

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-027-10-29
提出年月日	2022年3月3日

## 主蒸気管の弾性設計用地震動 $S_d$ での耐震評価について

2022年3月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

本資料では、主蒸気管（外側主蒸気隔離弁より主蒸気止め弁まで）（以下「主蒸気管」という。）における耐震重要度分類の考え方及び耐震評価結果について示す。

- I. 主蒸気管における耐震重要度分類及び評価用に適用する地震動の考え方について
- II. 評価用地震動における評価結果

なお、本資料が関連する図書は以下のとおり。

- ・ VI-2 「耐震性に関する説明書」

添付資料 1 主蒸気管に設置する三軸粘性ダンパの段階的な減衰性能の設定

添付資料 2 主蒸気管の振動モード

添付資料 3 地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動に対する考慮について

## I. 主蒸気管における耐震重要度分類及び評価用に適用する地震動の考え方について

### 1. はじめに

主蒸気管については、耐震Bクラスに分類され、また弾性設計用地震動S<sub>d</sub>に対して破損しないことの検討を行うこととしている。

本資料においては、主蒸気管の耐震重要度分類の考え方及び評価に適用する地震動の考え方について示す。

### 2. 耐震クラス設定の考え方

耐震重要度分類において、主蒸気管は、以下のクラス分類の規定に基づき、Bクラスに分類している。

「安全機能を有する施設のうち、機能喪失した場合の影響がSクラス施設と比べ小さい施設であって、原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されていて、一次冷却材を内蔵しているか又は内蔵し得る施設」

さらに、主蒸気管については、仮に破断した場合に、一次冷却系から直接外部へ放射性気体（核分裂生成物）を放出する事象が引き起こされる可能性があることに配慮して、弾性設計用地震動S<sub>d</sub>に対して破損しないことの検討を行うこととした。

設備の耐震上の重要度分類にあたって、原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG 4601・補-1984（以下「JEAG 4601・補-1984」という。）において検討した内容が整理されている。（図1参照）

この中で、「放射性物質に関連する設備の耐震重要度分類と被ばく線量」に関して、設備単体が破損したときに全身0.5レム以上の被ばくを与えるものは基準地震動S<sub>1</sub>による機能維持の確認を行うべき、としている。これにより、基準地震動S<sub>2</sub>による設備の同時破損を想定しても、被ばく線量を「原子炉立地審査指針及びその適用に関する判断のめやすについて」のめやす線量に対して十分小さくすることができることになる。

また、主蒸気管については、仮に原子炉格納容器外で破損した場合の被ばく線量は、小児甲状腺1.5レム以下となることが当時の評価方法で得られており、基準地震動S<sub>1</sub>に対し機能維持をする必要は必ずしもない。一方で、複数基立地の発電所で主蒸気管の同時破損を想定すると、仮定の仕方によりめやす線量を超える場合もあり得るとして、主蒸気止め弁までの部分は、基準地震動S<sub>1</sub>で破損しないことの確認を行っておくことが望ましいとしている。さらに、被ばく評価の基準が見直されたら、基準地震動S<sub>1</sub>に対する検討も再度見直す必要があるとしている。

被ばく評価の基準に関しては、「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」（平成2年8月30日原子力安全委員会決定）で判断基準が示されている。主蒸気管については、破損時に上記審査指針に定められている事故時の実効線量に関する判断基準（5mSv）

を超えないという条件が満たされる必要がある。島根原子力発電所2号機の原子炉設置変更許可申請書における主蒸気管破断時の評価結果によると、被ばく量は約  $6.8 \times 10^{-2} \text{mSv}$  であり、上記の判断基準（5mSv）と比較して小さい。このことから、主蒸気管は耐震Bクラスとすることは妥当である。一方で、主蒸気管が破断した場合、一次冷却系から直接外部へ放射性気体（核分裂生成物）を放出する事象が引き起こされる可能性があることに配慮することとし、念のため、主蒸気管を弾性設計用地震動  $S_d$  で破損しないことの検討を行うこととしたものである。

以上のように、被ばく評価結果に基づき耐震Bクラスの妥当性を確認するとともに、放射性物質の放出の可能性に配慮して弾性設計用地震動  $S_d$  に対して破損しないことの検討を行うこととしたものであり、基準地震動  $S_1$  を弾性設計用地震動  $S_d$  に読み換えたものではない。

【参考：耐震設計審査指針改訂（平成18年9月）による耐震重要度と適用する地震動との関連について】

次に耐震重要度分類と適用する地震動に関して、J E A G 4 6 0 1・補-1984 発刊当時は、耐震Aクラスのうち特に重要な施設を耐震  $A_s$  クラスとし、耐震Aクラス施設に対して基準地震動  $S_1$  を、耐震  $A_s$  クラス施設に対して基準地震動  $S_1$ 、 $S_2$  を適用することとなっていた。その後、平成18年に改訂された耐震設計審査指針において、耐震重要度分類については、 $A_s$  クラス及びAクラスを統合してSクラスとし、適用する地震動は基準地震動  $S_s$  のみとなった。さらに、施設の安全機能の保持を高い精度で確認するため弾性設計用地震動  $S_d$  を規定し、Sクラス施設に適用することとなった。

上記のような改訂経緯から、基準地震動  $S_1$  と弾性設計用地震動  $S_d$  とは直接関連するものではない。

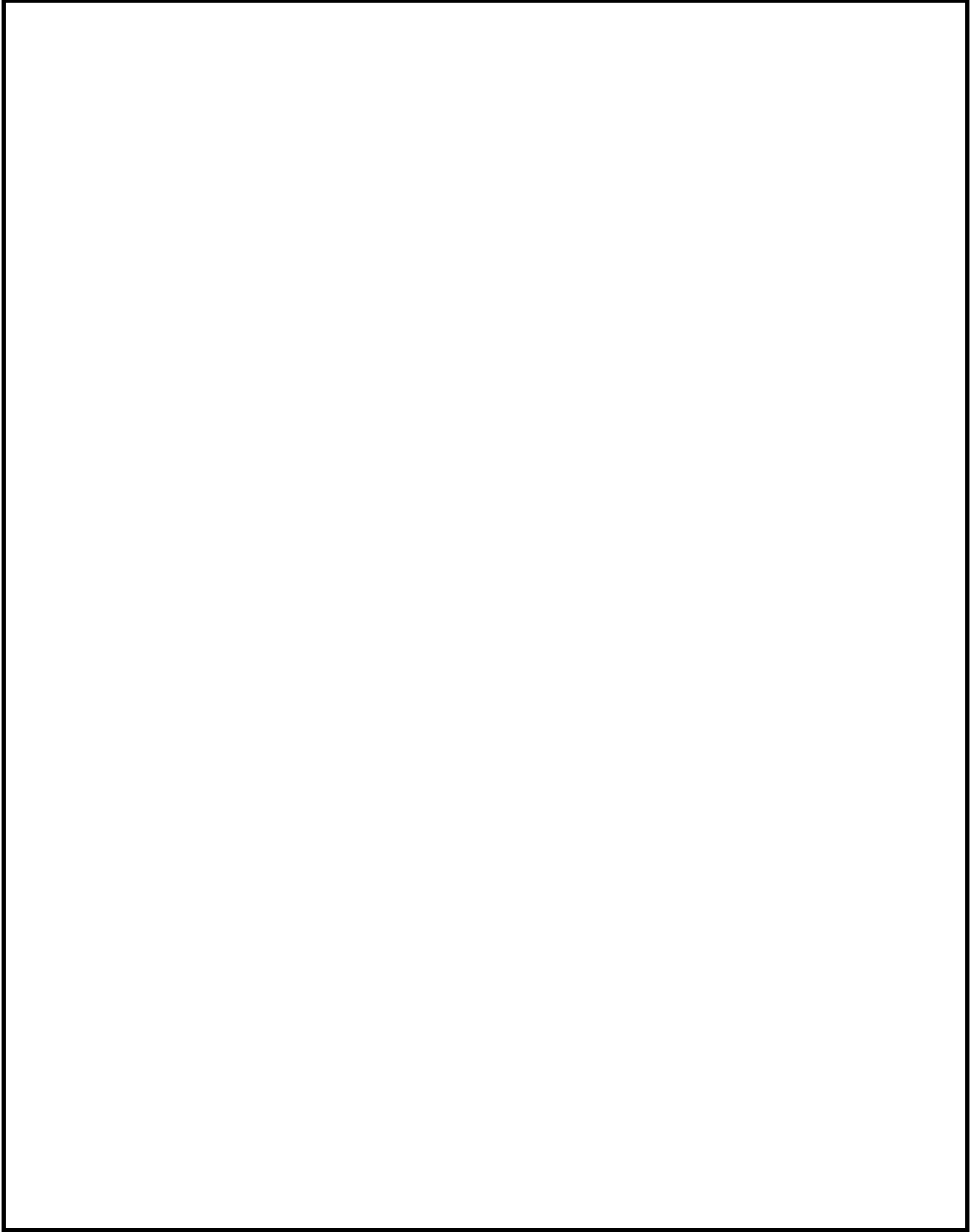


図1 J E A G 4 6 0 1 ・ 補-1984 重要度分類編 (抜粋)

## II. 評価用地震動における評価結果

### 1. はじめに

「I. 主蒸気管における耐震重要度分類及び評価用に適用する地震動の考え方について」において、主蒸気管は、耐震Bクラス、かつ、弾性設計用地震動S<sub>d</sub>に対して破損しないことの検討を行うこととしている。

ここでは、主蒸気管について、弾性設計用地震動S<sub>d</sub>を作用させた場合の応力評価を示す。

### 2. 評価方法

#### 2.1 概要

評価対象は原子炉格納容器外側隔離弁から主蒸気止め弁までの範囲とする。評価対象である配管系の鳥瞰図を図1に示す。主蒸気管には、三軸粘性ダンパ設置しており、高減衰による地震応答低減を図っている。地震応答解析法については、このような高減衰箇所の応答が考慮可能であるモーダル時刻歴解析を適用する。

また、主蒸気管は原子炉建物、タービン建物及び蒸気タービンの基礎に支持点（地震入力点）を有しており、それぞれの支持点に対応した建物・構築物の時刻歴応答波を入力する。なお、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せを考慮して、解析入力は3方向同時入力とする。

#### 2.2 評価条件

入力地震動については、弾性設計用地震動S<sub>d-1</sub>、S<sub>d-D</sub>、S<sub>d-F1</sub>、S<sub>d-F2</sub>、S<sub>d-N1</sub>、S<sub>d-N2</sub>とした。なお、本資料では評価上最も厳しい結果となるS<sub>d-1</sub>（表5参照）についての評価結果を示す。適用した入力地震動のうちS<sub>d-1</sub>についての時刻歴応答波を図2に示す。

配管系の構造減衰についてはVI-2-1-6「地震応答解析の基本方針」に記載の減衰定数を用いる。表1に評価条件を示す。

表1 評価条件

系統名称 (鳥瞰図番号)	耐震設計上の 重要度分類	建物・構築物	標高	減衰定数 (%)
主蒸気系 (MS-T-1)	B	原子炉建物		
		タービン建物		
		蒸気タービンの基礎		

### 3. 評価結果

#### 3.1 配管応力評価結果

主蒸気管 (MS-T-1) の最大応力評価点の応力評価結果を表 2 に示す。また、最大応力評価点を図 1 に示す。以下の結果から、計算値が許容値以下であり、主蒸気管が弾性設計用地震動  $S_d$  に対して破損しないことを確認した。

表 2 配管応力評価結果

許容応力 状態	最大応力区分 (許容応力)	鳥瞰図 番号	最大応力 評価点	応力評価		疲労評価
				計算応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	疲労累積 係数
IVAS	一次応力 ( $0.9 \cdot S_u$ )	MS-T-1	264	108	377	—
	一次+二次応力 ( $2 \cdot S_y$ )	MS-T-1	264	120	396	—

### 3.2 支持構造物評価結果

下表に示すとおり計算応力及び計算荷重はそれぞれの許容値以下である。

表 3 支持構造物評価結果 (荷重評価)

支持構造物 番号	種類	型式	材質	温度 (°C)	評価結果		
					計算荷重 (kN)	一次評価*1	二次評価*2
DMP-MS-017	粘性ダンパ	630/426	VI-2-1-12「配管及び 支持構造物の耐震計 算について」参照	—	水平	191	350
SNO-MS-716	オイルスナツバ	ODP-1000			鉛直	64	140
RE-MS-746	ロッドレストレイント	MSV用 100t			—	1050	1500
					1369	1800	—

注記\*1：あらかじめ設定した設計上の基準値を許容荷重として実施する評価

\*2：計算荷重があらかじめ設定した設計上の基準値を超過した箇所に対して，J E A G 4 6 0 1 に定める許容限界を満足する範囲内で新たに設定した設計上の基準値を許容荷重として実施する評価。なお，一次評価を満足する場合は「—」を記載する。

表 4 支持構造物評価結果 (応力評価)

支持構造物 番号	種類	型式	材質	温度 (°C)	支持点荷重						評価結果		
					反力 (kN)			モーメント (kN・m)			応力 分類	許容 応力 (MPa)	
					F x	F y	F z	M x	M y	M z			
RE-MS-221	レストレイント	ラグ	SGV410	302	0	117	78	—	—	—	—	16	114
AN-MS-206	アンカ	ラグ	SGV480	302	340	130	133	78	112	106	組合せ	18	137



