータ	75
添付 (11/11)	IHX/ポンプ合体機器全体の振動解析モデルデータ	76

1 緒言

実用化 Na 冷却 FBR (アドバンスド・ループ型炉) において冷却系コンパクト化のために、中間熱交換器と 1 次系機械式 Na ポンプを合体し一つの機器とする方策を採用している。この IHX/ポンプ合体機器は図 1-1 に示すように中心軸にポンプ、その周囲に IHX 伝熱管が配置された構造となっており、1 次 Na は IHX 伝熱管内を下降し、2 次 Na は管外をジグザグ流で上昇する。

この合体機器の成立性を評価する上で重要な項目は、1) 伝熱管振動によるバブル板との接触摩耗 (フレットィング摩耗) と 2) 伝熱管への 1 次 Na の不均一流入に起因する伝熱管熱膨張差、合体機器の変形およびポンプ回転軸固着の可能性、である。後者については 1 次 Na の 3 次元流動解析により既に見通しは得られている。一方、後者の伝熱管振動については、Na ジグザグ流の影響 (流力振動) だけでなくポンプ回転も励振源となりうるが、ポンプ回転振動の影響についてはこれまで十分な検討が実施されていなかった。このため、ポンプ回転を励振源とした伝熱管のフレットィング摩耗量を評価する解析モデルを作成し、これに基づいて摩耗深さの予備解析を行ったので報告する。なお、管外流体 (2 次 Na) 流れによる流力振動もフレットィング摩耗の原因となりうるが、これについては別途評価する。

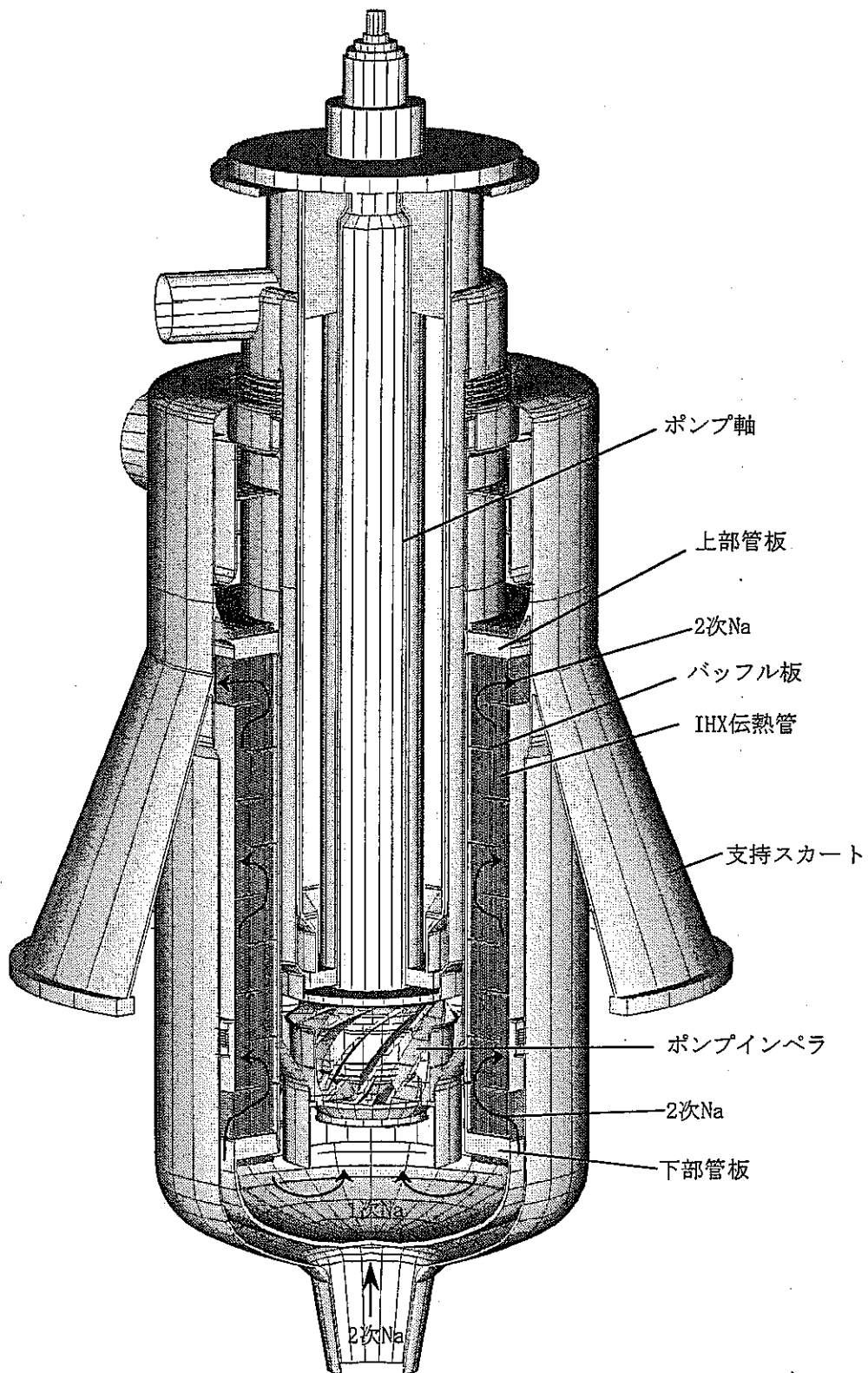
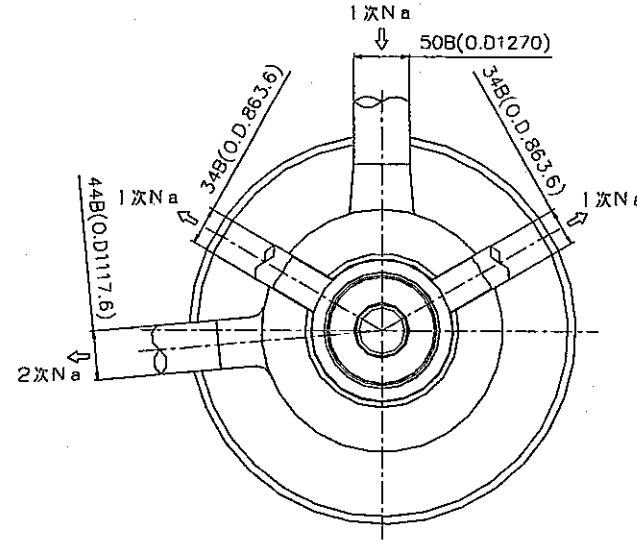
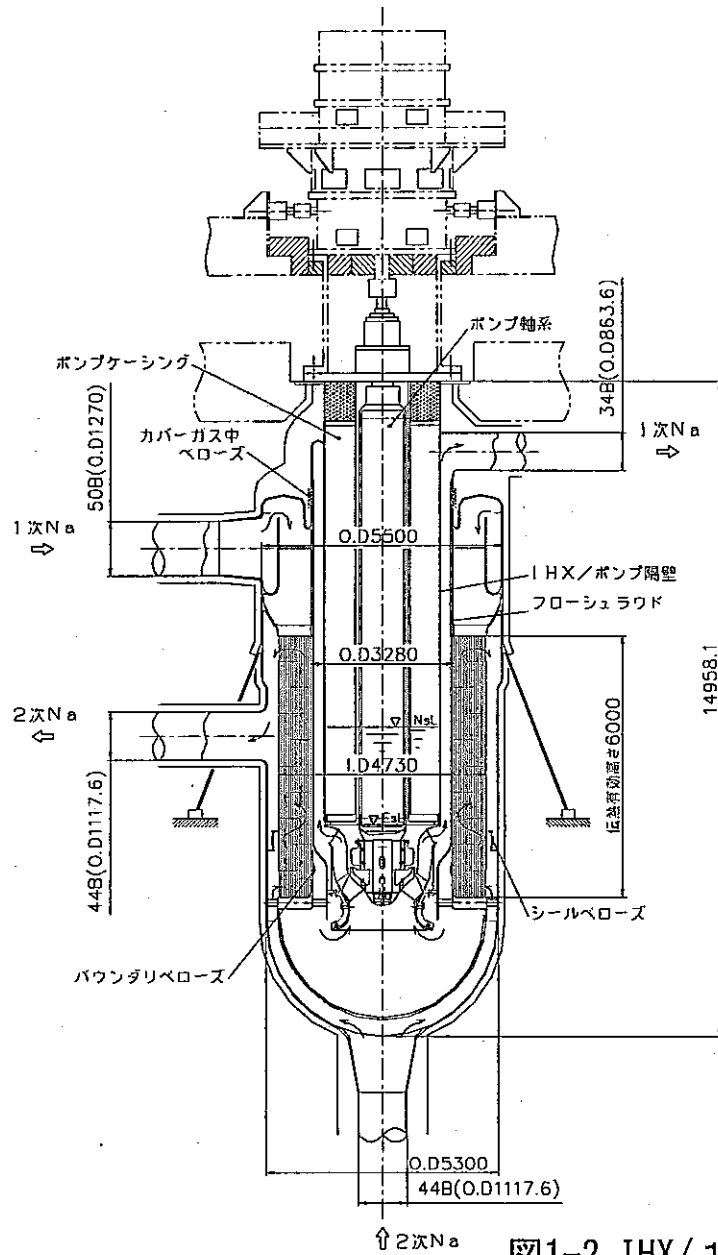


図1-1 IHX/1次ポンプ合体機器概念図



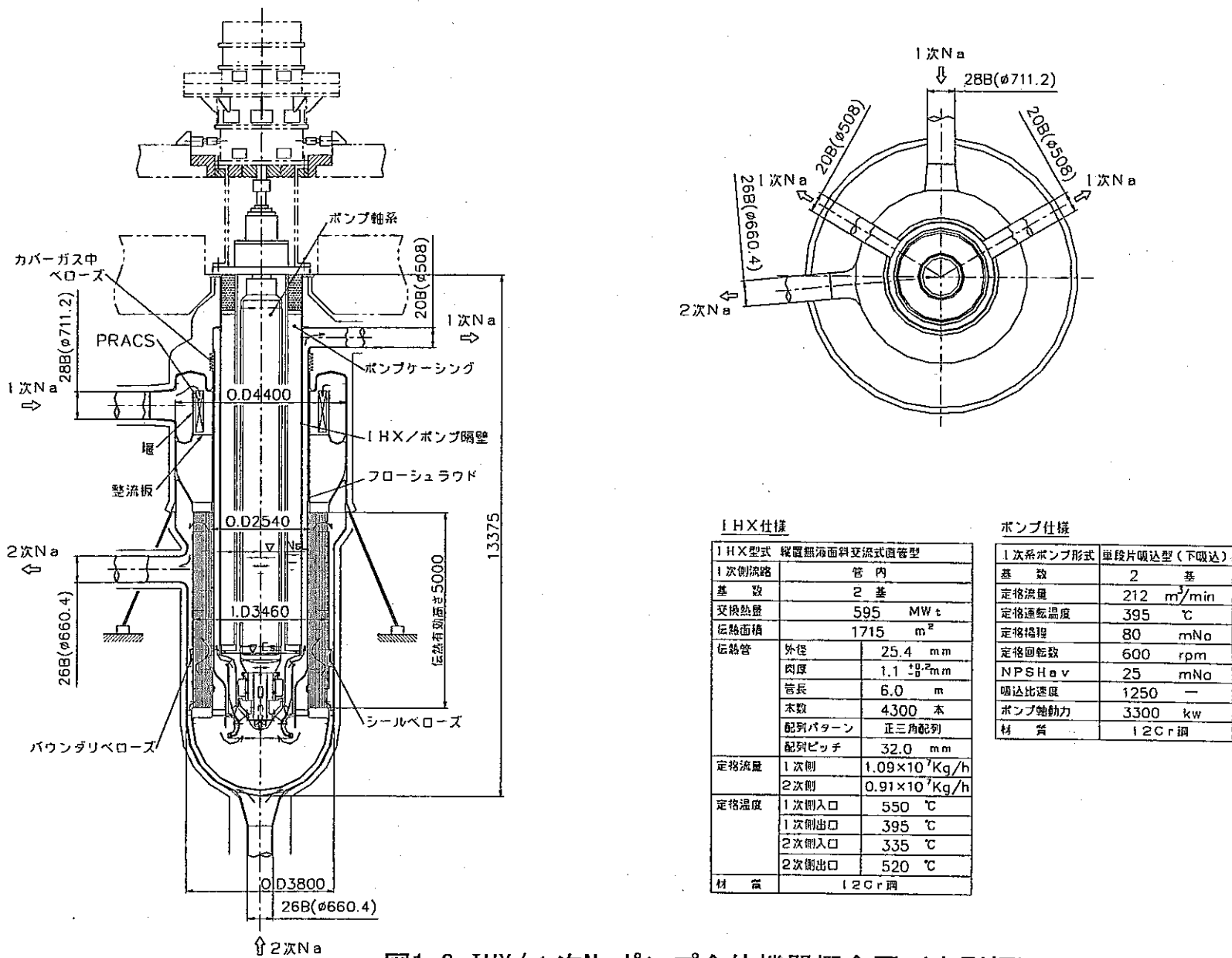
IHX仕様

IHX型式	縦置無液面対流式直管型	
1次側流路	管内	
基 数	2 基	
交換熱量	1785 MWt	
伝熱面積	4370 m ²	
伝熱管	外径	25.4 mm
	肉厚	1.1 ±0.05 mm
	管長	6.0 m
	本数	9660 本
	配列パターン	正三角配列
	配列ピッチ	32.0 mm
定格流量	1次側	3.27×10 ⁷ Kg/h
	2次側	2.73×10 ⁷ Kg/h
定格温度	1次側入口	550 °C
	1次側出口	395 °C
	2次側入口	335 °C
	2次側出口	520 °C
材 質	12Cr鋼	

ポンプ仕様

1次系ポンプ形式	単段片吸込型(下吸込)	
基 数	2 基	
定格流量	636 m ³ /min	
定格運転温度	395 °C	
定格揚程	76 mNa	
定格回転数	554 rpm	
NPSH _{av}	25 mNa	
吸込比速度	1250 -	
ポンプ軸動力	9300 kw	
材 質	12Cr鋼	

図1-2 IHX/1次Naポンプ合体機器概念図 (大型炉)



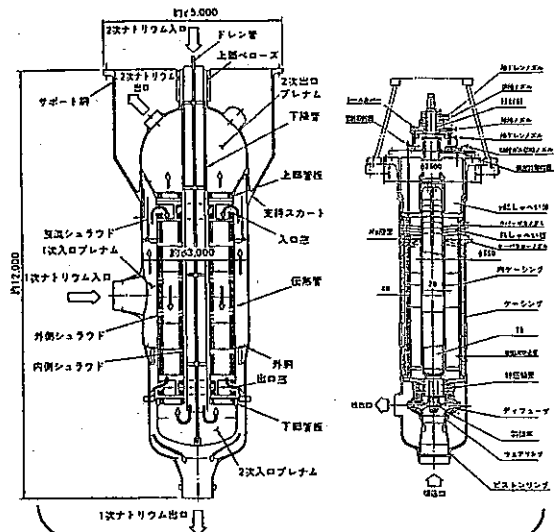
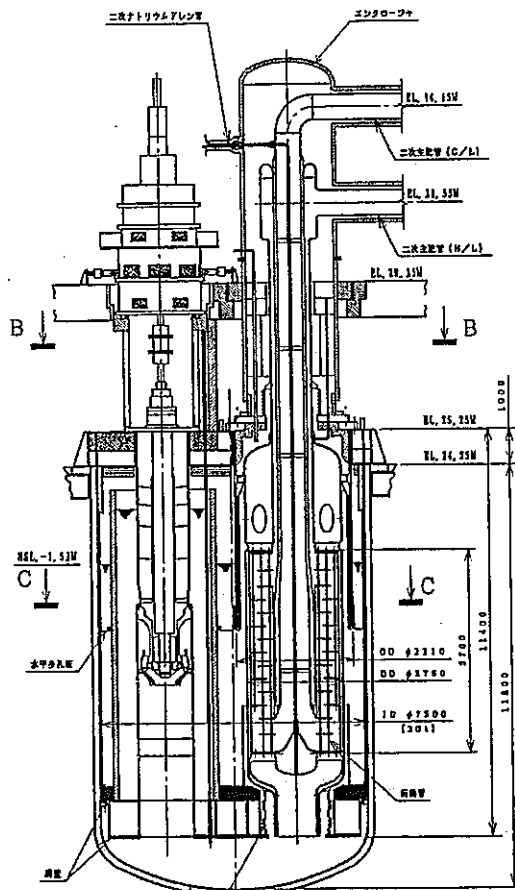
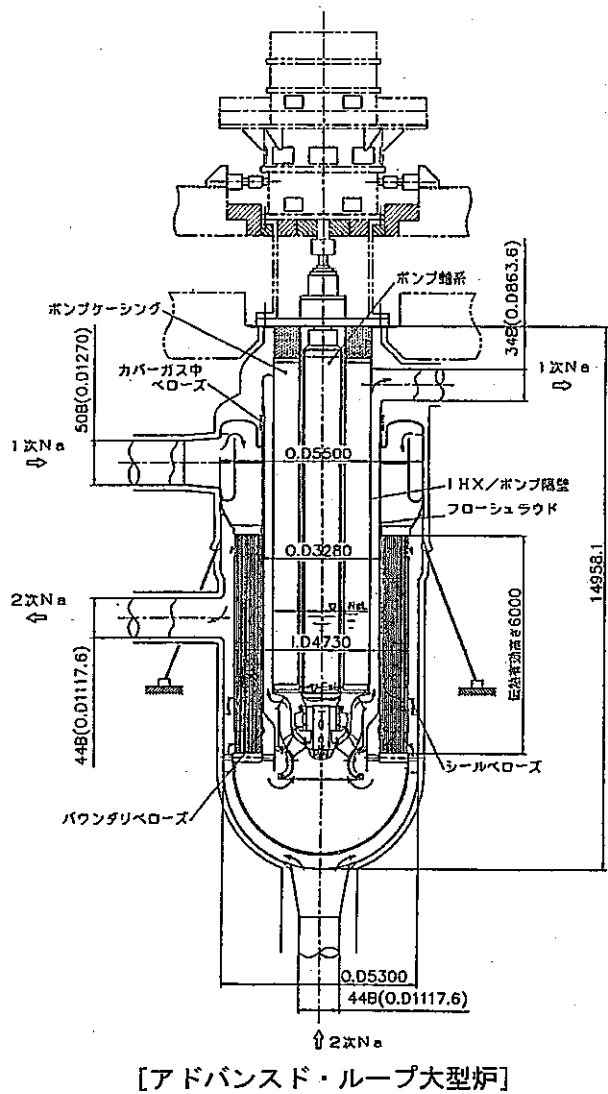
IHX仕様

IHX型式	螺旋盤面殻型交換式直管型	
1次側流路	管内	
基数	2基	
交換熱置	595 MWt	
伝熱面積	1715 m ²	
伝熱管	外径	25.4 mm
	肉厚	1.1 mm
	管長	6.0 m
	本数	4300 本
	配列パターン	正三角配列
配列ピッチ	32.0 mm	
	定格流量	1次側 1.09×10 ⁷ Kg/h
	2次側 0.91×10 ⁷ Kg/h	
定格温度	1次側入口	550 °C
	1次側出口	395 °C
	2次側入口	335 °C
	2次側出口	520 °C
材質	12Cr鋼	

ポンプ仕様

1次系ポンプ形式	単段片吸込型(下吸込)
基数	2基
定格流量	212 m ³ /min
定格運転温度	395 °C
定格揚程	80 mNa
定格回転数	600 rpm
NPSH _{av}	25 mNa
吸込比速度	1250 -
ポンプ駆動力	3300 kw
材質	12Cr鋼

図1-3 IHX/1次Naポンプ合体機器概念図 (中型炉)



		アドバンスド・ループ大型炉	実証炉	原型炉	
中間熱交換器	基数	2	3	3	
	交換熱量 (MWt)	1785	534	238	
	伝熱面積 (m ²)	4370	1681	1093	
	伝熱管長さ	6	5.7	6.07	
ポンプ	伝熱管本数	9660	3960	3294	
	定格流量 (m ³)	636	191	99.5	
	定格揚程 (mNa)	76	95	92	
	ポンプ回転数	554	823	837	
		ポンプ軸動力	9300	3500	2000

図1-4 IHX/ポンプ機器の比較

2 伝熱管摩耗量の評価手法

図 2-1 に伝熱管のフレットング摩耗の概念図を示す。ポンプの回転振動は、隔壁や管板および流体 (Na) などを通して伝熱管に伝わる。一方、伝熱管は片幅約 0.1mm の隙間を隔ててバッフル板により支持されており、このバッフル板と伝熱管の接触摩耗を評価する。

伝熱管などの摩耗量 (摩耗深さ) は、図 2-2 に示すようにワークレートと呼ばれる伝熱管に働く磨耗作用量と材料の摩耗定数 (比摩耗量) の積に、摩耗時間 (プラント寿命) を乗じて求められる。ここで、ワークレートは伝熱管とバッフル板の接触荷重 $f(N)$ と単位時間あたりの摩耗距離 $L(mm)$ の積分値として算出される値である。一方、比摩耗量は材料の摩耗され易さを示す材料定数であり、この値が大きいほど摩耗されやすい。

比摩耗量は伝熱管材料の Na 中摩耗試験から直接求めることができる。しかし、伝熱管材料(12Cr 鋼)の比摩耗量は現在試験データがないため、本報告書では暫定的に 2-1/4Cr-1Mo 鋼の比摩耗量を用いる。なお、12Cr 鋼の比摩耗量は別途試験により測定することを予定している。

一方、合体機器伝熱管のワークレートは、図 2-3 に示すフローに従って解析的に求める。解析は振動解析とワークレート解析に分類される。振動解析では、まず固有振動解析により、合体機器各部 (外壁、シュラウド、ポンプ軸、伝熱管など) の固有振動モードを確認する。その上でポンプ部にアンバランス励振力を正弦波で入力し、伝熱管を含む合体機器全体での振動伝達を求める。ワークレート解析では振動解析で得られた伝熱管に作用する力を上下管板部より伝熱管に入力し、かつバッフル板に所定の条件で接触させることで生じるワークレートを求める。

本評価ではすべての解析を FINAS を用いて計算しており、3章、4章では振動解析による固有振動モードとアンバランス力による周波数応答結果について述べる。そして5章では振動解析結果からワークレート解析を行うモデルについて記載し、6章では算出されたワークレートからプラント寿命中の伝熱管摩耗量及び摩耗深さについて報告する。

