

機器上下免震構造の具体化に関する調査  
減衰要素の構造計画の具体化  
(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2003年1月



株式会社 大林組

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 - Ken, 319-1184, Japan

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

2003

2100

(KO)

## 機器上下免震構造の具体化に関する調査

### 減衰要素の構造計画の具体化

(契約業務報告書)

榎木 孝裕\* 宮本 明倫\*

仲戸川哲人\*

#### 要旨

機器上下免震構造概念(コモンデッキ方式)を実現するための研究開発の一環として、現在、機器上下免震構造の具体化に関する調査を行っている。具体化に当たっては使用する要素である免震要素、減衰要素それぞれの構造計画を作成し、これら構造計画に基づき試験計画の立案、試験結果の分析・反映を行うこととなる。

本報告書では、減衰要素の具体化として構造計画及び試験計画の検討結果について報告する。

はじめに減衰要素は、平成13年度の検討結果より、R0型で評価出来る鋼材ダンパが適していることが分かっている。

そこで、本結果を踏まえ、機器の応答許容値を満足するダンパの形状範囲を断面厚とひずみ分布をパラメタに解析的に求めた。

次に、この解析結果に基づき減衰要素の性能(減衰性能、耐力、疲労強度及び限界変位までの変形性能)を確認するため実大規模を対象とした試験計画を立案した。

---

\* 株式会社大林組

本報告書は、株式会社大林組が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

機構担当課室： 要素技術開発部 構造信頼性研究グループ

January, 2003

The investigation about embodiment of vertical isolation structure  
An embodiment of the structural plan of damper element

T.Somaki\* A.Miyamoto\*  
T.Nakatogawa\*

Abstract

In order to realize the concept of a vertical isolation system (common deck system), research and development on the vertical isolation structure is now underway. In its first step, structure plans of each of the isolation element and the damper element will be drawn up, and in the next step, tests on these elements will be planned, executed, analyzed, and evaluated, to be reflected to the structure plan.

In this report, the structure plan and test plan of damper element is reported.

At first, it was concluded in the previous work that the steel-materials damper which can be evaluated by Ramberg-Osgood type is applicable to the vertical isolation system required performance. Then, based on this result, the form range of a damper which satisfies was surveyed from both cross section thickness and distribution of strain by analysis. Next, in order to check the performance (limit a damping capability, load carrying capacity, fatigue strength, and deformability) of an actual damper element based on this analysis result, the test plan for actual scale model was drawn up.

---

\* OBAYASHI COPORATION

This report is related with the operating result which OBAYASHI CORP. carried out by contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

The division of contract : Structural Mechanics Research Group, Advanced technology division,  
O-arai Engineering Center

## 目 次

要旨	I
目次	II
表リスト	III
図リスト	IV
1. はじめに	1
2. 目 的	2
3. 検討内容	3
3.1 減衰要素の構造計画の具体化	3
3.1.1 検討目的	3
3.1.2 減衰要素の構造計画の具体化	5
3.1.3 試験計画	27
3.1.4. まとめ	33

表 リ ス ト

表 3.1.2-1 減衰器モデル1(ダンパ幅 60mm)の検討結果(荷重 56.10tonf) .....	11 ~ 12
表 3.1.2-2 減衰器モデル2(ダンパ幅 66mm)の検討結果(荷重 61.86tonf) .....	13 ~ 14
表 3.1.2-3 減衰器モデル3(ダンパ幅 72mm)の検討結果(荷重 67.46tonf) .....	15 ~ 16
表 3.1.2-5 形状変更モデル2(ダンパ幅 66mm)の検討結果(荷重 60.97tonf)	21 ~ 22
表 3.1.2-5 減衰要素形状の 1 次抽出 .....	24
表 3.1.3-1 試験体のパラメータ .....	29
表 3.1.3-2 加力条件 .....	30

## 図 リ ス ト

図 3.1.3-1 83kN(8.5tonf)用鋼材ダンパ	3
図 3.1.1-2 減衰装置の種類による減衰力と応答値の関係	4
図 3.1.2-1 材料特性	8
図 3.1.2-2 解析モデル(減衰要素単体)	8
図 3.1.2-3 全体解析モデル	9
図 3.1.2-4 最外縁軸歪み分布(モデル1~3)	17
図 3.1.2-5 荷重一変位曲線(最大荷重 63.50tonf) (モデル1~3)	17
図 3.1.2-6 ダンパ固定用ボルトの応力検討結果 (モデル1~3)	18
図 3.1.2-7 形状変更を行った要素単体の解析モデル	19
図 3.1.2-8 最外縁歪み分布	20
図 3.1.2-9 荷重一変位曲線	20
図 3.1.2-10 最外縁軸歪み分布	23
図 3.1.2-11 荷重一変位関係(最大荷重 60.95tonf)	23
図 3.1.2-12 ダンパ固定用ボルトの応力検討結果	23
図 3.1.2-14 減衰要素の寸法	25 ~ 26
図 3.1.3-1 要素試験に用いる試験体の基本的な形状寸法	29
図 3.1.3-2 正弦波加振	30
図 3.1.3-3 ケーススタディ波の応答変位波形(最大 88.69mm)	30
図 3.1.3-4 加力方法(要素試験、応答波入力による性能試験)及び計測方法	31
図 3.1.3-5 変形性能確認試験の加力方法及び計測方法(陰影部が試験範囲)	31
図 3.1.3-6 ひずみ測定位置	32

## 1. はじめに

平成 14 年度における「機器上下免震構造の具体化に関する調査」として以下の検討項目がある。

- ・ 機器上下免震要素の具体化に関する調査
- ・ 機器上下免震要素の構造計画の具体化
- ・ 機器上下免震要素の試験計画の立案
- ・ 減衰要素の構造計画の具体化

本報告書では、この内「減衰要素の構造計画の具体化」について調査検討を行った結果についてまとめたものとなる。

## 2. 目的

現在、高速炉プラントを3次元免震する方策として有望なコモンデッキ方式上下免震構造の開発が進められている。

本年度においては、機器上下免震要素の構造計画の具体化、構造成立性を確認するための試験計画の具体化を立案し、免震要素と組み合わせて用いる減衰要素の構造についても調査検討を行い、機器上下免震構造の具体化を図るものである。

### 3. 検討内容

#### 3.1 減衰要素の構造計画の具体化

##### 3.1.1 検討目的

平成 13 年度までの検討により、機器上下免震構造に用いる減衰要素は、その復元力特性が RO 型で評価できる鋼材ダンパが適していることが分かつてきた。この結果を反映し、2.2 で具体化する免震要素と組み合せて用いる実規模の減衰要素の構造及びプラント配置を具体化する。さらに、減衰特性確認のための試験計画を立案する。

ここで、平成 13 年度では、地震応答解析により機器の応答許容値を満足する RO 型鋼材ダンパの仕様(必要耐力)を求め、147kN(15tonf)用鋼材ダンパを開発目標として検討した結果(鋼材:SS400 材、初期降伏荷重と 10 サイクル目の荷重比 1.75 を仮定し、初期耐力 83kN(8.5tonf)用鋼材ダンパを開発目標とした)、固定点一荷重載荷点長さ 600mm、変断面鋼材ダンパを原形として抽出した。なお、図 3.1.1-1 に、鋼材ダンパの原形を示す。実機では、皿ばねの上下免震ユニット 1 ユニット当たり、本鋼材ダンパを 3 本一組としてユニットを構成する。

