

電力用遮断器の振動実験

木下繁夫^{*}・稲葉誠一^{*}

国立防災科学技術センター
大型実験研究部

Shaking Table Test of a Circuit Breaker

By

Shigeo Kinoshita and Seiichi Inaba

*Earthquake Engineering Laboratory
Research Division of Large Experiments
National Research Center for Disaster Prevention*

Abstract

This paper describes the results of the dynamic test of a circuit breaker of 72/84 kilovolts for the electric power transformer substation. The test was carried out by using the large-scale shaking table of the National Research Center for Disaster Prevention in 1975.

This test was designed to find the dynamic characteristics of the prototype structure shielded by the porcelain insulator. Sinusoidal waves at resonant frequency and earthquake simulated waves were applied to the test structure.

It was found that the porcelain insulator governs the seismic resistibility of the circuit breaker and the estimated allowable acceleration at the top of the structure is approximately 8.6 g.

まえがき

この資料は電力用遮断器（以下遮断器と略記する）の動的耐震性の検討を目的として行った振動実験の報告である。動的耐震性の検討は平均応答スペクトル法が一般的といわれる。実際に、欧米における遮断器の耐震設計には設計用応答スペクトルの利用が報告されている。しかしながら、我国では遮断器（より一般的には電力機器）の耐震設計には3波擬共振が多く適用されている。この報告においても、3波擬共振実験の結果を中心として検討する。

動的耐震性の検討を振動台実験に限定すれば、擬共振実験は地震波実験に比較して有利で

* 耐震実験室

ある。これは振動台の性能に基づくものである。即ち、地震波実験において、要求される地震波形の正確な再現は困難である。擬共振法では入力波形が簡単なため、その振動台での再現は地震波と比較してはるかに容易である。したがって、入力波の応答曲線(後述する図14及び図15に相当する)が求まっていれば、実験供試体に対する入力波のダメージ・ポテンシャルを適確に把握することが出来る。そして、これが機器設計者の最も要求することであり、今回の実験及びこの報文はこれを意図したものである。

なお、これは第8回UJNRでの簡潔な報告を補い、地震波実験の解析を加えて、資料としてより詳細にまとめたものである。

1. 実験概要

実験は構造の耐震性を調べるための振動実験と遮断器の動作機能確認のための開閉試験、ガスリーク試験及びAC耐圧試験とを行った。機能確認試験は振動実験の前後で行ったが異常は認められなかった。

1.1 実験供試体

実験供試体^{*}は構造的には架台部と碍管より構成されている(写真1)。碍管は上部の遮断部碍管と下部の支持碍管より構成され、その一相は全長2.2m、重量900Kgでヤング率 $6,500\text{Kg/mm}^2$ の磁器材料を主体としている。また、支持碍管は最下部碍子をセメント付けの強度を上げるために他の碍子よりも外径を太くしてある(写真2)。

架台部は架台とこれを支える架台脚より構成されている。架台は内部に制御装置を組込んだ鉄箱で、碍管はこれに据付けられている。また、架台脚はヤング率 $21,000\text{Kg/mm}^2$ の鉄材で構成されている。

実験における遮断器の据付けは、据付用鉄板を加振台にボルト締めし、これに架台脚底部をボルト締めすることによって行った。

* 委託研究申請者である株式会社明電舎より提供された72/84KV用の電力用遮断器である。

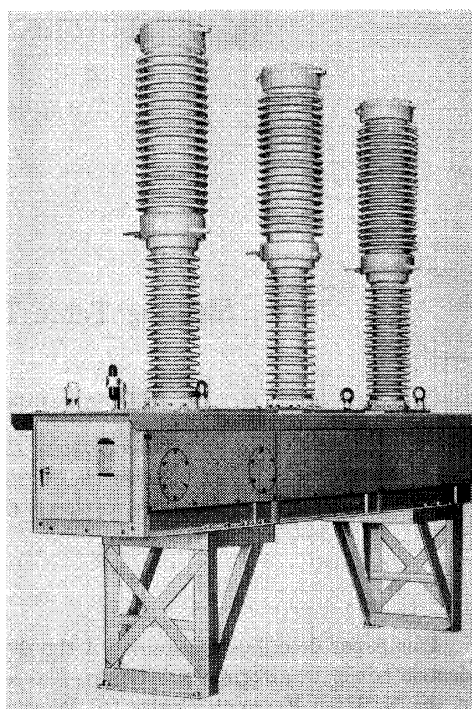


写真. 1 電力用遮断器(72/84KV用)
Photo. 1 Circuit Breaker

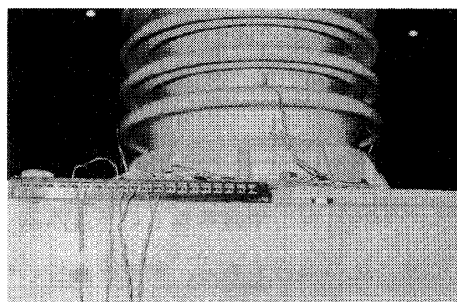


写真. 2 支持碍管下部
Photo. 2 Bottom of Insulator

1. 2 測定方法

実験は加振方向に対する供試体配置にしたがって二系統行った。図1にこれを示す。図中に示された加振方向に対して、遮断器の配置が左図のときを前後方向加振、右図のときを左右方向加振と称することにする。また、各相の名称も図中に示すようにA、B及びC相とする。各相に架台部も含めて振動挙動を考えると、これを相系と称することにする。

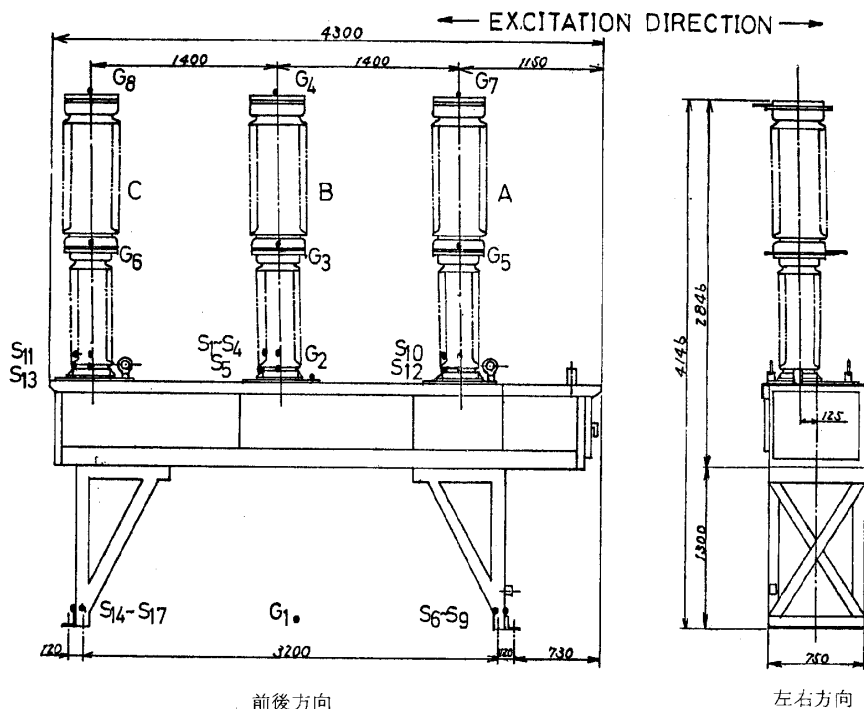


図. 1 加振方向・測定点

Fig. 1 Excitation Directions and Measurement Points

測定物理量は歪及び加速度とする。図1に示したS₁～S₁₇が歪測定点で、G₁～G₈が加速度測定点である。ただし、S₅、S₁₀～S₁₃は加振方向にしたがって碍管の曲げ方向に選択出来るように2枚の歪ゲージを直角に配置してある。各測定点の位置及び使用検出器を表1に示す。

表. 1 測定位置
Table 1 Measurement Points

測定点	測定位置	検出器	備考
G ₁	遮断器据付用鉄板	BA-0.5L	新興通信製
G ₂	架台上部	120A-2JM	共和電業製
G ₃ 、G ₅ 、G ₆	碍管重心	BA-5L	新興通信製
G ₄ 、G ₇ 、G ₈	碍管頂部	BA-10G	
S ₁ ～S ₄ 、S ₁₀ 、S ₁₁	支持碍管・碍子のひだ2枚目	KP-6-A1-11	共和電業製
S ₅ 、S ₁₂ 、S ₁₃	支持碍管・碍子のひだ1枚目		
S ₆ ～S ₉ 、S ₁₄ ～S ₁₇	架台脚・すじかい接合部付近		

加速度の測定は、加速度換振器の出力を歪増巾器で増巾しデータ・レコーダに記録した。ただし、増巾器の出力はコーナ周波数11.2 Hzの低域通過フィルタで濾波してペン・レコーダでモニタした。付図に示した各加速度波形は全てこれである。また、歪測定は、歪ゲージの出力を歪増巾器で増巾し電磁オシロで記録した。

1. 3 加振方法

1. 3. 1 共振実験

地震波の周波数帯域における架台部を含めた各相系の周波数伝達特性を調べ、3波擬共振実験の参考のために行うものである。最初に、加振台を0.5 mm程度ステップさせて各相系に自由振動を起こさせる。この結果から、各相系の固有振動数と減衰定数に目安をつける。次に、目安をつけた固有振動数の近傍では0.2 Hzきざみに、他では0.5～1.0 Hzきざみにして振巾0.03 g程度の正弦波を系が定常応答を示すまで加振する。いずれの加振方向に対しても1 Hzから10 Hz程度迄加振し、各相系の周波数伝達特性を求める。

1. 3. 2 3波擬共振実験

加振振動数は共振実験の結果に従って、加振台加速度に対する碍管頂部加速度が最大応答を示す振動数を基準とする。実際には、これと前後0.2 Hzずらした振動数も加え3点とした。加速度振巾は予備的に0.15 g程度で加振し、しかる後に0.3 g程度で加振する。これを両加振方向において、遮断器を動作させた状態及び切断した状態において行う。

擬共振実験の入力波は検討すべき問題もあるが、今回は正弦波3波を採用した。ただし、加振台の動作を滑らかにするため、正弦波3波の始めと終りの部分を多項式で平滑化する。即ち、入力変位波 $u(t)$ は次式とする。

$$u(t) = \begin{cases} 0 & ; t \leq t_1, 3T+t_1 \leq t \\ a(t-t_1)^3 + b(t-t_2)^2 & ; t_1 \leq t \leq t_2, 3T-t_2 \leq t \leq 3T+t_1 \\ \sin \omega t & ; t_2 \leq t \leq 3T-t_2 \end{cases}$$

ここで、 a 、 b は変位及び速度が $t = t_2, 3T-t_2$ で連続になるように決定する。ただし、 $t_1 \equiv -T/4$ 、 $t_2 \equiv T/12$ で $T = 2\pi/\omega$ とする。また、加振台上での加速度振巾の大きさは、制御卓の増巾器で調整する。

1. 3. 3 地震波実験

地震波実験として、加振台入力用El-Centro, 1940, N-S波を使い、最大加速度振巾0.35 g程度で加振する。遮断器の配置及び動作条件は3波擬共振実験と同じとする。振動台実験では変位制御や振巾制限のため実測された地震加速度波を厳密には再現出来ない。しかしながら、加速度応答スペクトルの基礎となる二次系の応答は実測波と加振台上再現波でほとんど一致する「菅原正己、勝山ヨシ子(1967)」。

2. 実験結果

以後においては簡単のため測定点の記号をそのまま測定物理量の表示に転用する。

2. 1 共振実験

衝撃試験における遮断器各測定点の加速度を付図1（前後方向加振）及び付図2（左右方向加振）に示す。これらの付図から、各相系の自由振動数は前後方向加振では約9 Hz、左右方向加振では約7 Hzと推定出来る。また、付図1のC相碍管頂部加速度 G_8 から推定される減衰定数は約2%である（図中1から10迄を利用した）。

共振実験はこれらの振動数を中心として行った。前後方向加振の結果は図2の共振曲線となる。最大応答はC相系で起こり、そのときの振動数は8.6 Hzである。衝撃試験の波形からも推定出来るが、C相は他相と比較して架台部の影響が少ない。即ち、C相の応答は他相と比較して碍管独自の応答に最も近いといえる。前後方向加振においては各相系の共振曲線はかなり異なる。しかしながら、この報告では共振曲線に対する構造力学的な考察は行わない。