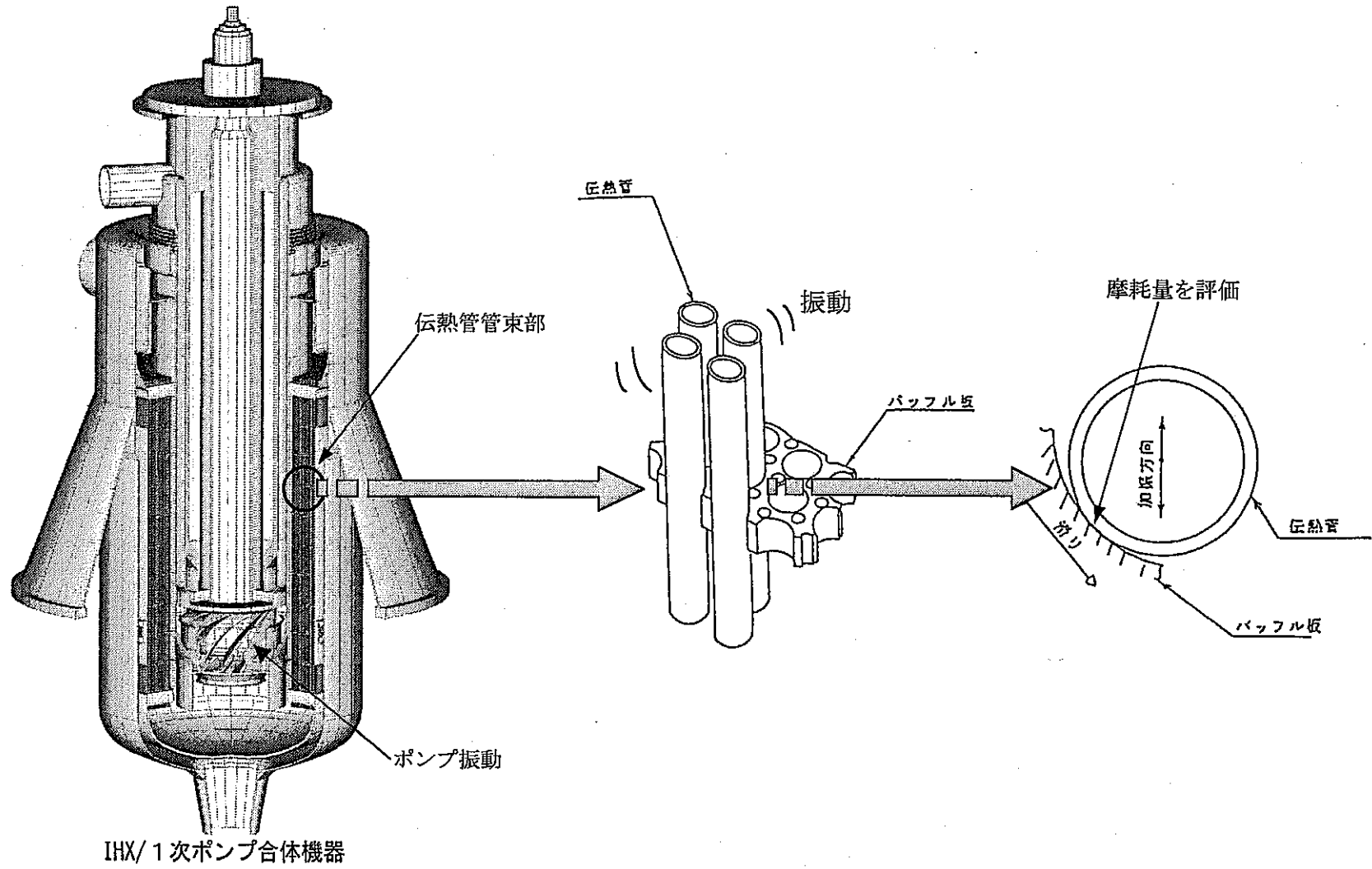


図2-1 伝熱管フレットング摩耗

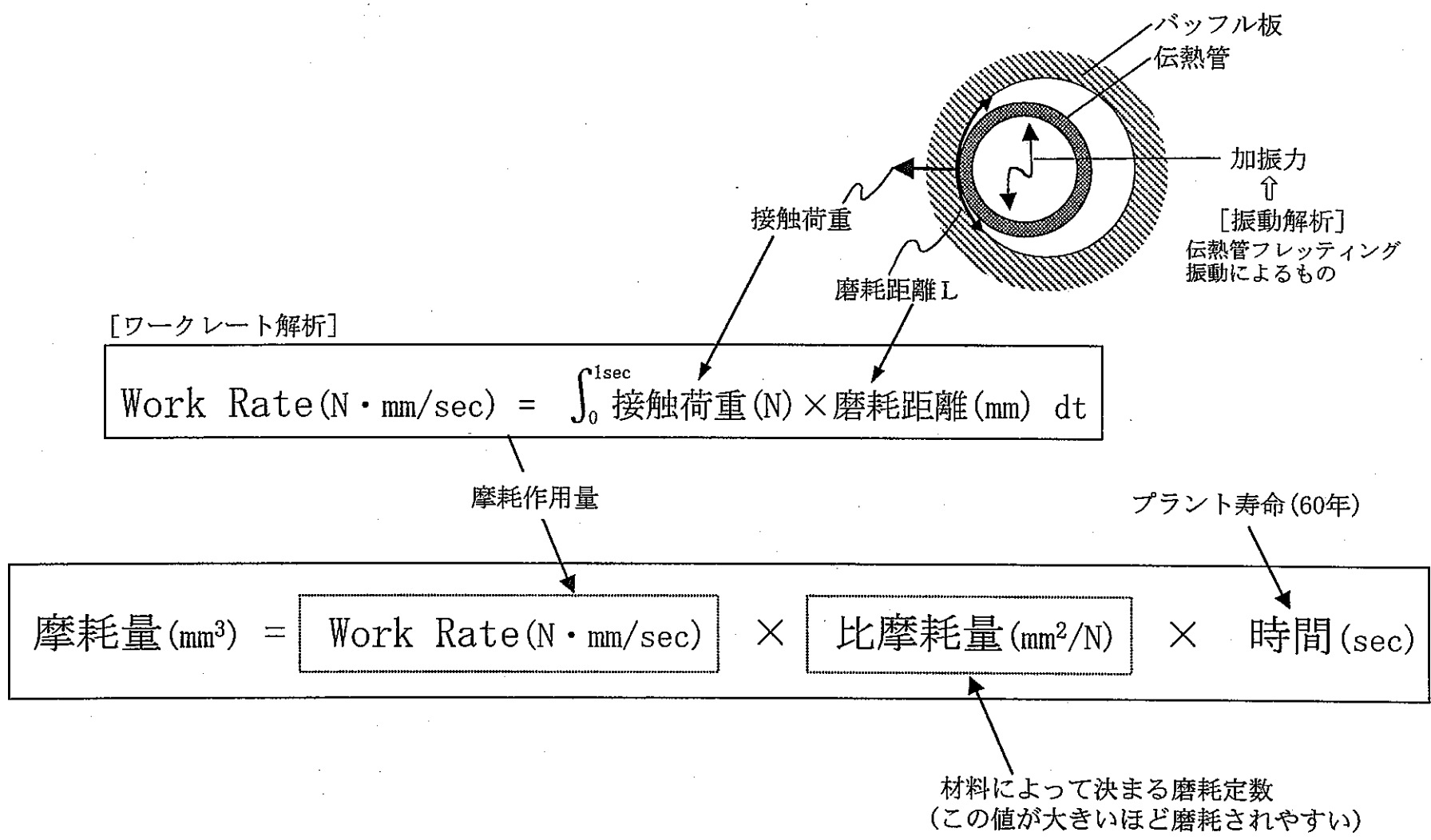


図2-2 伝熱管摩耗量の算出方法

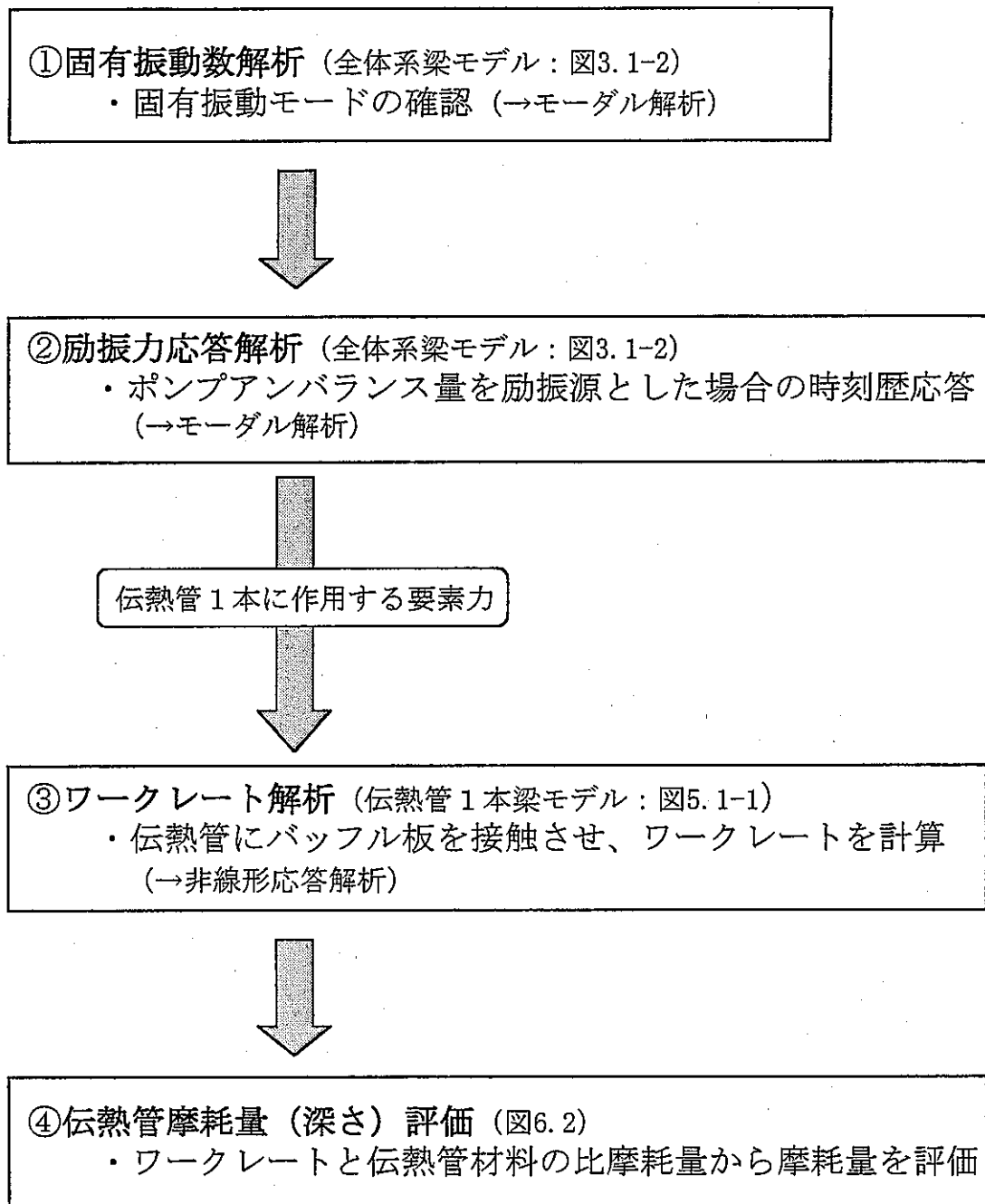


図2-3 FINASによる伝熱管摩耗量解析フロー

3 固有値振動解析

IHX/ポンプ合体機器全体の振動解析モデルを作成し、固有値及び固有振動モードの解析によるモデル化妥当性の確認を行った。

3.1 解析モデル

(1) 梁モデルの全体概要

IHX/ポンプ合体機器構造概念図を図 3.1-1 に示す。ポンプ軸、ケーシング、シュラウド、伝熱管などの主要構造物は、梁要素によるモデル化を行うこととし、その概念図を図 3.1-2 に示す。解析は汎用非線形構造解析システム「FINAS」コードを用いて行った。また、ナトリウムを介した振動伝達については、その付加質量による連成効果を考慮した。

(2) 伝熱管の剛性

伝熱管は全体管と 1 本管の 2 種類で模擬した。全体管は、伝熱管管束部の全体的な挙動を把握するため、全伝熱管を 1 本の梁要素でモデル化したものであり、全伝熱管の剛性は距離効果も考慮してモデル化した。

$$\text{全伝熱管剛性} = \sum_{i=1}^N I_i \times r_i^2 \times A_i$$

N : 伝熱管本数

I_i : 断面二次モーメント

A_i : 断面積

r_i : 合体機器中心軸から各伝熱管までの距離

また、1 本管は、伝熱管 1 本の挙動を把握するため、伝熱管 1 本分の剛性のみの梁要素としてモデル化した。

(3) 流体連成モデル

梁要素によるモデル化概念図（流体連成）を図 3.1-2 に示す。各部の付加質量を表 3.1-1 に、流体連成付加質量を表 3.1-2 に、また、物性値を表 3.1-3 に示す。

ポンプ（軸、ケーシング）及び IHX（隔壁、各シュラウド、本体胴）は、同心配置されているため、下図 A に示すような多重円筒構造として取り扱い、Fritz 式によって示された流体付加質量をナトリウム液面以下の節点に与え、流体による連成効果を考慮した。以下に Fritz 式を示す。

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_H & -(M_1 + M_H) \\ -(M_1 + M_H) & M_1 + M_2 + M_H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix}$$

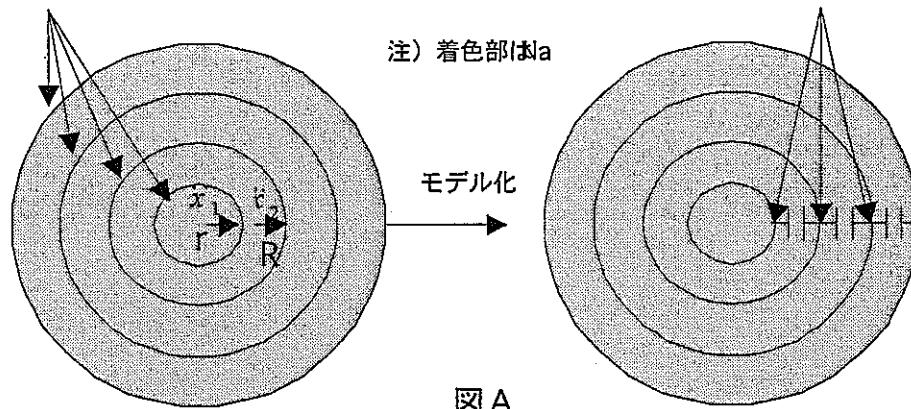
$$M_1 = \rho_l \pi r^2 l \quad M_2 = \rho_l \pi R^2 l$$

$$M_H = C_M M_1 \quad C_M = \frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2}$$

- F_1 : 内筒に働く力
- F_2 : 外筒に働く力
- \ddot{x}_1 : 内筒の加速度
- \ddot{x}_2 : 外筒の加速度
- M_1 : 内筒による流体排除質量
- M_2 : 外筒による流体排除質量
- ρ_l : 流体密度
- l : 円筒の長さ
- r : 内筒の半径
- R : 外筒の半径

多重円筒

流体連成付加質量



図A

(4) ポンプシールリング部のギャップ

合体機器では、IHX 機器との取り合い部に、上下シールリングを設けて羽根車出口水の吸込側及びポンプ上部への流体の漏洩量を制限しており、この構造を図 3.1-3 に示す。シールリング部は、ポンプ振動の管束部への伝達経路の1つであるが、今回の解析では、シールリング部の

ギャップ幅（図 3.1-3 の A-B 間）は固定とし、加振方向（水平方向）を一体構造としてモデル化した。なお、今後のサーベイ条件としては、フリー、ガタ、摩擦等の状態で解析を行う必要がある。

(5) 各部のばね定数及び各部の拘束条件

各部のばね定数を表 3.1-4 に示す。各部の拘束条件を表 3.1-5 に示す。今回設定した前提条件は、加振方向は y 方向とし、y 方向・z 方向・x 軸回転以外を拘束した。伝熱管は、バップル板部で接触がないものとして加振方向をフリーとした。また、耐震振れ止めについても加振方向をフリーとした。

3.2 解析結果

各固有振動数を表 3.2-1 に、また、固有振動モードを図 3.2-1 に示す。各振動モードにおいて、特異な振動モードは見られない。よって、全体振動解析モデルは妥当と判断した。

表3.1-1 各部の付加質量

節点番号	付加質量内容	付加質量 (kg)
19	水力部	4850.0
918	下部プレナム鏡板 (1次ナトリウム含)	19202.0
1002	1次ナトリウム入口ノズル	617.32
1012	2次ナトリウム出口ノズル	542.06
1018	2次ナトリウム入口ノズル+下部鏡 (2次ナトリウム含)	10403.0
511, 601, 701, 903	上部管板	各2325.0
520, 631, 711, 917	下部管板	各2325.0
213~217	ポンプケーシング内ナトリウム	各1000.0
113~115	ポンプケーシング (上部)	各1625.0
212~214	ポンプケーシング (下部)	各5785.0
506, 1001	上部鏡板	各1885.0
102, 202	生体遮へい	各7812.5
602~630	管内ナトリウム (1本管)	各0.0726
702~710	管内ナトリウム (全体管)	各2258.8

表3.1-2 流体連成付加質量

内筒 (節点番号)	外筒 (節点番号)	内筒 (MH) (kg)	外筒 (M1+M2+MH) (kg)	非対角項 -(M1+MH) (kg)
12	108	4.839E+03	6.858E+03	-5.674E+03
13	110	4.839E+03	6.858E+03	-5.674E+03
107	207	1.719E+03	5.559E+03	-2.625E+03
109	209	1.719E+03	5.559E+03	-2.625E+03
111	211	1.719E+03	5.559E+03	-2.625E+03
208	310	1.715E+05	1.812E+05	-1.762E+05
210	313	1.715E+05	1.812E+05	-1.762E+05
213	409	3.548E+03	8.635E+03	-5.030E+03
214	410	4.856E+03	8.688E+03	-6.230E+03
215	411	1.354E+04	1.683E+04	-1.501E+04
216	413	1.354E+04	1.683E+04	-1.501E+04
304	502	2.613E+04	3.897E+04	-3.129E+04
305	402	2.831E+04	4.077E+04	-3.341E+04
306	403	2.831E+04	4.077E+04	-3.341E+04
307	404	2.831E+04	4.077E+04	-3.341E+04
308	405	2.831E+04	4.077E+04	-3.341E+04
309	406	2.831E+04	4.077E+04	-3.341E+04
311	407	2.831E+04	4.077E+04	-3.341E+04
314	408	2.831E+04	4.077E+04	-3.341E+04
412	519	4.181E+03	8.308E+03	-5.563E+03
507	1002	1.010E+04	2.849E+04	-1.492E+04
508	1003	1.010E+04	2.849E+04	-1.492E+04
509	1004	1.010E+04	2.849E+04	-1.492E+04
510	902	1.313E+04	2.799E+04	-1.788E+04
512	906	1.974E+04	4.105E+04	-2.666E+04
513	908	1.974E+04	4.105E+04	-2.666E+04
514	910	1.974E+04	4.105E+04	-2.666E+04
515	912	1.974E+04	4.105E+04	-2.666E+04
516	914	1.974E+04	4.105E+04	-2.666E+04
902	1005	7.904E+04	1.028E+05	-8.936E+04
905	1009	1.540E+05	1.865E+05	-1.687E+05
907	1011	1.540E+05	1.865E+05	-1.687E+05
909	1012	1.540E+05	1.865E+05	-1.687E+05
911	1013	1.540E+05	1.865E+05	-1.687E+05
913	1014	1.540E+05	1.865E+05	-1.687E+05
915	1016	1.754E+05	2.125E+05	-1.921E+05
917	1017	2.434E+04	2.949E+04	-2.667E+04

表3.1-3(1/2) 構造材料(12Cr鋼)物性値

温度 (°C)	縦弾性係数 (kg/mm ²)	ポアソン比
20.0	22040.816	0.266
125.0	21326.531	0.266
200.0	20816.327	0.279
335.0	19591.837	0.290
360.0	19285.714	0.293
365.0	19285.714	0.293
395.0	18979.592	0.295
427.5	18571.429	0.298
450.0	18367.347	0.298
520.0	17448.980	0.304
535.0	17346.939	0.305
550.0	16938.776	0.306

比重 : 7.86E-6kg/mm² (一定)

表3.1-3(2/2) ナトリウム比重量

温度 (°C)	比重量(kg/mm ³)
335.0	8.71683E-07
395.0	8.57400E-07
427.5	8.49640E-07
450.0	8.44260E-07
472.5	8.38872E-07
520.0	8.27478E-07
550.0	8.20270E-07

表3.1-4 各部のばね定数

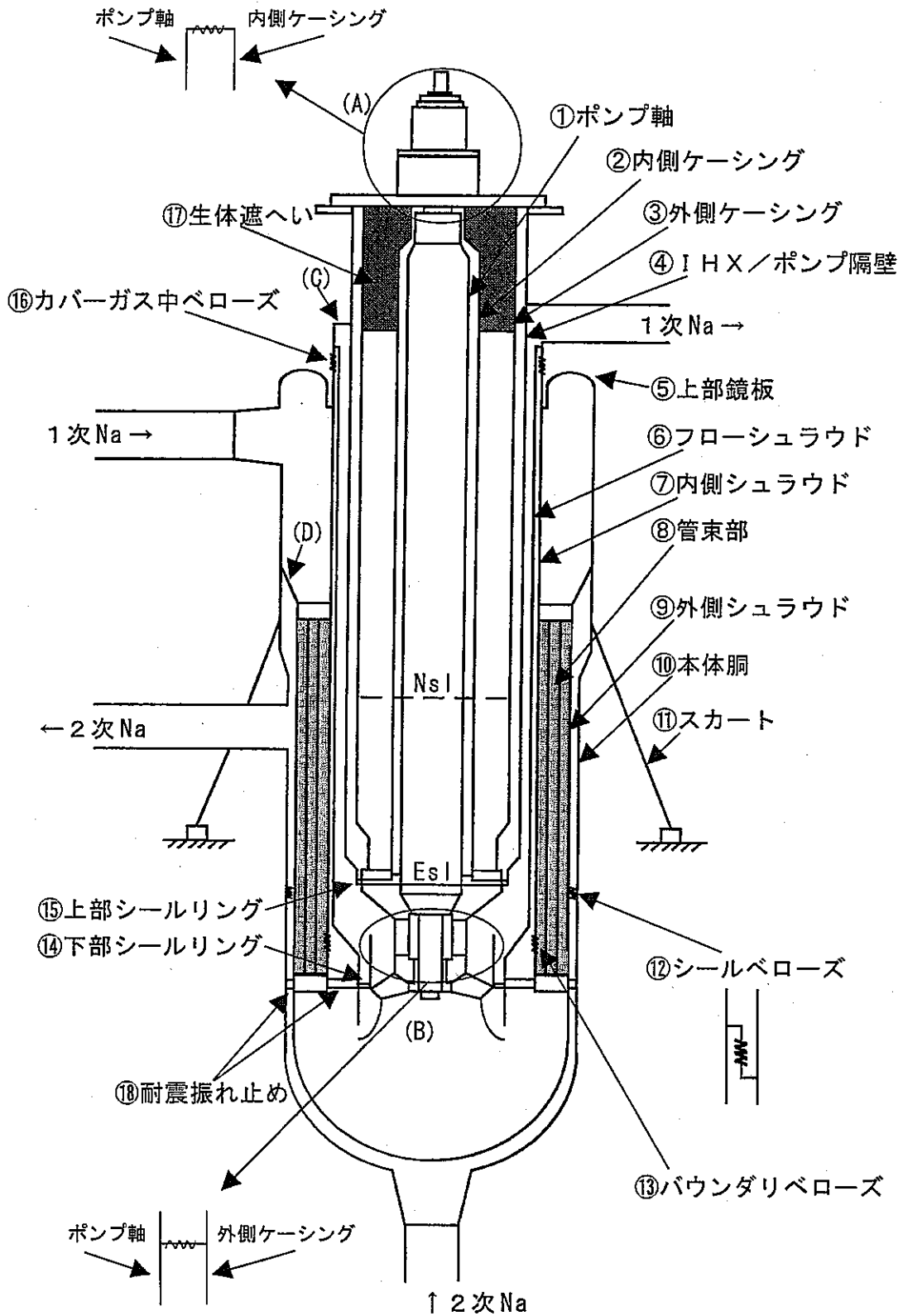
種類	位置 (節点番号)	水平方向 (kg/mm)	軸方向 (kg/mm)	回転方向 (kg・mm/rad)
カバーガス中ベローズ	504-505	3.648E+04	1.052E+04	-
バウンダリベローズ	517-518	1.224E+06	1.311E+05	-
シールベローズ	913-1015	1.549E+06	1.342E+05	-
スカート据付フロア	1105	-	-	7.347E+12
ポンプ外側ケーシング	201	-	-	7.500E+12
内側シュラウド-本体胴	506-1001	-	-	5.000E+12
外側シュラウド-本体胴	901-1005	-	-	5.000E+12
軸-軸受 (上部)	1-115	3.700E+04	-	-
軸-軸受 (下部)	17-214	2.500E+04	-	-

表3.1-5 各部の拘束条件

節点番号		拘束条件
201-301	内側ケーシング-IHX/ポンプ隔壁	剛結
101-201	内側ケーシング-外側ケーシング(上部)	剛結
112-212	内側ケーシング-外側ケーシング(下部)	剛結
212-315	上部シールリング	加振方向を同変位
215-411	下部シールリング	加振方向を同変位
303-501	IHX/ポンプ隔壁-内側シュラウド	剛結
401-503	フローシュラウド-内側シュラウド	剛結
506-1001	内側シュラウド-本体胴	回転方向以外を拘束
511-601-701-903	上部管板	剛結
520-631-711-917	下部管板	剛結
901-1005	外側シュラウド-本体胴	回転方向以外を拘束
1	ポンプ軸(上端)	加振方向以外を拘束
201	外側ケーシング(上端)	回転方向以外を拘束
1105	スカート(下端)	回転方向以外を拘束
1007-1101	本体胴-スカート	剛結
413-520	内側耐震振れ止め	フリー
917-1017	外側耐震振れ止め	フリー

表3.2-1 各固有振動数

次数	周波数(Hz)	備考
1	3.303	伝熱管(1本管)が卓越するモード
2	6.271	外側シュラウドが振動するモード
3	7.040	フローシュラウドから内側が振動するモード
4	9.103	伝熱管(1本管)が卓越するモード
5	10.926	フローシュラウドから内側が振動するモード
6	12.978	ポンプ軸が卓越するモード
7	13.320	ポンプ軸、内側シュラウドから外側が振動するモード
8	15.653	
9	17.835	伝熱管(1本管)が卓越するモード
10	17.855	
11	19.224	内側シュラウドから外側が振動するモード
12	21.988	ポンプ軸が卓越するモード
13	22.293	ポンプ軸、内側シュラウドから外側が振動するモード
14	25.546	IHX/ポンプ隔壁、内側シュラウドが振動するモード
15	28.436	
16	29.472	伝熱管(1本管)が卓越するモード
17	35.729	ポンプ軸が卓越するモード
18	39.842	
19	43.422	
20	43.998	伝熱管(1本管)が卓越するモード
21	45.138	
22	46.500	
23	48.758	
24	50.220	