なお、平成 13 年度に実施した地震応答解析(機器設計条件を満足するために必要な減衰力)の検討結果を、図 3.1.1-2 に示す。

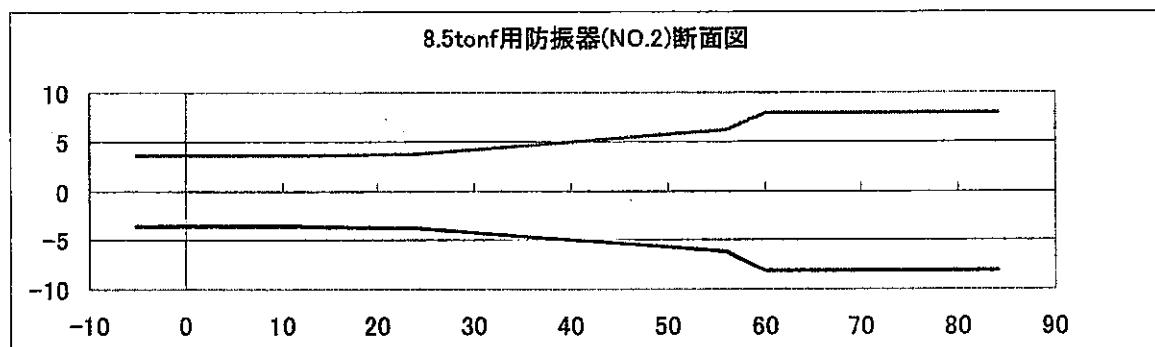


図 3.1.1-1 83kN (8.5tonf) 用鋼材ダンパ

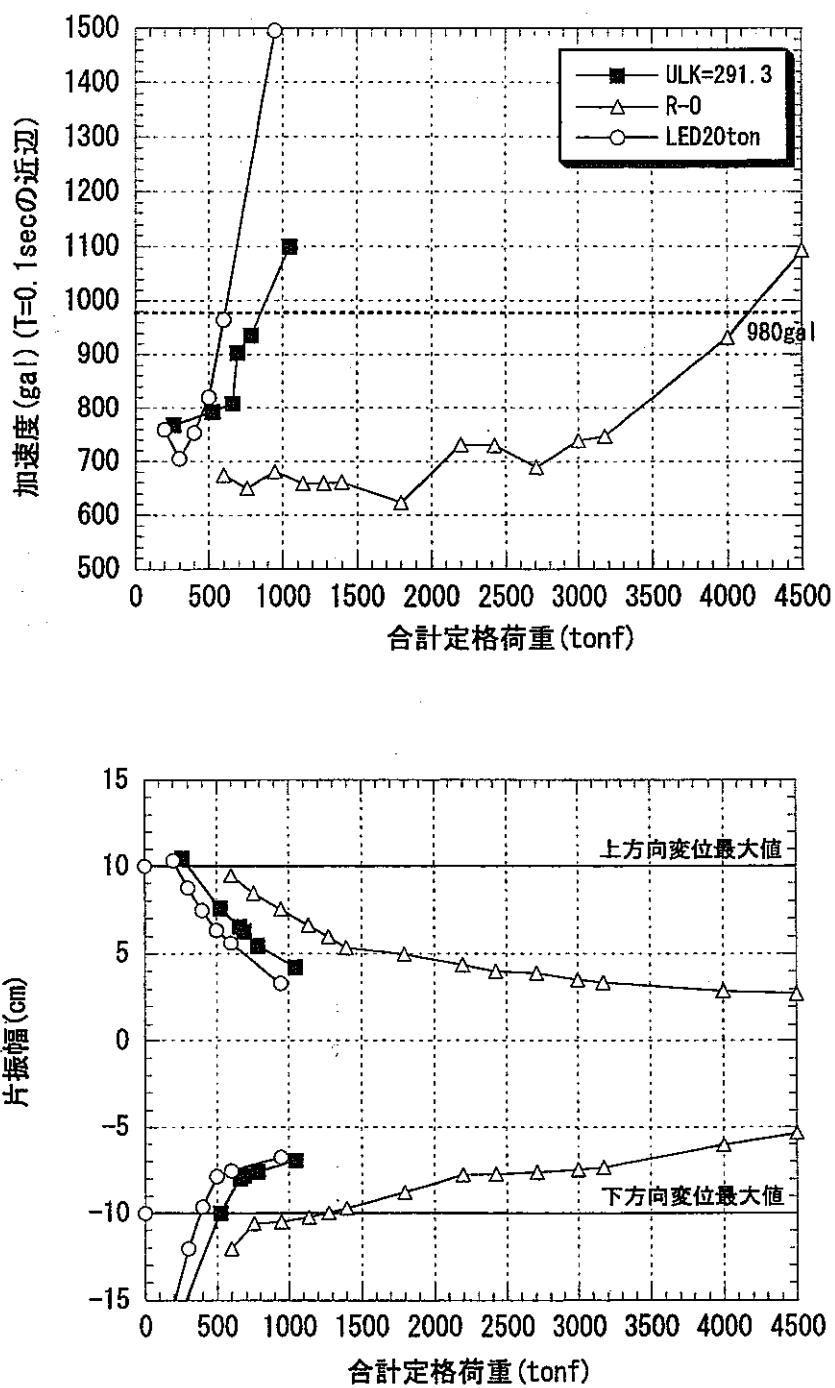


図 3.1.1-2 減衰装置の種類による減衰力と応答値の関係

### 3.1.2 減衰要素の構造計画の具体化

#### (1) 検討方針

減衰装置の減衰力は、皿ばね 1 ユニット当り 450kN(45tf)であり、この荷重を 3 本にて発生させる。従って、1 本当りの減衰装置には、150kN(15tf)が開発目標となる。また、装置単体に対しては、設計変位(±100mm)、あるいは 1.5 倍の変形(±150mm)に対して変形性能及び減衰性能を発揮すること、また、周辺治具の強度及び変形追従性が要求される。また、地震波入力に対する疲労強度(特性)を高めるための工夫が必要となる。

なお、減衰装置は、皿ばね免震ユニット近傍に配置した場合には、機器(プラント)配置に影響ないと考えられる。

#### (2) 減衰要素の具体化

##### a. 平成 13 年度検討条件

昨年度の FEM による検討は、以下の条件にて行った。

- ・要素数: 単体。
- ・要素断面形状: 変断面
- ・モデル化範囲: 有効長さ+余長(図 3.1.1-1 参照: 0 を加力点、60cm 以上を固定、0~60cm までを有効長さ)
- ・要素の固定条件: 脚部一辺を完全固定。
- ・加力点: 点加振。
- ・材料特性: 図 3.1.2-1 参照。

##### b. 検討条件

本検討では、昨年度実施した知見(要素の有効長さ 600mm)を踏まえ、FEM 解析による要素形状の検討を行う。本検討では、以下の条件とした。

- ・要素数: 3 体。
- ・要素断面形状: 変断面(図 3.1.2-2 参照)
- ・要素の固定条件: コモンデッキ側を固定点とし、固定点と減衰要素の定着部を接触要素を介して結合する。接触要素は、圧縮側では剛、引張側では浮上り時には抵抗しない。ここで、減衰要素を、4 本の高力ボルト(F11T、M36、許容

値 509kN)にて所定の張力で締付けた状態を初期状態とする。

・モデル化範囲:3 体の減衰要素+荷重伝達治具(図 3.1.2-3 参照:0 を加力点、

60cm 以上を固定、0~60cm までを有効長さ)

・加力点:ピン中心部を点載荷し、接触要素を介して減衰要素へ伝達する。

・材料特性:図 3.1.2-1 参照。

なお、図 3.1.2-3 に、減衰装置の全体解析モデルを示す。実際の配置状態を模擬し、減衰要素は 3 本配置とし、周辺治具の剛性等を考慮した。

#### c. 検討方法

検討の手順として、上記条件にて、FEM 解析(材料定数及び変断面形状は平成 13 年度と同じ)により、皿ばね 1 ユニット当たり 450kN(減衰要素 3 本で、45tf)の減衰力を確保するように、断面厚をパラメータとして最初の検討を行った。

次に、上記の結果を踏まえて、目標とする減衰力が得られた板厚を有するモデルを基本として、ひずみ未分布を均一化して損傷を可能な限り分散させる要素形状の検討を行った。

#### d. 検討結果

FEM による繰返し解析を行った結果、板厚 60mm(モデル 1)、66mm(モデル 2)及び 72mm(モデル 3)の 3 候補を抽出した。

3 候補の FEM 解析結果を、表 3.1.2-1~3 に示す。また、図 3.1.3.1~6 に、最外縁軸ひずみ分布、荷重一変位曲線、ダンパ固定用ボルトの応力検討結果をそれぞれ示す。

モデル化の範囲及び固定条件が異なるが、ひずみ分布は昨年度の検討結果と概ね同じ結果が得られている。荷重特性は、板厚の厚さに応じて減衰力が増加している。また、固定用ボルトは許容値に納まっている。

次に、この結果を踏まえて、最外縁軸ひずみ分布(損傷)を均一になるように、モデル 2 を基本として要素形状について検討を行った。

図 3.1.2-7 に、形状変更を行った要素単体の解析モデルを示す。要素形状は、図 3.1.2-4 のひずみ分布より、胴体部から先端部にかけてのひずみを均一化する

ために、加力点近傍ののど首部や胴体部の幅をパラメータとした。まず、基本モデルののど首幅 70mm に対して、胴体部のひずみを小さく、先端部のひずみを大きくするため、のど首幅を 58mm(形状変更モデル 1) 及び 66mm(形状変更モデル 2)、胴体部を基本(モデル 2)より最大 6mm 幅広げし、脚部の幅は基本モデルとした。なお、形状変更モデル 1 及び 2 は同一の胴体とした。この結果では、図 3.1.2-8 に示すひずみ分布より、極端に先端部のひずみが大きくなり、ひずみ分布の均一化がなされていない。

そこで、のど首幅を 64mm(形状変更モデル 3) 及び 60mm(形状変更モデル 4)、胴体部を基本(モデル 2)と同じとして次の検討を行った。図 3.1.2-8 に示すひずみ分布より、形状変更モデル 4 の方がひずみ分布は均一化されている。図 3.1.2-9 に、最外縁ひずみ分布が均一化された形状変更モデル 4 の荷重一変位曲線を、形状変更モデル 1 及びモデル 2 との比較で示す。荷重特性より、のど首 60mm 及び胴体部基本と同じである形状変更モデル 4 は、基本とほぼ同等の履歴面積(エネルギー吸収)を有していることが認められる。

これより、形状変更モデル 4 を候補として選定する。表 3.1.2-4 に、形状変更モデル 4 の FEM 解析結果を示す。図 3.1.2-10～11 に、基本(モデル 2)、形状変更モデル 4 及び平成 13 年度の結果(No.2)との比較について、ひずみ分布及び荷重特性を示す。また、ボルト検討結果を、図 3.1.2-12 に示す。形状変更モデル 4 のひずみ分布がより均一化されていること、今回抽出した基本(モデル 2)と形状変更モデル 4 の減衰性能は大略平成 13 年度の結果(No.2)と合致していることが確認される。

表 3.1.2-5 に、上記の検討により 1 次抽出した減衰要素を示す。

試験の実施については、評価の欄に示すように、設計目標の減衰力(450kN)を満足すること、また、周辺治具の強度を確認することを念頭に置くと、荷重が大きくなるモデル 2～4 を行うこととする。

なお、上記で基本モデルとした形状 2 の減衰要素をベースに、減衰要素寸法を図 3.1.2-15 に示す。

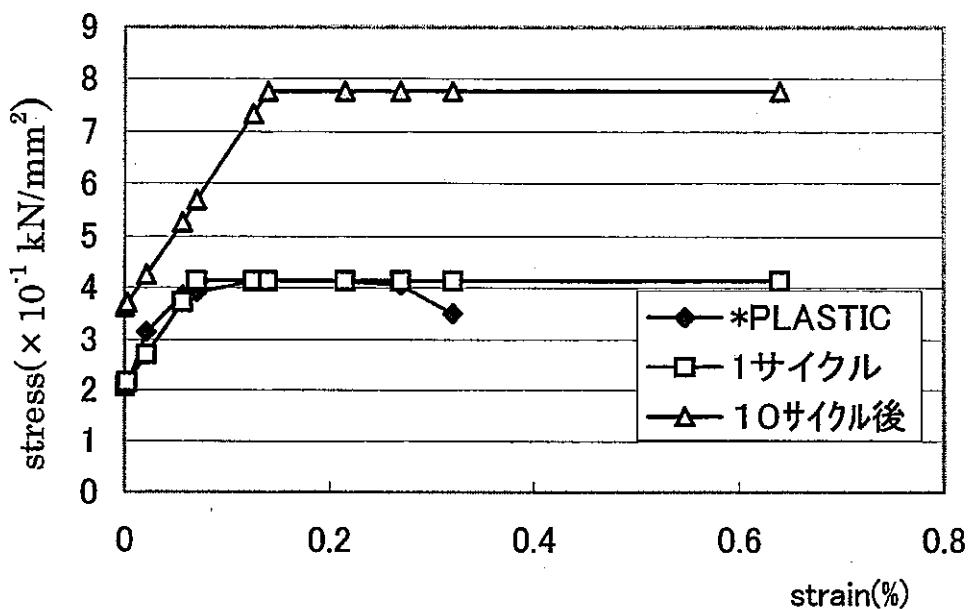


図 3.1.2-1 材料特性 (SS400、PLASTIC は、FBR 水平免震での鋼棒ダンパーの素材試験結果に基づく)

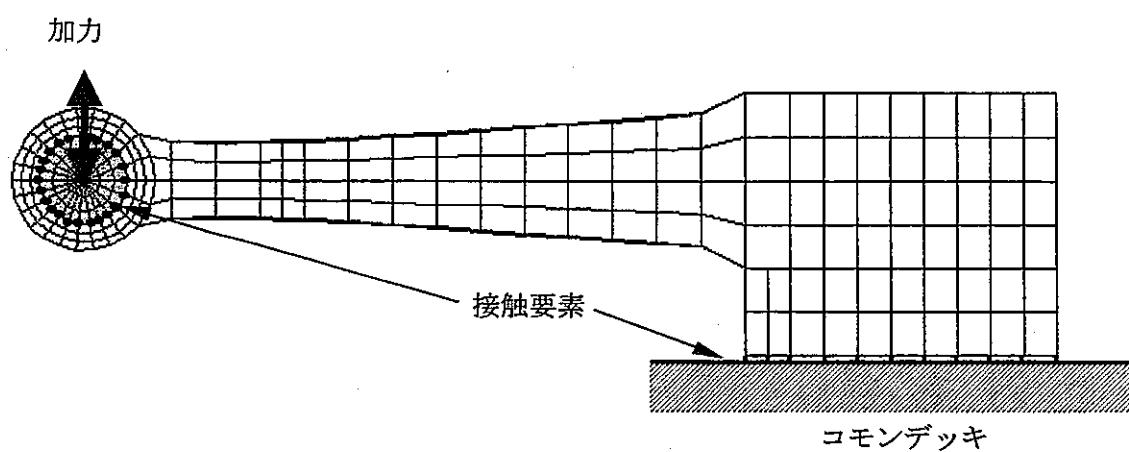


図 3.1.2-2 解析モデル (減衰要素単体)