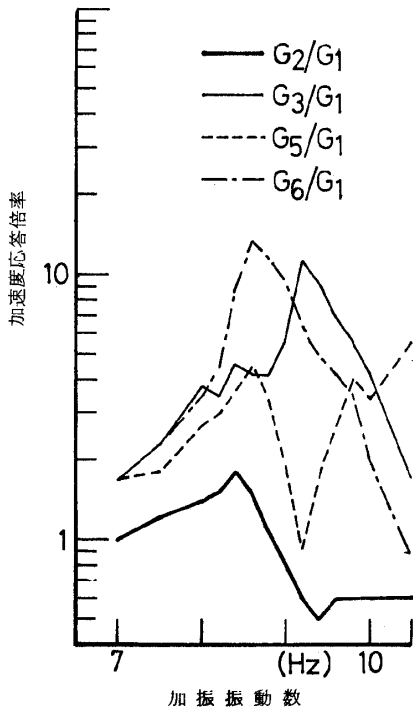


図. 2 共振曲線（前後方向）
Fig. 2 Resonance Curves (Long Axis Direction)

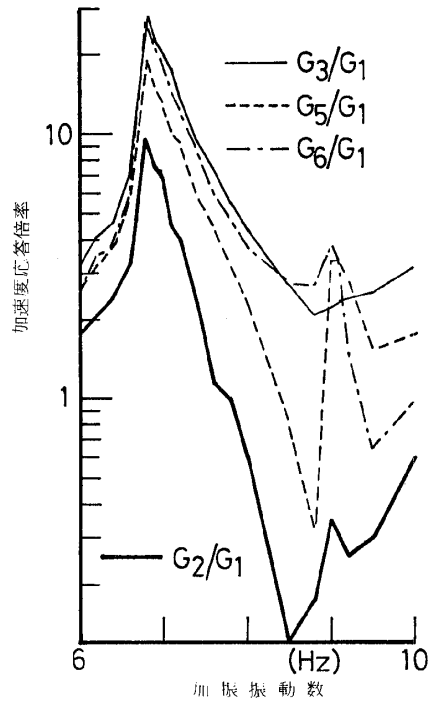


図. 3 共振曲線（左右方向）
Fig. 3 Resonance Curves (Short Axis Direction)

左右方向加振の結果は図3の共振曲線となる。全ての相系の共振振動数は6.8 Hzである。

2. 2 3波擬共振実験

3波擬共振実験における入力波の振動数は共振実験の結果に従って決定した。即ち、前後方向加振では8.4、8.6及び8.8 Hzとし、左右方向加振では6.8、7.0及び7.2 Hzとした。表2は入力波の設定振巾を0.3 gとしたときの遮断器主要部における測定加速度及び歪の絶対最大値である。この表によれば、遮断器の動作状態が応答に及ぼす影響は小さい。

表. 2 3 波擬共振実験結果
Table 2 Results of Three-wave Quasi-resonance Test

加振振動数 (Hz)	G ₁ (g)	G ₂ (g)	G ₄ (g)	G ₇ (g)	G ₈ (g)	S ₂ (10) ⁻⁶	S ₄ (10) ⁻⁶	S ₁₀ (10) ⁻⁶	S ₁₁ (10) ⁻⁶	動作状態
8.4	0.31	0.34	2.25	1.98	3.35	257	280	210	360	開
	0.32	0.35	2.35	2.10	3.43	252	290	219	369	閉
8.6	0.30	0.34	2.18	2.03	3.28	248	280	225	360	開
	0.32	0.34	2.25	2.13	3.23	257	290	239	351	閉
8.8	0.31	0.34	2.15	2.08	3.10	233	275	214	346	開
	0.32	0.34	2.16	2.20	3.00	243	280	238	309	閉

前後方向加振

加振振動数 (Hz)	G ₁ (g)	G ₂ (g)	G ₄ (g)	G ₇ (g)	G ₈ (g)	S ₁ (10) ⁻⁶	S ₃ (10) ⁻⁶	S ₁₀ (10) ⁻⁶	S ₁₁ (10) ⁻⁶	動作状態
6.8	0.29	0.41	3.19	1.76	2.68	309	247	171	271	開
	0.30	0.40	3.27	1.93	2.93	323	240	185	262	閉
7.0	0.30	0.36	3.10	1.93	2.68	318	258	143	252	開
	0.30	0.36	2.68	1.85	2.68	300	230	171	252	閉
7.2	0.30	0.34	2.93	2.01	2.52	291	237	171	248	開
	0.30	0.33	2.20	1.58	2.52	300	215	171	238	閉
6.8	0.50	0.77	5.84	3.34	4.67	568	526	357	457	開

左右方向加振

この受託研究の主目的は遮断器の耐震性を3波擬共振実験により評価することである。過去における遮断器の被害例「笠原篤, 小島弘司(1970)」をみると, 支持碍管下部の被害がほとんどである。実際に, 今回の実験においても支持碍管最下部の碍子のヒダ2枚目部分で最大歪応答を示している。したがって, 遮断器の耐震性の検討はこの部分の応答にほぼ限定しても良いと思われる。検討すべき応答は応力, 歪及びたわみである。ここでは実際に計測可能な歪応答に限定する。このことは歪応答だけを考えれば良いという意味ではない。碍子は歪ゲージをはる位置によりその応答量は変動する。ここでの歪応答は碍子のヒダの平坦部(写真2参照)の応答とする。

遮断器の安全性を簡単に評価するために, 碍子に発生する歪の許容値が必要である。しかしながら, 実際に利用出来る数値としては静的荷重試験の結果得られた静的限界歪約 900×10^{-6} という値のみである。したがって, これを利用する。即ち, 3波擬共振実験における最大応答歪でこの限界値を割って安全性の目安を定量化する。入力波を振動数8.6 Hzとして前後方向加振したときの結果を図4に, 同じく6.8 Hzで左右方向加振したときの結果を図5に示す。ただし, 横軸は加振台加速度(前後方向加振での黒丸印は架台加速度)の最大値とし, 縦軸は静的限界歪を最大応答歪(前後方向加振でC相, 左右方向加振でB相の各々碍子のヒダ2枚目部分で発生)で割った値を示している。

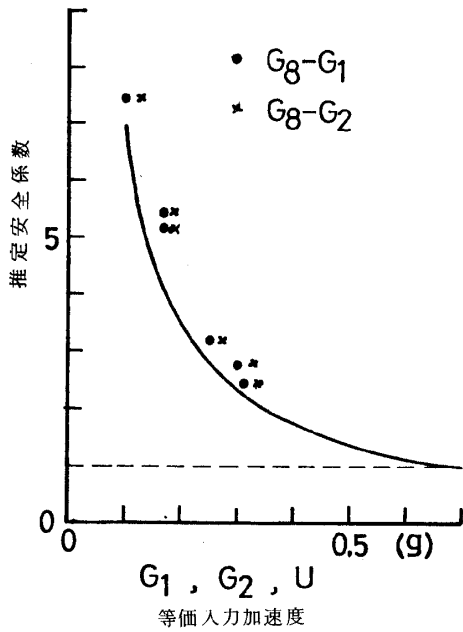


図. 4 推定安全係数(前後方向)

Fig. 4 Estimated Factor of Safety
(Long Axis Direction)

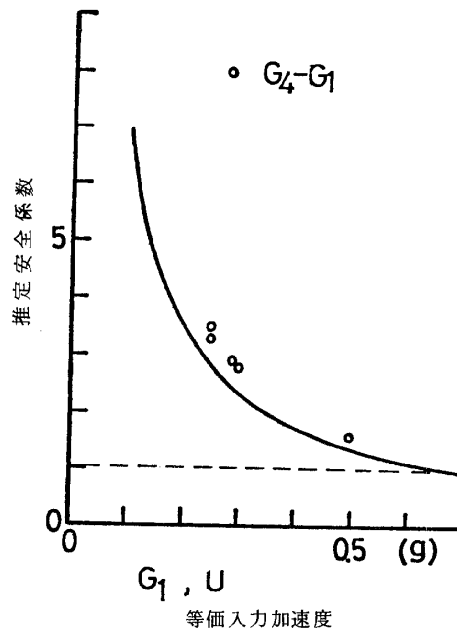


図. 5 推定安全係数(左右方向)

Fig. 5 Estimated Factor of Safety
(Short Axis Direction)

さらに、加振台加速度を大きくした場合について、碍管の振動を弾性棒の曲げ振動でモデル化して導びいた簡単な半理論式(付録1)を使って安全性を推定すると図中の実線のような結果が得られる。ただし、これはいくぶん安全側にたって推定している。この推定法では、遮断器は0.7 g程度まで耐えられるようである。

2. 3 地震波実験

3波擬共振実験では入力波の振動数と振巾とを固定した。その結果、遮断器の応答は遮断器の減衰定数で大方のことは記述される(付録1)。これに対して、地震波実験では入力波の周波数特性も振巾特性も非正常である。この場合、遮断器はアクティブな帯域通過フィルタとして作用し、その応答は狭帯域不規則応答を示す。したがって応答は共振振動数と減衰定数とで主に記述される。

遮断器の応答が示す共振振動数は、その構成部材と形状とで決定されるため、応答に対する依存性は少ない。しかしながら、減衰定数は部材間あるいは部材内部のエネルギー損失により決定されるため、応答に依存して変動する。応答スペクトル曲線を利用して耐震性を検討するために必要な二つのパラメータ共振振動数と減衰定数はこの様な性質を持っている。特に減衰定数の不確実さは問題となる。

振動台実験では、振動台の変位制御方式や振巾制限のため、地震波を完全に再現出来ないにしても、上記不確定さを考えずに測定及び耐震性の検討が出来る利点がある。今回の受託研究において用いた振動台地震波El-Centro, 1940, N-S波による加振実験の結果及び遮断器の振動挙動の推定を次に示す。

2. 3. 1 測定結果

実験用地震波El-Centro, 1940, N-S波を最大約0.35gで加振したときの歪応答を付図7(前後方向加振)及び付図8(左右方向加振)に、加速度応答を付図9(前後方向加振)及び付図10(左右方向加振)に示す。3波擬共振実験と同じく、地震波実験においても支持碍管最下部の碍子のヒダ2枚目部分が最大歪応答を示す。表3は最大歪を示した位置とその絶対値である。ただし、参考のためC相系主要部の加速度と歪及び加振台加速度の絶対最大値を加えた。

3波擬共振(設定振巾0.3g)応答と地震波(最大加速度約0.35g)応答を最大歪量で比較すれば、地震波実験での歪量は前後方向加振で約40%, 左右方向加振で約70%の量を示している。また、遮断器が動作状態にあるときの方が切断状態にあるときよりもいくぶん応答が大きい。

表. 3 地震波実験結果

Table 3 Results of Earthquake Simulated Wave Test,

加振方向	動作状態	G ₁ (g)	G ₈ (g)	S ₁₁ (10) ⁻⁶	最大歪(10) ⁻⁶
前後	開	0.37	1.25	138	138(S ₁₁)
	閉	0.36	1.47	146	148(S ₁₀)
左右	開	0.38	1.76	206	206(S ₁₁)
	閉	0.37	1.82	211	223(S ₁)

2. 3. 2 振動挙動の推定

地震波加振における遮断器の振動挙動のとらえ方にはいくつかの方法がある。ここではこれを加速度応答の共振振動数, 減衰定数, 応答加速度の自乗平均値の平方根(以下 r. m. s. 値と略記する。)及び応答加速度のスペクトル形状係数の変動としてとらえることを試みる。もちろん、これが最良の方法とは言えないが、振動挙動の概観をある程度定量的にとらえることが出来る。

C相系の加速度応答及び歪応答は他相系よりも平均して大きく、衝撃試験等からも知れる様に振動も安定している。ここではC相頂部の加速度応答を1つの標本として考察する。対象とする区間は加振直後の主応答部とする。減衰定数等の推定法に関しては付録2で示すこととし、ここでは得られた推定結果を図6~図11に示す。これらの図において、横軸の時間t秒は加振後t-1秒からt秒までの1秒間を推定区間としたことを意味するものとする。標本化時間を10msとしているので、標本点数は各区間100である。

これらの図からは次のことが読みとれる。

- 狭帯域過程とはスペクトル形状係数が0.3程度以下の場合である。左右方向加振の場合は前後方向加振に比べて、徐々にではあるが確実に狭帯域応答へ移行している。
- 応答加速度の r. m. s. 値は左右方向加振が前後方向加振の約2倍を示している。前後方向加振において、スペクトル形状係数が途中大きくなるととき応答加速度の r. m. s. 値は小さくなっている。これは振動が弱まって、スペクトルが集中しないためと考えられる。同じことが両方向とも図中の尾部でみられる。
- 共振振動数のバラツキはいずれの加振方向においても周期換算で0.02秒程度である。減衰定数はかなり変動する。応答加速度の r. m. s. 値が大きいところでは、左右方向加

