機器配管系支持部及び結合部の耐震性評価に関する研究報告書（第３報　容器配管系の振動実験）

著者	小川 信行, 箕輪 親宏, 千葉 敏郎, 小林 博栄, 相田 重一
雑誌名	国立防災科学技術センター研究速報
号	88
ページ	1-49
発行年	1990-03-30
URL	http://id.nii.ac.jp/1625/00002826/

624：699.84

機器配管系支持部及び結合部の耐震性評価に関する研究
報　告　書
（第3報　容器配管系の振動実験）

小川信行*・箕輪親宏*
国立防災科学技術センター
千葉敏郎**
日本原子力研究所
小林博栄***・　相田重一***
石川島播磨重工業株式会社

Research on Seismic Qualification of Nuclear Piping and Equipment Interacted System
(Report-3, A Vibration Test and Analysis of Vessel-Piping System)

By

Nobuyuki Ogawa*, Chikahiro Minowa*
National Research Center for Disaster Prevention
Toshio Chiba**
Japan Atomic Energy Research Institute
Hiroe Kobayashi*, Shigekazu Aida****
Ishikawajima-Harima Heavey Industries Co., Ltd.

Abstract

In this study, the authors have conducted a large vibration test of vesssel-piping system and investigated the dynamic behavior of coupled system of vessel, piping and internal liquid. The vibration test was conducted in two phases, one was dynamic response test and the other was dynamic failure test by high level excitation. The test results have shown the pipe effect on vessel dynamic response and typical failure modes of vessel support system. The liquid dynamic behaviors in piping system have clearly appeared especially in high level

*第3研究部，**原子炉安全工学部，***原子力事業部技術開発部

excitations and affected on the piping seismic response. And further, the significant effects of closed or opened condition of vessel liquid to piping response have been found.

Key words: Vibration test, Pipe, Vessel

要　旨

本研究は現実の各種施設，プラント等に多くみられる容器配管系のモデルを用いて振動実験を行ない，容器，配管および内部流体の連成を伴った地震応答挙動を考察したものである。

実験は，連成応答挙動を把握するための応答実験および大入力時の損傷挙動を把握するための破損実験を実施した。実験の結果，配管接続が容器の固有振動数に与える影響，容器支持部の塑性域での損傷挙動が確認された。また配管内流体の応答は，特に大入力時において負圧を含む顕著な応答を示し，配管の応答に影響を与えた。さらに，容器の密閉条件が配管内流体と配管の応答に顕著な影響を与えることが確認された。

キーワード：振動実験，配管系，容器

目　　次

1. はじめに …… 3
2. 試験体および実験方法 …… 3
　2.1 実験装置 …… 3
　2.2 試験体 …… 3
　2.3 計　測 …… 4
　2.4 実験方法 …… 4
3. 主要実験結果 …… 6
　3.1 試験体の特性 …… 6
　3.2 容器の応答挙動と水位条件，配管の影響 …… 7
　3.3 配管内流体の挙動と配管の応答への影響 …… 9
　3.4 配管系の応答に対する水位条件，容器の影響 …… 12
　3.5 高レベル加振による応答挙動 …… 15
　3.6 塑性域応答実験 …… 16
4. 地震応答解析 …… 19
　4.1 全系の応答解析 …… 19
　4.2 結合部・支持部の応力解析 …… 21
5. 結　語 …… 23

謝　辞 …… 24
参考文献 …… 24
図・写真 …… 25

1. はじめに

既報（箕輪ら, 1988, 1990; 小川ら, 1989）では容器と模擬配管の連成応答，配管と流体の連成地震応答などに関する振動実験および解析結果について報告した．実際の施設等では，配管あるいは容器が単独で存在することはなく，地震時には構造的あるいは流体的な連成を生ずることが考えられる．この点について，従来の解析等では，構造的連成については配管側からみた容器ノズル部のバネ定数を考慮するが，容器の解析では配管の影響は一般に無視されている．また，流体については，（特に配管内流体を）もともとDead mass（単純な慣性質量）として扱っているので動的連成効果は考慮されない．しかし，耐震解析の精度，信頼性を（特に支持部・結合部などの地震荷重の評価面で）より向上させるためには，これらの点についても逐次明らかにしていく必要がある．

このため，本実験ではより実際的なモデルとして，容器と2系統の配管から成る試験体の振動実験を行なった．この実験では容器と配管の相互干渉，流体の応答の影響，水位条件による地震応答の変動などに着目した．また，塑性化を含む損傷領域の実験は，特定の試験体であり一般性を持つものではないが，配管支持部の破断が応答に与える影響，容器支持部の最終破損挙動の確認を行なった．

なお，本実験は振動現象の把握，応答解析法の検証，合理化などを目的としたものであり，試験体の材料等の特性，設計および検査条件は一般プラントと同等のJIS仕様によるものである．また，本実験では配管内流体の流れなどアクティブな条件は考慮にいれていない．これについては別途実験を実施する予定である．

2. 試験体および実験方法

2.1 実験装置

実験には国立防災科学技術センターの大型振動台を用いた．主要諸元は表1の通りである．

表1 大型耐震実験装置（筑波）主要諸元
Table 1 Performance of Shaking Table of NRCDP, Tsukuba

Shaking Table	15 m×15 m, 170 ton
Driving System	Electro-Hydraulic System
Actuators	360 ton（90 ton×4）
Max. Model Weight	500 ton
Max. Amplitude	±220 mm
Max. Velocity	75 cm/sec
Max. Acceleration	2 G（Table only）
Frequency Range	0～50 Hz
Shaking Wave	Sinusoidal, Random, Earthquake

2.2 試験体

試験体の全体配置を図1に，また大型振動台上の設置状況を写真1に示す．

試験体の設計にあたっては，容器と配管の構造的バランスを考慮して形状，寸法，肉厚等を

定めた．その概要は表2の通りである．

容器モデル（図2）は下部スカート支持の自立型とし，アンカーボルト，ベースプレートを介して振動台に固定した．容器寸法は直径2.3 m，高さ3.6 m，肉厚6 mmであり，変形挙動などを強調して観測できるよう比較的薄肉としている．

この容器に対して配管接続のための2個所のノズル（上部および下部）を設置した．配管は送出側（A，下部ノズル）および戻り側（B，上部ノズル）を想定し，2系統のモデルを作成した．配管Aは長い直管部を持ち，比較的柔構造のモデルであり，また配管Bは通常の構造特性を持つ立体配管である．いずれの配管も，片端が容器ノズルに他端がアンカーフレームにつながる1本の配管であり，中間では図1に示す位置に支持装置（ロッドレストレイント）を設置し，上下および水平1方向への変位を拘束した．平均支持間隔は配管A，Bとも3.6 mである．

表2　試験体の概要
Table 2　An Outline of Test Model

	Material	Outer Diameter	Thickness	Nozzle Height (from vessel bottom)	Total Length
Vessel and Skirt	Carbon Steel (SS 41)	2.3 m 1.5 m	6 mm	1.4 m (Nozzle A) 2.4 m (Nozzle B)	3.6 m (Height)
Pipe A	Carbon Steel (SGP)	6 B (165.2 mm)	5 mm	1.4 m	29 m
Pipe B	Carbon Steel (SGP)	6 B (165.2 mm)	5 mm	2.4 m	18 m

2.3　計　測

計測は加速度，水圧，歪，変位等について行った．モデル全体の計測点数は以下の通りである．

容器　　加速度18点　圧力6点　歪106点
配管A　加速度17点　圧力4点　歪4点
配管B　加速度17点　圧力3点　歪4点

これらのうち，本報告で対象とする主な計測点を図3（配管A，B），図4（容器），図5（ノズル部軸歪）に示した．データ収録はディジタルデータレコーダを用い，200 Hz/ch.でサンプリングした．また，後述する圧力波伝播速度の計測では2 kHz/ch.で収録した．

2.4　実験方法

2.4.1　実験ケースと入力波

実験は動的応答実験，塑性域応答実験の2フェーズに分けて行なった．動的応答実験では，

表3　動的応答実験リスト（水位条件および入力波）
Table 3　List of Dynamic Test Conditions and Excitations

	Excitation Waves	Liquid Level in Vessel**					Note
		0%	50%	80%	100%	pr*	
Dynamic Response Test	Impulse	○	○	○	○●	○○	Displacement step shaking
	Random	○	○	○	○	○	0-40 Hz Band limitted
	ELCENTRO	○	○	○	○●	○	1940 NS component
	Earthq. E 1	○○	○	○○	○●	○○	Simulated floor response
	Earthq. E 2			○	○	○○	Twice time scale of E 1
	Sin Sweep					○	2-20 Hz, 500 sec
	Sin (resonance)	○					4.6, 7.92, 13.8 Hz
	〃		○				4.02, 8.03, 10.15 Hz, 1.6 s
	〃			○			3.84, 6.0, 7.1
	〃			○			1.575 sec (p-p 2 cm, 20 cm)
	〃				○		3.7, 5.53, 6.0
	〃					○	3.3, 3.4, 6.25, 9.6, 17.0, 16.7

Note: pr* = 100% water filled and pressurized (500 kPa)
● = Closing of air vent valve at the top of vessel
** = Water level in pipings are shown in Table 6

水位をパラメータとして応答変位，加速度，圧力等を計測した．この実験で実施した水位条件および入力波を表3にとりまとめて示した．配管の支持位置等は固定とし，変更していない．塑性域応答実験では配管支持部破損実験および容器塑性域応答実験を実施した．配管支持部破損実験では，代表的支持部に弱点を設け，支持部の破断とその時点が全系の地震応答に与える影響を評価することを目的とした．容器塑性域応答実験は支持部の損傷モード，各

表4　塑性域応答実験リスト（水位条件および入力波）
Table 4　List of Failure Test Conditions and Excitations

	Excitation Waves	Liquid Level** in Vessel			Note
		80%	100%	pr*	
Failure Test	Earthq. E 2	25[1]			Pipe Support Failure Test (Including ordinary and no support) With vessel
	Earthq. E 2			3[2]	Vessel Failure Test Excitation Level =100%, 150%, 200% With pipings

Note: pr* = 100% water filled and pressurized (500 kPa) in vessel and pipings
1) number of test piece of defective support elements
2) number of excitations for vessel with pipings
** = Water level in pipings are shown in Table 6

部の塑性化を確認するために行なった．表4に塑性域応答実験のリストを示した．なお，表には記載していないが，これらの実験に先立って容器単体の応答実験も実施し，配管結合後の応答挙動と比較した．

入力波は表3，4に示すように正弦波，ランダム波の他，各種地震波を用いた．地震波E1は模擬地震入力による建屋床応答波であり，図6に示すように7−8 Hzが卓越している．地震波E2は地震波E1の時間軸を倍にしたものであり，4 Hz付近に卓越成分を持っている．動的応答実験で水位などの条件別の比較には地震波E1を用い，また塑性域応答実験には低振動数のパワーの大きい地震波E2を用いた．ランダム波加振は各条件での応答関数の解析用に，また正弦波および正弦波スイープ加振は共振振動数とモードの確認用に用いた．

2.4.2　実験手順

実験は支持部等の条件設定後，以下の手順で加振実験を行なった．

1）水位条件の設定

2）エア抜きおよび圧力波伝播速度の計測（加圧実験の場合のみ）

3）インパルス加振による共振振動数の把握

4）共振正弦波による低レベル加振（加圧実験では正弦波スイープ加振も実施）

5）ランダム波および地震波による応答実験

6)大入力加振実験（塑性域応答実験の場合）

3.　主要実験結果

3.1　試験体の特性

3.1.1　固有振動数

満水時の一次固有振動数は，配管Aで約3.7 Hz，配管Bおよび容器で約5.5 Hzであった．しかし，密閉加圧するとこれらの値は若干変わった．また，配管内流体の固有振動数は，配管Aで9.6 Hz，配管Bで17 Hzであった．配管Aは柔構造モデルとしたため固有振動数は通常の配管系に比べかなり低くなっている．各水位条件における一次固有振動数を表5，6に示す．なお，表中の固有振動数は，ショック加振による自由振動などから読みとった値である．

3.1.2　配管内圧力波伝播速度

配管内流体自体の共振振動数は圧力波の伝播速度によって決まる．このため加圧条件のモデルについては，圧力波伝播速度の概略を知るための計測を行なった．圧力波の発生には，管端での衝撃あるいは加圧ポンプ（手動）によるショック加圧を用いた．計測は圧力計の感度を最大限にして伝播波形を収録した．記録波形の1例を図7に示した．伝播速度はエア抜き

表5　水位条件と容器一次固有振動数（Hz）
Table 5　Vessel 1 st Resonance Frequencies for Each Water Level (Hz)

Water Level in Vessel	Vessel (1 st) (in shaking direction)		Note
	Without pipe	With pipe	
0% (empty)	14.8	13.8	
50%	10.6	10.15	
80%	7.1	7.1	
100%	5.3	5.53	Opened air vent valve at the top of vessel
100% pressurized	──	6.3 (6.9)	(perpendicular direction)

表6　水位条件と配管一次固有振動（Hz, 容器と接続した配管）
Table 6　Pipe 1 st Resonance Frequencies for Each Water Level of Vessel (Hz)

Water Level in Vessel	Pipe A (1 st)	Pipe B (1 st)	Note
0% (Empty)	(Empty) 4.6	(Empty) 7.92	
50%	(95%) 4.02	(Empty) 8.03	( )＝Water level in each pipe
80%	(100%) 3.84	(100%) 6.0	
100%	(100%) 3.7	(100%) 5.53	Opened air vent valve at the top of vessel
100% Pressurized	3.3～3.4*	6.25**	*A little unstable **Very near the resonance of the vessel
	Liquid pressure		Resonance of liquid column
	9.6	17	

などの条件によって若干異なったが，ほぼ1100～1200 m/s程度の値であった．
表4の流体共振振動数を配管A, Bに等しい長さを持つ直管の開－閉端末条件での1次共振振動数と考え，これから圧力波速度を逆算すると，配管Aでは1160 m/s，配管Bでは1224 m/s程度となる．これらの値は前記測定値とほぼ対応しているといえる．

3.2　容器の応答挙動と水位条件，配管の影響

3.2.1　応答伝達関数と固有振動数

各水位条件での容器天端の応答伝達関数（ランダム波加振，振動台加速度を入力としたFFT

解析による）は図8のようである．共振振動数は表5の値とほぼ一致している．応答倍率は加振方法，ランダム波の特性，レベルやデータ処理の分解能に依存するため図の値は正弦波加振による正確な倍率と異なるが，50%水位で応答が高く，80%水位および加圧の場合が他より低いという傾向が現われている．地震波による最大応答値は後に示すように波形の成分に依存するためこの図の傾向とは異なっている．

図9は空水および80%水位条件での容器固有振動数計算値を示す．周方向次数（Harmonic number）N＝2以上のいわゆるオーバルモードは今回の実験ではほぼ対象外である．また，N＝1のビームモードでも軸方向1次以外は対象外である．ビームモード1次の実測値は計算値とかなりの差がある．これは，計算では支持スカート下端の固定用フランジ，固定用ボルトなどを完全に剛としているためである．

3.2.2　水位条件と最大応答値

図10に水位条件別の最大応答値（振動台加速度，容器加速度および容器ノズル部軸歪）を示す．容器加速度，ノズル部軸歪は地震波E1, E2の場合，80%水位でもつとも高い応答を示し，容器天端で最大5G程度となっている．この水位での容器固有振動数が，入力波の卓越成分に合致するためである．ELCENTRO波入力の場合は応答自体は地震波E1, E2の場合に比べかなり低いが，100%水位で相対的に高い応答となる．また，図のノズル部軸歪ではノズルAの上下の軸歪（G69, G71）が他に比べて顕著な応答を示している．これから容器の加振方向ロッキングがノズルの応力に大きな影響を与えていることがわかる．配管Aの容器近辺の支持方法（図1にみられるように比較的近い位置に上下と加振方向水平の拘束がある）がこの挙動をもたらしているものと思われる．配管Bのノズルの歪は小さく，容器近くの配管の加振方向拘束が弱く，配管が容器の動きに追随していることがわかる．なお，100%水位で，自由液面（容器天端の空気開放弁を開にした条件）と密閉加圧の場合では容器加速度およびノズル歪に若干の差があるが，両条件での固有振動数の差が影響したものと思われる．

3.2.3　容器の内圧低下現象

容器には最上部にエア抜きのためのバルブを設けており（図11），密閉加圧条件ではこれを閉鎖し，また80%以下の水位ではこれを開放して実験している．100%水位の場合は，この弁の開閉の影響を確認する実験を行なった．（この場合，図11の開放弁からの空気排出は接続したホースを経て容器下端に通じている）．配管への影響などについては後に述べるが，容器自体への影響としては100%水位で弁開放の場合に容器の内圧低下現象がみられた．すなわち，容器内のスロッシングにより，容器上部からホースを通じて空気と水が排除されるが，ホース内に滞留した水の水頭，ホース外からの大気圧，容器上部での残留空気量のバランスによって容器上部での残留圧（初期は大気圧に等しい）が定まる．これらの量はホース（一般には開

放弁につながる配管）のレイアウトなどに依存するところが大きい．この実験ではほぼ容器の静水頭に相当する変動を生じた．図12にこのときの計測波形（容器内圧，容器周歪および軸歪）を示す．わずかであるが，歪にも対応した変化を生じている．

このような現象は，既に知られているようなスロッシングによる負圧発生現象に類似した現象の一つとみることができる．変動量自体は通常のレイアウトでは高々容器の静水頭程度であり，応力評価上は問題にならないが，振動によって系の静的な荷重バランスが変わるという意味で興味ある現象の一つであろう．

3.2.4 容器に対する配管の影響

容器の固有振動数（ビームモード1次）に対する影響は表5に示されているが，これを図化したものが図13(a)である．容器の水量が少ない場合は，配管を接続すると容器の一次固有振動数が低下することがわかる．空水時では1Hz程度の低下があり，これは入力波にもよるが地震応答に少なからぬ影響を与えると思われる．他方，水量が増えると低下傾向が小さくなり，100%水位では逆に配管接続の場合に固有振動数がやや大きくなる傾向がみられる．

以上の点は定性的には以下のように説明できる．すなわち，容器に対する配管の影響は大別して付加質量効果と付加剛性効果に分けられる．容器水量が少ない場合，（容器自体の質量はあまり大きくないので）配管接続による質量効果が（配管による容器の拘束，すなわち配管の剛性効果よりも）大きく現われ，固有振動数を低下させる．容器の水量が増えると（それによる質量はきわめて大きいので）配管の質量効果は無視できる程度になる．配管の剛性効果はそのまま残るので配管接続により固有振動数が少し上がる．中間の水量（今の場合80%）では配管接続による質量増加と剛性増加がキャンセルして容器の固有振動数がほとんど変わらない結果になる．

