

空気遮断器の振動特性

Vibration Response Characteristics of Air-blast Circuit Braeker

志賀 正明* 仲野 善一**
Masaaki Shiga Zen'ichi Nakano
大島 正文** 佐藤 敏三**
Masafumi Oshima Toshizô Satô

要 旨

従来電力用機器の耐震設計は地震の加速度のみを考慮して、0.2~0.5Gの地震に耐えればよいとされ、地震時の動的な現象、特に共振時の現象についてあまり解明されていなかった。

しかし、実用上はこの現象を考慮しておく必要があるため、主として屋外用空気遮断器について、単一周波共振時の現象および地震波と類似の多重周波との共振時の現象について研究を進めてきた。一方、実際の地震に対する応答特性を得るため、松代群発地震下での現地試験を実施し、これまでの解析結果との比較を行なった。この結果単一周波での振動試験は実地震に比較して過酷であることがわかり、機器の耐震設計は単一周波での共振を考慮しておけば、実地震に対して裕度があり十分安全であることが確認された。

1. 緒 言

屋外用空気遮断器（以下 ABB と略称する）はがい子柱上に遮断部を配置した構造をとっており、がい子が粘性の低い材料であること、構造的に簡単であることなどから、振動時の減衰能が低い傾向を有している。このためほかの電力用機器に比べて、地震の影響を受けやすく、ABB の普及度が高まるにつれて各地で地震に遭遇する機会も増し、また被害を受けた事例も出ている。

これまでの ABB の耐震設計では、横力係数 0.5 の静荷重に耐えればよいとされていたがこれらの状況から動的な考え方をとり入れた耐震設計法を確立することが必要となった。

2. 地 震 波

一般に地震波形は震源機構、震央からの距離、地盤などにより種々異なるが、振動数成分についてみれば国内の地震では約 1~10 c/s のものが大部分である。地震波の中で極端に高い振動数成分および極端に低い振動数成分を度外視すると、各地盤に対して卓越振動数があることが常時微動の測定結果から明らかにされている。すなわち卓越振動数は硬地盤では 10 c/s 付近、沖積層、ローム層などの一般的な地盤では約 4~3 c/s、そのほかの軟地盤では約 3~2 c/s、特に埋立地のような極端に層が薄く軟弱な地盤ではあまり明確でなく 2 c/s 以下と言われている。

このように地盤が軟弱になるに従い振動数は低くなり、卓越振動数も明確でなくなる傾向がある。

地盤の卓越振動数は常時微動のみならず、破壊的地震の場合でもこれに相当する波の加速度が最も大きく発生することが統計的にわかっており、卓越振動数は構造物の設計上、構造物の主要固有振動数とともに重要な要素である。しかし、ABB のように汎用性があり設置される地盤が不特定な機器では単一の卓越振動数でなく、ある幅を考慮しなければならない。

地震力の構造物に対する影響を表わすものに地震の加速度波形がしばしば用いられる。図 1 は地震の加速度波形に対する弾性質点系の加速度応答スペクトラムの一例（アメリカ・エルセントロ地震）を示したものである。これにより地震波の主要周期が明らかになるとともに、質点系の地震に対する応答特性も明りょうに示される。