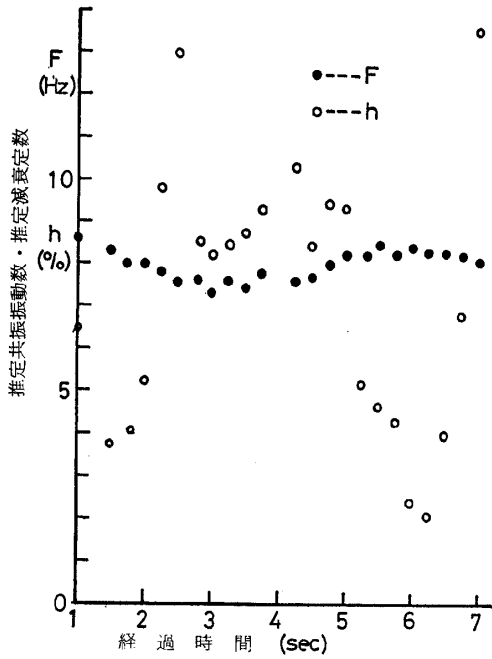


図. 6 推定スペクトル・パラメータ (前後方向)
Fig. 6 Estimated Spectral Parameters (Long Axis Direction)

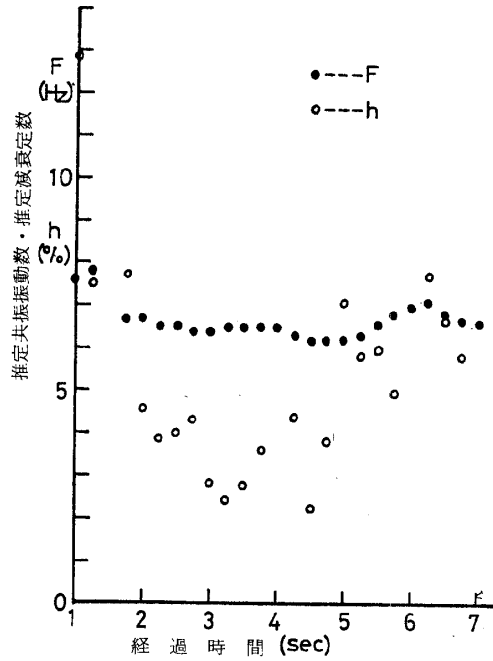


図. 7 推定スペクトル・パラメータ (左右方向)
Fig. 7 Estimated Spectral Parameters (Short Axis Direction)

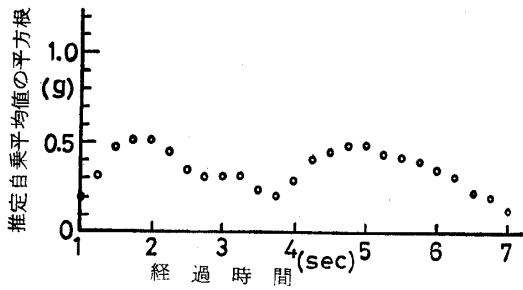


図. 8 推定自乗平均値の平方根 (前後方向)
Fig. 8 Estimated R.M.S. Value of Acceleration Gg. (Long Axis Direction)

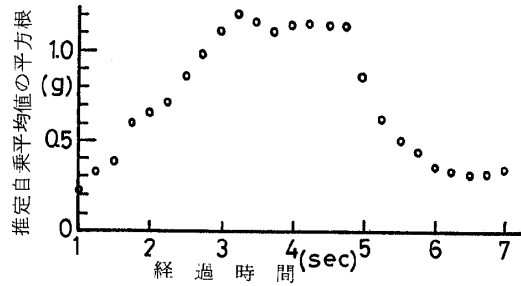


図. 9 推定自乗平均値の平方根 (左右方向)
Fig. 9 Estimated R.M.S. Value of Acceleration Gg. (Short Axis Direction)

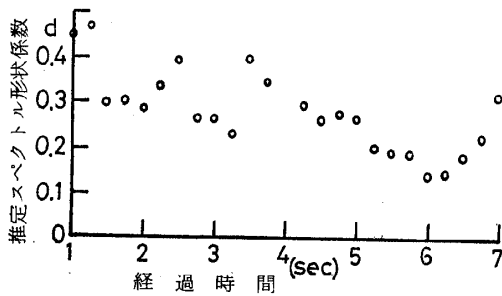


図. 10 推定スペクトル形状係数 (前後方向)
Fig. 10 Estimated Spectral Shape Factor (Long Axis Direction)

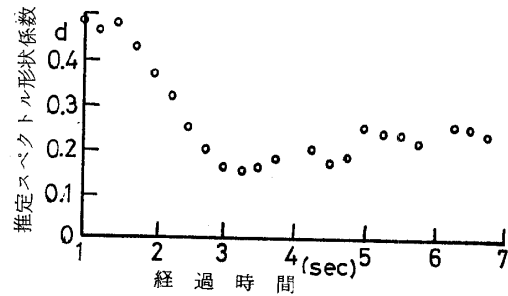


図. 11 推定スペクトル形状係数 (左右方向)
Fig. 11 Estimated Spectral Shape Factor (Short Axis Direction)

振で2~5%, 前後方向加振で4~9%と推定される。特に前後方向加振では応答加速度の r. m. s. 値に追従して、これが減少するときは減衰定数も小さくなる。これは碍子の特性に似ており、架台部の影響が少ないことを示している。架台部の影響の大きい左右方向加振では逆の傾向が見られる。

2.4 その他

白雑音波は加振装置の周波数特性のため、必要帯域内においてその性質を維持出来ない。したがって、振動実験では有効な解析は限定される。その中で、共振実験でデータ不足のため求められなかった前後方向加振のA相系ピークに対して、架台加速度とのスペクトル比で多少の推定はつく。また、架台と各相系の碍管との相関の度合を示すコヒーレンシは有効と思われる。

図12は前後方向加振における架台加速度に対する各相系碍管の重心部加速度のスペクトル比の平方根を推定したものである。10 Hz をやや超えたところにA相系のピークが見られる。また、前後方向加振において、架台加速度を入力として、各相系碍管重心部加速度を出力としたときの推定コヒーレンシを図13に示す。碍管が架台と無関係に振動する程コヒーレンシは小さくなり、その落ち込みの深さは碍管振動の独立性の強さを意味する。前後方向加振では、C相が約9 Hz で他相よりも深く落ち込み、碍管の1次固有振動数がこの程度である可能性を示している。

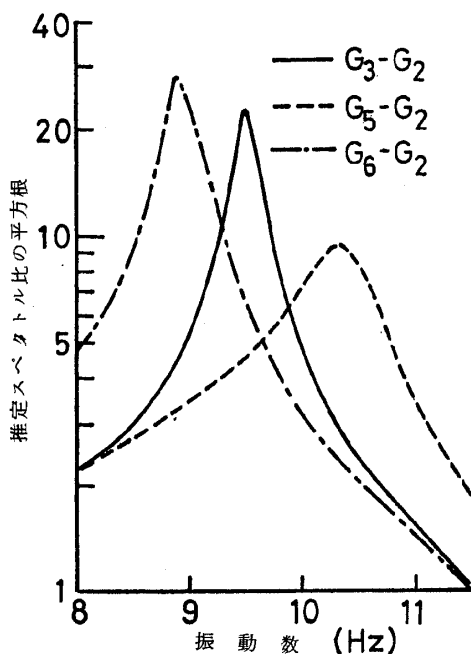


図. 12 推定スペクトル比の平方根
Fig. 12 Ratios of Estimated Root Power Spectral Densities

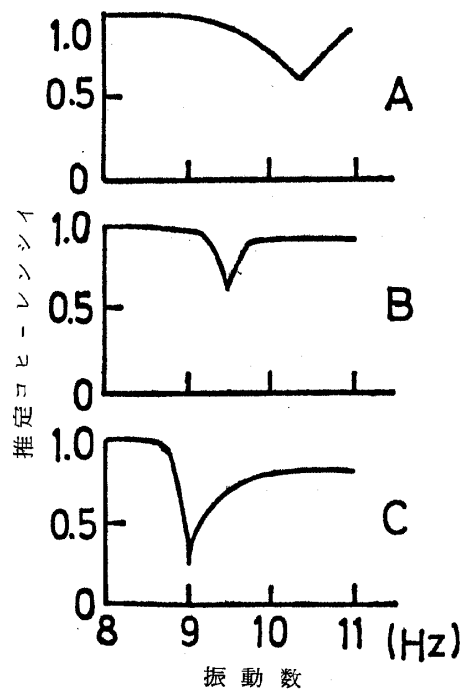


図. 13 推定コヒーレンシ
Fig. 13 Estimated Coherencies

2. 5 結 論

以上のことをまとめると、遮断器の振動実験からはその耐震性に関して以下のような結論が得られる。

- a. 前後方向加振では、各相系の共振振動数は異なる。最大応答を示すC相系の共振振動数は8.6 Hzで、入力加速度0.3 gの3波擬共振での安全係数は、碍管の静的限界歪を基準にすると約2.5である。左右方向加振での各相系の共振振動数は全て6.8 Hzである。同条件での安全係数は約3である。
- b. 碍管の3波擬共振応答理論を基礎にして推定した碍管の安全係数は、その減衰定数を2%と仮定したとき、a.に比べて安全側の評価を与えている。この曲線から、遮断器は入力加速度0.7 gの3波擬共振に対して安全係数1が保たれることを推定出来る。
- c. 振動台実験用地震波El-Centro, 1940, N-S波を最大加速度0.35 gで加振したとき、遮断器の最大歪応答は、入力加速度0.3 gの3波擬共振と比較して前後方向加振で約40%、左右方向加振で約70%の量を示している。

あとがき

当然のことながら、受託研究というのは早期に結論が要求される。そのためというわけではないが、かなり荒い仮定と計算を行った。詳細は付録を参照されたい。

特に、今後の課題として、碍子のヤング率のばらつきを考慮した応答計算と擬共振法の入力波形の検討が重要と思われる。入力波形としては数波の正弦波を半波正弦波で振巾変調したうなり (beat) 波形が遮断器の振動実験に用いられた例も報告されている「Fischer, E. G. and Daube, W. M. (1976)」。

最後にこの振動実験は昭和50年10月30日及び31日の両日にわたり、国立防災科学技術センター耐震実験室の大型振動台を用いて行ったものである。なお、入力波作製は小川研究員、実験進行及び測定は箕輪研究員、振動台運転制御は耐震実験室の飯田、久保田両氏にそれぞれ担当していただいた。また、供試体の据付け及び測定の一部を明電舎・高圧機器部の諸氏に担当していただいた。これらの方々に感謝致します。

付録 1.

1 質点系のN波擬共振応答及びこれを碍管へ適用した結果を示す。

1. 1 1自由度粘性減衰系のN波擬共振応答

静止状態にある1自由度系を正弦加速度で加振したときの運動方程式は次のように得られる。

$$\ddot{q} + 2 h_n \omega_n \dot{q} + \omega_n^2 q = -\ddot{u} \quad (1)$$

$$u(t) = \begin{cases} \sin \omega_n t, & 0 \leq t \leq 2\pi N / \omega_n \\ 0, & \text{その他} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、加振正弦波は系の固有振動数と同じ振動数を持ち、波の数はNに制限されているとする。1自由度系のN波擬共振応答とは(1)式及び(2)式で支配される系の過度応答とする。この解は主要時間範囲において次のように得られる。

$$q(t) = \frac{D_n}{2} \sin(\omega_n \sqrt{1-h_n^2} t + \theta_n) \cdot \exp(-h_n \omega_n t) - \frac{1}{2h_n} \cos \omega_n t, \quad 0 \leq t \leq 2\pi N / \omega_n \quad (3)$$

ここで、 $D_n \equiv [h_n(1-h_n^2)^{1/2}]^{-1/2}$ 、 $\theta_n \equiv -\tan^{-1}[(1-h_n^2)^{1/2}/h_n]$ とする。1自由度系の応答値は(3)式より求まる。即ち、N波擬共振における1自由度系の相対変位の応答倍率を $D_N(h_n) \equiv |q|_{\max}$ 、 $0 \leq t \leq 2\pi N / \omega_n$ 、加速度の応答倍率を $A_N(h_n) \equiv |\ddot{q} + \ddot{u}|_{\max} / \omega_n^2$ 、 $0 \leq t \leq 2\pi N / \omega_n$ とすれば、これらは各々図14及び図15となる。