図13(a)で80%水位での容器固有振動数は配管接続にかかわらず同じ値であるが，地震波による応答をみると図13(b)のように若干の差異を生じている．すなわち，容器の全体的な応答を示す加速度A－4，5，6（加振方向X），A－11，12（上下Z）等では配管有り，無しで応答量にあまり差がない．しかし，ノズルに比較的近いA－7（X）では配管をつけた場合の方が2倍程度の応答を示している．また，A－8（Y）等の加振直角方向の応答は応答量だけでなく波形にも顕著な差が出ており，配管（B）の拘束による容器自由振動の抑制効果（波形の違い）また配管（B）からの入力効果が現われている．

3.3 配管内流体の挙動と配管の応答への影響

流体条件が配管の応答に及ぼす影響をみるため，満水で加圧した場合と加圧しない場合（容器上部のエア抜き弁は開放）の応答を比較した．

3.3.1　配管Aの応答挙動

図14は満水加圧および非圧の場合の配管Aのランダム波加振による圧力応答から求めた応答曲線（振動台加速度を入力とした伝達関数）である．このときの振動台加速度は加圧条件，非圧条件の場合とも約150 Gal程度，また容器天端の最大加速度は848 Galおよび995 Galである．非圧条件でやや大きくなっているのは両条件で容器の一次固有振動数がやや異なることと入力波の特性によるものである．

加圧条件での圧力の応答曲線には4つのピークがみられるが，3.6 Hz付近は配管自体の固有振動，6 Hz付近は容器からの影響，また9-10 Hz付近は前述の流体応答，13 Hz付近は配管の高次モード（上下振動が主）の影響によるものと考えられる．

これに対し，非圧条件では応答が小さく，配管の応答が顕著な3.6 Hz付近でのピーク以外は加圧条件でのピーク振動数と異なっている．これは非圧条件では，圧力の応答が負圧による拘束を受けて逸散するとともに非線形的な挙動を示すためと思われる．なお，この時の加振による圧力応答のピーク値は，加圧条件で80 kPa，非圧条件で30 kPa程度であった．

一方，配管Aの加速度は代表点で図15のような応答曲線を示した．加圧条件では圧力の応答曲線とほぼ対応する位置に応答のピークがみられる．非圧の場合は圧力と加速度の応答が対応するピークと対応しないピークがみられる．なお，図15に対応する応答波形のピーク値はいずれの場合とも550 Gal程度であった．

加圧条件と非圧条件でのこのような応答の差異は加振レベルが高くなるとより顕著に現われる．図16はこのような場合の応答例である．配管の応答加速度のピーク値にはあまり差がないが，波形をみると応答の状況がまったく異なることがわかる．この場合の加圧条件での圧力応答波形の主成分（前述の3.6 Hz付近）は，流体自体の共振的応答によるものではなく，配管の応答に付随して生じているものである．

以上のデータにもとづいて，地震時の配管内流体の挙動について考察してみる．

まず，同じ圧力の応答であっても流体の挙動の違いにより以下のような差異がある．すなわち，ある振動数で加振されている配管から流体に伝えられるエネルギーは流体内の各点で運動エネルギー（慣性質量効果）あるいは圧力エネルギー（バネ効果）の形で（時間的に）交互に現われる（減衰力により消散する部分を除く）．前者は流体の全体としての振動（剛体運動に相当する）エネルギーと圧力波の伝播に伴う流体粒子の振動エネルギーからなる．今の場合，系の柔構造特性および入力波の特性のため，圧力波の伝播による流体の共振的応答は小さい．従って，流体の有するエネルギーはほとんど剛体運動によるもので，これが運動エネルギーまたは圧力エネルギーの形で現われている．すなわち，上に述べた圧力の応答は流体のDead massとしての挙動にほぼ対応するものである．図14にみられた容器からの影響，配管の高次モードなどによる圧力の応答も同じ挙動が（別の振動数で）現われたものといえる．

一方，入力および配管系の条件によっては，圧力波の伝播による共振的応答（前述の9-10

Hzが顕著に生じた場合を考えている）が現われる．この場合に圧力応答として観測されるものは，（流体の剛体運動に対応するものも含まれるが）主として流体粒子の波動運動のエネルギーに対応するものである．配管内流体をDead massとしてモデル化するか，あるいは波動として取り扱うかという選択は上に述べた流体の挙動のいずれを対象とするかということと関連している．地震波加振などでは図16の波形にも現われているように，上に述べた流体の二つの挙動が混在して生じ，いずれが強く現われるかは，入力および系全体の特性に依存する．

次に満水で加圧されていない場合はどうかという問題がある．上に示したデータをみると圧力波の共振的な応答は生じていない．また，流体のDead massとしての挙動もみられない．圧力にパルス状の応答が顕著に現われ，配管加速度の応答などにもその影響が現われている．これは配管内流体の第3の挙動であり，その特徴は負圧領域での流体の異常応答である．流体が前述のような振動エネルギーを担うことができるのは，それが（変動する）圧力エネルギーの形をとりうる場合だけであるが，加圧されていない場合，負側への圧力応答が頭打ちとなり，いわゆる負圧領域にはいる．加圧されている系でも入力レベルが高く，設定圧が比較的低い場合は同様の現象が起こる．この状態で，流体への入力が大きくなると流体内にキャビティ（空洞）を生じ，振動のエネルギーの一部はこのキャビティの発生に伴う熱流体過程とキャビティの崩壊にともなう圧力パルスの放射に費やされる．この点については配管への影響も含めて3.5節であらためて取り上げる．

なお，図16の加振で加圧条件および非圧条件での振動台最大加速度はそれぞれ652 Galおよび638 Galである．またこの時の容器天端での加振方向最大加速度はそれぞれ3028 Galおよび2307 Galであり，加圧条件での容器の固有振動が入力波の特性に近いため応答が大きくなっている．

3.3.2 配管Bの応答挙動

配管Bの場合も基本的な事情は同様である．図17は図14と同じ加振の場合の配管B端末での圧力応答曲線である．6 Hz付近のピークは（流体がDead massとして振舞う場合の）配管Bの1次固有振動（容器の固有振動もこれに近い）によって生じたものであり，17 Hz付近のピークは流体自体の固有振動により生じているものである．配管Bの場合は（加圧条件では）流体独自の応答が成長し，配管または容器の固有振動に強制されて生ずる圧力応答成分は小さくなっている．なお，応答波形の最大値は加圧条件，非圧条件ともに60 kPa程度であるが，波形は図17と対応してまったく異なっている．

他方，図18は配管Bの中央部の加振直角方向の加速度応答を比較したものである．加圧条件の場合，流体の圧力応答が顕著に生ずる17 Hz付近で配管の加振直角方向の応答にも対応する顕著な応答を生じていることがわかる．非圧条件の場合は，配管Bの1次（あるい容器

表7　配管内流体の地震応答挙動
Table 7　Liquid Behaviors in Piping Subjected to Seismic Excitation

Liquid Behavior	Condition to occur		Effect on Piping Response
	Frequency Range	Liquid Condition and Excitation Level	
Mass-type Response	Far away from liquid resonance frequency	Pressurized (low level) Non-pressurized (low level)	Inertia force in vibration direction (Dead mass effect)
Wave-type Response	Near liquid resonance	Pressurized (low-high level) Non-pressurized (fairly low level)	Dynamic coupling Liquid forces by pressure difference in pipes
Negative Pressure	Any	Pressurized (High level) Non-pressurized (low-high level)	Impulsive acceleration Dispersion of energy

の固有振動数と近接している）および配管Bの2次モード（8.4 Hz付近）の応答が卓越している．この2次モードの配管振動は容器水位80%（配管B水位100%）の場合にも同様に現われており，配管B自体の持つ固有振動である．しかし，この配管振動に励起された流体の応答は図8にみられない．この配管Bの例のように，配管内流体の応答が配管に与える影響の一つは，振動の方向ではなく，差圧の方向に配管起振力を生ずるという点である．

なお，応答波形の最大値自体は加圧条件で337 Gal，非圧条件で434 Galとなっており，非圧条件で容器の応答が大きくなっていることの影響を受けている．

図19は同様にやや入力レベルが高い場合の応答波形である．これは図16で示した加振の際の配管Bの応答波形である．この場合は，圧力，加速度ともに加圧条件の方がずっと小さくなっている．また，振動数成分に違いがあることがわかる．この相違の理由としては，非圧条件では，図18にみられた8.4 Hz付近の応答特性が入力波（E1波）の特性に合致したため大きい応答を生じたこと，一方，加圧条件では流体の応答は生ずるが，入力波の主成分が10 Hz以下であり，17 Hz付近の圧力応答をほとんど励起しないこと，非圧条件のように8.4 Hz付近の応答をほとんど生じないためである．なお，容器の加振方向振動は前述のように加圧条件の方が大きいが，配管Bへの入力効果が大きいノズル部での（加振直角方向）最大加速度は加圧条件で834 Gal非圧条件で1008 Galである．

以上，本実験でみられた配管内流体の挙動を取りまとめると表5のようになる．

3.4　配管系の応答に対する水位条件，容器の影響

3.4.1　水位条件と最大応答値

ここでは代表的な加振データを水位別に比較してみる．表5，6に示したように水位条件によって容器及び配管系の固有振動数が変わるので地震波による応答も当然変動する．但し，

容器水位50%以上では配管Aは95%以上，また容器水位80%以上では配管A，Bともに100%注水状態になっている．従って容器水位50%以上では配管Aはほぼ同一条件，また容器水位80%以上で配管Bはほぼ同一の条件である．

図20は対象部位別に水位条件によるE1波加振（図10と同一条件）による最大応答値を比較したものである．入力は50%水位の場合にやや大きいが他の場合はまったく同一である．

配管Aの変位はほぼ1次モードのみによって決まるので，水位条件による違い，特に密閉加圧条件と他の条件との差異が明瞭に現われている．この1次モードによる配管の変位応答には流体自体の固有振動などはまったく関与していないので，この差異は前項にも述べたように管壁から流体に伝えられた圧力エネルギーを維持できる場合（密閉加圧条件）と維持できず逸散してしまう場合（非圧開放条件）の違いにより生じているものと考えられる．

配管Aの加速度は水位0，50%の場合に全般的に低い応答となっているが，他の場合は各モードの影響が重なりあうため測定点によってまちまちである．配管Bの加速度も同様であるが，容器水位50%以下（配管Bは空水）で1次固有振動数が入力の卓越振動数に近いため応答が大きくなっている．

圧力応答では，配管AのP－9，10（端末付近）では密閉加圧の場合に応答が大きくなっているが，他では開放条件の場合の方がピーク値が高くなっている．これは前述のように，負圧に伴う圧力パルス（ひげ状の応答波形）のためである．

3.4.2 容器上部エア抜き弁開閉の効果

密閉加圧条件で配管Aの変位応答が顕著に大きくなることをみたが，次に加圧しない100%水位条件（非圧）での応答に着目する．

これまでのデータは（密閉加圧条件の場合を除き）容器天端エア抜き弁を開放した条件での計測値であった．以下では，このバルブの開閉による応答の差異を検討する．

実験結果をみると，このバルブの開閉条件は容器の応答にはほとんど何の影響も与えなかったが（図21(a)，(b)），配管の応答にはかなり明瞭な差異を生じた．最も顕著なものは配管Aの長い直管部の変位であり，図22(a)に示す通りである．バルブ閉の場合は開の場合の2倍程度の応答になっている．（なお，加圧した場合は，閉の場合のさらに2倍程度の変位応答になる）．また，同図(b)のように配管Aのサポート支持力にも同じ傾向が現われている．

この応答の差異の様子を波形でみたものが図23である．振動台加速度（A1X）および容器天端加速度（A6X）は両ケースでほとんど同一であることがわかる．これに対し，配管Aの加速度，変位および圧力の応答は異なった挙動を示しており，閉の場合に配管の1次モードが鮮明に現われているが開の場合はこれが乱れて成長していないことがわかる．圧力の応答は負圧後の衝撃圧により生じているものとみられるが，閉の場合の方がかなり高くなっている．配管A，Bの加速度応答もバルブ開閉により明瞭な差異を生じているが，この場合，各振動モー

ドの影響のため測定点により大小関係が異なっている．

このバルブの開放による容器内流体のスロッシングによる溢流は極めてわずかであり，バルブ開閉が系の応答に与えると思われる影響は圧力波として伝わってきたエネルギーを逸散させるかどうかという点にあると考えられる．従って以上の差異は，振動により系内の流体に与えられたエネルギーの逸散が開放条件で大きく，閉鎖条件で小さくなったために生じているものと推定される．

3.4.3　応答再現性

加振の反復により流体の条件（気泡の発生あるいは消滅など）が変わるために応答が変化することが考えられる．このため応答の再現性に関する加振を行なった例が図24(a)，(b)（水位80%条件および加圧条件）である．この図から加振の繰り返しにより最大応答値に若干の応答変動を生ずることがわかる．

なお，振動台および容器加速度の最大値はほとんど同じである．また，配管B系では2，3の点で多少の差異を生じた程度である．一方，配管Aの変位以外でも加速度，圧力，アンカー部応力の最大値にかなり明瞭な差異を生じた．波形を見ると衝撃状の成分で差が生じている．主な原因としては前述のように加振によって流体内部の条件が変化することが考えられるが，この点を明瞭にするためには流体条件を正確にコントロールした実験が必要である．

前項で述べた容器上部弁の開放・閉鎖条件による応答の差異は，ここで述べた流体の条件変化による差異よりもずっと大きいので，バルブの開閉条件自体が（流体の挙動を介して）応答の変動をもたらしたものと考えられる．

3.4.4　スロッシング領域での容器と配管の応答

80%水位での容器内の水のスロッシング共振振動数は0.63 Hz (1.575 sec) であった．この振動数で加振したときの応答を図25に示す．振動台の加振変位は全振幅20 cmである．容器の応答は水の動きに強制されて生じているものであるが，天端で300 Galを越えている．ノズルの配管側軸歪ではノズルAの上下位置（G69, G71）で比較的大きい曲げ歪（上下で位相反対）を生じている．これは容器の（スロッシングに強制された）ロッキングによるもので，容器の上下加速度（A15Z, A18Z）にも同じ傾向が現われている．

ノズル位置での水圧変動は，ノズルAはスロッシングの影響がそのまま現われ，2～3 kPa（水頭にして20～30 cm）となっている．ノズルBはスロッシングの中立位置付近にあるため変動は小さく10 cm程度である．他方，配管内の圧力はずっと大きく10～30 kPaとなっている．この変動分にはスロッシングによるものも含まれているが，ほとんど配管内水の静的応答によって生じているものである．すなわち，振動数が低いので配管内水には（管を傾斜させたときと同様の）静加速度が作用し，これによる静水圧応答振幅P (kPa)＝αL/200（液体密

度＝水，α：加振加速度振幅 Gal, L：配管有効長さ m）が有効長さの両端で生ずる．この値は図 25 の実測値と大略一致する．Lが大きいほどこのような長周期加振による静水圧応答が大きくなるのは配管系独自の特徴といえる．なお，配管の加速度，変位の応答は図 25 のように（変位など）かなり大きい応答を示している．これは配管に作用する荷重（配管自体の静加速度と前述の静水圧応答の和）と配管系の静剛性から決まる変形量を表わしている．

3.5 高レベル加振による応答挙動

前述のように，負圧によると思われる挙動は，ヒゲ状の圧力応答として現れ，また加速度応答にも衝撃のような波形を生じた．試験体にとってより厳しいスペクトルをもつE2入力波の場合はこのような現象がより明瞭に現われるとともに，関連すると思われるいくつかの現象を生じた．これらの現象およびその影響を取りまとめると以下のようである．

1)加速度および圧力応答に生ずる衝撃

2)配管内衝撃音の発生

3)付属品等への衝撃による影響

4)全体応答への減衰効果

これらの現象は加圧条件では，圧力応答がある程度大きくなるまでは負圧に入らないので，入力レベルの大きい場合にこのような現象が生じた．加圧しない通常の水位条件の場合は比較的入力レベルが低い場合でもこのような負圧挙動を生じている．図 26 に入力レベルを上げていったときの応答波形の変化（配管 A の圧力および加速度応答，容器水位 80%で地震波 E2 加振の場合）を示した．

上記項目の 1) については，図 26 の応答波形にみられる通りである．2) は流体のハンマーリングによる音と思われ，入力および応答レベルが高くなると発生する．E2 入力波で容器水位 80%の場合（図 26），入力レベル 40%以下では（100%入力で振動台加速度 1 G）異常音は小さいかほとんどなく，60%以上で顕著であり，大まかにいって振動台ピーク加速度 0.5 G が

表 8　高レベル応答時の配管内流体関連現象とその影響
Table 8　The Effect of Liquid in Negative Pressure Range of Response Due To High Level Response of Piping (* : Observed in the other experiment)

Phenomena	Effect on Piping Seismic Response	Note
1. Repeated High Pressure Pulse	Damage of pipe internal sensor	Observed*
	or	
	valve fittings	Observed
2. Repeated High Acceleration Shock	Damge of pipe outer sensor	Observed
	or	
	valve fittings	Observed*
3. Non-linear Response and Cavitation Collapse	Generation of shock sound	Observed
	Vibration damping due to the dispersion of pressure wave energy	Estimated

異常音発生の境界であった．このとき圧力応答のピーク値（負圧による衝撃波形）は400 kPa以上であった．また加圧条件でも応答レベルが高い場合にはこの現象を生じた．しかし，この現象は流体のエア含有状況などの影響を受けると思われ，スイープ加振などの後で応答がなまる場合があった．

3）については実験中に，長い直管部に取り付けているベント弁（容器上部に取り付けたものと同じもの）の水漏れ損傷を生じた．この直管部は1次モード（3.8 Hz）が卓越する場所であり，管の振動自体は弁に損傷を生じさせるものとは考えられない．振動による流体または弁内空気の挙動によるものと思われる．4）は，前項でみたように密閉または加圧条件で変位などの主要応答が大きく，開放条件で応答が低下していることである．非圧条件では前述のように負圧領域に入りやすく振動エネルギーがキャビティの挙動や圧力パルスなどの形で消費されるが，開放されて自由液面が存在する場合はこのような意味での減衰がさらに大きくなるものと考えられる．しかし，加速度のように各種モードの影響を受けまた衝撃圧の影響を受けやすい量は最大値だけをみる限り必ずしも減衰すると限らない．なお，このような配管内負圧に伴うと思われる衝撃は減衰しつつ容器ノズル部まで伝播している．

以上の点を現象と配管への効果に分けて整理すると表8の通りである．

3.6　塑性域応答実験

3.6.1　配管支持部破損実験

この実験は，特定の支持部（配管Aの主要支持部，図1の加振方向水平ロッドレストレイントRA7(X)）に意図的に弱点を設け，これが大入力によって破断した場合に全系の応答がどのように変わるかを調べるために行なった．入力は地震波E2を用い，振動台ピーク加速度は（100%入力レベルで）約1Gであった．E2はE1に比べて低振動数成分が卓越しているので，配管Aに対する影響が大きいと判断したためである．また，水位条件は80%とした．この水位では，地震波E2に対する容器の応答は比較的小さく，支持部，ノズルなどに対する繰り返し加振による影響が緩和されるものと考えた．