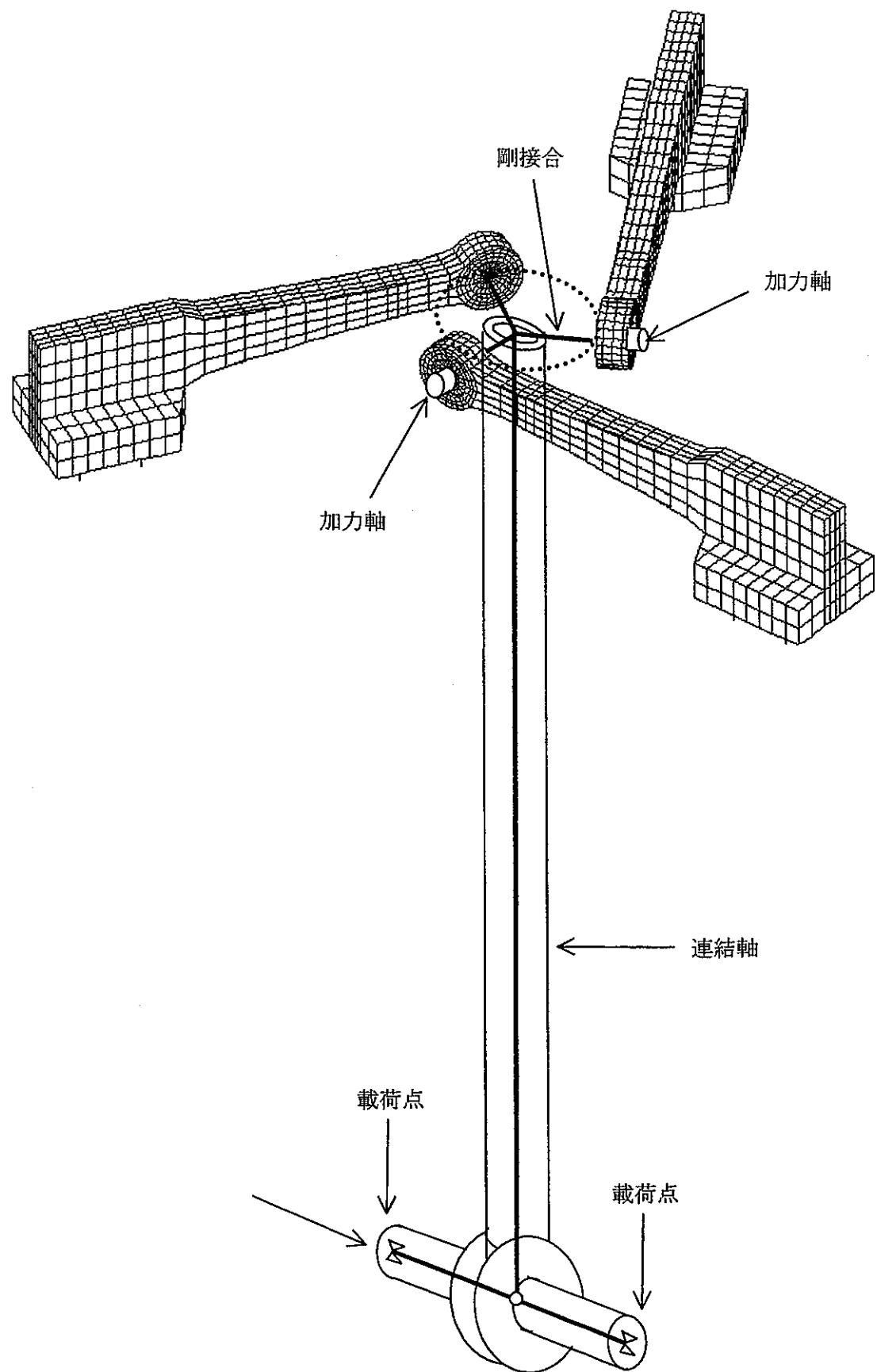


図 3.1.2-3 全体解析モデル

表 3.1.2-1 減衰器モデル 1(ダンパ幅 60mm)の検討結果 (荷重 56.10tonf)

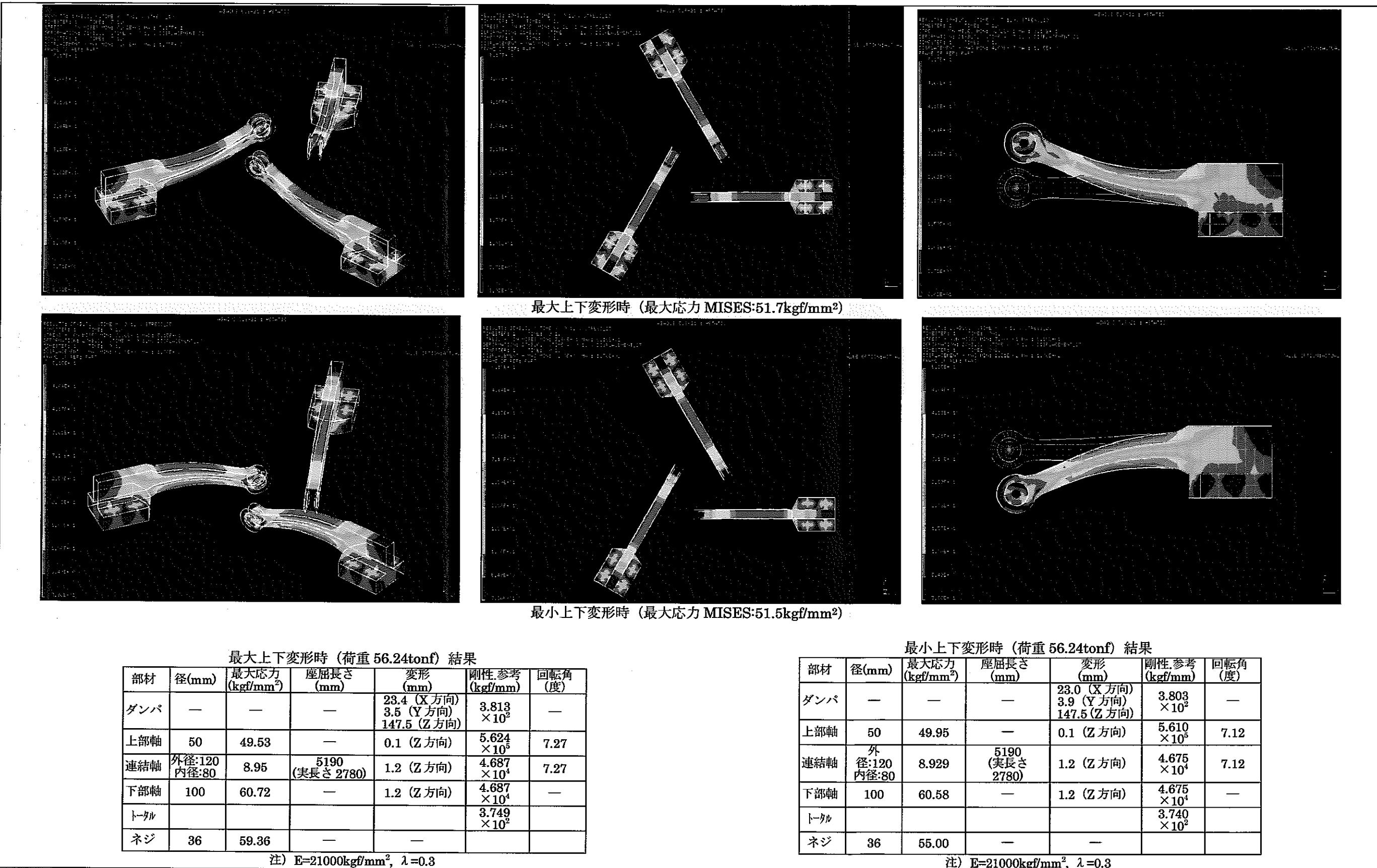


表 3.1.2-2 減衰器モデル 2(ダンパ幅 66mm)の検討結果 (荷重 61.86tonf)