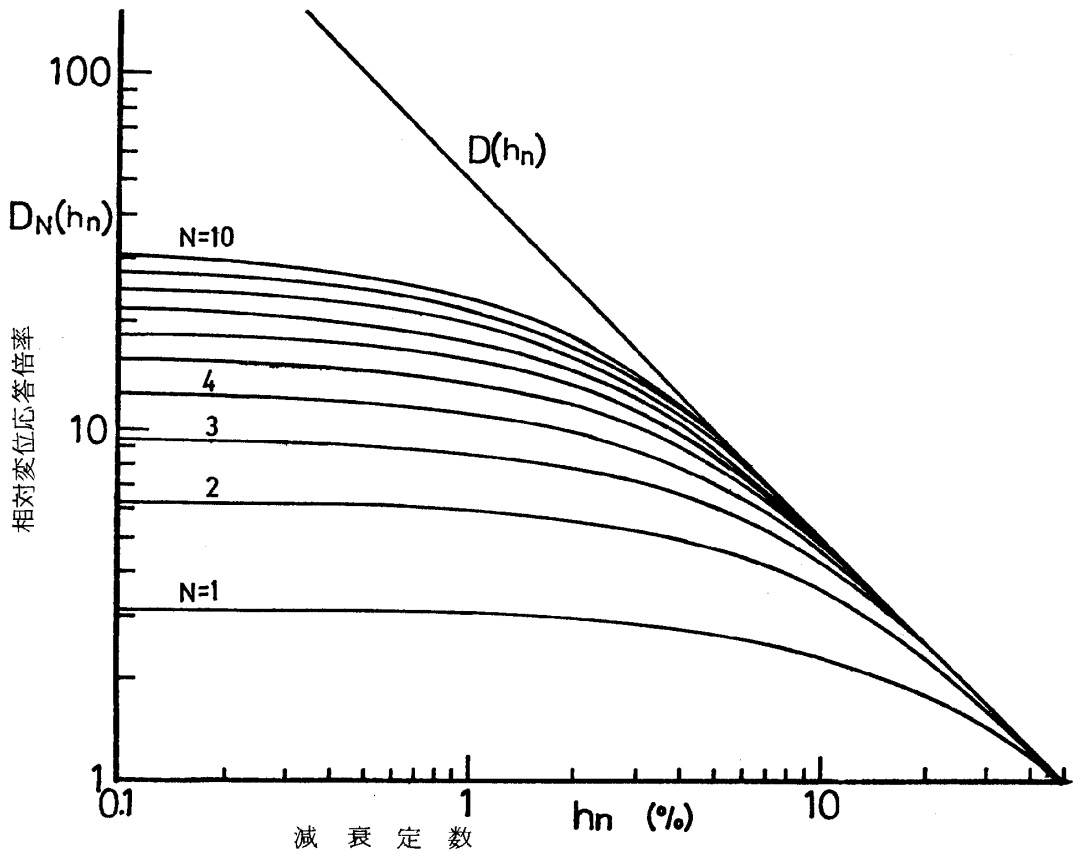


図. 14 相対変位応答曲線

Fig. 14 Relative Displacement Amplification Factor

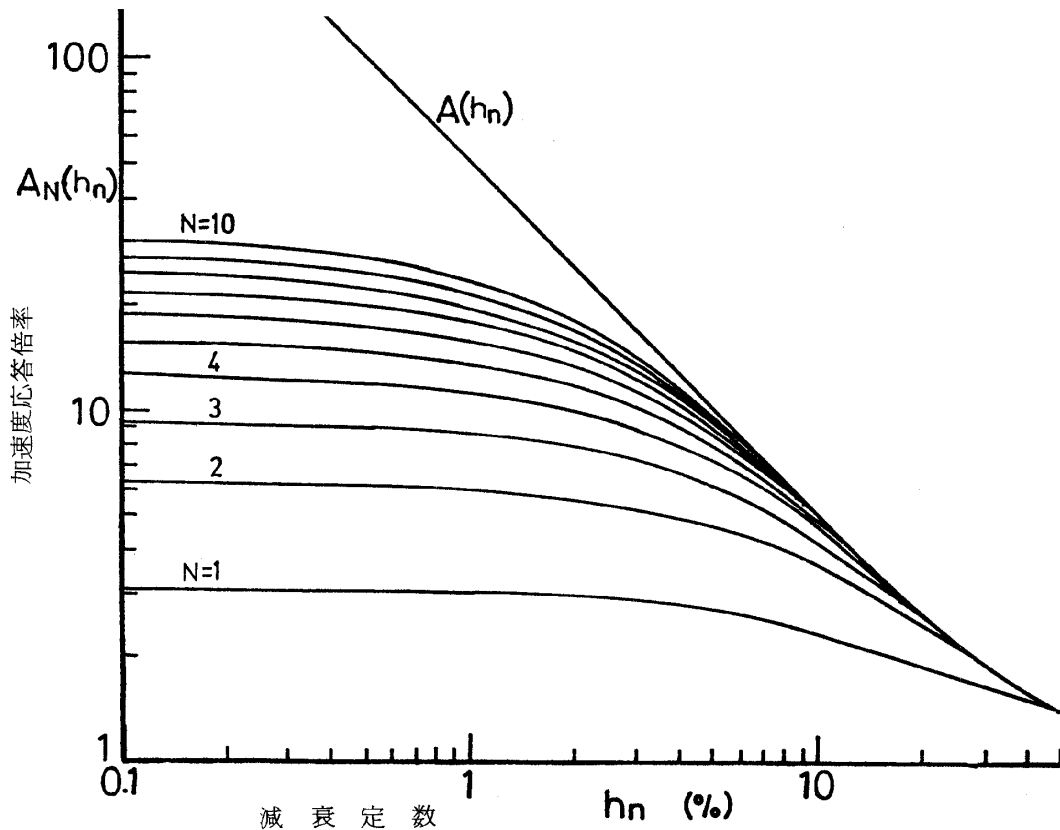


図. 15 加速度応答曲線

Fig. 15 Absolute Acceleration Amplification Factor

図 15 を地震波の規準化加速度応答スペクトルと比較すれば、次のような結果を得る。即ち、規準化加速度応答スペクトル曲線で減衰定数を固定した最大応答値で比較すれば、E1-Centro, 1940, N-S波は 1 波と 2 波の間に位置する。また、国内の 10 種の地震によって建築研究所で求めた規準化平均応答スペクトルは 2 波をやや上回る場所に位置する「森田健児・篠田克郎(1975)」。したがって、3 波擬共振実験は通常の地震波実験よりも条件は厳しいといえる。

1. 2 碍管への適用

遮断器は架台部と碍管より構成されている。このうち耐震の立場から問題となるのは碍管であり、これに 1 自由度系の N 波擬共振応答の結果を適用するため、図 16 に示す弾性棒の曲げ振動で碍管の振動を模擬する。

図 16 において、 $u(t)$ を固定点 $x=0$ での強制変位、 $y(x, t)$ 、 $0 \leq x \leq 1$ を棒のたわみの変位とすれば、正弦波入力に対する系の振動方程式は (4) 式となる。

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + k^2 b^2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = -\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad u(t) = \sin \omega t \quad (4)$$

ここで、 k は断面の慣性半径、 $b^2 = E/\rho$ 、 E は棒のヤング率、 ρ は密度とする。

この系における自由振動で変数分離した座標関数を $v(x)$ 、 $0 \leq x \leq 1$ とすれば、これ

は次式を満たす。

$$\frac{d^4 v}{dx^4} - \frac{m^4}{l^4} v = 0, \quad m^4 \equiv \frac{\omega^2 l^4}{k^2 b^2} \quad (5)$$

これを上端自由，下端固定の境界条件；

$$v(0) = \frac{dv(0)}{dx} = 0,$$

$$\frac{d^2 v(l)}{dx^2} = \frac{d^3 v(l)}{dx^3} = 0 \quad (6)$$

で解けば，系の振動モードを決定する周波数方程式；

$$1 + \cos m \cosh m = 0 \quad (7)$$

を得る。(7)式を満たす $m = m_j, j = 1, 2, \dots$

「Rayleigh, J. W. S (1945)」が j 次の振動系を決定する。それは，

固有角振動数；

$$\omega_j = kb m_j^2 / l^2, \quad j = 1, 2, \dots \quad (8)$$

基準関数系；

$$v_j(x) = \cos \frac{m_j}{l} x - \cosh \frac{m_j}{l} x - \frac{\cos m_j + \cosh m_j}{\sin m_j + \sinh m_j} \left(\sin \frac{m_j}{l} x - \sinh \frac{m_j}{l} x \right) \quad (9)$$

$j = 1, 2, \dots$

$$\int_0^l v_i(x) v_j(x) dx = \frac{1}{4} l v_j^2(l) \cdot \delta_{ij} \quad (10)$$

となる。

強制力の加わった場合の解形式を

$$y(x, t) = \sum_{j=1}^{\infty} v_j(x) \cdot q_j(t) \quad (11)$$

と仮定して(4)式を解く。ここで， $q_j(t), j = 1, 2, \dots$ は一般座標とする。系の運動エネルギー T ，位置エネルギー V 及び一般外力 Q は棒の断面積を A とすると(11)式により各々次のように得られる。

$$T = \frac{1}{2} \int_0^l \rho A \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right)^2 dx = \frac{1}{2} \rho A \sum_j \int v_j^2 dx \dot{q}_j^2 \quad (12)$$

$$V = \frac{1}{2} \int_0^l EA k^2 \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right)^2 dx = \frac{1}{2} \rho A \sum_j \int v_j^2 dx \cdot \omega_j^2 q_j^2 \quad (13)$$

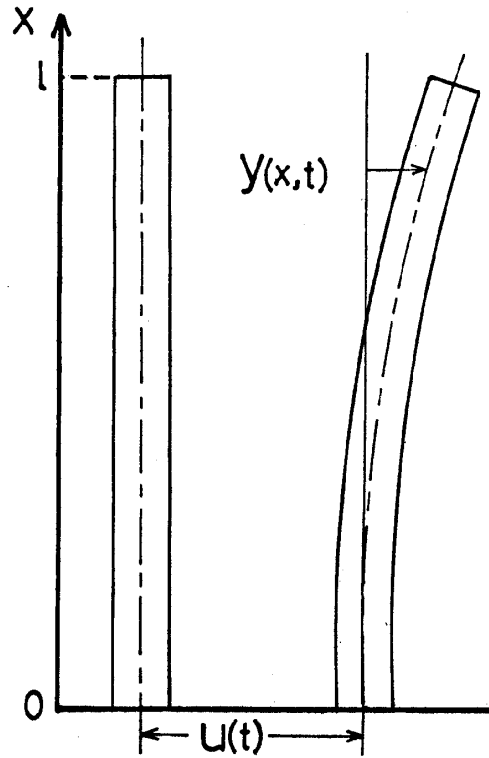


図. 16 弾性棒の曲げ振動
Fig. 16 Model of Insulator

及び

$$Q = \int_0^l \left(-\rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) \cdot y \, dx = \rho A \sum_j \int \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} v_j \, dx q_j \quad (14)$$

したがって、一般速度に比例する減衰を考慮するために正定な散逸関数

$$F = \frac{1}{2} \rho A \sum_j 2 h_j \omega_j \int v_j^2 \, dx \dot{q}_j^2 \quad (15)$$

を形式的に考えれば、 n 次モードの Lagrange の方程式は、

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_n} \right) = \frac{\partial L}{\partial q_n} - \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_n} \quad (16)$$

となる。ここで、 $L \equiv Q + T - V$ は系の Lagrangian である。(16)式に(12)式から(15)式までを代入すれば、次の運動方程式を得る。

$$\ddot{q}_n + 2 h_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = -\beta_n \ddot{u} \quad (17)$$

ここで、 β_n は n 次の基準関数に対する刺激係数で次式より計算される。

$$\beta_n = \int_0^l v_n(x) \, dx \bigg/ \int_0^l v_n^2(x) \, dx \quad (18)$$

故に、 N 波擬共振において、 n 次モード振動での棒の各部の最大応答倍率は $v_n(x) \cdot \beta_n \cdot A_N(h_n)$ 、 $0 \leq x \leq l$ で与えられる。図17に基準関数 v_j 、 $j=1, 2, 3$ を、表4にその刺激係数を示す。また、棒の1次固有振動数を9 Hzと仮定したときの各次の推定固有振動数を加える。これは(8)式より $F_j = (m_j / m_1)^2 F_1$ から求めたものである。ただし、 F_j 、 $j=1, 2, 3$ は j 次の固有振動数とする。この表より碍管のみの地震