支持部23体（健全支持および支持無しを含めて25体）の破損試験を行ない，ほぼ予定通りの破断を示した．表9にその一覧を示す．入力レベルを変えている実験は，同じ支持条件で破断時点が異なる場合の挙動をみるためである．破断後の挙動については，本実験の場合，破断後配管の変位，歪等が顕著に進行することはなかった．すなわち，表10に示したように，配管Aの応答変位はほとんどのケースで40 mm程度の一定した応答を示している．しかし，2，3のケースでは破断後応答変位が大きくなり，最大値が正常支持の場合およびはじめから支持無しの場合の応答最大値を越えているものがある．表中，加速度が他に比べて特に大きいケースがあるのは，流体の挙動などによるヒゲ状の加速度パルスを生じているためである．

破断後の配管変位応答があまり伸びないのは入力波（特にその後半部）に2.5 Hz（支持無し

条件の場合の配管の固有振動数）以下の成分がほとんど含まれていなかったためと思われる．

3.6.2 容器塑性域応答実験

この実験は，比較的薄肉の容器スカート支持部の座屈変形挙動，ノズル部の塑性化をみるために行なったものである．波形は地震波Ｅ２を用いた．入力レベルは応答実験に用いてきた

表９　配管支持部破損実験リスト
試験条件：水位 80%，タンク Air 抜き弁開放
入　　力：地震波Ｅ２

Table 9　List of Pipe Support Failure Test
Test Condition : 80% vessel water level, upper vent valve opened
Excitation : E 2 wave

Test No.	Position : RA7　Direction : X (shaking)							Note
	Normal Support	Fragile support*					No support	
		9.8	8.8	7.1	6.2	5.0		
0	+							Bolt M 30
1			○					Without sleeve
2			●					With sleeve**
3				△				〃
4					△			〃
5						△		〃
6				●				Without sleeve With washer***
7					○			〃
8						○		〃
9		○						Without sleeve Without washer
10				○				Without sleeve With washer
11				○				〃
12					○			〃
13			○					Without sleeve Without washer
14				○				Without sleeve With washer
15						○		〃
16					○			〃　80%****
17					○			〃　60%
18					○			〃　40%
19					●			〃　20%
20						○		〃　80%
21						○		〃　60%
22						○		〃　40%
23						●		〃　20%
24							+	Release RA7(X)

○ Guillotine break, △ Striking after break, ● Not break (Plastic deformation)
* Diameter of fragile section (mm)　** To prevent buckling of fragile section
*** To prevent bending of fragile part　**** Excitation level (100% in other cases)

レベル（振動台加速度で約1G）を100%として100% → 150% → 200%の3段階の加振を行なった．最後の加振で振動台ピーク加速度は約2Gであった．また，試験体条件は満水加圧（5 kg/cm²）とした．150%加振までは特に顕著な変状を示さなかったが，200%加振によってかなり明瞭な座屈変形を生じた．加振終了後の変形状況は図27のようであり，大規模な変形，崩壊などは生じなかった．

各部の変形状況は次の通りである．容器本体と支持スカートの溶接部は塑性化が最も進展したが貫通亀裂は生じなかった．また，容器本体には明瞭な損傷は生じなかった．ノズル部

表10　配管支持部破損実験　主要応答（最大値）
Table 10　Main Response (Maximum Value) in Support Failure Test

Test No.	Pipe-A displacement D−1 (mm)	Support force F−1 (RA7) (kN)	Nozzle-A acceleration A15Z (Gal)	Nozzle-A axial strain G69 (10-6)	Note
0	43	27	10836	122	A 15 Z: pulse
1	40	18	6647	117	
2	42	23	9549	127	
3	42	23	8967	123	
4	41	23	6655	115	
5	40	20	5917	116	
6	41	26	5308	116	
7	37	13	3163	115	
8	36	14	3929	112	
9	37	16	4607	120	
10	36	17	4311	108	
11	41	20	3194	112	
12	50	12	5932	98	
13	53	15	13023	97	A 15 Z: pulse
14	52	25	8135	96	
15	47	11	10836	91	
16	38	14	6605	75	80% level
17	36	16	7579	58	60%
18	32	15	2960	43	40%
19	4	1.8	394	20	20%
20	54	11	5467	77	80%
21	33	11	1847	55	60%
22	31	12	2117	41	40%
23	6	3	521	20	20%
24	40	—	5921	112	

では容器のロッキングに伴うとみられる上下位置での歪が大きく生じ内面では塑性化しているものと思われた．この加振の際，配管Aでは最も厳しい位置にあるエルボの側面が塑性化した．

以上，本実験では，大入力の繰り返しにより各部の塑性化の進展が確認されたが貫通亀裂の発生による内部液体の漏洩や大変形による支持機能の喪失は全く生じなかった．

4. 地震応答解析

地震応答解析は支持部等に作用する地震荷重を評価するための全系を対象とした応答解析とその後の各部の応力解析が必要である．全系解析用のモデルは精粗さまざまな取り扱いが考えられるが，ここでは試験体の特徴を考え，容器をビームで扱うなど比較的簡単なモデルを用いる．しかし，ノズル部でのバネ定数や配管内流体の動的応答など主要な要素は考慮する．また，応力解析には通常用いられる詳細モデルを用いる．

4.1 全系の応答解析

4.1.1 解析手法とモデル

本節では，実験モデルに対し，配管内流体との連成を考えた応答計算を行ない実験と比較する．計算手法は前報で述べた通りであるが，その要点は以下の通りである．すなわち，配管はFEM等によりマトリクス振動方程式で表現され，また流体は1次元の波動方程式で取り

表11 解析モデルとそのパラメータ
Table 11 Analytical Modelling and Calculation Parameters

	Structural System	Liquid System
Model Form	Pipe-A + Pipe-B + Vessel	Pipe-A, Pipe-B, independantly Vessel = zero pressure boundary
Model Type	Pipe-A, B: Beam and bend elements Vessel: Beam Base Flange: Spring (with bolts) (Rocking)	Liquid in vessel: lumped mass Liquid in pipe: one dimensional pressure wave
Boundary Condition	Structural anchor at ends Bijlaard spring at nozzles Fixed or spring at supports	Vessel = constant pressure Pipe = bend and closed ends
Number of Nodes	62 (Structural, including liquid boundary points)	32 (Liquid boundary)
Used modes	1-25 in order	——
Liquid division in cm	——	32
Pressure Wave Velocity	——	1100 m/sec
Time interval of calculation	2.9×10^{-4} sec	
Input Wave	Measured shaking table acceleration by E l wave excitation	

表12　解析モデルの固有値および応答計算に用いた減衰比
Table 12　Eigen Value of Analytical Model and Used Modal Damping Value for Simulation

Order of mode	Natural frequency of analytical model (Hz)		Damping value for simulation
	Wholly lumped mass	Semi-lumped mass (used)	
1	3.67	4.60	0.02
2	6.07	6.35	0.02
3	6.30	6.58	0.02
4	7.11	7.38	0.001
5	7.37	7.83	0.005
6	8.66	9.73	0.05
7	12.01	12.55	0.001
8	15.24	18.30	0.002
9	18.27	19.81	0.002
10	19.73	20.13	0.002
11	19.78	20.33	0.002
12	21.53	22.18	0.002
13	23.56	24.29	0.002
14	25.76	27.76	0.002
15	26.85	29.94	0.002
16	27.97	30.05	0.002
17	28.53	30.24	0.002
18	32.27	32.59	0.002
19	33.11	34.36	0.002
20	33.64	39.63	0.002
21	36.37	41.38	0.002
22	39.02	42.54	0.002
23	42.04	43.00	0.002
24	42.51	45.27	0.002
25	44.93	46.71	0.002

(Note)　Wholly lumped mass: liquid = lumped mass for whole motion of pipe element (conventional model of liquid)
Semi lumped mass　: liquid = lumped mass for pipe lateral motion = neglected for axial and torsional motion (a model for coupled response calculation)

扱う．これらの連成は，曲がり点等での節点において集中的に考慮するものとする．従って配管の節点速度を用いて流体の境界条件を考慮し，またこの点での流体圧を配管への外力として考慮する．

実際の計算では配管系にはモーダルアナリシス，流体には特性曲線法を用いる．配管のモーダルアナリシスでは流体の質量は（連成応答計算で考慮される）軸方向の振動に対しては無視し，さらにねじりに対する流体の影響はないものとしてこれも無視している．従ってこのモーダルアナリシスに用いる配管振動モードは連成の結果として定まる振動モードではなく，流体の軸方向慣性力を省略した，いわば部分構造の振動モードである．しかし，このモーダルアナリシスによる応答計算式には流体力の項があり，すべてのモードを考える場合は，流体

の軸方向振動の効果が考慮される形になっている．実用的には，対象とする配管の振動モード領域に加えて，圧力による配管の主要な変形が考慮される範囲のモードを考える．解析法の詳細は既報（小川, 1989）に示した通りである．

以下の応答計算は前述の実験モデルのうち密閉加圧条件の場合を対象とした．また，圧力応答については実験，計算ともに設定静圧（500 kPa）からの変動分を対象とする．

解析には実験結果をふまえて図28のようにモデル化した．設定したモデルの定数等は表11の通りである．また，このモデルで，容器および配管内の全液体をDead massとしたときの固有振動モードを図29に示した．1次は配管A，2，3次は容器の加振および加振直角方向，4次は配管Bが卓越するモードである．表5，6に示した実測値とはいずれも若干の差がある．

4.1.2 解析結果と実験との比較

図30に計算用の入力波（振動台加速度），容器加速度，配管Aの変位，加速度，配管Bの加速度応答の計算結果を示した．地震波E1による加振の場合である．比較のために実験結果を併せた示した．容器の応答波形は実験と合っているが，応答量にはかなり差がある．計算には（レベルの低い）正弦波加振で得られた値に近い2%減衰比を（容器の振動モードに対して）用いたが，実際にはもっと大きい減衰を生じたものと思われる．

配管Aの圧力および変位はいずれも（流体をDead massで考えたモデルの）1次モードに対応した波形になっており，主要部では実験と計算はほぼ一致している．しかし，主要部を過ぎたところで差が生じている．この原因としては支持部（ロッドレストレイント）のピン部での摩擦の作用による非線形減衰の影響が考えられる．加速度応答は図に示した位置などでは計算と実験が比較的よく一致しているが，場所によっては差を生じた．加速度の場合，配管系の高次の振動モードが支配的であり，これら高次モードのモード形，刺激係数が一致しない点では実験との差異を生ずるためである．

4.2 結合部・支持部の応力解析

容器配管結合部（ノズル）については配管からのモーメント荷重など，また支持部（容器スカート）については容器水平方向に1Gの水平加速度をそれぞれ静的に作用させたときの応力を評価した．

実験と対応させる場合，通常これら部位への入力（実験時の配管からのモーメントなど，容器の平均応答加速度）の最大値と計算用の入力の比率の換算により応答応力（の最大値）を求め，これを実測応力と比較する方法がとられる．ここでも簡単のためにこの方法を用いた．また，容器に作用する配管からの荷重については，あまり適切な方法ではないが容器をバネとして配管系単独の解析を行なった結果を用いている．正確には前項で扱ったような全体モデルの応答から求まる配管荷重の時刻歴または最大値を用いる必要がある．

4.2.1　ノズル応力解析

計算にはMSC／NASTRANを用いた．ここでは配管Bノズルについての結果を示す．図31に計算用のモデルと要素分割および荷重条件を示した．ノズル自体については，実際の形状と解析用の形状の差異を図31に示した．計算結果は図32のノズル断面応力コンターで示した．コンターレベル数値に対応する実際の応力値は同図に示している．また，ノズルへの荷重は，応答シミュレーションで得た配管の応答から算出したモーメントおよび軸力を用いている．

前述の容器塑性域応答実験（満水加圧条件，E2地震波150%入力レベルの加振）時の配管Bの応答歪から，ノズルBに作用する主要な荷重（Z周りモーメント）を求めると約1.55×10^{6} N・cmであった．この値は図31に示した計算用Z周りモーメント荷重の約5倍である．従って，実測値を1/5にすると図32の計算値と比較することができる．図にはノズルコーナーに最も近い点での実測値（の1/5, kg/mm²）を示した．この位置での計算値はコンターレベル3（2.5 kg/mm²）であり，測定値とほぼ一致している．なお，計算用の入力荷重にはZ周りモーメント以外の荷重も入っているが，この位置での歪は（図32のPLOT ZONEにあるので）ほとんどZ周りモーメントだけで決ってしまうのでここではこれらの荷重の実測値は省略した．

4.2.2　容器支持部応力解析

容器とスカートの接合部の応力については，空水状態で静的水平加速度1Gの場合について計算した．図33に解析用のモデルを示す．なお，この解析ではプログラムISTRANを用いた．図34に計算応力分布を示す．

以下，前と同様に容器塑性域応答実験（満水加圧条件，E2地震波150%入力レベルの加振）の測定応力と計算応力を比較する．水の有無および加振入力レベルが実験と計算で異なるので次のように換算する．すなわち，このE2波加振に対する容器の応答は4Gであり，満水容器の単位高さ重量は空水容器の12倍である．満水加圧なので，容器内の水は単純な質量としてよいと考えている．従って，計算応力を48倍した値が測定値に対応する．計算で用いたヤング率は1.94×105 MPa，ポアソン比は0.3である．表13に示すように計算と測定の値は良い一致を示している．

表13　容器およびスカートの歪（代表点の計算値と実験値）
Table 13　Strain of Vessel and Skirt

	Vessel (G-13, G-14)		Skirt (G-15, G-16)	
	Membrane	Bending	Membrane	Bending
Calculations	436×10^{-6}	551×10^{-6}	97×10^{-6}	824×10^{-6}
Measurements	461×10^{-6}	1271×10^{-6}	80×10^{-6}	864×10^{-6}

5. 結　語

前年度の実験結果をふまえ，容器と配管を結合したモデルを用いて振動実験を行った．主な結果を取りまとめると以下の通りである．

(1) 満水（非圧）の場合と満水加圧の場合で配管の応答に顕著な差異がみられた．一方容器の応答にはわずかな差異しか生じなかった．さらに，満水非圧条件でも容器上部のエア抜き弁の開閉条件によって配管の応答にかなりの差異を生じた．この時，容器自体の応答にはほとんど差異を生じていない．このことは配管の応答は容器を含めた系全体の流体条件の影響をうけること，従って配管内の水は単純な質量として扱うことができないことを示している．

(2) 配管内流体の応答挙動には管体からの強制加振に対応するもの（Dead mass 効果と等価），流体独自の共振応答が成長し，配管に影響を与えるもの（動的連成効果），圧力応答が大きくなった場合の負圧挙動の3つの挙動が観測された．これらの結果は，基本的には配管内流体が，質量として地震時の慣性力を担うだけでなく，圧力伝播の媒体として振動エネルギーを蓄積，あるいは逸散させる役割を果たすこと，その結果として配管の地震応答は流体を慣性質量モデルで扱った応答解析による予測に対し，かなり大きいゆらぎを生じ得ることを示している．

(3) 配管内流体の負圧によると思われる挙動は，加圧しない通常の水位条件の場合にも生じ，この挙動と並行して配管加速度に衝撃を生じ，また流体のハンマーリングによると思われる異常音を発生した．このような衝撃は減衰しつつ容器ノズル部まで伝播した．

(4) 容器の応答に対する配管の影響が確認された．この影響は比較的水量の少ない場合の容器固有振動数への影響（負荷質量効果），容器の自由振動の拘束や地震応答への影響（バネ効果および配管から容器への入力効果）などとして現われる．

(5) 解析手法によるシミュレーションと実験結果を比較した結果，全体応答および支持部・結合部などの応力について比較的よく一致することが確認された．しかし，配管内あるいは容器上部で負圧を生ずる場合など，流体の非線形挙動を伴う場合の取り扱いについてはさらに検討が必要である．

(6) 容器配管結合部（ノズル）および容器支持部は，過大入力に対しては塑性化，座屈変形等の損傷を示したが，塑性崩壊あるいは亀裂の貫通による内部流体の漏洩などはみられなかった．試験体の設計等を JIS レベルで行なったことを考えると，初期欠陥のない容器あるいは配管は限界入力に対してかなり高い安全裕度を有するものと思われる．

容器配管系の地震応答評価の確度をあげるためには，このような内部流体の挙動，流体的境界条件を考慮することが必要と考えられる．しかしながら，容器および配管系とその流体条件は一般に多種多様な形態があり，これを考慮した地震応答の評価手法，特に簡便な手法

を開発することが今後の一つの課題と思われる．さらに，流送条件の影響，負圧を生ずる場合の挙動を解析評価することが今後検討すべき問題点と考えられる．

謝　辞

本研究全般について東京大学生産技術研究所教授柴田碧博士のご指導をいただいている．また東京理科大学教授原文雄博士には実験計画に際して有益なご助言をいただいた．この場をかりて，深甚の謝意を表する次第である．

研究の計画，実施に当たっては当センターの大八木規夫第3研究部長，大谷圭一耐震工学研究室長，管理部施設課各位他多くの方々のご助力をいただいた．試験体の製作では石川島播磨重工業株式会社の関係各位のご協力をいただいた．また，原稿作成に当たって，第1研究部主任研究官森脇寛氏より多くのご助言をいただいた．

以上の方々に厚くお礼申し上げる次第である．

最後に，本研究は原子力安全研究年次計画（原子力委員会）にもとづき，国立機関原子力試験研究費（科学技術庁）を用いて実施しているものである．科学技術庁原子力局技術振興課はじめ関係各位の日頃のご指導，ご援助に対し深く感謝申し上げる次第である．

参　考　文　献

1) Minowa, C. and Ogawa, N. (1988): A Shaking Table Test of Cylindrical Tank with A Spring-Mass System, PVP-Vol.145, ASME.

2) 箕輪親宏・小川信行・千葉敏郎・小林博栄・相田重一（1990）：機器配管系支持部及び結合部の耐震性評価に関する研究報告書（第2報　付加ばね・質量系を有する円筒容器の振動実験），国立防災科学技術センター研究速報，第87号．

3) Ogawa, N., Minowa, C., Chiba, T., Kobayashi, H., Shibata, H. (1989): A Seismic Test of A Large Scale Liquid-Filled Piping (Related to Liquid Boundary Conditions), PVP-Vol. 182 (Seismic Engineering, Design, Analysis, Testing, and Qualification Methods), ASME.

3) Ogawa, N., Minowa, C., Chiba, T., Kobayashi, H., Shibata, H. (1989): Coupled Seismic Response of A Piping and Internal Pressurized Liquid, PVP-Vol. 157 (Sloshing and Fluid Structure Vibration), ASME.

