

模型貯油槽の振動実験

柴田 碧・重田達也
東京大学生産技術研究所
曾我部 潔
上智大学理工学部
高橋 博
国立防災科学技術センター

Experimental Study on Response of a Model Liquid Storage

By

Heki SHIBATA, Tatsuya SHIGETA

Inst. of Industrial Science, Univ. of Tokyo

and

Kiyoshi SOGABE

Faculty of Science and Technology, Sonia Univ.

and

Hiroshi TAKAHASHI

National Research Center for Disaster Prevention, Tokyo

Abstract

To ensure the safety of storages for oil and other flammable liquids, we should clarify the behavior of such liquids in a cylindrical vessel during strong earthquake.

The authors settle a model of a corn roof type oil storage tank which is 4 meters in diameter and 1.8 meters in height to investigate sloshing responses under natural earthquake conditions.

They obtained the result that the storages behave in two ways, corresponding to the response of acceleration type and that of displacement type. Acceleration type response gives the maximum response value almost simultaneously to the peak of acceleration of the ground, while displacement type response gives the delay and shows resonance phenomenon to the displacement of the ground. Therefore, in design, we should pay attention to these two types of response.

And they also studied the distribution of eigen-frequencies of liquid in a small cylindrical vessel.

目 次

第1章 序 論

- § 1.1 研究の目的
- § 1.2 液体貯槽の各種地震被害と液体動揺
- § 1.3 液体貯槽設計の現状および液体動揺に対する今までの研究
- § 1.4 本研究の今までの研究状況および今後の方向付け

第2章 理論解析

- § 2.1 液体動揺の解析

- § 2.1.1 理論解析

- § 2.1.2 液体貯槽モデルに対する液体動揺の計算

- § 2.1.3 計算結果に対する考察

- § 2.2 液体貯槽の殻体としての解析

- § 2.2.1 理論解析

- § 2.2.2 液体貯槽モデルに対する計算

- § 2.2.3 計算結果に対する考察

第3章 実験観測

- § 3.1 液体貯槽モデルによる実地震応答観測

実験

§ 3.1.1 液体貯槽モデルによる実地震応答観測

§ 3.1.2 液体貯槽モデルの寸法決定

§ 3.1.3 観測の状況

§ 3.1.4 観測結果

§ 3.1.5 観測結果に対する考察

§ 3.2 小形円筒モデルによる加振実験

§ 3.2.1 実験の概要

§ 3.2.2 実験結果

§ 3.2.3 実験結果に対する考察

第4章 結論

参考文献

付 録

A, 円筒貯槽内の液体のスロッシング周期計算図表

B, 液面動揺の応答曲線

C, 地震記録追加

第1章 序 論

§ 1.1 研究の目的

液体貯槽は内容物のほとんどが石油やLPGなど可燃性液体、液化ガスの危険物であり一度事故が起ると大きな災害に直結する可能性がある。最近これら液体貯槽について、内部の液体の動揺(スロッシング)が耐震工学的立場から問題になってきた。昭和39年の新潟地震に際し、スロッシングが第一原因で石油貯槽の火災が発生したのはよく知られているとおりである。この新潟地震では上述の例の他にも東北電力新潟火力発電所の重油貯槽や原水貯槽、日本石油新潟製油所の各種貯槽などが被害を受けている。さらに最近1971年のアメリカSan Fernando地震に於ても小被害ではあるが広い範囲にその被害がみられている。

地震波には加速度波の領域で卓越している成分と、変位波の領域で卓越している成分とがある。後者に対し貯槽の液体の自由表面が共振して大振幅になるのがいわゆるスロッシング現象である。この変位波の卓越している領域とは周期1~2secから10sec程度を意味し、通常の寸法の貯槽の液体動揺の1次の固有周期はほとんどすべてこれに入る。変位波の成因は実体波によるものと表面波によるものとが考えられるが、その多くはkmの波長に及ぶ表面波であると推定される。

最近プラントの大規模化に伴い、石油貯槽やL

PG貯槽も大型化し、貯槽内部の液体の質量が増加してきている。このため、地震時にその入力に対して共振し、液面動揺を起した際、液体の有する運動エネルギーもとうぜん大きくなる。このような状態で液体が貯槽の側壁や屋根に衝突する場合には、非常に大きな動圧力が生じ、貯槽の構造体に種々の影響を与え、さらにそれを破壊する可能性が大きくなっている。

以上の事柄を考え合わせると、液体貯槽の耐震設計を行うためには次の2点の研究が必要であると考えられる。

(1) 貯槽内部の液体の動揺を考慮に入れた液体貯槽容器の応答解析法を開発する。

(2) 入力波と定めるため長周期成分を含んだ変位波形の強震記録を得、解析する。

本研究の目的は上記の2項目を中心として実用上役に立つ液体貯槽の耐震設計法を開発するための基礎資料を得る事にある。本報告はその目的に沿って解析および貯槽モデルの実地震応答観測を行なった。

§ 1.2 液体貯槽の各種地震被害と液体動揺

液体貯槽の地震被害はかなり多様である。主なものを挙げるなら

- 1) 浮屋根の動揺、旋回
- 2) トップアングル部の破損
- 3) 円錐天井板の破損
- 4) 側壁上部から下部にかけての換れ座屈
- 5) 側壁の長円形状変形
- 6) 側壁下部の張り出し
- 7) 側壁・底板の接続部附近の切断
- 8) 内部支持柱の折損
- 9) 全体の横ずれ
- 10) 全体の沈下

などがある。このうち4)のように現時点では、その力学的機構が不明のものもある。このうち液体動揺が直接関連していると考えられる貯槽の破損例から1,2例を紹介すると次の通りである。

昭和39年6月16日に発生した新潟地震(M=7.5)の際には新潟地区で大型の浮屋根式石油貯槽の浮屋根が大きく動揺し、内部の原油が噴出し、この原油に火が付き、大火災となり、さらに隣接貯槽にも延焼して長時間燃え続けた(1.1)。このような災害発生に至らなかった貯槽でも、内部の原油、重油などが非常に大きく動揺し、貯槽側壁上部のトップアングル附近を破壊し、あるいは

は側壁上部を越えて外側に流出した。これらの事故の第1原因は内部の油類の動揺にあると思われる。新潟地震でみられた破壊の様式としては、上述のような1)の浮屋根の動揺のほか2), 3), 4), 5), 9), 10)などである。このうち10)を除いては液体の動揺現象が直接関係していると思われる。このうち2), 3)は波頭の衝撃によるものであって解析計算の対象と仕難い面がある。また4)については、液体が動揺したとき回転流を発生することが多いので、それが関係しているのではないかと推定されるが、明らかではない。貯槽自体の換れ入力に対する剛性不足がある可能性も否定できない。

昭和43年5月16日の十勝沖地震(M=7.8)では幸いにして貯槽の被害はすくなかった(1.2)。

青森、八戸地区で横ずれ現象がみられた。これは単純に主として横方向加速度で動くのか、あるいはまた液体の動揺現象にもとづく液体の動心移動による慣習力の作用なのか明らかでない。また室蘭地区では軽度の換れ現象等スロッシングの影響がみられた。

また1971年2月9アメリカ西海岸ロスアンゼルス地区 San Fernando 地震(M=6.6)が襲った。この地震地域にある幾つかの液体貯槽について内部の液体の動揺の固有周期を計算してみた結果、何等かの事故のあった液体貯槽の液体の動揺の固有周期はほぼ4.5sec附近であることが分った(表1.1参照)(1.3)。上記の事実も貯槽内部の液体が地震動に対し選択的に共振して生ずる動揺が貯槽の地震被害の原因の一つである事を示す良い例であると思われる。

表1.1 貯槽スロッシング周期(被害にあったもの)

地 点	直 径	液 面 高	周 sec 期	備 考
Long Beach	50'	?	(4.3)	軟質沖積層
Oxnard	63'	40'	4.62	……(?), 軽油
Santa Susana	60'	80'	4.48	砂岩, 水
L. A. 空港 *1	60'	30~35'	4.59~4.54	砂丘, 軽油
L. A. 空港 *2	45'	30~35'	3.90~3.89	砂丘, 軽油
他の地震による例				
Bakersfield	100'	48'	5.96	沖積層(乾燥)(1952)
新 潟	51.5m	13.0m	8.79	軟弱地, 原油 } (1964)
新 潟	44.6m	12.1m	8.00	

() 概算値, *1:被害率3/3, *2:被害率1/3

表1.1からみてもわかるように被害は地盤条件によらず広範囲(震源からほぼ半径70~100kmの円内)である。このことは新潟地震の際に言われた、ごく表層附近のみの地盤が関与する振動、表面波によるものではなく、かなり深いところまで関係した半実体波的振動によるものではないかという考えを裏付けているものと思われる。

上記の様な液体貯槽内部の液体の動揺の固有周期は1~10sec(容量にして約10kl~130,000kl)と今までの耐震設計の対象物の固有周期とは比較にならない位長い。さらに液面動揺の励振機構は加速度の卓越した成分による励振よりもむしろ

変位が卓越した成分による励振であると考えられる。従って、液体貯槽の設計に際しては、従来の通常の構造物(概して短周期)に対して適用してきた加速度(震度)を基準として行なう耐震設計法をそのまま適用する事はできない。また応答計算等に用いる入力波としても今までに得られている加速度計による強震記録は不十分な点が多いと考えられる。

§ 1.3 液体貯槽設計の現状および液体動揺に対する今までの研究

液体貯槽の設計を行う際に液体の動揺を考慮に入れようとして、そのために行なわれた研究は幾

つか報告されている。しかしこれらはいづれも実際の設計には直接利用しにくい面がある。とくに前述のような被害例の多様性と必ずしも結び付かない。また入力波としての地震波についても加速度波形を使用している。わが国の現状は強震記録の大部分は加速度波であり、長周期に着目した変位波の強震記録はほとんど無く、止むを得ない面もあるが早急に対策が施されねばならぬ点である。

わが国に於ける液体貯槽の設計では貯槽容器に対する静的横力による安全計算を主とした耐震設計は行なわれているが、動的解析をもとにした耐震設計は行なわれていないのが現状である。これは液体貯槽の設計に対し、動的解析にもとづく耐震設計を義務付ける法規が無いのも原因の一つであると考えられるが、液体貯槽に対し、実際の設計に用いることのできる、内部の液体の動揺まで考慮する耐震設計法が未だに確立されていないのが大きな原因であると考えられる。

アメリカに於ては、液体貯槽の設計に対し液体の動揺の影響を考慮する方法としてHousnerの理論(1.4)を基にした手法がU. S. Atomic Energy Comissionより出されたT I D Report 7024により推せんされている(1.5)。

(省 略)

§ 1.4 本研究の今までの研究状況および今後の方向付け

以上の状況に対し、次の様な考えで研究を進めた。

まず、研究の第1段階として、液体貯槽の設計に対しては従来行なわれている加速度入力に対する応答解析に加えて、長周期変位入力に対する応答解析をも考慮する必要がある事を提案し、これを第2章の理論と第3章の地震応答観測により実証した。また、液体貯槽の固有値解析および応答解析に対しては、内部の液体の質量効果が非常に大きいので、その効果を取り入れた解析が必要である事を第3章のモデル実験で示した。

今後はこの研究を次の方向で行なうのが適当と考えられる。

(1) 入力波としての変位波の観測を更に続行し、変位波に対する基礎データを得、これを解析することにより模擬地震波を作成するための資料を得る。さらに大地震時の変位波の特性について最近の地震発生機構に関する理論を検討し、地震記録の不足を補う。

(2) 変位波入力に対する液体貯槽系の応答にも

とづく強度面からみた解析理論を作成する。

(3) 以前からある設計法に上記の設計法を組み合わせて、液体貯槽系の設計方法を確立する。

第2章 理論解析

§ 2.1 液体動揺の解析

§ 2.1.1 理論解析(省略)

§ 2.1.2 液体貯槽モデルに対する液体動揺の計算

§ 3.1に示すように東大生研千葉実験所で、液体貯槽モデルを対象に実地震に対する液体貯槽の応答の観測を行った。この貯槽モデルに対して§ 2.1.1の解析理論を適用して、内部の液体の動揺の固有周期および液面変位と容器に働らく圧力を計算した。