波に対する応答では2次以上の振動モードは起こりにくいことがわかる。

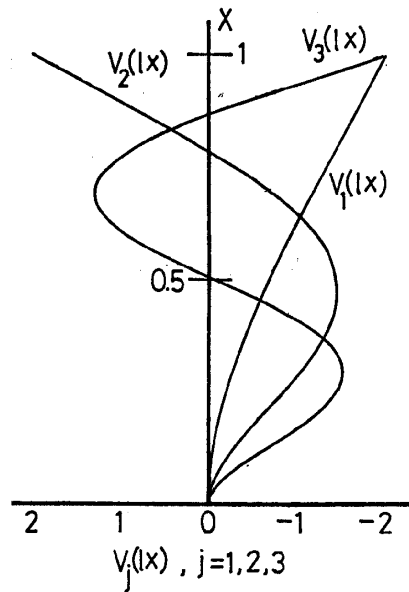


図. 17 基準関数
Fig. 17 Normal Functions

表. 4 刺激係数
Table 4 Participation Factors

j	m_j	β_j	F_j (Hz)
1	1.88	-0.78	9
2	4.69	-0.43	56
3	7.85	-0.25	158

1.3 碍管の曲げモーメント

実際に必要となる碍管の曲げモーメントは1次モードにおいて次のように得られる。

$$M(x, t) = EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \approx EI \frac{d^2 v_1}{dx^2} q_1 = \frac{EI m_1^2}{\ell^2} v_1(\ell-x) q_1(t), \quad 0 \leq x \leq \ell \quad \dots\dots (19)$$

ここで、 I は断面二次モーメントとする。 $v_1(x)$ は $x=\ell$ で最大となり、1自由度系のN波擬共振では図14より $q_1(t)$ の最大値は $\beta_1 D_N(h_1)$ である、したがって、N波擬共振における最大曲げモーメントは碍管最下端において生じ、 $M(0, t)_{\max} = EI m_1^2 \ell^2 \beta_1 \cdot v_1(\ell) \cdot D_N(h_1)$ となる。しかるに、 h_1 が小さいときは $D_N(h_1) = A_N(h_1)$ であり、 $A_N(h_1) = \omega_1^{-2} \cdot (\ddot{q}_1 + \ddot{u})_{\max}$ 、 $0 \leq t \leq 2\pi N/\omega_1$ であるから最大曲げモーメントは次のようになる。

$$M(0, t)_{\max} = \frac{EI \ell^2}{k^2 b^2 m_1^2} \beta_1 v_1(\ell) (\ddot{q}_1 + \ddot{u})_{\max}, \quad 0 \leq t \leq 2\pi N/\omega_1 \quad \dots (20)$$

1.4 碍管の耐震性

(20)式は、1次モード振動のN波擬共振応答において碍管下端部に生じる最大曲げモーメントは碍管頂部での最大加速度に比例することを意味している。また、この部分での歪は曲げモーメントを碍子のヤング率及びこの部分での断面係数で割って求まる。したがって、碍管下端部(実際には碍子のヒダ2枚目部分)で測定される最大歪は碍管頂部の最大加速度にほぼ比例するといえる。実験結果から、前後方向加振で図18、左右方向加振で図19が得られる。図において、横軸は碍管頂部の絶対最大加速度を、縦軸は対応する碍管の碍子のヒダ2枚目部分に生じた歪の絶対最大値を示している。これらの結果は、いずれの加振方向においても比例定数がほとんど同じに推定されることを示している。ただし、この比例定数が理論的に推定されるものと同じ意味をもつかどうかの確認は残念ながら出来ない。

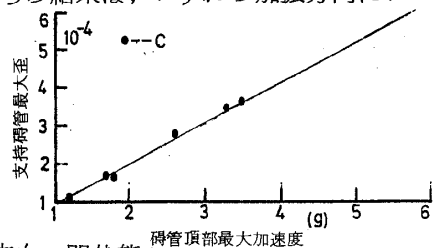


図. 18 碍管最大加速度—最大歪(前後方向・閉状態)

Fig. 18 Maximum measured Accelerations and Strains of Insulators (Long Axis Direction)

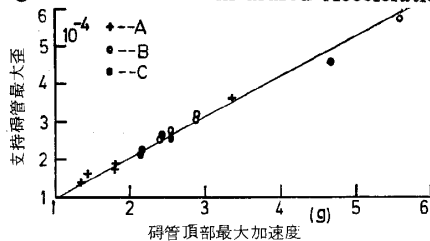


図. 19 碍管最大加速度—最大歪(左右方向・開状態)

Fig. 19 Maximum measured Accelerations and Strains of Insulators (Short Axis Direction)

この比例定数を利用すれば、碍管の静的限界歪に対応する碍管頂部加速度は約 8.6 g と推定出来る。したがって、前後方向において、架台を剛と仮定すれば図 4 の安全曲線は $8.6 / v_1(\ell) \cdot \beta_1 \cdot A_3(h_1) \cdot U$ より求まる。ここで U は入力加速度の最大値である。図 4 は安全側にたって h_1 を 2% として計算したものである。左右方向加振の結果である図 5 にこの計算値を適用するのは、架台の影響が大きいことを考えれば無理である。しかしながら、左右方向加振で最大応答を示す相系に対してもこの計算値は安全側での評価を保っている。

さらに一般的には、碍管の安全性の目安は $8.6 / v_1(\ell) \cdot \beta_1 \cdot A_N(h_1) \cdot U$ で与えられる。図 4 及び図 5 における実線は $N=3$, $h_1=0.02$ として、これを U の関数として求めたものであった。これに対して、U 及び h_1 を固定すれば N の関数として碍管の安全性を評価出来る。たとえば、入力加速度 0.3 g の N 波擬共振に対する碍管の安全性の評価は $U=0.3$ g として N を変化させることにより求まる。表 5 は $h_1=0.02$ として計算したものである。

表. 5 N 波擬共振推定値

Table 5 Estimated Factor of Safety and Number of Waves of Quasi-resonance

N	$v_1(\ell) \beta_1 A_N(h_1)$	$G_0 / v_1(\ell) \beta_1 A_N(h_1) U$
1	4.6	6.3
2	8.8	3.3
3	12.4	2.3
4	15.4	1.9
5	18.5	1.6
6	20.8	1.4
7	23.0	1.3
8	24.6	1.2
9	26.2	1.1
10	28.0	1.0

$G_0 = 8.6$ g, $h_1 = 0.02$, $U = 0.3$ g

付録 2.

遮断器の振動台用地震波 E ℓ -Centro, 1940, N-S 波に対する振動挙動の推定には次の方法を用いた。まず、各相系の周波数応答関数を地震波帯域内において次のように近似する。

$$H(\lambda) = 1 / \left(1 - \frac{z^{-1}}{z_0}\right) \left(1 - \frac{z^{-1}}{z_0^*}\right), \quad |\lambda| \leq \pi \quad (21)$$

ここで、 $z = \exp(i\lambda)$ 、 $\lambda = 2\pi f \cdot \Delta T$ は規準化角周波数である。また、 ΔT は標本化周期とする。応答関数の極 z_0 (z_0^* は z_0 の複素共役とする) は、

$$z_0 = \rho_0 \exp(i\theta_0) = \exp(s_0 \cdot \Delta T) \quad (22)$$

とする。ここで、複素 s 平面での極は 1 自由度粘減衰系の固有角振動数 ω_n と減衰定数 h により、

$$\begin{aligned} s_0 &= -h\omega_n + i\sqrt{1-h^2\omega_n^2} \\ &= -\pi B + i2\pi F, \quad (h \ll 1) \end{aligned} \quad (23)$$

となる。B は -3 dB 帯域巾、F は固有振動数である。従って、相系の固有振動数、-3 dB 帯域巾及び減衰定数は応答関数の極から

$$F = |\theta_0| / 2\pi \cdot \Delta T \quad (24)$$

$$B = -\ell_n \rho_0 / \pi \cdot \Delta T \quad (25)$$

$$h = B / 2F \quad (26)$$

として求まる。

実際の加振実験における応答加速度波に上記事項を適用して、相系の固有振動数及び減衰定数を推定するためには次の仮定をする。まず、標本化時間 ΔT で標本化した短区間での応答加速度列をスペクトル密度関数

$$P(\lambda) = \frac{\sigma_n^2}{|1 + \sum_{j=1}^n \alpha_j z^{-j}|^2}, \quad |\lambda| \leq \pi \quad (27)$$

をもつ定常確率過程からの標本と仮定する。(27)式的全極型密度関数は狭帯域応答における共振部を問題とするには妥当なモデルと思われる。この密度関数において、分母に現われる多項式

$$C(z) = 1 + \sum_{j=1}^n \alpha_j z^{-j} \quad (28)$$

は 1 次式と 2 次式の積に分解され、2 次式は共振現象に寄与する「Gold, B. and Rader, C. M. (1969)」。特に、狭帯域応答においてはその根が単位円に接近し、顕著な共振現象を支配する 2 次式が 1 つ存在する。我々は、この根を(2)式における極 z_0 の近似値と仮定する。

実際の計算においては、測定された応答加速度波を $f_c = 17.8 \text{ Hz}$ の低域通過フィルタで前処理し、 $\Delta T = 10 \text{ ms}$ で標本化する。こうして得られた標本列に自己回帰モデルを適用して、最適次数 n 、予測係数 α_j 、 $j = 1, 2, \dots, n$ 、及び予測誤差分散 σ_n^2 を推定する「Akaike, H. (1969)」。予測係数が推定されたならば、代数方程式 $C(z) = 0$ を解き、最も単位円に近い根を求める。この複素根から(24)~(26)式を使って相系の固有振動数及び減衰定数を推定する。代数方程式の数値解法としては Bairstow 法「Ralston,

A. (1965)」が目的に合っている。

スペクトルの形状は予測誤差分散 σ_n^2 及び -3 dB 帯域巾 B より推察されるが、通常はスペクトル形状係数が用いられるようである。これは λ_j , $j=0, 1, 2$ を j 次のスペクトル・モーメント

$$\lambda_j = \int_0^\infty f^j P(f) df, \quad j=0, 1, 2 \quad (29)$$

とすれば、

$$d = (1 - \lambda_1^2 / \lambda_0 \lambda_2)^{1/2} \quad (30)$$

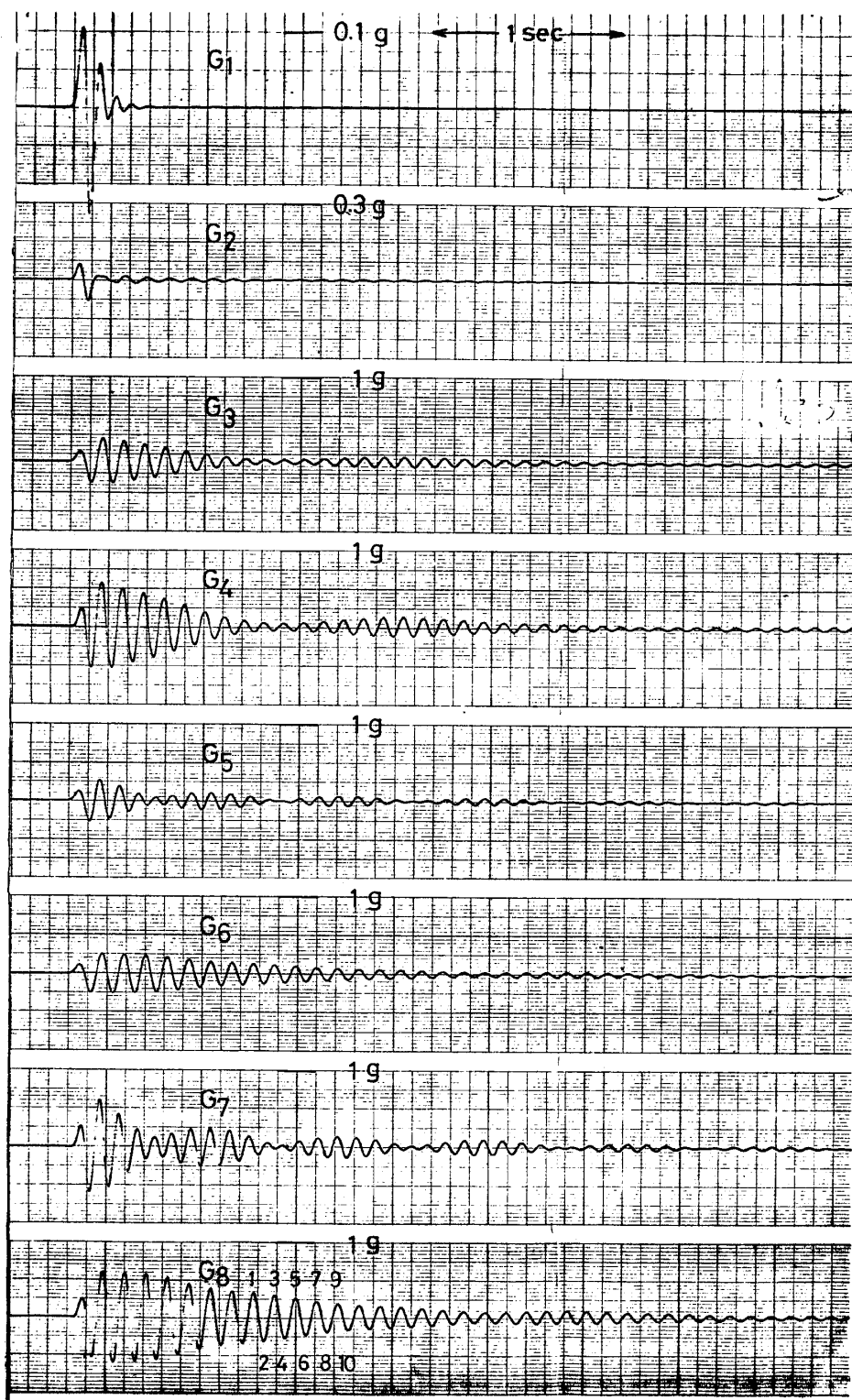
より推定される「Van Marcke, E. H. (1972)」。Schwarz の不等式によれば d は 0 と 1 の間を動く。(29) 式の積分範囲の上限は理論的には $1/2 \cdot \Delta T$ であるが、前処理に使った低域通過フィルタの遮断周波数 f_c 程度とするのが妥当と思われる。実際の計算においても $f_c = 17.8$ Hz を上限とした。また、r. m. s. 値は標本共分散から求めた。