4) 小川信行・箕輪親宏・千葉敏郎・小林博栄・相田重一（1989）：機器配管系支持部及び結合部の耐震性評価に関する研究報告書（第1報　配管系の流体連成振動実験），国立防災科学技術センター研究速報第84号．

（1990年2月2日原稿受理）

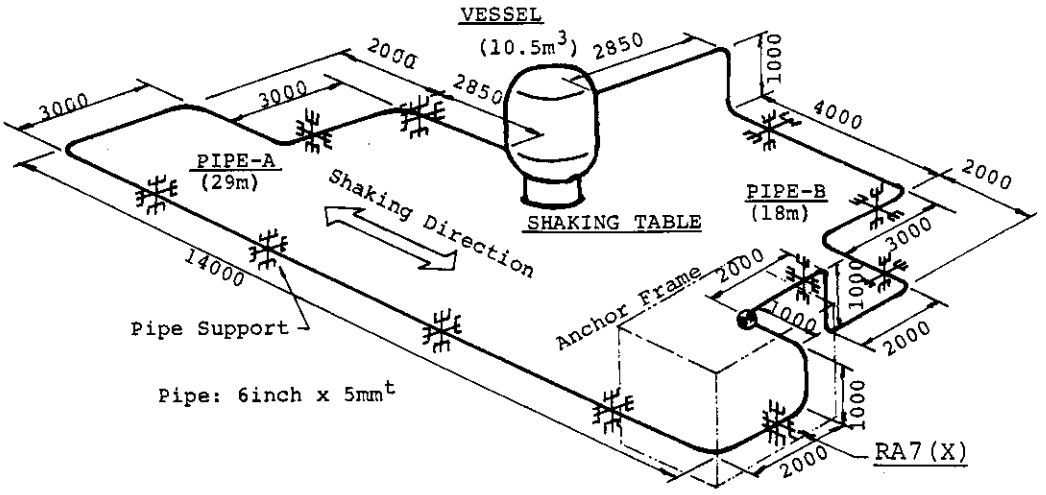


図1　試験体の概要
Fig. 1　An Outline of Test Model

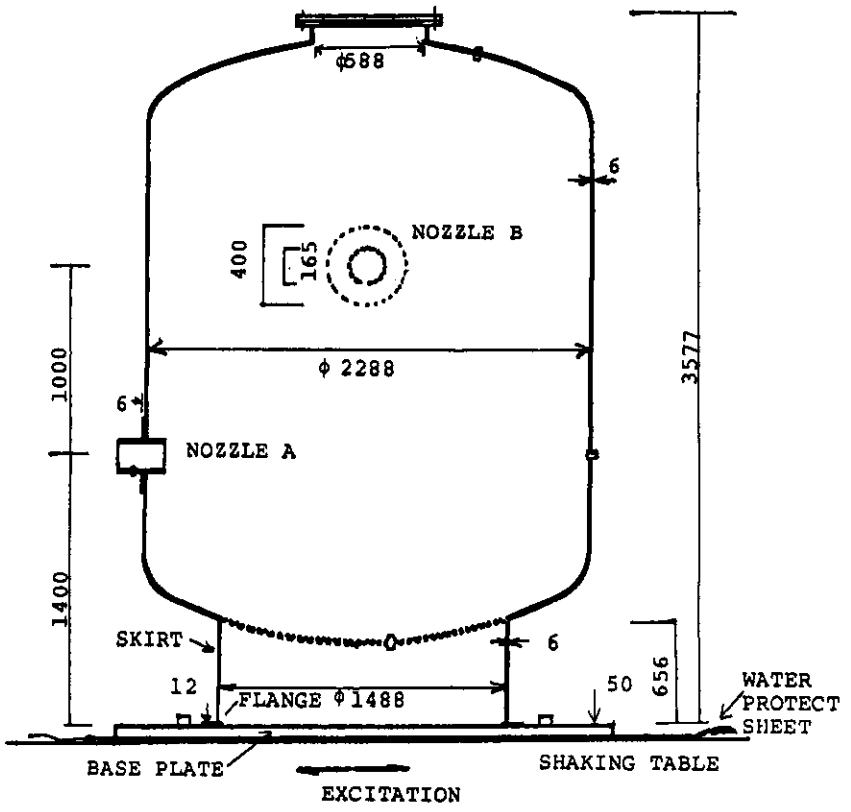


図2　容器モデルの構造概要
Fig. 2　An Outline of Vessel

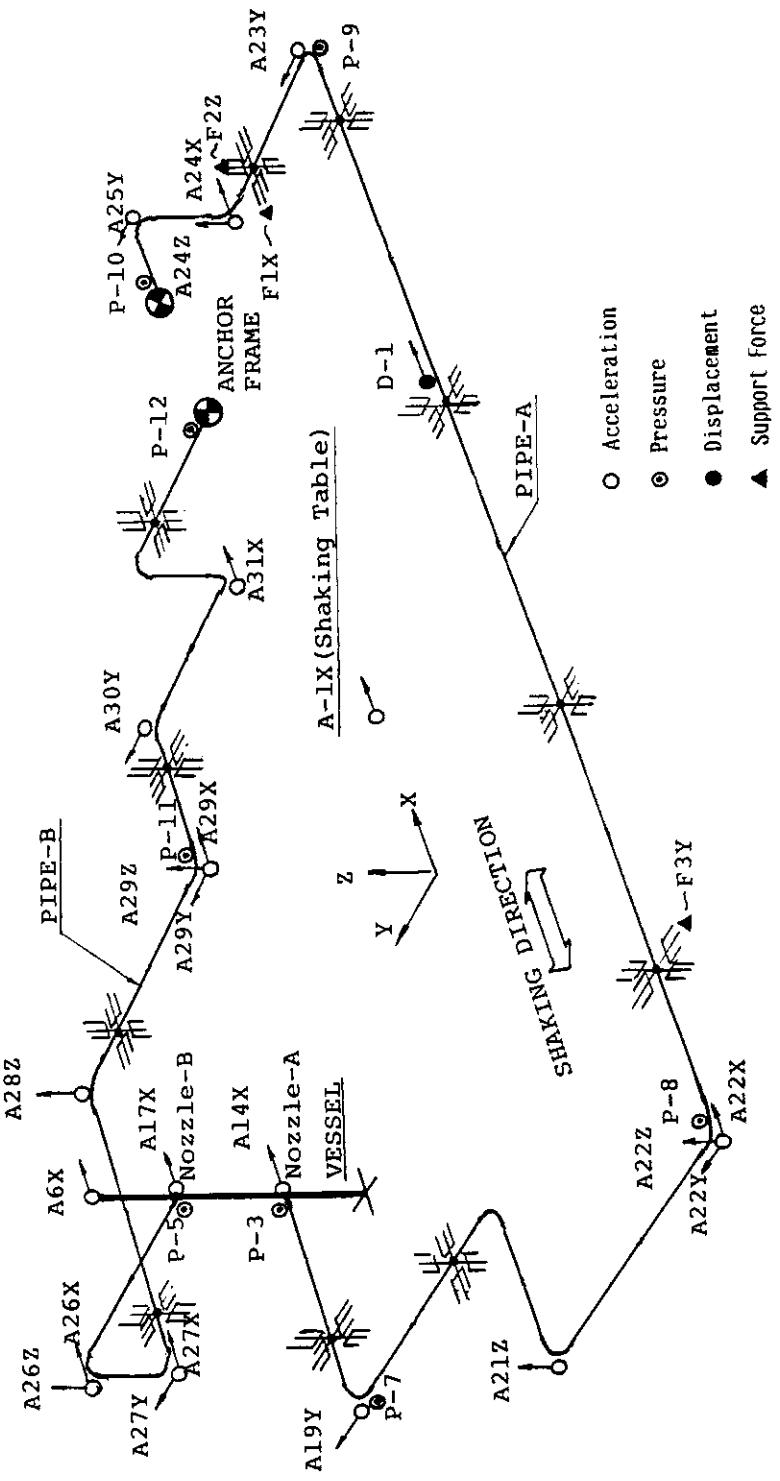


図3　配管モデル計測点
Fig. 3　Location of Main Measurement Sensor (Pipe A, B)

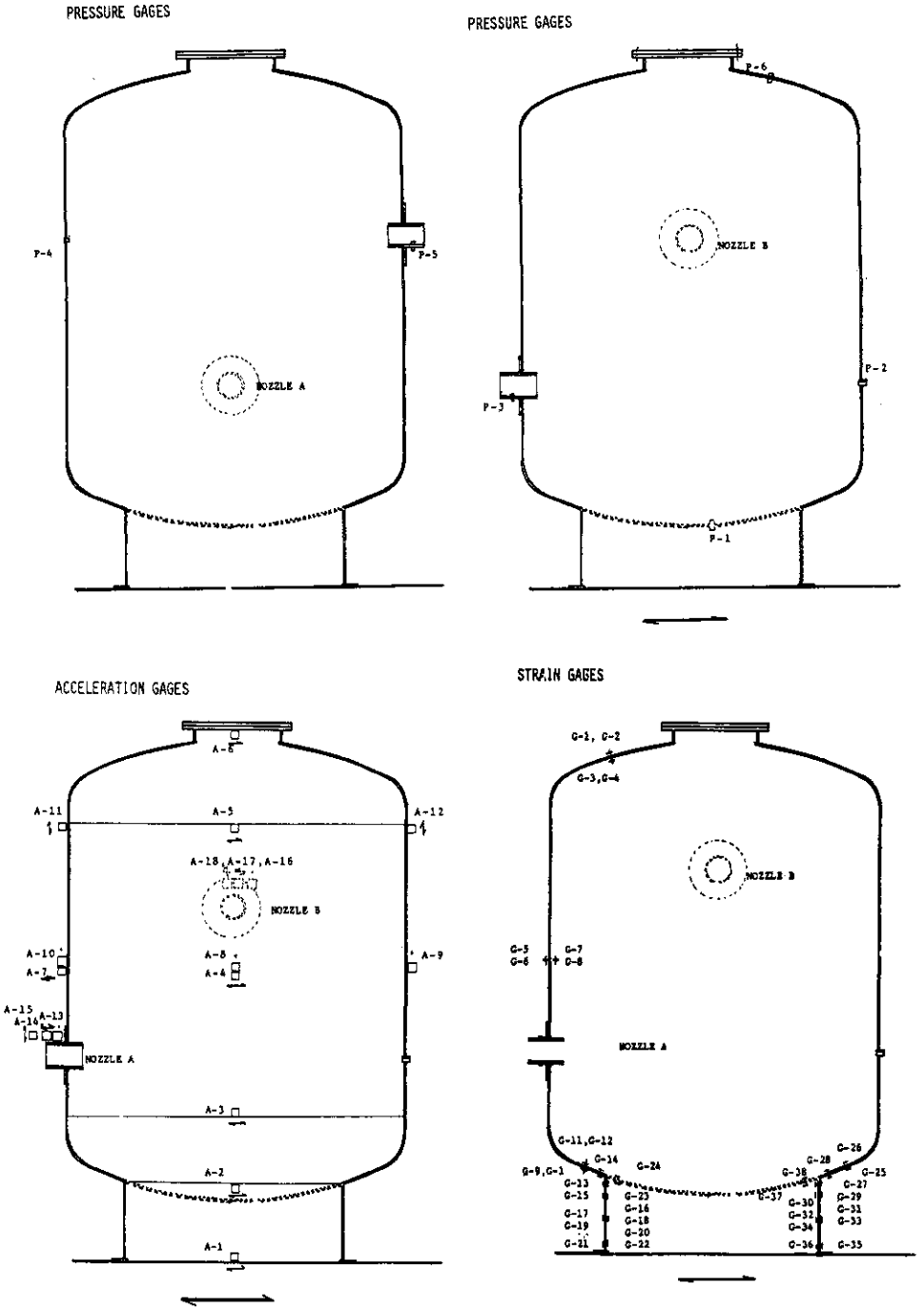


図 4　容器モデル計測点
Fig. 4　Location of Main Measurement Sensor (Vessel)

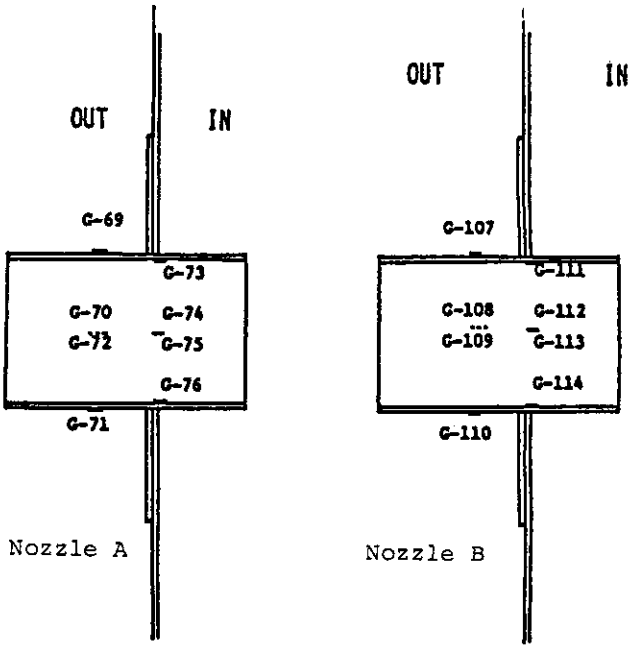


図5　ノズル軸歪計測点
Fig. 5　Location of Main Measurement Sensor (Nozzle axial strain)

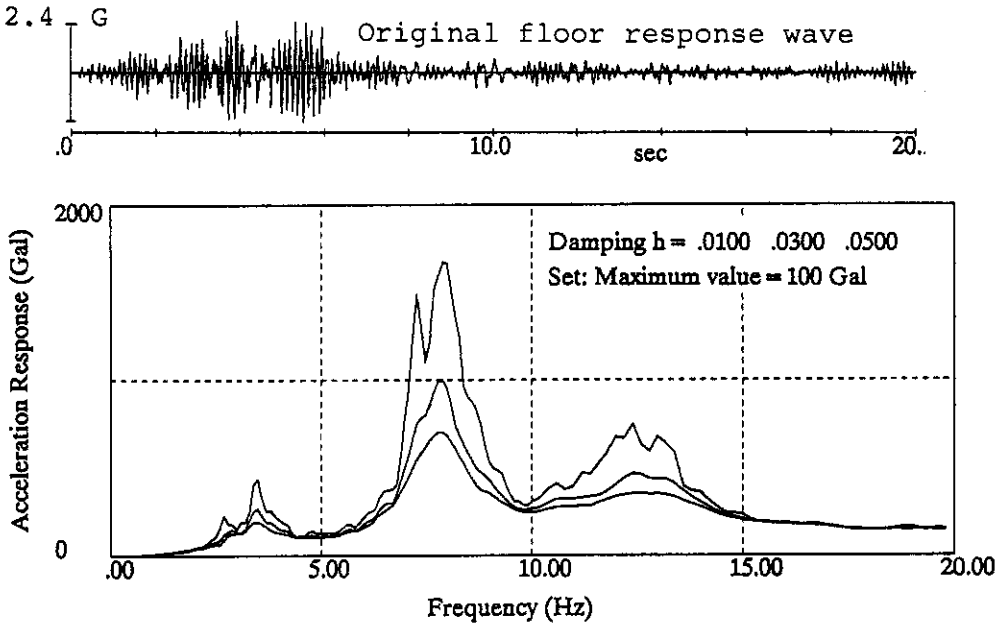


図6　地震波E1（表3）の波形および加速度応答スペクトル
（注：波形の最大値は原子炉建屋モデルによる計算値であるが，本実験ではもっと低いレベルで用いている）
Fig. 6　Waveform of E1 (Table 3) and Its Response Spectrum
(Note: Max value was given by the model calculation of nuclear power plant bulding, but the lower level excitation was used for this experiment)

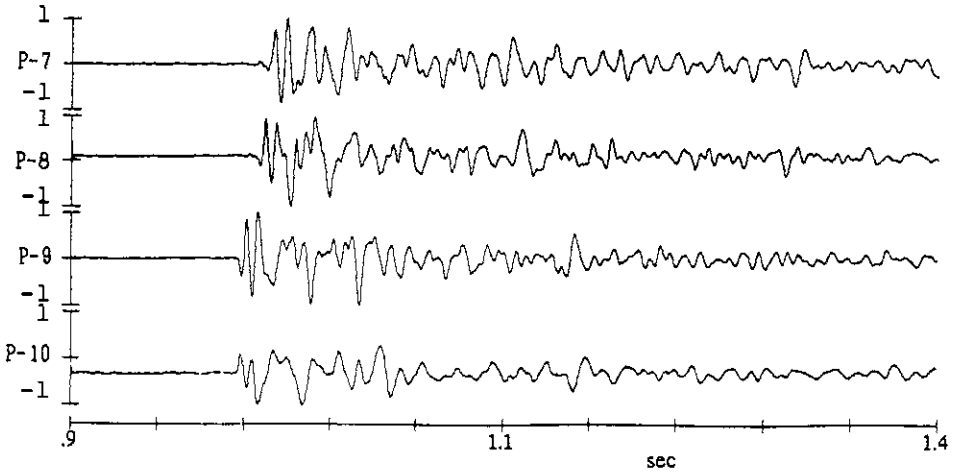


図7　配管内圧力波伝播の測定例（各最大値で無次元化した波形）
Fig. 7　Typical Pressure Wave Propagation by Measurement
(Normalized by each maximum value)

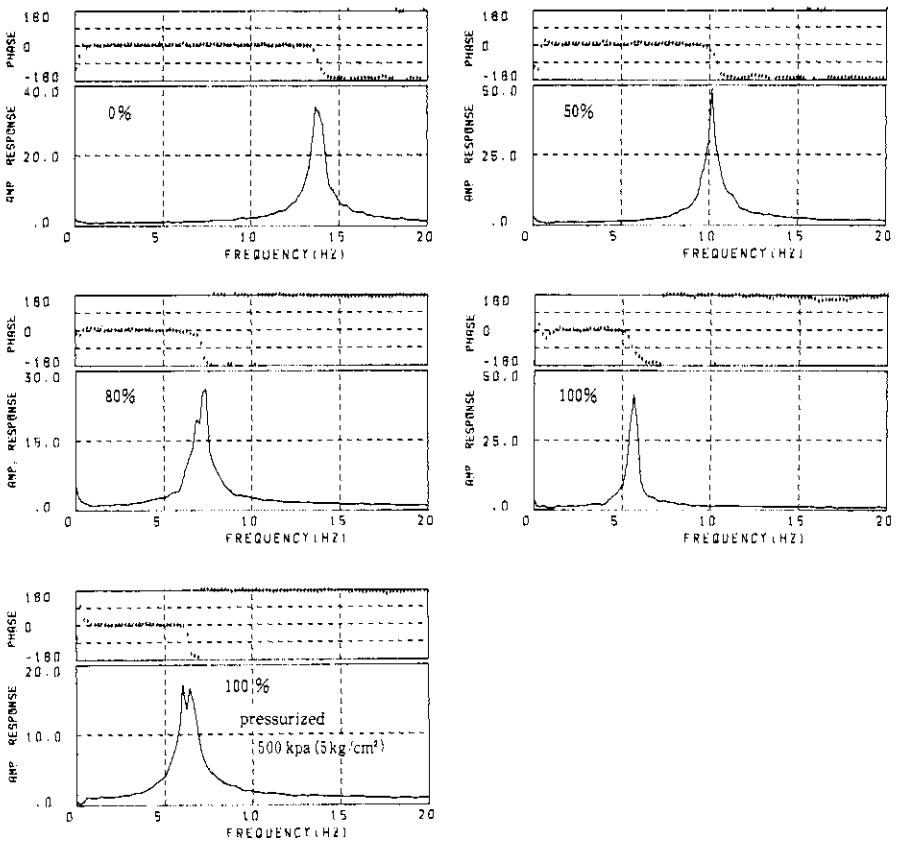


図8　容器天端での応答共振曲線（各水位条件）
Fig. 8　Response Curves of Vessel Top Acceleration to the Shaking Table
(Each water level condition, Random wave excitation)