注) ①～⑯は図3.1-2中の番号に対応

図3.1-1 IHX/ポンプ合体機器構造概念図

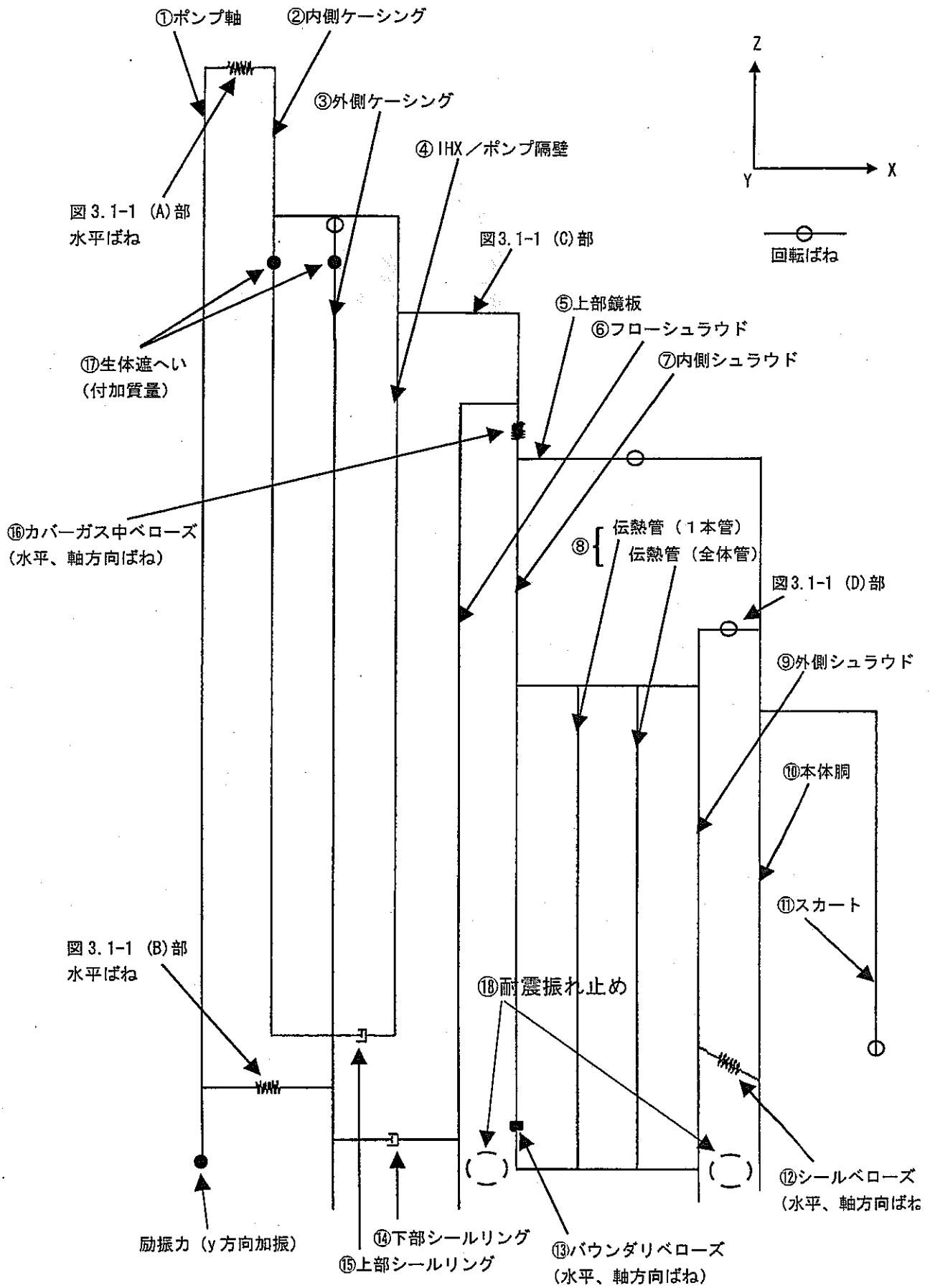
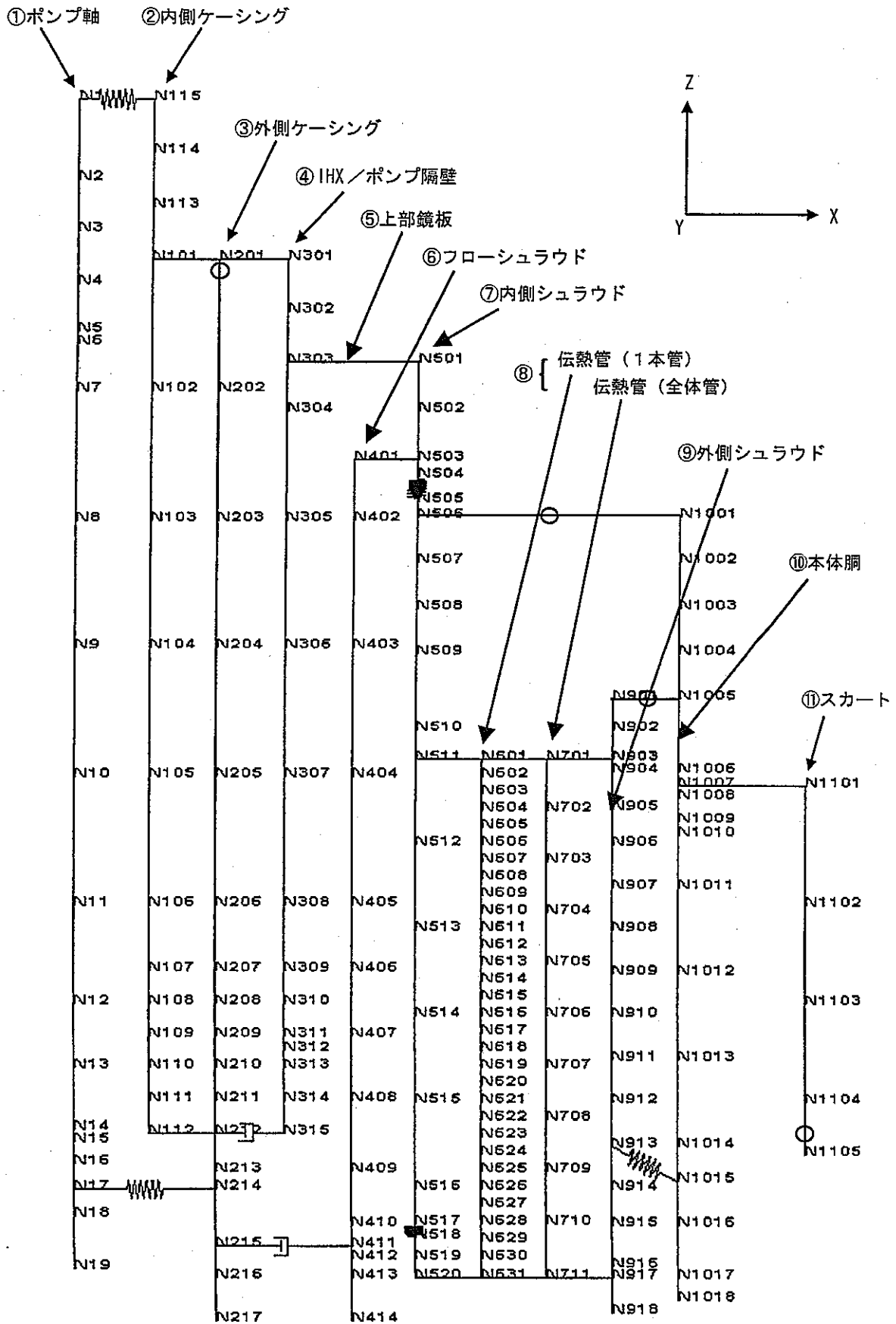


図3.1-2(1/3) 梁要素によるモデル化概念図



注) N1 ~ N1105 は表中の節点番号に対応

図 3.1-2 (2/3) 梁要素によるモデル化概念図

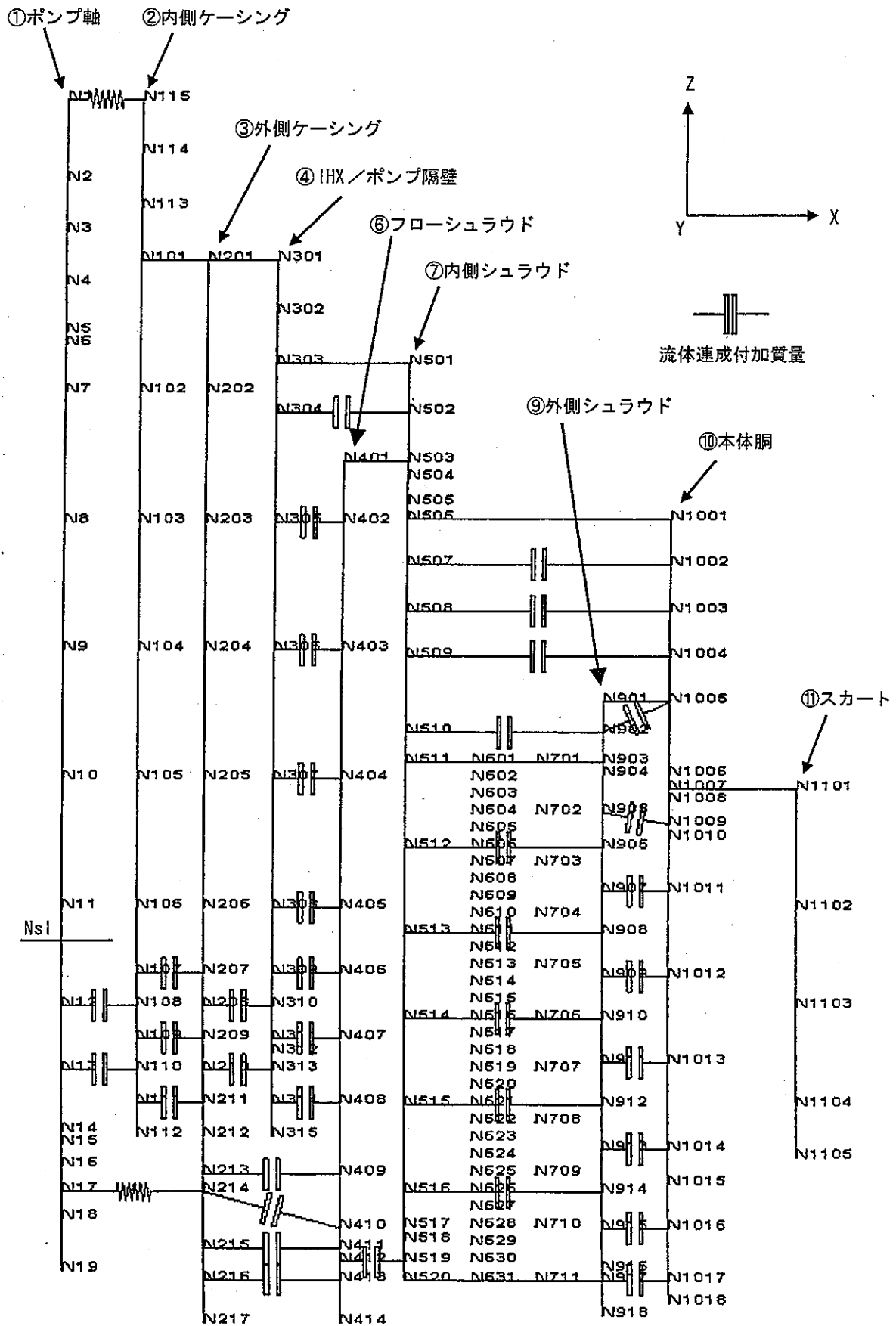


図 3.1-2 (3/3) 梁要素によるモデル化概念図 (流体連成)

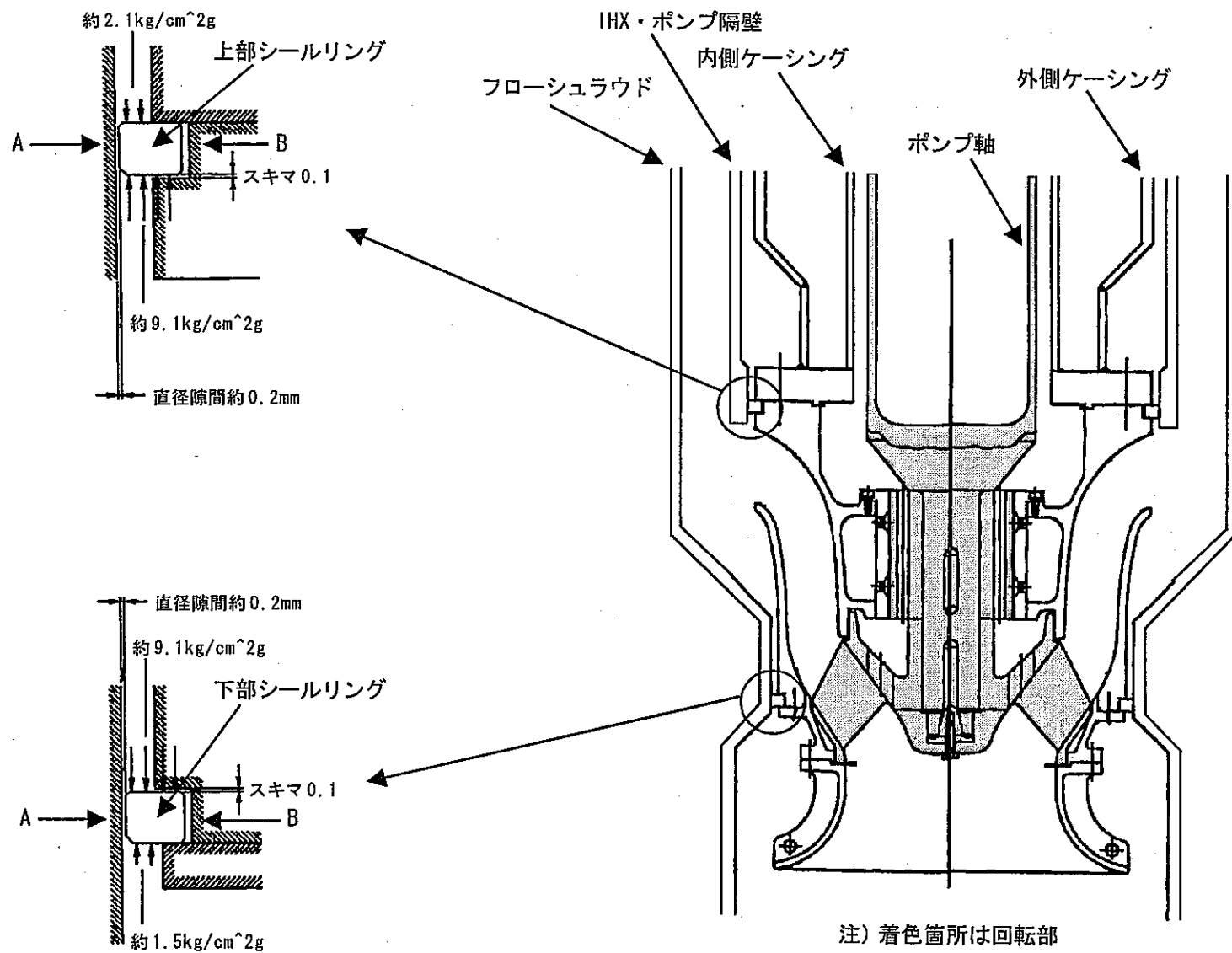


図 3.1-3 シールリング構造概念図

1次モード (3.30Hz)

2次モード (6.27Hz)

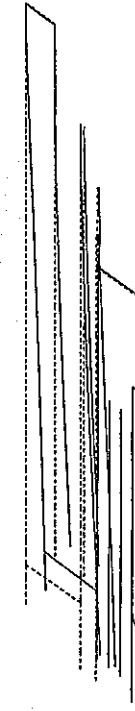
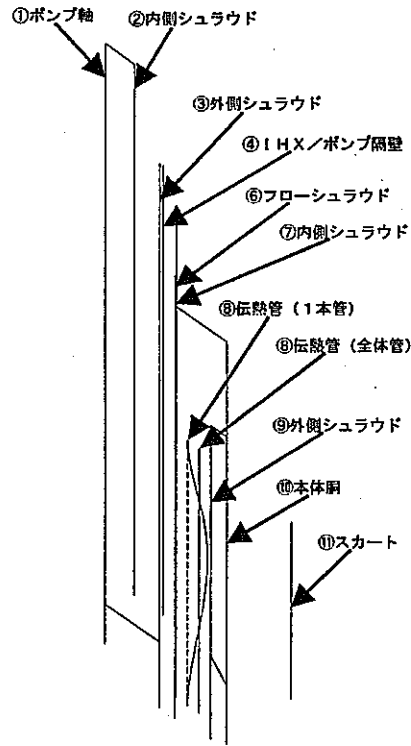
3次モード (7.04Hz)

FINAS
MODE SHAPE

FINAS
MODE SHAPE

FINAS
MODE SHAPE

加振方向はy方向とし、
x方向・y軸回転・z軸回転を拘束



MODE NO. 1

GEOM. SCALE 1500.00



MODE NO. 2

GEOM. SCALE 1500.00



MODE NO. 3

GEOM. SCALE 1500.00

図 3.2-1 (1/8) 固有振動モード

4次モード (9.10Hz)

5次モード (10.93Hz)

6次モード (12.98Hz)

FINAS
MODE SHAPE

FINAS
MODE SHAPE

FINAS
MODE SHAPE

加振方向はy方向とし、
x方向・y軸回転・z軸回転を拘束



MODE NO. 4

GEOM SCALE 1500.00

MODE NO. 5

GEOM SCALE 1500.00

MODE NO. 6

GEOM SCALE 1500.00

図 3.2-1 (2/8) 固有振動モード

7次モード (13.32Hz)

8次モード (15.65Hz)

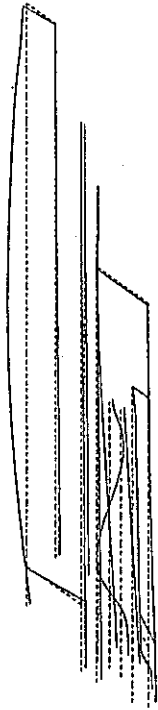
9次モード (17.84Hz)

FINAS
MODE SHAPE

FINAS
MODE SHAPE

FINAS
MODE SHAPE

加振方向はy方向とし、
x方向・y軸回転・z軸回転を拘束



MODE NO. 7

GEOM SCALE 1500.00

MODE NO. 8

GEOM SCALE 1500.00

MODE NO. 9

GEOM SCALE 1500.00

図 3.2-1 (3/8) 固有振動モード

10次モード (17.86Hz)

11次モード (19.22Hz)

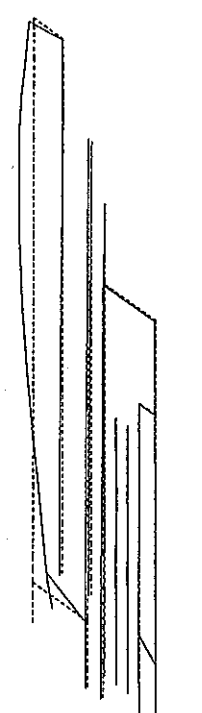
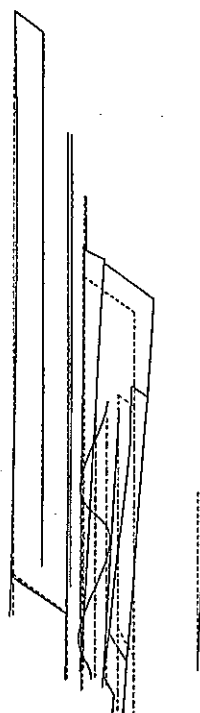
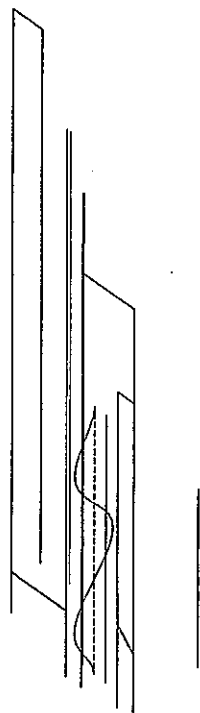
12次モード (21.99Hz)

FINAS
MODE SHAPE

FINAS
MODE SHAPE

FINAS
MODE SHAPE

加振方向はy方向とし、
x方向・y軸回転・z軸回転を拘束



MODE NO. 10

GEOM. SCALE 1500.00



MODE NO. 11

GEOM. SCALE 1500.00



MODE NO. 12

GEOM. SCALE 1500.00

図 3.2-1 (4/8) 固有振動モード

13次モード (22.29Hz)

14次モード (25.55Hz)

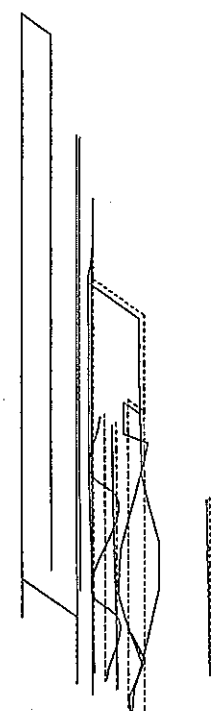
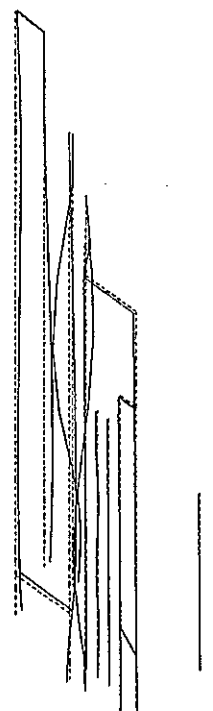
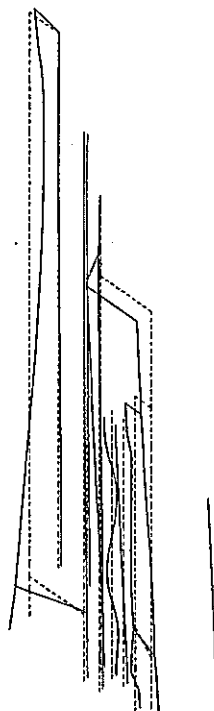
15次モード (28.44Hz)

FINAS
MODE SHAPE

FINAS
MODE SHAPE

FINAS
MODE SHAPE

加振方向はy方向とし、
x方向・y軸回転・z軸回転を拘束



MODE NO. 13

GEOM SCALE 1500.00



MODE NO. 14

GEOM SCALE 1500.00



MODE NO. 15

GEOM SCALE 1500.00

図 3.2-1 (5/8) 固有振動モード

16次モード (29.47Hz)

17次モード (35.73Hz)

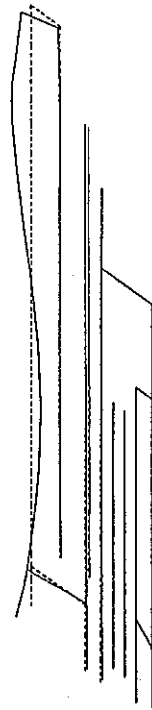
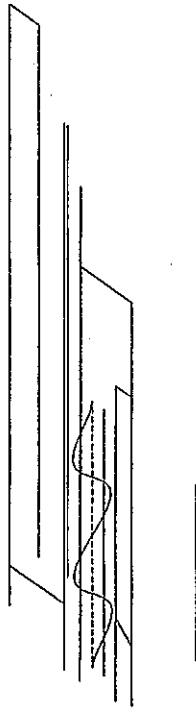
18次モード (39.84Hz)

FINAS
MODE SHAPE

FINAS
MODE SHAPE

FINAS
MODE SHAPE

加振方向はy方向とし、
x方向・y軸回転・z軸回転を拘束



MODE NO. 16

GEOM SCALE 1500.00



MODE NO. 17

GEOM SCALE 1500.00



MODE NO. 18

GEOM SCALE 1500.00

図 3.2-1 (6/8) 固有振動モード

19 次モード (43.42Hz)

20 次モード (44.00Hz)

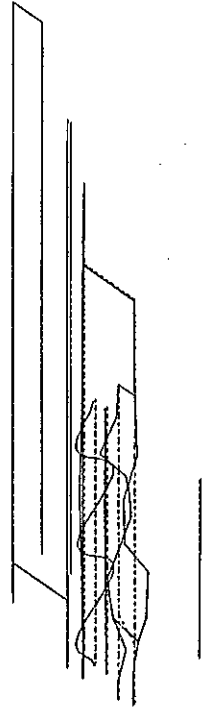
21 次モード (45.14Hz)

FINAS
MODE SHAPE

FINAS
MODE SHAPE

FINAS
MODE SHAPE

加振方向はy方向とし、
x方向・y軸回転・z軸回転を拘束



MODE NO. 19

GEOM SCALE 1500.00



MODE NO. 20

GEOM SCALE 1500.00



MODE NO. 21

GEOM SCALE 1500.00

図 3.2-1 (7/8) 固有振動モード

22 次モード (46.50Hz)

23 次モード (48.76Hz)

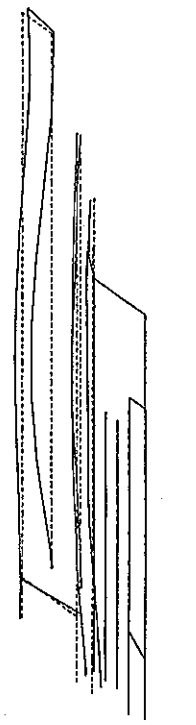
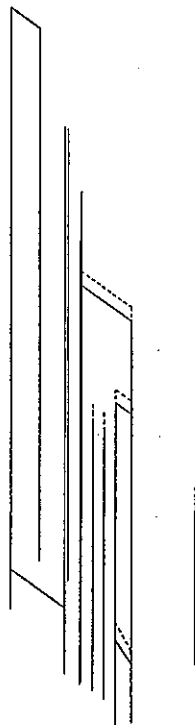
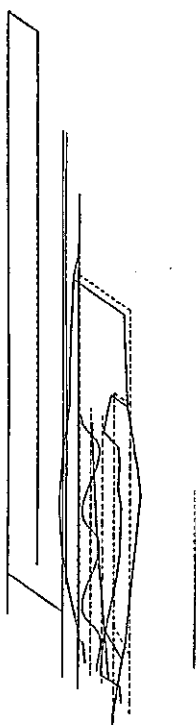
24 次モード (50.22Hz)

FINAS
MODE SHAPE

FINAS
MODE SHAPE

FINAS
MODE SHAPE

加振方向はy方向とし、
x方向・y軸回転・z軸回転を拘束



MODE NO. 22

GEOM. SCALE 1500.00

MODE NO. 23

GEOM. SCALE 1500.00

MODE NO. 24

GEOM. SCALE 1500.00

図 3.2-1 (8/8) 固有振動モード

4. ポンプ励振力による応答解析

IHX/ポンプ合体機器全体の振動解析モデルにて、ポンプ主軸のインペラ部に励振力を与え、各部の応答変位及び応答加速度を求めた。

4.1 解析モデル

(1) 応答解析手法

応答解析は、正弦波入力を用いたモーダル時刻歴応答解析とした。また、構造物の減衰比は、すべて1%とした。

(2) 1次ポンプからの励振力

1次ポンプからの励振力は、軸系の不釣り合いに起因する機械的なものと羽根車と案内羽根の干渉によって生じる流体脈動によるものがある。今回の解析では、軸系の不釣り合いに起因する機械的な力（以下、アンバランス力）を用いた。本ポンプに求められる釣り合い良さは JISB0905 よりポンプ羽根車に求められる G6.3 とし、以下の式よりアンバランス力を算出した。

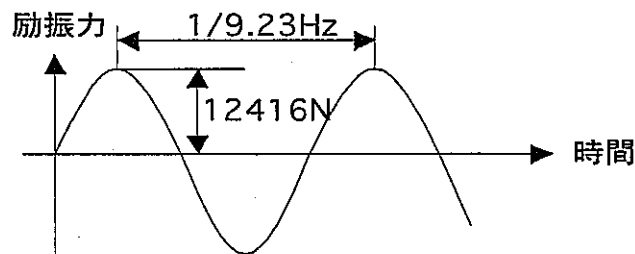
$$\text{アンバランス量 } M = G \times 0.955 \times W / N = 3.689 \text{ (kg} \cdot \text{m)}$$

$$\text{アンバランス力 } F = M \times (2\pi N / 60)^2 = 12416 \text{ (N)}$$

周波数はポンプの回転数より 9.23Hz となる。

W: 軸系重量 (kg)

N: ポンプ回転数 (rpm)