極 z_0 の挙動が遮断器の地震時応答を支配することは上述した通りであるが、単位円上に位置すれば遮断器は共振状態となる。したがって、 z_0 が単位円のごく近傍で、どの程度滞在時間を持つかが遮断器の耐震性の目安になるとと思われる。

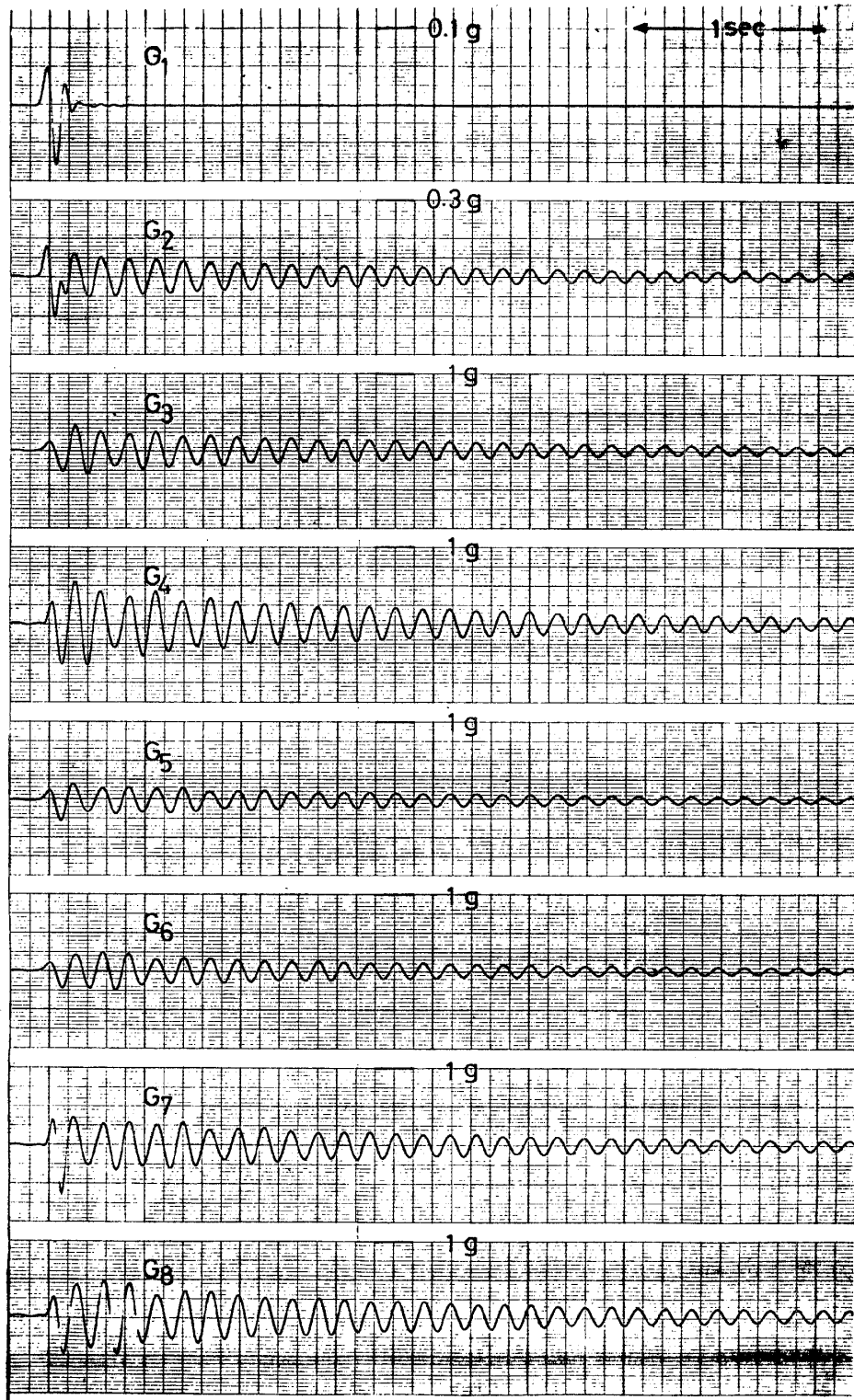
参 考 文 献

- 1) Akaike, H. (1969): Fitting autoregressive models for prediction. *Ann. Inst. Statist. Math.*, 21, 243-247.
- 2) 笠原篤・小島弘司(1970): 発電設備の耐震設計の考え方(2) - がいし形機器 - 電気雑誌 OHM, 11, 39-45.
- 3) Gold, B and Rader, C.M. (1969): Digital processing of signals, McGraw-Hill, 31-33.
- 4) 菅原正己・勝山ヨシ子(1967): 耐震実験装置に関する試験研究報告(第1報). 国立防災科学技術センター研究速報, 第6号
- 5) Vanmarcke, E.H. (1972): Properties of spectral moments with applications to random vibration. *A.S.C.E.*, 98, EM2, 425-446.
- 6) Fischer, E.G. and Daube, W.M. (1976): Combined analysis and test of earthquake-resistant circuit breakers. *Int. J. Earthz. Engng Struct. Dyn.*, 4, 3, 231-244.
- 7) 森田健児・篠田克郎(1975): 碍子の耐震設計. 碍子レビュー, 36, 17-32.
- 8) たとえば Ralston, A. (1965): A first course in numerical analysis, McGraw-Hill, 376-378
- 9) Rayleigh, J.W.S. (1945): The theory of sound, Dover, 1, 277-279

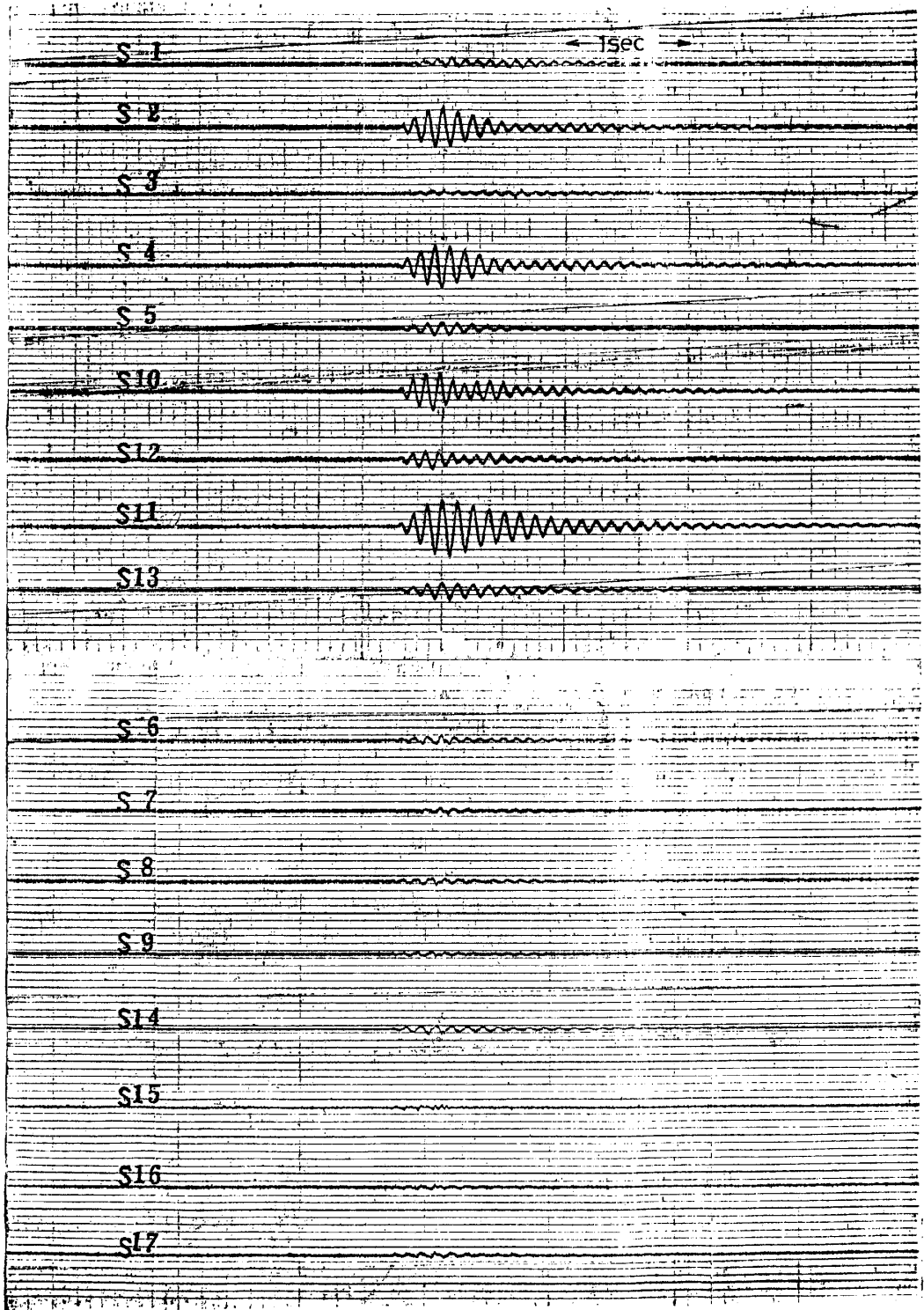
(1976年6月12日原稿受理)