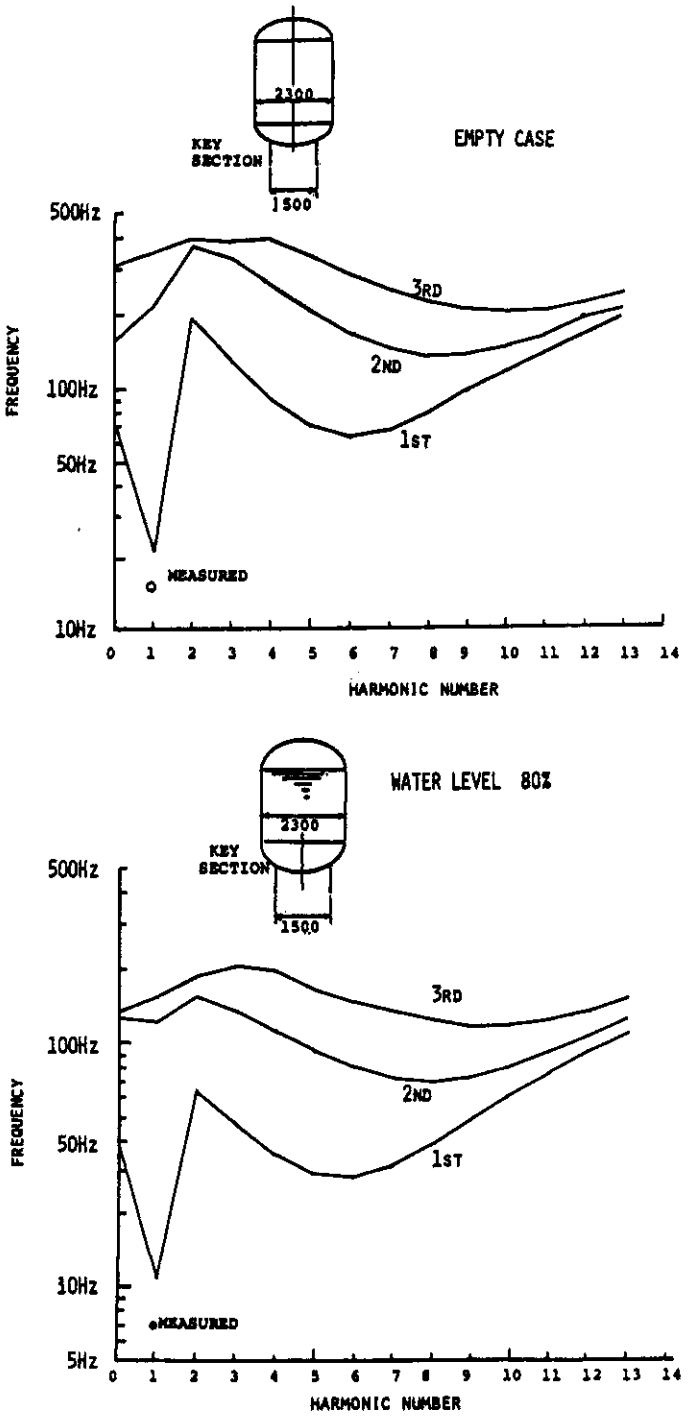
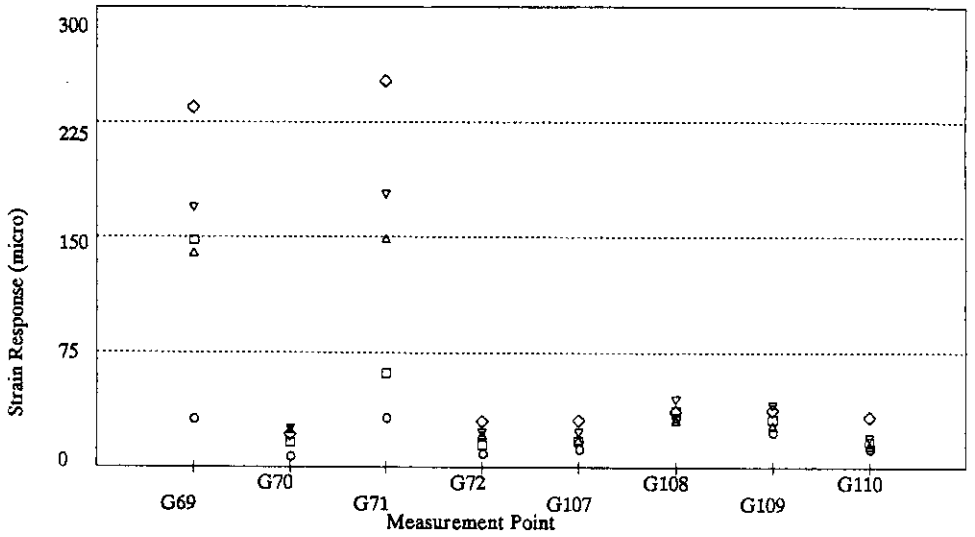
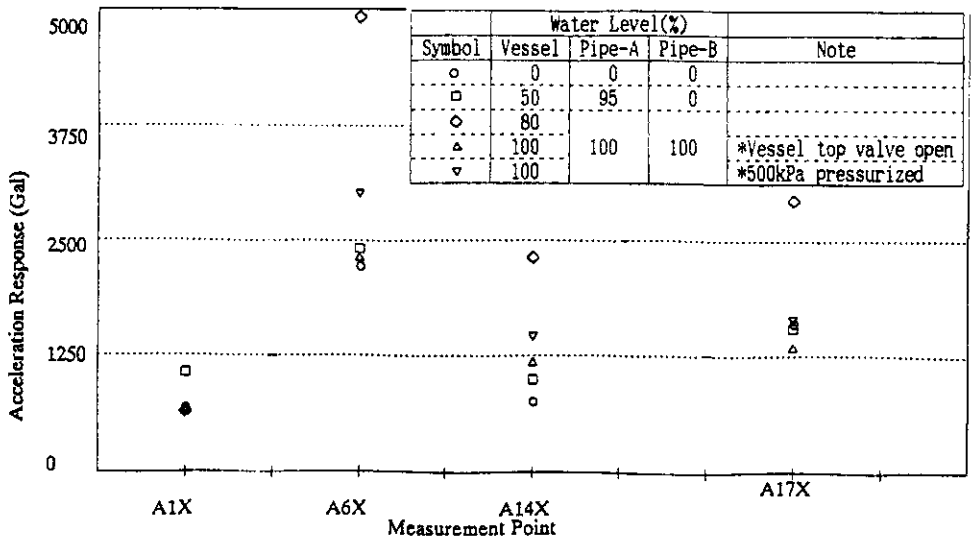


図9　空水および80%水位条件での容器固有振動数計算値

Fig. 9　Calculated Natural Frequencies of Vessel for Empty and 80% Water Level Conditions





(a) Shaking Table and Response of Vessel

図 10　各水位条件での最大応答の比較
（容器加速度およびノズル軸歪，地震波 E 1 による加振）

Fig. 10　Comparison of Maximum Responses for Each Water Level Condition
(Vessel acceleration and nozzle axial strain, Case of E 1 earthquake-like wave excitation)

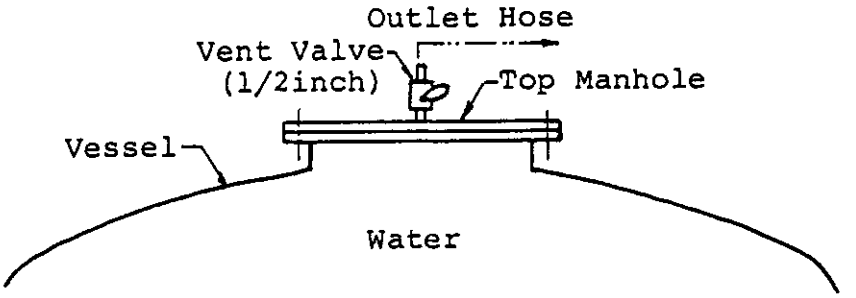


図11　容器天端の開放弁
（100%水位のとき，開放および閉鎖の両条件で実験）
Fig. 11　Vent Valve at the Top of the Vessel
(Closed or opened conditions were used in the case of 100% water level vibration test)

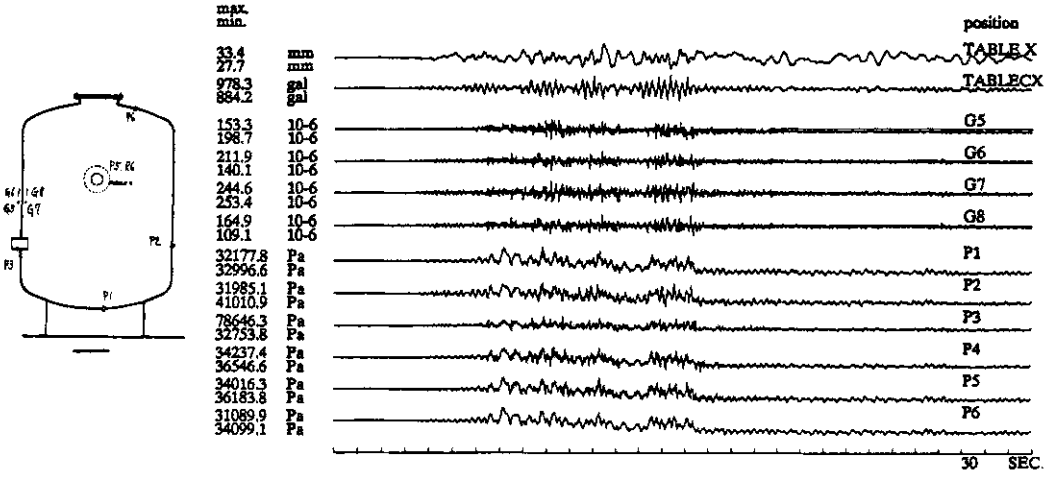
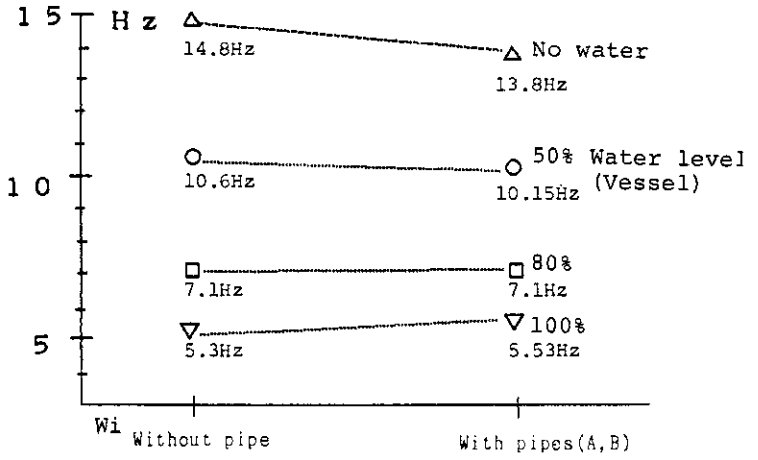
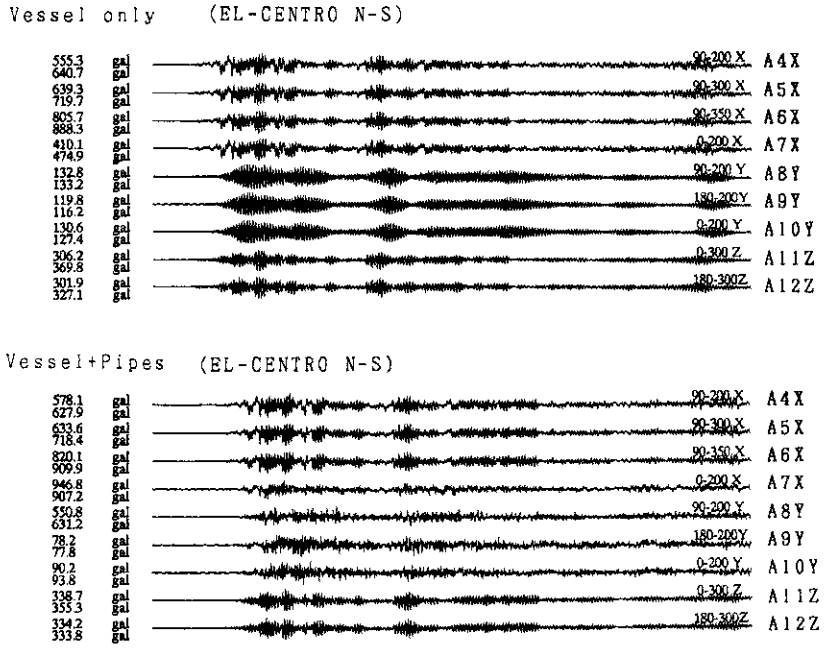


図12　スロッシングに伴う容器の内圧低下現象
Fig. 12　Reduction of Vessel Internal Pressure After Sloshing



(a) Effect on Vessel 1st Resonance Frequency



(b) Effect on Earthquake Wave Response
(ElCentro NS wave, Vessel Water level=80%)

図13 配管接続が容器の応答に与える影響
Fig. 13 Pipe Structural Effect on Vessel Response

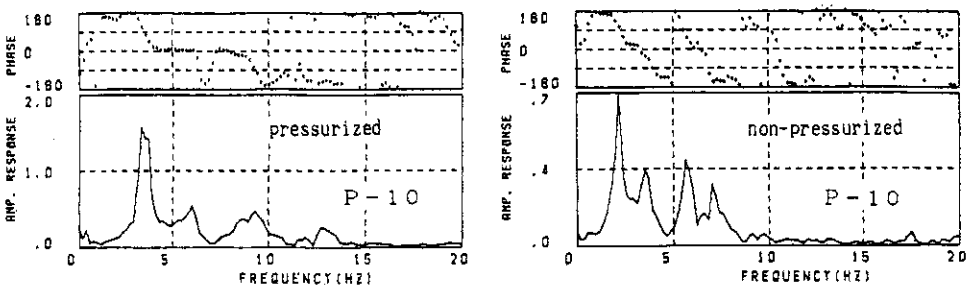


図14　配管Aの圧力応答曲線の比較
100%満水非圧条件（容器上部弁開放）および加圧条件入力はランダム波

Fig. 14　Comparison of Pipe-A Pressure Response Curve for the Cases of Wholly Water-Filled Non-Pressurized Condition and Pressurized Condition (Random wave excitation)

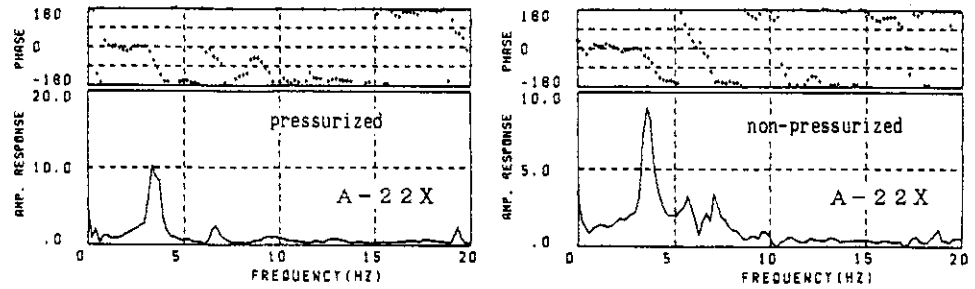


図15　配管Aの加速度応答曲線の比較
100%満水非圧条件（容器上部弁開放）および加圧条件入力はランダム波

Fig. 15　Comparison of Pipe-A Acceleration Response Curve for the Cases of Wholly Water-Filled Non-Pressurized Condition (with Vent Valve Opened) and Pressurized Condition　(Random wave excitation)

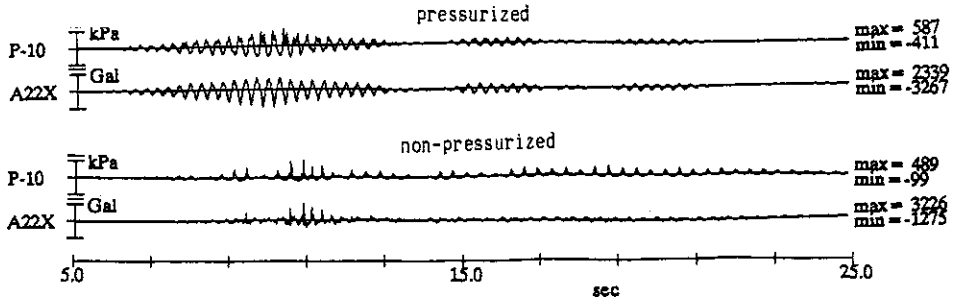


図16　配管Aの応答波形の比較
100%満水非圧条件（容器上部弁開放）および加圧条件
入力は地震波E1（最大加速度650 Gal）

Fig. 16　Response Waves of Pipe-A Pressure and Acceleration for the Case of Wholly Water-Filled Non-Pressurized Condition (with Vent Valve Opened) and Pressurized Condition
(E1 earthquake-like wave excitation, max. acceleration=650 Gal)

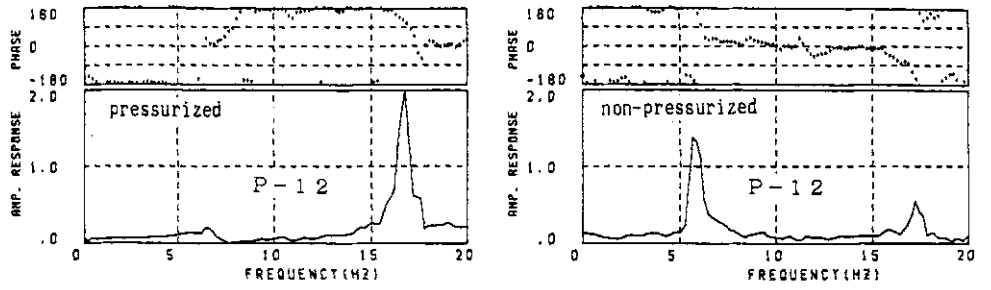


図 17　配管 B の圧力応答曲線の比較
100%満水非圧条件（容器上部弁開放）および加圧条件 入力はランダム波

Fig. 17　Comparison of Pipe-B Pressure Response Curve for the Cases of Wholly Water-Filled Non-Pressurized Condition (with Vent Valve Opened) and Pressurized Condition　(Random wave excitation)