なお、この計算結果は、水の減衰は無いものと仮定し、 $\mu = 0$ として計算したものである。

計算の対象とした貯槽モデルの寸法は次の通りである。

$$\text{半 径} \quad R = 2.0 \text{ m}$$

$$\text{液面の高さ} \quad H = 1.538 \text{ m}$$

また内部は水で満されているので、液体の比重量として次の値を用いた

$$\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$$

以下に計算結果を示す。

図 2.2は液体の動揺の固有周期を低次のものから順に10次まで求めた結果を示している。この図より、この貯槽モデルの内部の液体の1次の固有周期は約2.2 secであることがわかる。

次にこの貯槽モデルを加振した場合の応答に対して次の三つの場合について計算した。

(1) 衝撃的な振動を行うと考えられる場合

$$T = 1 \times 10^{-5} \text{ sec}$$

$$A = 100 \text{ gal}$$

この場合の計算結果は図 2.3に示されている。

(2) 液面の動揺の1次の固有周期近くで振動を行う場合

$$T = 2.2 \text{ sec}$$

$$D = 1 \text{ cm}, \quad A = 8.32 \text{ gal}$$

この場合の計算結果は図 2.4に示されている。

(3) 液体の動揺の1次の固有周期に比較して十分に長い周期の振動を行う場合

$$T = 10.0 \text{ sec}$$

$$D = 1 \text{ cm}, \quad A = 0.4 \text{ gal}$$

この場合の計算結果は図 2.5に示されている。

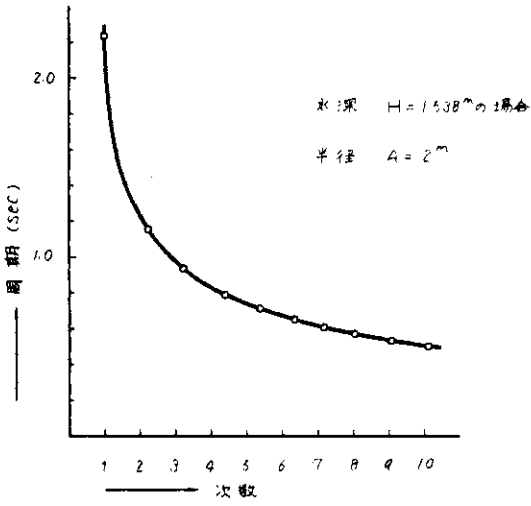


図 2.2 液面動揺の固有周期

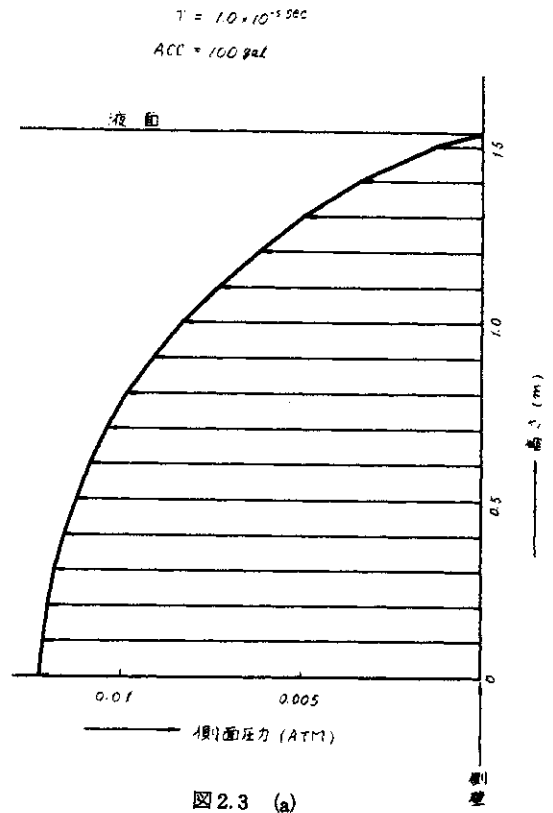


図 2.3 (a)

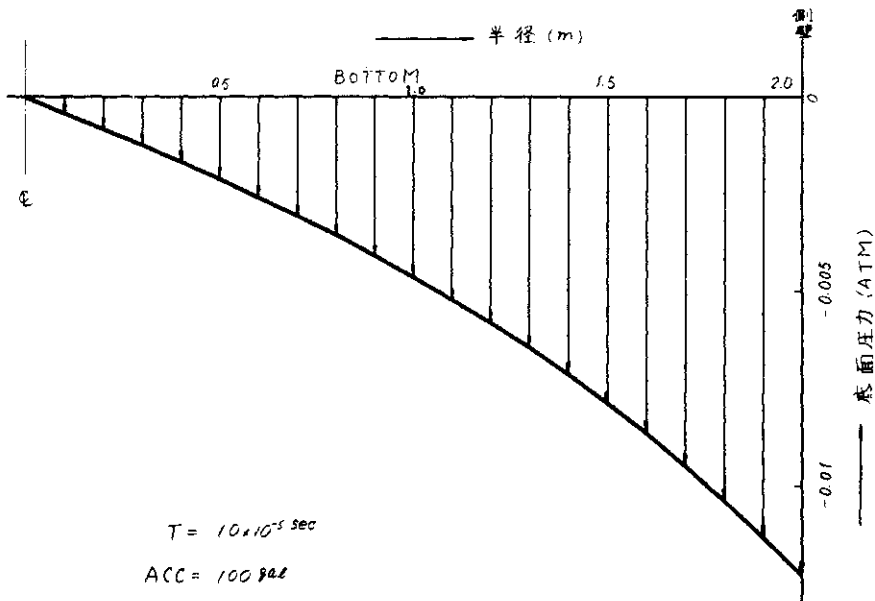


図 2.3 (b)

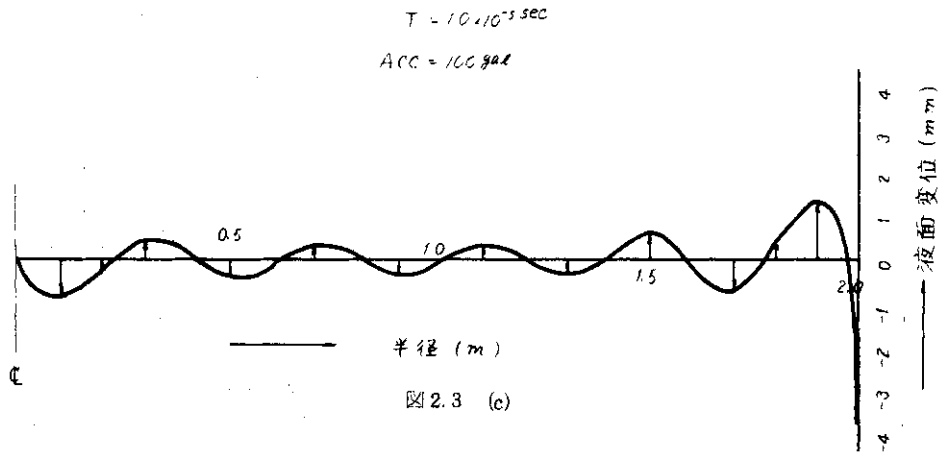


図 2.3 (c)

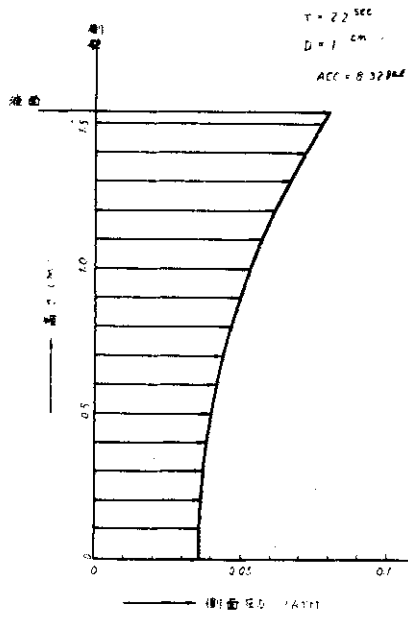


図 2.4 (a)

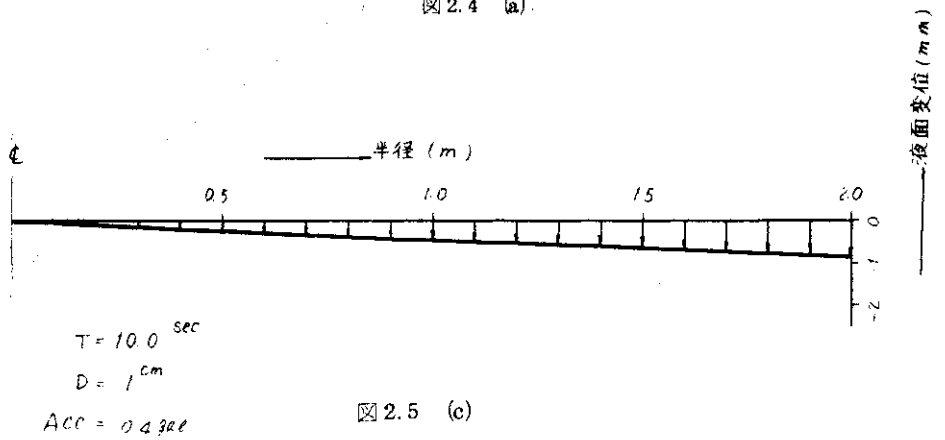


図 2.5 (c)

§ 2.1.3 計算結果に対する考察

図 2.3 は貯槽タンクが水平方向に 100 gal の衝撃的な加速度を受けた場合の応答を示している。図 2.3 (a) より側面圧力は変位方向と位相が 180° ずれていることが分る。また側面圧力は液の表面では 0 であり、底面に近くなるにつれて大きくなることが分る。

図 2.4 は貯槽タンクが水平方向に振幅 1 cm 周期 2.2 sec の変位加振を受けた場合の応答を示している。この場合の加速度は約 8.32 gal である。これは液面の 1 次の動揺がほぼ外力に共振している状態を示している。この場合の側面圧力は底面で最小であり、液の表面に近くなるにつれて大きくなることが分る。これは丁度図 2.3 (a) の場合と反対の圧力モードであると考えられる。この場合の加速度は図 2.3 の場合の $1/12$ 位であるにもかかわらず、側面圧力の最大値は約 6.5 倍と大きいことが分る。またこの場合には側面圧力は底面から離れるにつれて大きくなっているから、この圧力による容器底面の曲げモーメントも図 2.3 の場合に比較して相当に大きくなるものと考えられる。

図 2.5 は貯槽タンクが液面の動揺の固有周期に対して充分大きい場合である。この場合には、側面圧力は壁面に沿ってほぼ一定で非常に小さいことが分る。

次に液面の変位については次のことが分る。図 2.3 の場合には衝撃的な力を受けるので、液面変位は低次～高次のモードの重畳されたものが現われ、図 2.4 の場合には 1 次のモードのみが卓越し

ている。また、図 2.5 の場合には、液面はほぼ平面的な動きをすることが分る。

以上の事より、例えば図 2.3 のような加速度が卓越した衝撃的な励振に対する応答よりも図 2.4 に示すような、加速度は小さいが液体の動揺の固有周期に近い周期成分をもつ変位波にする励振に対する応答の方が大きくなることが確かめられた。従って液体貯槽の設計には従来の衝撃的な励振に対する応答のみでなく、変位波による液体の動揺の固有周期近くの励振に対する応答も考慮する必要があると考えられる。

§ 2.2 液体貯槽の殻体としての解析

§ 2.2.1 理論解析(省略)

§ 2.2.2 液体貯槽モデルに対する適用

§ 3.1 に示すように、東大生研千葉実験所で、液体貯槽モデルを対象に、実地震に対する液体貯槽の応答を求める観測を行った。この貯槽モデル容器の固有値および振動モードの解析を SHELVIA を用いて行った。