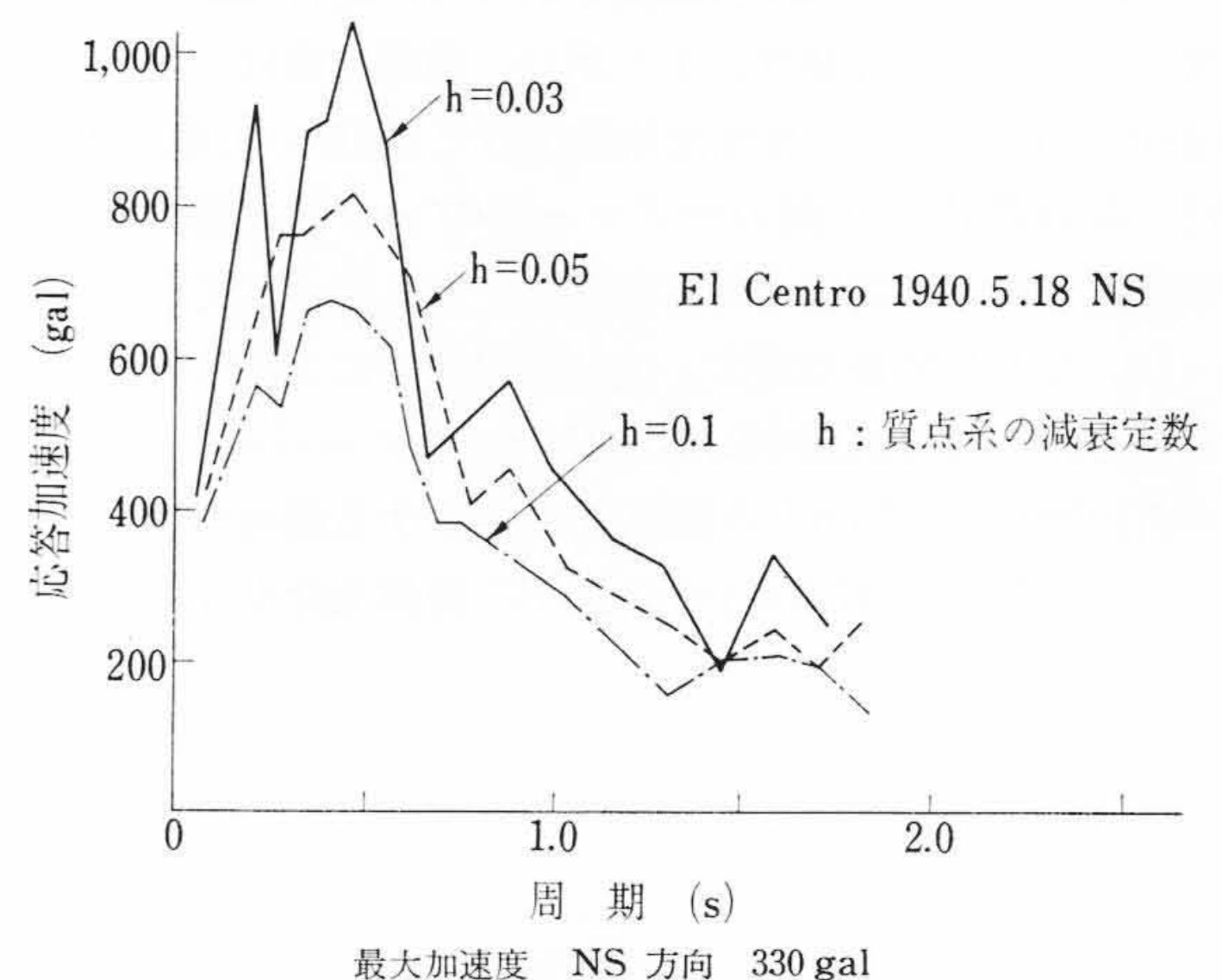


図 1 エルセントロ地震記録（1940 年 5 月 18 日 NS 成分）の加速度応答スペクトル

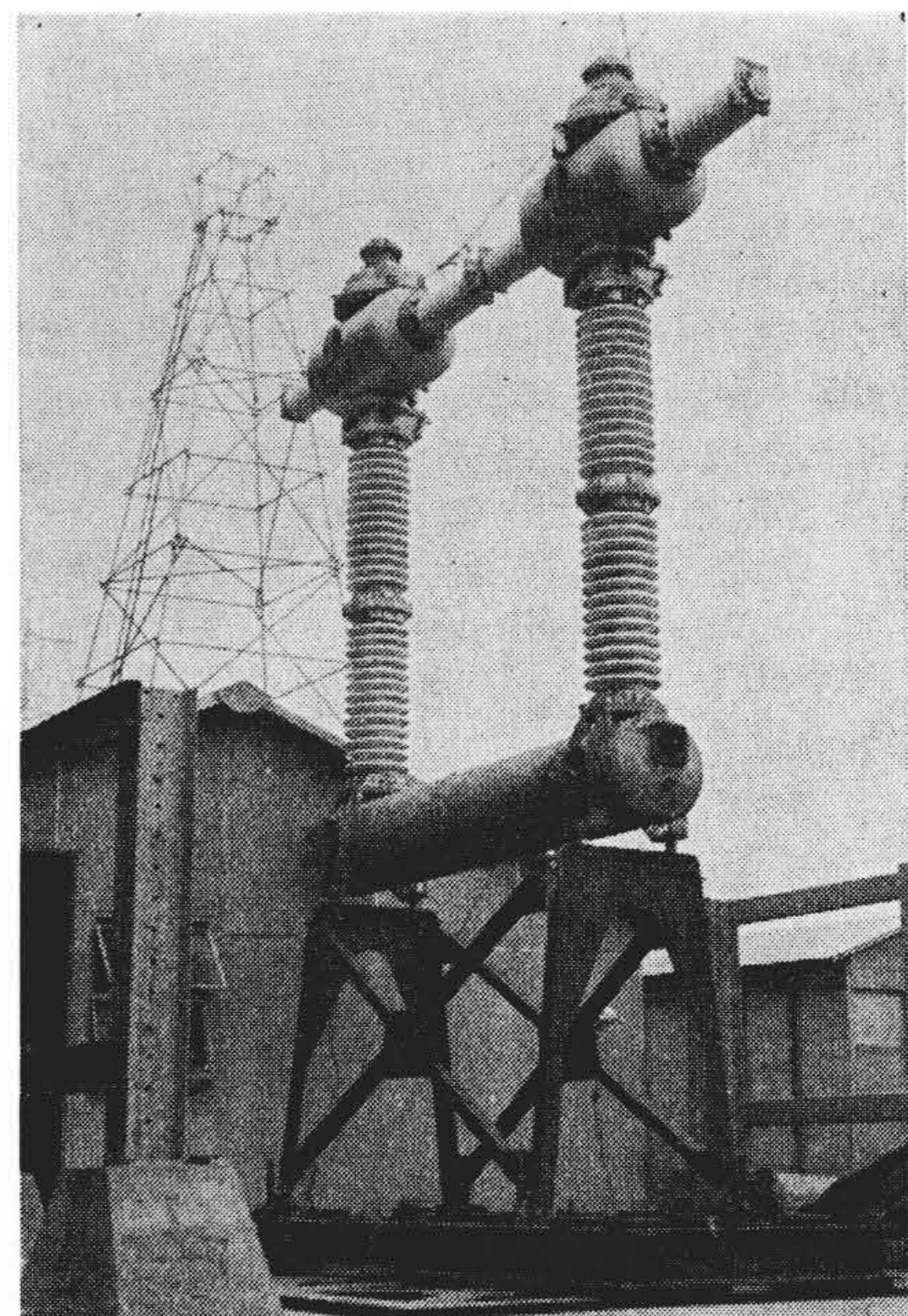


図 2 OPG-750A-PAR 168 kV ABB 振動試験状態

3. ABB の振動特性

OPG-750A-PAR 168 kV ABB を供試品として振動試験機により正弦波で定常加振して振動特性を求めた。図 2 に供試品を示す。

* 中部電力株式会社

** 日立製作所国分工場

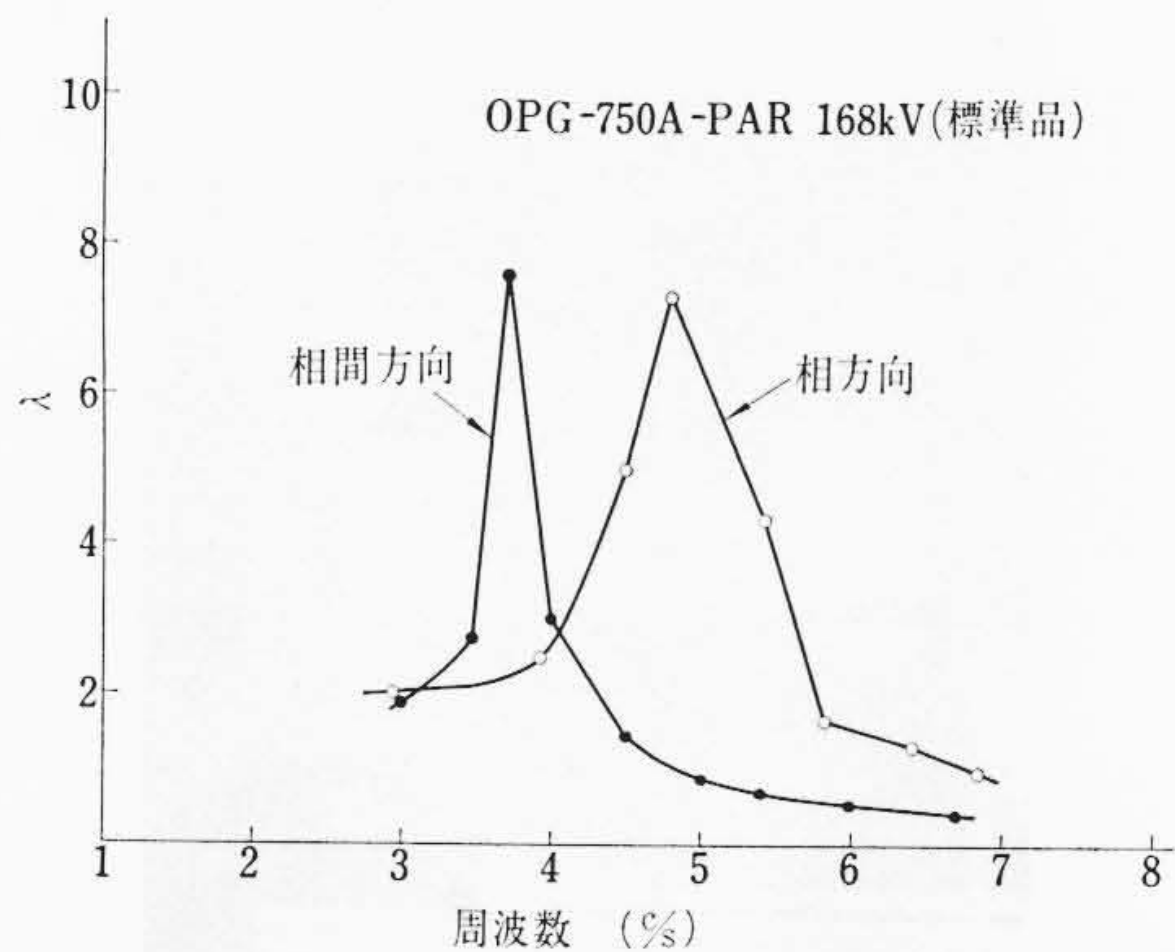


図3 OPG-750A-PAR 168 kV 空気遮断器の振動特性

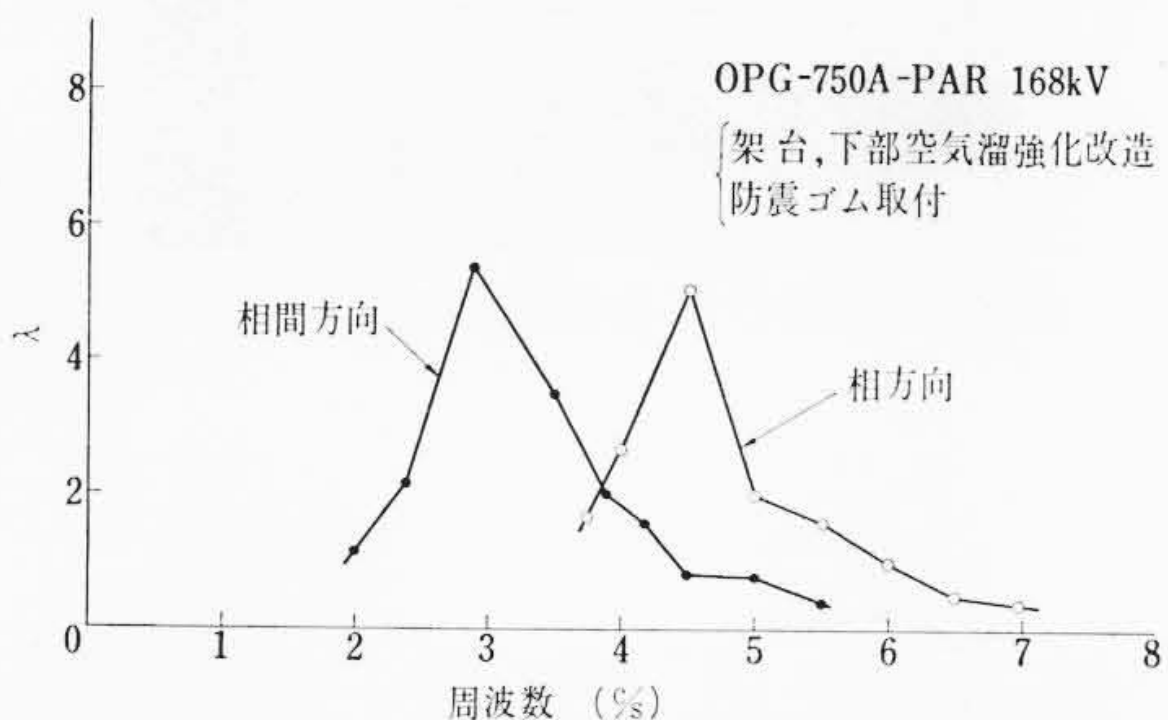


図4 OPG-750A-PAR 168 kV 空気遮断器の振動特性 (耐震改造後)

定常加振した場合支持がい子最下部に最大応力が現われることに着目して、振動特性を振動数対がい子応力で表わすことにした。図3はその振動特性曲線で、 λ は加振加速度を横力係数として静的荷重に換算した場合に発生するがい子応力(σ_s)と、測定されたがい子応力(σ_d)との比である。ABBを自由端に集中質量を有するはりと考えて、はりの横振動に置き換えると弾性限度内において λ は(1)式で表わされる。