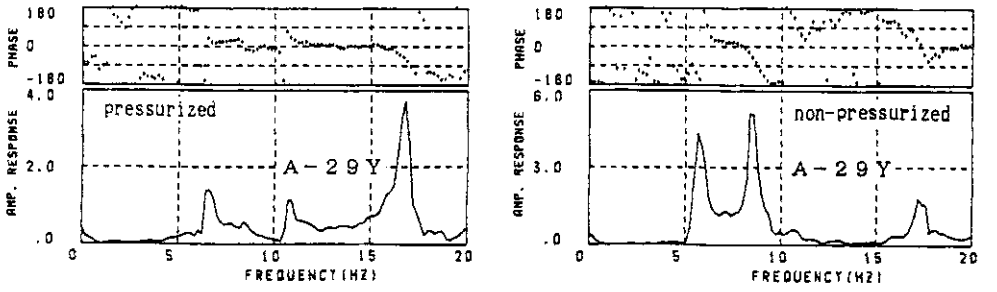


図 18　配管 B の加速度応答曲線の比較
100%満水非圧条件（容器上部弁開放）および加圧条件 入力はランダム波

Fig. 18　Comparison of Pipe-B Acceleration Response Curve for the Cases of Wholly Water-Filled Non-Pressurized Condition (with Vent Valve Opened) and Pressurized Condition　(Random wave excitation)

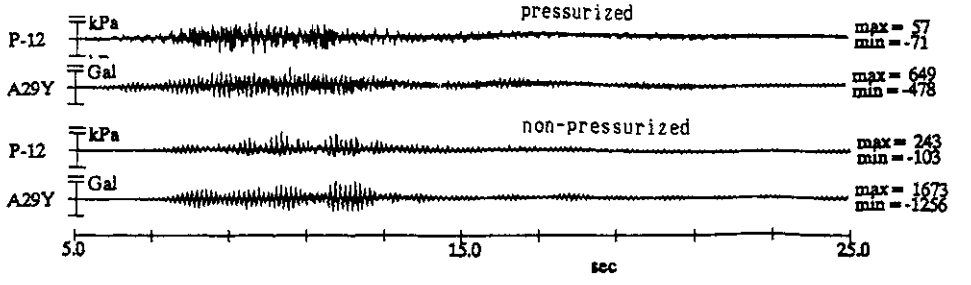
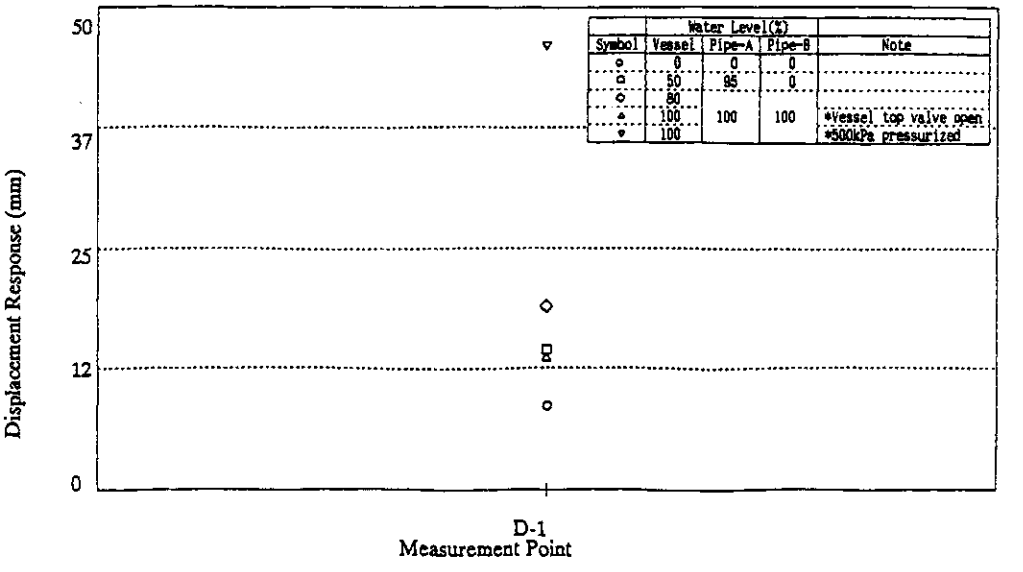
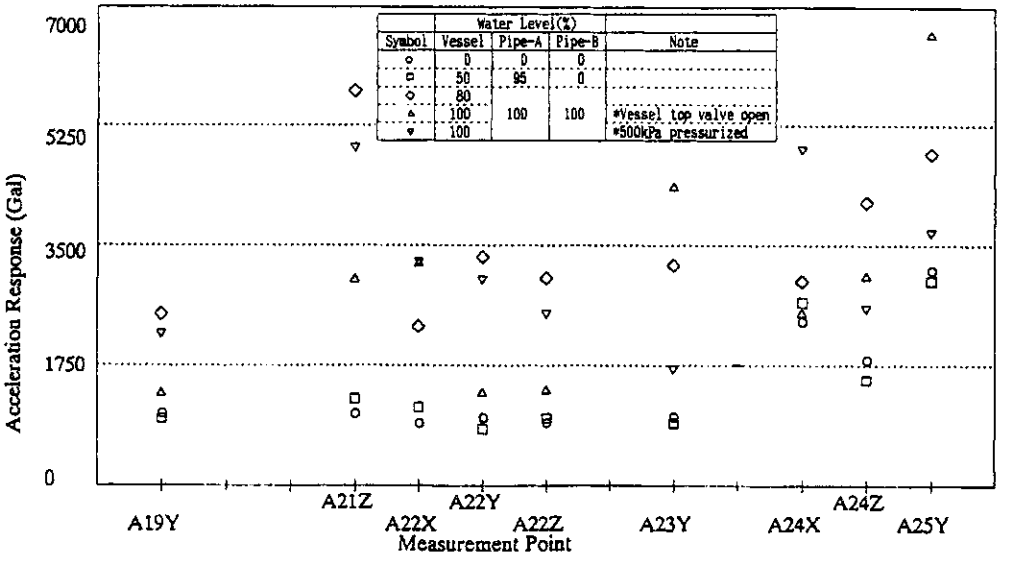


図 19　配管 B の応答波形の比較
100%満水非圧条件（容器上部弁開放）および加圧条件
入力は地震波 E 1（最大加速度 650 Gal）

Fig. 19　Response Waves of Pipe-B Pressure and Acceleration for the Case of Wholly Water-Filled Non-Pressurized Condition (with Vent Valve Opened) and Pressurized Condition
(E 1 earthquake-like wave excitation, max. acceleration = 650 Gal)

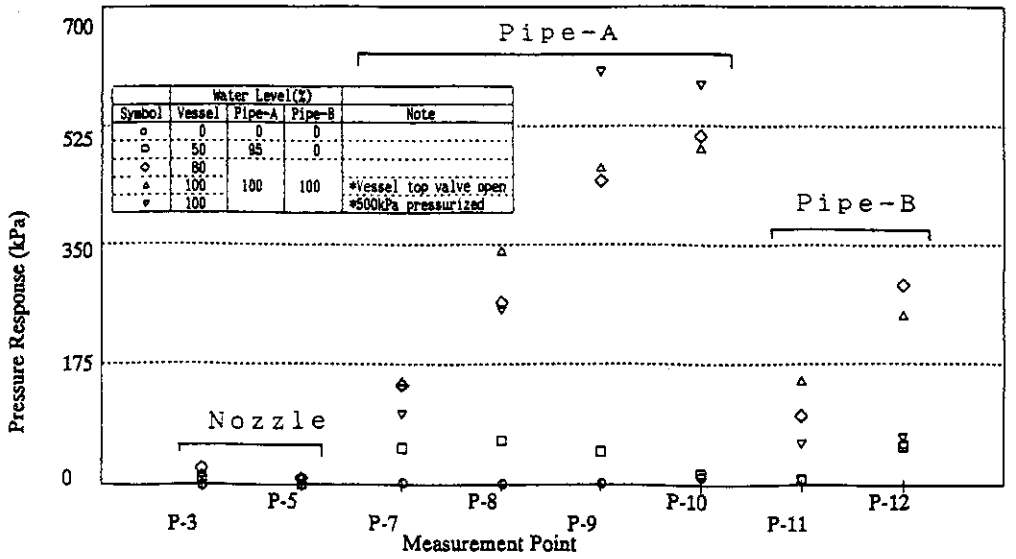


(b) Response of Pipe-A Displacement

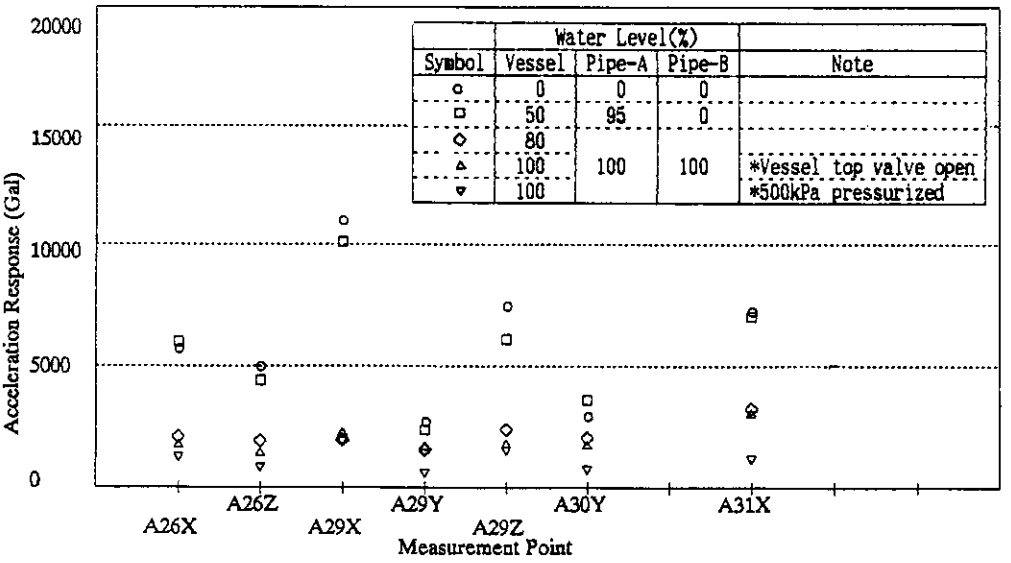


(a) Response of Pipe-A Acceleration

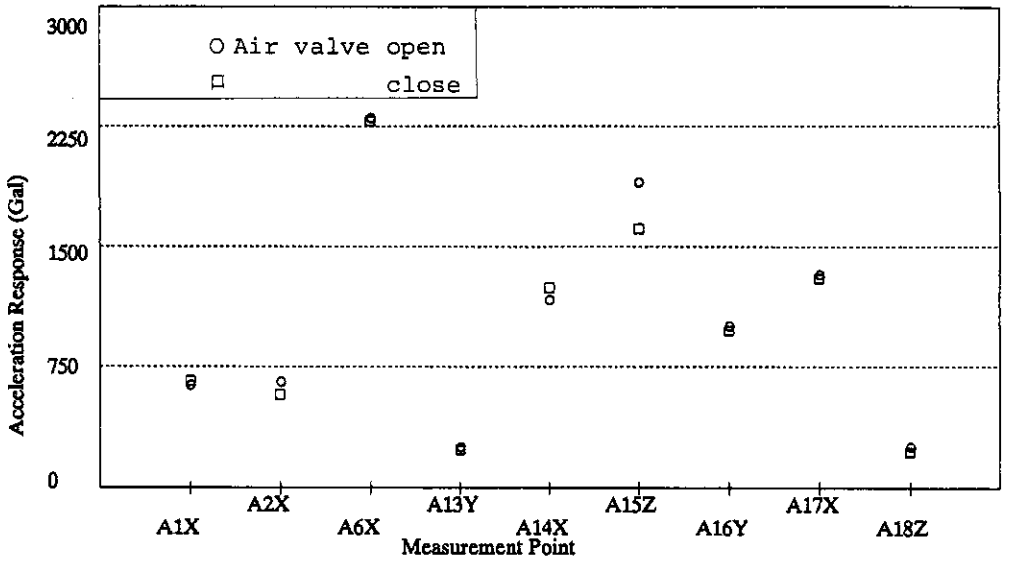
図 20　水位条件と配管系各部の最大応答値（地震波 E 1 加振）
Fig. 20　Comparison of Maximum Responses for Each Water Level Condition
(Case of E 1 earthquake-like wave excitation)



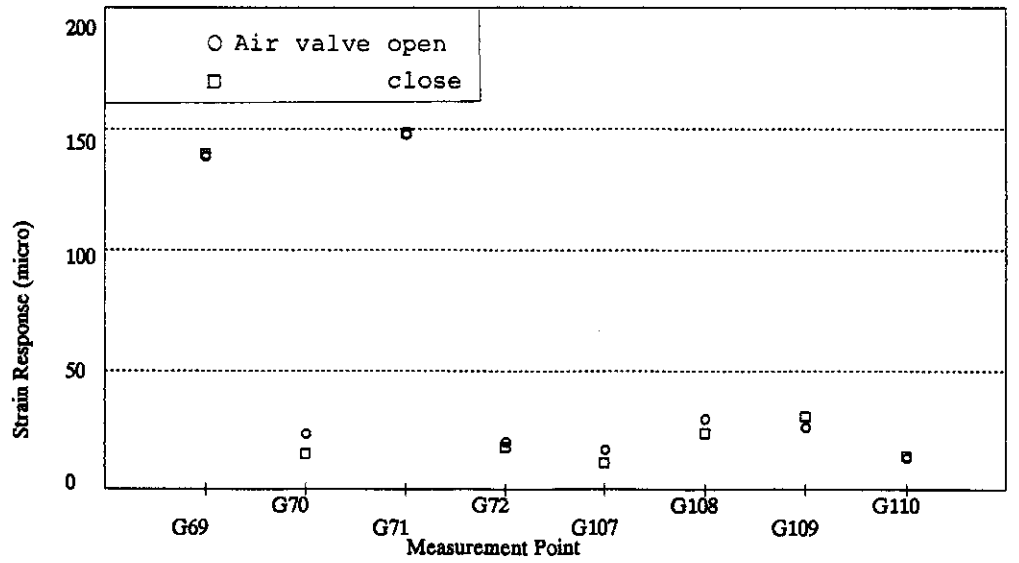
(d) Response of Pipe-A, B Pressure



(c) Response of Pipe-B Acceleration



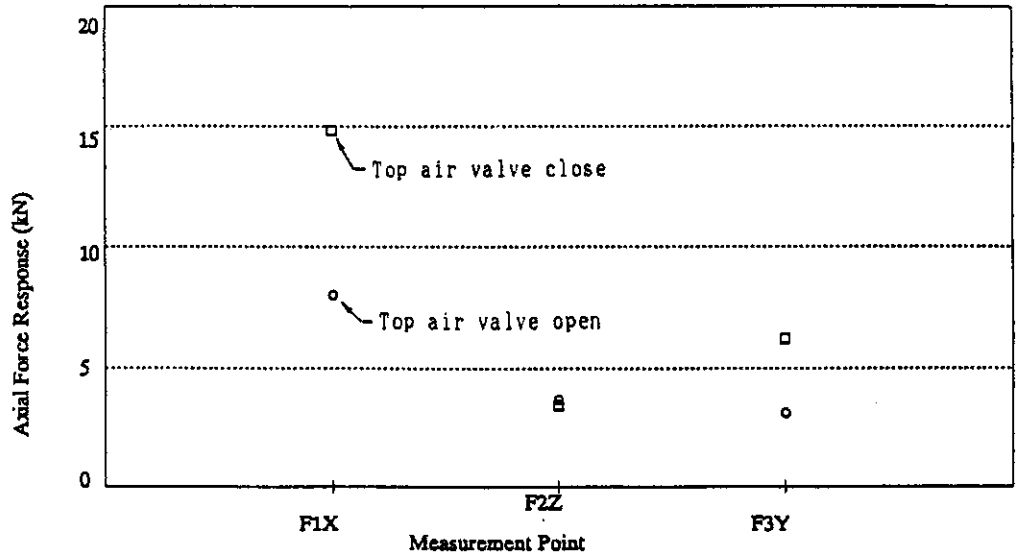
(a) Maximum Value of Shaking Table and Vessel Acceleration



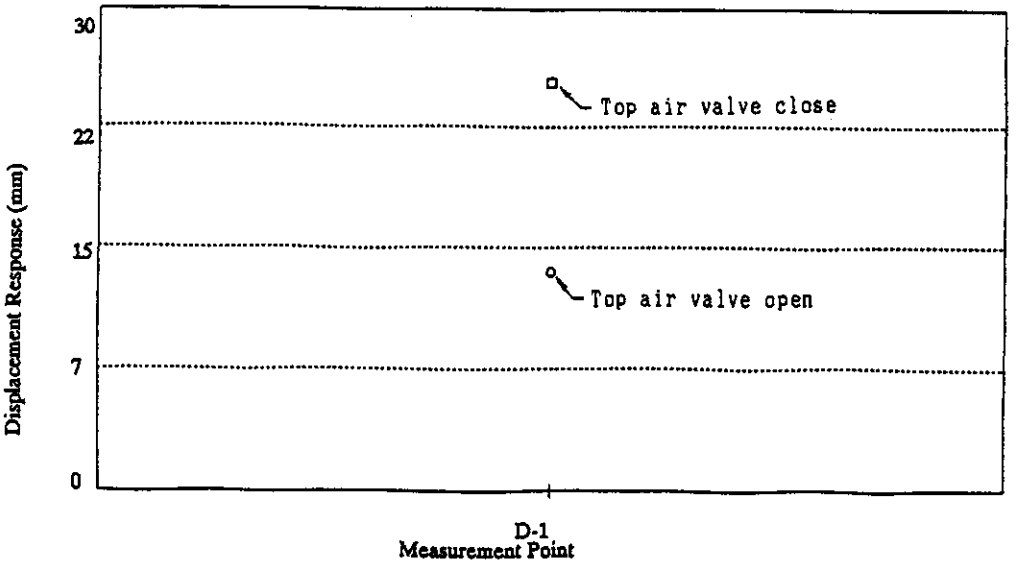
(b) Maximum Value of Nozzle Axial Strain

図 21　容器上部弁開放と閉鎖の場合の応答の比較（振動台および容器加速度，ノズル部歪）
100%満水条件，入力は地震波 E 1

Fig. 21　Comparison of Shaking Table and Vessel Acceleration in Opened and Closed Conditions of the Vessel Top Air Valve
(Vessel water level=100%, E 1 wave excitation)