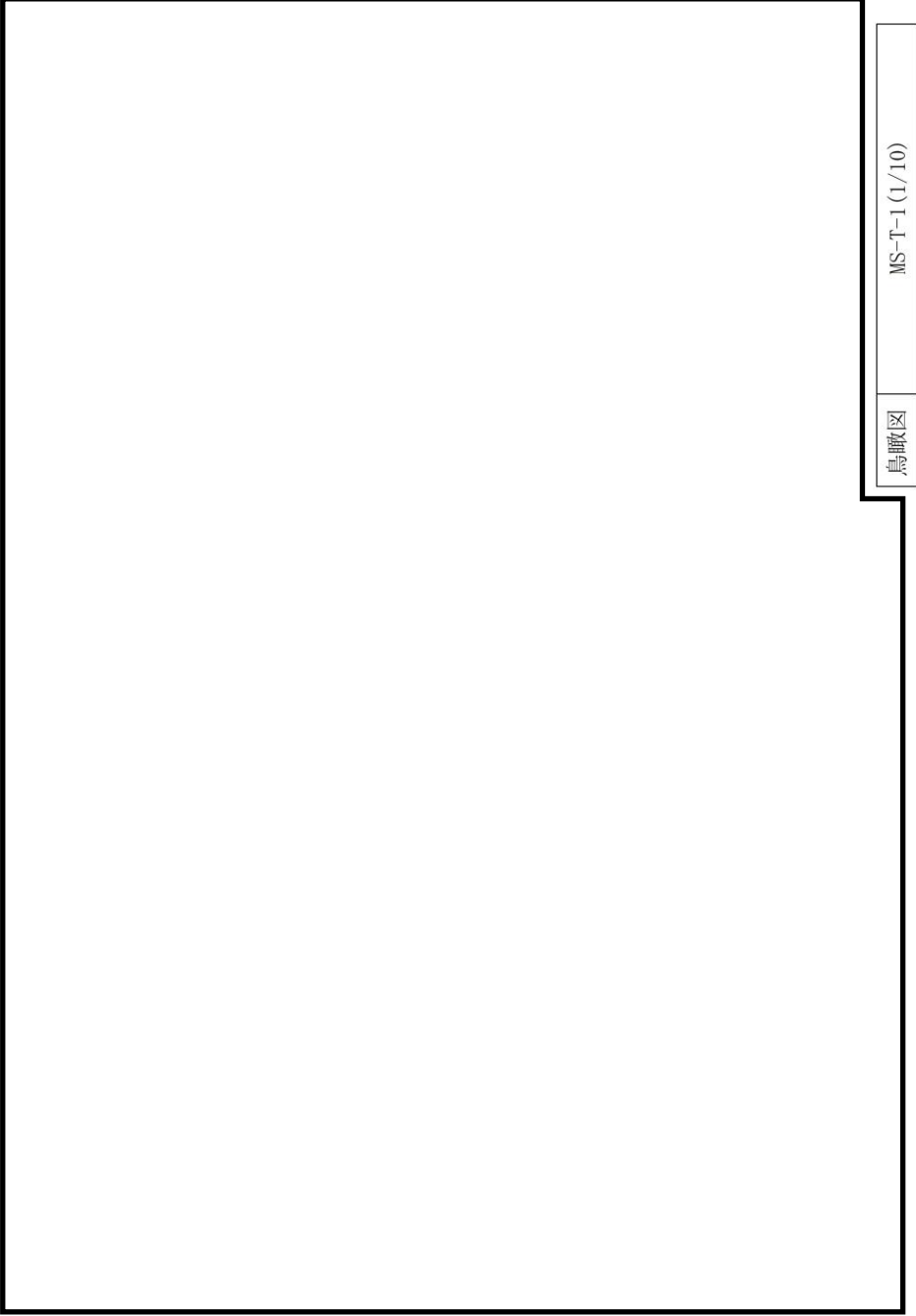


図1 主蒸気配管モデル (1/10)

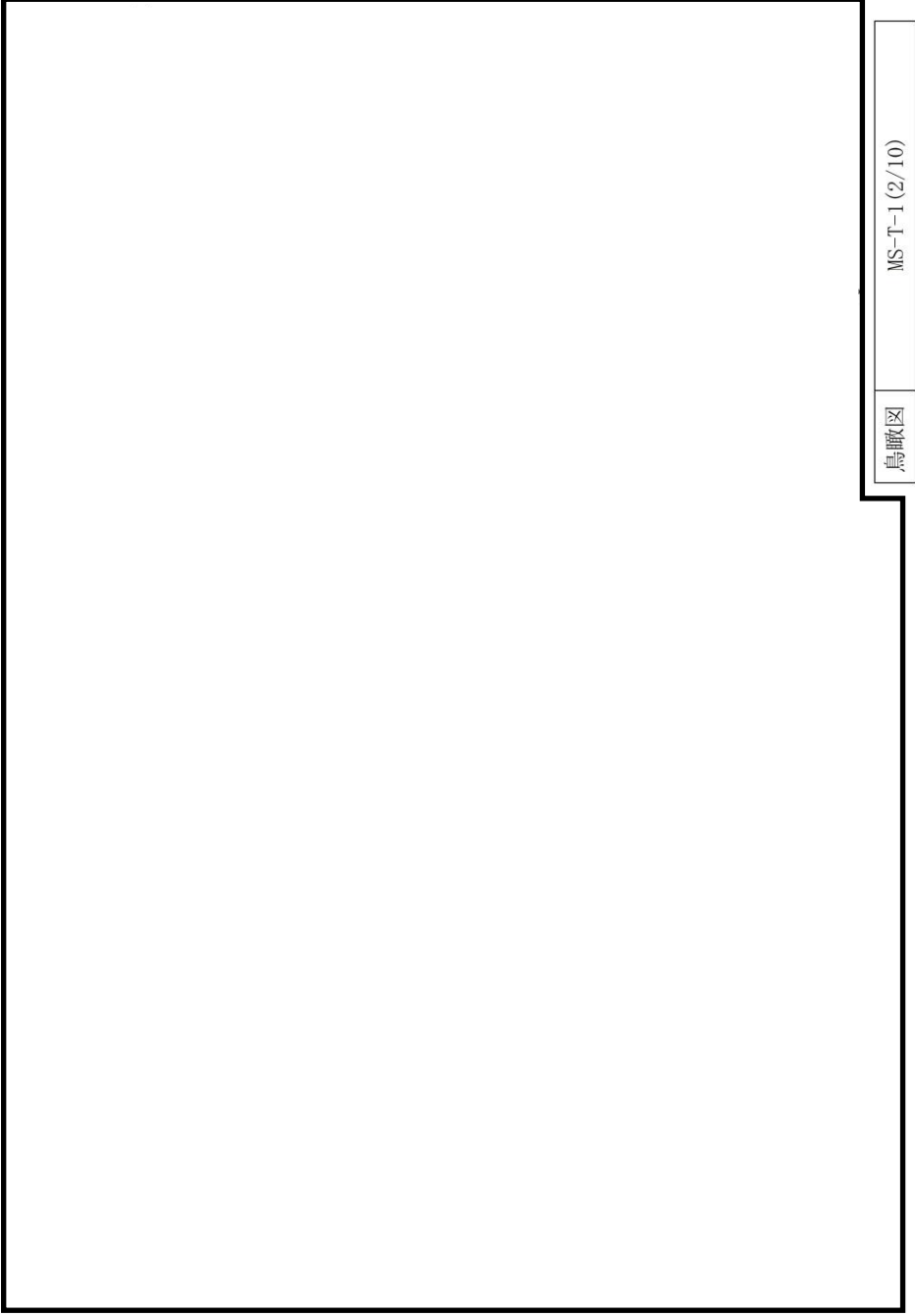


図 1 主蒸気配管モデル (2/10)

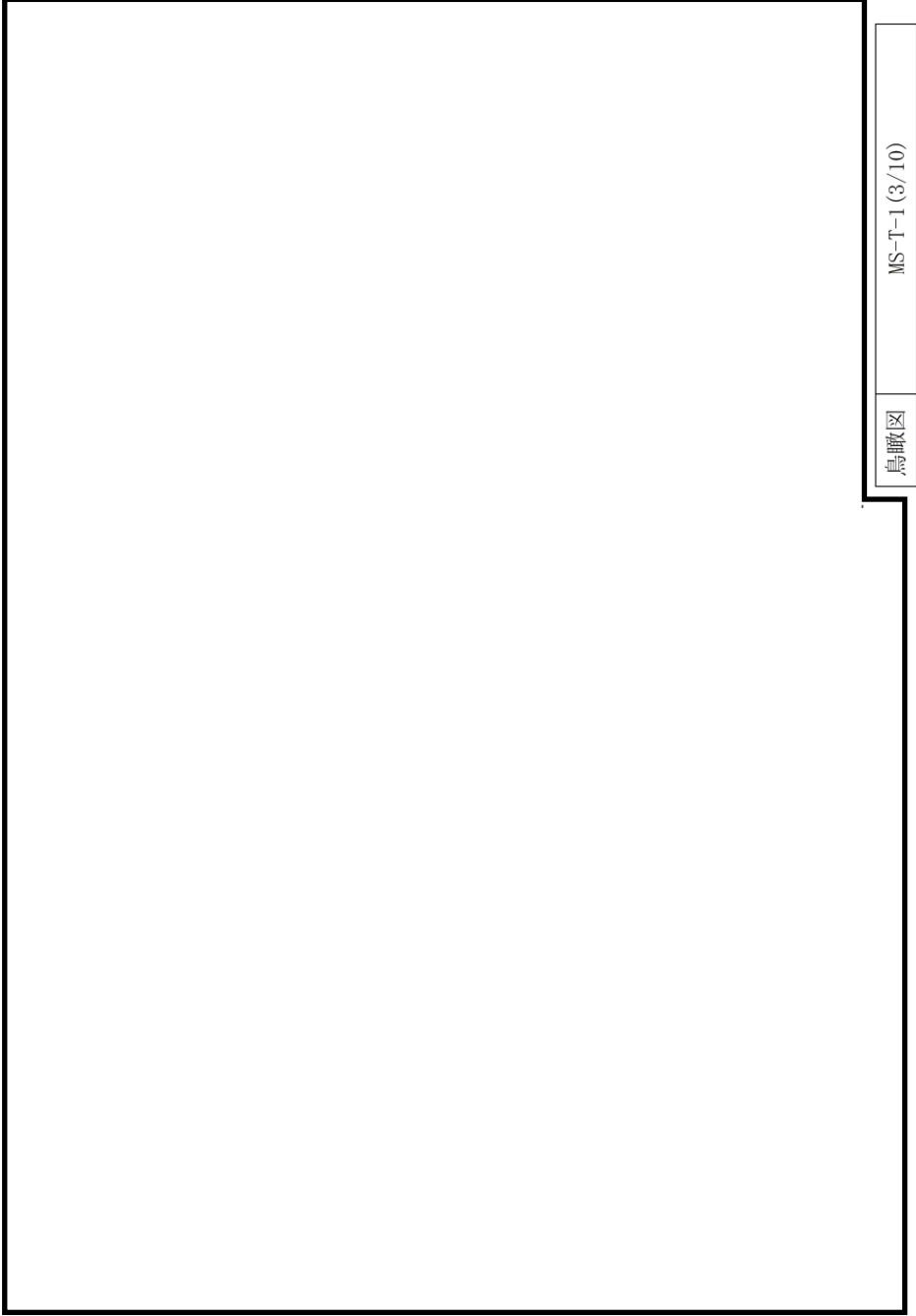


図 1 主蒸気配管モデル (3/10)

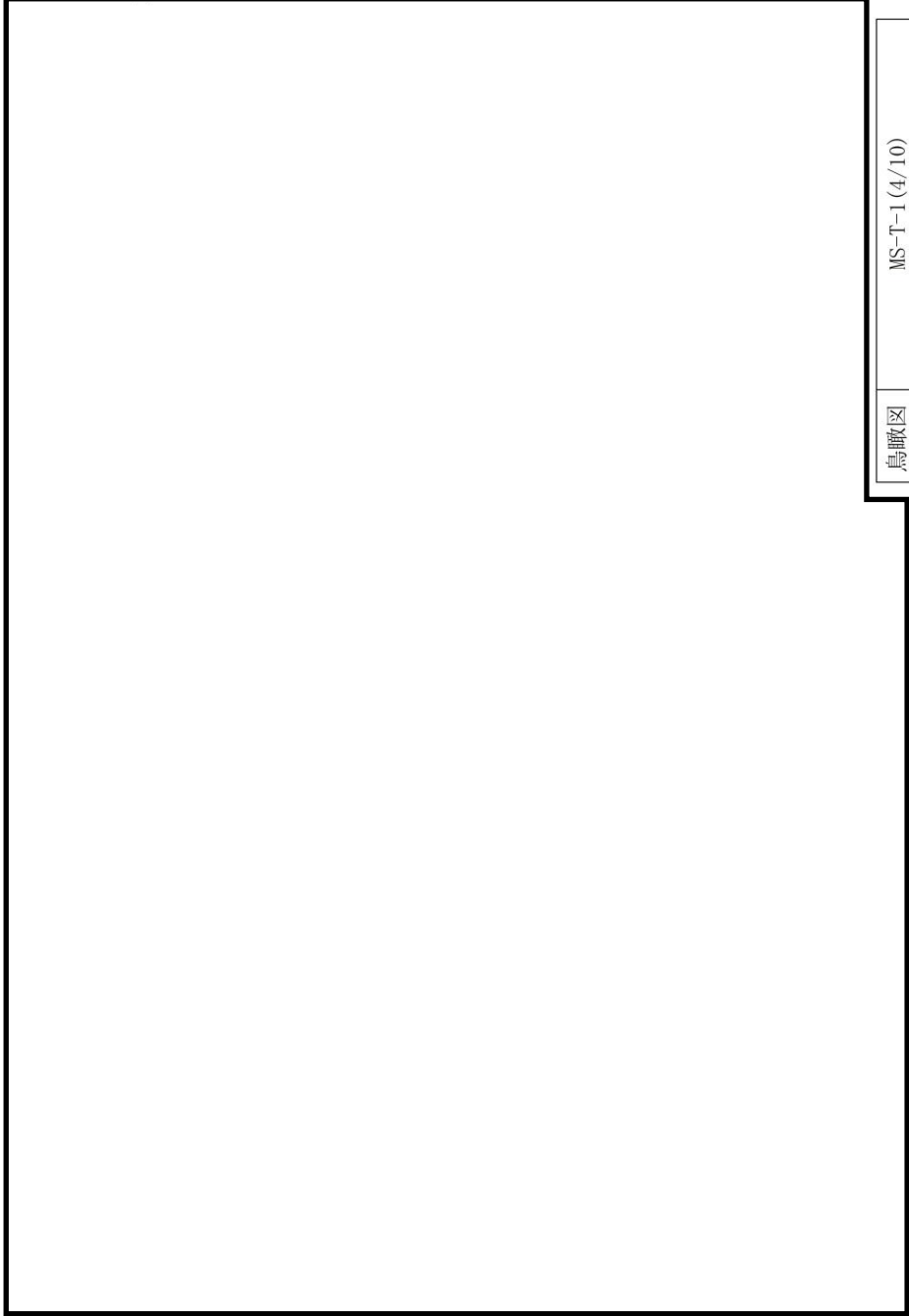


図1 主蒸気配管モデル (4/10)