4.2 解析結果

応答解析結果を表 4.2-1 に示す。伝熱管（1本管）の変位履歴を図 4.2-1、図 4.2-2 及び図 4.2-3 に示す。今回の解析では、上部管板部での最大応答変位は約 $10\mu\text{m}$ 、下部管板部で約 $15\mu\text{m}$ であった。伝熱管（1本管）は 2 次モードで振動し、上部管板から 1800mm 部が最大振幅となり約 $136\mu\text{m}$ であった。この結果から保守的な評価を行うために、上部管板部から 1800mm 部の所にバッフル板をあてがい伝熱管摩耗解析を実施することとした。また、今後は、励振力、シールリング部のモデル化方法、ベローズの剛性、シュラウド間のギャップ量、管群のモデル化方法、耐震振れ止めのモデル化方法、等をパラメータとし解析を行い最大となるワークレートを算出する必要がある。

表4.2-1(1/2) 応答解析結果

1. ポンプ主軸

節点番号	軸方向長さ (mm)	最大応答変位 (mm)	最大応答加速度 (gal)
1	1825.0	0.0130	23.360
2	924.0	0.0222	40.379
3	332.0	0.0439	54.734
4	-270.0	0.0648	61.367
5	-805.0	0.0809	61.530
6	-855.0	0.0824	61.485
7	-1500.0	0.1015	61.389
8	-3000.0	0.1413	64.074
9	-4500.0	0.1733	61.156
10	-6000.0	0.1993	59.034
11	-7500.0	0.2186	62.990
12	-8650.0	0.2286	68.603
13	-9400.0	0.2321	69.766
14	-10200.0	0.2341	71.730
15	-10250.0	0.2342	72.017
16	-10500.0	0.2346	73.421
17	-10800.0	0.2347	75.058
18	-11100.0	0.2345	76.800
19	-11700.0	0.2309	80.639
最大値		0.2347	80.839

2. ポンプ内側ケーシング

節点番号	軸方向長さ (mm)	最大応答変位 (mm)	最大応答加速度 (gal)
115	1825.0	0.0104	5.053
114	1217.0	0.0070	3.179
113	608.0	0.0035	1.443
101	0.0	0.0000	0.000
102	-1500.0	0.0153	4.491
103	-3000.0	0.0402	11.843
104	-4500.0	0.0728	21.191
105	-6000.0	0.1111	31.707
106	-7500.0	0.1533	42.674
107	-8275.0	0.1761	48.326
108	-8650.0	0.1874	51.033
109	-9025.0	0.1987	53.528
110	-9400.0	0.2101	56.294
111	-9775.0	0.2214	59.026
112	-10150.0	0.2328	61.784
最大値		0.2328	61.784

3. ポンプ外側ケーシング

節点番号	軸方向長さ (mm)	最大応答変位 (mm)	最大応答加速度 (gal)
201	0.0	0.0000	0.000
202	-1500.0	0.0162	4.359
203	-3000.0	0.0410	11.076
204	-4500.0	0.0729	19.714
205	-6000.0	0.1106	29.831
206	-7500.0	0.1525	40.996
207	-8275.0	0.1755	47.038
208	-8650.0	0.1867	49.995
209	-9025.0	0.1981	52.909
210	-9400.0	0.2095	55.830
211	-9775.0	0.2211	58.808
212	-10150.0	0.2328	61.784
213	-10700.0	0.2509	66.302
214	-10800.0	0.2543	67.120
215	-11500.0	0.2789	73.093
216	-11900.0	0.2919	76.307
217	-12300.0	0.3049	79.517
最大値		0.3049	79.517

4. IHX/ポンプ隔壁

節点番号	軸方向長さ (mm)	最大応答変位 (mm)	最大応答加速度 (gal)
301	0.0	0.0000	0.000
302	-584.0	0.0078	2.182
303	-1168.0	0.0188	5.220
304	-1734.0	0.0270	7.363
305	-3000.0	0.0484	13.266
306	-4500.0	0.0773	21.225
307	-6000.0	0.1112	30.244
308	-7500.0	0.1506	40.273
309	-8275.0	0.1732	45.786
310	-8650.0	0.1849	48.549
311	-9025.0	0.1968	51.588
312	-9200.0	0.2025	53.265
313	-9400.0	0.2089	55.079
314	-9775.0	0.2207	58.414
315	-10150.0	0.2328	61.784
最大値		0.2328	61.784

5. フローシュラウド

節点番号	軸方向長さ (mm)	最大応答変位 (mm)	最大応答加速度 (gal)
401	-2300.0	0.0438	12.342
402	-3000.0	0.0623	17.624
403	-4500.0	0.1045	29.220
404	-6000.0	0.1478	40.472
405	-7500.0	0.1895	50.764
406	-8275.0	0.2096	55.545
407	-9025.0	0.2278	59.730
408	-9775.0	0.2446	63.517
409	-10700.0	0.2637	68.389
410	-11210.0	0.2736	71.430
411	-11500.0	0.2789	73.093
412	-11600.0	0.2812	73.759
413	-11800.0	0.2858	75.054
414	-12300.0	0.2970	78.251
最大値		0.2970	78.251

6. 上部プレナム内側シュラウド

節点番号	軸方向長さ (mm)	最大応答変位 (mm)	最大応答加速度 (gal)
501	-1168.0	0.0188	5.220
502	-1734.0	0.0309	8.695
503	-2300.0	0.0438	12.342
504	-2400.0	0.0457	12.848
505	-2880.0	0.0207	6.780
506	-2965.0	0.0204	6.667
507	-3499.0	0.0185	6.024
508	-4033.0	0.0167	5.384
509	-4567.0	0.0148	4.749
510	-5450.0	0.0117	3.805
511	-5800.0	0.0105	3.471
最大値		0.0457	12.848

7. 内側シュラウド

節点番号	軸方向長さ (mm)	最大応答変位 (mm)	最大応答加速度 (gal)
511	-5800.0	0.0105	3.471
512	-6800.0	0.0071	2.536
513	-7800.0	0.0036	1.661
514	-8800.0	0.0046	2.156
515	-9800.0	0.0083	3.314
516	-10800.0	0.0119	4.637
517	-11200.0	0.0134	5.163
518	-11300.0	0.0136	5.216
519	-11600.0	0.0146	5.590
520	-11800.0	0.0153	5.817
最大値		0.0153	5.817

表4.2-1(2/2) 応答解析結果

8. 伝熱管 (1本)

節点番号	軸方向長さ (mm)	最大応答変位 (mm)	最大応答加速度 (gal)
601	-5800.0	0.0105	3.471
602	-6000.0	0.0101	3.262
603	-6200.0	0.0196	6.427
604	-6400.0	0.0407	13.469
605	-6600.0	0.0645	21.449
606	-6800.0	0.0882	29.399
607	-7000.0	0.1092	36.506
608	-7200.0	0.1254	41.930
609	-7400.0	0.1350	45.101
610	-7600.0	0.1367	45.646
611	-7800.0	0.1302	43.412
612	-8000.0	0.1155	38.495
613	-8200.0	0.0934	31.173
614	-8400.0	0.0654	21.921
615	-8600.0	0.0336	11.395
616	-8800.0	0.0048	3.397
617	-9000.0	0.0360	12.069
618	-9200.0	0.0680	22.710
619	-9400.0	0.0955	31.865
620	-9600.0	0.1169	38.954
621	-9800.0	0.1308	43.578
622	-10000.0	0.1366	45.528
623	-10200.0	0.1341	44.703
624	-10400.0	0.1238	41.358
625	-10600.0	0.1074	35.929
626	-10800.0	0.0861	28.846
627	-11000.0	0.0622	20.850
628	-11200.0	0.0383	12.824
629	-11400.0	0.0181	5.936
630	-11600.0	0.0147	5.728
631	-11800.0	0.0153	5.817
最大値		0.1367	45.646

9. 伝熱管 (全体)

節点番号	軸方向長さ (mm)	最大応答変位 (mm)	最大応答加速度 (gal)
701	-5800.0	0.0105	3.471
702	-6400.0	0.0084	2.912
703	-7000.0	0.0064	2.348
704	-7600.0	0.0043	1.795
705	-8200.0	0.0034	1.825
706	-8800.0	0.0045	2.133
707	-9400.0	0.0066	2.735
708	-10000.0	0.0088	3.508
709	-10600.0	0.0110	4.281
710	-11200.0	0.0131	5.051
711	-11800.0	0.0153	5.817
最大値		0.0153	5.817

10. 外側シュラウド+下部円筒

節点番号	軸方向長さ (mm)	最大応答変位 (mm)	最大応答加速度 (gal)
901	-5100.0	0.0129	4.232
902	-5450.0	0.0117	3.781
903	-5800.0	0.0105	3.471
904	-5810.0	0.0104	3.462
905	-6390.0	0.0051	2.217
906	-6800.0	0.0043	1.787
907	-7300.0	0.0035	1.591
908	-7800.0	0.0028	1.430
909	-8300.0	0.0036	1.473
910	-8800.0	0.0045	1.878
911	-9300.0	0.0055	2.313
912	-9800.0	0.0065	2.680
913	-10300.0	0.0075	3.032
914	-10800.0	0.0092	3.667
915	-11210.0	0.0106	4.170
916	-11790.0	0.0152	5.805
917	-11800.0	0.0153	5.817
918	-12200.0	0.0167	6.318
最大値		0.0167	6.318

11. 本体胴

節点番号	軸方向長さ (mm)	最大応答変位 (mm)	最大応答加速度 (gal)
1001	-2965.0	0.0204	6.667
1002	-3499.0	0.0185	6.084
1003	-4033.0	0.0166	5.481
1004	-4567.0	0.0148	4.862
1005	-5100.0	0.0129	4.232
1006	-5950.0	0.0101	3.321
1007	-6000.0	0.0099	3.269
1008	-6250.0	0.0092	3.033
1009	-6525.0	0.0084	2.776
1010	-6690.0	0.0079	2.594
1011	-7300.0	0.0061	2.053
1012	-8300.0	0.0029	1.192
1013	-9300.0	0.0021	1.071
1014	-10300.0	0.0056	2.098
1015	-10710.0	0.0071	2.555
1016	-11210.0	0.0086	2.867
1017	-11800.0	0.0104	3.412
1018	-12058.0	0.0112	3.679
最大値		0.0204	6.667

12. スカート

節点番号	軸方向長さ (mm)	最大応答変位 (mm)	最大応答加速度 (gal)
1101	-6000.0	0.0099	3.269
1102	-7500.0	0.0054	1.793
1103	-8650.0	0.0026	0.860
1104	-9800.0	0.0003	0.098
1105	-10000.0	0.0000	0.000
最大値		0.0099	3.269

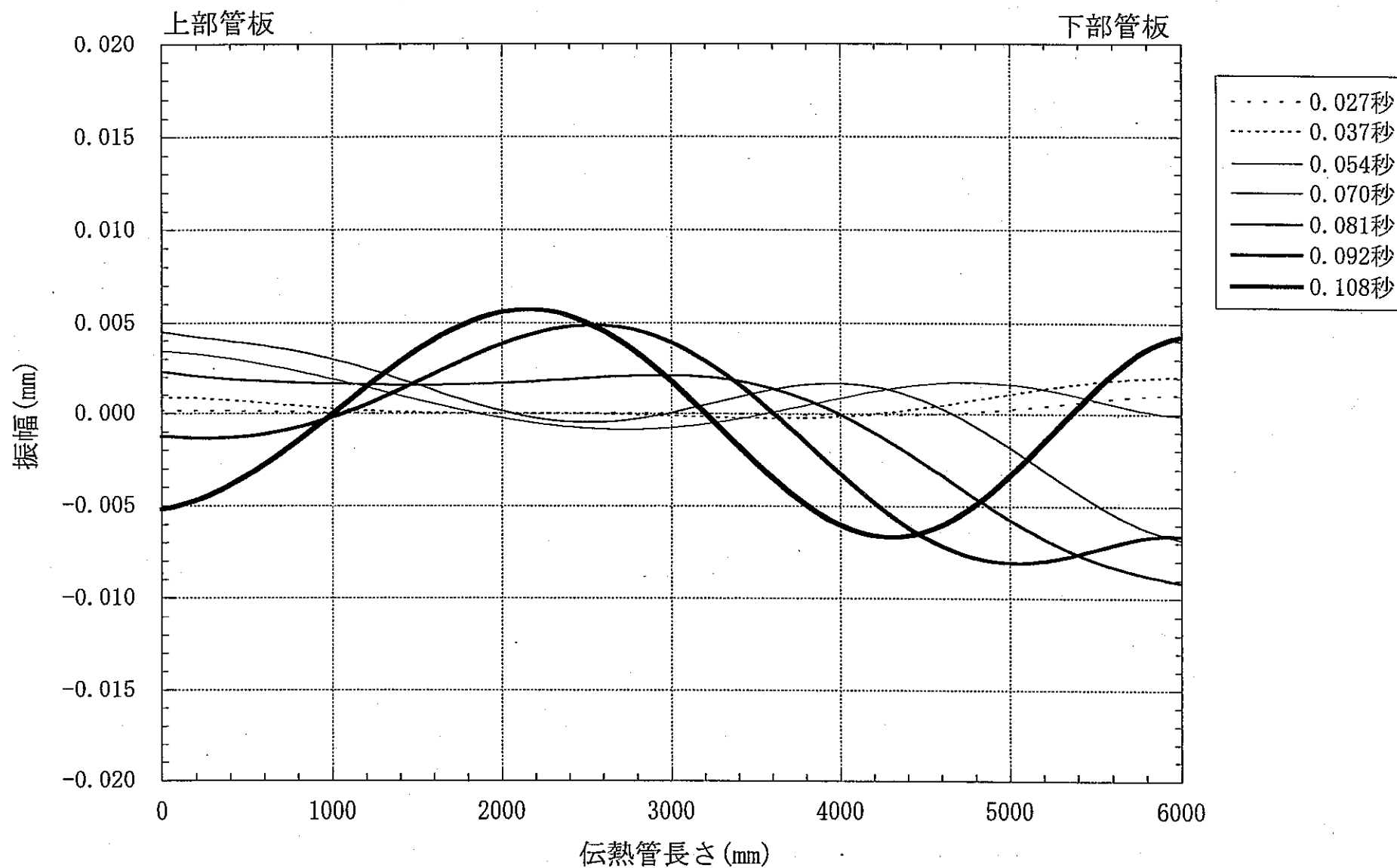


図4.2-1(1/2) 伝熱管 (1本管) の変位履歴

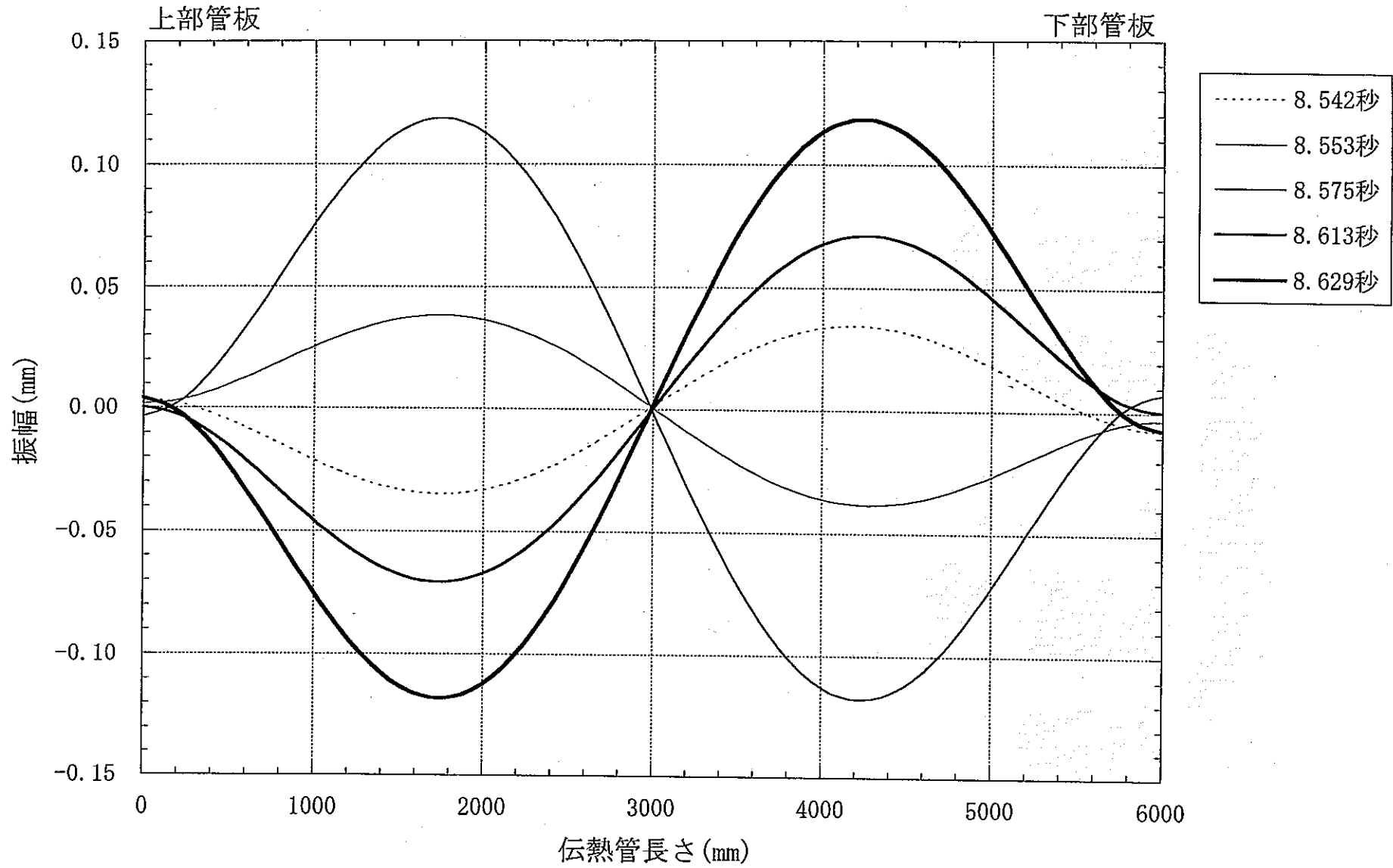


図4.2-1(2/2) 伝熱管 (1本管) の変位履歴

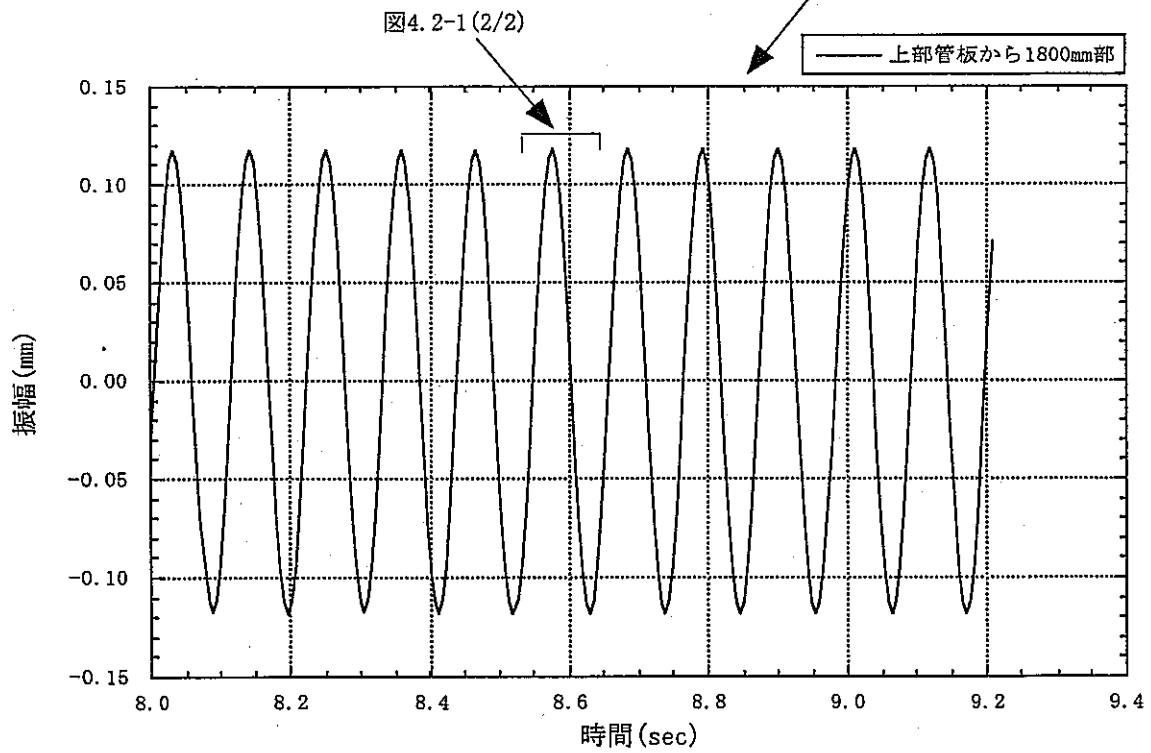
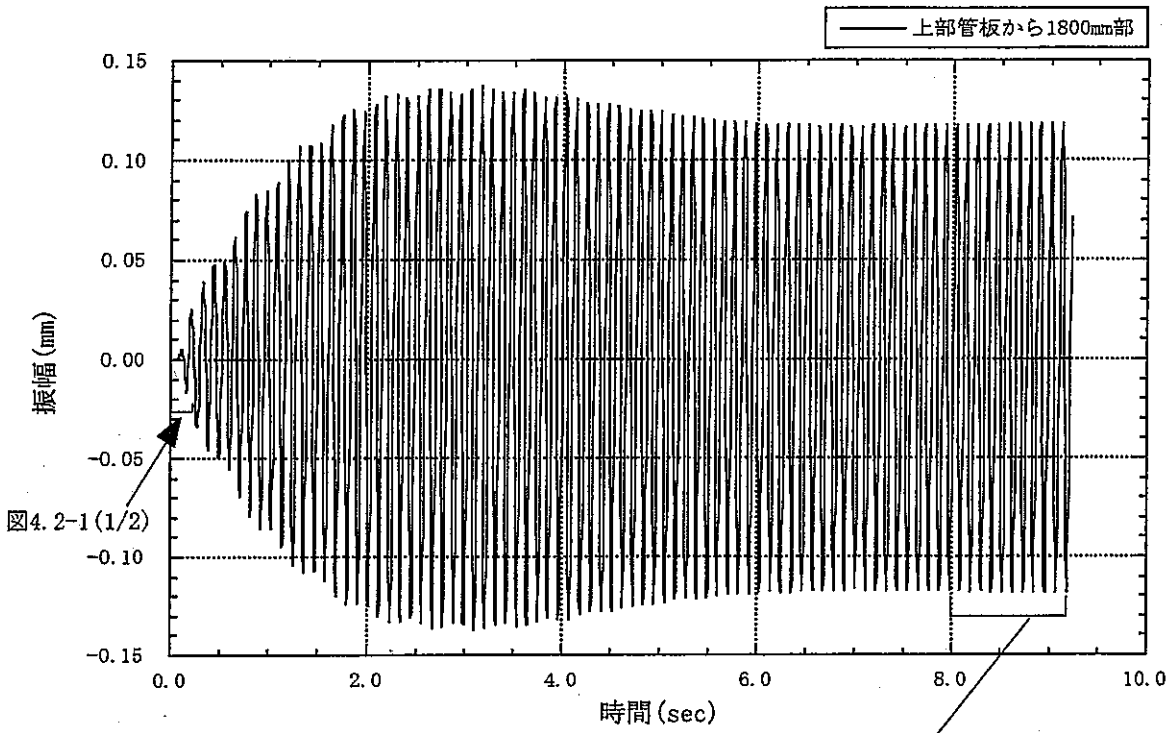


図4.2-2 伝熱管（1本管）の変位履歴

0.027 秒

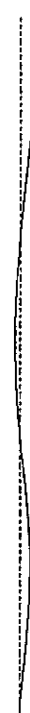
0.037 秒

0.054 秒

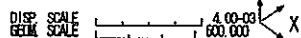
FINAS
DEFORMED SHAPE

FINAS
DEFORMED SHAPE

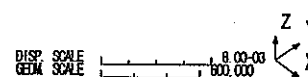
FINAS
DEFORMED SHAPE



STEP NO. 5



STEP NO. 7



STEP NO. 10

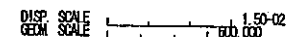


図 4.2-3(1/4) 伝熱管 (1 本管) の変位履歴

0.070 秒

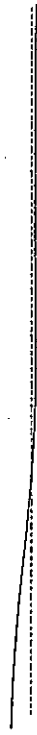
0.081 秒

0.092 秒

FINAS
DEFORMED SHAPE

FINAS
DEFORMED SHAPE

FINAS
DEFORMED SHAPE



STEP NO. 13

DISP SCALE 3.00-02
GEOM SCALE 600.000

STEP NO. 15

DISP SCALE 4.00-02
GEOM SCALE 600.000

STEP NO. 17

DISP SCALE 3.00-02
GEOM SCALE 600.000

図 4. 2-3(2/4) 伝熱管 (1 本管) の変位履歴

0.108 秒

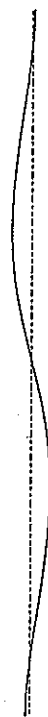
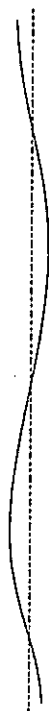
8.542 秒

8.553 秒

FINAS
DEFORMED SHAPE

FINAS
DEFORMED SHAPE

FINAS
DEFORMED SHAPE



STEP NO. 20

DISP. SCALE 2.00E-02
GEOM. SCALE 600.000

STEP NO. 1577

DISP. SCALE 0.15000
GEOM. SCALE 600.000

STEP NO. 1579

DISP. SCALE 0.15000
GEOM. SCALE 600.000

図 4.2-3(3/4) 伝熱管 (1本管) の変位履歴

8.575 秒

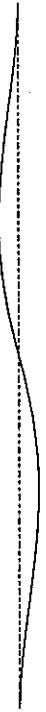
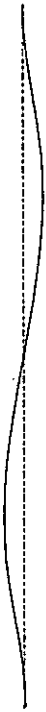
8.613 秒