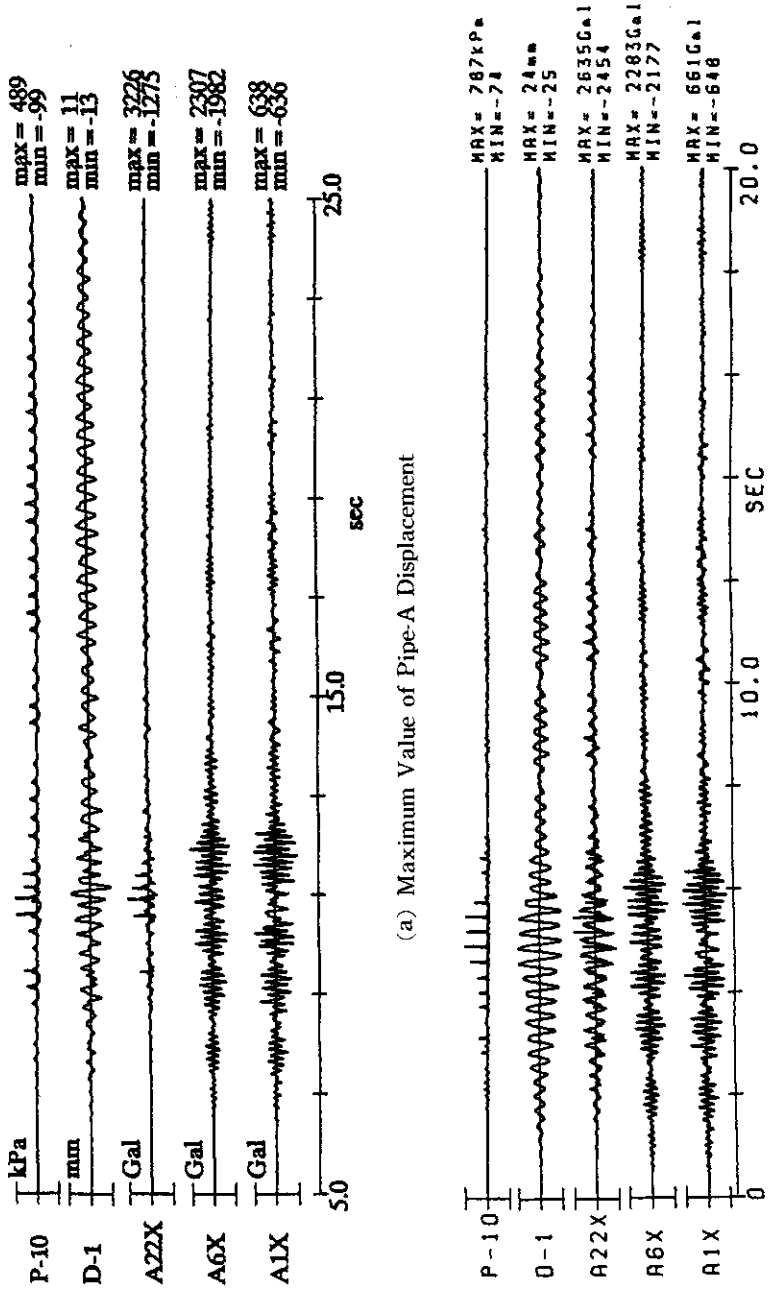
(b) Maximum Value of Pipe Support Force



(a) Maximum Value of Pipe-A Displacement

図 22　容器上部弁開放と閉鎖の場合の応答最大値の比較（配管変位および支持部荷重）
100%満水条件，入力は地震波 E 1

Fig. 22　Comparison of Pipe Displacement and Support Force in Opened and Closed Conditions of the Vessel Top Air Valve
(Vessel water level = 100%, E 1 wave excitation)

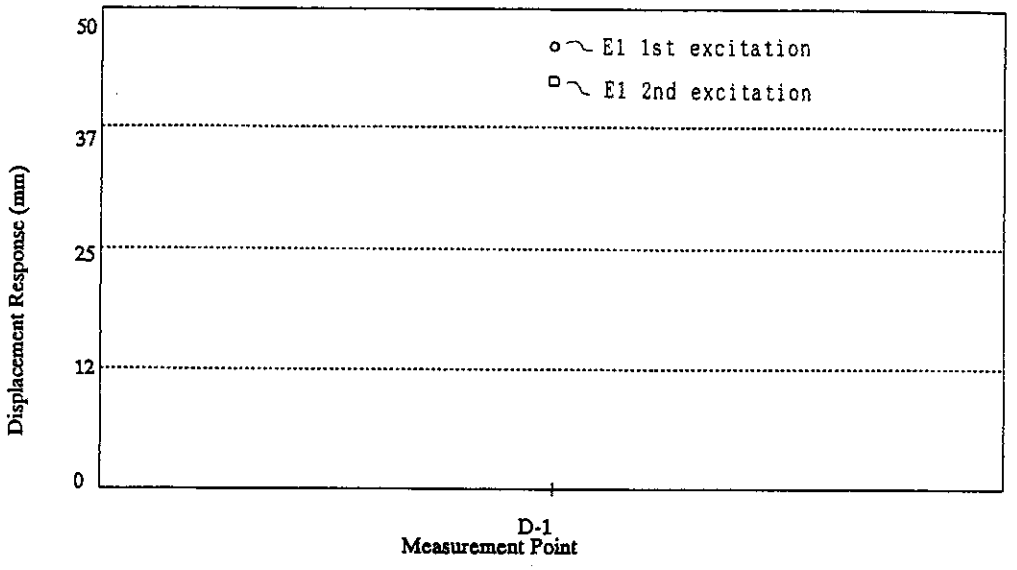


(a) Maximum Value of Pipe-A Displacement

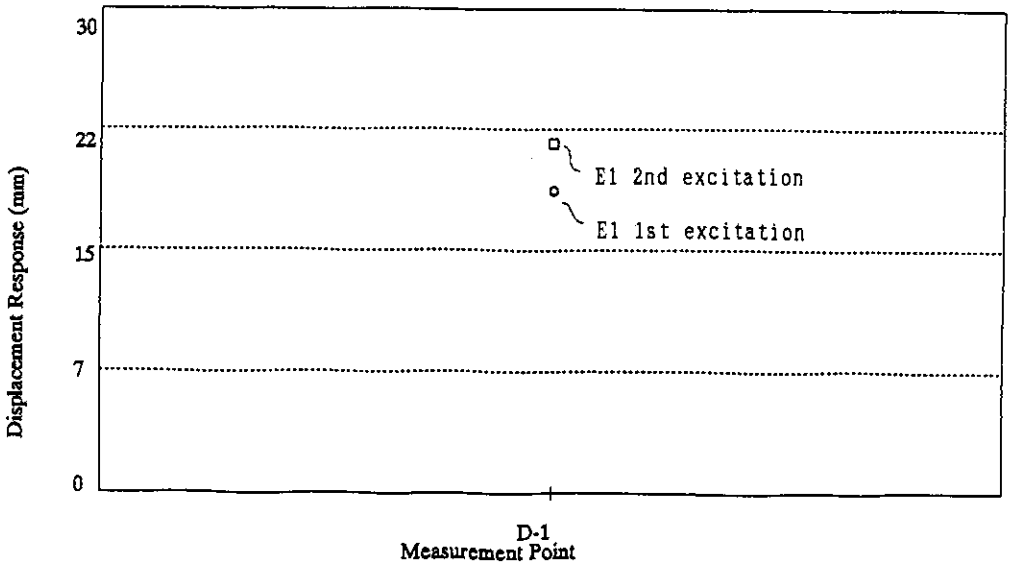
(b) Maximum Value of Pipe Support Force

図 23　容器上部弁開放と閉鎖の場合の応答波形の比較（配管変位および支持部荷重）
100%満水条件，入力は地震波 E 1

Fig. 23　Typical Response Waves in Opened and Closed Conditions of Vessel Top Air Valve　(Vessel water level=100%, E 1 wave excitation)



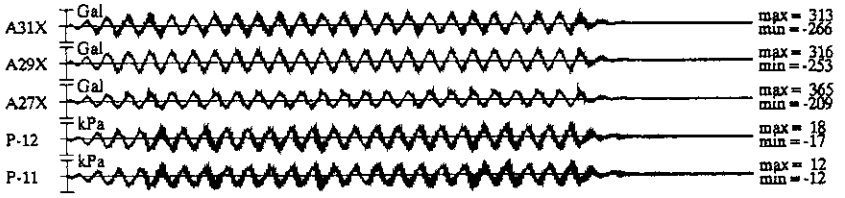
(b) 500kPa pressurized



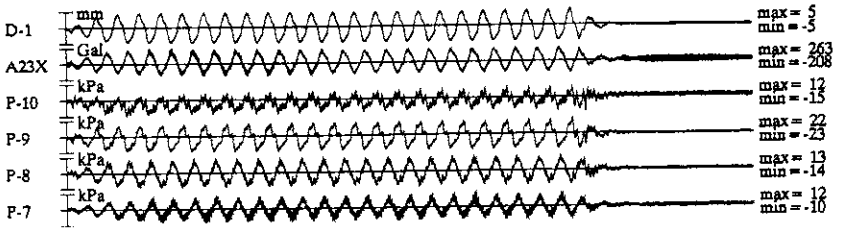
(a) Vessel water level = 80%

図 24　同じ加振に対する応答のばらつきの程度
（配管 A 変位応答，　入力は地震波 E 1）

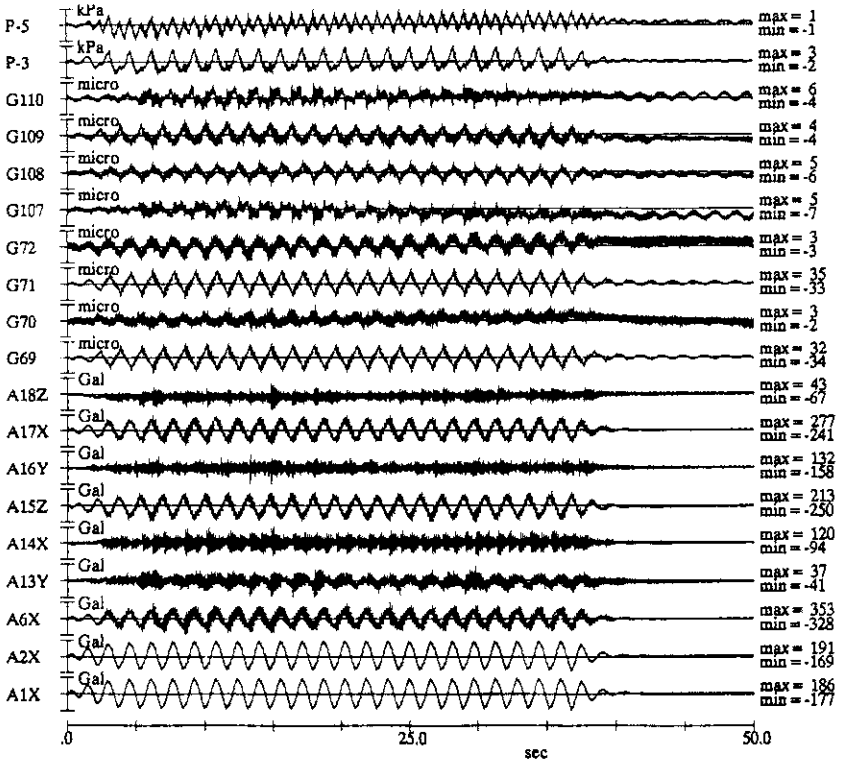
Fig. 24　Maximum Responses of Pipe-A Displacement by two same excitations
(E 1 earthquake-like wave excitation)



(c) Response of Pipe-B



(b) Response of Pipe-A



(a) Shaking Table and Vessel Response

図 25　スロッシング領域での応答（容器水位 80%，加振周期 1.575 秒）
Fig. 25　Responses in Sloshing Frequency Range
(Excitation period=1.575 sec, Vessel water level=80%)

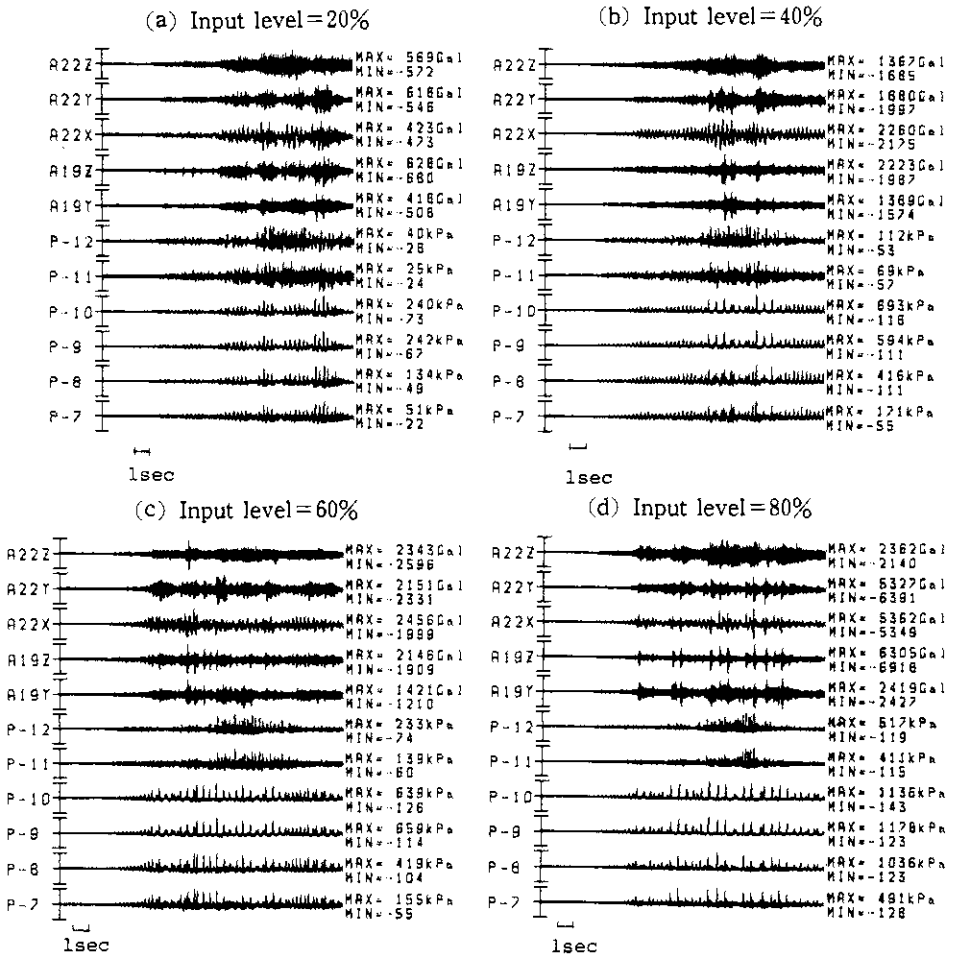


図 26　入力レベルを上げていったときの応答状況の変化（配管 A の加速度および圧力）
水位 80%，地震波 E 2
図中の%は入力レベル（100%で振動台加速度約 1 G）

Fig. 26　The Change of Response Behaviors with Increased Excitation Level
(Maximum shaking table acceleration at 100% level＝about 1 G)
Water level＝80%, E 2 wave excitation

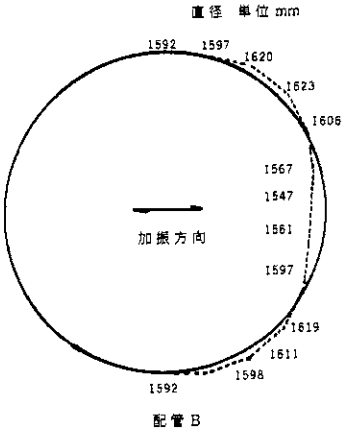


図 27　容器支持スカート（下端の据付用フランジ板）の最終変形状況

Fig. 27　The Final Deformation of Vessel Skirt (Flange Plate to Attach the Shaking Table)

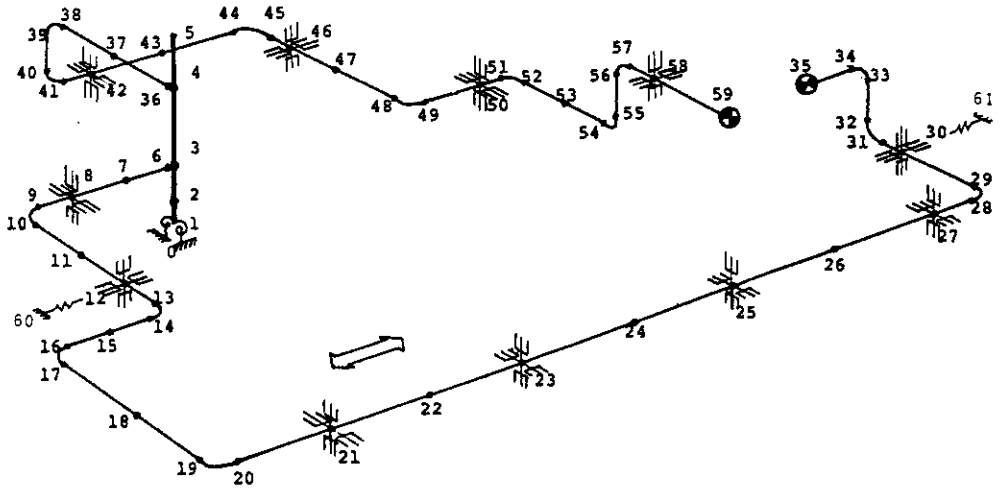


図 28　全系応答解析用モデル（容器ビームモデル）
Fig. 28　Analytical Model for Total System

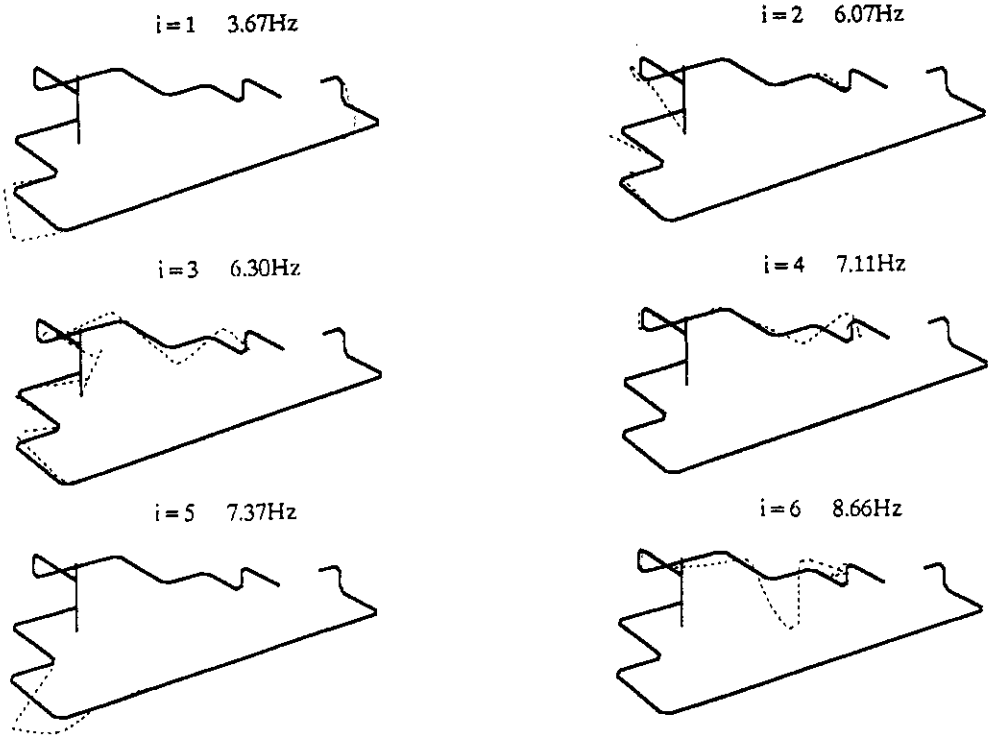


図 29　計算モデルの主な固有振動モード（流体を慣性質量としたモデルの場合）
Fig. 29　Typical Vibration Modes Calculated by Lumped Mass Model of Pipe and Internal Liquid