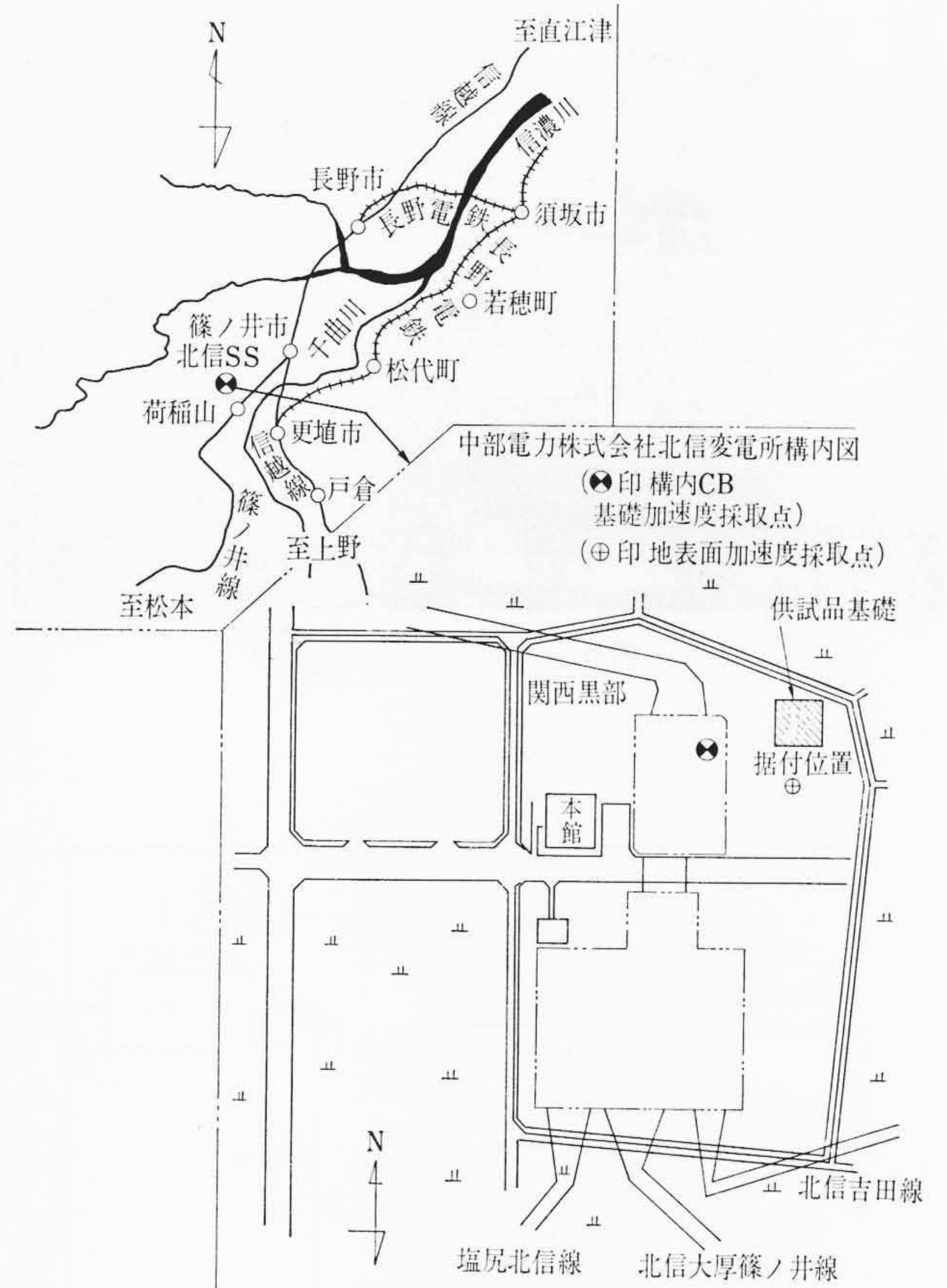
$$\lambda = \frac{x}{\delta_s} = \frac{1}{\sqrt{(1-\mu^2)^2 + 4\mu^2 h^2}} \propto \frac{\sigma_d}{\sigma_s} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 x : 振動時のたわみ量
 δ_s : 静的たわみ量
 μ : 加振振動数/固有振動数
 h : 減衰定数
 σ_d : 振動時の応力
 σ_s : 静的応力

図3より、ABBは固有振動数が低く地震波の振動数領域内にあることがわかる。共振時の λ は測定上で約8倍前後にまで達しているが、これは構造上の特殊性、すなわち長がい子柱の上端に遮断部がある逆立振子状の構造であること、比較的単純な構造で減衰能が少ないことなどの理由によるものと思われる。

これに対してABBは主要部材としてがい子を使用しているため、塑性領域がなく、地震波と共振した場合強度的に過酷な状態になると考えられる。

地震によるABBがい子の破壊を避けるためにはいくつかの方法が考えられる。地震の振動数とABBの固有振動数とを大幅に相違させることは一つの方法であり、ABBの固有振動数を地震の振動数に比べて極端に低くするかまたは高くすることが考えられる。しかし一般の地震波は振動数成分として前述のように1~10 c/s程度の幅をもっているため、地震波との共振を避けるには固有振動数が1 c/s以下(柔構造物)または20 c/s以上(剛構造物)とせねばならない。ABBの固有振動数がどの程度変えられるか検討を行なったが、1 c/s前後の変化を得るためにはかなりの改造が必要となり、完全な



(中部電力株式会社北信変電所)

図5 現地測定位置詳細図

剛構造物あるいは柔構造物とすることは経済性からみて実用的でないと考えられる。このように共振の可能性をまぬがれない構造物の耐震対策としては、構造物の減衰能を大きくする方法が考えられる。

振動応答は固有振動数および振動減衰能によって大きく影響されるが、共振時には減衰能によって定まり、減衰能が大きければ応答は小さくなる。減衰能は一般に摩擦力などの持つ等価粘性減衰定数として表わされる。ABBについてこれを求めると2~3%となり鉄筋コンクリート建物(約10%)などに比べて低い値となる。これは前述のように構造が比較的単純なこと、鋼材、がい子など減衰性の小さな部材で構成されているためと考えられる。

以上の考えに基づき各種の検討を行なったが、防振ゴムを振動減衰材として用いると、減衰定数を5~9%に向上させることができ、最も効果的であった。

図4は防震ゴムによりABBを架台から浮かせた場合の振動特性で、 λ は5倍前後となる(ただし、固有振動数については本体脚部および架台の剛性を高くするなどの改造を行なったため、約0.5~1 c/s高くなっている)。

4. 現地試験

振動試験で得た資料を基に改造した耐震形ABBを使用して、1965年8月以降、長野県松代町付近を震源域として続発した松代群発地震の実地震波により動的な現象を測定した。

図5に示すように震源域より西方約10 kmの地点にある中部電力株式会社北信変電所構内に、図6のように機器を設置し、1966年7月16日から約2ヶ月半にわたって測定を行なった。