貯槽モデルの詳細な図面は図 3.6 に示されている。この貯槽容器を図 2.9 のようにモデル化し計算した。使用した材料定数も同時にこの図の中に書き入れてある。

計算結果を示すと次のとおりである。

図 2.1 0 はこの容器の固有振動数をプロットしたものであり、図 2.1 1 は図 2.1 0 のプロットの内◎印のある点に対する容器の振動形を表わしている。

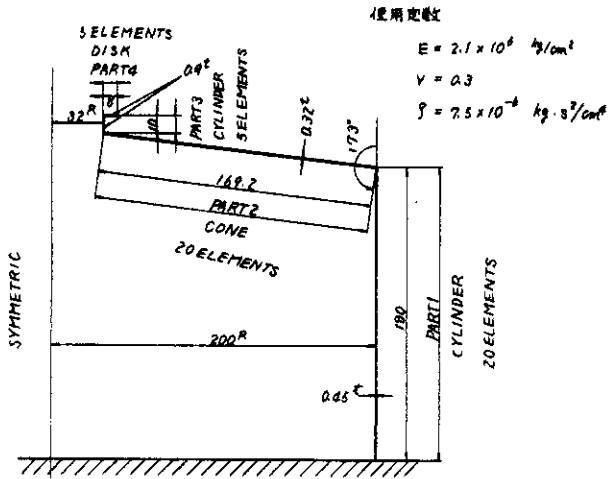


図 2.9 SHELVIAによる計算のための要素分割図(単位cm)

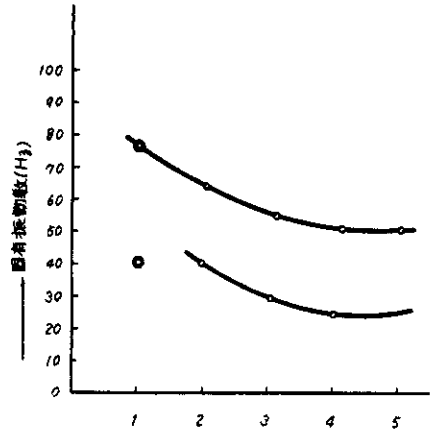


図 2.10 貯槽容器の固有振動数

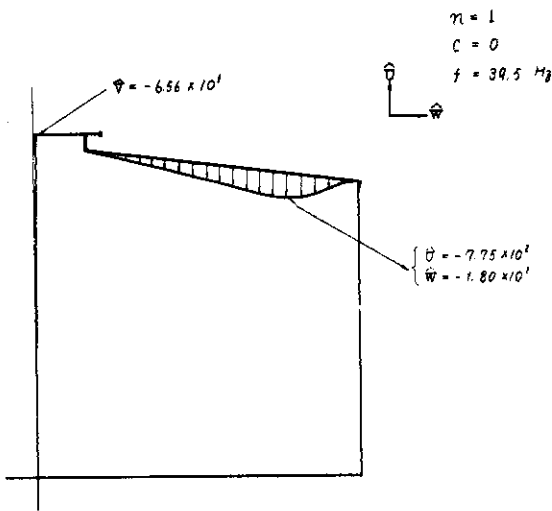


図 2.11 (a)

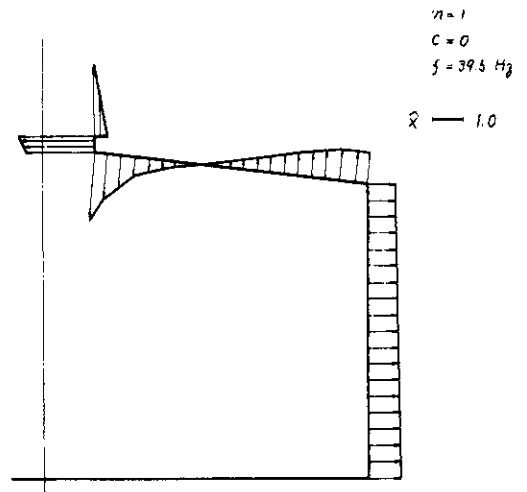


図 2.11 (b)

$n = 1$
 $C = 0$
 $f = 39.5 \text{ Hz}$

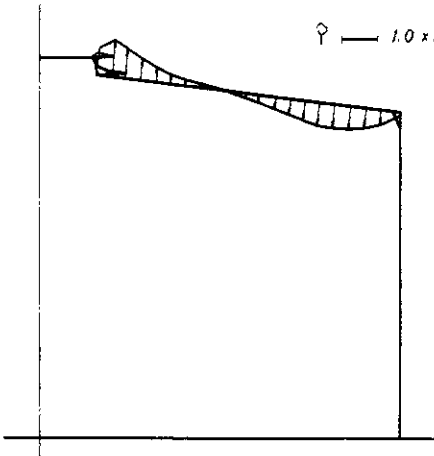


図 2.1 1 (c)

$n = 1$
 $C = 0$
 $f = 39.5$

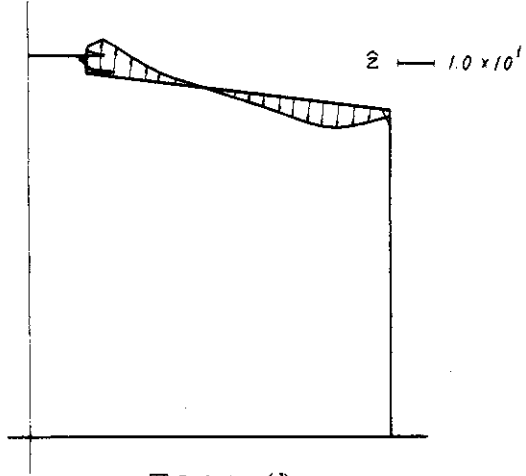


図 2.1 1 (d)

$n = 1$
 $C = 0$
 $f = 39.5$

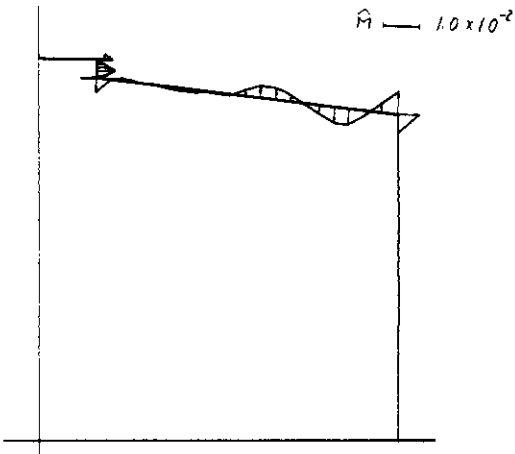


図 2.1 1 (e)

§ 2.2.3 計算結果に対する考察

図 2.1 1 から分る様に、このタンクは屋根の部分に側面部分に比較して柔かいのでこの部分が主として振動することが分る。また図 2.1 0 より分る様にこのタンクの固有振動数は、液面の動揺の固有振動数に比して相当大きいことが分る。従って液面の動揺に対するタンクの応答倍率はかなり 1 に近いものと考えられる。

尚屋根の部分のラフターの影響を考慮して板厚を厚くした計算モデルに対しても計算を行ったが、余り変化は見られなかった。

第3章 実験観測

§ 3.1 液体貯槽モデルによる実地震応答観測実験

§ 3.1.1 実験の目的

§ 1.1 に示した様に、内部の液体まで考慮して液体貯槽の耐震設計を行うためには液体貯槽の応答理論を確立することが重要である。がしかしそれが未だ確立されていない現在、液体貯槽の応答を実験的に考察することは、既存の理論の検証に役立つのみでなく、今後の理論研究に大きな指唆を与えてくれる可能性が大きいと考えられる。今までにも液体貯槽を対象にした加振実験も幾つか報告されている(1.1)。しかし、これらはほとんどが正弦波を入力とする加振であり、不規則波(地震波)による加振は余り行なわれていない。また、使用しているモデルもかなり小さいものが多く、実際の貯槽をうまくモデル化したものは少いと思われる。

さらに入力波の問題にしても、加速度波形としては多くの強震記録もあるが、液体の動揺の励振に相当であると思われる変位波形としての強震記録はほとんど見られない。

以上のような状況のもとで、本実験では次の事項について観測を行い、今後の研究の基礎資料とすることをその目的とする。

(1) 入力波形としての変位波形の強震記録を得るために長周期地震計による観測を行う。

(2) 実際の液体貯槽になるべく近い貯槽モデルを用いて実地震に対する液体の動揺の状態および貯槽容器の変形に対する応答を求める観測を行う。

§ 3.1.2 液体貯槽モデルの寸法決定

本観測は東大生研千葉実験所柴田研究室敷地内で行なわれることに決った。この敷地内では以前から地震観測が行なわれている。この観測結果から、この場所で得られる変位波形は次のA, B, C型の3種類に分けることができることが分っている(3.1)(図3.1参照)。

A型: 茨城, 千葉, 銚子等に震源をもつ近地地震によるもの。周期0.4~4 secの波が卓越しているが、時間と共に次第に3~4 secの長周期成分のみ卓越してくる。地震の継続時間は2~10 minである。

B型: 福島沖等海洋に震源をもつ中距離地震によるものや、地震とは考えられないときに起るものもある。周期は2~4 sec位の正弦波に類似し

た波で、明瞭なうなりが特徴である。地震継続時間は5~10 hと非常に長い。

C型: 北海道沖, 三陸沖, 樺太などに震源をもつ遠距離地震によるもの。周期8~14 secの正弦波に類似した波で、明瞭なうなりが特徴である。地震継続時間は30 min~2 hとかなり長く続く。これらの変位波の卓越周期と貯槽モデル内部の液体の動揺の1次の固有周期とをなるべく近くすることを貯槽モデルの設計の目標とした。C型に合わすとする貯槽モデルの寸法が非常に大きくなるので、これは一応対象からははずすことにした。残りのA, B型両方の波形に対して、内部の液体が大きな動揺を起すようにするためには、液体の動揺の1次の固有周期が大体2 sec前後になるように設計すれば良い。周囲の状況その他から考えて、一応直径4 m位が適当と思われるので、水位は1.5 mが適当となる。以上のことを総合して、貯槽モデルの寸法を次のように決定した。

直 径	4.0 m
側壁の高さ	1.8 m

図3.2はこの貯槽内部の液体の動揺の1次の固有周期と水位の関係を示したものである。この図からも分るとおり、水位を多少加減すれば、液体動揺の1次の固有周期は2~3 secとなるので、A型, B型の変位波に対して共振を起すのに適当であると考えられる。

§ 3.1.3 観測の状況

この観測は、地震時における地表面の変位、加速度各1個と液体貯槽モデルの液面変位、側面圧力および側壁の曲げひずみ各2個に対して行った。計測は昭和48年1月下旬から開始された。

観測場所は、千葉市西方の東大生産技研千葉実験所内の柴田研究室の敷地内である(図3.3参照)。この周辺は広場や各実験施設等が点在するが、大きな振動を発生するものは無く、割に閑寂な場所である。

地表面の変位および加速度は地震観測小屋の内部の床と切り離された1 m²のコンクリートブロック上(図3.4参照)で行った。また貯槽モデル(図3.5参照)はこの観測小屋の近くに設置された。この敷地内の地盤のボーリングデータを表3.1に示す。これより、ここの地盤はかなりしっかりしたものであることが分る。