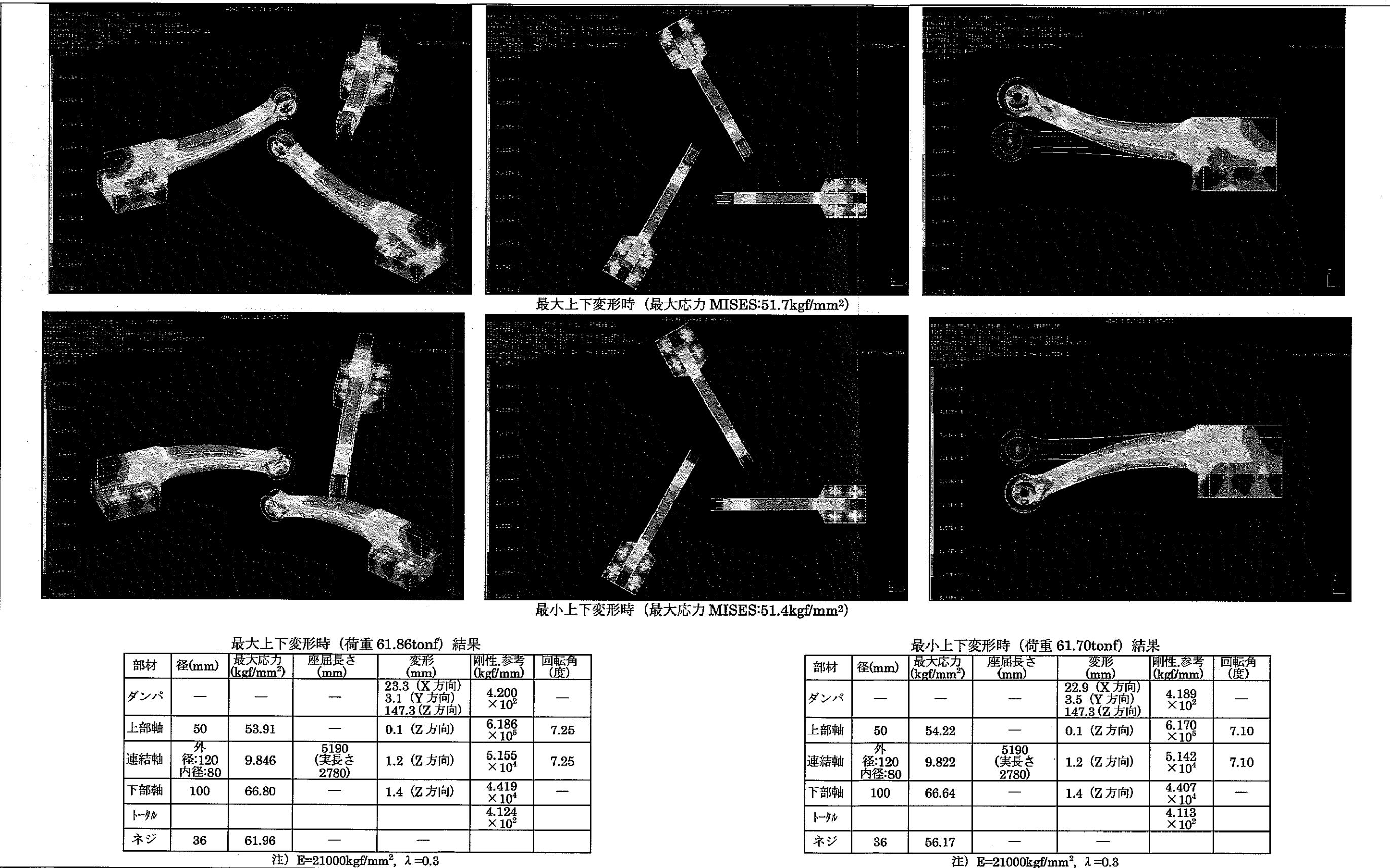
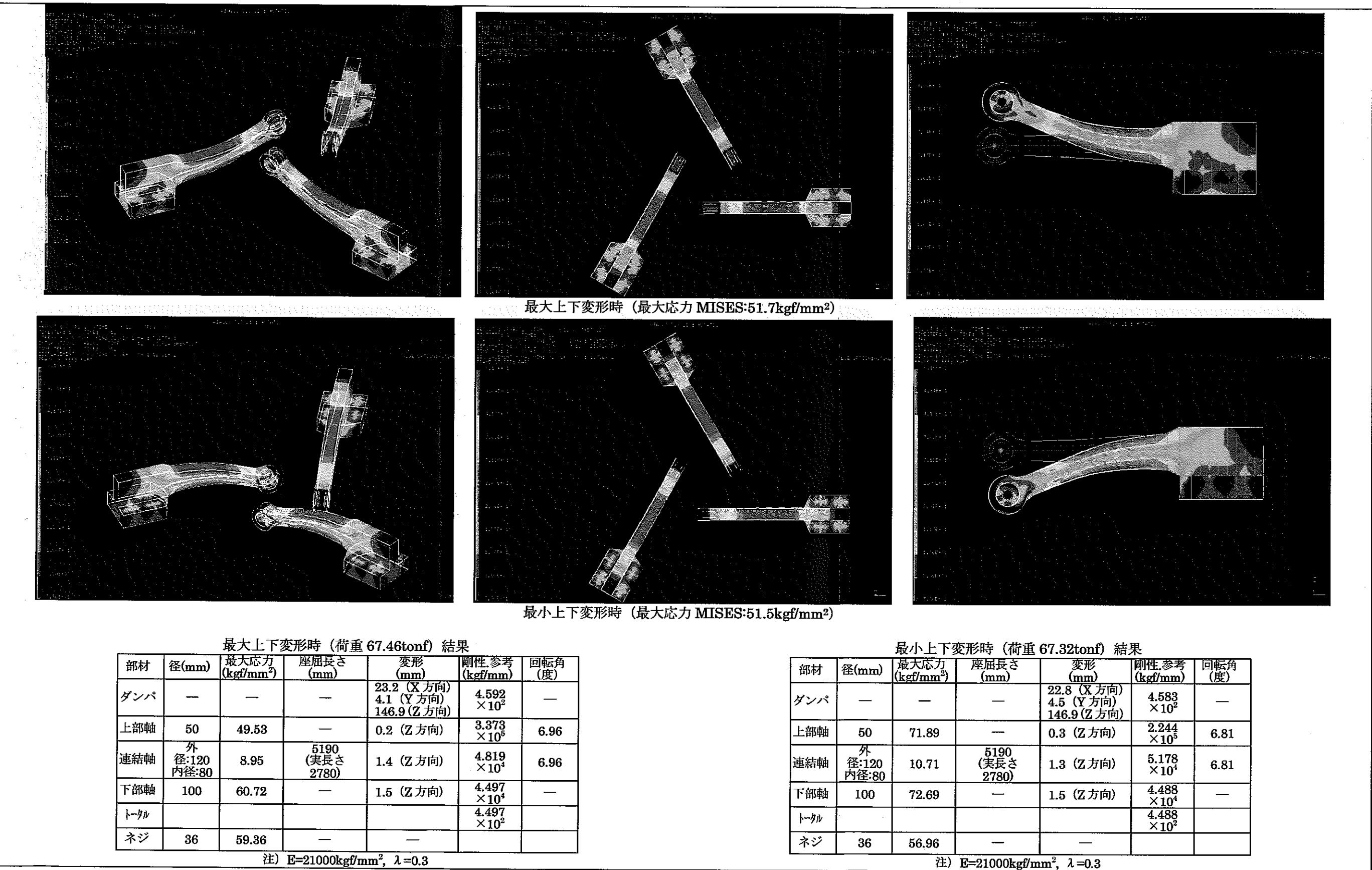


表 3.1.2-3 減衰器モデル 3(ダンパ幅 72mm)の検討結果 (荷重 67.46tonf)