供試機器はABBのほか、断路器、避雷器なども同時に測定されたが、本文ではABBの測定結果について述べる。

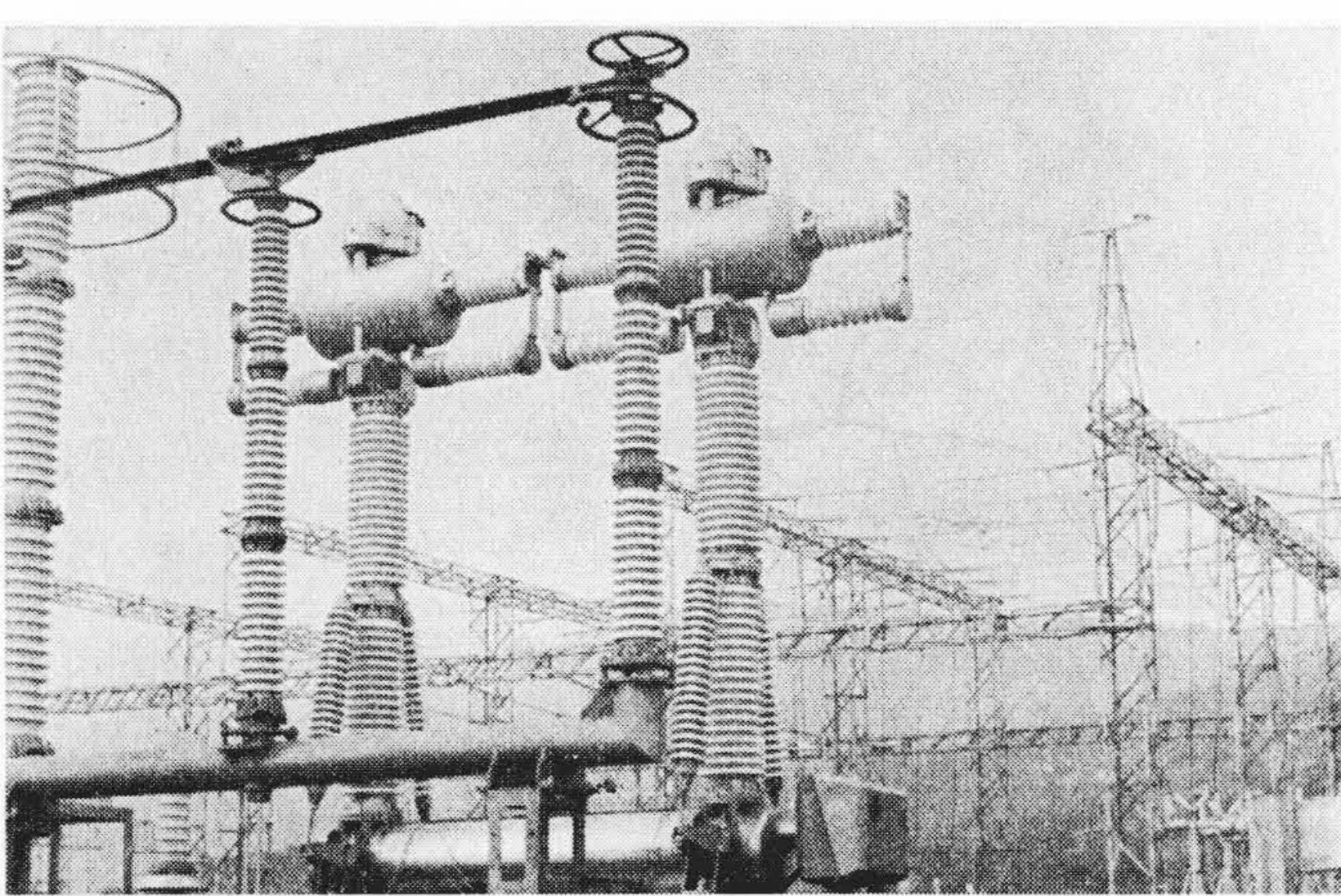


図 6 供試機器設置状態

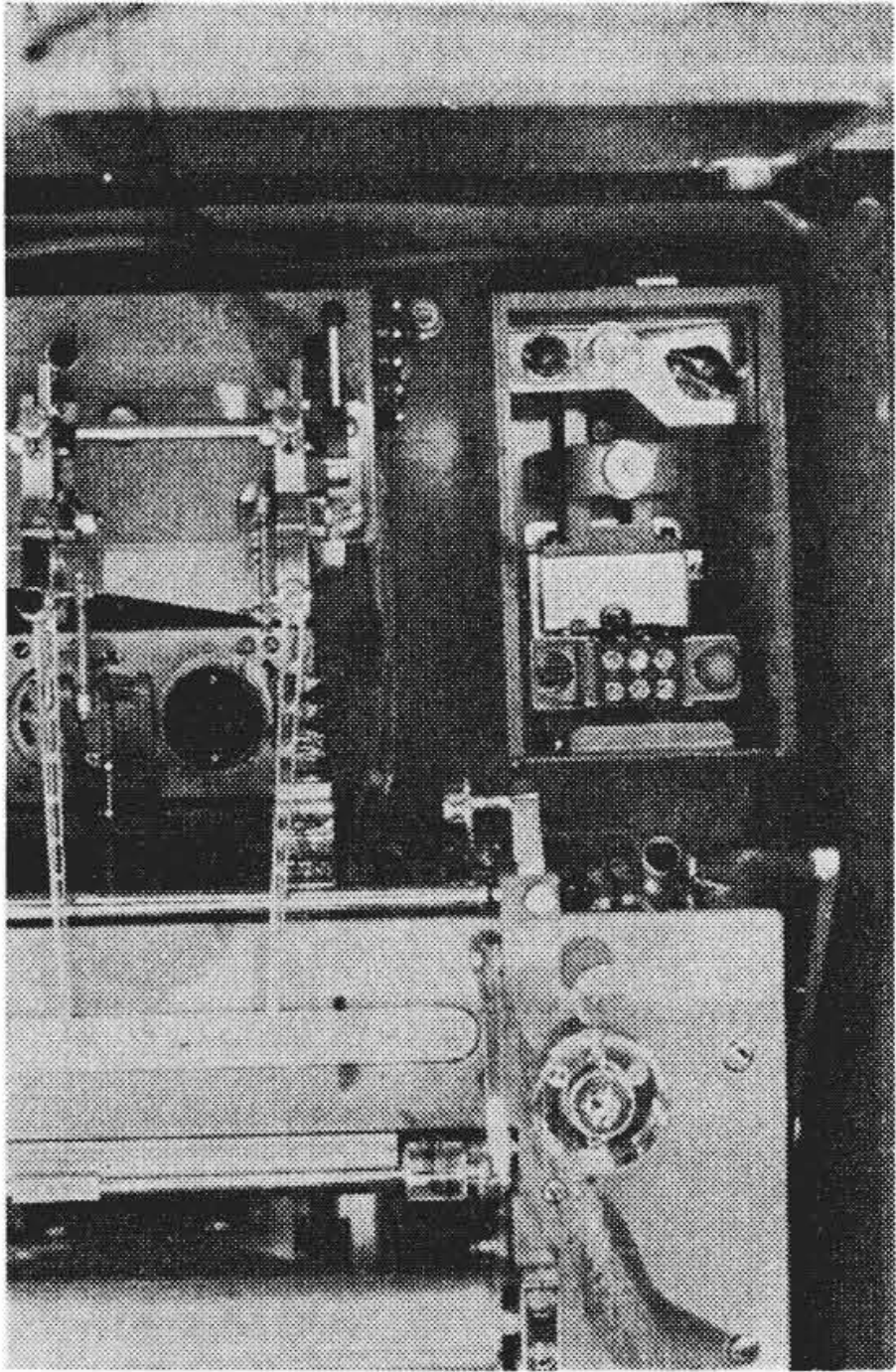


図 8 SMAC-B 強震計電気式スタータ

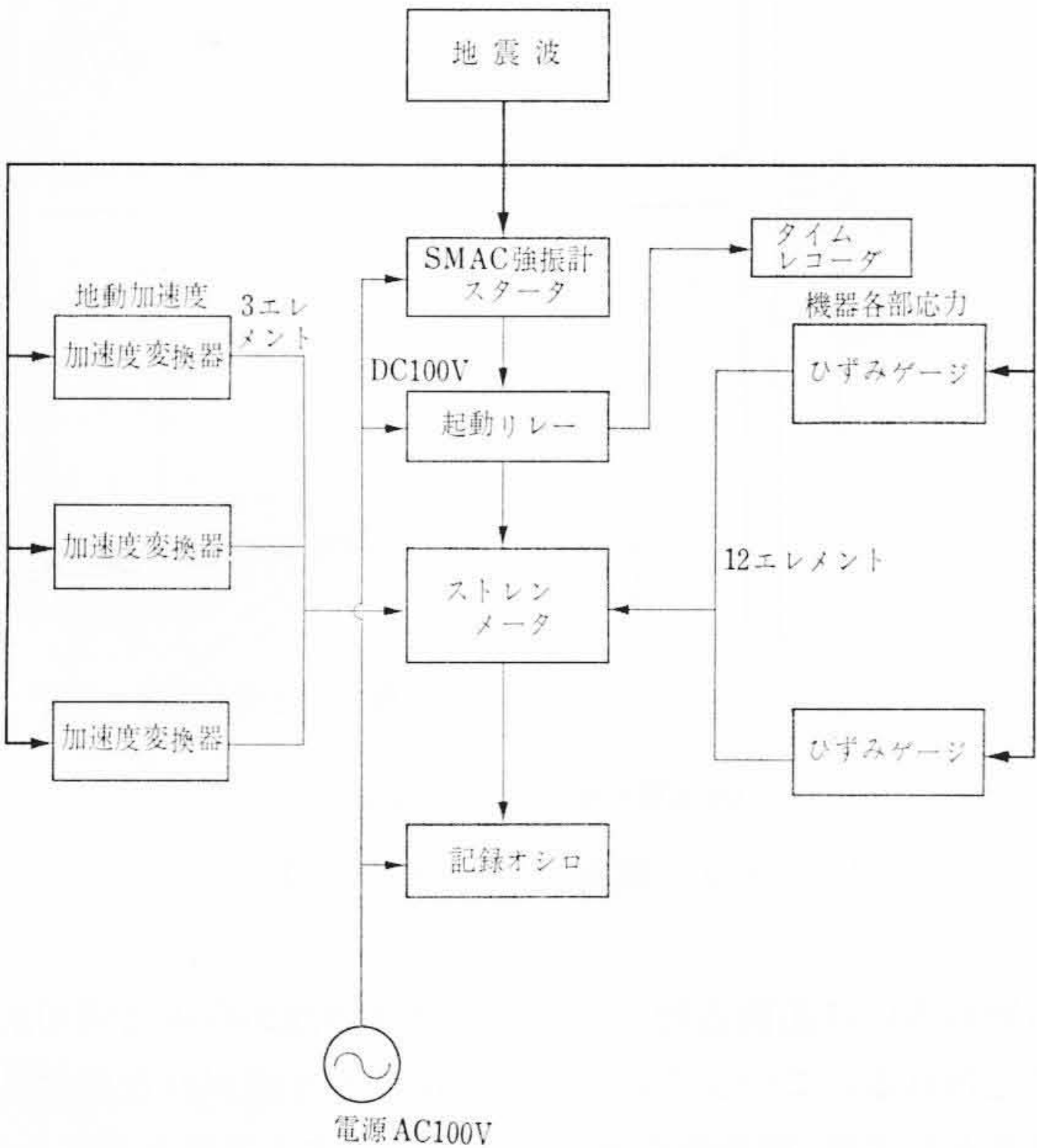


図 7 自動測定装置ブロック線図

供試 ABB は OPG-750A-PAR 168 kV で、標準形よりもがい子柱の長い耐塩害形で行なった。

地震波の検出、記録、供試機器のがい子応力の記録は、図 7 に示すように自動測定で行なわれた。すなわち SMAC-B 形強震計の電気式スタータ(図 8 参照)を使用し上下動約 5~10 gal の加速度の震動でスタートするように調整した。スタータの信号で起動リレーを動作させ電磁オシログラフを起動し、同時に地震発生時間記録用タイムレコーダに信号を出す。起動から 10 秒後、起動リレーの時限装置によって電磁オシログラフはリセットするが、なお地震が続いているときは再びスタータが働いてこの動作を繰り返す。

地動加速度の検出はひずみゲージ式加速度変換器、がい子応力はがい子に接着させたひずみゲージで行なわれ、これらはすべて電磁オシログラフに記録された。ABB の応力測定個所の詳細は表 1 および図 9 に示すとおりである。

図 10, 11 に測定オシログラムの一例を示す。図 10 は今回の測定によって得られた最大の地動加速度波形と、ABB のがい子応力波である。がい子応力波は地震波が複雑であるにもかかわらず、単弦振動を行なって自己の固有振動数に対し大きく応答している。