計測対象は地表面と液体貯槽モデルに対して合計8個である。これらを次に示す。

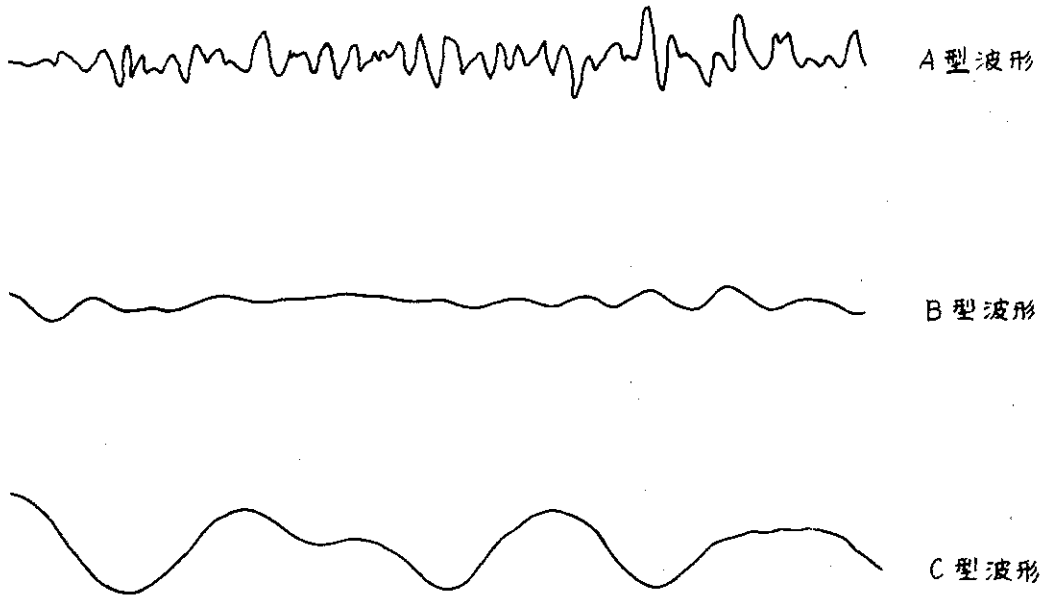


図3.1 東大生研千葉実験所で観測された3種類の変位波形

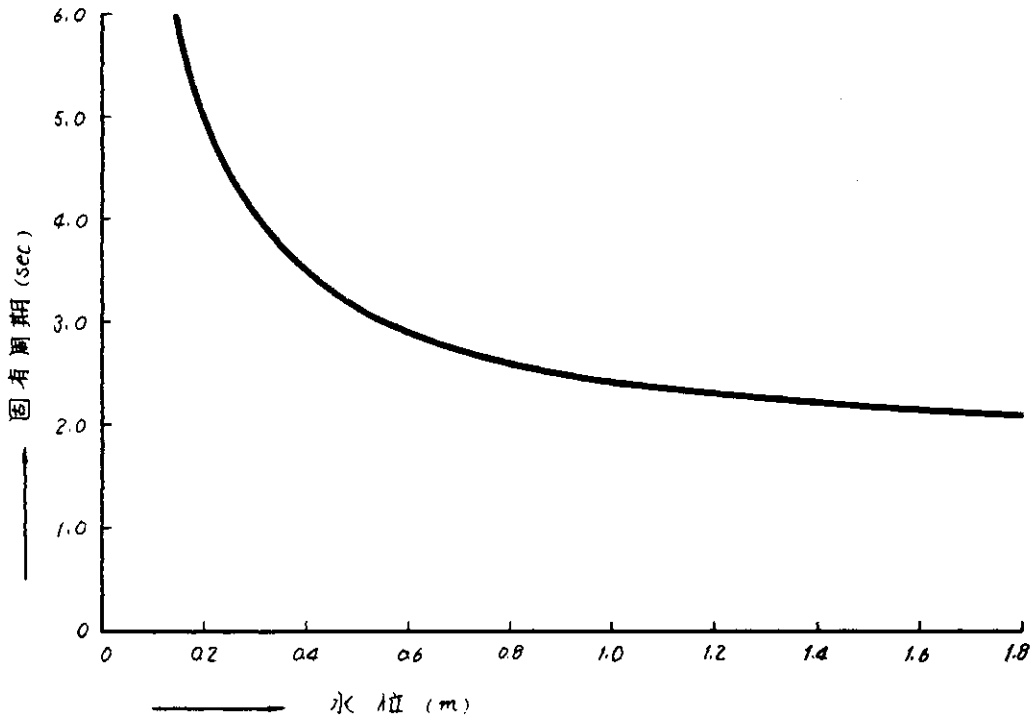


図3.2 水深による1次の液面動揺の固有周期の変化

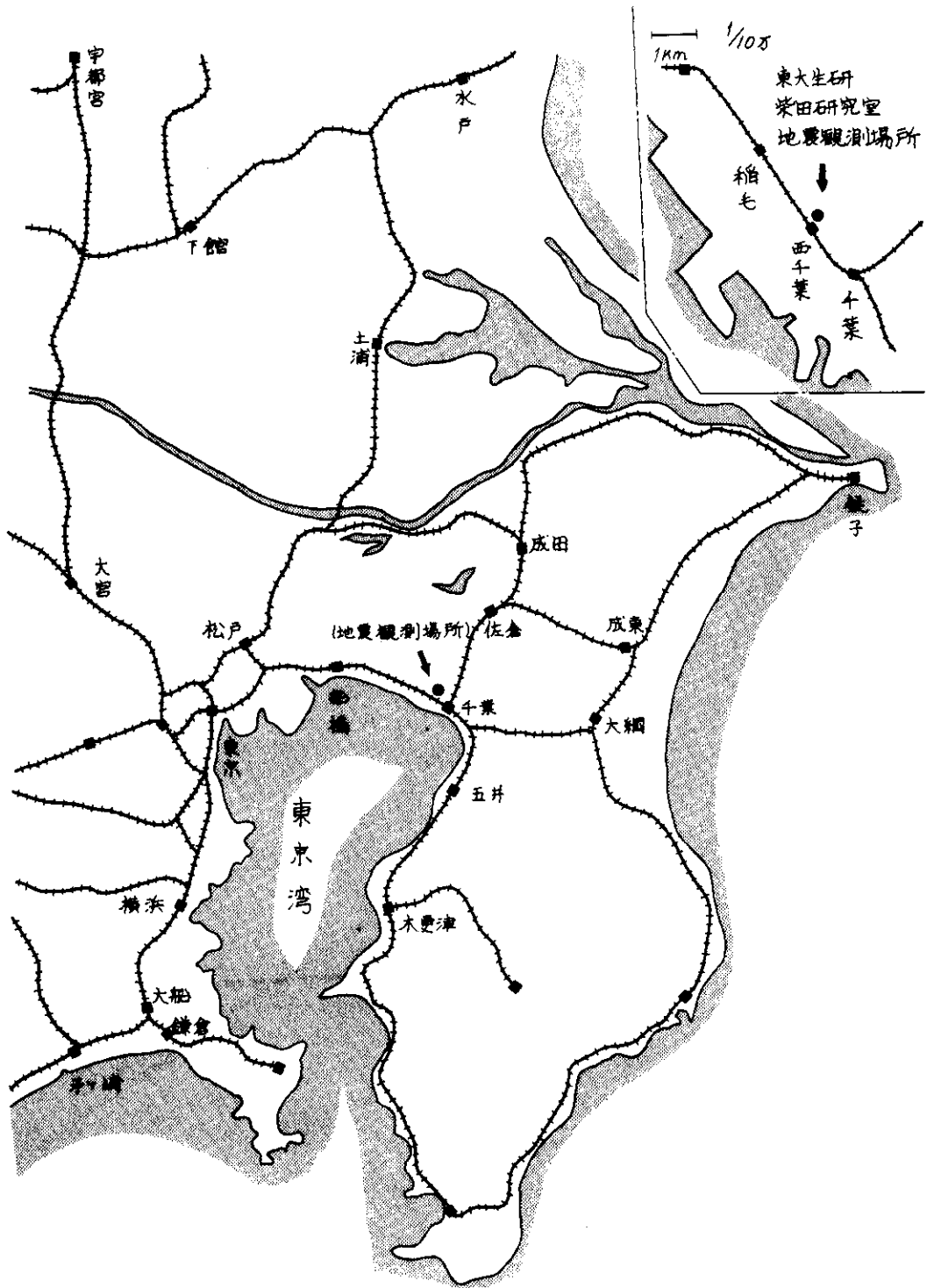


図 3.3(a) 地震観測場所

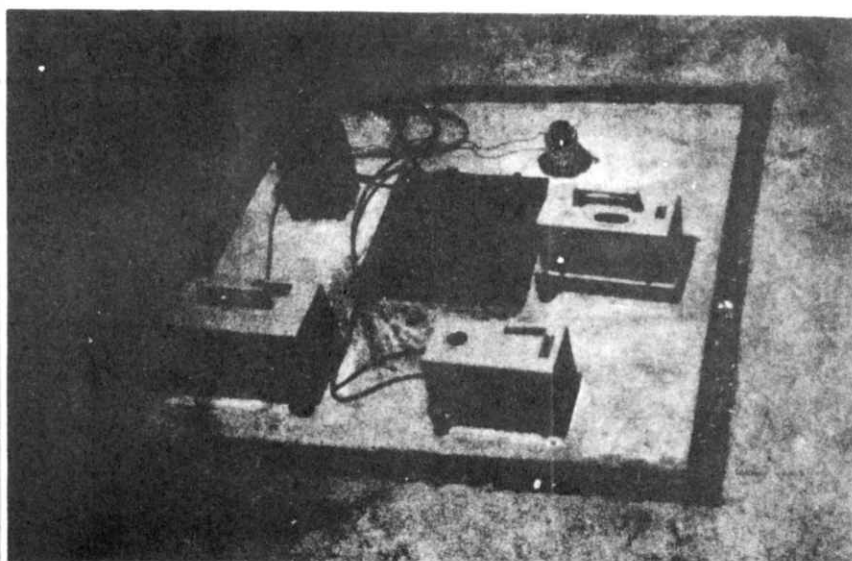


図3.4 コンクリートブロック上のピックアップ

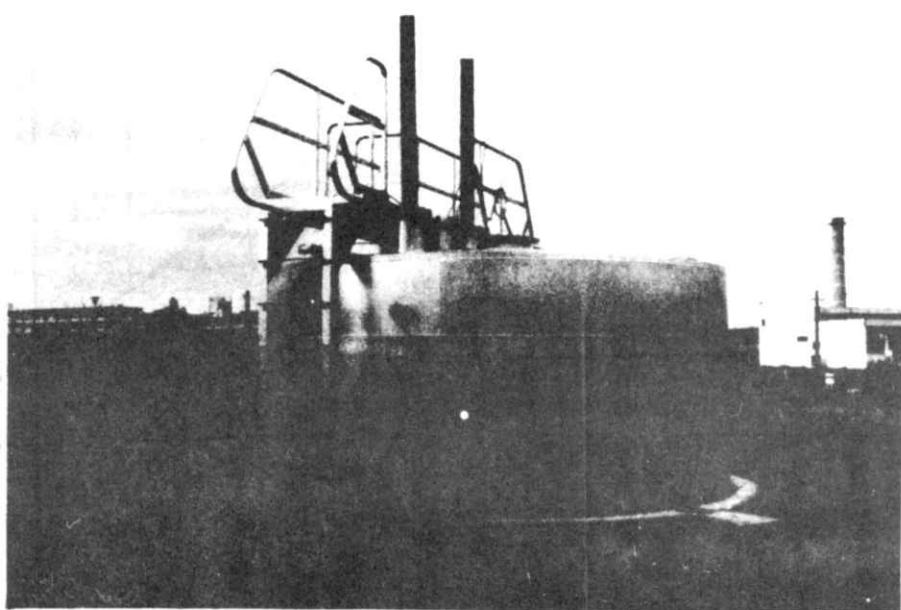


図3.5 液体貯槽モデル全景

表 3.1 ポーリングの際の土質データ

採取深度	土質名	N 値
0 ~ 0.3 m	埋 土	—
0.3 ~ 0.6	表 土	—
1.25 ~ 1.45	ロ ム	5
2.15 ~ 2.45	"	4
3.15 ~ 3.45	"	4
4.15 ~ 4.45	"	3
5.15 ~ 5.45	"	4
6.15 ~ 6.45	"	5
7.15 ~ 7.45	粘土混砂	11

地表面の地震波の計測対象の記号とその内容は次の通りである。

- (1) ACC : 地表面加速度 (NS 方向)
- (2) DISP : 地表面変位 (NS 方向)

液体貯槽モデルの詳細は図 3.6 に示す通りである。この貯槽モデルに NS 方向の地震波に対する応答を求める目的で次の 6 個の計器を取り付けて観測した (図 3.6, 3.7 参照)。測定対象の記号と内容は次の通りである。

- (3) SL1 : 液面変位 (側壁に近い側)
- (4) SL2 : 液面変位 (中心に近い側)
- (5) PR1 : 側面圧力 (上側)
- (6) PR2 : 側面圧力 (下側)
- (7) ST1 : 側壁曲げひずみ (上側)
- (8) ST2 : 側壁曲げひずみ (下側)