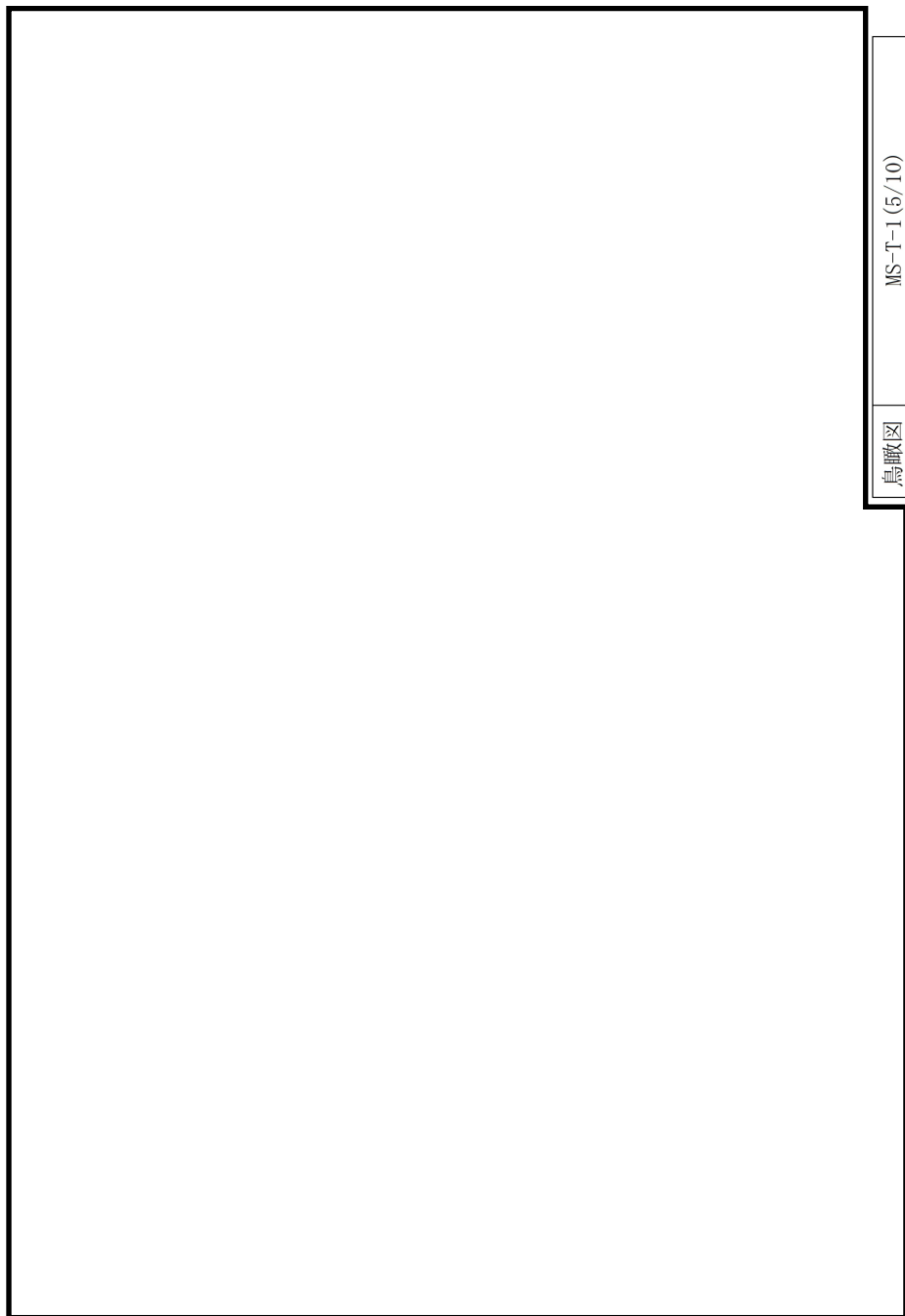


図 1 主蒸気配管モデル (5/10)

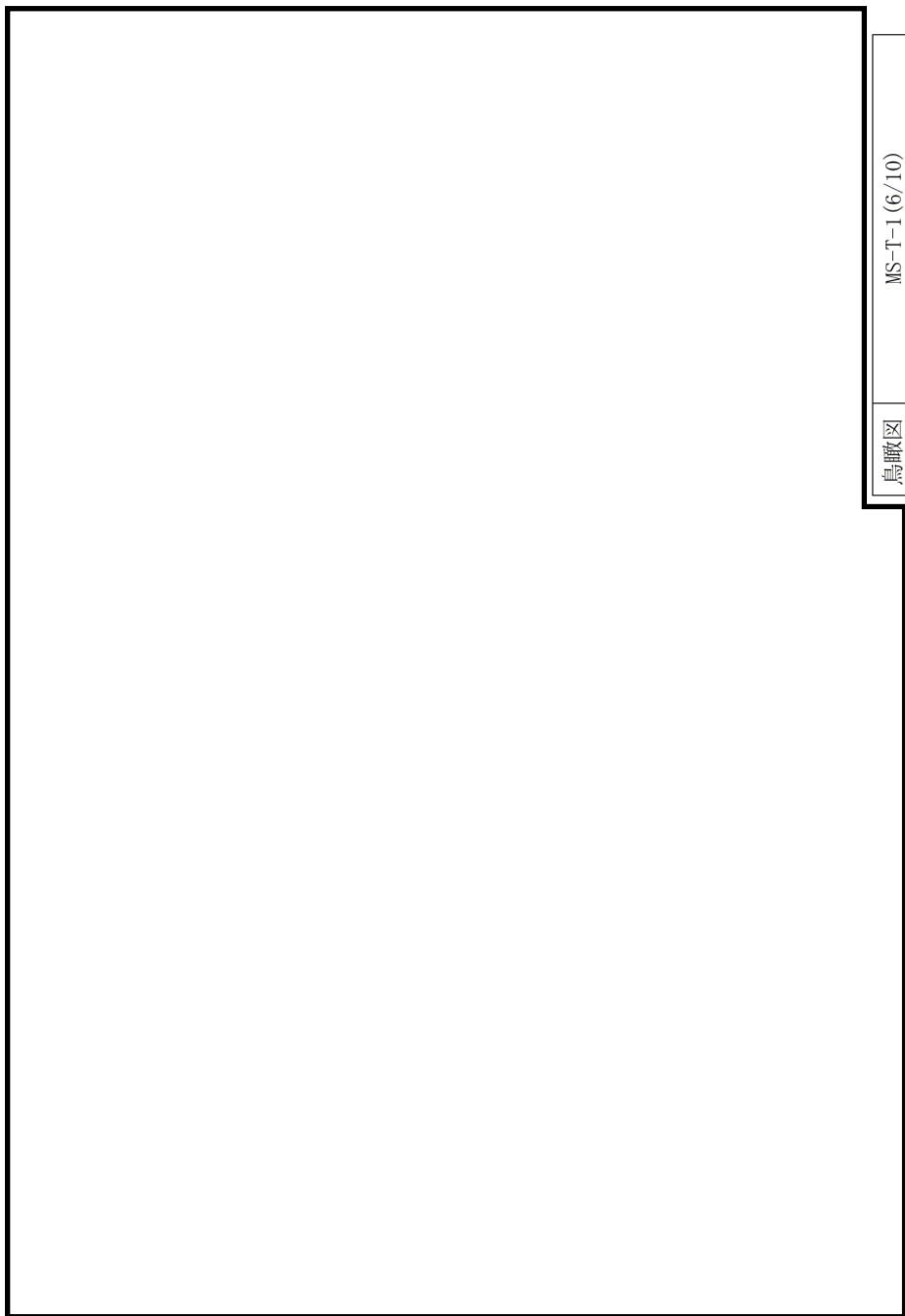


図 1 主蒸気配管モデル (6/10)

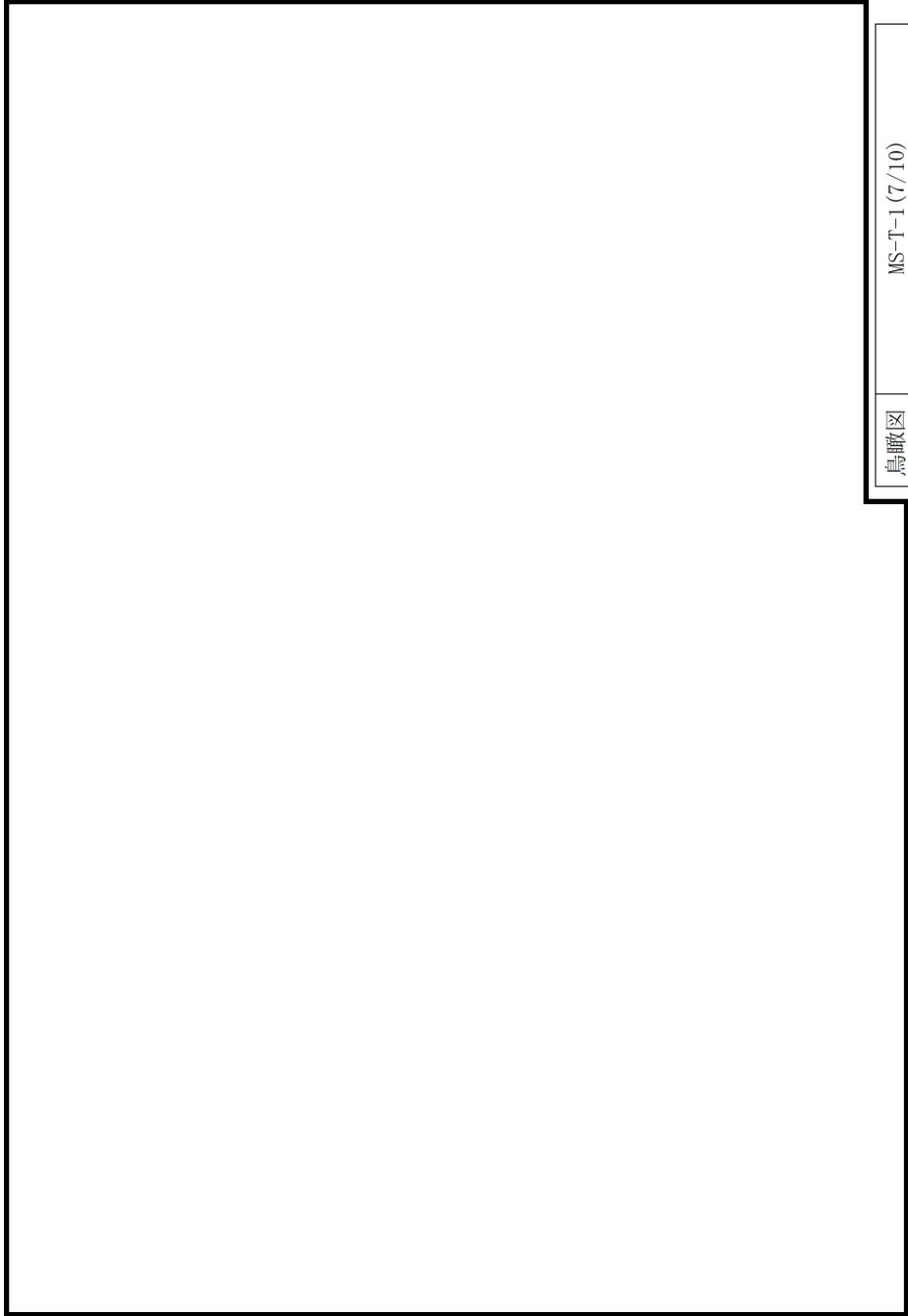


図1 主蒸気配管モデル (7/10)