このように記録したオシログラムについて加速度波形、がい子応力波形のおおのの最大値を求め、地震波の様相、ABB の動的な特性について検討した。

図 12 は供試基礎で測定した北信変電所における到達地震の方向

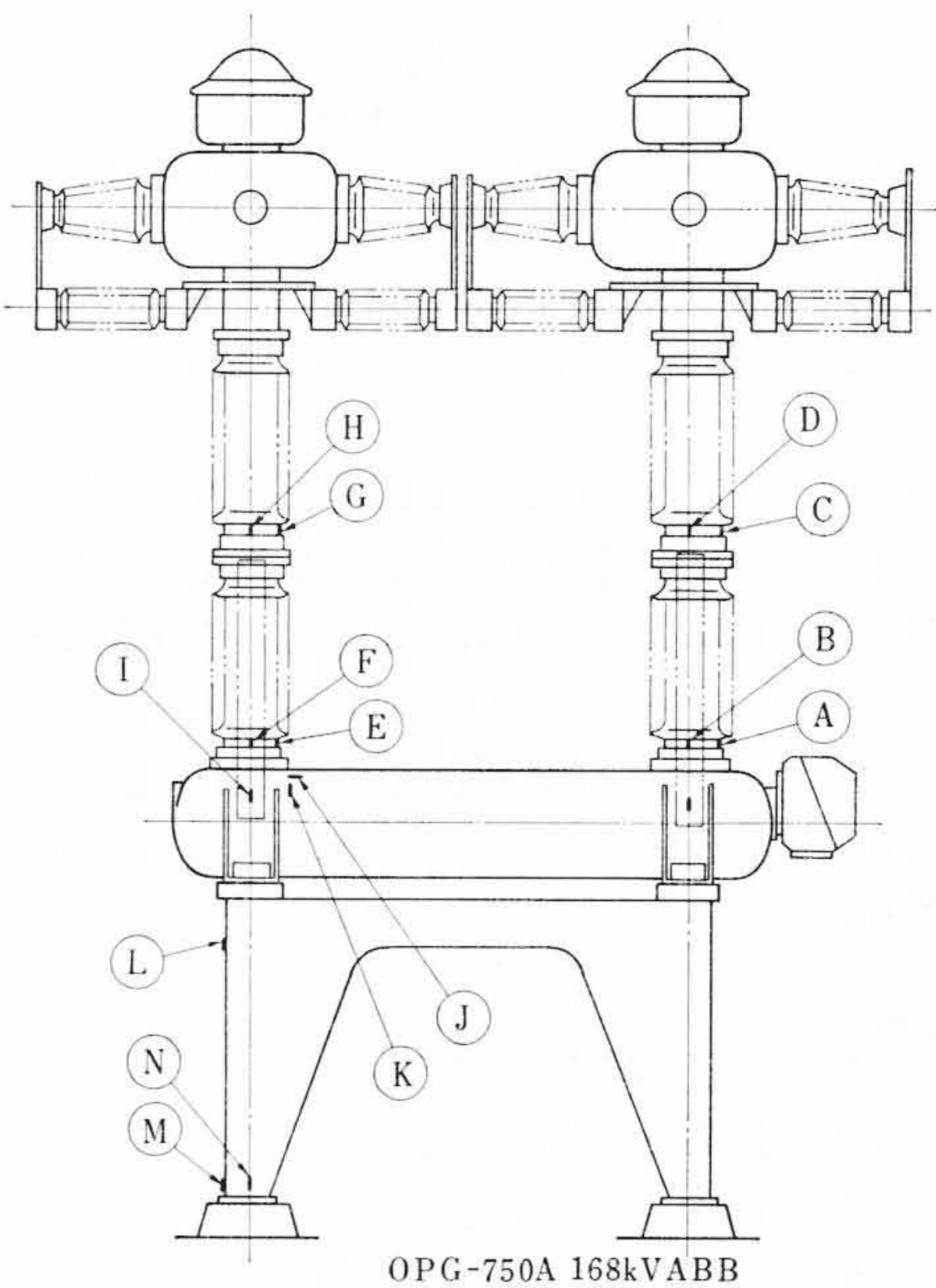


図 9 ABB 応力測定個所

表 1 ABB 応力測定個所

機 器	記 号	測 定 個 所 の 詳 細	方 向
A B B	A	T ₁ が い 管 下 段 根 本	N-S
	B	T ₁ が い 管 下 段 根 本	E-W
	C	T ₁ が い 管 上 段 根 本	N-S
	D	T ₁ が い 管 上 段 根 本	E-W
	E	T ₂ が い 管 下 段 根 本	N-S
	F	T ₂ が い 管 下 段 根 本	E-W
	G	T ₂ が い 管 上 段 根 本	N-S
	H	T ₂ が い 管 上 段 根 本	E-W
	I	ス テ ー が い 子	
	J	下 タ ン ク 長 手 軸 方 向	N-S
	K	下 タ ン ク 長 手 軸 直 角 方 向	E-W
	L	架 台 脚 上	N-S
	M	架 台 脚 上	E-W
	N	架 台 脚 下	E-W