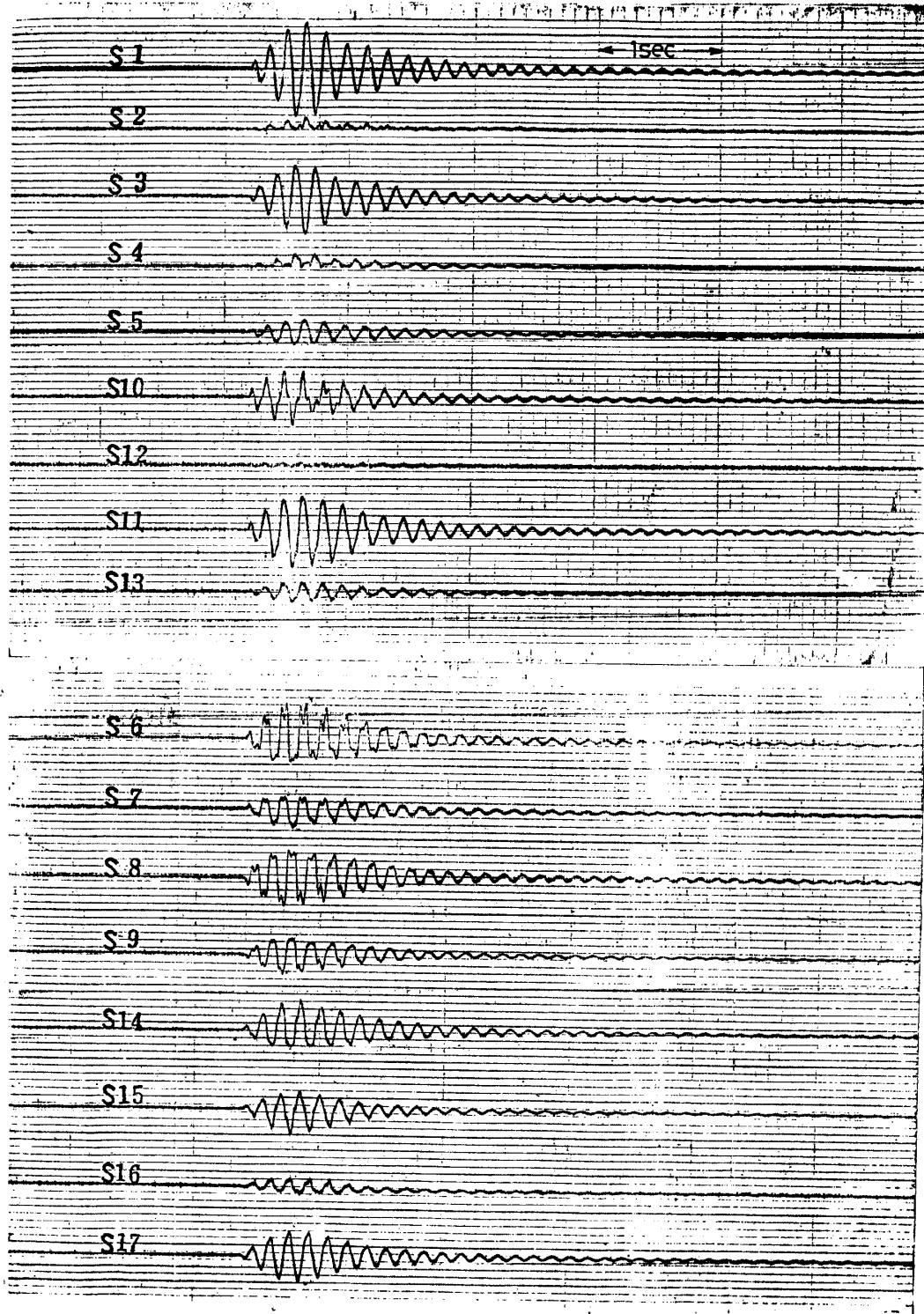
付図。1 衝撃試験・加速度波（前後方向・閉状態）



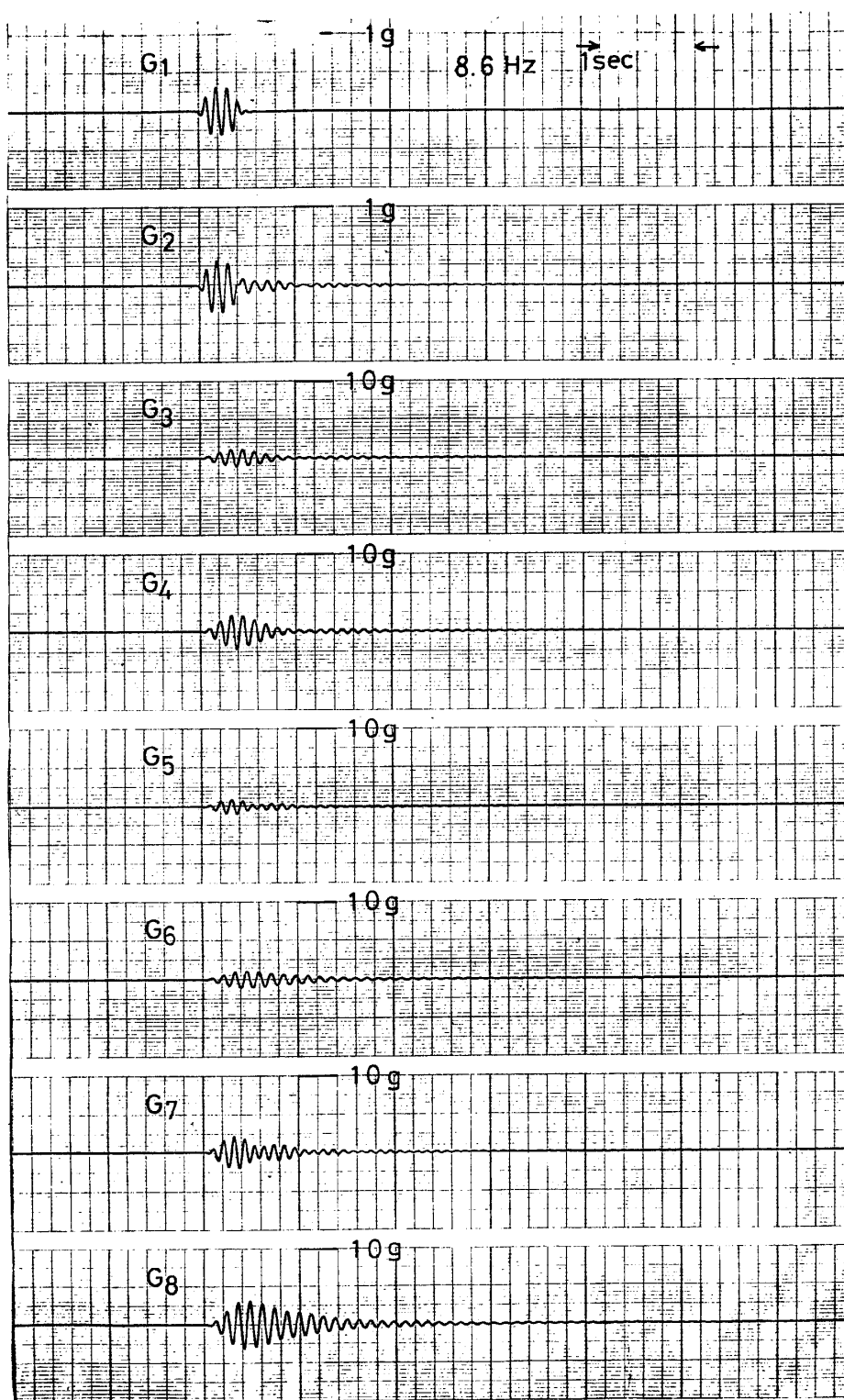
付図. 2 衝撃試験・加速度波(左右方向・閉状態)



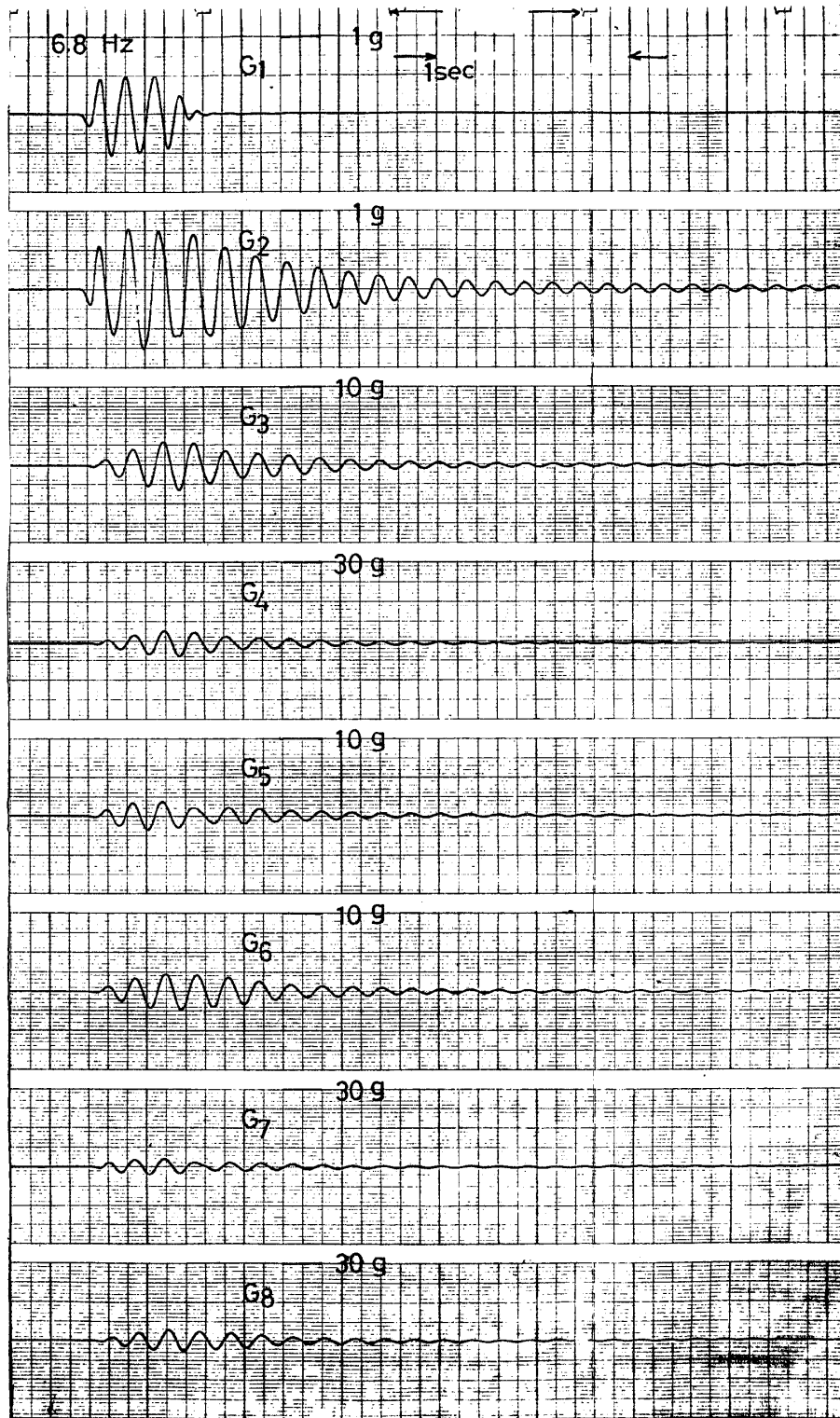
付図. 3 3波擬共振実験・歪波(前後方向・閉状態)



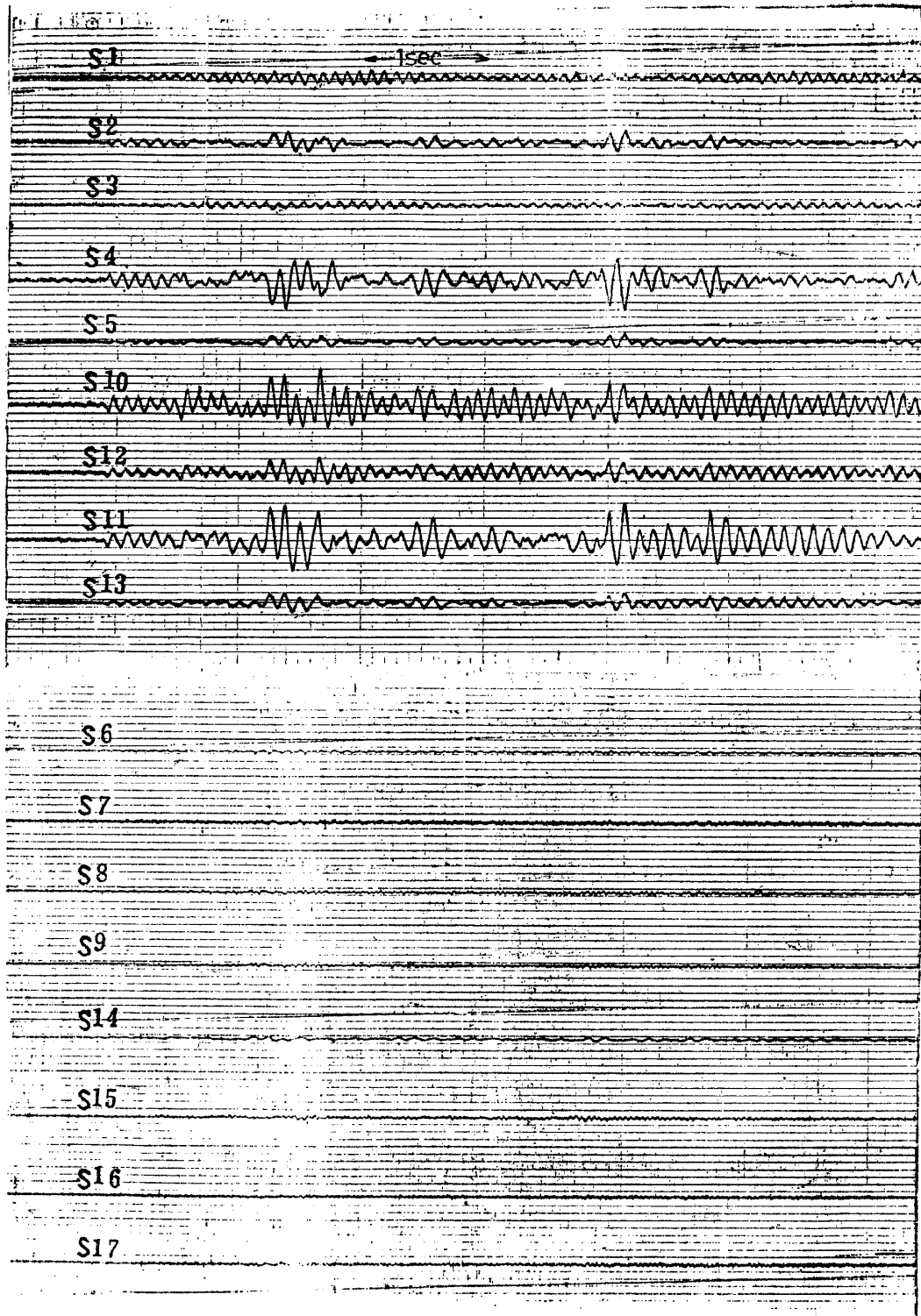
付図. 4 3波擬共振実験・歪波(左右方向・開状態)