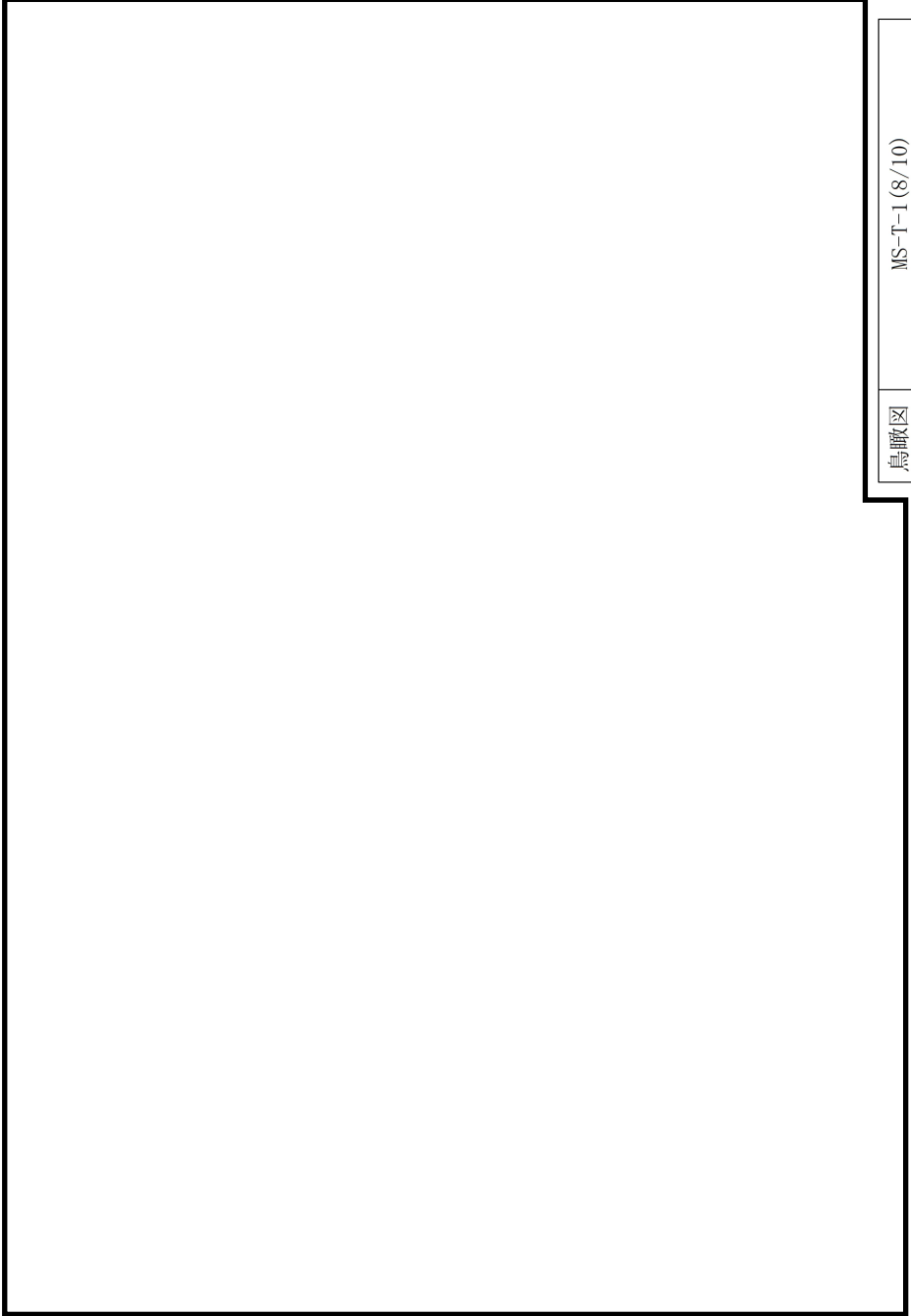


図1 主蒸気配管モデル (8/10)



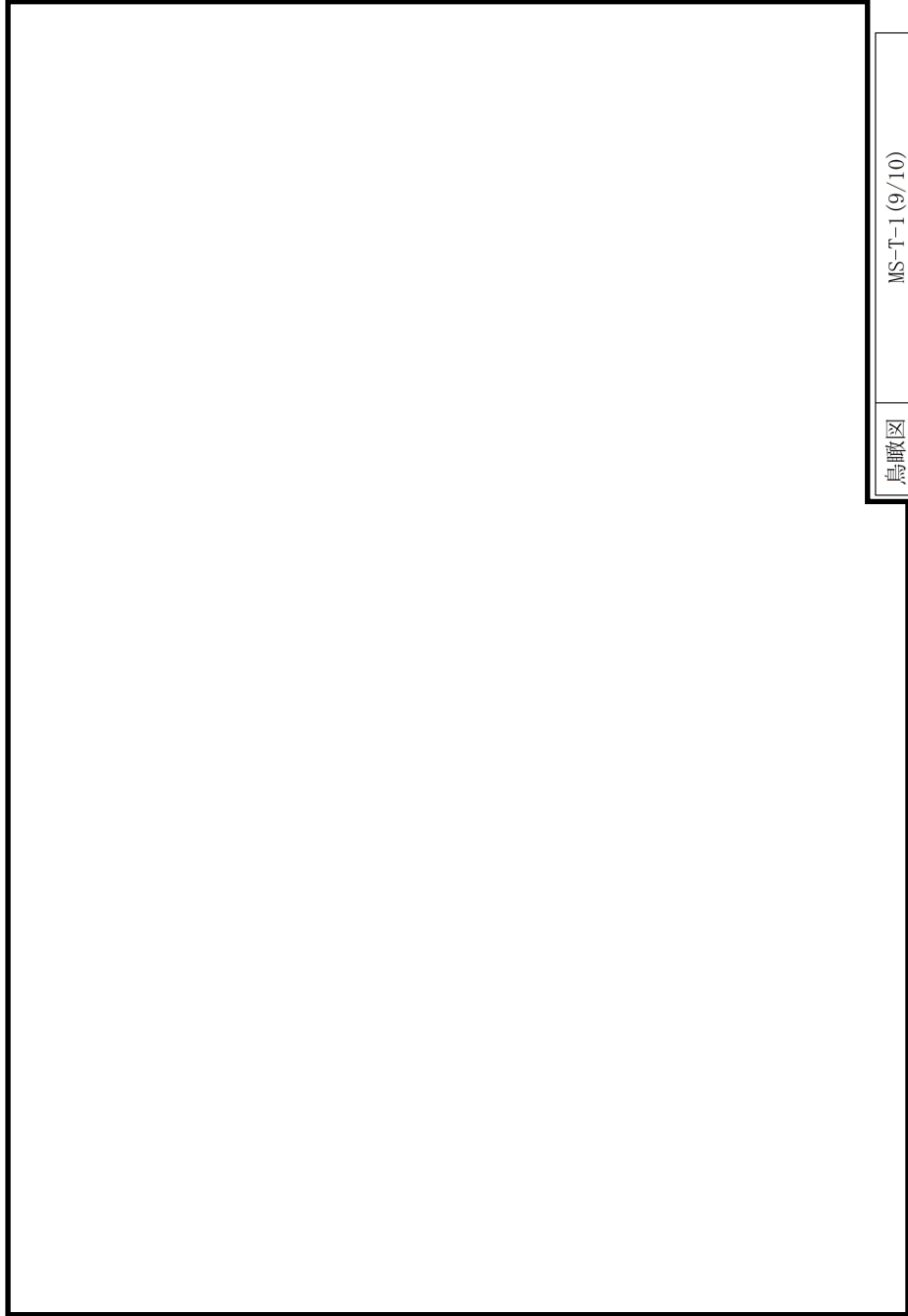


図1 主蒸気配管モデル (9/10)

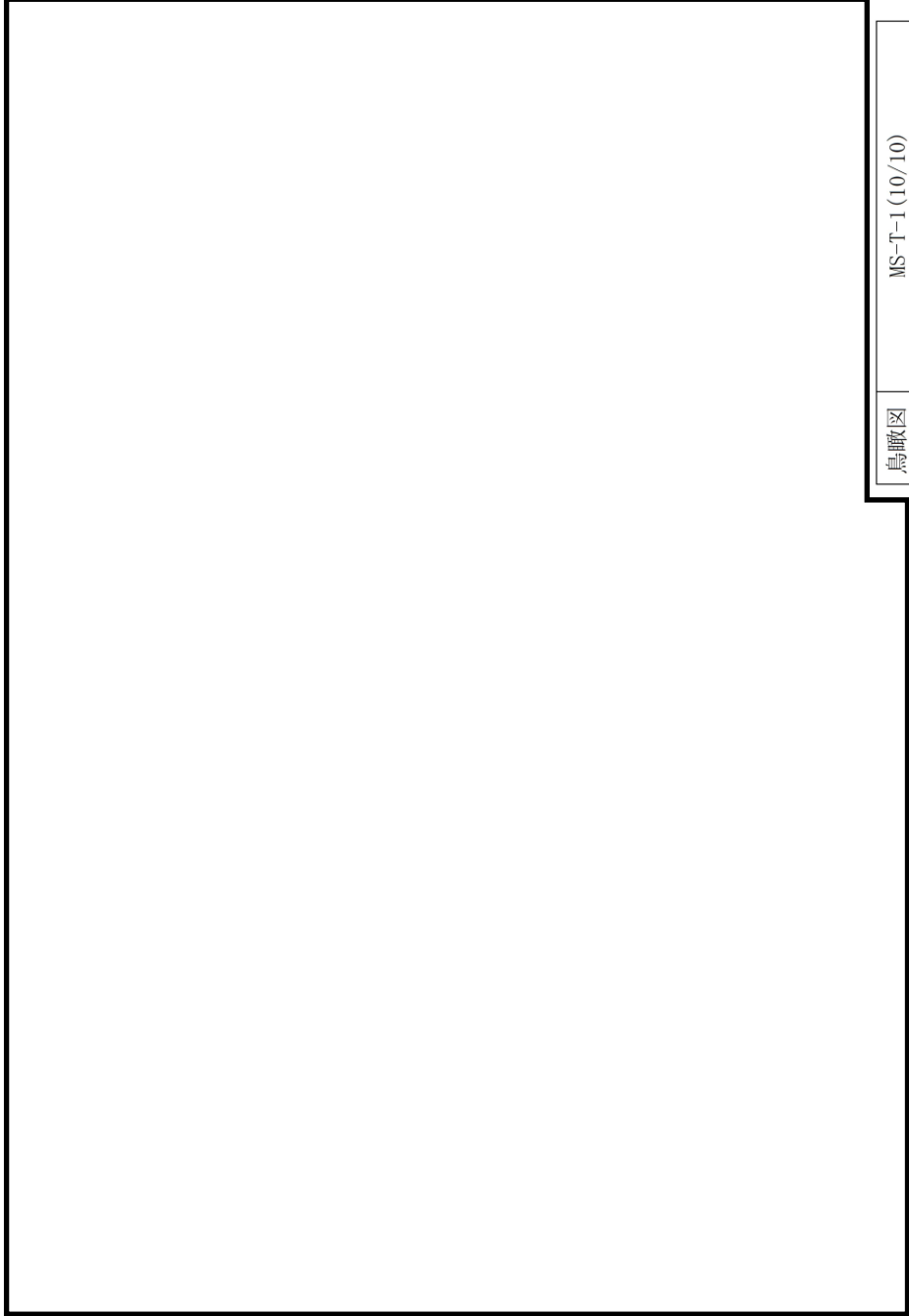


図 1 主蒸気配管モデル (10/10)

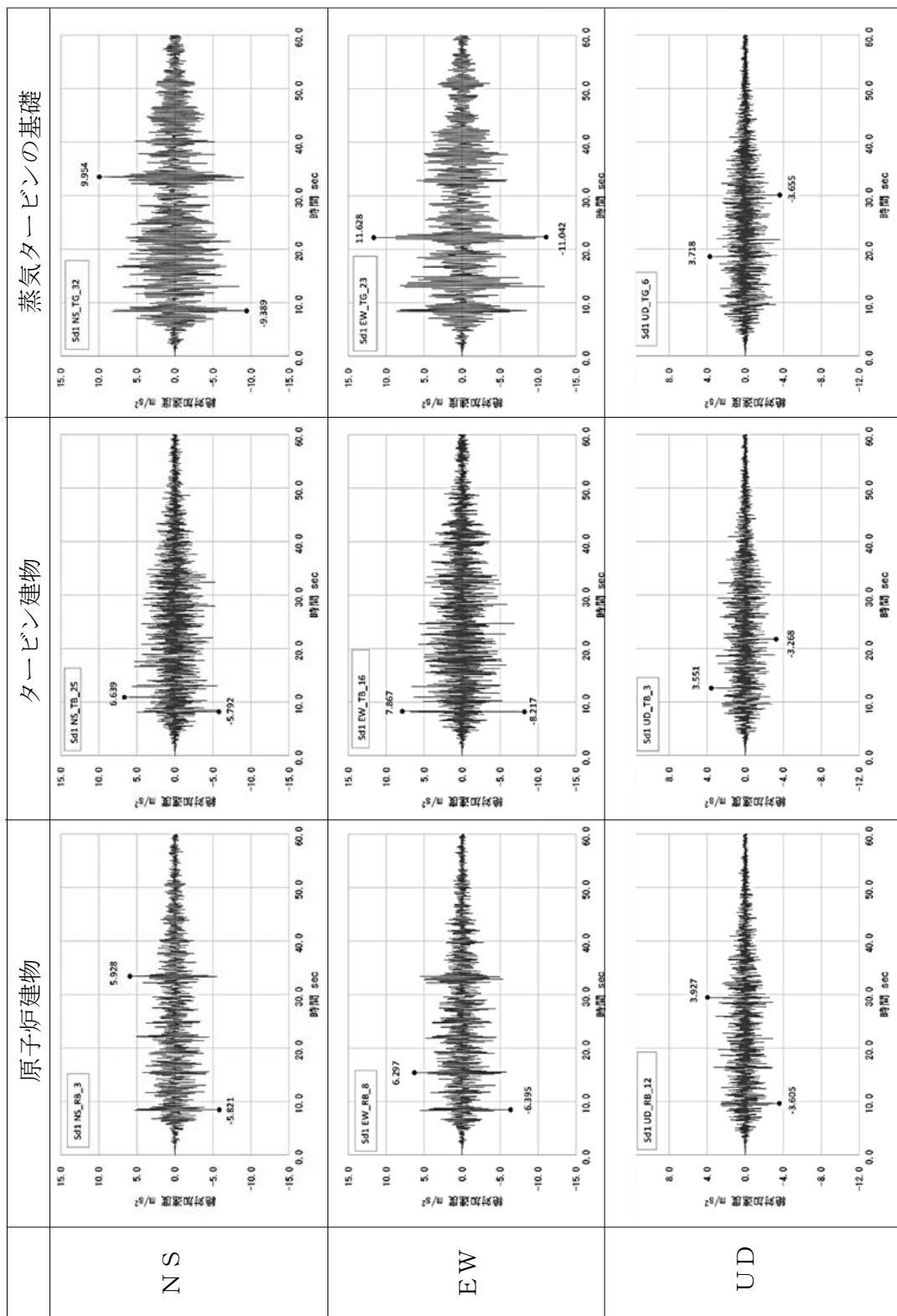


図2 入力地震動の時刻歴応答波 (S d - 1)