8.629 秒

FINAS
DEFORMED SHAPE

FINAS
DEFORMED SHAPE

FINAS
DEFORMED SHAPE



STEP NO. 1583

DISP SCALE 0.50000
REFL SCALE 600.000

STEP NO. 1590

DISP SCALE 0.30000
REFL SCALE 600.000

STEP NO. 1593

DISP SCALE 0.50000
REFL SCALE 600.000

図 4.2-3(4/4) 伝熱管 (1 本管) の変位履歴

5 ワークレート解析

5.1 ワークレート解析モデル

(1) 振動解析とワークレート解析

図 5.1-1 に励振力応答解析結果からワークレート解析を行うモデルの手法を示す。励振力応答解析（全体系梁モデル）から得られた上下管板の変位をワークレート解析モデル（伝熱管 1 本管モデル）の管板に代入する。この 1 本管モデルにバッフル板を所定の荷重で接触させ、伝熱管の振幅（摺動距離）を計算しワークレートを求める。

図 1-1～図 1-3 に示されている様にバッフル板は全部で管束部に 9 枚設置されており、バッフル板による支持箇所は、内層の伝熱管では 4 箇所、中層では 9 箇所、外層では 5 箇所となっている。接触箇所によって振動モードや振幅は変わってくるが、ここでは暫定的な仮定として伝熱管と接触するバッフル板は 1 枚のみで、そこで伝熱管に摩耗が生じるものとする。なお、実際には伝熱管は複数のバッフル板と接触しているため、この影響については今後パラメータ解析により評価する予定である。

(2) 伝熱管とバッフル板の接触条件

伝熱管とバッフル板の接触により発生する力は、伝熱管の反りによるバッフル板への押し付け荷重と伝熱管フレットング振動による摩擦力の 2 つである。ここではワークレートが最も大きくなる保守的な評価を行うため、図 5.1-2 に示すように押し付け荷重は接触接線に対して垂直方向（ギャップ方向）に作用するものとし、摩擦力は押し付け荷重と直交する方向（すべり方向）に作用するものとして計算する。つまり、押し付け荷重と摩擦力は直交する。さらにバッフル板は最も摺動距離が大きくなる様に、伝熱管振動の腹の部分にあてがうこととする。4 章の振動解析よりバッフル板によるピン支持がない場合は伝熱管 2 次モードで振動することがわかっているため、バッフル板は図 5.1-2 に示すように上から 1/4 長さの位置に押し付ける。

また、バッフル板への押し付け荷重は、伝熱管の反りの許容値を最大値としたパラメータとする。

(3) FINAS における接触モデル

伝熱管とバッフル板の接触は、FINAS の接触要素「CONT2」を用いる。ギャップ方向については、ギャップ方向剛性 K_g に大きい値を用い、 K_g を十分に小さくする ε を代入することで、伝熱管とバッフル板が接触するまでは力は発生

せず、接触後、大きな力を発生させ伝熱管が変位しないモデルとする（図 5.1-3）。

一方、すべり方向についてはすべり方向剛性値 K_f を大きくしてクーロン摩擦力の作用する領域を無視できる程度まで小さくさせ、また K_f を十分に小さくさせる ε を代入することで伝熱管とバッフル板の摩擦力は、（動）摩擦係数と押し付け荷重の積（ μf ）で与えられる一定値となるようにする（図 5.1-4）。

5.2 ワークレート解析結果

図 5.2-1(1/4)～(4/4)に押し付け荷重を 0.0, 0.006, 0.012, 0.02 kgf とした場合の伝熱管の変位を示す。2次モードで振動している伝熱管の振幅が押し付け荷重の増加とともに、小さくなっていく様子が確認できる。次にバッフル板の接触位置（上部管板より 1.8m）における伝熱管変位の時刻歴応答を示したグラフが図 5.2-2(1/4)～(4/4)である。0～9秒間の振動の様子を示しているが、このグラフも押し付け荷重の増加と共に振幅が小さくなっていることが確認できる。そして、約6秒以降の振動はほぼ定常状態になっていることもわかる。過小評価や過大評価を避けるため、定常時の振幅からワークレートは求めるものとし、定常時の振幅の詳細を同図下に示す。

以上の伝熱管振動の応答図に基づいて、押し付け荷重と振幅及びワークレートの関係を示したグラフが図 5.2-3 である。このグラフは押し付け荷重が増加すると共に伝熱管の振動振幅が減少し、約 0.022kgf 以上では摩擦力により伝熱管は振動しないことを示している。一方、ワークレートに着目すると、押し付け荷重の増加と共にワークレートは大きくなるが、押し付け荷重が 0.012kgf の時最大値 0.38(Nmm/sec)を示した後低下し、摩擦力により伝熱管が振動しなくなる時点でゼロの値を示す。この様に、ワークレートは接触荷重が小さくても大きくても大きな値とはならず、程良い荷重の時に最大値となっている。

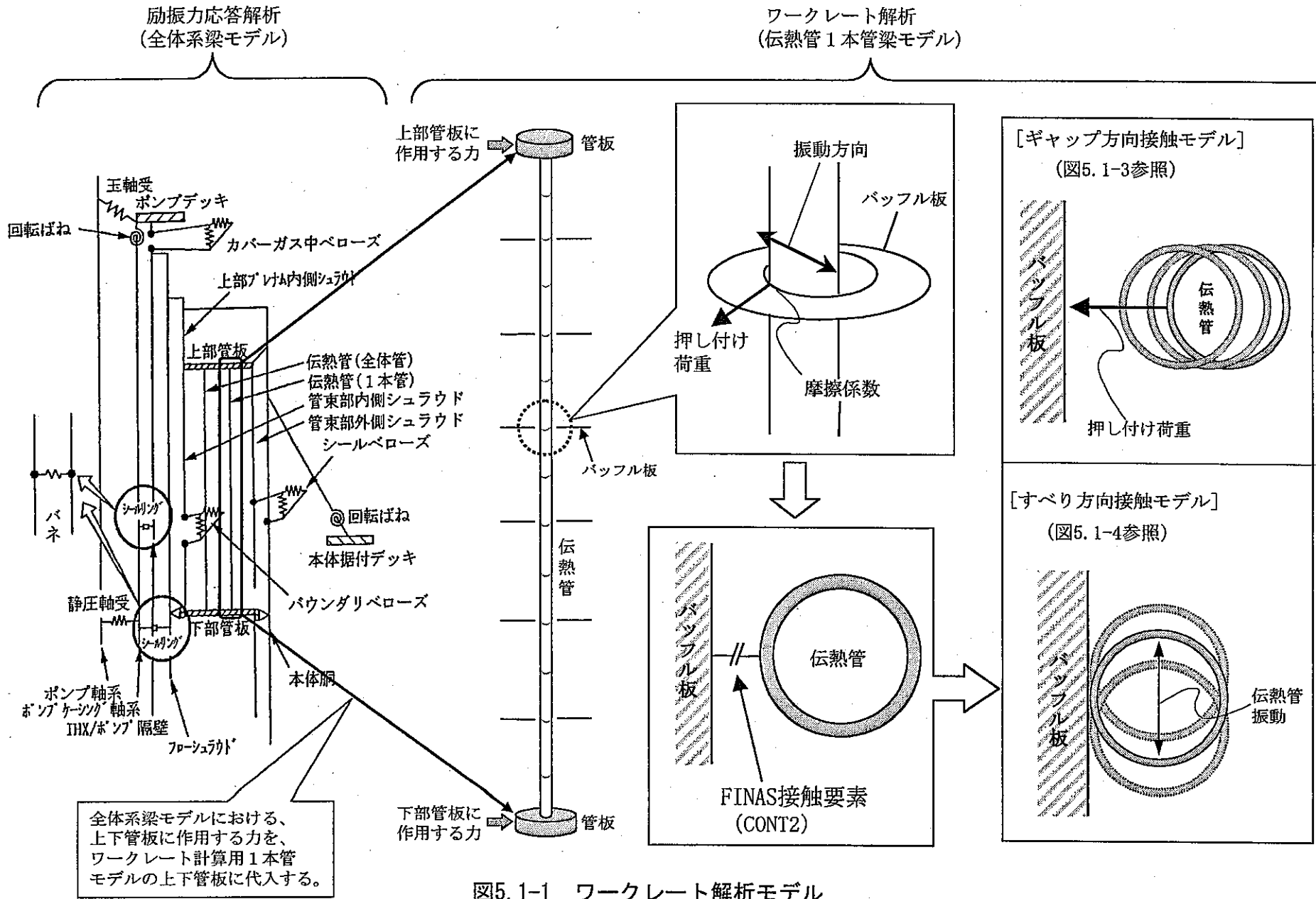


図5.1-1 ワークレート解析モデル

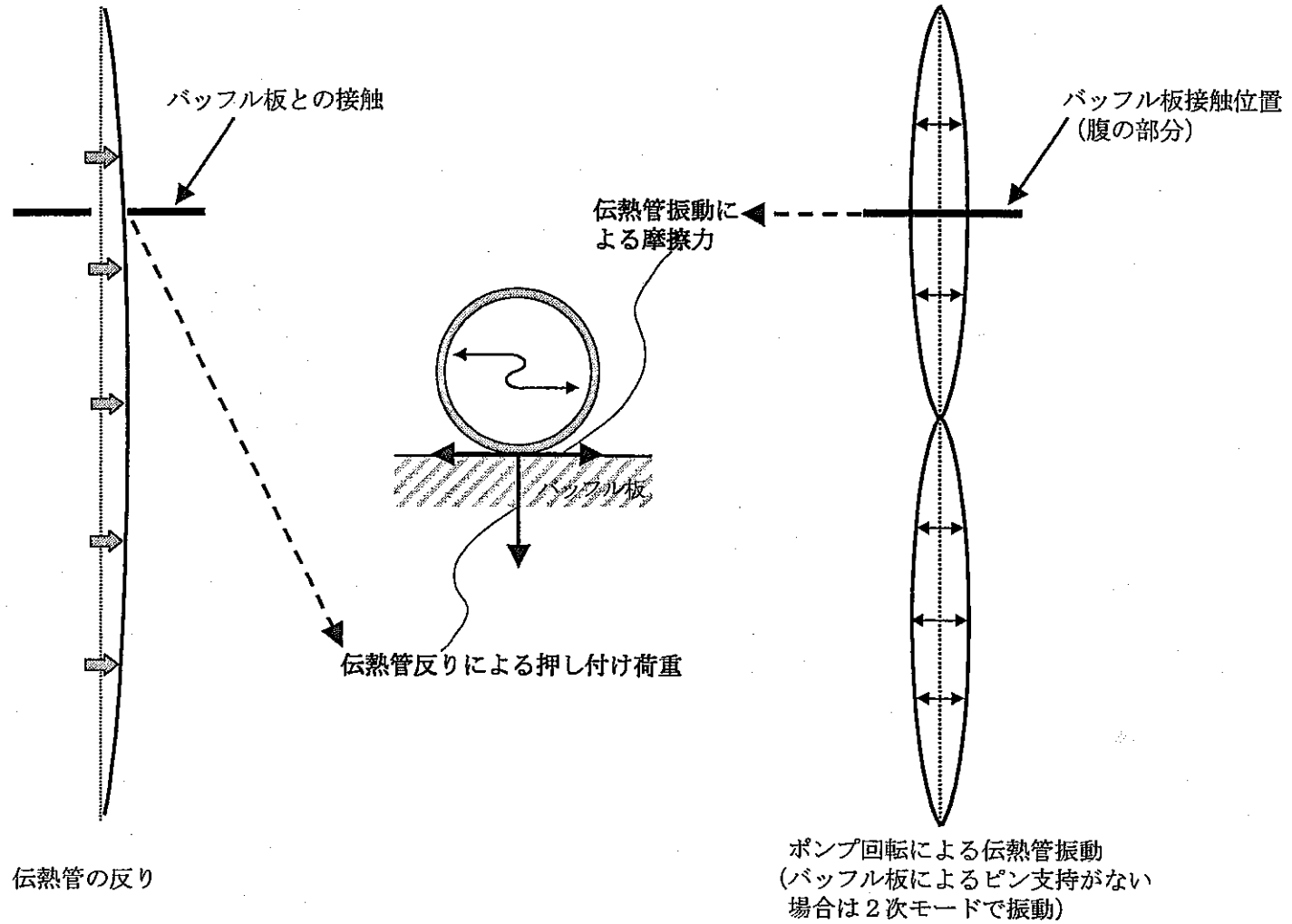


図5.1-2 伝熱管とバッフル板の接触条件 (解析条件)

[ギャップ方向接触モデル]

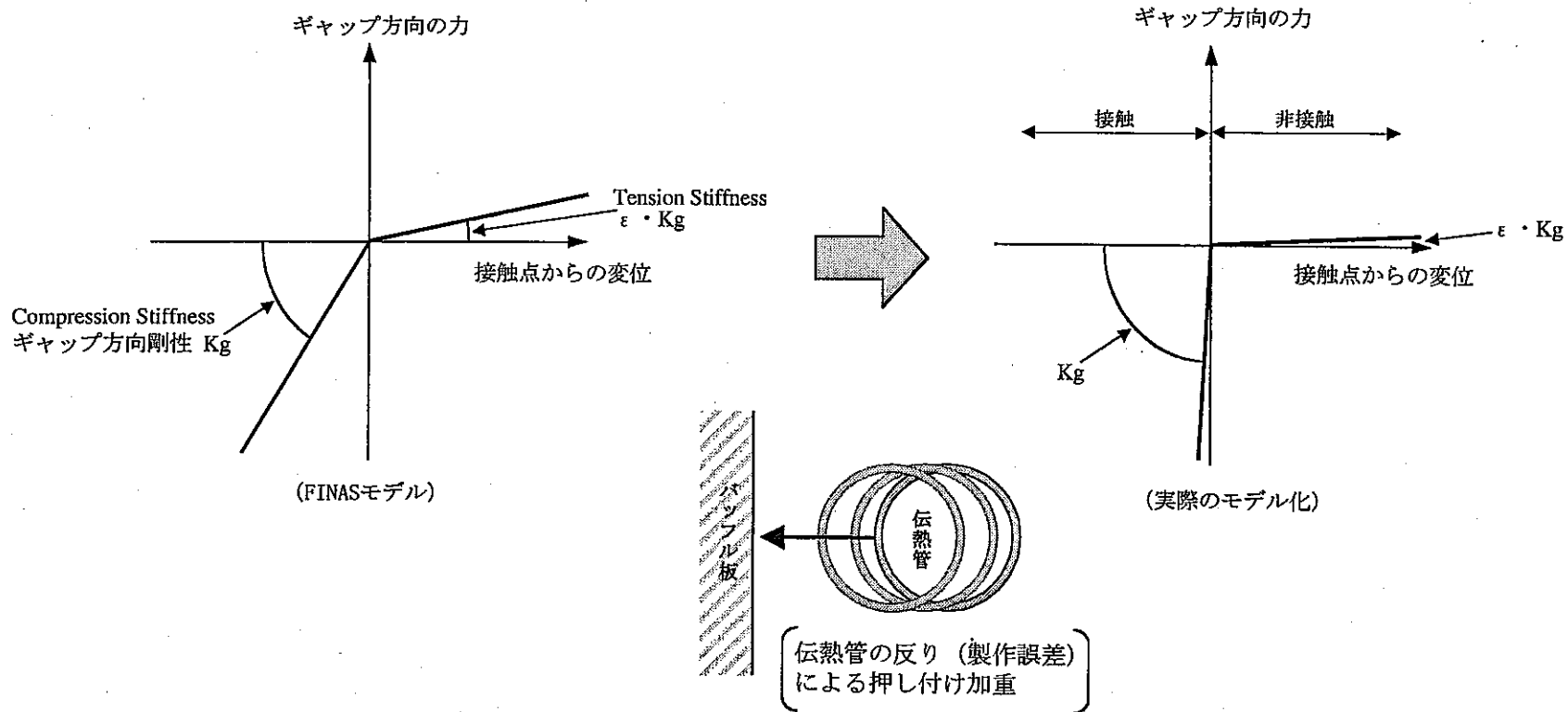


図5.1-3 伝熱管とバッフル板のギャップ方向接触モデル

[すべり方向接触モデル]