個々の観測に使用した機器および測定方法は次に示す通りである。

- (1) 加速度計による加速度波観測

普通に用いられているストレインゲージ型の加速度ピックアップを用いストレインメータを用いて観測した。この加速度計を 1 m² のコンクリートブロック上に NS 方向の加速度が測定できるように設置して観測した。測定できる最大加速度は 2 G である。

- (2) 長周期変位計による変位波観測

ピックアップは過制動を与えられた固有周期 1.1 sec の電磁式加速度型ピックアップを用いた。これにより得られた信号を周期 1.0 sec の不完全積分を 2 回行なり 2 重積分回路を内蔵したア

ンプを通すことにより周期 0.1 ~ 1.0 sec 程度の変位の出力を得ることができる。この変位計を、地震観測室内の 1 m² のコンクリートブロック上に NS 方向の変位が測定できるように設置して観測した。

- (3) 液面変位の観測

イングクタンズ型の変位変換器を用い、その芯棒の先端に発泡スチロールの浮きを取り付け、液面の変位に追従できるようにした。アンプとしてストレインメータを用いた。測定可能な最大変位は片振幅 120 mm である。

- (4) 側面圧力の観測

ストレインゲージ型の圧力変換器を用い、ストレインメータと組合せて用いた。測定可能な最大圧力は 0.5 kg/cm² である。

- (5) 側壁の曲げひずみの観測

半導体ひずみゲージとストレインメータを用いて計測した。ゲージの取付方向は容器の中心軸方向に合わせ、容器の片持梁型の曲げに対するひずみを測定できるようにした。

記録方式は地震到来時記録である。長周期変位計と加速度計を設置したと同じブロック上に約 0.5 gal 以上の加速度でスイッチ・オンするスタータ用の感振器を設置し、これに連結されているスタータが作動すると、地震到来時刻をタイム・スタンプで記録し同時に記録機が作動し、約 6 min の記録をする。記録は電磁オシログラフとデータ・レコーダを併用して行なった。これらの計測システムは図 3.8 に示されている。

§ 3.1.4 観測結果

昭和 48 年 1 月下旬に計測を開始して以来 2 月下旬までに得られた記録を整理し解析したものを表 3.2 に示す。

また、この期間中に得られた記録のうち最も良好なものを図 3.9 に示す。これは昭和 48 年 2 月 1 日 05:59 の地震の記録である。図 3.9 の上段の波形はオシログラフの記録であり、下段の波形はオシロの記録でスケールオーバーしている変位計の記録を補修して、縦軸方向のスケールを 1/3 にしたものである。

図 3.10 は図 3.9 の記録の下段に示す変位波形をデジタル化し、FFT を用いてパワースペクトルを求めたものである。この図より、変位波の卓越周期は 9.3 sec と 3.5 sec であることが分る。

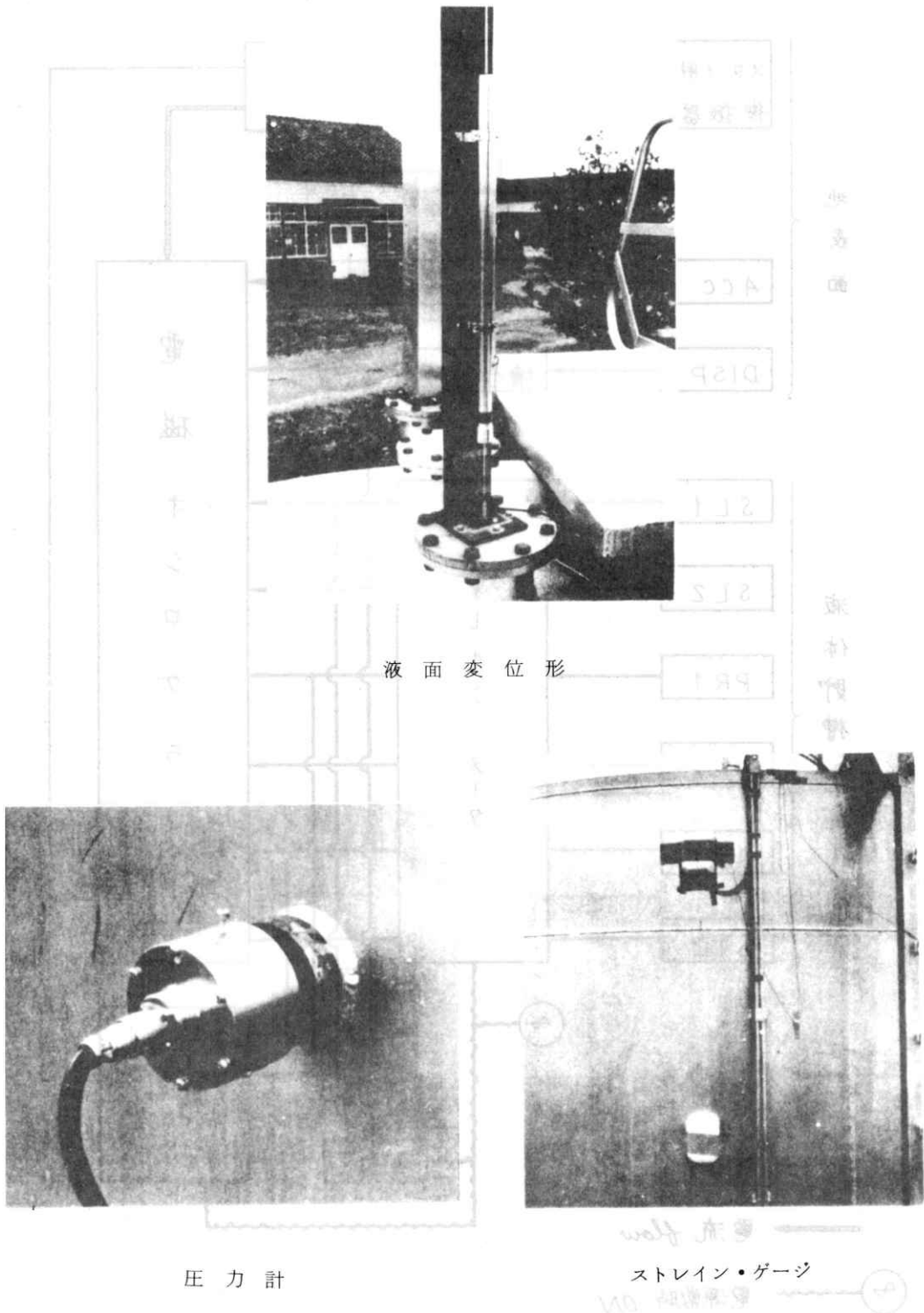


図3.7 タンクの応答計測装置

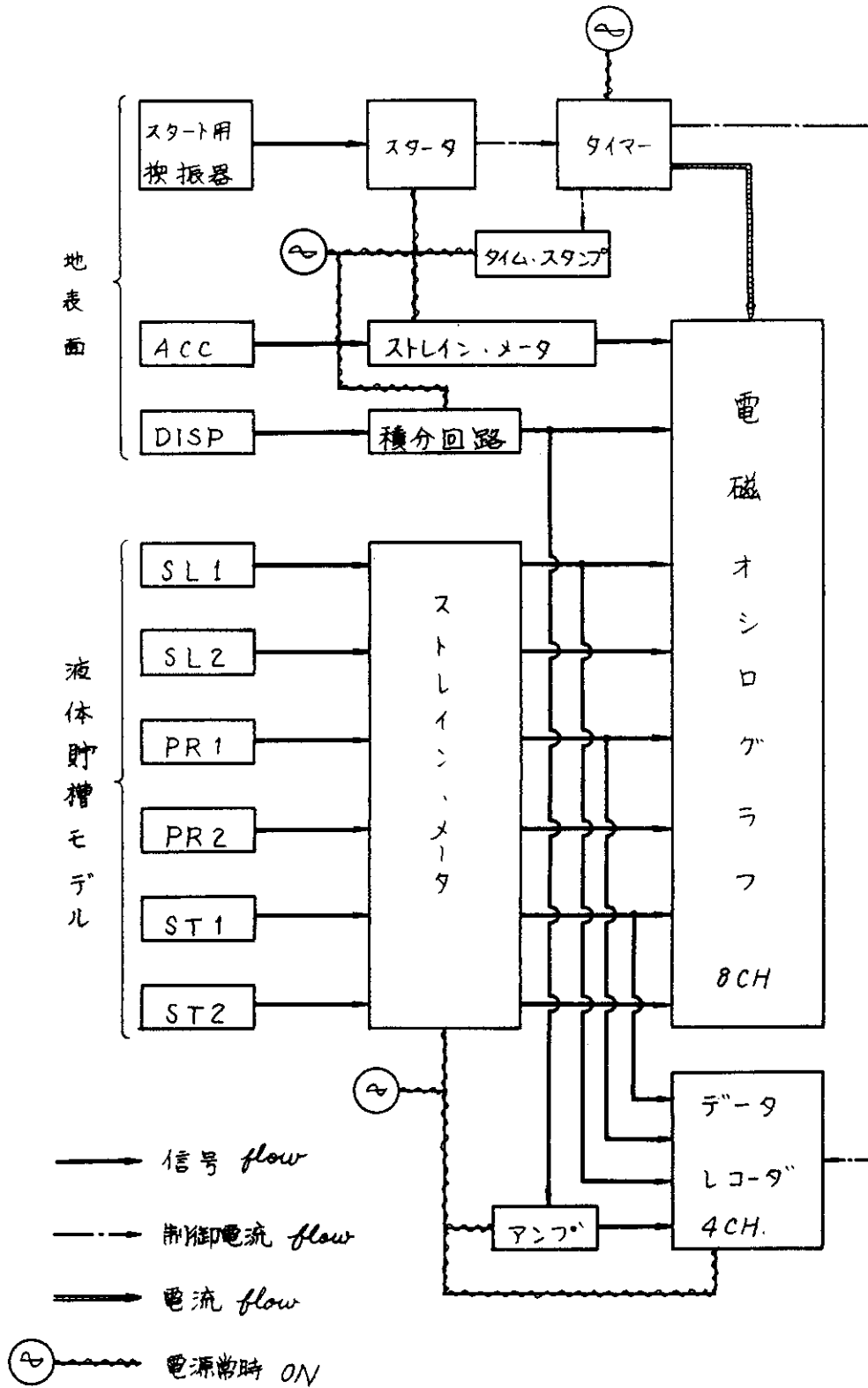


図3.8 地震記録システム

表 3.2 (a) 地震応答の整理(1)

日 時	48. 1. 21 1:55			整理番号		
震 源 お よ び 特 徴	房総半島南東沖			震 度 階	I 館山	
測定対象	最大値	最大値 時 間	卓越周期	応答の種類	加速度形 応 答	変 位 形 応 答
ACC.	0.294 gal	2 sec	0.1 sec			
DISP.	119.2 μ	90 sec	2.0 sec			
SL 1	1.14 mm	150 sec	2.0 sec	DISP		956
SL 2	*	*	*	*	*	*
PR 1	3.75 mmAq	3 sec	0.4 sec	ACC	12.8 mmAq/gal	
PR 2	*	*	*	*	*	*
ST 1	*	*	*	*	*	*
ST 2	*	*	*	*	*	*

表 3.2 (b) 地震応答の整理(2)

日 時	48. 1. 21, 17:16			整理番号		
震 源 お よ び 特 徴	茨城県南西部			震 度 階	III 熊谷、水戸、宇都宮、秩父 II 東京、大島、前橋 I 館山、福島、白川 横浜、銚子、甲府	
測定対象	最大値	最大値 時 間	卓越周期	応答の種類	加速度形 応 答	変 位 形 応 答
ACC.	0.883 gal	8.5 sec	0.15 sec			
DISP.	171 μ	9.0 sec	0.5~1.0 sec			
SL 1	*	*	*	*	*	*
SL 2	*	*	*	*	*	*
PR 1	4.18 mmAq	10 sec	0.1 sec	ACC.	4.64 mmAq/gal	
PR 2	10.0 mmAq	10 sec	0.1 sec	ACC.	12.0 mmAq/gal	
ST 1	*	*	*	*	*	*
ST 2	7.15×10^{-8}	8 sec	0.2 sec	ACC.	8.11 1/gal	

表 3.2(c) 地震応答の整理(3)