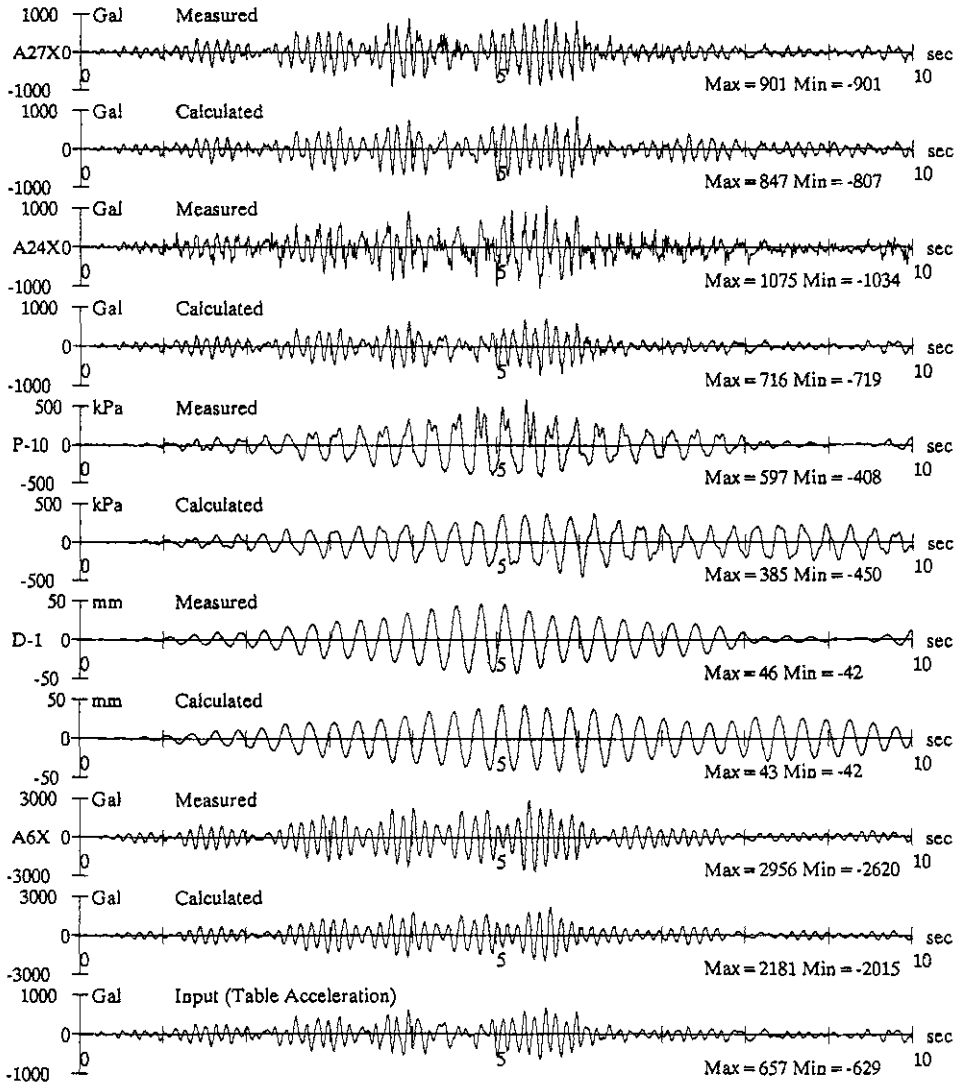


図 30　主な応答波形の比較（計算および実測，流体連成モデル）
Fig. 30　Typical Measured and Calculated Responses in Time History

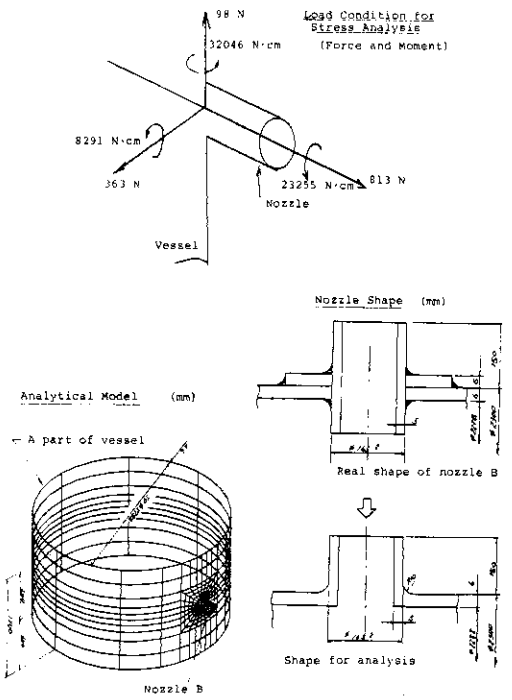


図 31　ノズル部応力解析用モデルと荷重条件
Fig. 31　A Model for Nozzle Stress Analysis and Static Load Condition for Nozzle B

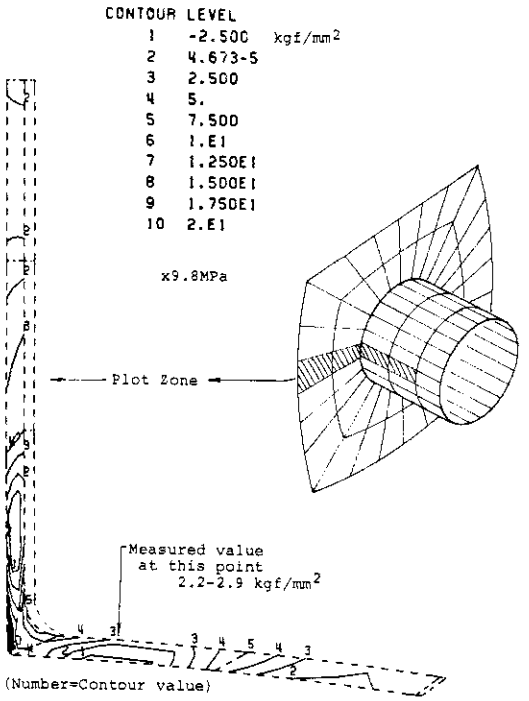


図 32　ノズル部応力計算結果（ノズル B 主応力コンター図）
Fig. 32　Results of Nozzle Stress Analysis in the Load Condition of Fig. 31 (Nozzle B Principal Stress Contour)

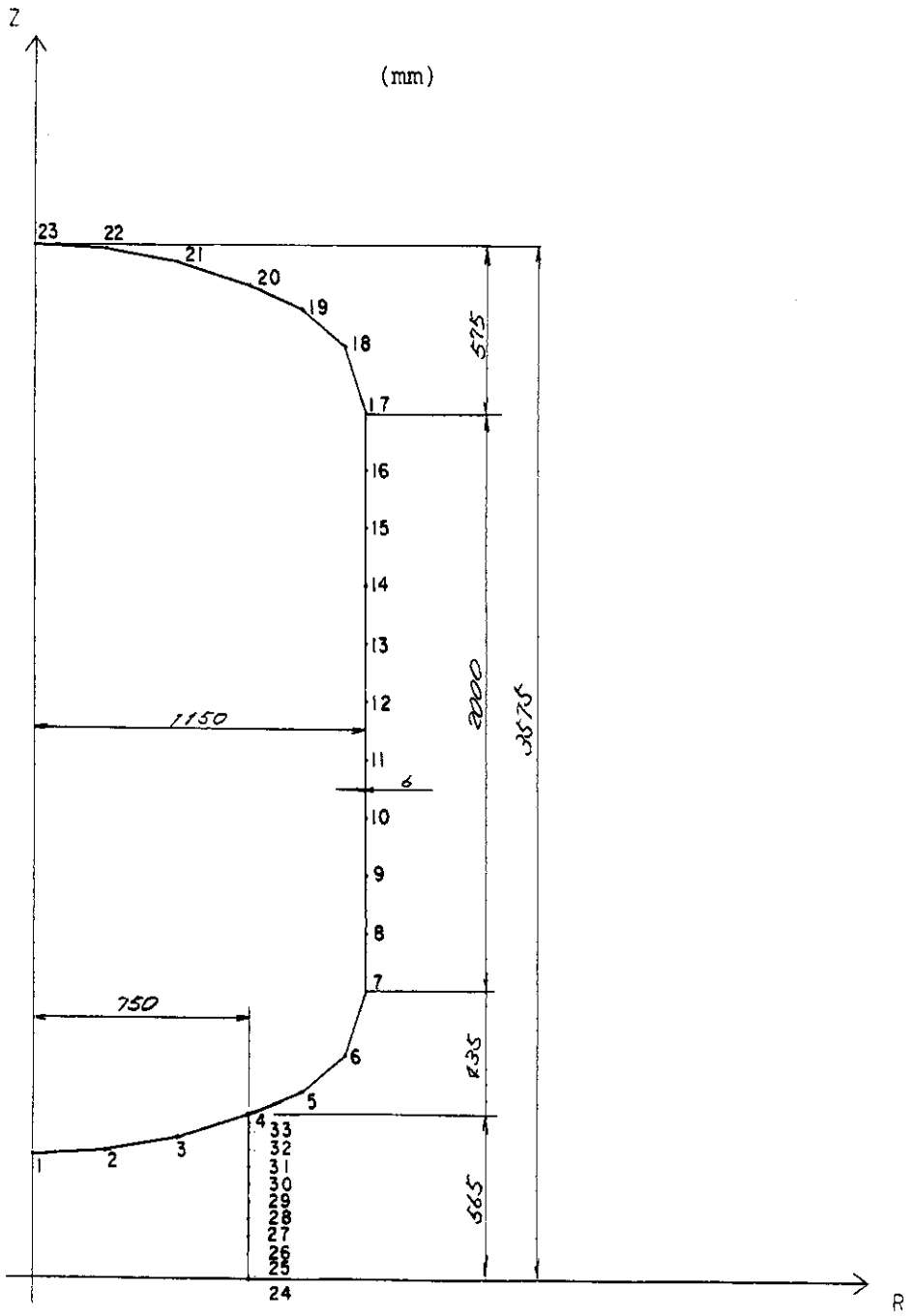


図 33　容器支持スカート解析用モデル
Fig. 33　An Model for Stress Analysis of Vessel-Skirt

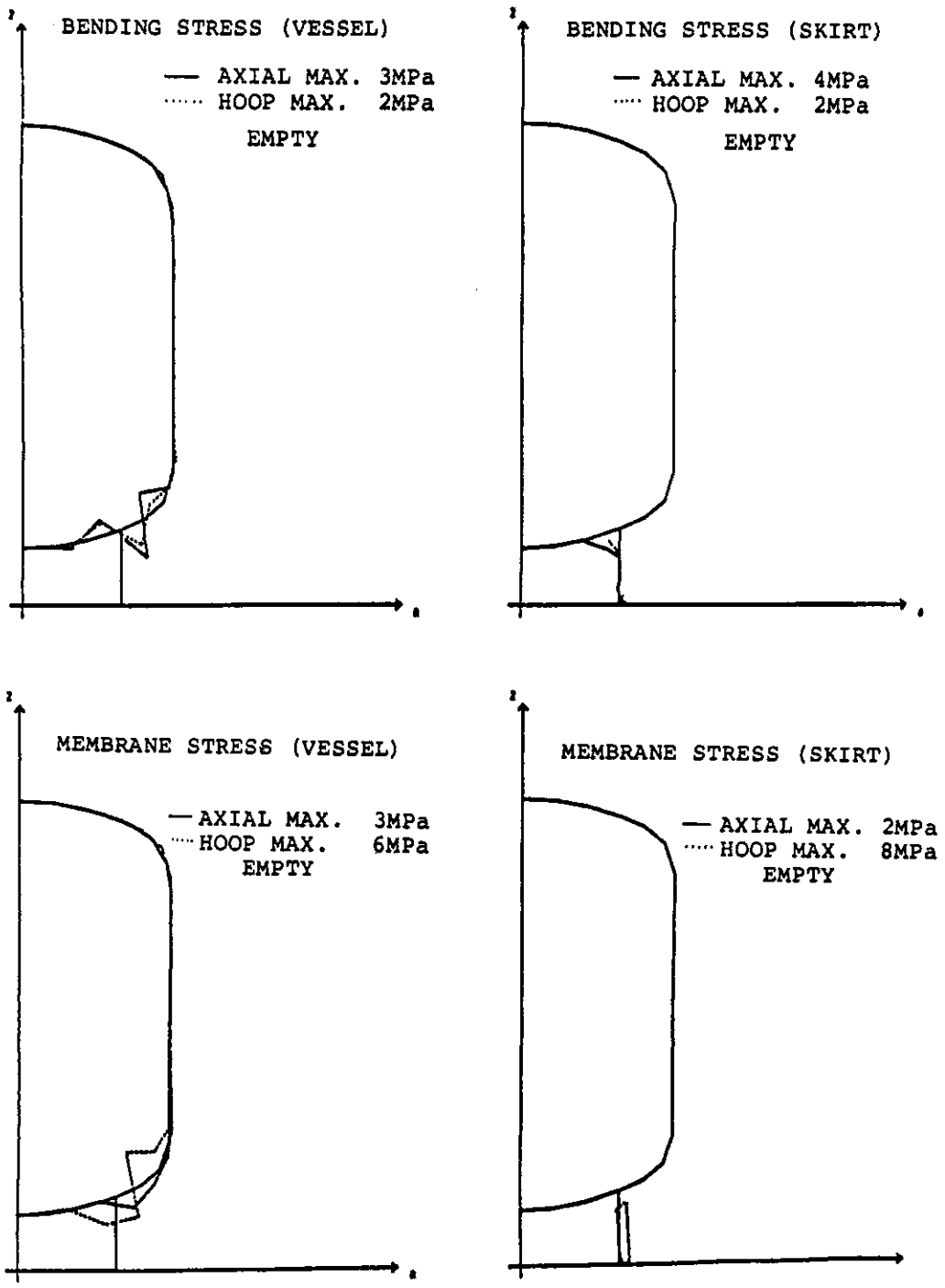


図 34　容器支持スカート付近の応力分布と最大値（計算結果）
軸方向およびフープ方向応力，荷重は水平 1 G の場合

Fig. 34　Stress Distribution and Maximum Value near the Vessel-Skirt Junction to Horizontal Static Load 1 G (calculated)

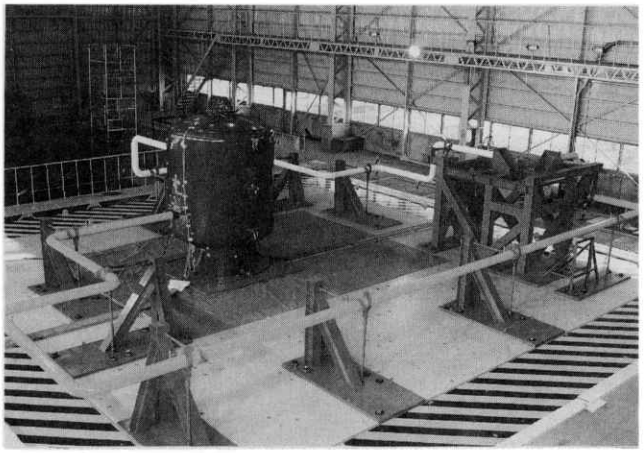


写真 1　試験体の設置状況
Photo. 1　General View of Test System

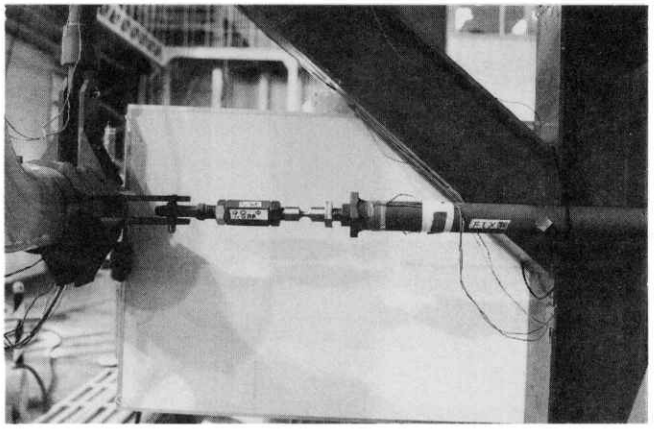


写真 2　配管支持部破断試験に用いた脆弱ロッド（9.8 mmϕ の場合）
Photo. 2　A Fragile Rod Element for Pipe Support Failure Test (Case of 9.8 mmϕ)

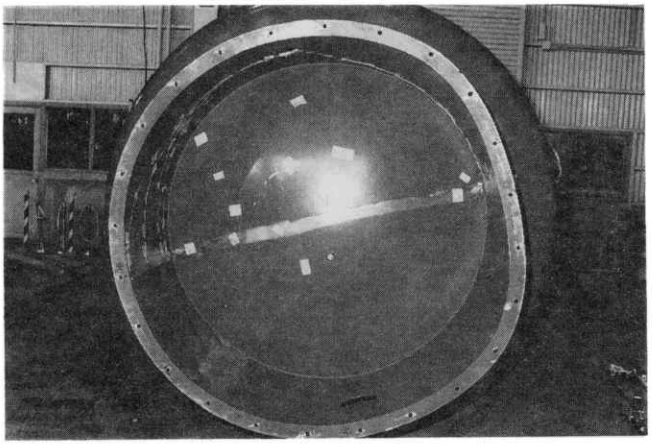


写真 3　容器支持スカート下部フランジの変形状況
Photo. 3　A Final Deformation of the Lower Flange Plate of Vessel Skirt