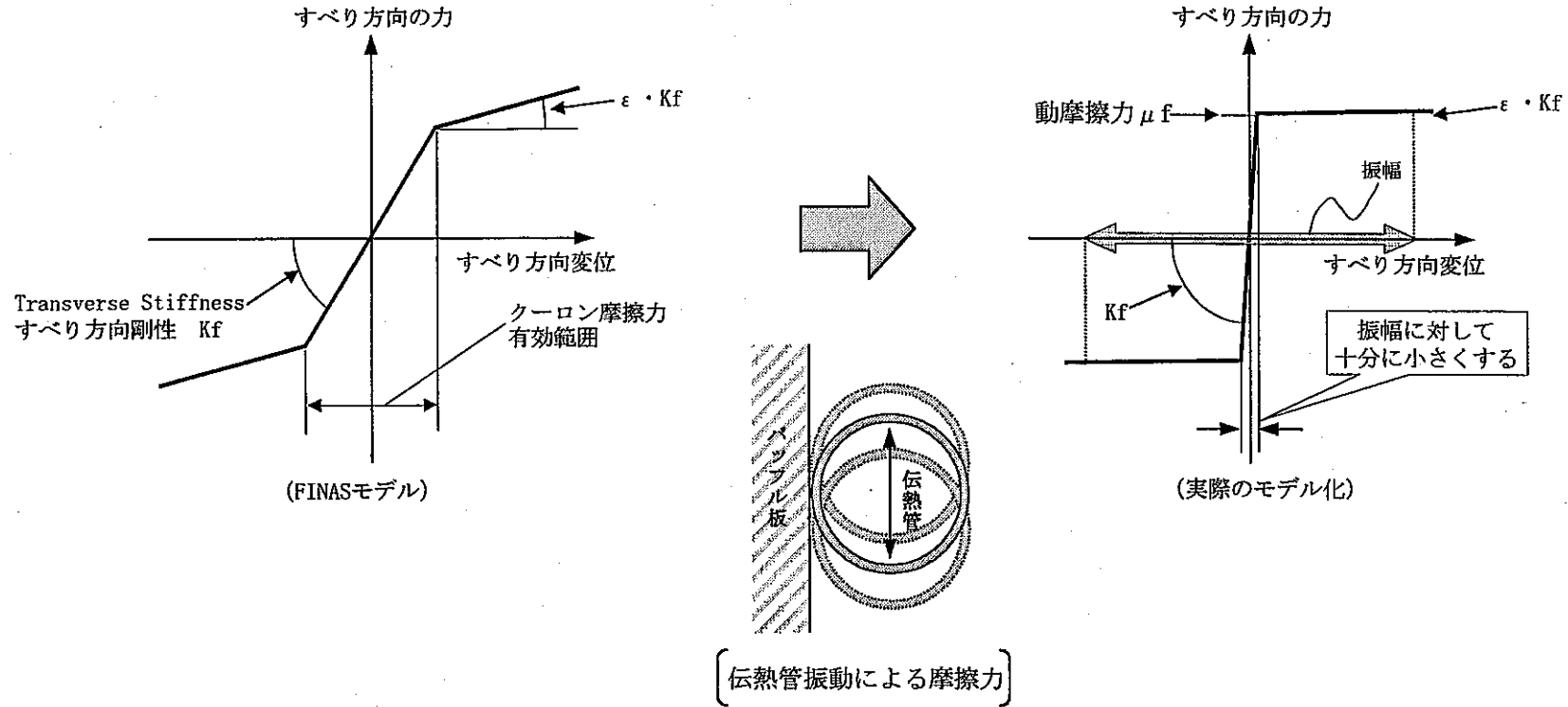


図5.1-4 伝熱管とバッフル板のギャップ方向及びすべり方向接触モデル

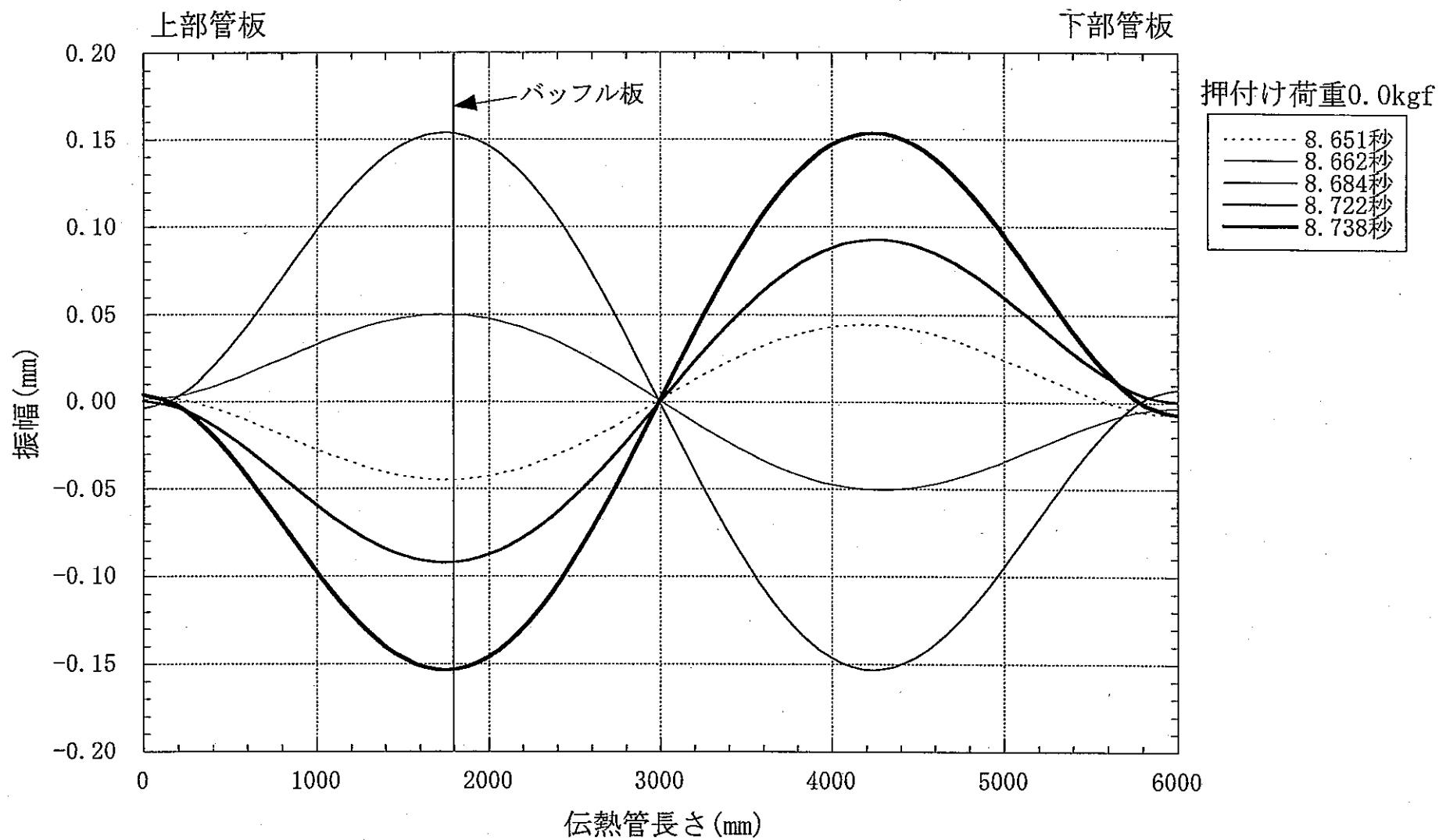


図5.2-1(1/4) 伝熱管 (1本管) の定常振動状態

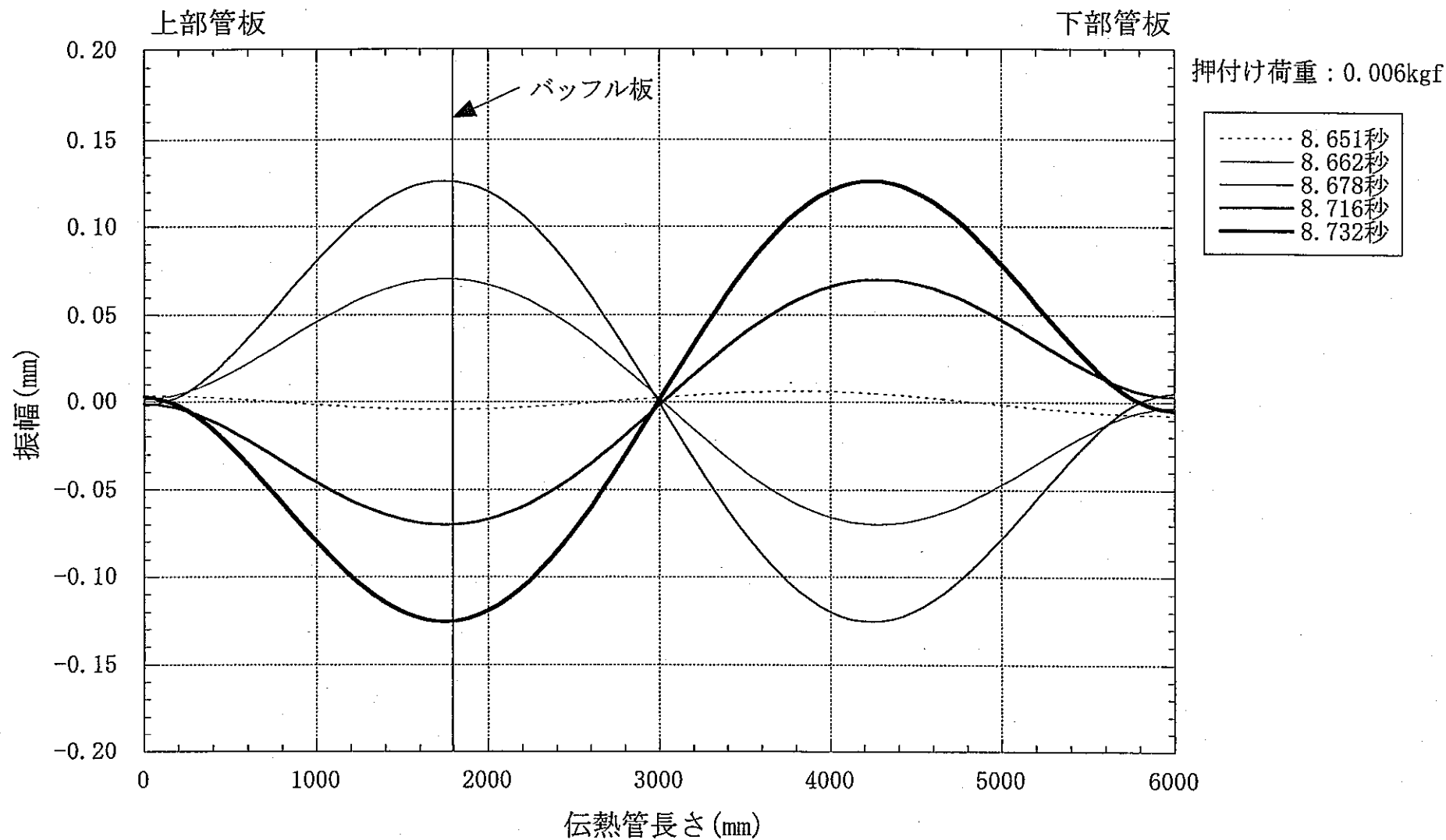
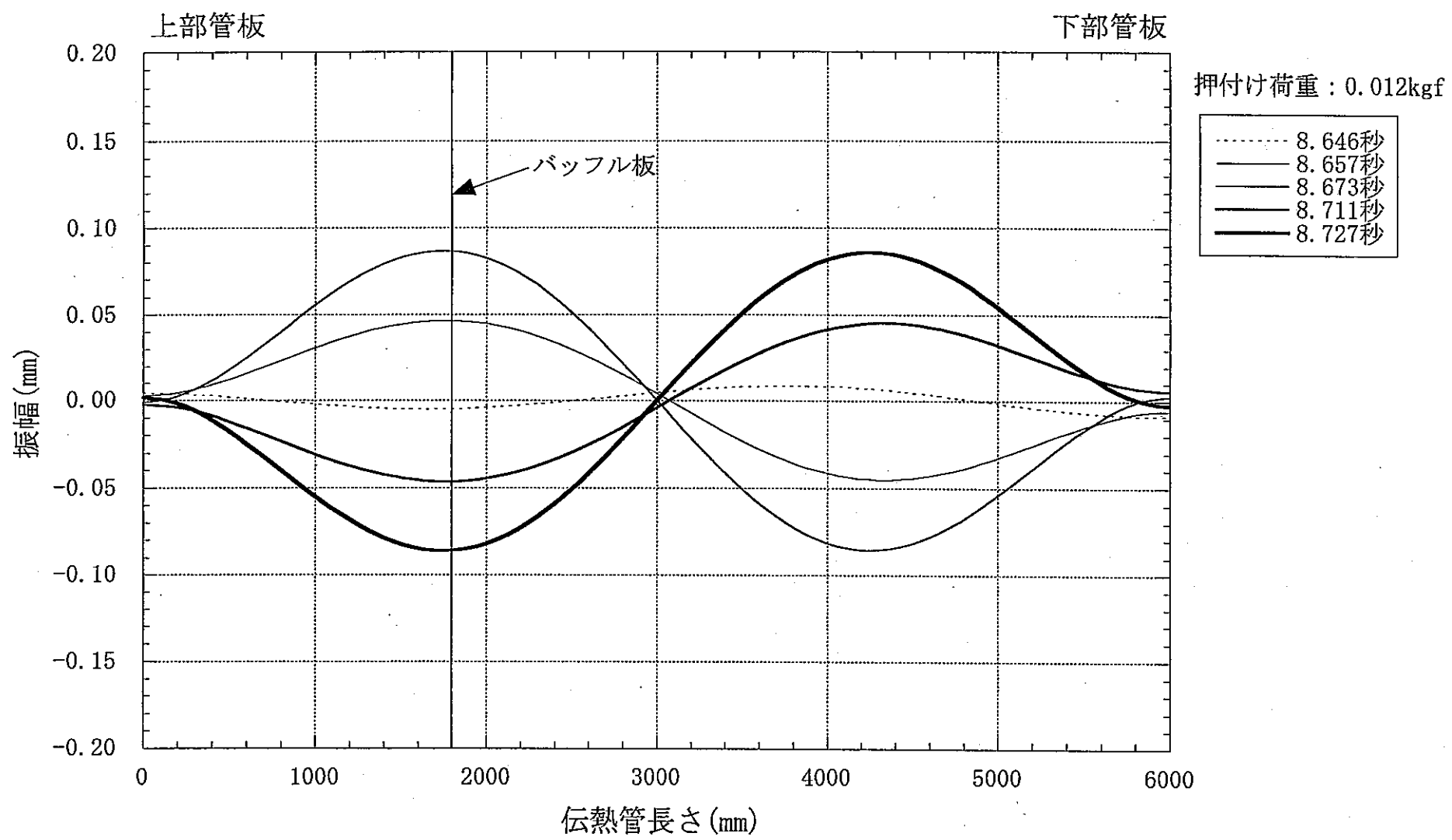


図5.2-1(2/4) 伝熱管 (1本管) の定常振動状態



-51-

図5.2-1(3/4) 伝熱管(1本管)の定常振動状態

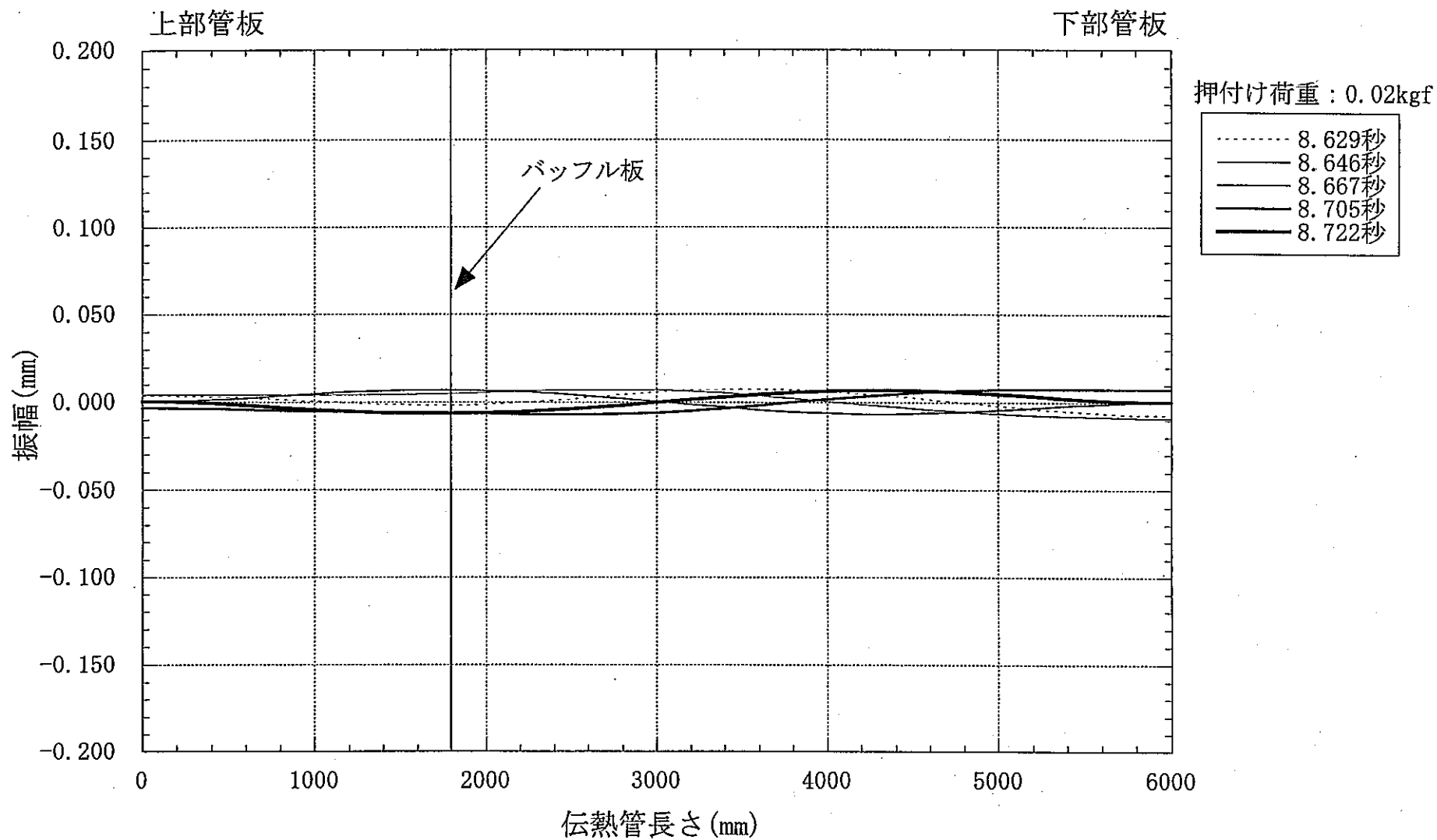


図5.2-1(4/4) 伝熱管 (1本管) の定常振動状態

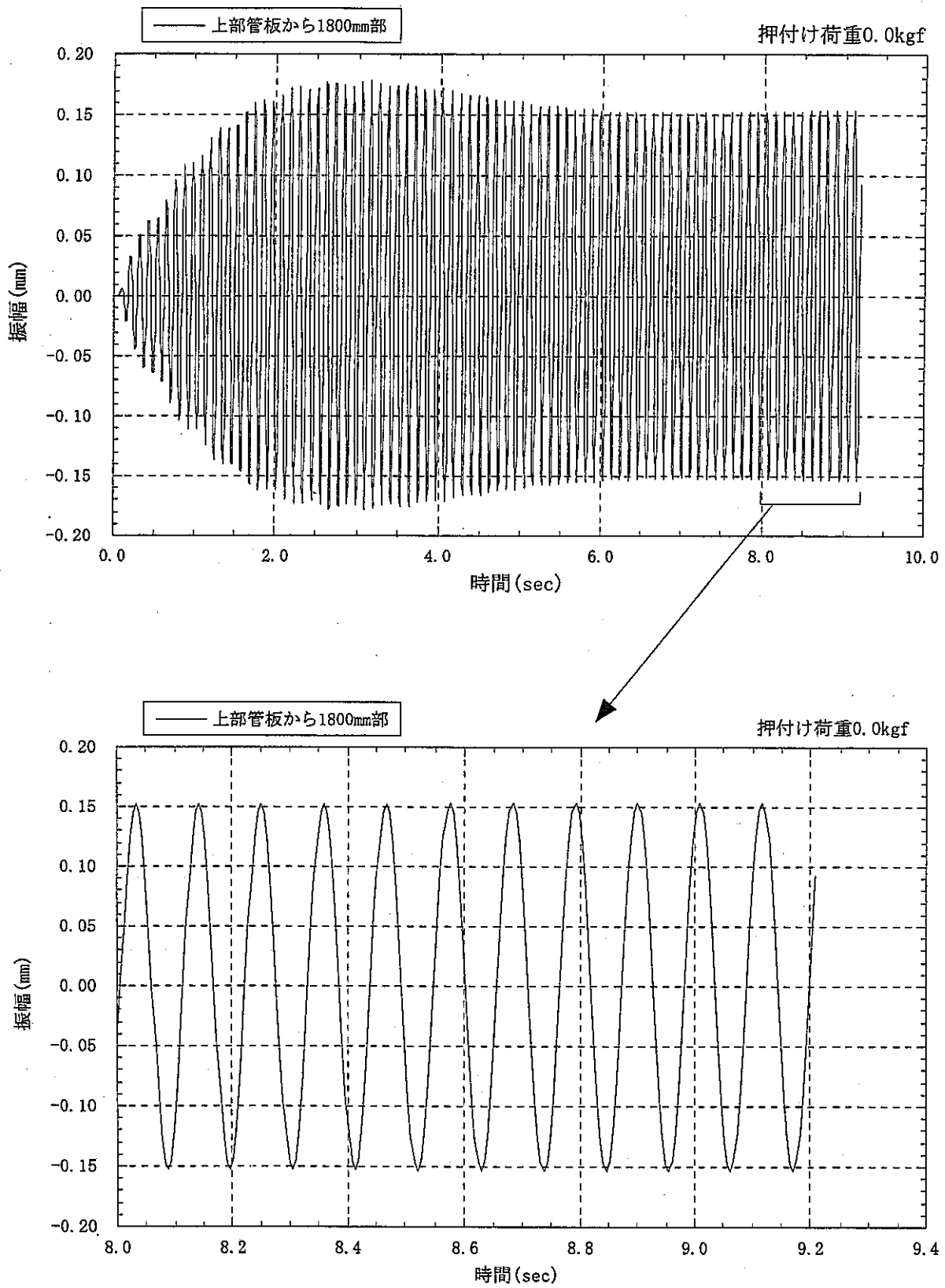


図5.2-2(1/4) 伝熱管（1本管）のバッフル板部の変位履歴

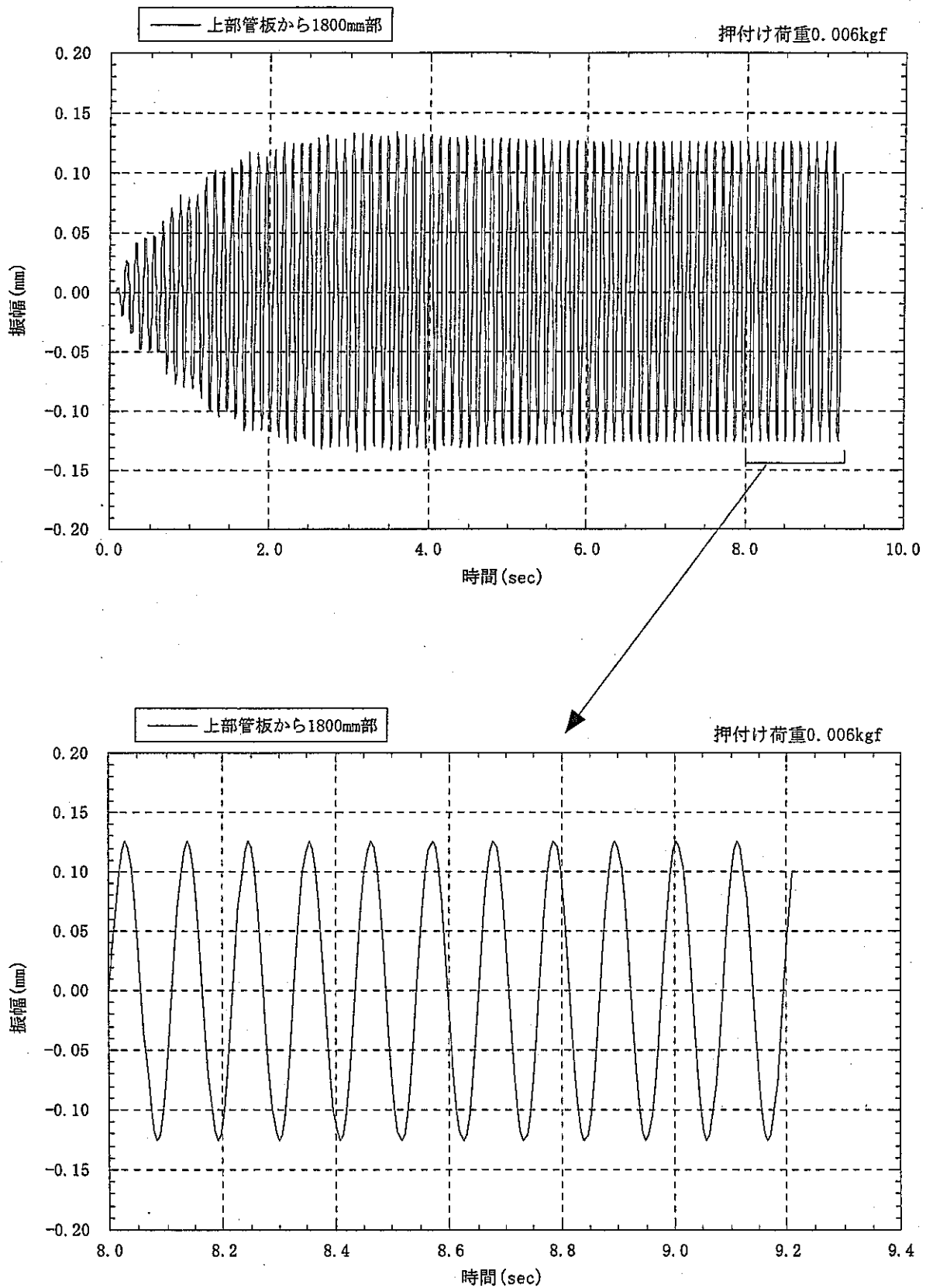


図5.2-2(2/4) 伝熱管（1本管）のバツフル板部の変位履歴

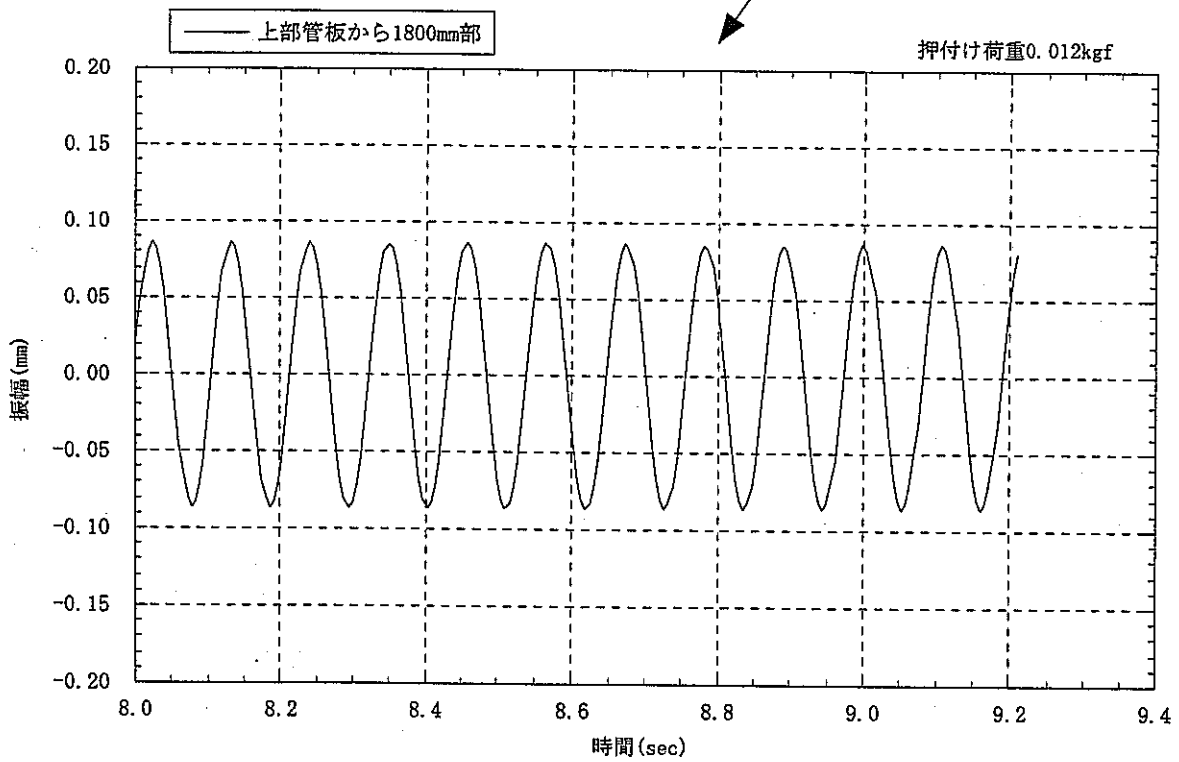
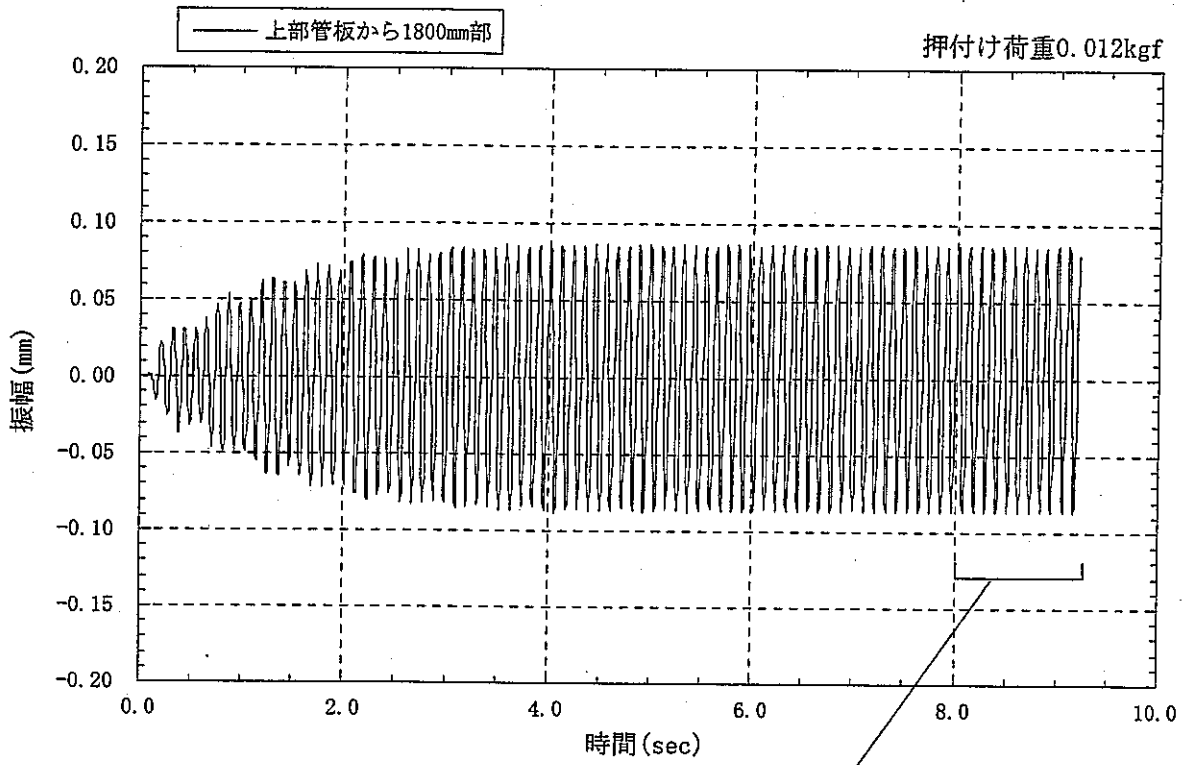


図5.2-2(3/4) 伝熱管（1本管）のバツフル板部の変位履歴

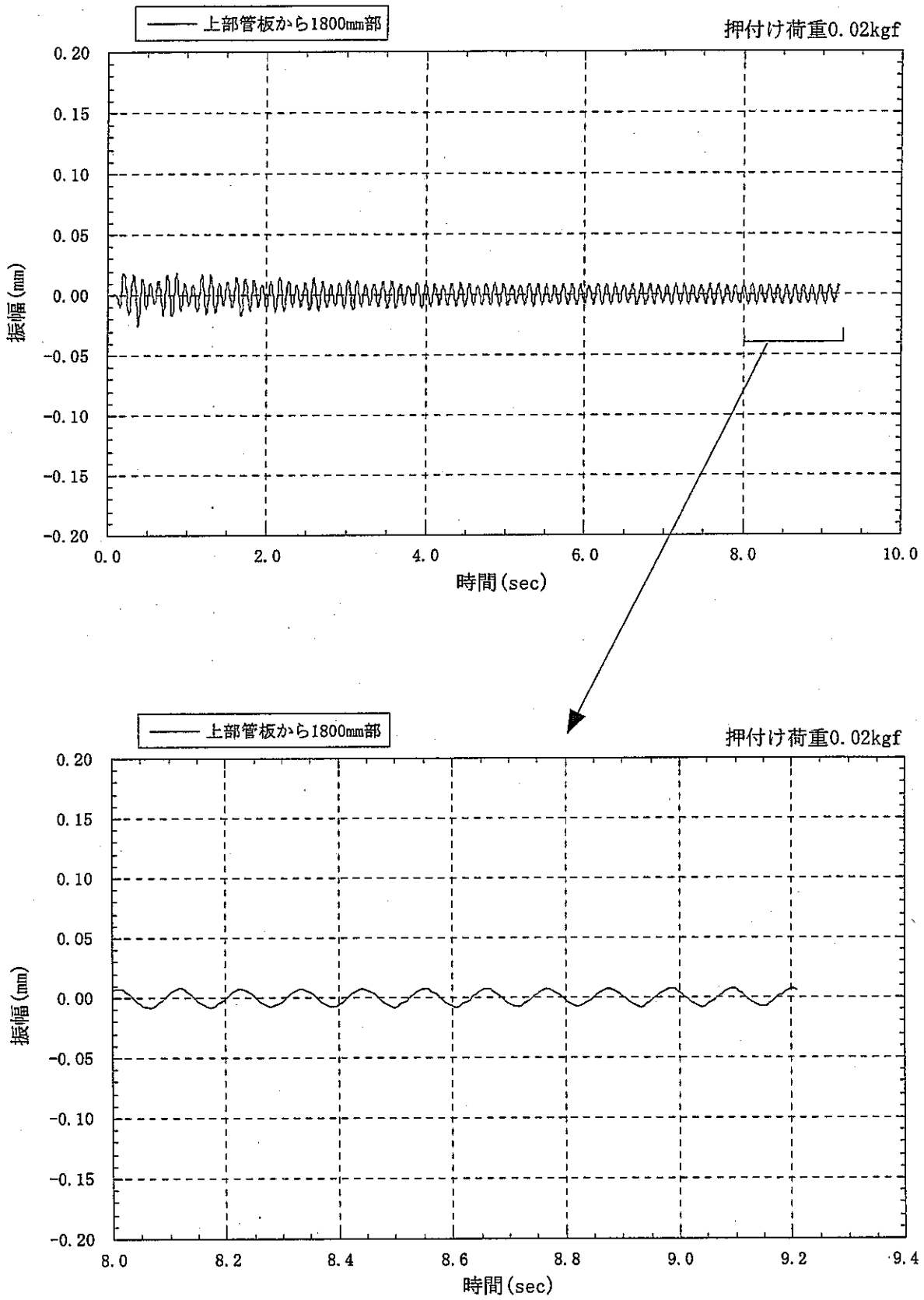


図5.2-2(4/4) 伝熱管（1本管）のバッフル板部の変位履歴

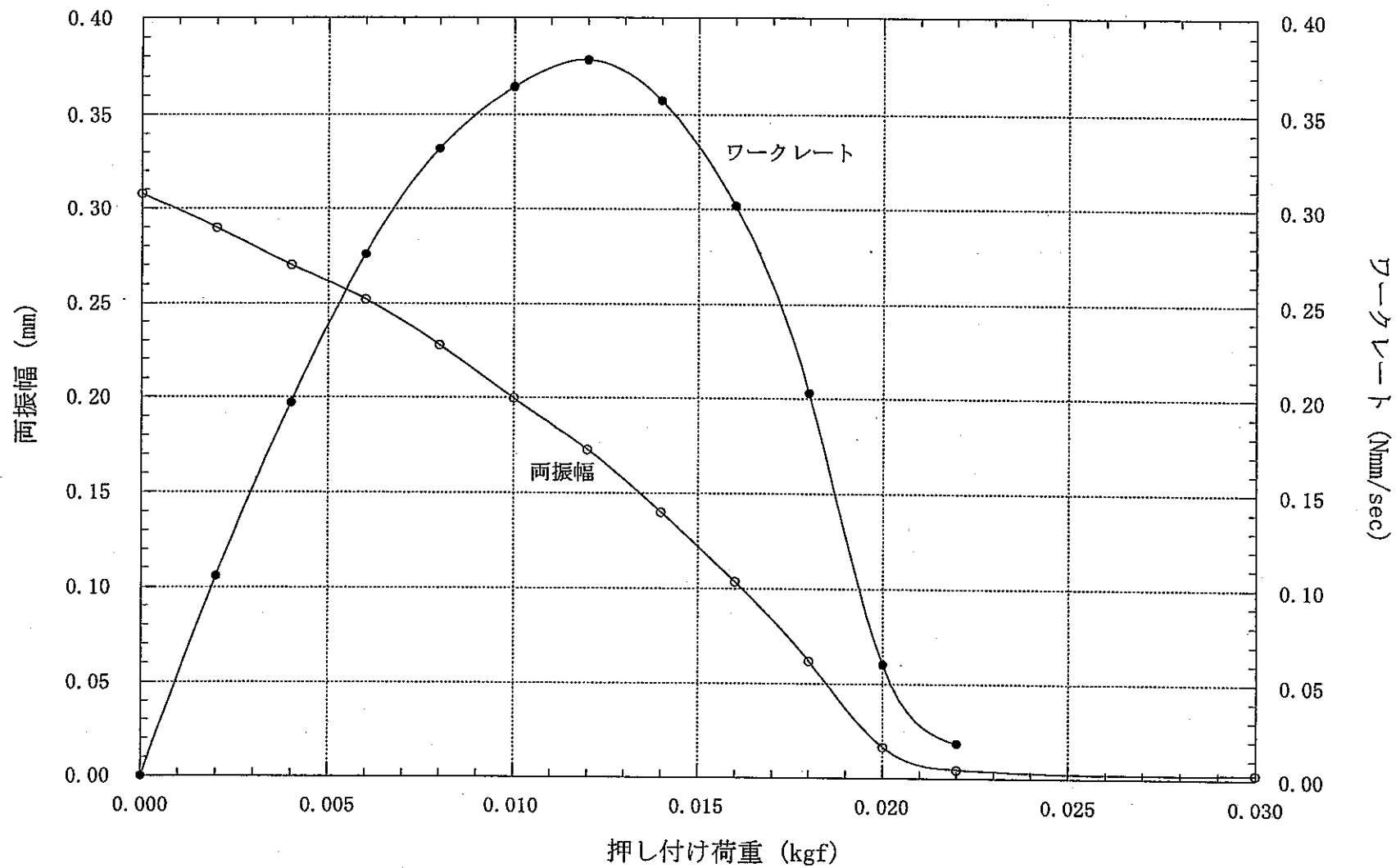


図5.2-3 押し付け荷重とワークレート

6 伝熱管摩耗量評価

IHX 伝熱管の肉厚(1.1mm)は、図 6.1 に示すように耐外圧必要肉厚、腐食代、摺動摩耗代などを考慮して決められており、このうちフレットング摩耗として許容できる深さは 0.255mm である。したがって、プラント寿命期間中のフレットング摩耗深さがこの値以下になるように対策を講じることが必要となる。