表 5 弾性設計用地震動による最大応力評価点の評価結果

No	地震動 種類	許容応力状態ⅣA S										
		一次応力評価					一次+二次応力評価					
		評価点	計算応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度	最小 裕度	評価点	計算応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度	疲労累積係数	最小 裕度
1	S d - 1	264	108	377	3.49	○	264	120	396	3.30	—	○
2	S d - D	462	99	394	3.97		264	91	396	4.35	—	
3	S d - F 1	462	102	394	3.86		264	88	396	4.50	—	
4	S d - F 2	264	88	377	4.28		264	75	396	5.28	—	
5	S d - N 1	462	81	394	4.86		264	54	396	7.33	—	
6	S d - N 2	462	105	394	3.75		462	83	374	4.50	—	

## 主蒸気管に設置する三軸粘性ダンパの段階的な減衰性能の設定

## 1. 概要

本資料では、主蒸気管に設置する三軸粘性ダンパの段階的な減衰性能の設定について示す。なお、表 1 に主蒸気管に設置している三軸粘性ダンパの型式を示す。

表 1 主蒸気管に設置している三軸粘性ダンパの型式

設置箇所	型式
主蒸気管	630/426

## 2. 段階的な減衰性能の設定

主蒸気管に設置する三軸粘性ダンパの段階的な減衰性能の設定を図 1 に示す。

三軸粘性ダンパのモデル化にあたっては、性能試験結果に基づいて設定した高側及び低側の減衰性能に対して、製造公差及び据付公差による $\pm 30\%$ のばらつきを考慮し設定している。また、保守的に変動及びばらつきを考慮することで上限と下限の減衰性能の差が大きくなるため、等間隔に補間した減衰性能も設定しており、上限と下限を含めた 5 段階の減衰性能を設定している。

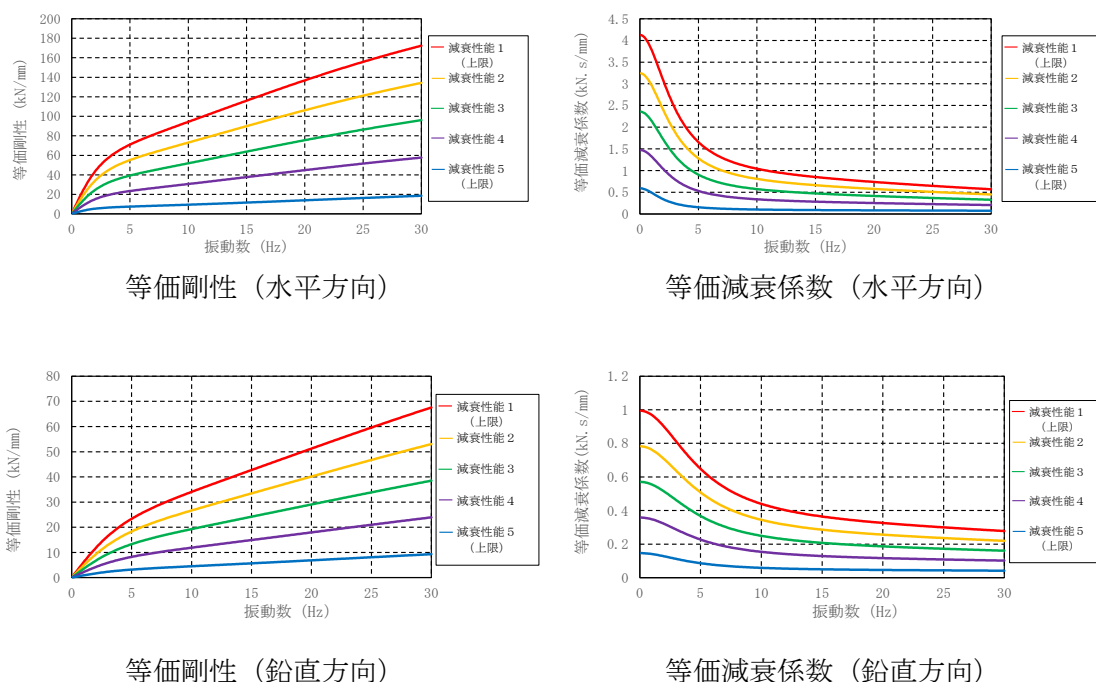


図 1 主蒸気管に設置する三軸粘性ダンパの段階的な減衰性能の設定 (630/426)

## 主蒸気管の振動モード

## 1. 概要

配管系に三軸粘性ダンパを設置した場合、減衰マトリクス[C]が大きな値となり対角化できず[M], [C], [K]の3つのマトリクスを解く複素固有値解析になる。

本資料では、三軸粘性ダンパの設置による主蒸気管の振動性状の変化の傾向を示すため、三軸粘性ダンパ設置前の実固有値解析及び設置後の複素固有値解析の結果を示す。

## 2. 複素固有値解析における振動モードについて

減衰マトリクス[C]を対角化できる場合の実固有値解析においては、ある固有モードでの各自由度の振幅の最大値は同一時刻に生じるため、振動モードを見ることで、系全体の応答を把握することが可能である。

一方、複素固有値解析では、固有モードが複素数になり位相を有するため、ある固有モードにおいて各自由度間で位相差があり、振幅が最大になる時刻が異なる。したがって、複素固有値解析における振動モードは、各自由度がそれぞれ異なる位相で振動している状態のうち、ある一瞬を切り取ったものとなる。

## 3. 固有値解析結果

主蒸気管 (MS-T-1) の固有周期及びモード減衰比を表 1 に、実固有値解析 (三軸粘性ダンパが無い状態での解析) における振動モードを図 1 に、複素固有値解析における振動モードを図 2～図 6 に示す。なお、固有周期、モード減衰比及び振動モードは、2次モードまでを代表で示すが、実固有値解析における1次モードは三軸粘性ダンパを複数設置する主蒸気止め弁から高圧タービンまでの配管が応答するモードであり、2次モードは三軸粘性ダンパを設置しないタービンバイパスラインが応答するモードである。また、振動モードでは、各質点の変位の相対量・方向を破線で図示する。

実固有値解析及び複素固有値解析における振動モードを比較すると、実固有値解析における1次モードが複素固有値解析における2次モード、実固有値解析における2次モードが複素固有値解析における1次モードに対応していることが分かる。実固有値解析における1次モードでは、三軸粘性ダンパを設置することによりモード減衰比が高くなるとともに、剛性も増すため固有周期が短周期側に変化していることが分かる。また、減衰性能が高いほどモード減衰比及び固有周期の変化が大きくなっている。一方、実固有値解析における2次モードでは、固有周期はほぼ一致しており、モード減衰比も配管系の設計用減衰定数として設定した値 (3.00%) から変化はない。

以上の傾向は三軸粘性ダンパ設置前後の主蒸気管に対して想定される振動性状と整合している。

表 1 主蒸気管 (MS-T-1) の固有周期及びモード減衰比

実固有値解析		複素固有値解析									
		減衰性能 1 (上限)		減衰性能 2		減衰性能 3		減衰性能 4		減衰性能 5 (下限)	
次数	固有 周期 (s)	固有 周期 (s)	モード 減衰比 (%)	固有 周期 (s)	モード 減衰比 (%)	固有 周期 (s)	モード 減衰比 (%)	固有 周期 (s)	モード 減衰比 (%)	固有 周期 (s)	モード 減衰比 (%)

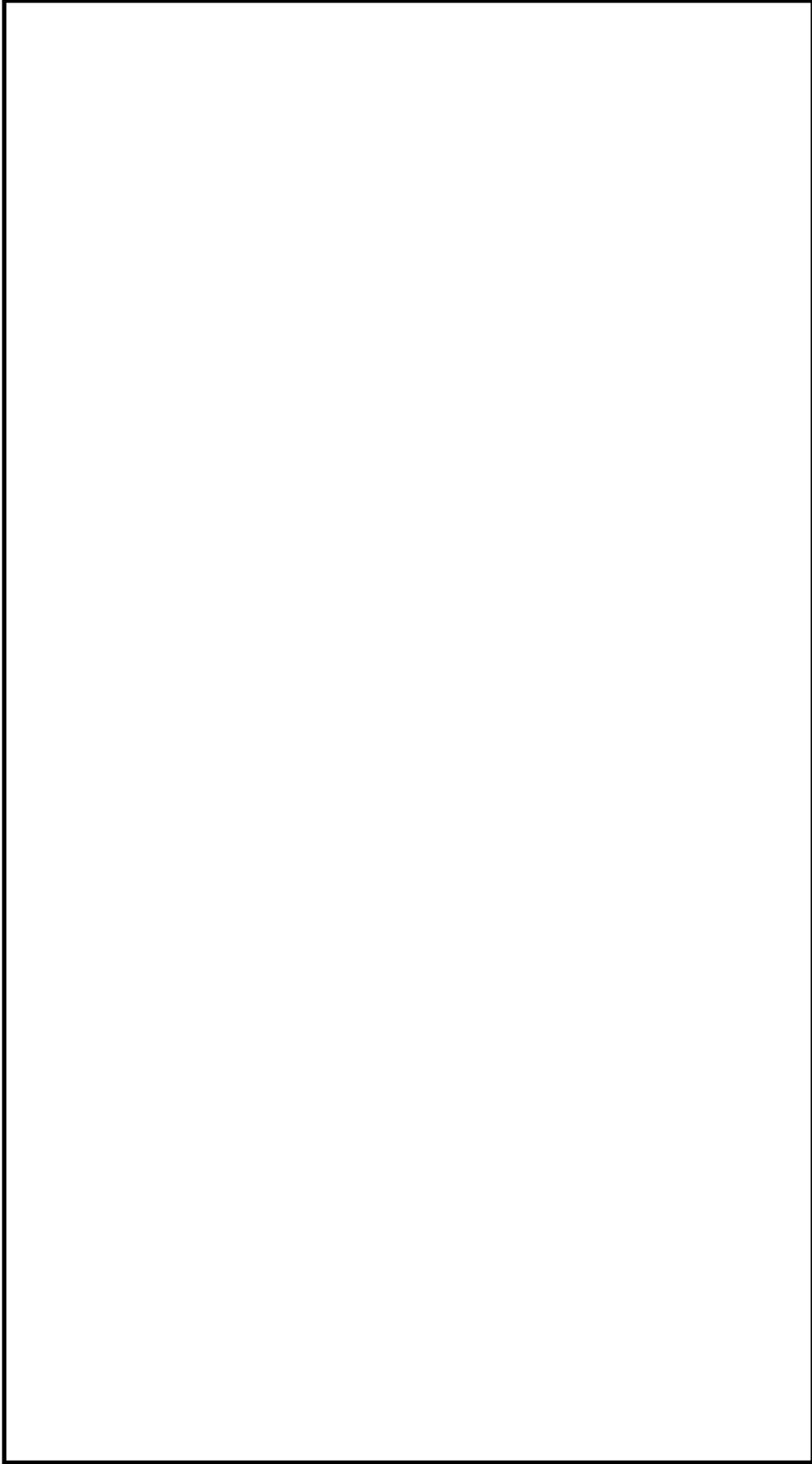


図 1 実固有値解析における代表的振動モード (1次) (1/2)



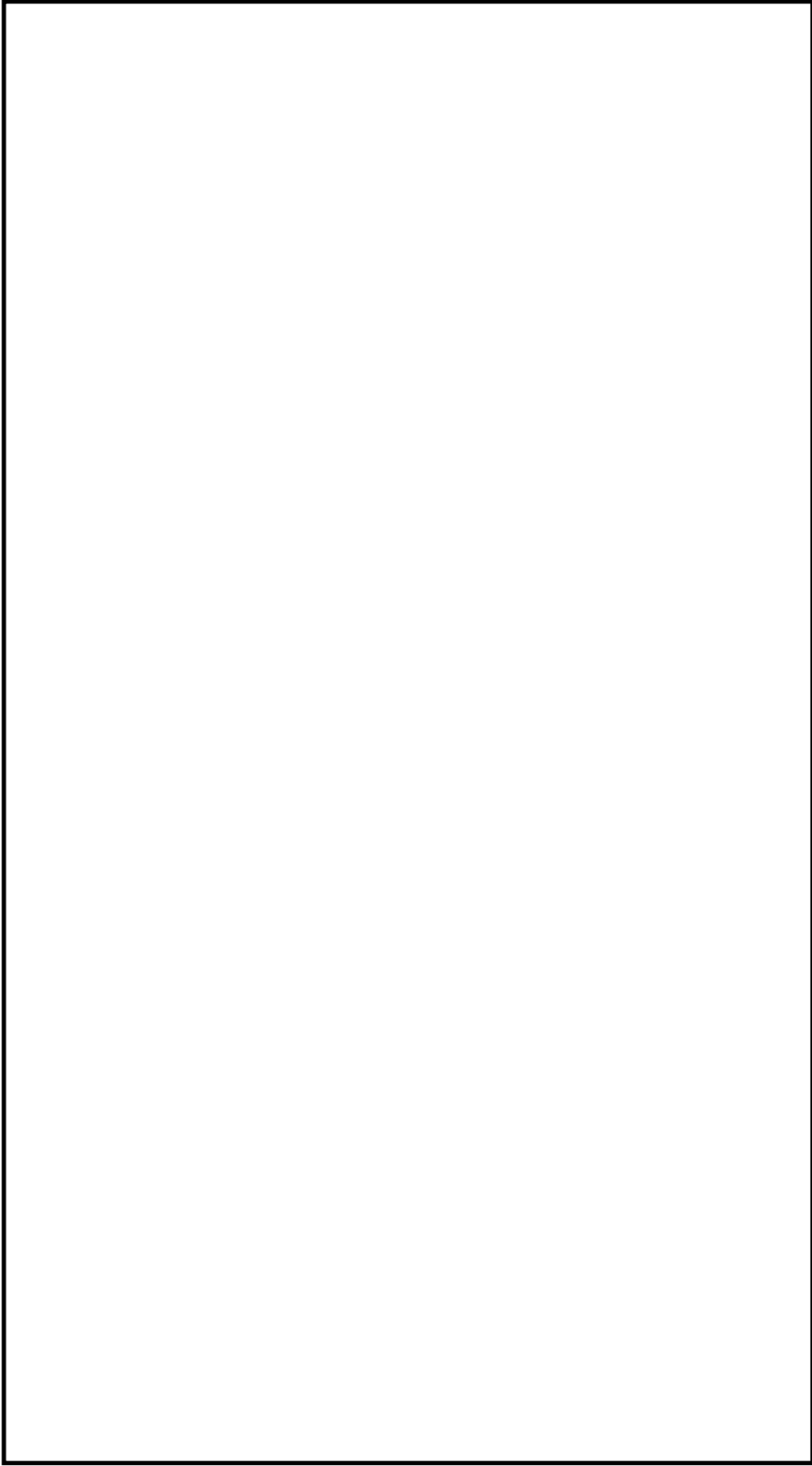


図 1 実固有値解析における代表的振動モード (2次) (2/2)