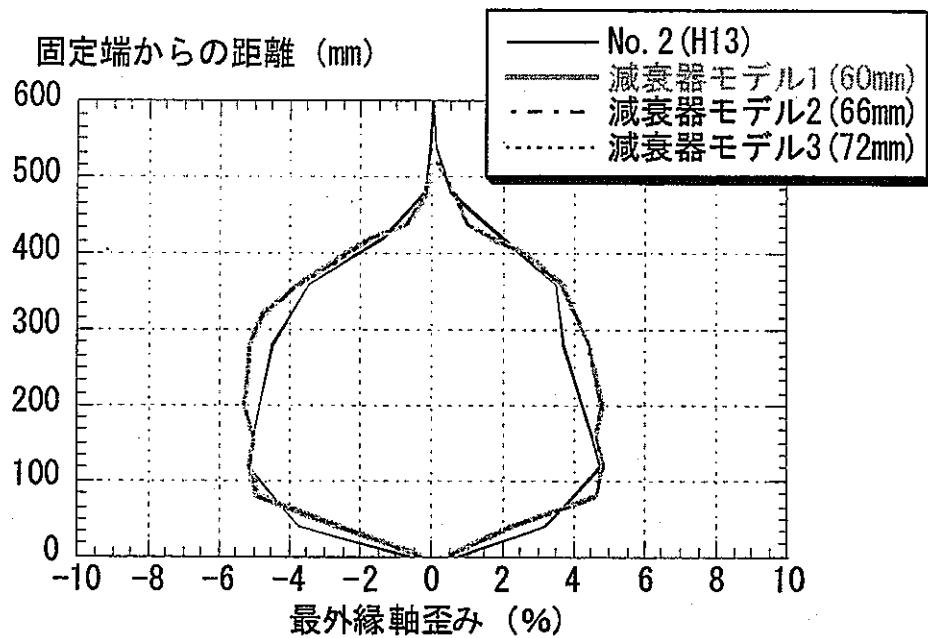


図 3.1.2-4 最外縁軸歪み分布（モデル 1～3）

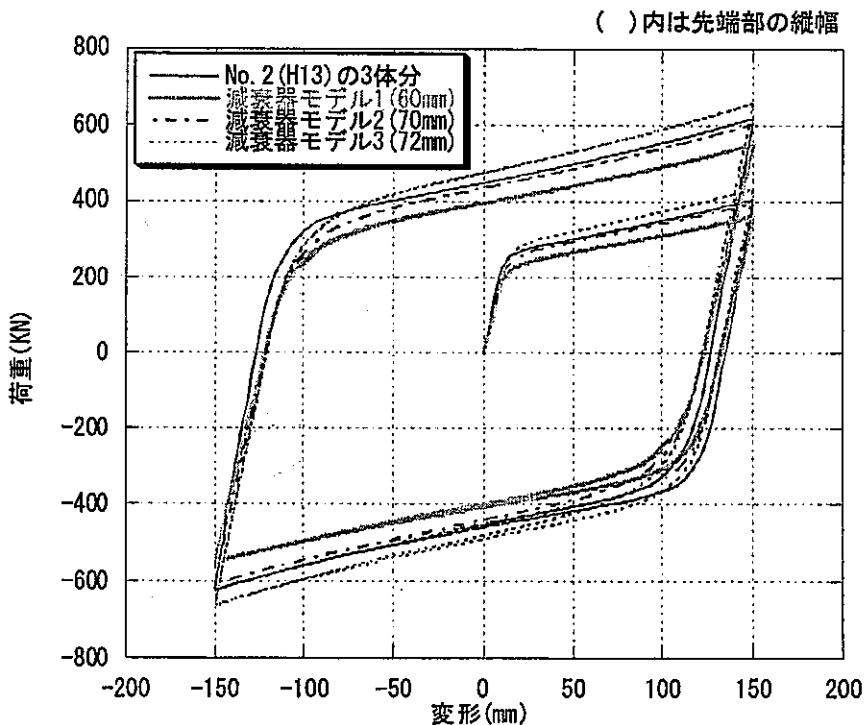


図 3.1.2-5 荷重一変位曲線（最大荷重 63.50tonf）（モデル 1～3）

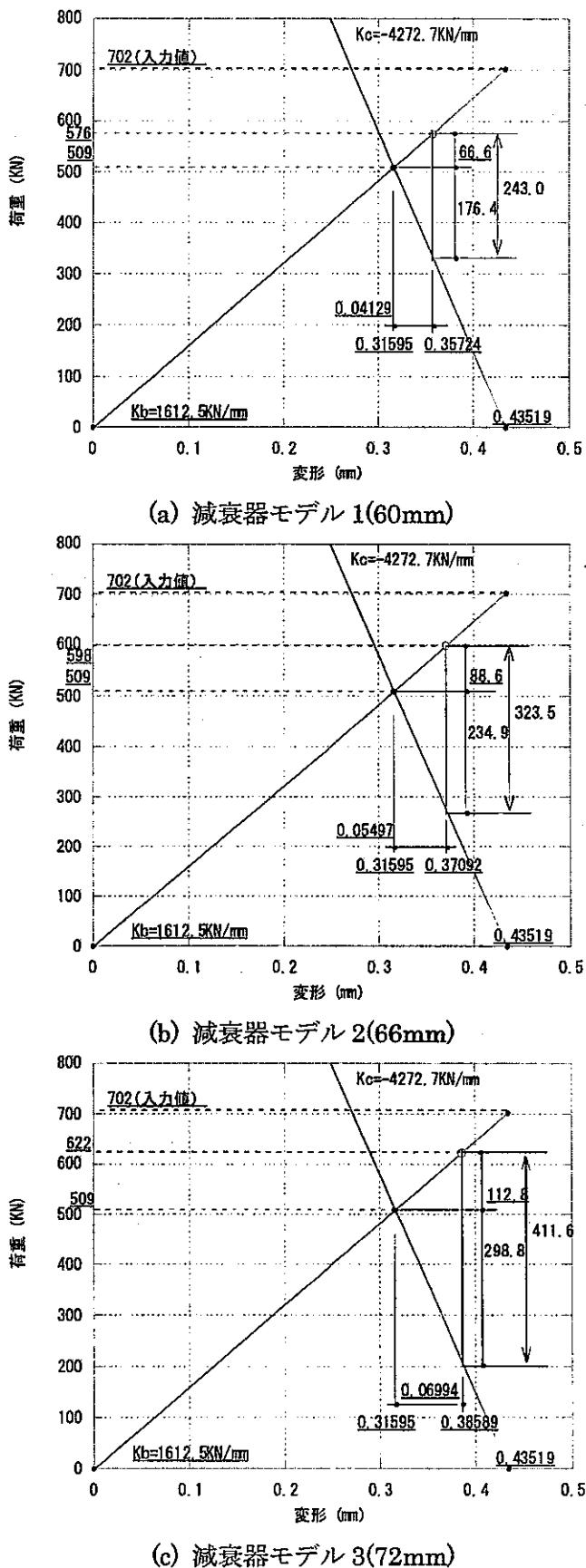
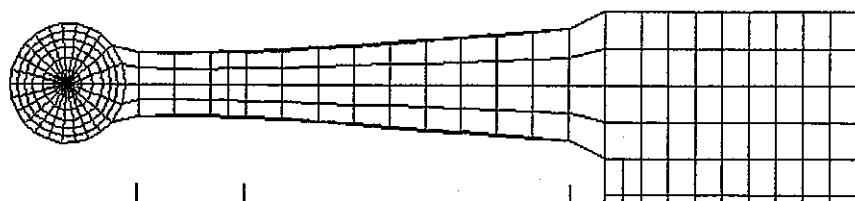
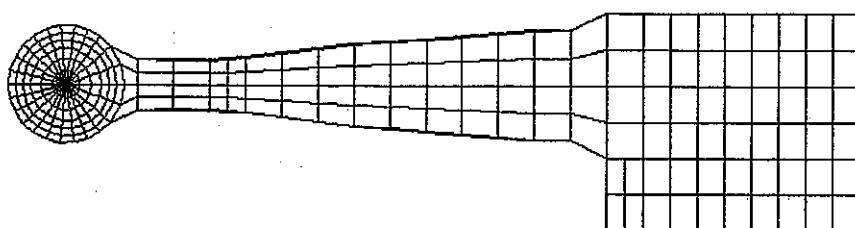


図 3.1.2-6 ダンパ固定用ボルトの応力検討結果（モデル 1～3）

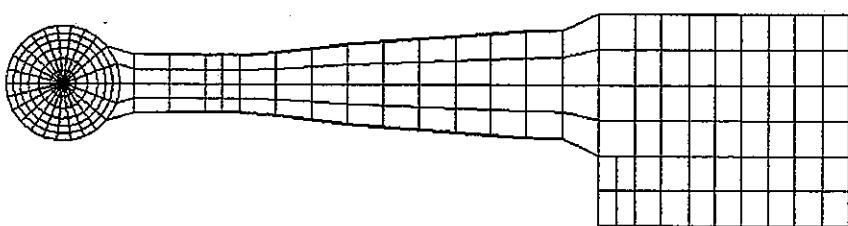
( )内は先端部の縦幅



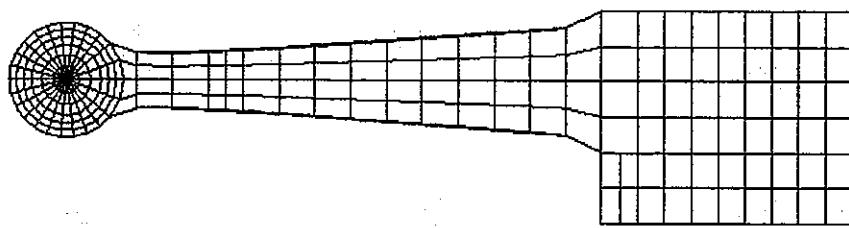
(a) 減衰器モデル 2(70mm)



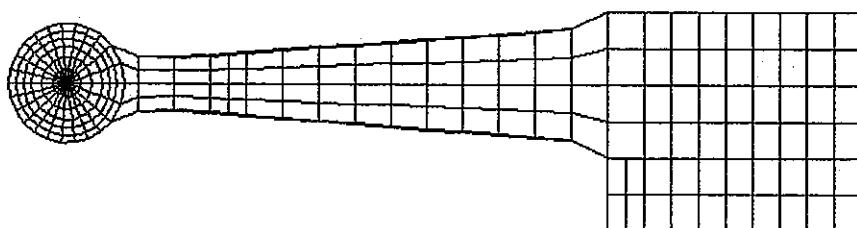
(b) 形状変更モデル 1(58mm)



(b) 形状変更モデル 2(66mm)



(c) 形状変更モデル 3(64mm)



(d) 形状変更モデル 4(60mm)