特性である。南北(NS)成分、東西(EW)成分はほぼ同じであることがわかる。

図13は供試基礎加速度とABBがい子応力との関係で、測定点はそれぞれの地震波の加速度の最大値と、その地震に対するがい子応力

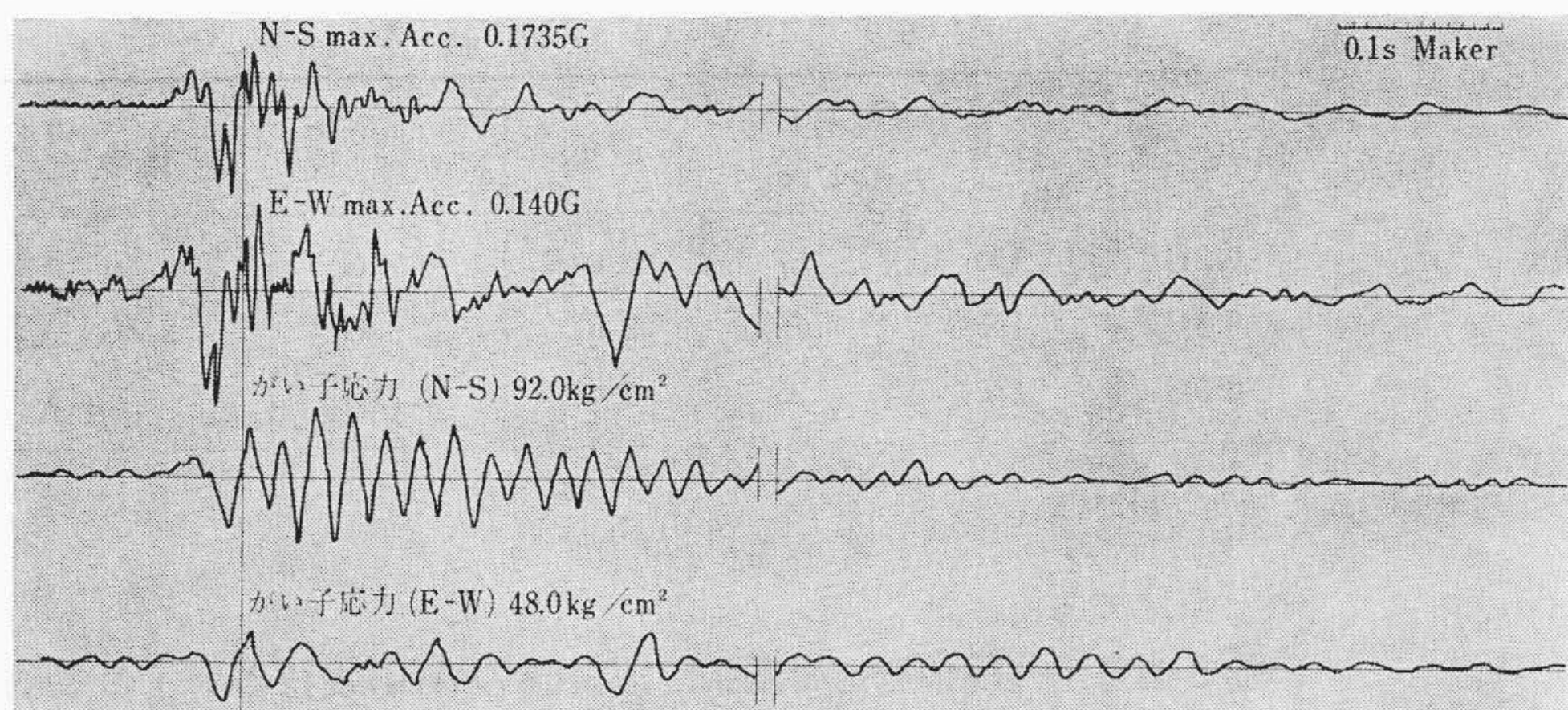


図10 測定オシログラム(1966年8月3日3時48分)M=5.0 松代V, 長野IV

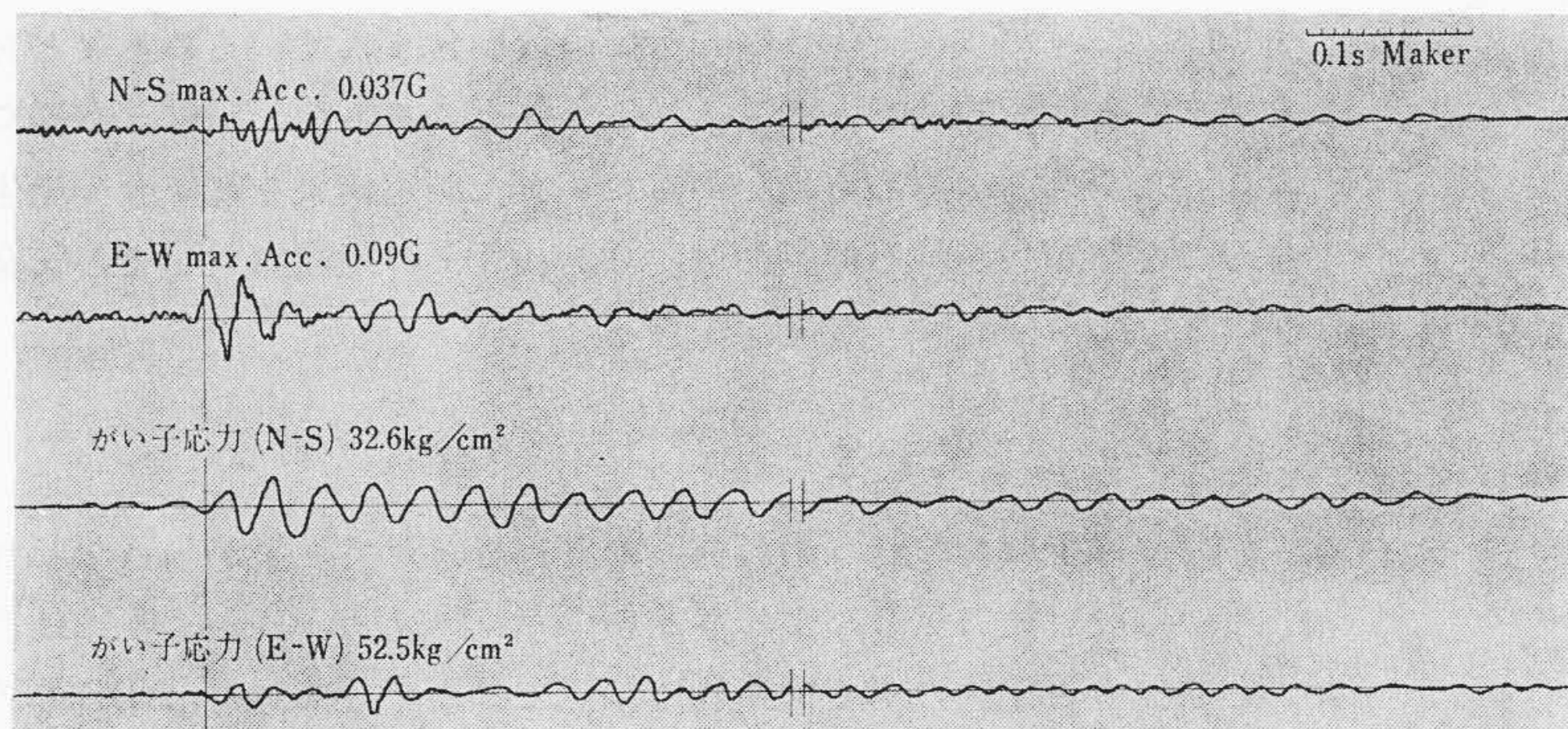


図11 測定オシログラム(1966年8月20日18時33分) M=5.0 長野, 松代IV

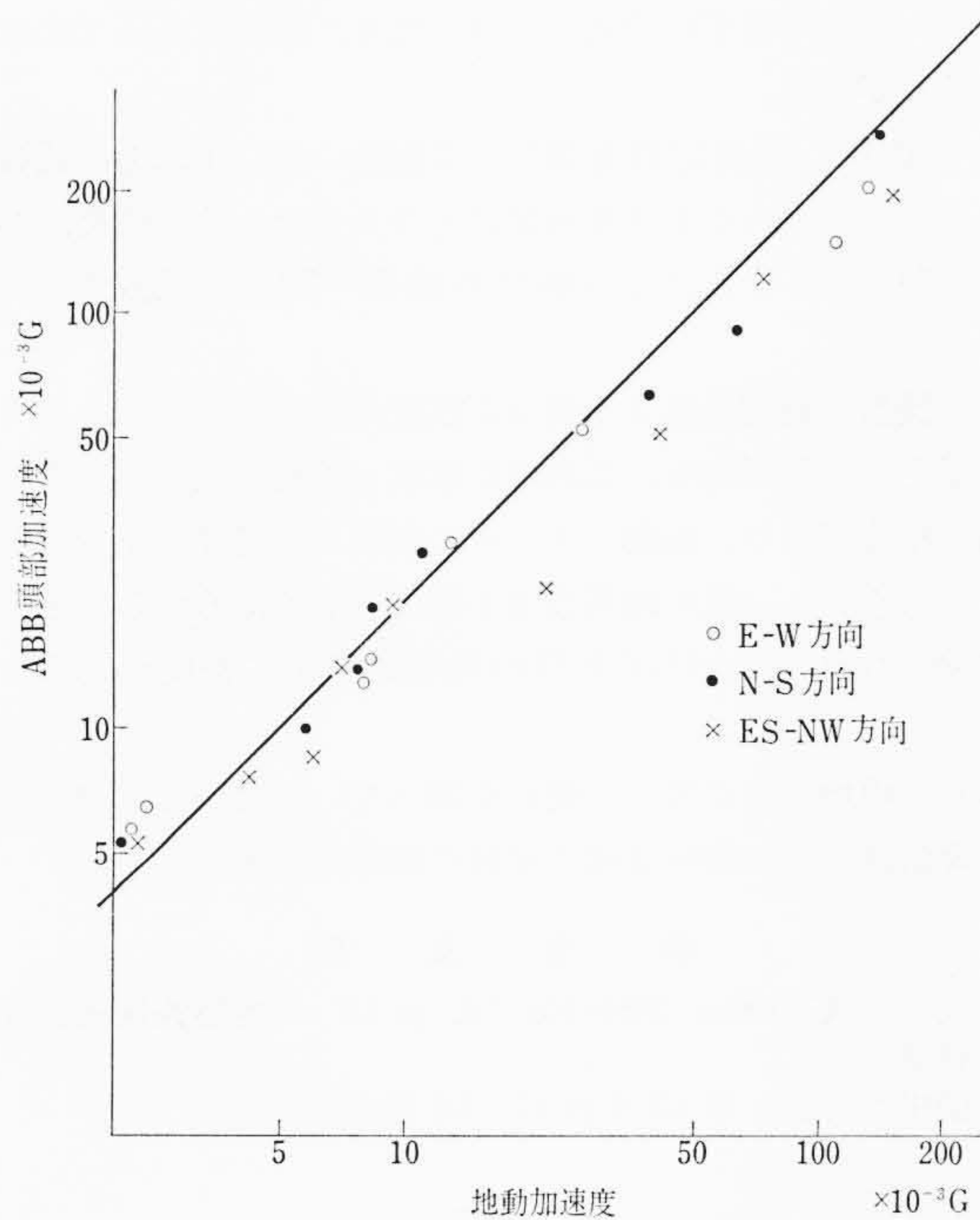
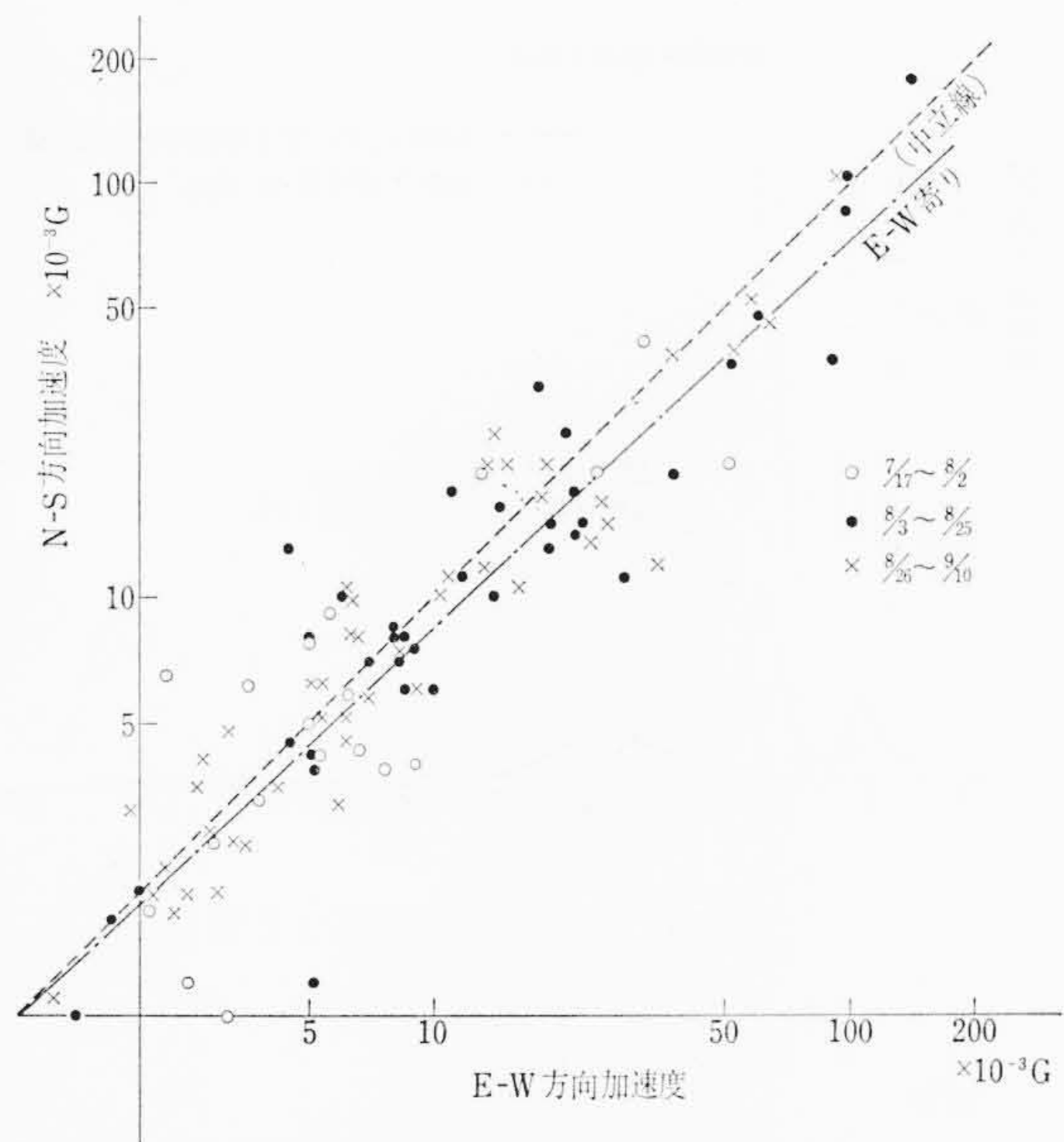