日 時	48. 2. 1, 05:57			整理番号		
震 源 お よ び 特 徴	父島西北西沖			震 度 階	II 東京、福島、館山 宇都宮 I 秋田、八丈島、白 川、水戸、前橋、宮 古、盛岡	
測定対象	最大値	最大値 時 間	卓越周期	応答の種類	加速度形 応 答	変位形 応 答
ACC.	3.33 gal	2.5 sec	0.2~0.3 sec			
DISP.	1280 μ	95~100 sec	2.0, 5.0 sec			
SL 1	11.8 mm	100 sec	2.0 sec	DISP		9.22
SL 2	4.59 mm	100 sec	2.0 sec	DISP		3.59
PR 1	12.5 mmAq	95 sec	2.0 sec	DISP		9.76 mmAq/mm
PR 2	8.45 mmAq	95 sec	2.0 sec.	DISP		6.60 mmAq/mm
ST 1	0.45×10^{-6}	100 sec	前0.2 sec 後2.0 sec	DISP		0.354×10^{-6} /mm
ST 2						

表 3.2(d) 地震応答の整理(4)

日 時	48. 2. 10, 14:12			整理番号		
震 源 お よ び 特 徴	八丈島近海			震 度 階	Ⅲ 八丈島 Ⅰ 館山	
測 定 対 象	最 大 値	最 大 値 時 間	卓越周期	応答の種類	加速度形 応 答	変 位 形 応 答
ACC.	0.55 gal	0.5 sec	0.2 sec			
DISP	17.5 μ	43 sec	前0.3 sec 後3~4 sec			
SL 1	*	*	*	*	*	*
SL 2	*	*	*	*	*	*
PR 1	2.40 mmAq	0.5 sec	0.1~0.2 sec	ACC	4.37 mmAq/gal	
PR 2	5.91 mmAq	0.5 sec	0.1~0.2 sec	ACC	5.91 mmAq/gal	
ST 1	*	*	*	*	*	*
ST 2	*	*	*	*	*	*

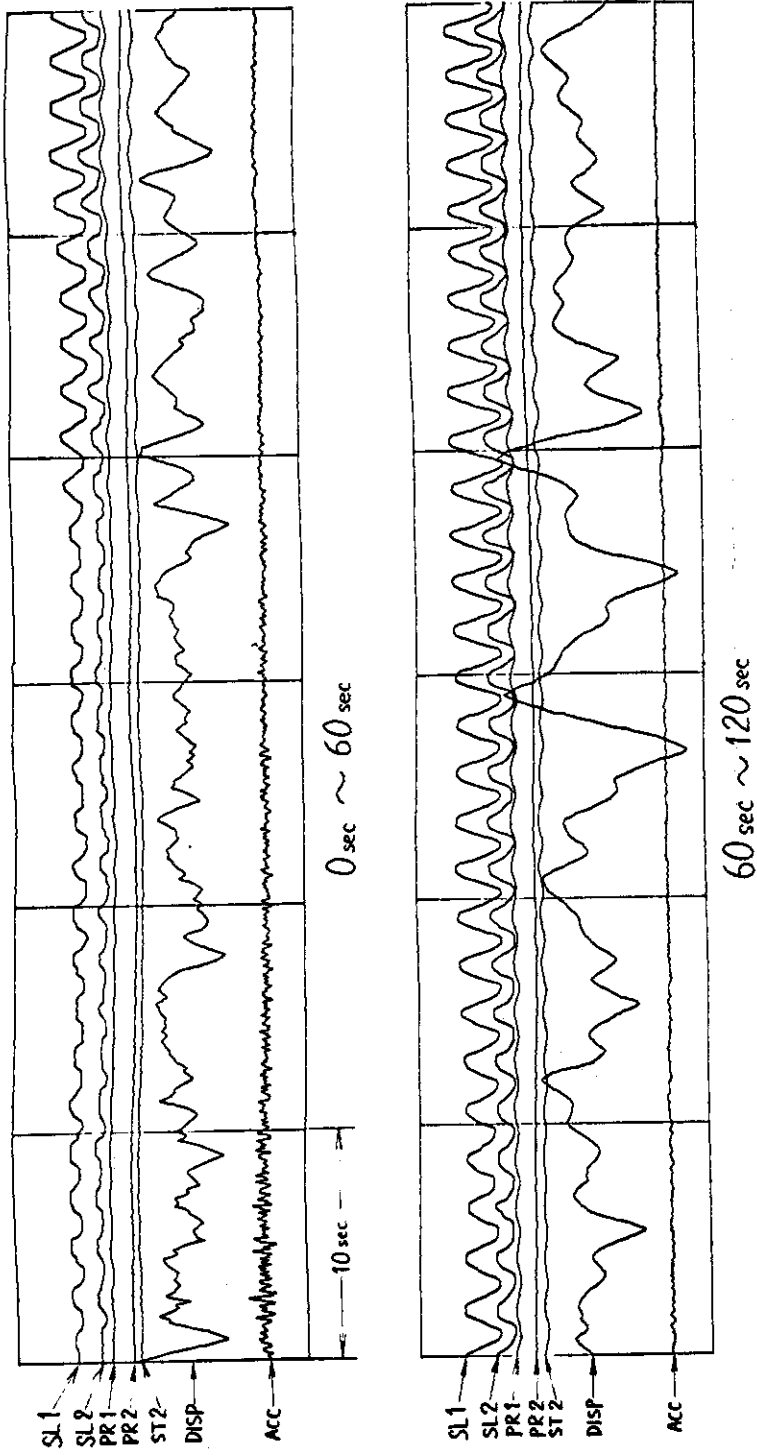
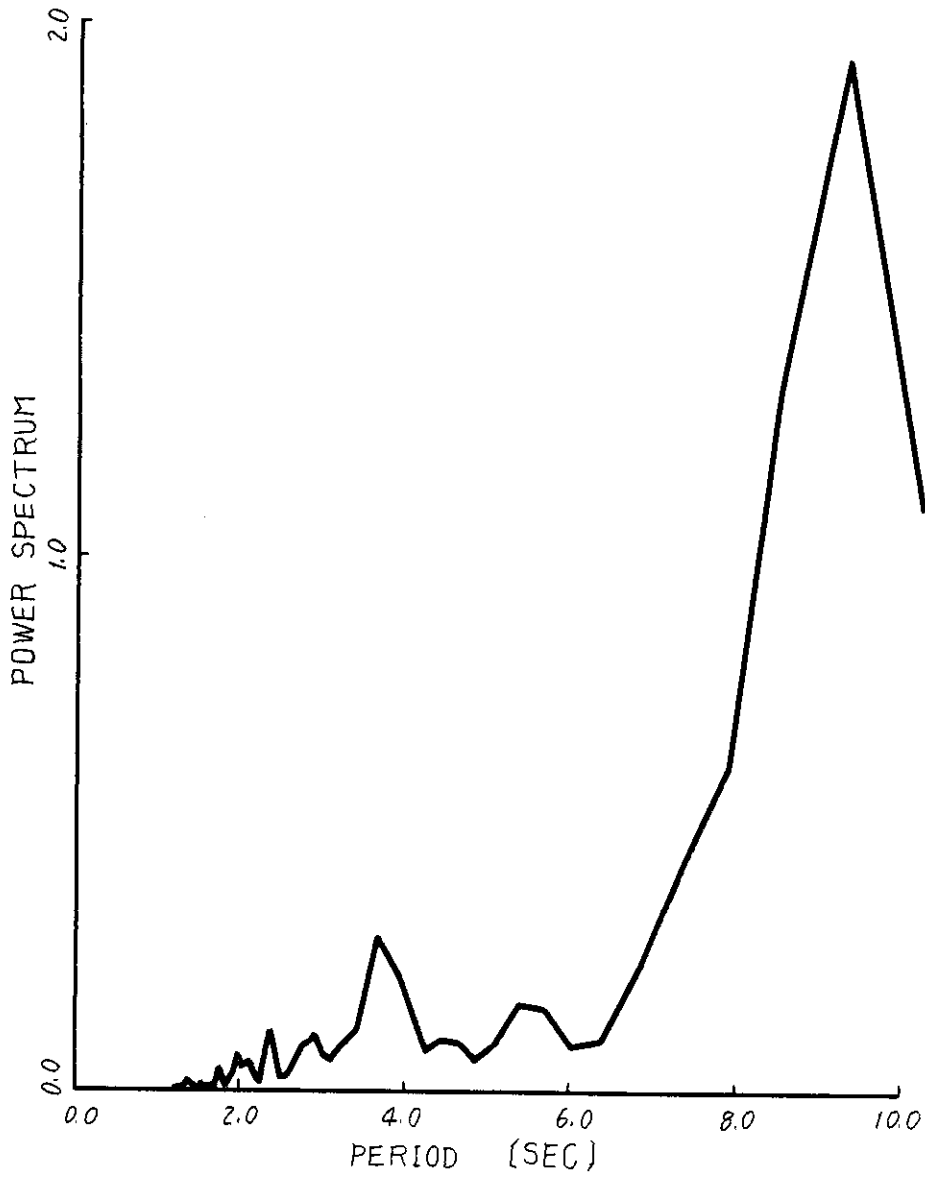


図 3.9 昭和 48 年 2 月 1 日 05:57 の地震記録



POWER SPECTRUM OF DISP 2/1

図 3.10 2月1日05:57の地震の変位波形のパワースペクトル

図 3.10 昭和48年2月1日05:57の地震の変位波形のパワースペクトル

§ 3.1.5 実験結果に対する考察

タンクの応答波形は記録に対する視察により、加速度タイプの応答と変位タイプの応答に大別することが出来ることが分った。加速度タイプというのは応答の波形が加速度波形と類似しており、応答の最大値の現われる時間が加速度の最大値の現われる時間に近いものである。また変位タイプというのは応答の波形が変位波形と類似しており、応答の最大値の表われる時間が変位の最大値の現われる時間に近いものである。

液面の変位はほとんどのものが変位タイプの応答であり、その変位応答倍率はSL1では大体9前後の値を示している。また側面圧力は加速度タイプの応答と変位タイプの応答の両方が現われており、地震の性質、経過時間により変化する。データの分析にあたってはその応答の性質により、上記2つに分けて整理するのが良いと思われる。側面圧力は加速度タイプの応答の場合にはPR1（上側）の方がPR2（下側）よりも小さいが、変位タイプの応答の場合にはPR1の方がPR2よりも小さくなっているため、§ 2.1.2の結果とも定性的に良く合っているものと思われる。

このデータは観測を始めてすぐの記録であるのでゲインの設定が充分でなく、記録の不備な点も多い。また、実際に得られたデータの数も4個と少ないので、これだけで結論を出すことはむずかしいと思われるが、応答に2つのタイプがあることが確認できたことは理論面からも推察されたことであり、この成果は大きい。今後の設計方法に重要な指針を与えることになった。なお今後も観測を続け、多くのデータを得てこれをもとにして結論を出す必要があると思われる。

§ 3.2 小形円筒モデルによる加振実験

薄肉液体貯槽に対する内部の液体の仮想質量としての影響を調べるために、薄肉円筒シエルの部分加振実験を行った（1.17）。

§ 3.2.1 実験の概要

弾性体薄肉円筒シエルに対する内部の液体の影響をはっきり出すためには、円筒シエルの半径に対する肉厚の比をかなり小さくすることが必要である。このために弾性体薄肉円筒シエルを最も薄い規模のブリキ板（肉厚0.27mm）を用いて作成した。

この薄肉円筒シエルを作成する際に、接合部分をハンダ付けしたので、その部分の剛性が大きく

なりシエル自体の振動特性が変化することを心配したので、両端自由の状態でも固有振動数を測定し、Warburtonの理論式（3.2）を用いて計算した結果と比較してみた結果固有振動数は理論式の値と良く一致したので、ハンダ付けの影響はほとんどないものと考えられる。

この弾性体薄肉円筒シエルを定盤に固定し、内部に水を入れる（図3.11参照）。この状態でシエルに電磁式振動試験機で局所強制加振により振動を与え共振を起させる（図3.12参照）。このとき、シエルの表面に電磁式ピックアップをあてて振幅をとらえ（図3.13参照）、その出力電圧をシンクロスコープの垂直軸に、また振動試験機の励振電圧をシンクロスコープの水平軸に入れ、リサーチ図形をえがかせる。このリサーチ図形の垂直軸方向の振幅が最大になる点で共振を確認し、分数調波、高調波共振の判別をしつつ固有振動度を決定した。固有振動数の測定にはデジタルストロボスコープを用いた。