図 3.1.2-7 形状変更を行った要素単体の解析モデル

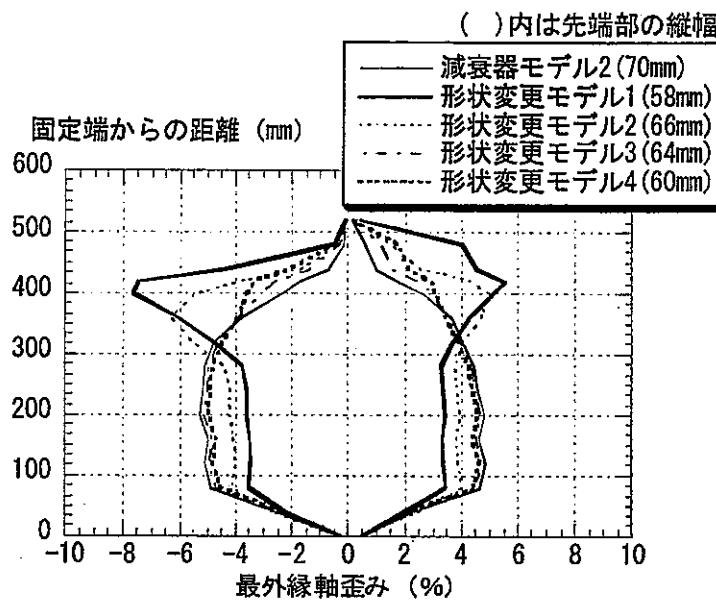


図 3.1.2-8 最外縁ひずみ分布

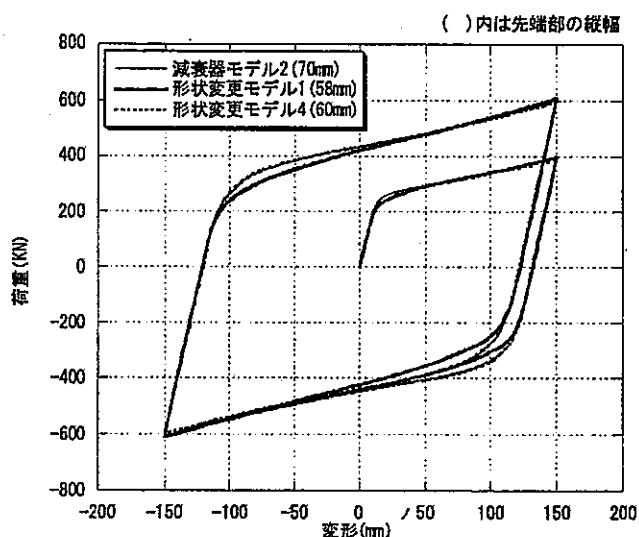
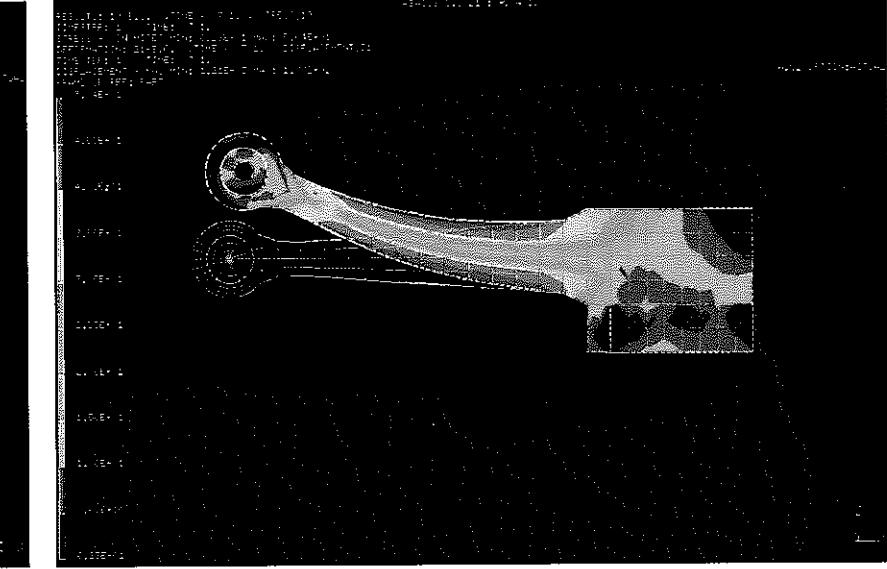
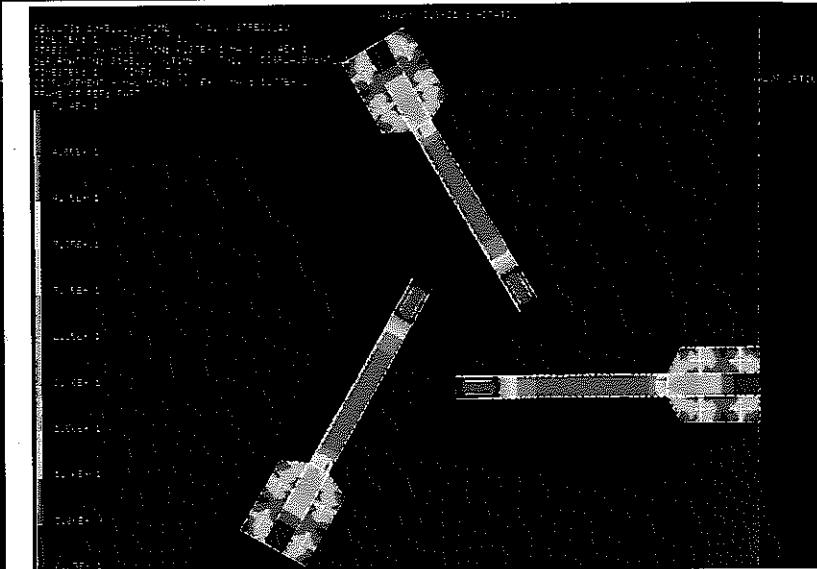
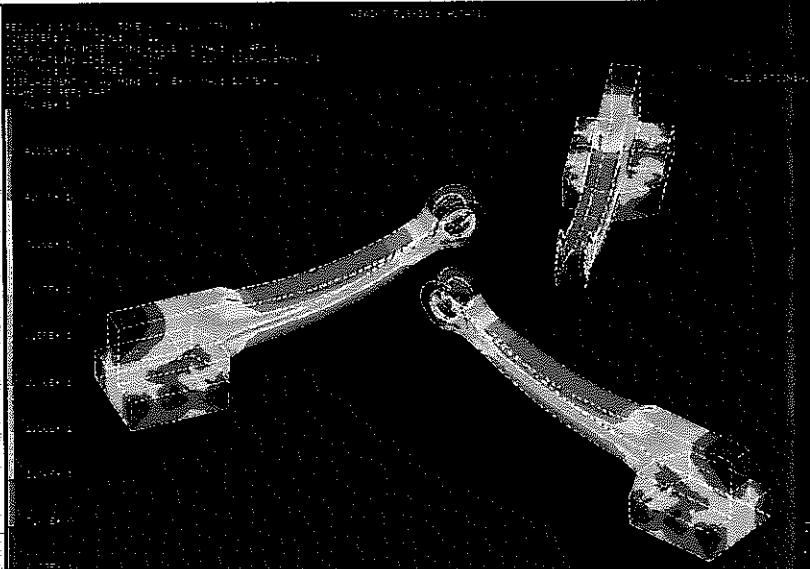
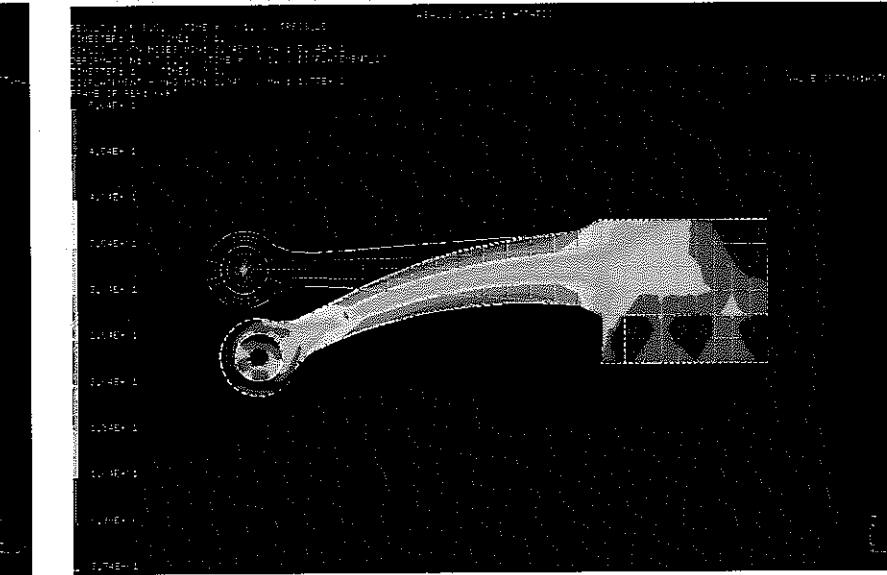
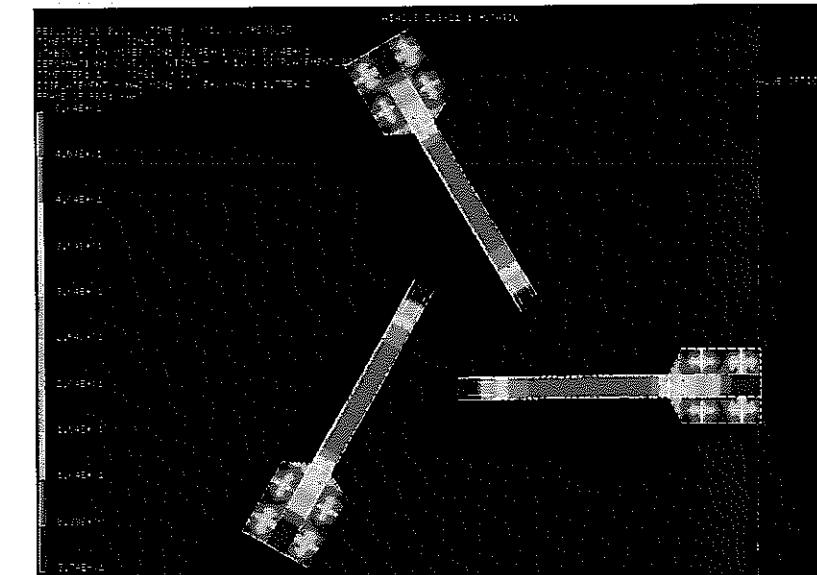
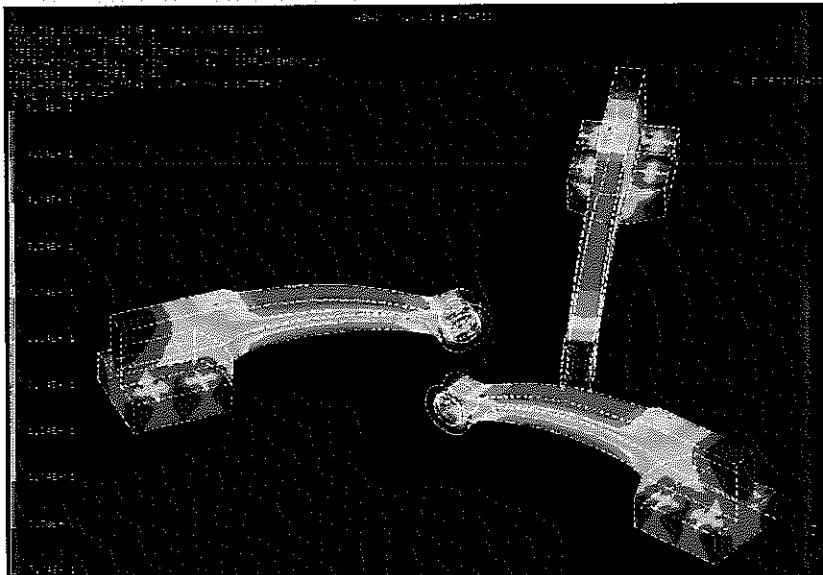


図 3.1.2-9 荷重一変位曲線

表 3.1.2-5 形状変更モデル 2(ダンパ幅 66mm)の検討結果 (荷重 60.97tonf)

最大上下変形時 (最大応力 MISES:50.4kgf/mm<sup>2</sup>)最小上下変形時 (最大応力 MISES:51.5kgf/mm<sup>2</sup>)

最大上下変形時 (荷重 60.97tonf) 結果

部材	径(mm)	最大応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )	座屈長さ (mm)	変形 (mm)	剛性参考 (kgf/mm)	回転角 (度)
ダンパ	—	—	—	24.0 (X 方向) 3.7 (Y 方向) 147.3 (Z 方向)	$4.139 \times 10^2$	—
上部軸	50	59.22	—	0.1 (Z 方向)	$6.097 \times 10^5$	7.32
連結軸	外 径:120 内径:80	9.704	5190 (実長さ 2780)	1.2 (Z 方向)	$5.081 \times 10^4$	7.32
下部軸	100	65.84	—	1.4 (Z 方向)	$4.355 \times 10^4$	—
トルク					$4.065 \times 10^2$	
ネジ	36	61.43	—	—		

注) E=21000kgf/mm<sup>2</sup>, λ=0.3

最小上下変形時 (荷重 60.95tonf) 結果

部材	径(mm)	最大応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )	座屈長さ (mm)	変形 (mm)	剛性参考 (kgf/mm)	回転角 (度)
ダンパ	—	—	—	23.6 (X 方向) 4.2 (Y 方向) 147.3 (Z 方向)	$4.138 \times 10^2$	—
上部軸	50	59.81	—	0.1 (Z 方向)	$6.095 \times 10^6$	7.18
連結軸	外 径:120 内径:80	9.701	5190 (実長さ 2780)	1.2 (Z 方向)	$5.079 \times 10^4$	7.18
下部軸	100	65.82	—	1.4 (Z 方向)	$4.354 \times 10^4$	—
トルク					$4.063 \times 10^2$	
ネジ	36	56.08	—	—		

注) E=21000kgf/mm<sup>2</sup>, λ=0.3

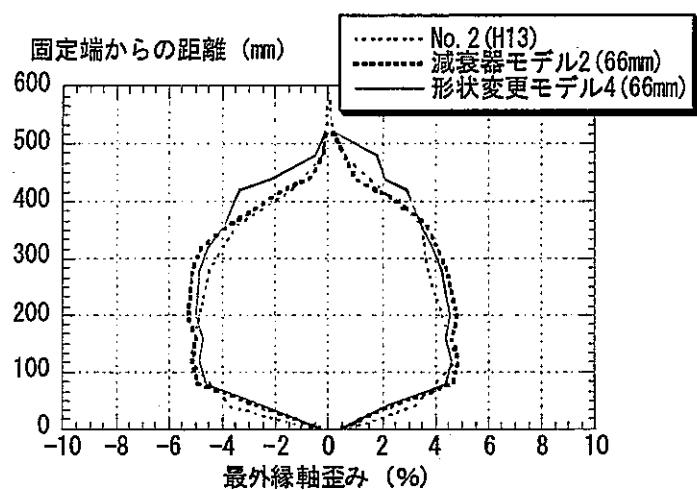


図 3.1.2-10 最外縁軸ひずみ分布

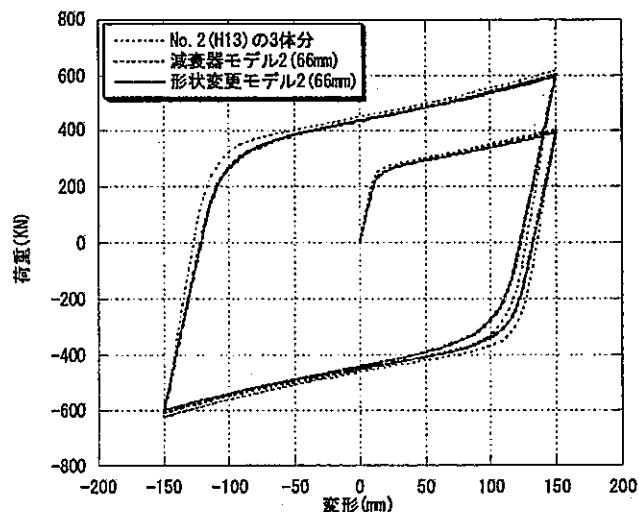


図 3.1.2-11 荷重一変位関係（最大荷重 60.95tonf）

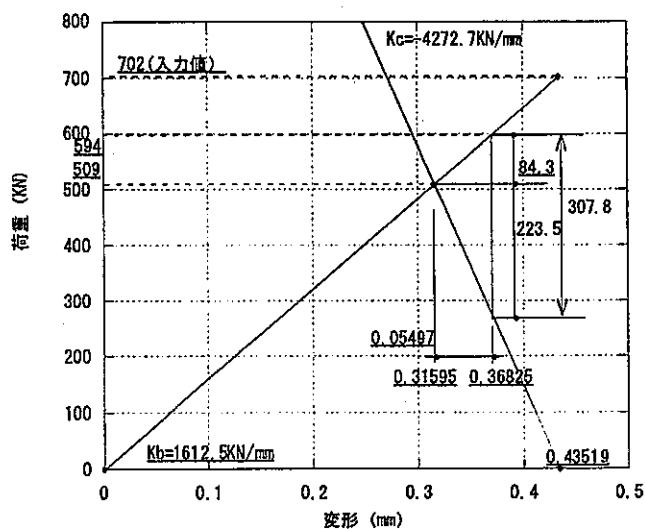


図 3.1.2-12 ダンパ固定用ボルトの応力検討結果

表 3.1.2-5 減衰要素形状の 1 次抽出

モデル No.	パラメータ			3 体の減衰力 (y 切片荷重) (kN)	評価
	有効長さ (mm)	板厚 (mm)	のど首の幅 (mm)		
1	600	60	70	400	△
2		66	70	440	○
3		72	70	470	○
4 (形状変更 モデル 2)		66	60	450	○