図15 加速度応答倍数

の最大値である。図13の鎖線で示す静的応力計算線はそれぞれの地震波の加速度の最大値とその地震によるがい子応力の最大値の関係である。図13の鎖線で示す静的応力計算線は、それぞれの地震波の加速度の最大値を横力係数として静的計算をしたものである(ただし、耐塩害用であるため相間方向(EW方向)にはステーがい子が付いているが、これを無視したので見かけ上高い値になっている)。

図14はABB頭部加速度とがい子応力の関係であり、鎖線は静的応力計算線である。

図15は地動加速度とABB頭部加速度との比(応答倍数)であり、



(供試基礎で測定した加速度波で示す)

図12 北信変電所到達地震の性質

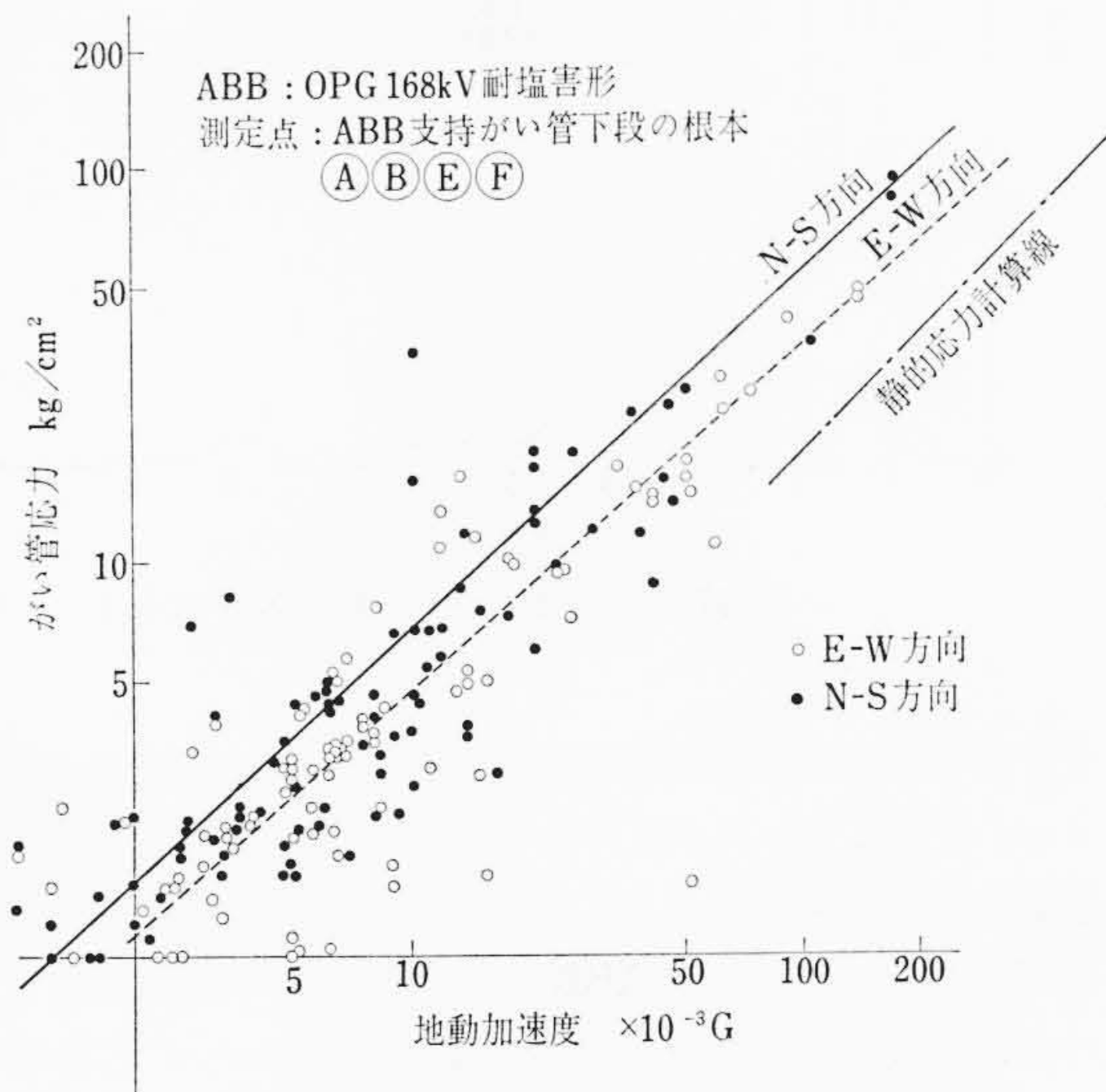


図13 地動加速度とがい子応力の関係

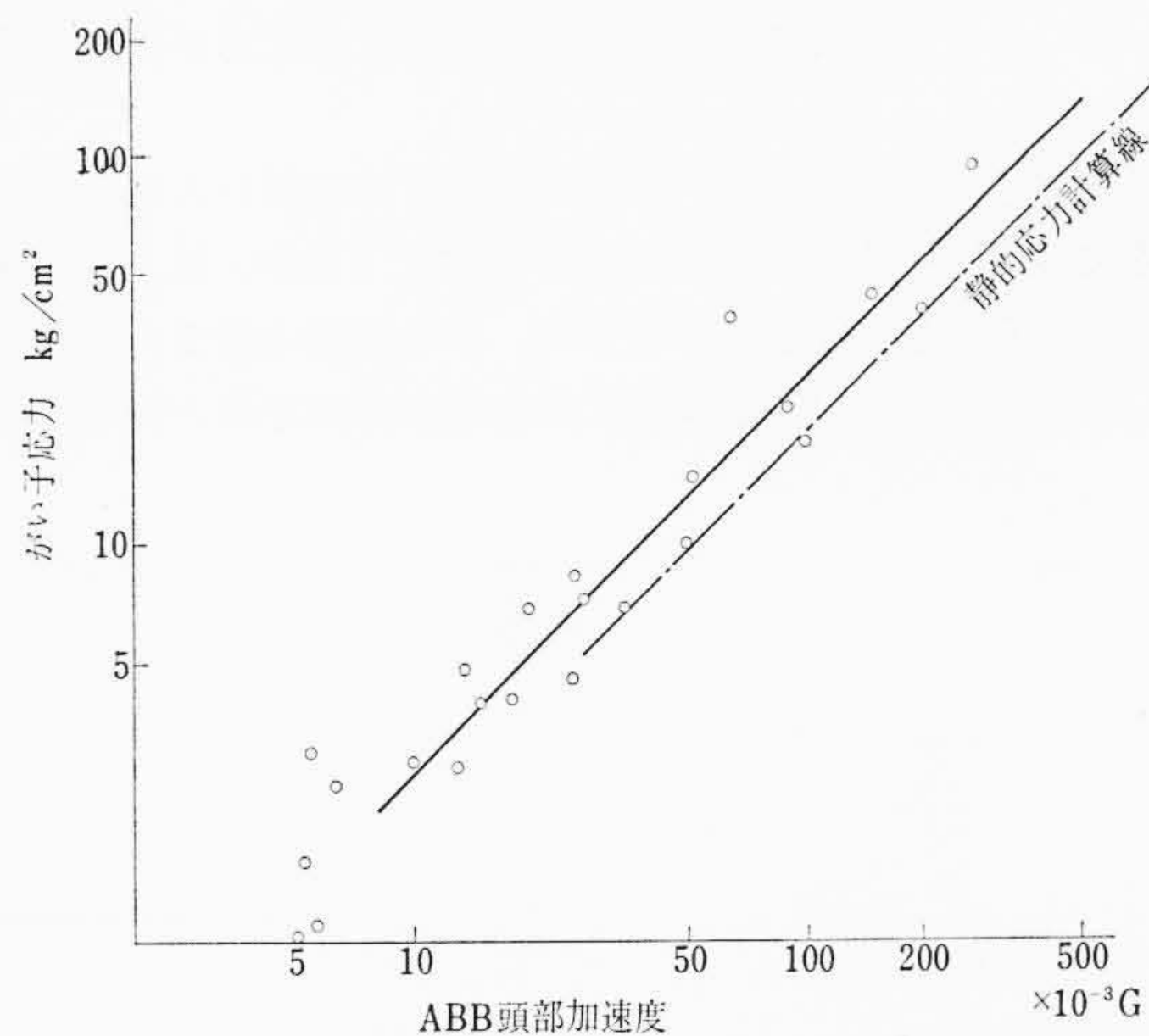


図14 ABB頭部加速度とがい子応力の関係

約2倍である。

次に測定されたオシログラムの中から代表的な波形についてフーリエ解析による周波数分析を行なった。その結果を図16, 17に示

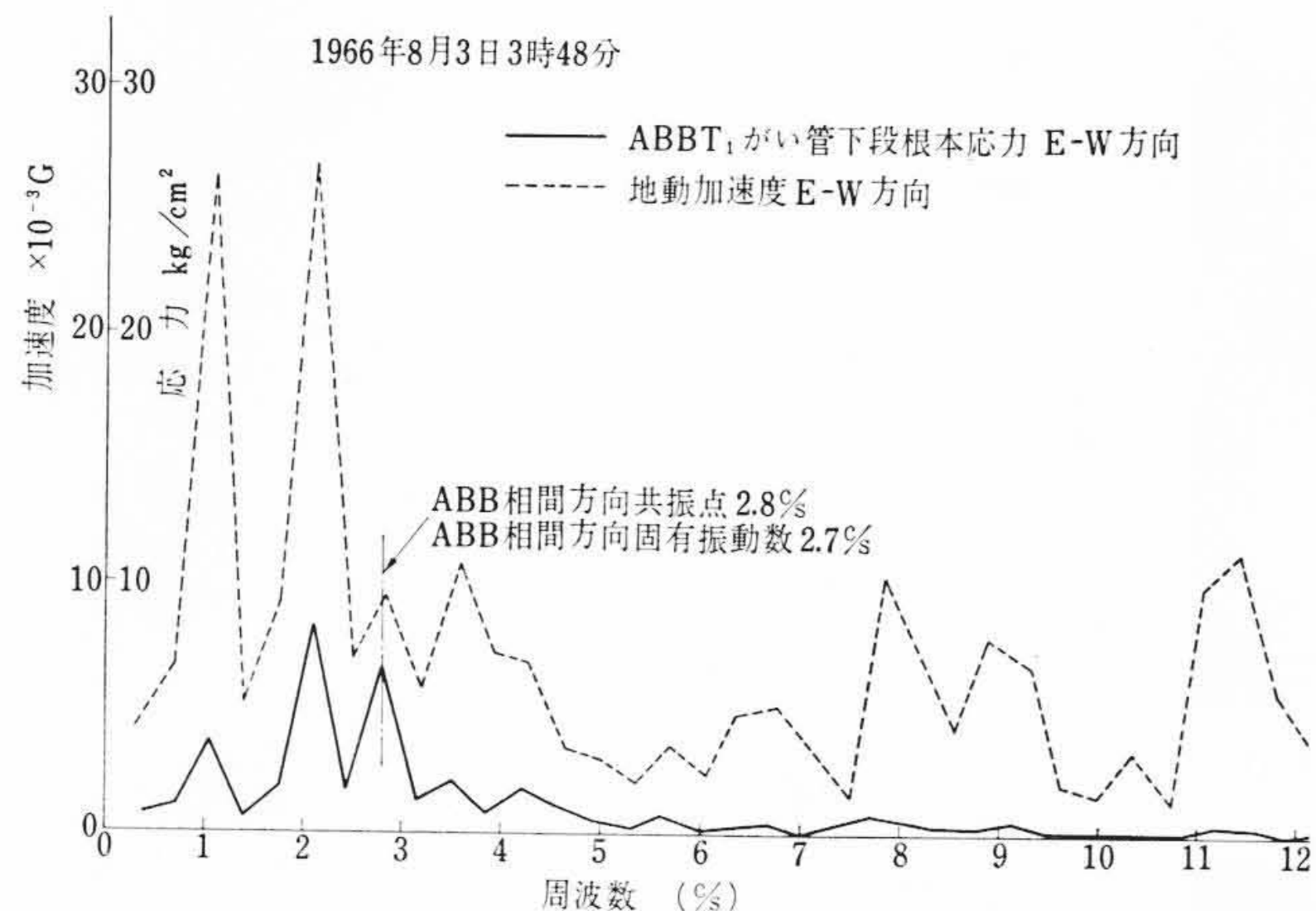


図 16 周波数分析結果 (E W 成分)

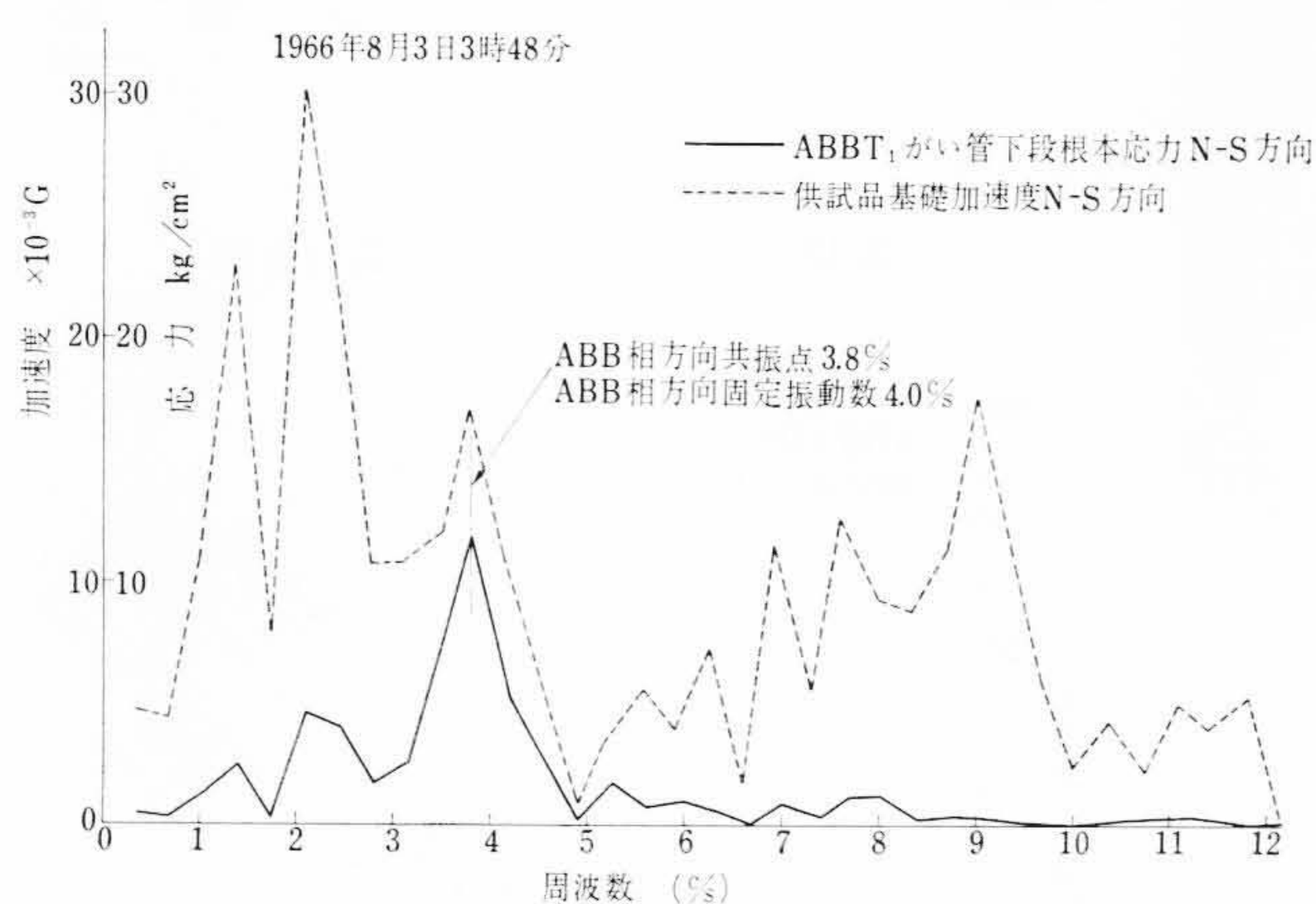


図 17 周波数分析結果 (N S 成分)

す。破線は地震の加速度波の周波数分析で地震波の主要成分は 1～4 c/s 付近にピークが現われており、北信変電所付近の土地の卓越振動数成分と考えられる。実線はその地震で発生したがい子応力波の周波数分析であるが ABB の固有振動数の周波数付近では地震波の加速度成分がピーク値でないにもかかわらず応力の高まりがある。すなわち、外部から加振される波がいかなる複合波であっても、その波形内に構造物の固有振動数に近い優勢な周波数成分があれば、それによって共振に近い状態になり大きな応力が発生することがわかる。

今回の測定では地動加速度 0.17G 以下の地震が大部分であったが、図 13 を用いて外挿(がいそう)法により 0.3G 以上の加速度に対するがい子応力の推定を行なった。この結果は表 2 に示すとおりである。同表中の動的倍数は最大発生応力の推定値と静的応力計算

表 2 大地震時の推定