また振動モードの測定は次の様にして行った。まず上記の方法により固有振動数を求め、その振動数に加振機の励振振動数を固定する。次にシエルの円筒方向、円周方向を各々16等分する基準線を引き、上記の電磁式ピックアップを用いて先ず円筒方向に振幅を測定し、円筒方向に1次（ $C=0$ ）の振動をしている事を確認する。次に、円周方向の線に沿ってピックアップを移動させ、シンクロスコープのブラウン管上の振幅の値を読み取った。振幅の測定は両線の交点上および最大、最小の振幅であると思われる点の各点で行った。以上の手順を水深を変化させて繰返し行った。

さらに、このシエルを振動台上にのせて水平方向に加振し、液面の共振の1次の固有振動数を求める実験も行った。

測定に用いた薄肉円筒シエルの形状および寸法を示すと図3.14のとおりである。

また実験装置の測定機器相互の関係は図3.15に示されている。

§ 3.2.2 実験結果

表3.3と図3.16は水深をパラメータとした弾性体薄肉円筒シエルのオーバル振動の固有振動数である。

図3.17は図3.16で黒印で示した点について円筒方向および円周方向の振動モードを图示したものである。

図3.18は水深の変化に対する液面の動揺の1次の固有振動数の変化を表わしている。

図3.19は水深を変化させたときの液面1次共振に対する円筒シエルの軸方向の曲げモーメントの分布を示している。


§ 3.2.3 実験結果に対する考察


図3.14は薄肉円筒シエルにおけるオーバル振動に対する内部の液体の質量効果を表わしている。この図から分る様に、液体容器のオーバル振

動の固有振動数は内部の液体の量により大きく変化する。その変化の割合はこの模型の場合には $n = 5$ に対し満水の場合には空の場合に対して約1/4にも低下する事が分る。従ってこのような薄肉の液体容器の固有振動数の算定に際しては、内部の液体の影響を十分に考慮しなければならないことが分る。

表 3.3 水深による固有振動数の変化(オーバル振動)

水深 (cm) n	50	40	30	20	0
1					
2					
3					
4	2 5.6 5	3 6.3 8	5 1.9 3	7 4.1 3	9 1.8 0
5	2 2.9 7	3 1.3 5	4 4.7 8	6 4.7 8	7 7.3 5
6	2 6.6 0	3 4.3 4	4 8.7 2	7 6.7 0	8 1.1 0
7	3 2.2 2	4 0.9 5	5 5.2 9	8 4.5 0	8 7.7 0
8	4 0.8 0	4 9.4 0	6 0.5 3	9 5.6 0	1 0 8.1 0
9	5 1.8 6	5 8.0 3	6 9.4 6	1 0 5.7 3	1 3 4.6 5
10	6 4.9 4	6 9.3 2	7 6.7 5	1 2 1.5 0	1 6 1.8 5
11	7 5.9 8	7 8.9 5	8 8.5 1		1 9 8.0 1
12		9 3.8 8	1 0 0.9 1		

 はモード測定も行なった点である。

 は測定困難な点。

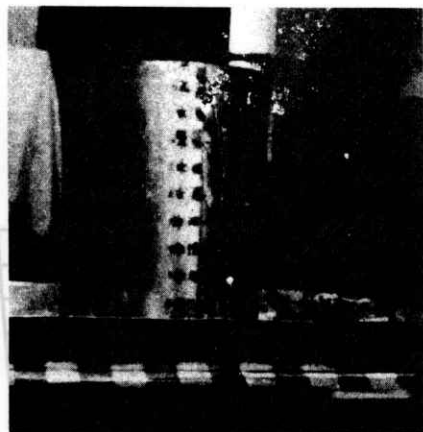


図3.11 薄肉円筒シェル



図3.13 電磁式振動ピックアップ
薄肉円筒シェル (肉厚 0.27mm)

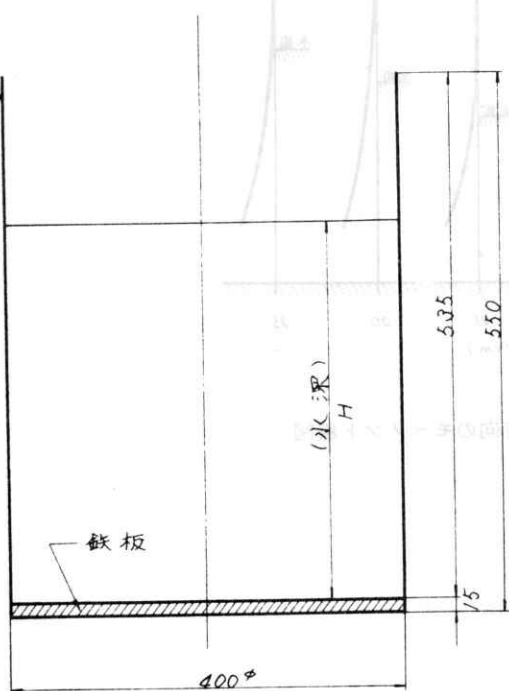


図3.14 薄肉円筒シェルの寸法



図3.12 加振機

07	20	28	45	35	45	51	71	75	80	85
1.13	1.28	1.57	2.05	1.77	2.14	2.50	3.80	4.15	4.50	5.00

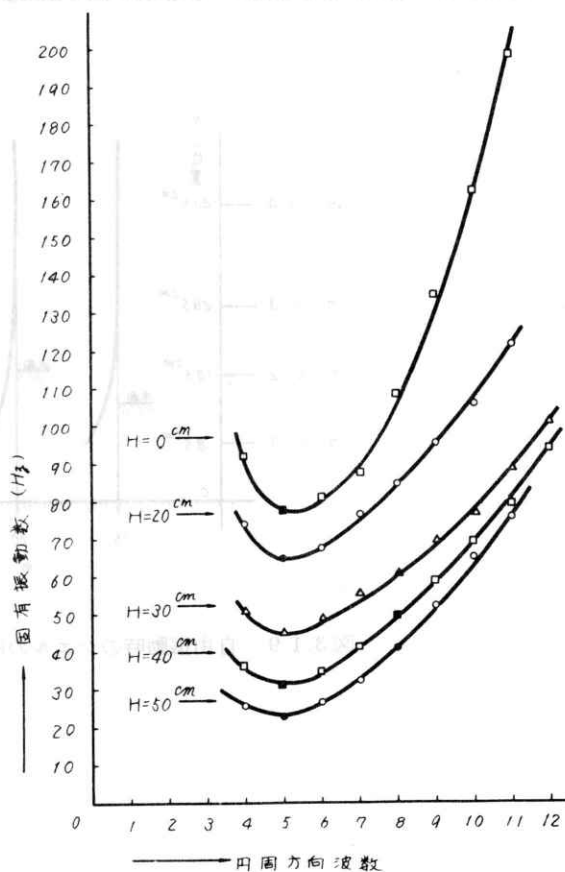


図3.16 水深による固有振動数の変化 (オーバル振動)

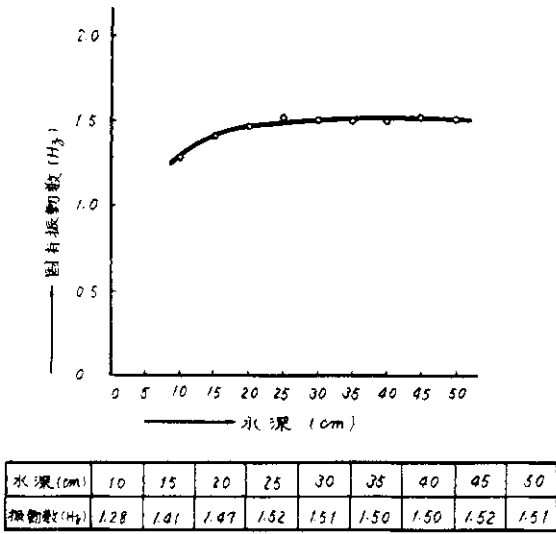


図 3.1 8 水深による液面の一次振動の固有振動数の変化

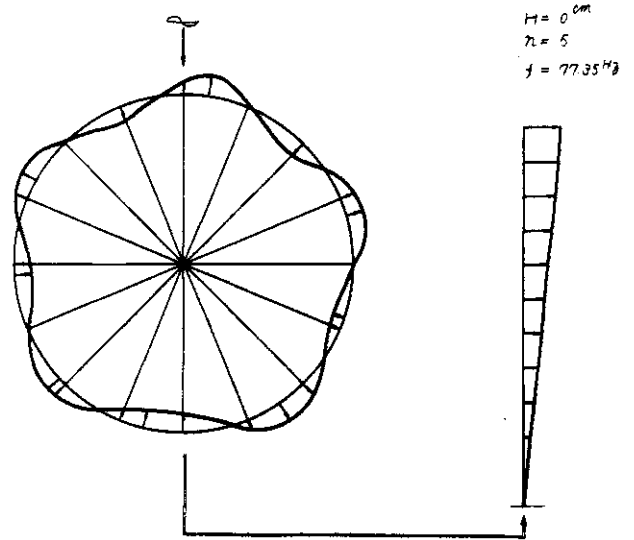


図 3.1 7 (a) オーバル振動モード

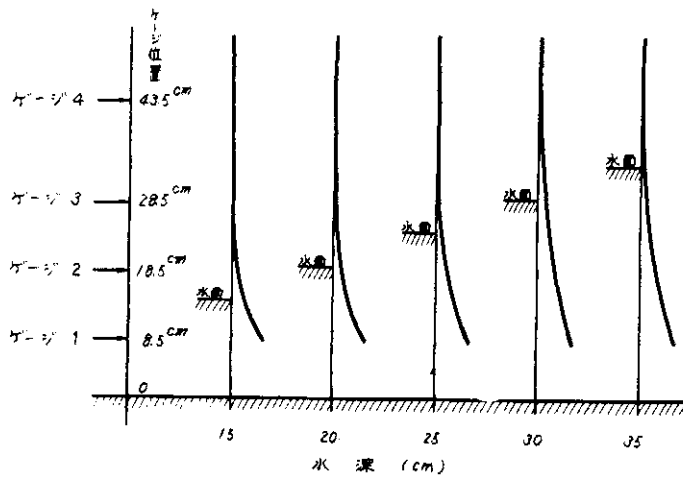


図 3.1 9 自由振動時のシエルの円筒方向のモーメント線図

第 4 章 結 論

液体貯槽の地震応答観測によって、その応答形式は加速度応答と変位応答の2つに分れることが実証された。これらは地震の震源距離、規模などにより、その様相が変化するものと思われるが、設計に際してはともに取り入れなければならないものである。しかしながら両者は同一の瞬間に発生する現象としては考えられず、したがって設計面からみると独立な事象と考えられる。現在すでに行なわれている設計法を基準に今後両設計法をさらに具体的に確立することが望ましい。

また液体貯槽の大規模化に伴う容器の薄肉化によって、容器の振動性状に対する内部流体の質量効果は無視できなくなる。実験で示したように容器の固有振動数は流体の付加質量によって低下するので、この具体的な評価のためのプログラムの開発が必要である。

終りに石油貯槽モデルの製作設置にあたっては月島機械タンク部の全面的な御協力をいただいた。

また、本研究の実施について東京大学生産技術研究所第5部久保慶三郎教授に何かと御支援御指導いただいた。この機会に厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

1. 1) 土木学会新潟震災委員会, 昭和39年新潟地震震害調査報告 第15編, (1966-6)
 1. 2) 東京都, 1968年十勝沖地震災害調査報告書, (昭46-4)
 1. 3) 柴田碧, 生産研究, 23-8, (1971-8), 335, 東京大学生産技術研究所
 1. 4) Housner, G. W., Bulletin of the Seismological Society of America. 47-1, (1957-1), 15.
 1. 5) U. S. A. E. C., Nuclear Reactor and Earthquakes, TID-7024, (1963-8)
 1. 6) Abramson, H. N., NASA SP-106, 1966.
 1. 7) Bauer, H. F., AIAA J., 1-7, (1963-7), 1590.
 1. 8) Senda, K. and Nakagawa, K., Technical Report of the Osaka University 4-117, (1954), 247.
 1. 9) Senda, K. and Nakagawa, K., Technical Report of the Osaka University