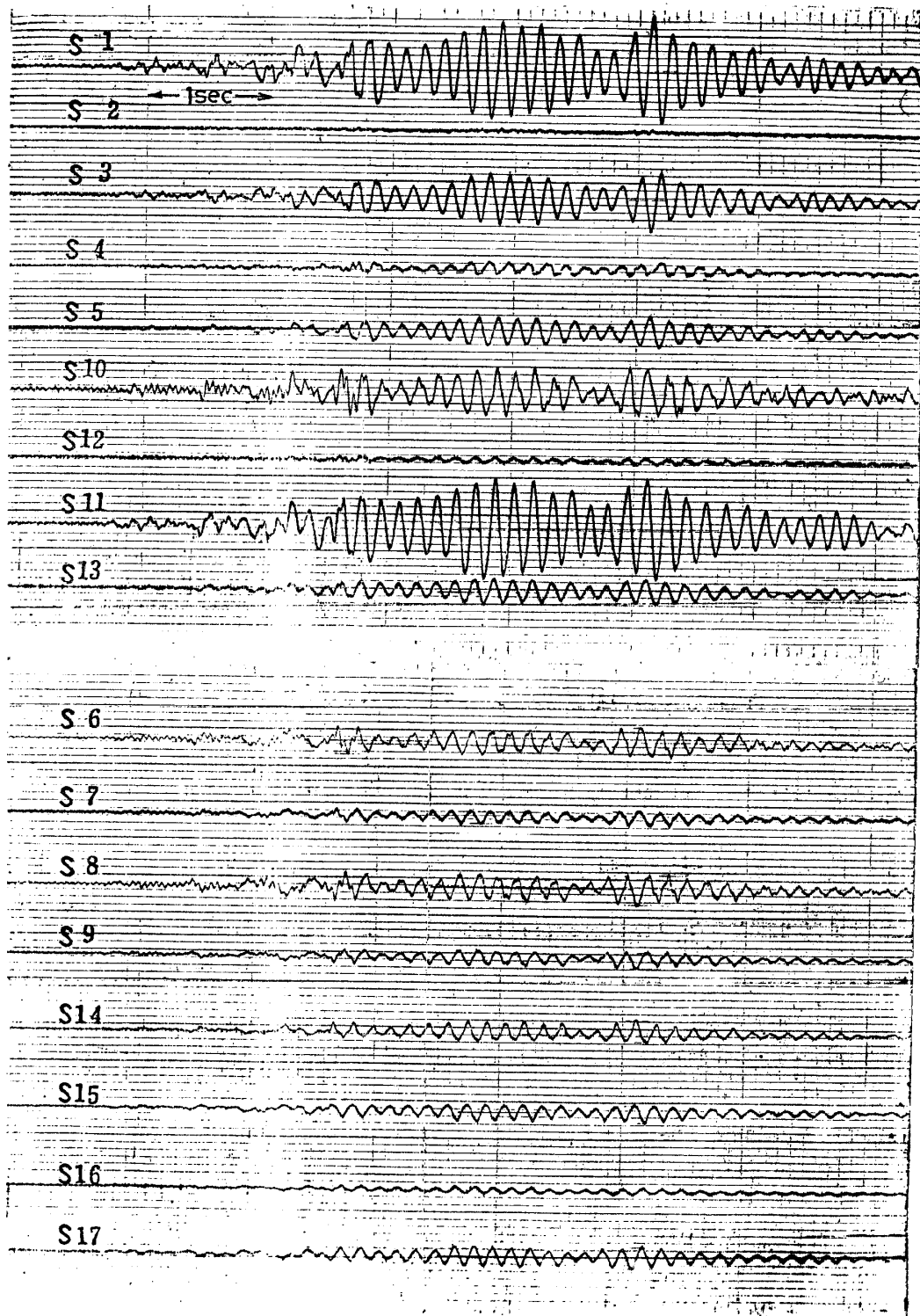
付図. 5 3波擬共振実験・加速度波(前後方向・閉状態)



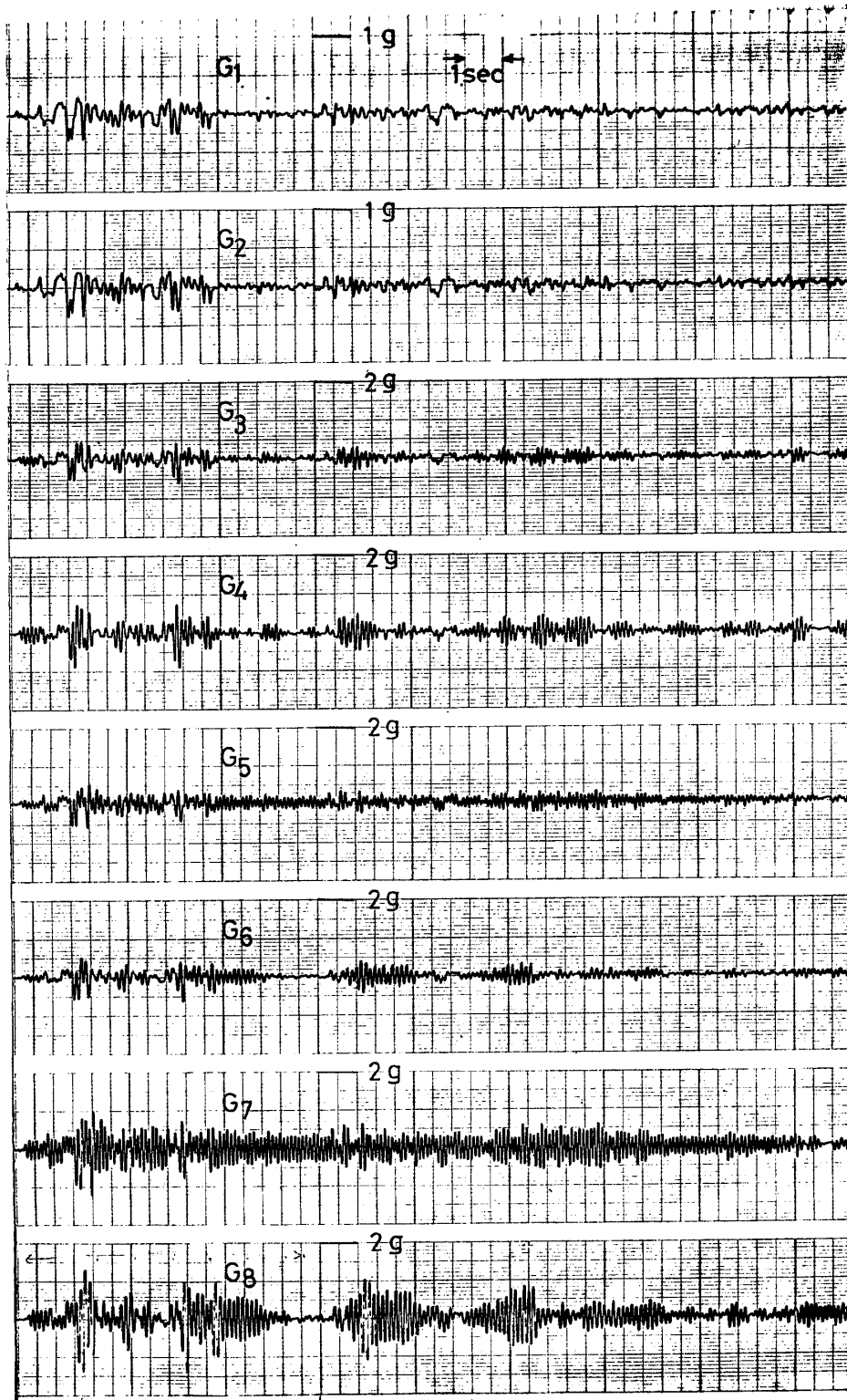
付図. 6 3波擬共振実験・加速度波(左右方向・開状態)



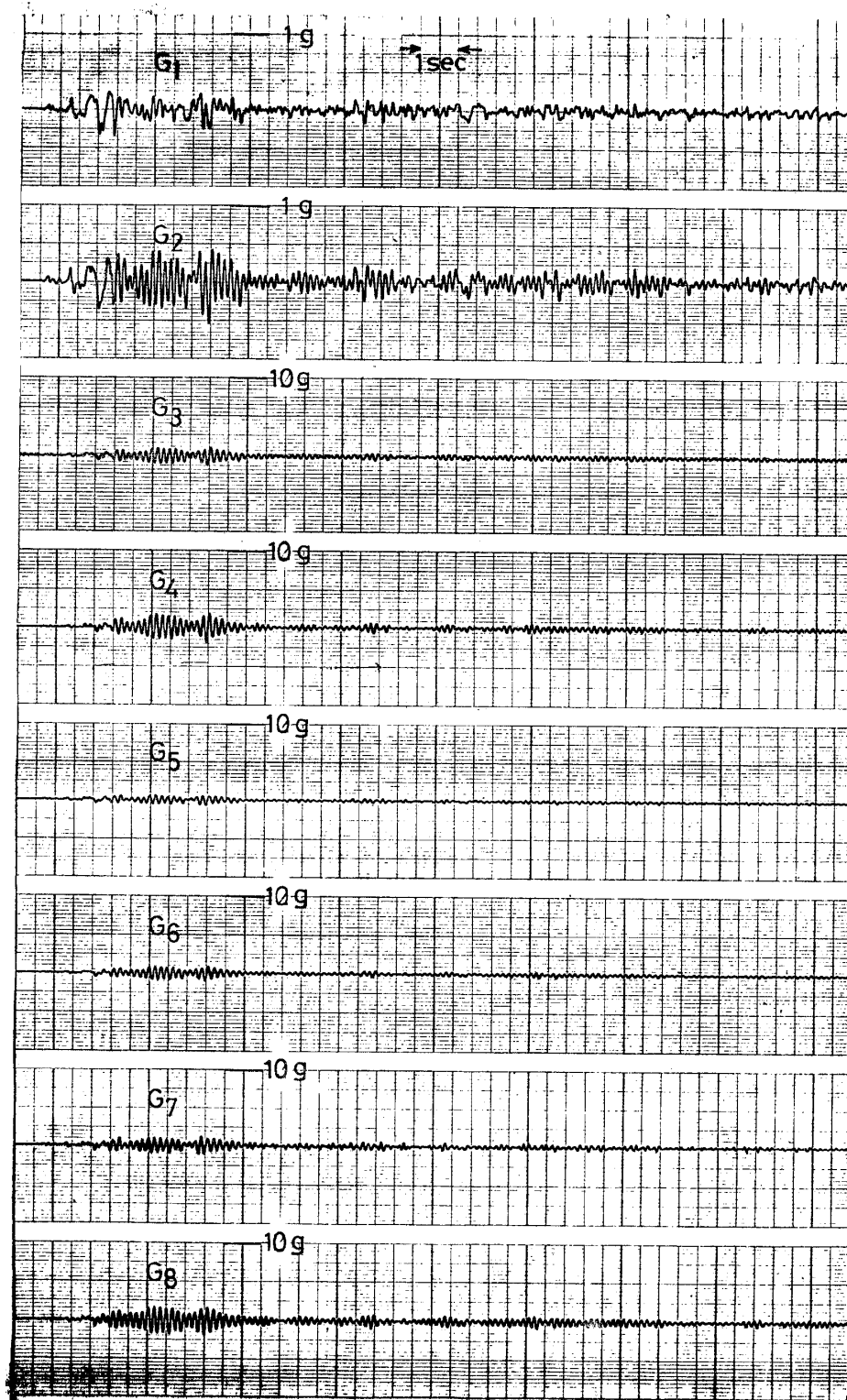
付図. 7 地震波実験・歪波（前後方向・閉状態）



付図. 8 地震波実験・歪波 (左右方向・閉状態)



付図. 9 地震波実験・加速度波(前後方向・閉状態)



付図. 10 地震波実験・加速度波(左右方向・閉状態)