地加 速 度	地震による がい子応力 の最大値 (kg/cm ²)	* 静的応力 (kg/cm ²)	動的倍数	静的等価 加 速 度	がい子の 耐 震 強 度
0.3G	150	57	2.63	0.79G	2.2G
0.4G	190	76	2.5	1.0 G	
0.5G	230	95	2.42	1.21G	

* 基礎加速度に対し静的に考えたがい子応力

値との比である。

約 2 ヶ月半の現地測定の結果、地震時の ABB 支持がい子の動的な応力の様相を知ることができた。記録された地震は 100 回以上で、この中には強震級の地震も数回あった。さらに卓越振動数が 1～4 c/s でこのうちに ABB の固有振動数が含まれていることなどを考慮すると比較的過酷と考えられる条件下であったが、供試機器にはまったく異常は認められなかった。また測定結果を基に今後発生することが予想される地動加速度 0.3～0.5G の地震に対する安全性についても検討することができる。

5. 結 言

(1) 以上要約すれば耐震強度の計算法として従来から行なわれている設計横力係数による静的計算だけでは ABB のように地震と共振の可能性のある構造物については不十分であり、ABB の各種振動波形に対する動的応答を求めて耐震強度を検討しなければならない。

(2) ABB は構造が逆立振子状でがい子を主要構成材としているため、共振時にがい子応力が高くなり、場合によっては破壊するおそれがある。

(3) ABB の減衰定数を増して共振時のがい子応力の低減を図るため、防震ゴムを本体架台間にそう入した。その結果、がい子応力を防震ゴムを入れない場合の約 60～70% に低減することができた。

(4) 機器の動的倍数 λ の値は正弦波共振状態と実際の波での測定結果とでは差がある。これは正弦波と不規則波形による場合の応答の相違であり、振動エネルギーの蓄積が持続する正弦波共振のほうが大きい。一般に地震波は不規則波形であるから正弦波共振の試験を行なっておけば実際の地震に対して裕度があると考えられる。

終わりに現地試験に関しご便宜を図っていただいた、中部電力株式会社北信変電所の関係各位に深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 武藤：Column 1964-No. 10, p. 18 八幡製鉄株式会社技術雑誌
- (2) 柴田：機誌 昭 42-4 p. 47～56 日本機械学会