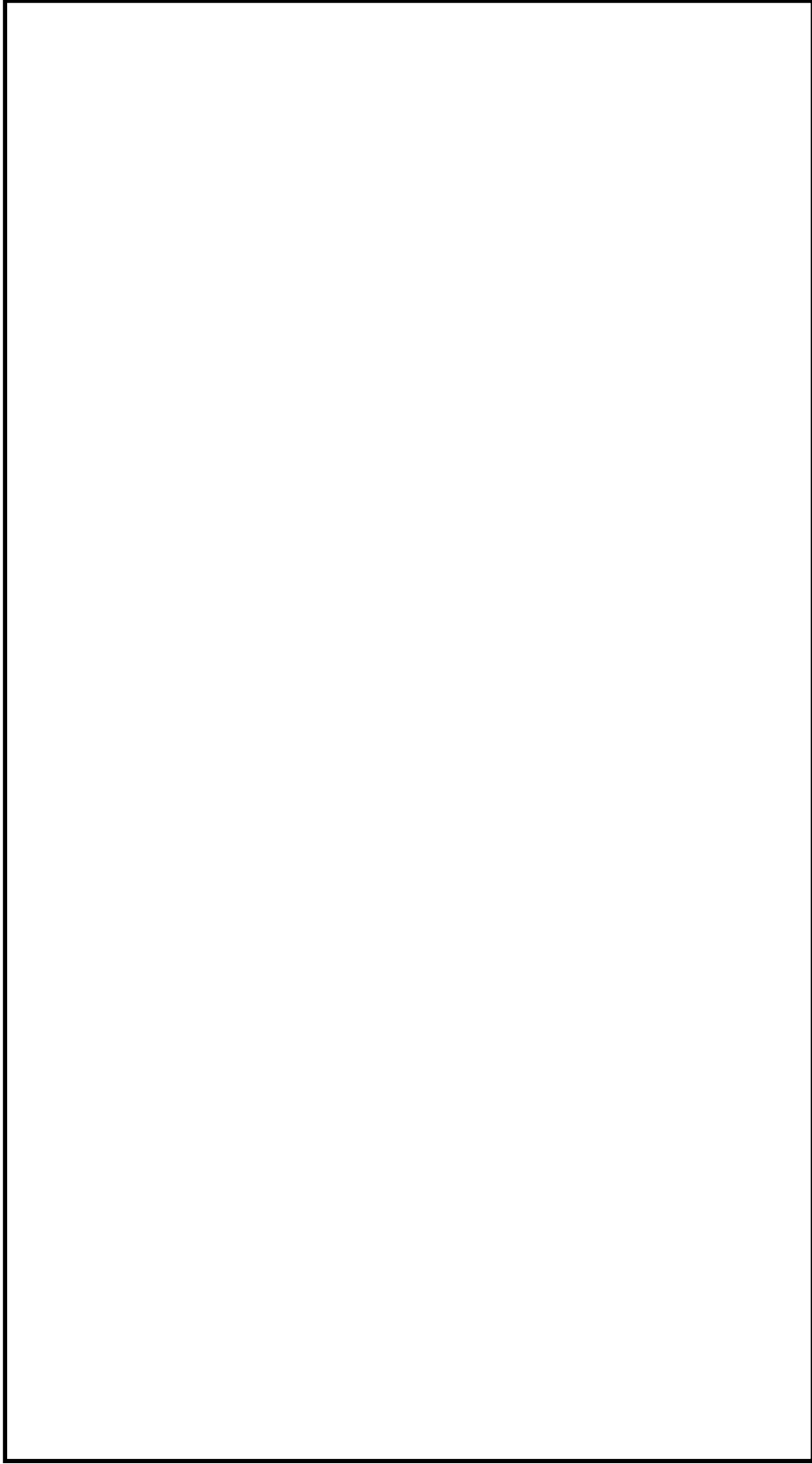


図2 複素固有値解析 (減衰性能1) における代表的振動モード (1次) (1/2)

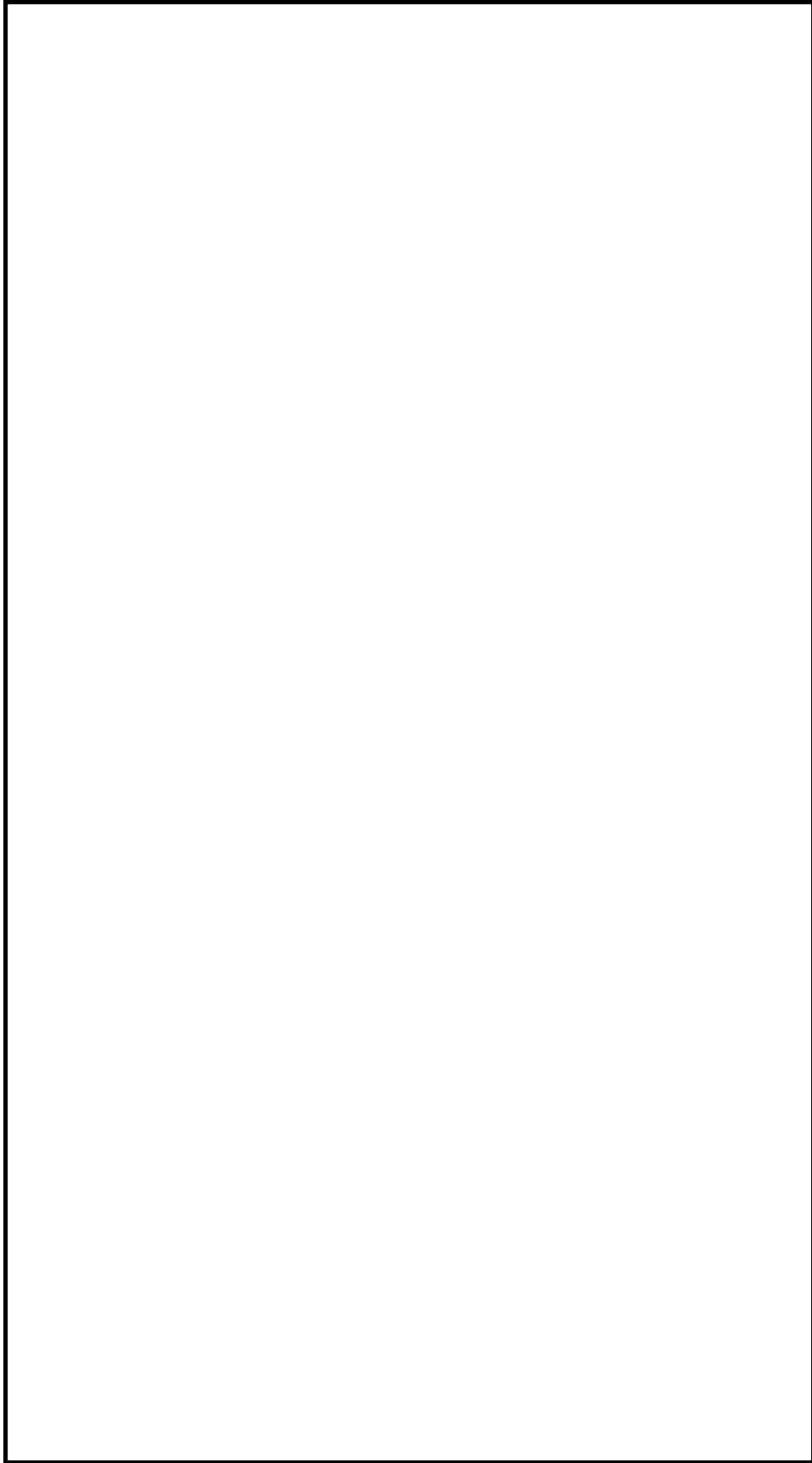


図2 複素固有値解析 (減衰性能1) における代表的振動モード (2次) (2/2)

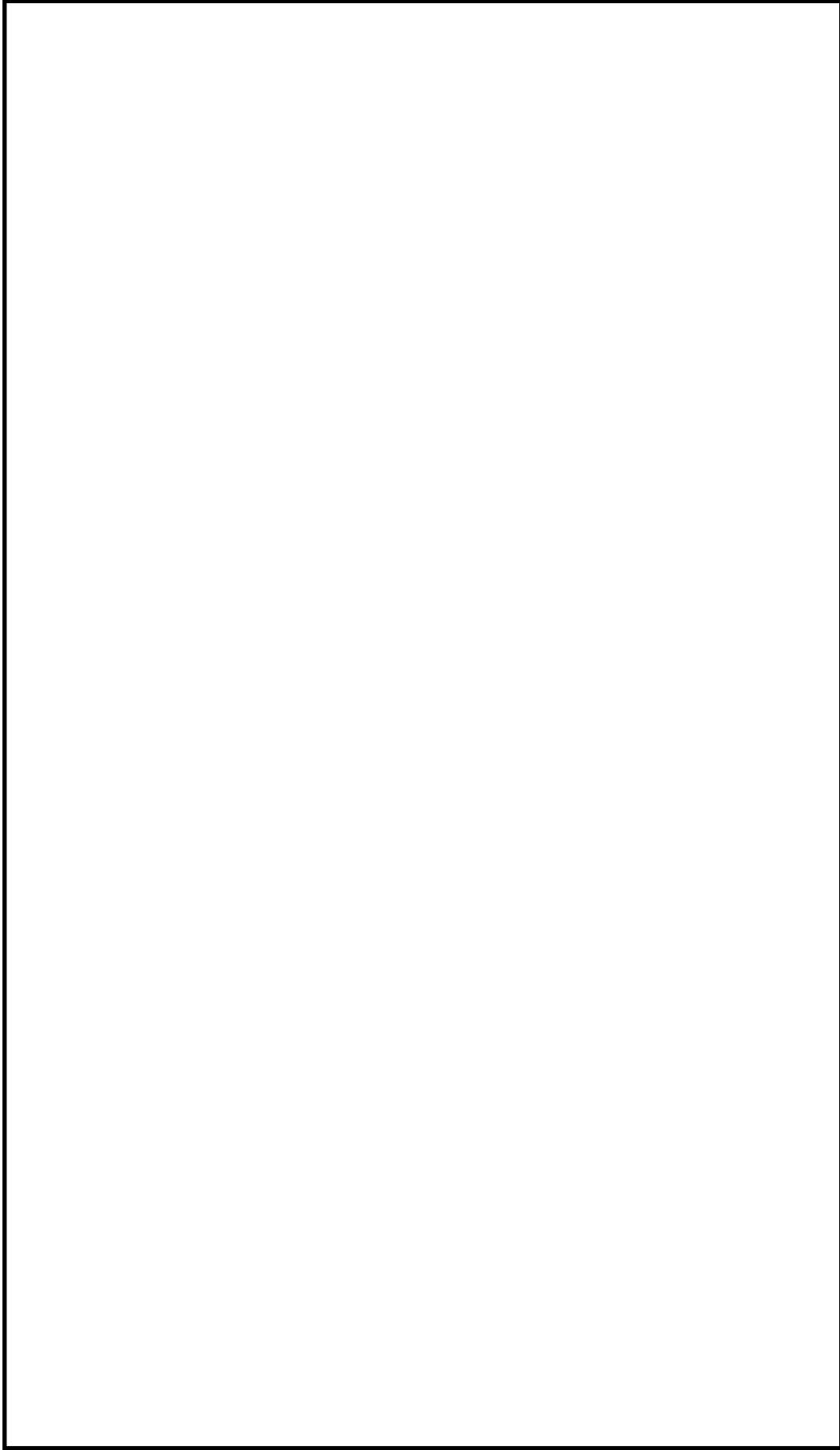


図3 複素固有値解析 (減衰性能2) における代表的振動モード (1次) (1/2)