図 2.2 に示す関係式に基づいて、ワークレートと摩耗量(摩耗体積)の関係グラフ化したものが図 6.2 である。伝熱管材料の比摩耗量は 12Cr 鋼の値が、現時点で得られていないため 2.25Cr-1Mo 鋼の値で代用し、また摩耗時間はプラント寿命 60 年と稼働率 92%の積とした。一方、摩耗体積と摩耗深さの関係は図 6.3 に示されるが、これはグラフ中の図に示すように伝熱管外面とバップル板内面が重なった場合の摩耗深さと摩耗部(斜線部)の関係を幾何学的に求めたものである。なお、実際には伝熱管は振動しながら摩耗していくため、摩耗範囲は図に示している状態より広くなり、したがって、摩耗深さはより小さくなると考えられるため、図 6.3 では保守的な換算を行っていることになる。

図 5.2-3 のワークレート解析結果が示すように、その最大値は約 0.38(Nmm/sec)であり、この値に対応する摩耗体積及び摩耗深さをそれぞれ図 6.1、図 6.2 のグラフに記載した。この結果、プラント寿命期間中の摩耗深さは約 0.05mm であり、伝熱管のフレットング許容摩耗深さ 0.255mm より十分に小さい値であることがわかった。

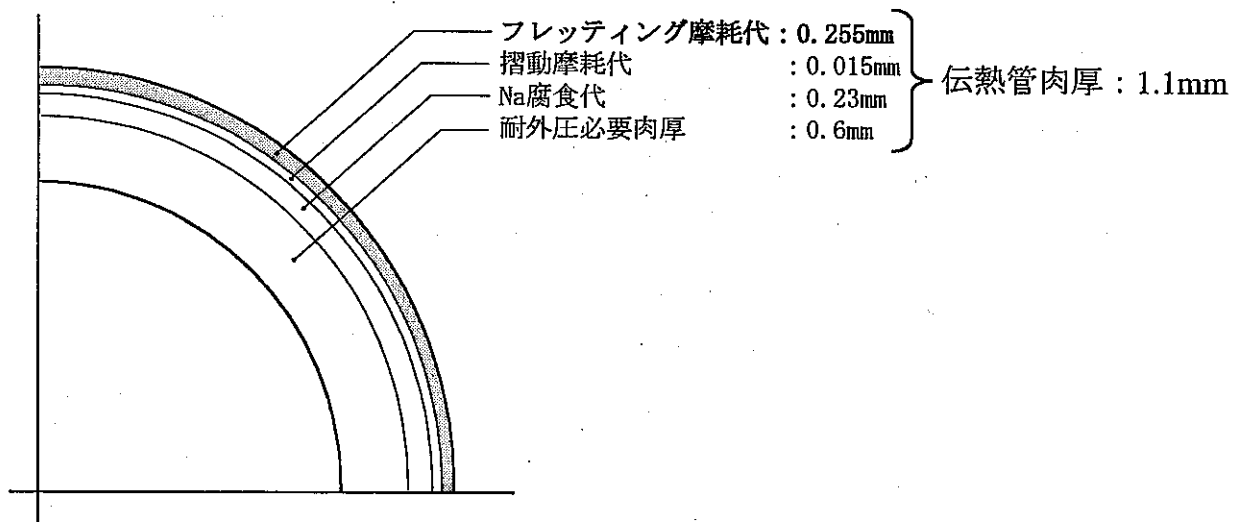
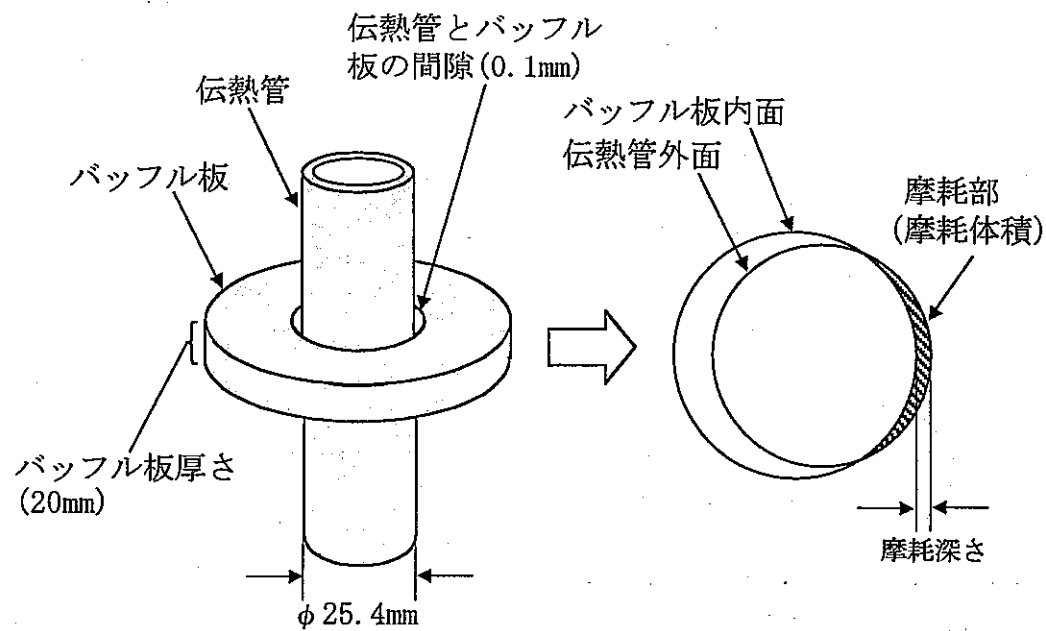


図6.1 伝熱管摩耗部とその許容摩耗深さ

摩耗体積計算条件

- ・比摩耗量： 2.13×10^{-14} (m^3/Nm) (2.25Cr-1Mo鋼の値)
- ・摩耗時間：60年×92% (プラント寿命×稼働率)

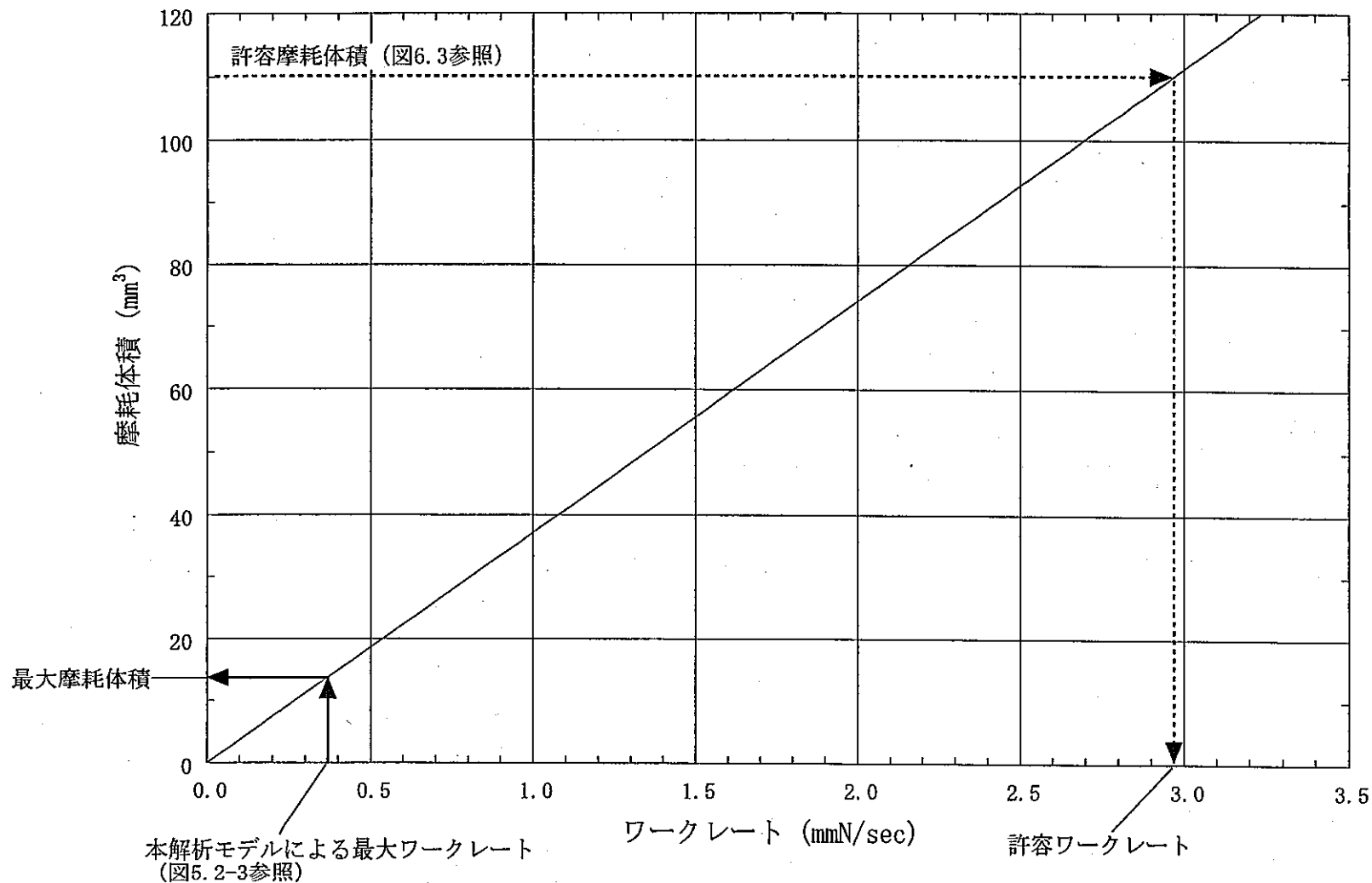


図6.2 伝熱管に作用するワークレートと摩耗体積の関係

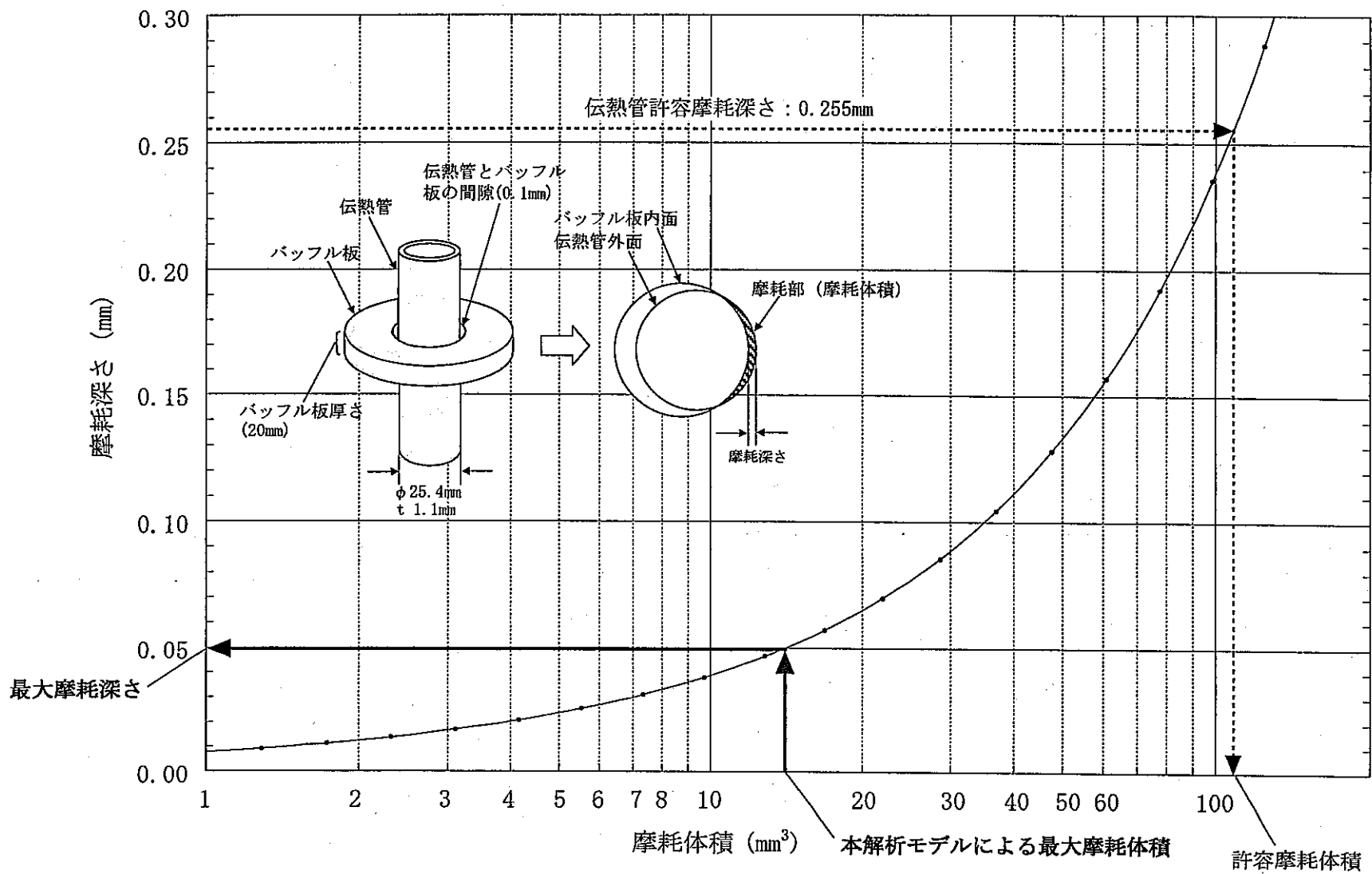


図6.3 伝熱管の摩耗体積と摩耗深さ

7 結言

FINAS による合体機器の振動解析モデルおよび伝熱管摩耗のワークレート解析モデルを作成した。この計算モデルを用いて想定される合体機器各部剛性、付加質量、ばね定数の条件を用い、伝熱管とパッフル板の接触状態については保守的と考えられる仮定に基づいて予備解析した結果、摩耗量は許容値以下である結果が得られた。ただし、本振動解析モデルはその作成の過程でも明らかのように機器構造図から振動伝達経路を予測して作成したものである。したがって、本モデル自体が最初から誤差を持っていることは否定できない。

今後は、摩耗特性に影響のあるパラメータについて十分なサーベイを行い、最大となるワークレートを算出してフレットング摩耗の評価を行う。一方、今後、上記のような振動伝達経路を予測したことによる誤差を解消するために合体機器の振動試験も実施する予定である。この試験結果を計算モデルに反映することによりモデルの精度の向上や検証を行う。

謝辞

合体機器の振動解析モデルおよびワークレート解析モデルを作成するに当たり、構造信頼性研究 Gr の北村誠司氏、FBR サイクル開発推進部の根岸仁氏および（株）CRC 総合研究所の柄谷和輝氏により貴重なご助言を頂いた。よって、ここに感謝の意を表する。

参考文献

- [1] 三原隆嗣, 他
“FBR システム技術検討書 -平成 12 年度報告-”
JNC TY9400 2001-012 2001 年 6 月
- [2] 中村友道、藤田勝久
“モーダル解析による管の支持部での衝突振動挙動の解析”
日本機会学会論文集 (C編) 55 巻 516 号(1989-8)
- [3] K. Kawamura, et al
(Central Research Institute of Electric Power Industry)
“ Tube-to-support Dynamic Interaction and Wear of Heat Exchanger
Tubes Caused by Turbulent Flow-induced Vibration”
PVP-Vol. 206, Flow-Induced Vibration and Wear
ASME 1991

添付資料

IHX/ポンプ合体機器全体の振動解析モデルデータ

添付資料(1/11) IHX/ポンプ合体機器全体の振動解析モデルデータ

1. ポンプ主軸

節点 No.	座標(mm)			断面積 (mm ²)	せん断形状 係数	断面2次モーメント (mm ⁴)	ねじり定数	水力部重量 (kg)	温度 (°C)	水平方向バネ (kg/mm)	備考
	X	Z	長さ								
1	0.0	1825.0								37000.0	内側ケーシング115とバネ結合(加振方向以外拘束)
2	0.0	924.0	901.0	76945.0	0.88	4.7114E+08	9.4228E+08		20.0		
3	0.0	332.0	592.0	90792.0	0.88	6.5597E+08	1.3119E+09		20.0		
4	0.0	-270.0	602.0	111630.0	0.88	9.9160E+08	1.9832E+09		200.0		
5	0.0	-805.0	535.0	384850.0	0.89	1.1786E+10	2.3572E+10		395.0		
6	0.0	-855.0	50.0	865900.0	0.89	5.9666E+10	1.1933E+11		395.0		
7	0.0	-1500.0	645.0	142080.0	0.53	1.7974E+10	3.5948E+10		395.0		
8	0.0	-3000.0	1500.0	142080.0	0.53	1.7974E+10	3.5948E+10		395.0		
9	0.0	-4500.0	1500.0	142080.0	0.53	1.7974E+10	3.5948E+10		395.0		
10	0.0	-6000.0	1500.0	142080.0	0.53	1.7974E+10	3.5948E+10		395.0		
11	0.0	-7500.0	1500.0	142080.0	0.53	1.7974E+10	3.5948E+10		395.0		
12	0.0	-8650.0	1150.0	142080.0	0.53	1.7974E+10	3.5948E+10		395.0		
13	0.0	-9400.0	750.0	142080.0	0.53	1.7974E+10	3.5948E+10		395.0		
14	0.0	-10200.0	800.0	142080.0	0.53	1.7974E+10	3.5948E+10		395.0		
15	0.0	-10250.0	50.0	865900.0	0.89	5.9666E+10	1.1933E+11		395.0		
16	0.0	-10500.0	250.0	384850.0	0.89	1.1786E+10	2.3572E+10		395.0		
17	0.0	-10800.0	300.0	283060.0	0.61	1.0961E+10	2.1922E+10		395.0	25000.0	
18	0.0	-11100.0	300.0	283060.0	0.61	1.0961E+10	2.1922E+10		395.0		
19	0.0	-11700.0	600.0	75477.0	0.89	4.5333E+08	9.0666E+08	4850.0	395.0		
合計			13525.0					4850.0			外側ケーシング214とバネ結合

流体連成(ポンプ主軸-内側ケーシング間)

ポンプ主軸 No.	内側ケーシング No.	長さ (mm)	ポンプ主軸 外半径(mm)	内側ケーシング 内半径(mm)	α	流体密度 (kg/mm ³)	M1	M2	流体連成付加質量(kg)		
									ポンプ主軸	内側ケーシング	非対角項
12	108	1125.0	525.0	625.0	5.793	8.574E-07	0.742	1.052	4838.9	6857.8	-5674.1
13	110	1125.0	525.0	625.0	5.793	8.574E-07	0.742	1.052	4838.9	6857.8	-5674.1
合計		2250.0							9677.7	13715.6	-11348.2

添付資料(2/11) IHX/ポンプ合体機器全体の振動解析モデルデータ

2. ポンプ内側ケーシング

節点 No.	座標(mm)		長さ	断面積 (mm ²)	せん断形状 係数	断面2次モーメント (mm ⁴)	ねじり定数	重量(kg)		温度 (°C)	備考
	X	Z						上部ケーシング	生体遮蔽		
115	652.0	1825.0						1625.0		395.0	外側ケーシング201と剛結
114	652.0	1217.0	608.0	183080.0	0.53	3.8424E+10	7.6848E+10	1625.0		395.0	
113	652.0	608.0	609.0	183080.0	0.53	3.8424E+10	7.6848E+10	1625.0		395.0	
101	652.0	0.0	608.0	183080.0	0.53	3.8424E+10	7.6848E+10			395.0	
102	652.0	-1500.0	1500.0	183080.0	0.53	3.8424E+10	7.6848E+10		7812.5	395.0	
103	652.0	-3000.0	1500.0	183080.0	0.53	3.8424E+10	7.6848E+10			395.0	
104	652.0	-4500.0	1500.0	183080.0	0.53	3.8424E+10	7.6848E+10			395.0	
105	652.0	-6000.0	1500.0	183080.0	0.53	3.8424E+10	7.6848E+10			395.0	
106	652.0	-7500.0	1500.0	183080.0	0.53	3.8424E+10	7.6848E+10			395.0	
107	652.0	-8275.0	775.0	183080.0	0.53	3.8424E+10	7.6848E+10			395.0	
108	652.0	-8650.0	375.0	183080.0	0.53	3.8424E+10	7.6848E+10			395.0	
109	652.0	-9025.0	375.0	183080.0	0.53	3.8424E+10	7.6848E+10			395.0	
110	652.0	-9400.0	375.0	183080.0	0.53	3.8424E+10	7.6848E+10			395.0	
111	652.0	-9775.0	375.0	183080.0	0.53	3.8424E+10	7.6848E+10			395.0	
112	652.0	-10150.0	375.0	183080.0	0.53	3.8424E+10	7.6848E+10			395.0	
合計			11975.0					4875.0	7812.5		外側ケーシング212と剛結

流体連成(内側ケーシング-外側ケーシング間)

内側ケーシング No.	外側ケーシング No.	長さ (mm)	内側ケーシング 外半径(mm)	外側ケーシング 内半径(mm)	α	流体密度 (kg/mm ³)	M1	M2	流体連成付加質量(kg)		
									内側ケーシング	外側ケーシング	非対角項
107	207	750.0	670.0	1205.0	1.895	8.574E-07	1.209	3.911	1718.5	5558.8	-2625.4
109	209	750.0	670.0	1205.0	1.895	8.574E-07	1.209	3.911	1718.5	5558.8	-2625.4
111	211	750.0	670.0	1205.0	1.895	8.574E-07	1.209	3.911	1718.5	5558.8	-2625.4
合計		2250.0							5155.6	16876.3	-7876.2