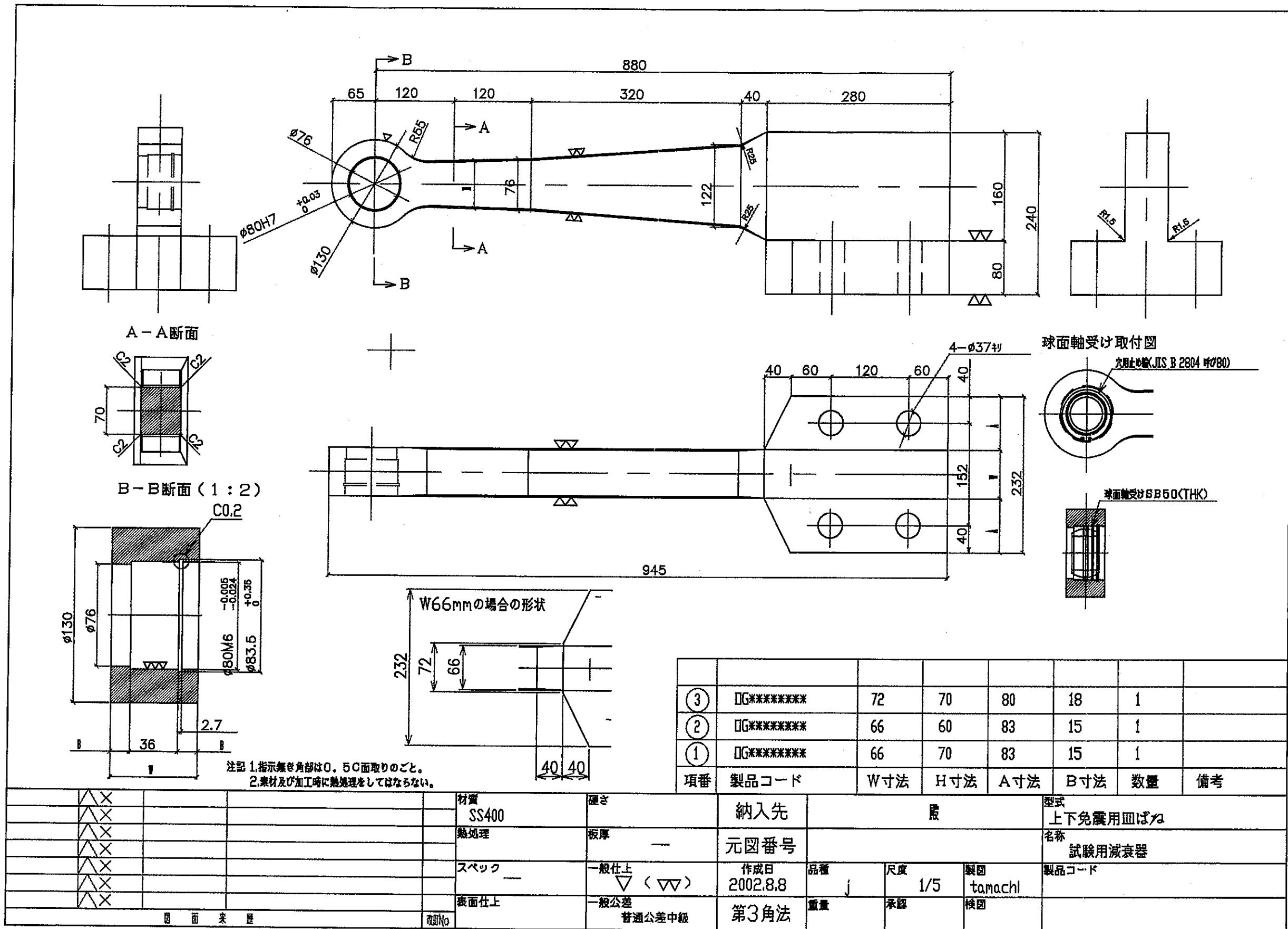


図 3.1.2-14 減衰要素の寸法

### 3.1.3 試験計画

#### (1) 試験目的

本検討では、皿ばねを用いた機器上下免震システムに採用する減衰装置の性能(減衰性能、耐力、疲労強度及び限界変位までの変形性能)を確認するため、実大規模の以下の試験を行う。

Step1 として、履歴特性及び疲労特性の観点から優れた減衰性能を発揮する減衰装置の要素形状を選定するため、正弦波加振による要素試験を行う。

Step2 として、要素試験結果を踏まえて選定した減衰装置に対して、ケーススタディ波応答波入力に対する余裕度を把握するための動的加振試験、限界変形(応答変位の1.5倍の変形)までの変形性能(変形追従性)を把握するため正弦波加振試験、及び減衰装置の荷重を受ける加力軸端部の回転軸と軸受け(球座)の強度及び回転性能に関する性能試験を実施する。

#### (2) 使用材料

減衰装置の使用材料は、入手が容易(市販)で安価である一般鋼構造用圧延鋼材のSS400を用いる。

なお、素材の材料特性(応力-ひずみ曲線)を把握するため、引張試験を行う。

#### (3) 試験体

##### a. 試験体寸法及びパラメータ

図3.1.3-1に、要素試験に用いる試験体の基本的な形状寸法(3体)を示す。また、表3.1.3-1に、試験パラメータを示す。パラメータは、板厚及び形状(のど首の幅)である。なお、試験体は、実大規模とする。

性能試験での試験体は、要素試験の結果を踏まえ、減衰性能に優れた要素形状の試験体3体を新たに製作する。3体のうち1体は応答波入力加振に用いる。設計変位±100mmの1.5倍の大変形加振では、減衰装置の変形性能及び接合ディテール(加力軸球座部の回転部性能及び減衰装置先端部加力ピンの強度及び抜出し)の変形追従性を検証することを目的としており、加力軸の回転を実現するために試験体2本を平行に組み込んだ状態にて試験を行う。

##### b. 試験体の製作方法

試験体の製作は、厚板からプラズマ切断により試験体形状に切出し、旋削機械

により所定の寸法に加工する。

(4) 試験方法

表 3.1.3-2 に加力メニューを、また、図 3.1.3-2～3 に正弦波のイメージを示す。

図 3.1.3-4～5 に、要素試験及び性能試験における加力方法の例を示す。

要素試験及び性能試験では、静的加振に準じる正弦波による加振を基本とする。なお、一部の性能試験では、ケーススタディ波にして何回耐えるかを確認するため、実時間での応答波加振を行う。

(5) 計測

図 3.1.3-4～5 に、荷重及び変位の計測方法の例を示す。荷重及び変位は、減衰装置の復元力特性(履歴特性、繰返し安定性)を評価する際に必要である。荷重は、振動台から加力軸を介して試験体に伝達するので、加力軸にロードセル(荷重検出器)を繋ぎ、直接測定する。変位は、加力軸の延長上にセットしたシャフトを介して測定する。

また、図 3.1.3-6 に、ひずみ測定位置を示す。ひずみ測定は、変形レベルのひずみ状態を調べておくため、加力方向に対して引張、若しくは圧縮となる面に片側 7 箇所、合計 14 箇所程度とする。なお、ひずみ測定は、性能試験にて実施する。

表 3.1.3-1 試験体のパラメータ

試験体 No.	パラメータ		有効長さ (mm)	全長 (mm)	高さ (mm)
	板厚 W (mm)	のど幅 H (mm)			
1	66	70	600	945	240
2	66	60			
3	72	70			

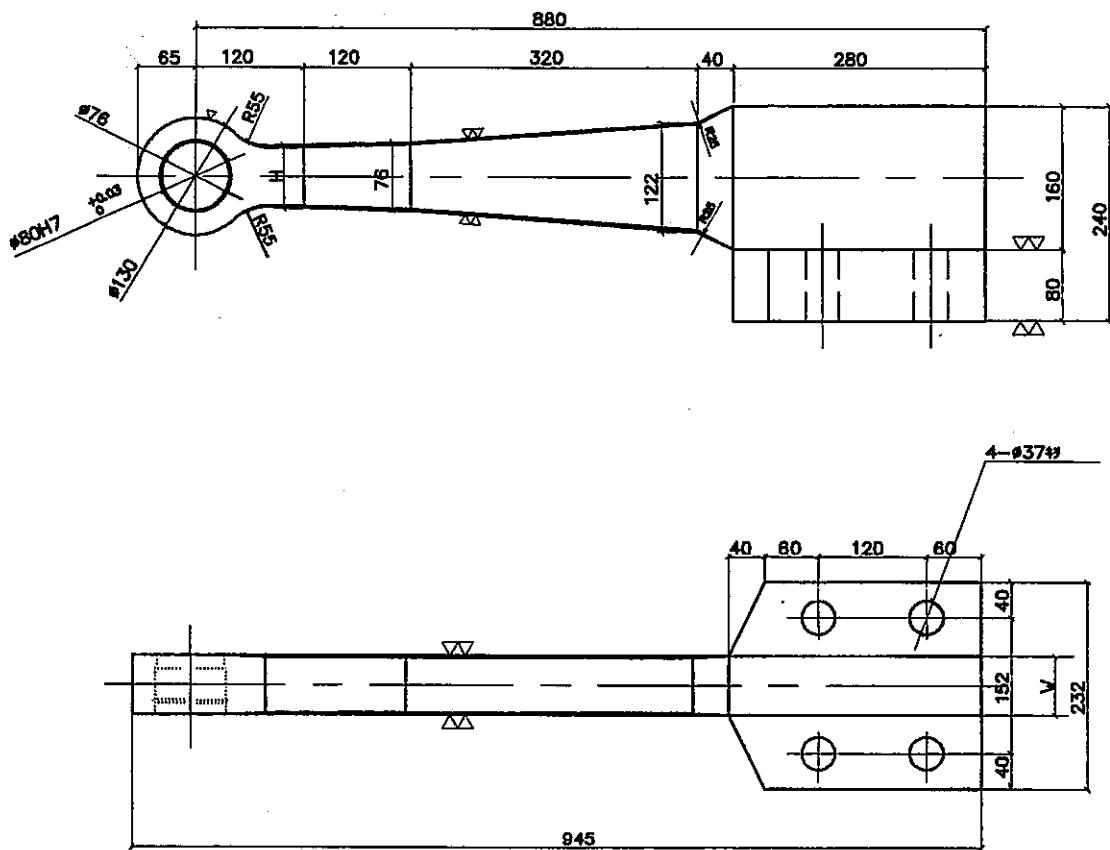
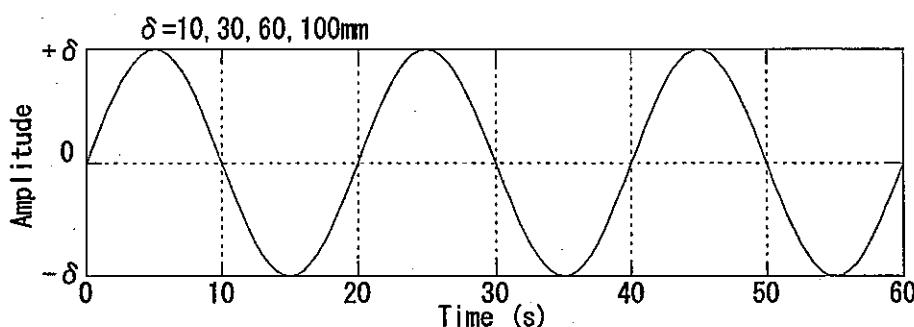