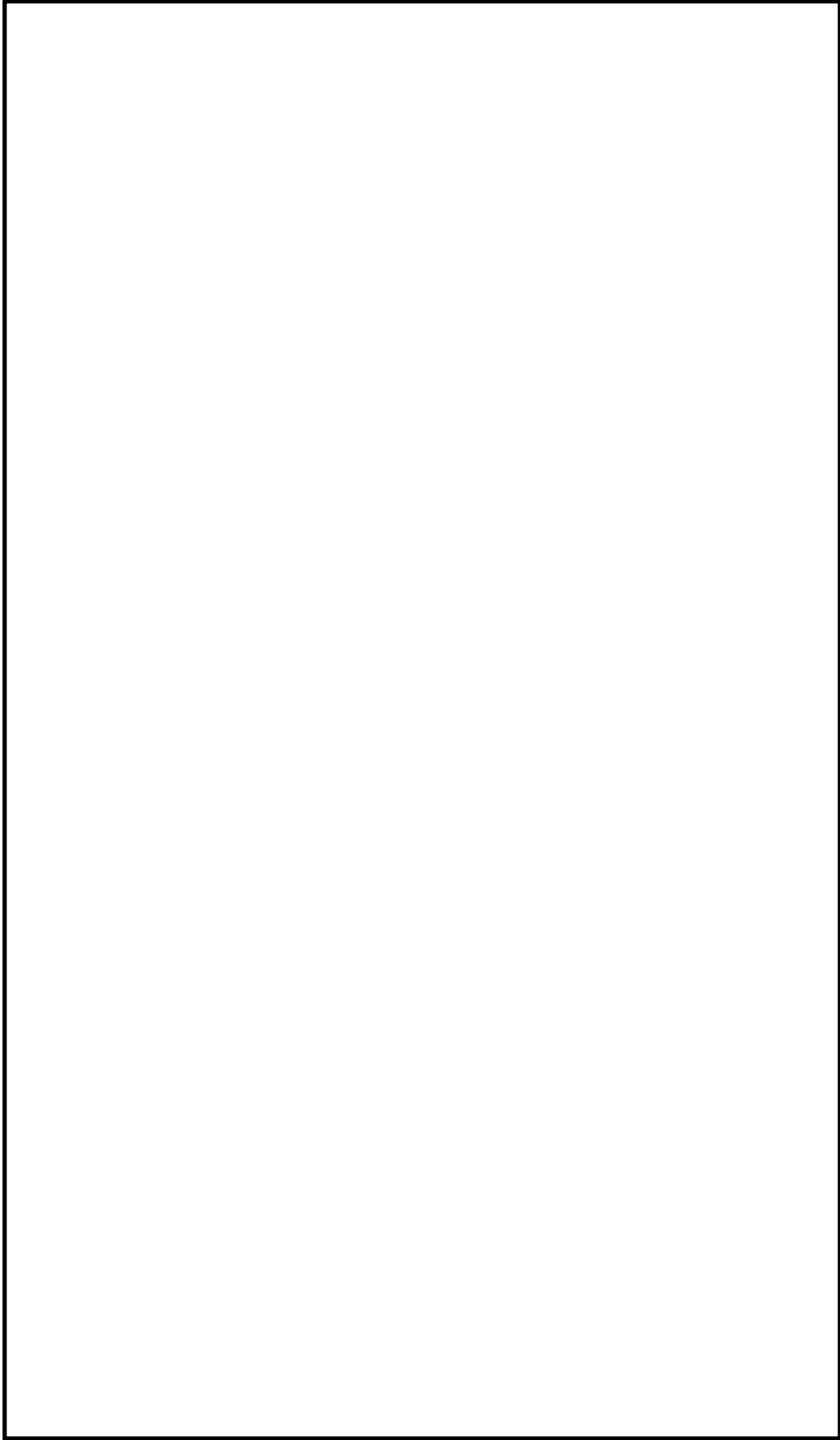


図 3 複素固有値解析 (減衰性能 2) における代表的振動モード (2 次) (2/2)

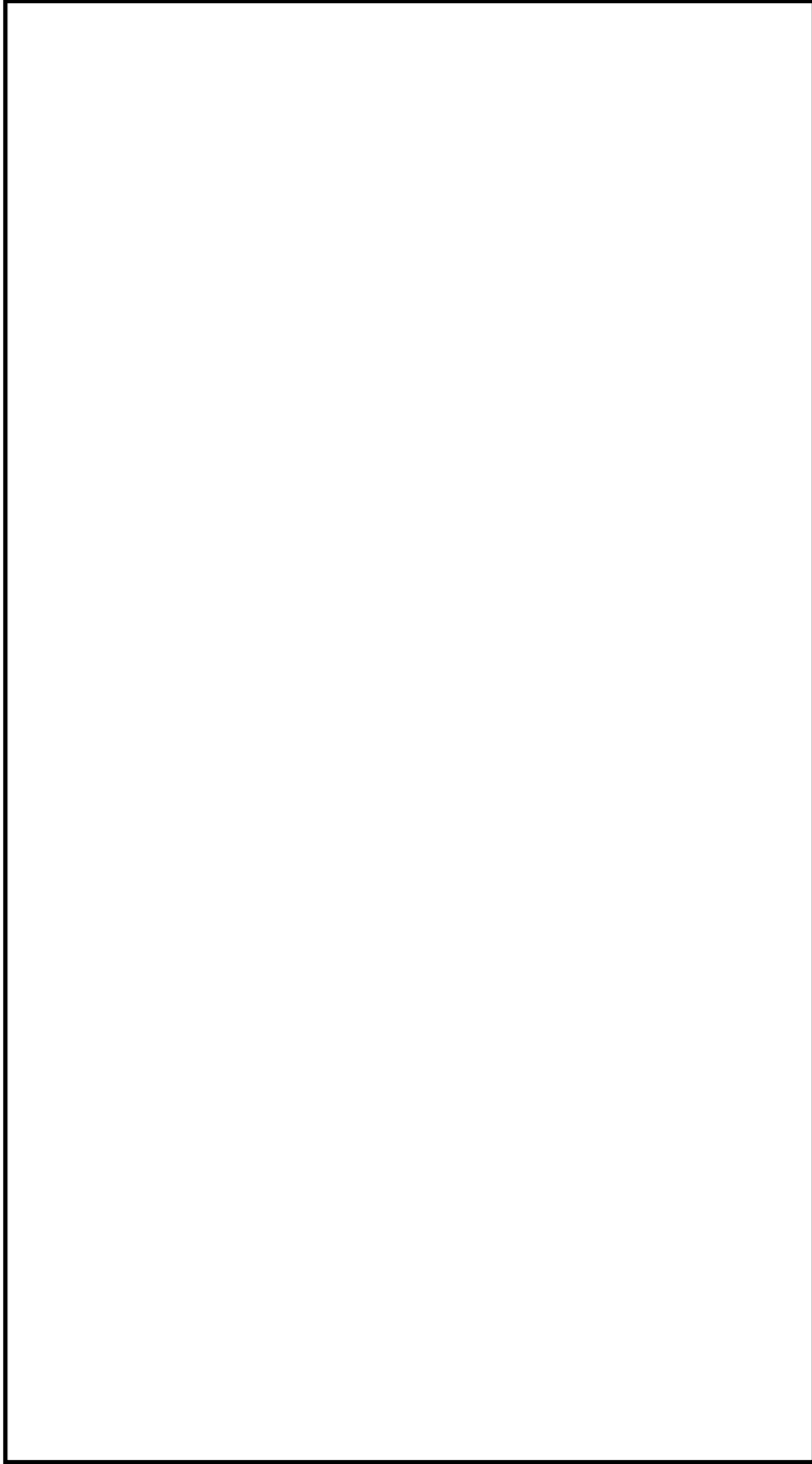


図 4 複素固有値解析 (減衰性能 3) における代表的振動モード (1 次) (1/2)

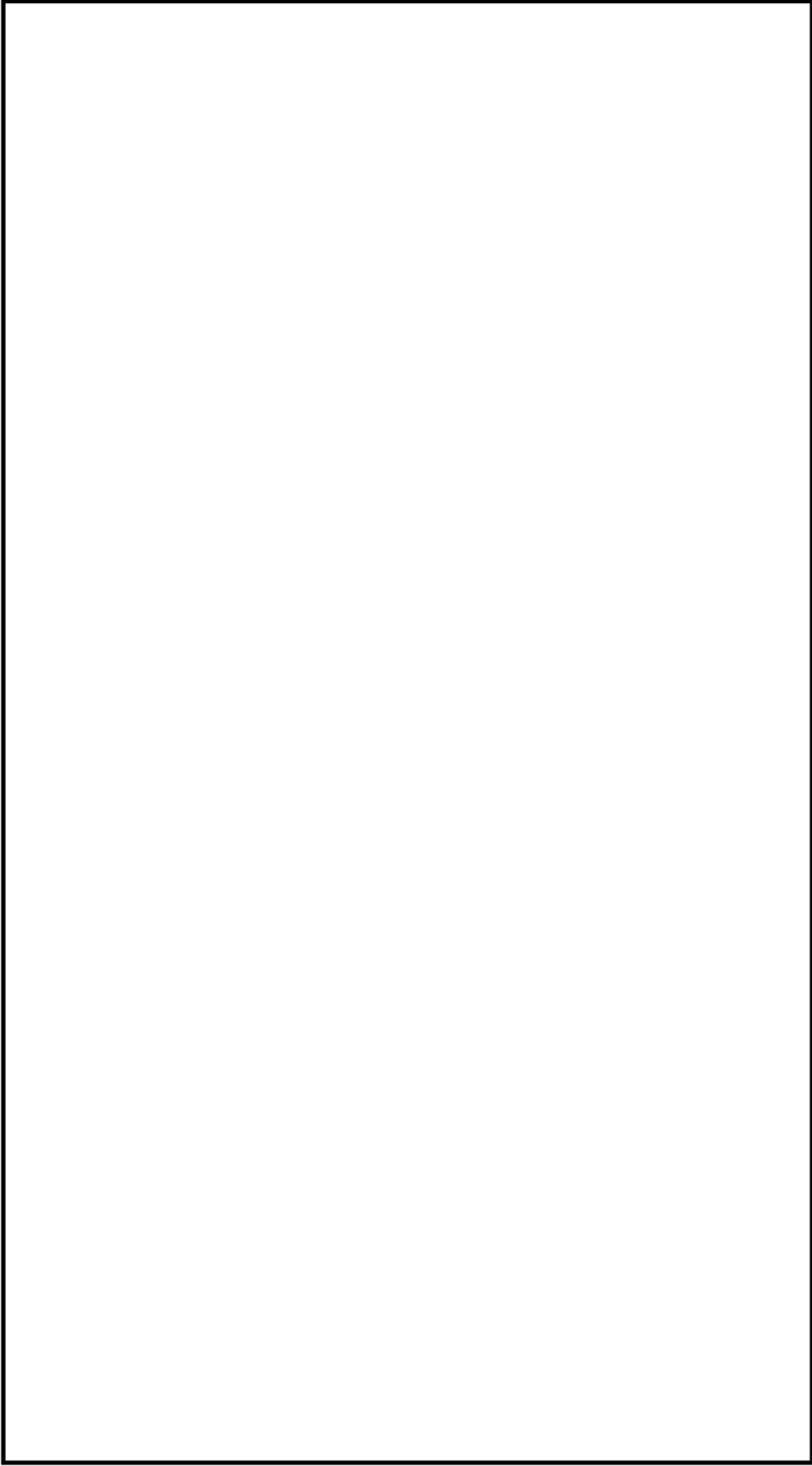


図 4 複素固有値解析 (減衰性能 3) における代表的振動モード (2 次) (2/2)

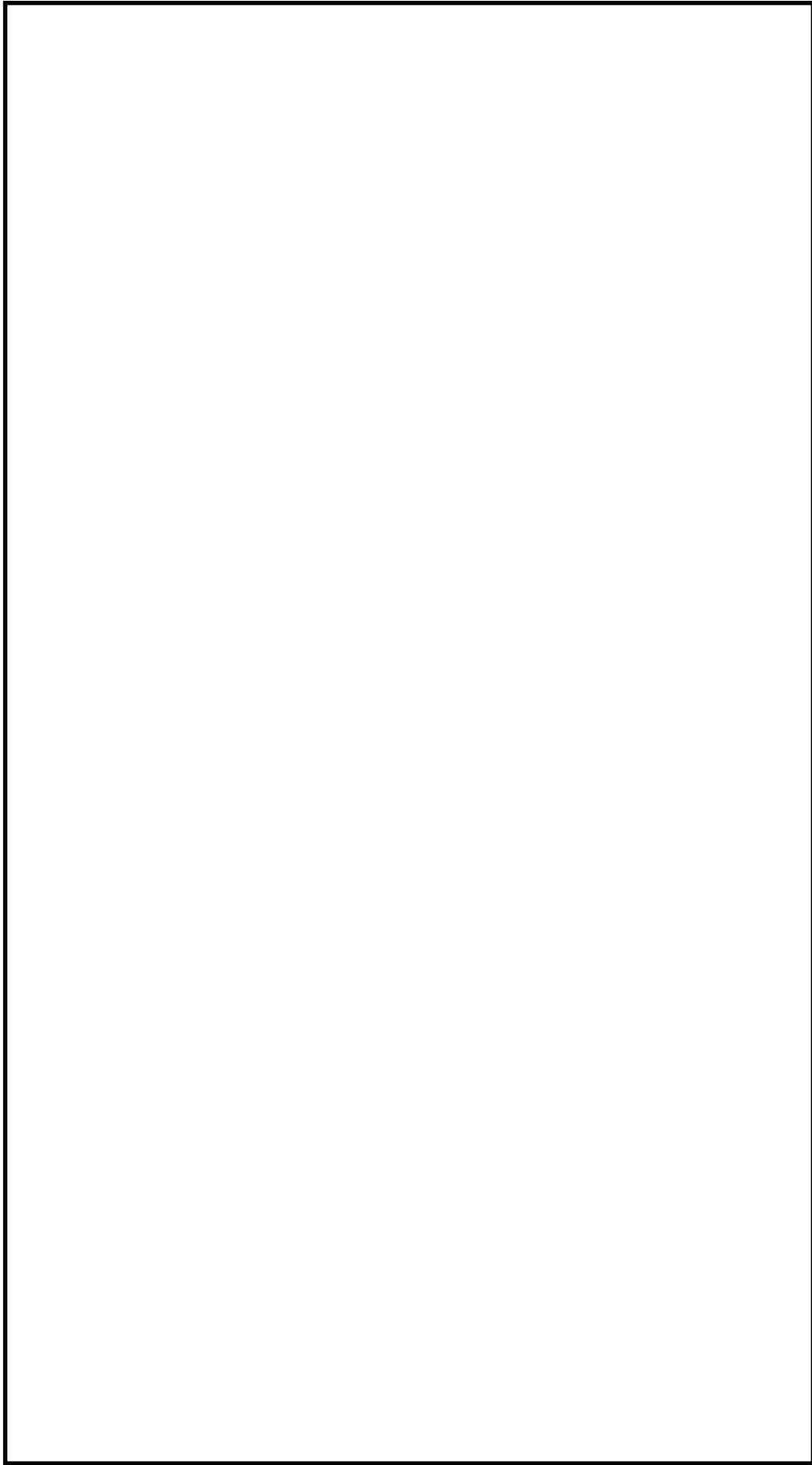


図 5 複素固有値解析 (減衰性能 4) における代表的振動モード (1 次) (1/2)