添付資料(3/11) IHX/ポンプ合体機器全体の振動解析モデルデータ

3. ポンプ外側ケーシング

節点 No.	座標(mm)			断面積 (mm ²)	せん断形状 係数	断面2次モーメント (mm ⁴)	ねじり定数	重量(kg)			温度 (°C)	回転バネ (kg・mm/rad)	備考
	X	Z	長さ					下部ケーシング	内側Na	生体遮蔽			
201	1223.0	0.0									0.0	7.5E+12	IHX/ポンプ隔壁301と剛結(回転方向以外拘束)
202	1223.0	-1500.0	1500.0	347070.0	0.53	2.6156E+11	5.2312E+11			7812.5	7812.5	395.0	
203	1223.0	-3000.0	1500.0	347070.0	0.53	2.6156E+11	5.2312E+11				0.0	395.0	
204	1223.0	-4500.0	1500.0	347070.0	0.53	2.6156E+11	5.2312E+11				0.0	395.0	
205	1223.0	-6000.0	1500.0	347070.0	0.53	2.6156E+11	5.2312E+11				0.0	395.0	
206	1223.0	-7500.0	1500.0	347070.0	0.53	2.6156E+11	5.2312E+11				0.0	395.0	
207	1223.0	-8275.0	775.0	347070.0	0.53	2.6156E+11	5.2312E+11				0.0	395.0	
208	1223.0	-8650.0	375.0	347070.0	0.53	2.6156E+11	5.2312E+11				0.0	395.0	
209	1223.0	-9025.0	375.0	347070.0	0.53	2.6156E+11	5.2312E+11				0.0	395.0	
210	1223.0	-9400.0	375.0	347070.0	0.53	2.6156E+11	5.2312E+11				0.0	395.0	
211	1223.0	-9775.0	375.0	347070.0	0.53	2.6156E+11	5.2312E+11				0.0	395.0	
212	1223.0	-10150.0	375.0	347070.0	0.53	2.6156E+11	5.2312E+11	5785.0			5785.0	395.0	
213	1223.0	-10700.0	550.0	276380.0	0.53	1.3211E+11	2.6422E+11	5785.0	1000.0		6785.0	395.0	
214	1223.0	-10900.0	100.0	276380.0	0.53	1.3211E+11	2.6422E+11	5785.0	1000.0		6785.0	395.0	
215	1223.0	-11500.0	700.0	276380.0	0.53	1.3211E+11	2.6422E+11		1000.0		1000.0	395.0	
216	1223.0	-11900.0	400.0	276380.0	0.53	1.3211E+11	2.6422E+11		1000.0		1000.0	395.0	
217	1223.0	-12300.0	400.0	276380.0	0.53	1.3211E+11	2.6422E+11		1000.0		1000.0	395.0	
合計			12300.0					17955.0	5000.0	7812.5	30167.5		

流体連成(外側ケーシング-隔壁間)

外側ケーシング No.	隔壁 No.	長さ (mm)	外側ケーシング 外半径(mm)	隔壁 内半径(mm)	α	流体密度 (kg/mm ³)	M1	M2	流体連成付加質量(kg)		
									外側ケーシング	隔壁	非対角項
208	310	1125.0	1250.0	1285.0	36.221	8.574E-07	4.209	4.448	171501.8	181240.3	-176236.6
210	313	1125.0	1250.0	1285.0	36.221	8.574E-07	4.209	4.448	171501.8	181240.3	-176236.6
合計		2250.0							343003.5	362460.7	-352473.2

流体連成(外側ケーシング-フローシュラウド間)

外側ケーシング No.	フローシュラウド No.	長さ (mm)	外側ケーシング 外半径(mm)	フローシュラウド 内半径(mm)	α	流体密度 (kg/mm ³)	M1	M2	流体連成付加質量(kg)		
									外側ケーシング	フローシュラウド	非対角項
213	409	550.0	1000.0	1560.0	2.395	8.574E-07	2.694	6.555	3548.3	8835.1	-5029.6
214	410	510.0	1000.0	1337.5	3.535	8.574E-07	2.694	4.819	4856.4	8687.6	-6230.1
215	411	545.0	1000.0	1115.0	9.223	8.574E-07	2.694	3.349	13539.2	16832.3	-15007.3
216	413	545.0	1000.0	1115.0	9.223	8.574E-07	2.694	3.349	13539.2	16832.3	-15007.3
合計		2150.0							35483.1	50867.3	-41274.4

添付資料(4/11) IHX/ポンプ合体機器全体の振動解析モデルデータ

4. IHX/ポンプ隔壁

節点 No.	座標(mm)			断面積 (mm ²)	せん断形状 係数	断面2次モーメント (mm ⁴)	ねじり定数	温度 (°C)	備考
	X	Z	長さ						
301	1295.0	0.0							
302	1295.0	-584.0	584.0	121820.0	0.53	1.0175E+11	2.0350E+11	395.0	上部プレナム内側シュラウド501と剛結
303	1295.0	-1168.0	584.0	121820.0	0.53	1.0175E+11	2.0350E+11	395.0	
304	1295.0	-1734.0	566.0	121820.0	0.53	1.0175E+11	2.0350E+11	395.0	
305	1295.0	-3000.0	1266.0	121820.0	0.53	1.0175E+11	2.0350E+11	395.0	
306	1295.0	-4500.0	1500.0	121820.0	0.53	1.0175E+11	2.0350E+11	395.0	
307	1295.0	-6000.0	1500.0	121820.0	0.53	1.0175E+11	2.0350E+11	395.0	
308	1295.0	-7500.0	1500.0	121820.0	0.53	1.0175E+11	2.0350E+11	395.0	
309	1295.0	-8275.0	775.0	121820.0	0.53	1.0175E+11	2.0350E+11	395.0	
310	1295.0	-8650.0	375.0	121820.0	0.53	1.0175E+11	2.0350E+11	395.0	
311	1295.0	-9025.0	375.0	121820.0	0.53	1.0175E+11	2.0350E+11	395.0	
312	1295.0	-9200.0	175.0	121820.0	0.53	1.0175E+11	2.0350E+11	395.0	
313	1295.0	-9400.0	200.0	202240.0	0.53	1.6764E+11	3.3528E+11	395.0	
314	1295.0	-9775.0	375.0	202240.0	0.53	1.6764E+11	3.3528E+11	395.0	
315	1295.0	-10150.0	375.0	202240.0	0.53	1.6764E+11	3.3528E+11	395.0	
合計			10150.0						

流体連成(隔壁-上部プレナム内側シュラウド間)

隔壁 No.	内側シュラウド No.	長さ (mm)	隔壁 外半径(mm)	内側シュラウド 内半径(mm)	α	流体密度 (kg/mm ³)	M1	M2	流体連成付加質量(kg)		
									隔壁	内側シュラウド	非対角項
304	502	1132.0	1300.0	1587.5	5.072	8.574E-07	4.552	6.788	26133.9	38971.4	-31287.0
合計			1132.0						26133.9	38971.4	-31287.0

流体連成(隔壁-フローシュラウド間)

隔壁 No.	フローシュラウド No.	長さ (mm)	隔壁 外半径(mm)	フローシュラウド 内半径(mm)	α	流体密度 (kg/mm ³)	M1	M2	流体連成付加質量(kg)		
									隔壁	フローシュラウド	非対角項
305	402	1121.4	1300.0	1560.0	5.545	8.574E-07	4.552	6.555	28309.3	40765.4	-33414.2
306	403	1121.4	1300.0	1560.0	5.545	8.574E-07	4.552	6.555	28309.3	40765.4	-33414.2
307	404	1121.4	1300.0	1560.0	5.545	8.574E-07	4.552	6.555	28309.3	40765.4	-33414.2
308	405	1121.4	1300.0	1560.0	5.545	8.574E-07	4.552	6.555	28309.3	40765.4	-33414.2
309	406	1121.4	1300.0	1560.0	5.545	8.574E-07	4.552	6.555	28309.3	40765.4	-33414.2
311	407	1121.4	1300.0	1560.0	5.545	8.574E-07	4.552	6.555	28309.3	40765.4	-33414.2
314	408	1121.4	1300.0	1560.0	5.545	8.574E-07	4.552	6.555	28309.3	40765.4	-33414.2
合計			7850.0						198165.0	285357.5	-233899.6

添付資料(5/11) IHXノポンプ合体機器全体の振動解析モデルデータ

5. フローシュラウド

節点 No.	座標(mm)			断面積 (mm ²)	せん断形状 係数	断面2次モーメント (mm ⁴)	ねじり定数	温度 (°C)	備考
	X	Z	長さ						
401	1570.0	-2300.0							上部プレナム内側シュラウド503と剛結
402	1570.0	-3000.0	700.0	197290.0	0.53	2.4316E+11	4.8632E+11	395.0	
403	1570.0	-4500.0	1500.0	197290.0	0.53	2.4316E+11	4.8632E+11	395.0	
404	1570.0	-6000.0	1500.0	197290.0	0.53	2.4316E+11	4.8632E+11	395.0	
405	1570.0	-7500.0	1500.0	197290.0	0.53	2.4316E+11	4.8632E+11	395.0	
406	1570.0	-8275.0	775.0	197290.0	0.53	2.4316E+11	4.8632E+11	395.0	
407	1570.0	-9025.0	750.0	197290.0	0.53	2.4316E+11	4.8632E+11	395.0	
408	1570.0	-9775.0	750.0	197290.0	0.53	2.4316E+11	4.8632E+11	395.0	
409	1570.0	-10700.0	925.0	197290.0	0.53	2.4316E+11	4.8632E+11	395.0	
410	1570.0	-11210.0	510.0	169330.0	0.53	1.5374E+11	3.0748E+11	395.0	
411	1570.0	-11500.0	290.0	141370.0	0.53	8.9469E+10	1.7894E+11	395.0	
412	1570.0	-11600.0	100.0	141370.0	0.53	8.9469E+10	1.7894E+11	395.0	
413	1570.0	-11800.0	200.0	141370.0	0.53	8.9469E+10	1.7894E+11	395.0	
414	1570.0	-12300.0	500.0	141370.0	0.53	8.9469E+10	1.7894E+11	395.0	
合計			10000.0						

流体連成(フローシュラウド-内側シュラウド間)

フローシュラウド No.	内側シュラウド No.	長さ (mm)	フローシュラウド 外半径(mm)	内側シュラウド 内半径(mm)	α	流体密度 (kg/mm ³)	M1	M2	流体連成付加質量(kg)		
									フローシュラウド	内側シュラウド	非対角項
412	519	400.0	1135.0	1600.0	3.026	8.535E-07	3.454	6.864	4180.9	8308.3	-5562.6
合計			400.0						4180.9	8308.3	-5562.6

添付資料(6/11) IHX/ポンプ合体機器全体の振動解析モデルデータ

6. 上部プレナム内側シュラウド

節点 No.	座標(mm)		長さ	断面積 (mm ²)	せん断形状 係数	断面2次モーメント (mm ⁴)	ねじり定数	温度 (°C)	重量(kg)		水平方向バネ (kg/mm)	垂直方向バネ (kg/mm)	回転方向バネ (kg・mm/rad)	備考
	X	Z							上部鏡板	上部管板				
501	1600.0	-1168.0												
502	1600.0	-1734.0	566.0	251330.0	0.53	3.2172E+11	6.4344E+11	395.0						
503	1600.0	-2300.0	566.0	251330.0	0.53	3.2172E+11	6.4344E+11	395.0						
504	1600.0	-2400.0	160.0	251330.0	0.53	3.2172E+11	6.4344E+11	395.0						
505	1600.0	-2880.0	480.0								36477.6	10518.3		
506	1600.0	-2985.0	85.0	202320.0	0.53	2.6223E+11	5.2446E+11	550.0	1885.0				5.0E+12	カバーガス中ベローズ 本体胴1001とバネ結合(回転方向以外剛結)
507	1600.0	-3489.0	534.0	202320.0	0.53	2.6223E+11	5.2446E+11	550.0						
508	1600.0	-4033.0	534.0	202320.0	0.53	2.6223E+11	5.2446E+11	550.0						
509	1600.0	-4567.0	534.0	202320.0	0.53	2.6223E+11	5.2446E+11	550.0						
510	1600.0	-5450.0	883.0	202320.0	0.53	2.6223E+11	5.2446E+11	550.0						
511	1600.0	-5800.0	350.0	202320.0	0.53	2.6223E+11	5.2446E+11	550.0						伝熱管601と剛結
合計			4632.0						1885.0	2325.0				

流体連成(上部プレナム内側シュラウド-本体胴間)

内側シュラウド No.	本体胴 No.	長さ (mm)	内側シュラウド 外半径(mm)	本体胴 内半径(mm)	α	流体密度 (kg/mm ³)	M1	M2	流体連成付加質量(kg)		
									内側シュラウド	本体胴	非対角項
507	1002	711.7	1620.0	2720.0	2.099	8.203E-07	6.763	19.065	10104.6	28485.8	-14917.6
508	1003	711.7	1620.0	2720.0	2.099	8.203E-07	6.763	19.065	10104.6	28485.8	-14917.6
509	1004	711.7	1620.0	2720.0	2.099	8.203E-07	6.763	19.065	10104.6	28485.8	-14917.6
合計		2135.0							30313.9	85457.3	-44752.8

流体連成(上部プレナム内側シュラウド-外側シュラウド間)

内側シュラウド No.	外側シュラウド No.	長さ (mm)	内側シュラウド 外半径(mm)	外側シュラウド 内半径(mm)	α	流体密度 (kg/mm ³)	M1	M2	流体連成付加質量(kg)		
									内側シュラウド	外側シュラウド	非対角項
510	902	700.0	1620.0	2365.0	2.768	8.221E-07	6.778	14.445	13132.6	27988.6	-17877.0
合計		700.0							13132.6	27988.6	-17877.0

添付資料(7/11) IHXノポンプ合体機器全体の振動解析モデルデータ

7. 内側シュラウド

節点 No.	座標(mm)		長さ	断面積 (mm ²)	せん断形状 係数	断面2次モーメント (mm ⁴)	ねじり定数	温度 (°C)	下部管板重量 (kg)	水平方向バネ (kg/mm)	垂直方向バネ (kg/mm)	備考
	X	Z										
511	1600.0	-5800.0										
512	1600.0	-6800.0	1000.0	407150.0	0.53	5.3434E+11	1.0687E+12	427.5				伝熱管601と剛結
513	1600.0	-7800.0	1000.0	407150.0	0.53	5.3434E+11	1.0687E+12	427.5				
514	1600.0	-8800.0	1000.0	407150.0	0.53	5.3434E+11	1.0687E+12	427.5				
515	1600.0	-9800.0	1000.0	407150.0	0.53	5.3434E+11	1.0687E+12	427.5				
516	1600.0	-10800.0	1000.0	407150.0	0.53	5.3434E+11	1.0687E+12	427.5				
517	1600.0	-11200.0	400.0	407150.0	0.53	5.3434E+11	1.0687E+12	427.5				
518	1600.0	-11300.0	100.0							1224489.8	131071.4	バウンダリベローズ
519	1600.0	-11600.0	300.0	407150.0	0.53	5.3434E+11	1.0687E+12	427.5				
520	1600.0	-11800.0	200.0	407150.0	0.53	5.3434E+11	1.0687E+12	427.5	2325.0			伝熱管631と剛結
合計			6000.0						2325.0			

流体連成(内側シュラウド-外側シュラウド間)

内側シュラウド No.	外側シュラウド No.	長さ (mm)	内側シュラウド 外半径(mm)	外側シュラウド 内半径(mm)	α	流体密度 (kg/mm ³)	M1	M2	流体連成付加質量(kg)		
									内側シュラウド	外側シュラウド	非対角項
512	906	964.0	1640.0	2365.0	2.853	8.496E-07	7.179	14.930	19741.8	41054.6	-26662.5
513	908	984.0	1640.0	2365.0	2.853	8.496E-07	7.179	14.930	19741.8	41054.6	-26662.5
514	910	984.0	1640.0	2365.0	2.853	8.496E-07	7.179	14.930	19741.8	41054.6	-26662.5
515	912	984.0	1640.0	2365.0	2.853	8.496E-07	7.179	14.930	19741.8	41054.6	-26662.5
516	914	984.0	1640.0	2365.0	2.853	8.496E-07	7.179	14.930	19741.8	41054.6	-26662.5
合計		4820.0							98709.2	205273.1	-133312.6

添付資料(8/11) IHX/ポンプ合体機器全体の振動解析モデルデータ

8. 伝熱管(1本)

節点 No.	座標(mm)			断面積 (mm ²)	せん断形状 係数	断面2次モーメント (mm ⁴)	ねじり定数	温度 (°C)	重量(kg)			備考
	X	Z	長さ						上下部管板	管内Na	合計	
601	1858.0	-5800.0							2325.0		2325.0	伝熱管701と剛結
602	1858.0	-6000.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
603	1858.0	-6200.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
604	1858.0	-6400.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
605	1858.0	-6600.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
606	1858.0	-6800.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
607	1858.0	-7000.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
608	1858.0	-7200.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
609	1858.0	-7400.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
610	1858.0	-7600.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
611	1858.0	-7800.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
612	1858.0	-8000.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
613	1858.0	-8200.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
614	1858.0	-8400.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
615	1858.0	-8600.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
616	1858.0	-8800.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
617	1858.0	-9000.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
618	1858.0	-9200.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
619	1858.0	-9400.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
620	1858.0	-9600.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
621	1858.0	-9800.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
622	1858.0	-10000.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
623	1858.0	-10200.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
624	1858.0	-10400.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
625	1858.0	-10600.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
626	1858.0	-10800.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
627	1858.0	-11000.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
628	1858.0	-11200.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
629	1858.0	-11400.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
630	1858.0	-11600.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0		0.0726	0.0726	
631	1858.0	-11800.0	200.0	91.232	0.53	6695.049	13390.099	450.0	2325.0	0.0726	2325.0	
合計			6000.0						4650.0	2.1046	4652.1	伝熱管711と剛結

添付資料(9/11) IHX/ポンプ合体機器全体の振動解析モデルデータ

9. 伝熱管(全体)

節点 No.	座標(mm)			断面積 (mm ²)	せん断形状 係数	断面2次モーメント (mm ⁴)	ねじり定数	温度 (°C)	重量(kg)			備考
	X	Z	長さ						上下部管板	管内Na	合計	
701	2116.0	-5800.0							2325.0		2325.0	外側シュラウド903と剛結
702	2116.0	-6400.0	600.0	881299.7	0.50	1.8250E+12	3.6500E+12	450.0		2259.0	2259.0	
703	2116.0	-7000.0	600.0	881299.7	0.50	1.8250E+12	3.6500E+12	450.0		2259.0	2259.0	
704	2116.0	-7600.0	600.0	881299.7	0.50	1.8250E+12	3.6500E+12	450.0		2259.0	2259.0	
705	2116.0	-8200.0	600.0	881299.7	0.50	1.8250E+12	3.6500E+12	450.0		2259.0	2259.0	
706	2116.0	-8800.0	600.0	881299.7	0.50	1.8250E+12	3.6500E+12	450.0		2259.0	2259.0	
707	2116.0	-9400.0	600.0	881299.7	0.50	1.8250E+12	3.6500E+12	450.0		2259.0	2259.0	
708	2116.0	-10000.0	600.0	881299.7	0.50	1.8250E+12	3.6500E+12	450.0		2259.0	2259.0	
709	2116.0	-10600.0	600.0	881299.7	0.50	1.8250E+12	3.6500E+12	450.0		2259.0	2259.0	
710	2116.0	-11200.0	600.0	881299.7	0.50	1.8250E+12	3.6500E+12	450.0		2259.0	2259.0	
711	2116.0	-11800.0	600.0	881299.7	0.50	1.8250E+12	3.6500E+12	450.0	2325.0		2325.0	外側シュラウド917と剛結
	合計		6000.0						4650.0	20330.6	24980.6	

添付資料(10/11) IHX/ポンプ合体機器全体の振動解析モデルデータ

10. 外側シュラウド+下部円筒

節点 No.	座標(mm)		長さ	断面積 (mm ²)	せん断形状 係数	断面2次モーメント (mm ⁴)	ねじり定数	温度 (°C)	質量(kg)		水平方向バネ (kg/mm)	垂直方向バネ (kg/mm)	回転方向バネ (kg*mm/rad)	備考
	X	Z							上下部管板	下部鏡板(Na含)				
901	2375.0	-5100.0											5.0E+12	本体胴1005とバネ結合(回転方向以外剛結)
902	2375.0	-5450.0	350.0	298450.0	0.530	8.4174E+11	1.6835E+12	535.0						
903	2375.0	-5800.0	350.0	298450.0	0.530	8.4174E+11	1.6835E+12	535.0	2325.0					
904	2375.0	-5810.0	10.0	298450.0	0.530	8.4174E+11	1.6835E+12	427.5						
905	2375.0	-6390.0	580.0	33161.0	0.029	9.3525E+10	1.8705E+11	427.5						
906	2375.0	-6800.0	410.0	298450.0	0.530	8.4174E+11	1.6835E+12	427.5						
907	2375.0	-7300.0	500.0	298450.0	0.530	8.4174E+11	1.6835E+12	427.5						
908	2375.0	-7800.0	500.0	298450.0	0.530	8.4174E+11	1.6835E+12	427.5						
909	2375.0	-8300.0	500.0	298450.0	0.530	8.4174E+11	1.6835E+12	427.5						
910	2375.0	-8800.0	500.0	298450.0	0.530	8.4174E+11	1.6835E+12	427.5						
911	2375.0	-9300.0	500.0	298450.0	0.530	8.4174E+11	1.6835E+12	427.5						
912	2375.0	-9800.0	500.0	298450.0	0.530	8.4174E+11	1.6835E+12	427.5						
913	2375.0	-10300.0	500.0	298450.0	0.530	8.4174E+11	1.6835E+12	427.5		1548978.6	134183.7			
914	2375.0	-10800.0	500.0	298450.0	0.530	8.4174E+11	1.6835E+12	427.5						
915	2375.0	-11210.0	410.0	298450.0	0.530	8.4174E+11	1.6835E+12	427.5						
916	2375.0	-11790.0	580.0	16581.0	0.015	4.6786E+10	9.3532E+10	427.5						
917	2375.0	-11800.0	10.0	298450.0	0.530	8.4174E+11	1.6835E+12	427.5	2325.0					
918	2375.0	-12200.0	400.0	298450.0	0.530	8.4174E+11	1.6835E+12	365.0					19202.0	
合計			7100.0						4650.0	19202.0				

流体連成(外側シュラウド-本体間)

外側シュラウド No.	本体胴 No.	長さ (mm)	外側シュラウド 外半径(mm)	本体胴 内半径(mm)	α	流体密度 (kg/mm ³)	M1	M2	流体連成付加質量(kg)		
									外側シュラウド	本体胴	非対角項
902	1005	701.5	2385.0	2720.0	7.652	8.239E-07	14.723	19.149	79035.2	102797.9	-89363.7
905	1009	982.1	2385.0	2625.0	10.461	8.386E-07	14.985	18.153	153952.2	186495.2	-168668.3
907	1011	982.1	2385.0	2625.0	10.461	8.386E-07	14.985	18.153	153952.2	186495.2	-168668.3
909	1012	982.1	2385.0	2625.0	10.461	8.386E-07	14.985	18.153	153952.2	186495.2	-168668.3
911	1013	982.1	2385.0	2625.0	10.461	8.386E-07	14.985	18.153	153952.2	186495.2	-168668.3
913	1014	982.1	2385.0	2625.0	10.461	8.386E-07	14.985	18.153	153952.2	186495.2	-168668.3
915	1016	1090.0	2385.0	2625.0	10.461	8.607E-07	15.380	18.631	175378.0	212451.3	-192143.3
917	1017	151.3	2385.0	2625.0	10.461	8.607E-07	15.380	18.631	24343.9	29489.8	-26670.9
合計		6853.1							1048519.0	1277214.4	-1151519.4

添付資料(11/11) IHXノポンプ合体機器全体の振動解析モデルデータ

11. 本体胴

節点 No.	座標(mm)			断面積 (mm ²)	せん断形状 係数	断面2次モーメント (mm ⁴)	ねじり定数	温度 (°C)	重量(kg)		備考	
	X	Z	長さ						上部盛板	出入口ノズル		
1001	2735.0	-2965.0							1885.0		上部プレナム内側シュラウド508と剛結 1次No入口ノズル	
1002	2735.0	-3499.0	534.0	515540.0	0.53	1.9282E+12	3.8564E+12	550.0		817.32		
1003	2735.0	-4033.0	534.0	515540.0	0.53	1.9282E+12	3.8564E+12	550.0				
1004	2735.0	-4567.0	534.0	515540.0	0.53	1.9282E+12	3.8564E+12	550.0				
1005	2735.0	-5100.0	533.0	515540.0	0.53	1.9282E+12	3.8564E+12	550.0				
1006	2735.0	-5950.0	850.0	515540.0	0.53	1.9282E+12	3.8564E+12	520.0				
1007	2735.0	-6000.0	50.0	688640.0	0.53	2.5851E+12	5.1702E+12	520.0				スカート1101と剛結
1008	2735.0	-6250.0	250.0	688640.0	0.53	2.5851E+12	5.1702E+12	520.0				
1009	2735.0	-6525.0	275.0	429220.0	0.53	1.6024E+12	3.2048E+12	520.0				
1010	2735.0	-6690.0	165.0	421760.0	0.53	1.5203E+12	3.0406E+12	520.0				
1011	2735.0	-7300.0	610.0	414300.0	0.53	1.4410E+12	2.8820E+12	520.0			2次No出口ノズル	
1012	2735.0	-8300.0	1000.0	414300.0	0.53	1.4410E+12	2.8820E+12	520.0		542.06		
1013	2735.0	-9300.0	1000.0	414300.0	0.53	1.4410E+12	2.8820E+12	520.0				
1014	2735.0	-10300.0	1000.0	414300.0	0.53	1.4410E+12	2.8820E+12	520.0				
1015	2735.0	-10710.0	410.0	414300.0	0.53	1.4410E+12	2.8820E+12	520.0				
1016	2735.0	-11210.0	500.0	414300.0	0.53	1.4410E+12	2.8820E+12	335.0				
1017	2735.0	-11800.0	590.0	414300.0	0.53	1.4410E+12	2.8820E+12	335.0				
1018	2735.0	-12058.0	258.0	414300.0	0.53	1.4410E+12	2.8820E+12	335.0		10403.0		2次No入口ノズル+下部鏡(No含)
合計			9093.0						1885.0	11562.4		

12. スカート

節点 No.	座標(mm)			断面積 (mm ²)	せん断形状 係数	断面2次モーメント (mm ⁴)	ねじり定数	温度 (°C)	回転バネ (kg・mm/rad)	備考
	X	Z	長さ							
1101	4186.0	-6000.0								回転方向以外拘束
1102	4186.0	-7500.0	1500.0	523510.0	0.53	1.1358E+12	2.2716E+12	360.0		
1103	4186.0	-8650.0	1150.0	523510.0	0.53	1.1358E+12	2.2716E+12	125.0		
1104	4186.0	-9800.0	1150.0	523510.0	0.53	1.1358E+12	2.2716E+12	125.0		
1105	4186.0	-10000.0	200.0	8011100.0	0.53	7.2440E+13	1.4488E+14	125.0	7.3469E+12	
合計			4000.0							