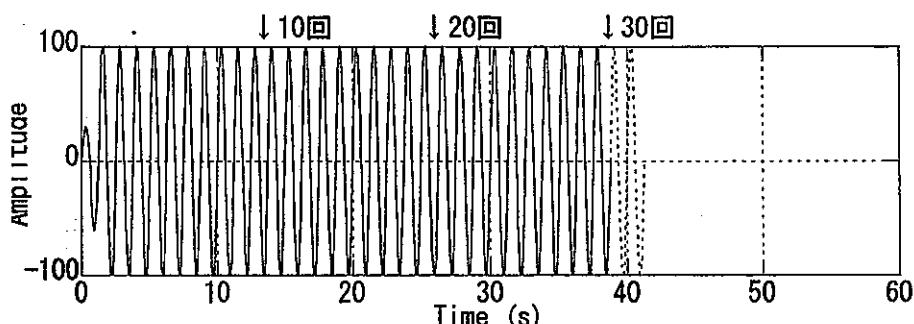
図 3.1.3-1 要素試験に用いる試験体の基本的な形状寸法

表 3.1.3-2 加力条件

試験体 No.	正弦波加振 3 回					正弦波連続加振 N 回		ケーススタディ波 応答変位波形 入力 N 回
	$\pm 10\text{mm}$	$\pm 30\text{mm}$	$\pm 60\text{mm}$	$\pm 100\text{mm}$	$\pm 150\text{mm}$	$\pm 100\text{mm}$	$\pm 150\text{mm}$	
1	○	○	○	○	—	○	—	—
2	○	○	○	○	—	○	—	—
3	○	○	○	○	—	○	—	—
4	○	○	○	○	—	—	—	○
5,6	○	○	○	○	—	—	○	—



(a) 正弦波加振 3 回の例



(b) 正弦波連続加振の例

図 3.1.3-2 正弦波加振

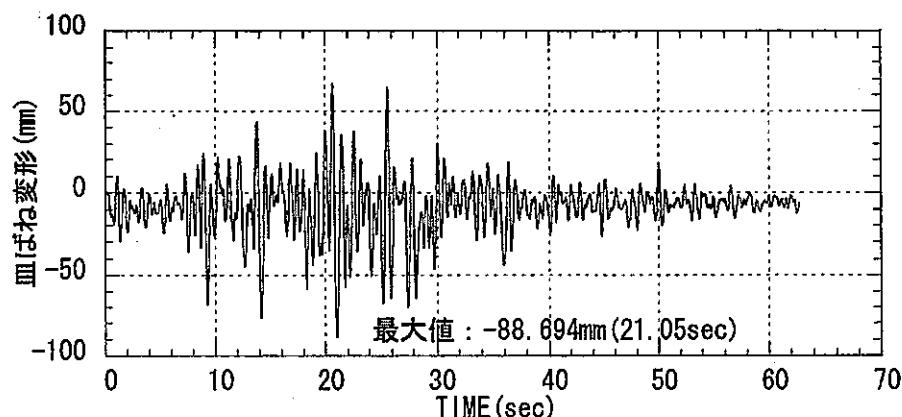
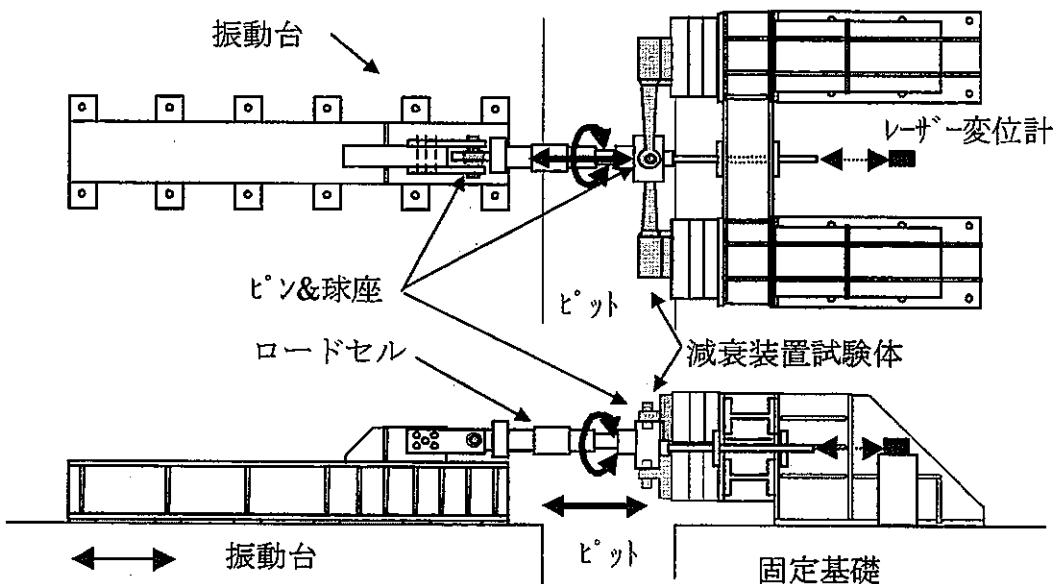
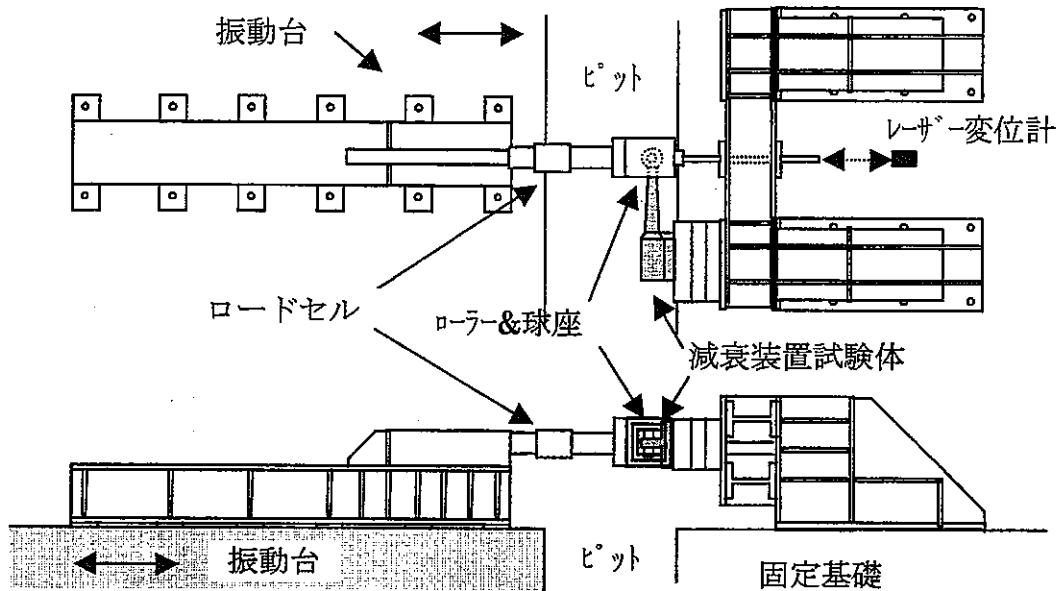


図 3.1.3-3 ケーススタディ波の応答変位波形 (最大 88.69mm)



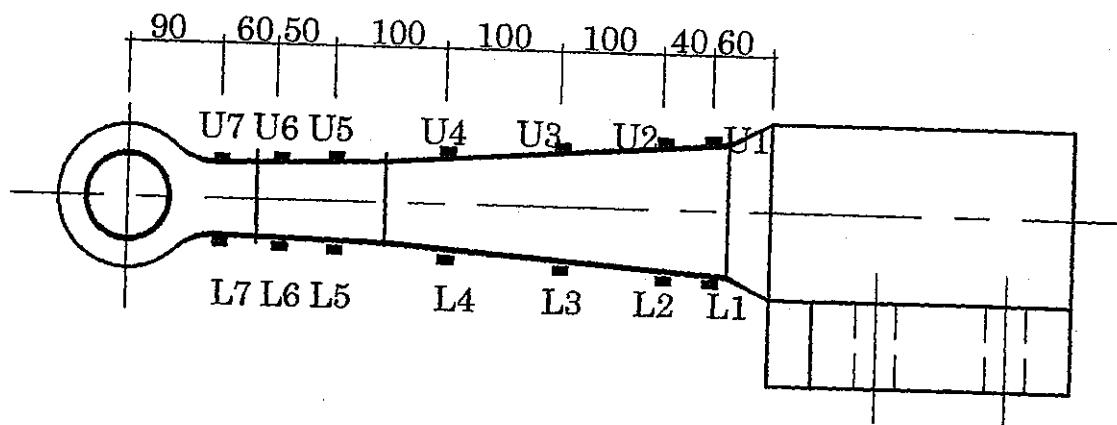


図 3.1.3-6 ひずみ測定位置

### 3.1.4 まとめ

平成13年度までの検討により、機器上下免震構造に用いる減衰要素は、その復元力特性がRO型で評価できる鋼材ダンパが適していることが分かつてきた。

この結果に基づき、減衰要素の構造計画の具体化を行い、3体の減衰要素の候補を抽出した。また、減衰要素の配置によりプラント配置への影響を検討し、その影響は殆ど認められないことを確認した。さらに、減衰性能を確認するために試験計画を立案した。