5-170, (1956), 317.
 1.10) Senda, K. and Nakagawa, K., Technical Report of the Osaka University, 6-193, (1956), 53.
 1.11) Nakagawa, K., Technical Report of the Osaka University, 9-349 (1959), 107.
 1.12) Fung, F. W., NASA STAR N 66-34415#, 4-20, (1966-10)
 1.13) 中島松喜, 浮屋根型貯槽内の液体の運動と制振についての研究, 東京大学大学院工学系研究科修士論文, (昭43-3)
 1.14) 国松昇, 四方昭武, 板野寿彦, 日本機械学会論文集, 35-269, (昭44-1), 47.
 1.15) Ping, T., AFOSR 66-0943, (1966-6), California Institute of Technology.
 1.16) Edwards, N. W., 70-14, 507, The University of Michigan, Ph. D., (1969)
 1.17) 曾我部潔, 流体容器の防振・耐震に対する基礎的研究, 東京大学大学院工学系研究科修士論文, (昭46-3)
 2.1) Lamb, H., Hydrodynamics, 6th Ed., IX, (1932)
 2.2) Gray, A., Mathews, G. B. and MacRobert, T. M., A Treatise on Bessel Functions and Their Applications to Physics, 2nd Ed., VIII and XI, (1922)
 2.3) 日本機械学会, 原子炉および配管系の耐震設計法に関する試験研究成果報告書(昭和42年度), (昭44-3)
 3.1) 利光聰, 地震波形のパターン認識に関する研究, 東京大学大学院工学系研究科修士論文, (昭47-3)
 3.2) Arnold, R. N. and Warburton, G. B., I. M. E. Proceedings, 167, (1953), 62.
 付録A. 円筒貯槽内の液体のスロッシング固有周期計算図表

第2章の理論をもとにして、円筒貯槽内の液体のスロッシングの固有周期の計算を簡便に行うための計算図表を作成した。この図表は次の計算式に依っている。

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1.84g}{R} \tanh(1.84 \frac{H}{R})}$$

ここに $R = D/2$; 半径, H ; 水深, $g = 9.8 \text{ m/sec}^2$

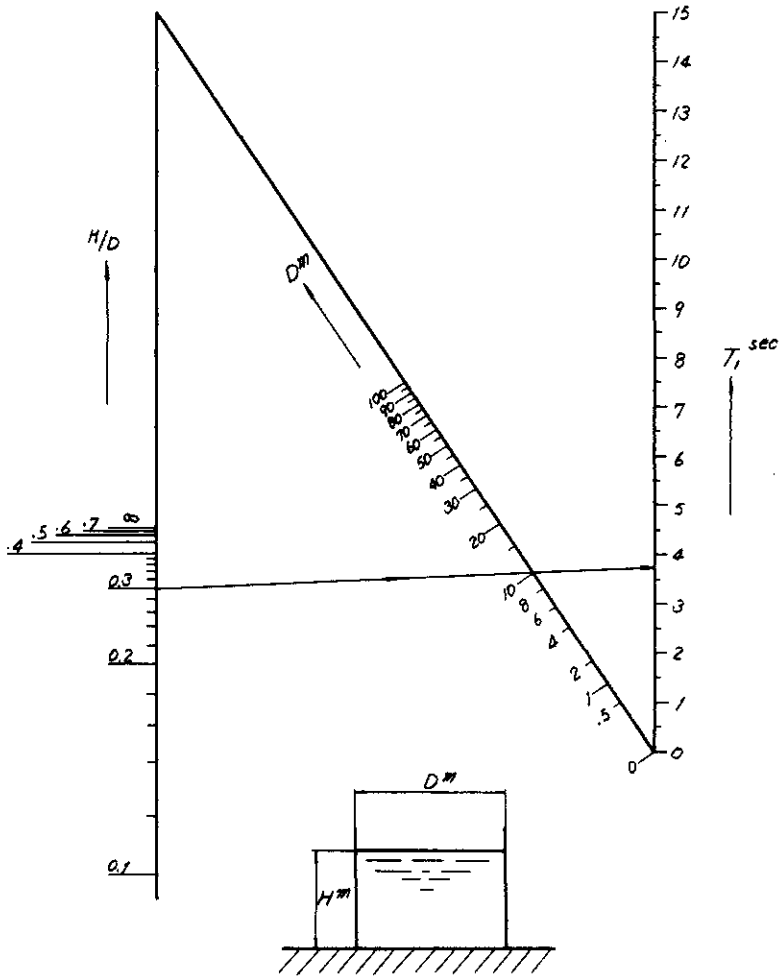
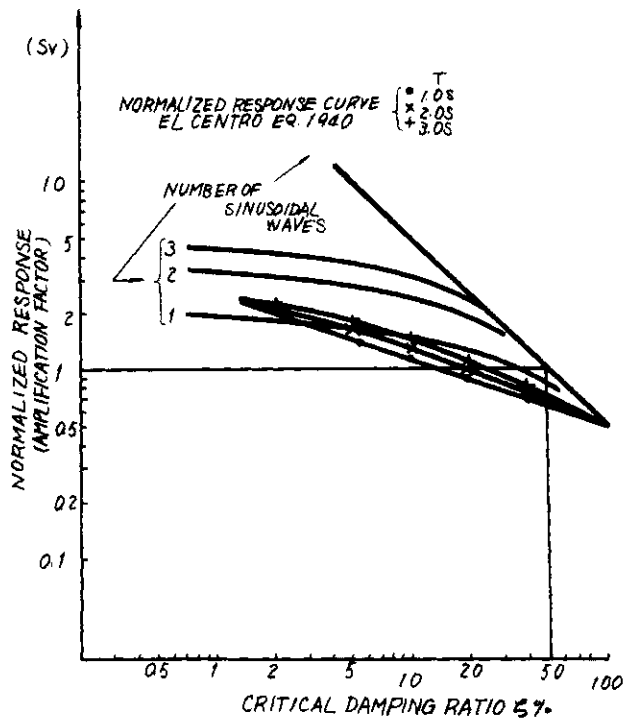


図 A - 1 円筒貯槽スロッシング固有周期計算図表

付録B. 液面動揺の応答曲線

アナログ計算機を用いて得た石油貯槽設計のための応答曲線を次に示す。この図は臨界減衰定数に対するタンク内の液体の重心の移動の sine 波に対する過渡応答倍率を示している。曲線の左側のパラメータは最初の衝撃からの波数を示している。曲線の下側の部分は Housner による 1940 年

の El Centro 波に対する正規化された速度応答を示している。Housner 応答に対しては、系の固有周期は 1.0 sec, 2.0 sec, 3.0 sec が選ばれている。この結果は、El Centro 模似地震波による倍率は 2 波か 3 波の過渡応答のレベルであることを示している。



図B-1 応答曲線

付録C. 地震記録追加

昭和48年3月以後に得られた地震記録とその解析結果を示す。この記録は48年3月27日に得られたものであり東京湾に震源を持つ有感地震である。表C-1にこの記録の解析結果を示す。

また図C-1に得られたオシロの記録の初めの部分を示す。この図は明らかな加速度型応答を示していて、本文27頁の変位型応答記録と明瞭な対比をなしていることが分る。

表C-1 地震応答の整理

日 時	48. 3. 27, 11:08			整理番号		
震 源 お よ び 特 徴	東京湾			震 度 階	IV大島、横浜 III東京、千葉、館山 II勝浦、水戸、三島、 八丈島 I銚子、静岡	
測定対象	最 大 値	最 大 値 時 間	卓越周期	応答の種類	加 速 度 形 応 答	変 位 形 応 答
ACC.	3.22 gal	2.5 sec	0.1~0.2 sec			
DISP.	459.5 μ	4.5 sec	0.2~0.4 sec			
SL 1	0.85 mm	8.0 sec	2.2 sec	DISP		1.85
SL 2	0.85 mm	14.5 sec	2.2 sec	DISP		1.85
PR 1	28.1 mm Aq	4.5 sec	~0.1 sec	ACC	8.73 mm Aq/gal	
PR 2	35.15 mm Aq	4.5 sec	~0.1 sec	ACC	10.91 mm Aq/gal	
ST 1	0.805×10^{-6}	4.5 sec	~0.1 sec	ACC	0.25×10^{-6} 1/gal	
ST 2	0.98×10^{-6}	4.5 sec	~0.1 sec	ACC	0.34×10^{-6} 1/gal	

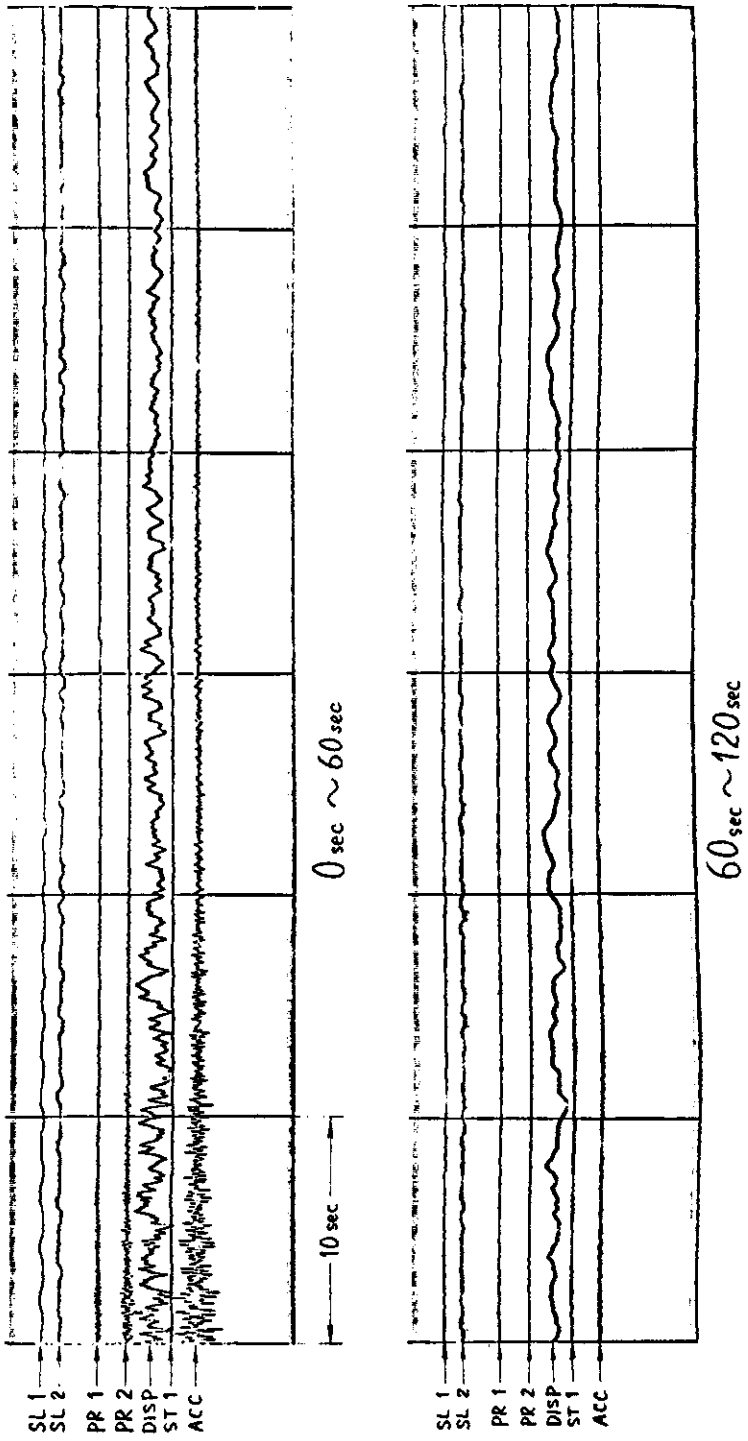


図 C-1 昭和48年3月27日 11:08地震記録