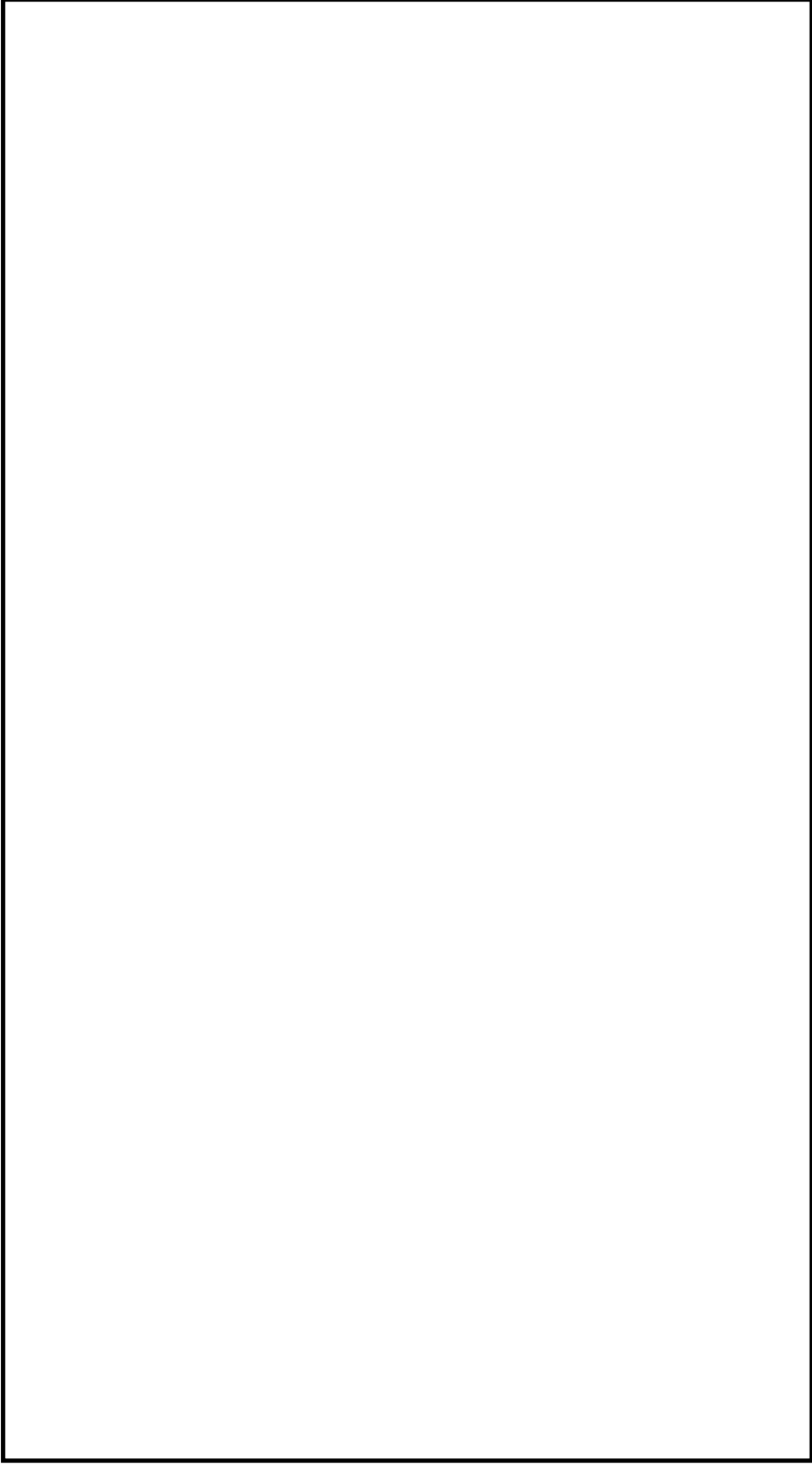


図 5 複素固有値解析 (減衰性能 4) における代表的振動モード (2 次) (2/2)

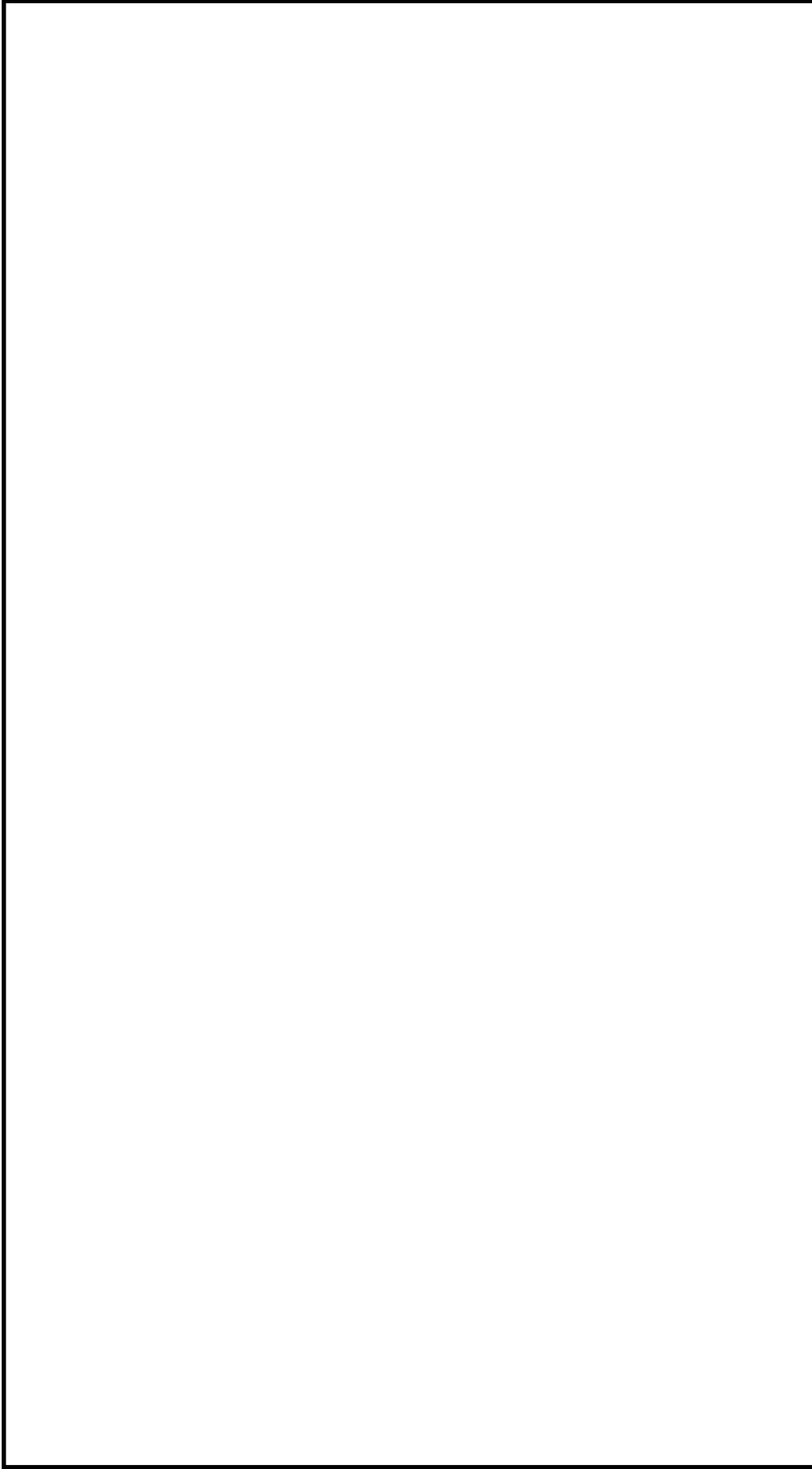


図 6 複素固有値解析 (減衰性能 5) における代表的振動モード (1 次) (1/2)

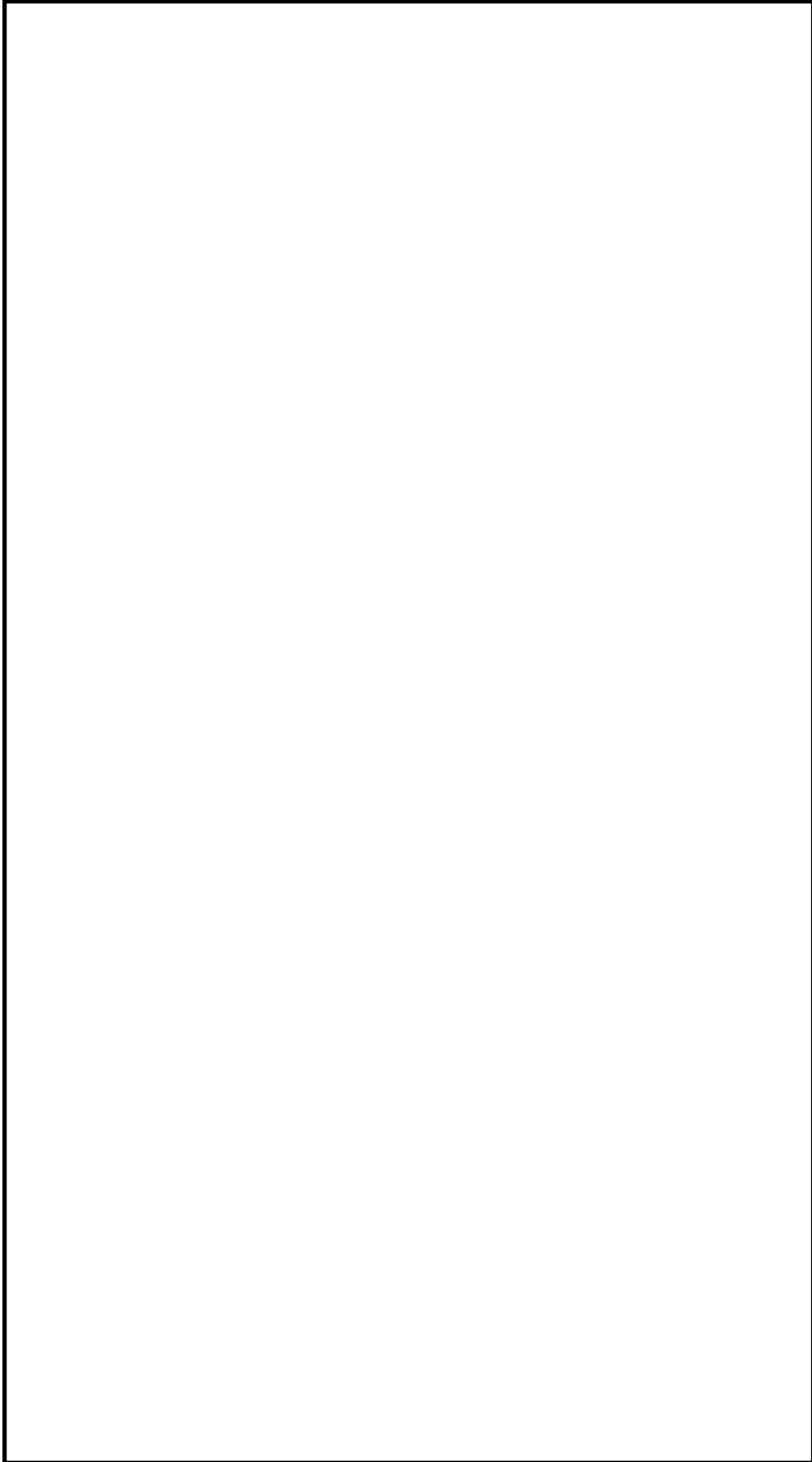


図 6 複素固有値解析 (減衰性能 5) における代表的振動モード (2 次) (2/2)

## 地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動に対する考慮について

## 1. 概要

スペクトルモーダル解析では、床応答加速度は地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動を考慮して周期方向に±10%拡幅した設計用床応答スペクトルを用いている。三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析では、時刻歴応答解析を採用することから、地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動の影響を考慮し、機器評価への影響が大きい地震動に対して影響評価を実施する。

なお、地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動に対する評価は、機器の固有周期と床応答スペクトルのピークが合うように時刻歴の横軸を±10%する手法があるが、配管系の固有周期は1次モードが支配的であるとは限らず、また減衰性能に応じて固有周期が変動することから、時刻刻みを±10%シフトした時刻歴波にて評価を実施し、機器が持つ裕度と時刻歴波をシフトすることへの影響度合を考慮して実施する。

## 2. 評価結果

地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動を考慮した配管の応力評価結果を表 1 に示す。なお、評価結果は機器評価への影響が大きい地震動である S d - 1 のうち、減衰が小さく、地盤物性等の不確かさによる固有周期の影響を受けやすい減衰性能 5（下限）について示す。

評価の結果、いずれの結果においても計算値が許容値以下であることを確認した。また、時刻刻みを±10%シフトした場合の計算応力への影響は 14%程度であり、機器が持つ裕度に対して微小な変動であることから、地盤物性等の不確かさによる固有周期の変動は本設備の成立性に影響がないことを確認した。

表 1 配管応力評価結果 (減衰性能 5)

No	地震動種類	許容応力状態Ⅳ A S										
		一次応力評価					一次+二次応力評価					
		評価点	計算 応力 (MPa)	許容 応力 (MPa)	裕度	変動率* (%)	評価点	計算 応力 (MPa)	許容 応力 (MPa)	裕度	疲労累 積係数	変動率* (%)
1	S d - 1 (オリジナル)	264	103	377	3.66	—	221	108	396	3.66	—	—
2	S d - 1 +10%シフト	221	98	377	3.84	95.1	221	102	396	3.88	—	94.4
3	S d - 1 -10%シフト	462	100	394	3.94	97.1	221	93	396	4.25	—	86.1

注記\* : 時刻刻みを±10%シフトした場合の計算応力への影響を示すパラメータとして、以下の計算をした値

$$S d - 1 \pm 10\% \text{シフトの計算応力} / S d - 1 \text{ (オリジナル) の計算応力} \times 100$$