

渥美沖人工地震の作手における観測と周波数分析

— 人工地震波の周波数分析 (I) —

熊谷貞治⁽¹⁾・鈴木宏芳⁽²⁾・八十島久⁽³⁾・高橋末雄⁽²⁾

目 次

概 要 -----	1	3 分析結果 -----	3
まえがき -----	1	3.1 P波平均速度 -----	3
1 観測の概要 -----	2	3.2 周波数分析 -----	4
2 観測点の地質概要 -----	2	4 結果と考察 -----	6

概 要

この報告は、2点で観測された同じ地震波を周波数分析し、この結果から2地点間の地質構造・岩質を知ることの可能性について検討した第1報である。

本報告に使用した観測資料は、1966年6月2～3日に爆破地震動研究グループによって行なわれた渥美半島沖爆破のものである。

分析結果は、周波数特性の全体的傾向は2点とも同じようであるが、細部についてはかなり異なる場合が認められる。

特にエネルギーの大きさの順位で2番目のピークに着目するならば、爆破点の位置によりピークの出る周波数に変動が認められる。

今後はこの変動が持つ意味について、すでに地質構造・岩質の知られている他の地域の資料を分析し対比する考えである。

まえがき

この研究は、同一の地震波動を離れた異なった地点で観測し周波数分析を行なえば2地点間の構造・岩質あるいはその状態を知る手段とすることが可能かどうか知ることを最終の目的とするものである。

このような研究には地点間の距離のほか、各々の測器の種類・地形精度などから生ずる問題があるので、同種、同性能の測器および記録装置で観測している爆破地震動研究グループの観測資料を分析することが、適当であると考えた。

この報告には爆破地震動研究グループが、ほぼ東経137度～138度に沿って本州を縦断する測線に

* T. Kumagai, H. Suzuki, H. Yasoshima and M. Takahashi: Observation and Frequency Analysis of ATSUMI—OKI Explosion Earthquake at TSUKUDE, AICHI Prefecture; Frequency Analysis of Explosion Earthquake (Report I)

- (1) 国立防災科学技術センター第2研究部地表変動防災研究室 } (爆破地震動研究グループTSUKUDE観測班)
 (2) 同 地震防災研究室
 (3) 国立防災科学技術センター第3研究部計測研究室

おける構造を知るために1966年6月2日～3日に愛知県渥美半島沖で行なった爆破地震動観測に当所グループもTSUKUDE(作手)観測点を分担したので、この観測結果および隣接観測点で通産省地質調査所が観測した結果とを分析したので、その結果について報告する。

1 観測の概要

全体の観測点は図-1のようにほぼ東経 $137^{\circ}\sim 138^{\circ}$ に沿って分布し、当所の観測点はTSUKUDE(愛知県南設楽郡作手村杉平 協和小学校、北緯 $34^{\circ}56'22.6''$ 、東経 $137^{\circ}27'33.4''$ 、標高340 m)である。

爆破船は最北端の爆破点より南に146 kmほどの間を、約7時間で航行し、その間23回の中水爆破を試み、うち20回(図-1の×印)が爆破に成功した。

使用した火薬量は、SHOT-1～12(不発を含む)が450 kg、SHOT-13以降は600 kgである。

TSUKUDEにおける換振器(上下動成分、固有周期:4%)の設置状況は、一つは風化はしているが岩体を成している花崗岩上(A点)に、他の一つは基部が岩盤に達していると思われるコンクリート台上(B点)に設置した(図-2)。

付近の状況は、A点については2～3 m幅を幅3 m程度の地方道(未舗装の砂利道で凹凸あまりなし)が走り、道路にはほぼ平行して横川の支流巴川が、比較的ゆるやかに流れている。

観測日の数日前に約80 mmの日雨量が高里(TSUKUDE観測点北西方約4.5 km)で観測され巴川の流量増加が認められたが、地震観測に影響を与えたと思われる記象は見当らなかった。

測器の構成を図-3に示す。増幅器の観測時における利得は次のようであった。

TSUKUDE :

2チャンネル(A点):2日20時30分～3日03時15分は80.5 db, 3日03時15分～05時は99 db,

3チャンネル(B点):2日20時30分～3日03時15分は99 db, 3日03時15分～05時は80.5 dbである。

地質調査所の観測概要

観測点はISHINOMAKI(愛知県豊橋市嵩山町石巻、北緯 $34^{\circ}47'38.1''$ 、東経 $137^{\circ}29'15.7''$ 、標高130 m)である。

換振器(上下動成分、固有周期:1%)は鍾乳洞の中(入口から25 m奥)に設置され、観測時における増幅器の利得は、SHOT-1～8は90 db, SHOT-9は100 db, SHOT-10は90 db, SHOT-11以降は100 dbであった。

ISHINOMAKIでは上記のほか換振器(上下動成分、固有周期:4%)を1台設置したが、この観測値は $\frac{S}{N}$ などに問題があったので分析に使用していない。

TSUKUDE, ISHINOMAKI間の距離は国土地理院発行1:500,000 地方図(中部近畿)によると17.1 kmである。

なほ、震源距離もこの地形図より求めた。

2 観測点付近の地質概要

TSUKUDEとISHINOMAKIの観測点の間には、中央構造線が存在し、これにはほぼ平行しあるいは交わる断層もいくつか観察されている。中央構造線は、両観測点を結ぶ線上では、第四紀層におおわれて直接観察されないが、豊川の流路付近をほぼNE-SW方向に走っているものと推定されている。

中央構造線をはさんで、その両側の地質には大きな相違がある。すなわち、その北側は領家変成帯に属し、花崗岩類が、小規模な片岩類をともなって、広大な面積にわたって分布する。

この花崗岩類は、地表付近では風化による変質が進んでいる。その南側は結晶片岩よりなる三波川変成帯が分布し、ISHINOMAKI 観測点付近の地質は、50万分の1京都図幅によると、三波川変成帯のさらに南方に分布する古生層となっている。

3 分析結果

3.1 P波平均速度

TSUKUDEにおける観測値を表-1に示す。

表-1 渥美半島沖人工地震の観測表
観測点：TSUKUDE，観測日：1966.6.2~3.

Shot No	震源距離	P 波	発震時	P波走時	P波平均伝搬速度
1	72.5 km	^{2nd} 21 13 22.16 ^s	08.36 ^s	13.80 ^s	5.25 km/s
2	80.0	38 33.57	17.66	15.91	5.03
3	84.8	53 27.78	11.78	16.00	5.30
4	90.5	22 08 33.26	16.19	17.07	5.30
5	95.4	23 31.92	13.23	18.69	5.10
6	105.5	38 29.83	10.36	19.47	5.42
7*	—	—	—	—	—
8	110.3	23 08 33.96	13.38	20.50	5.38
9	120.5	38 37.99	16.28	21.71	5.67
10	125.6	53 32.12	09.88	22.24	5.65
11	131.0	^{3rd} 00 07 38.12	15.21	22.91	5.72
12	136.4	23 41.67	18.23	23.44	5.82
13	143.2	43 39.52	15.05	24.47	5.85
14	150.3	01 03 37.74	12.53	25.21	5.96
15	157.2	23 40.17	13.65	26.52	5.93
16*	—	—	—	—	—
17	170.8	02 03 39.21	11.07	28.14	6.07
18**	—	23 40.40	—	—	—
19*	—	—	—	—	—
20**	—	03 03 43.6	—	—	—
21**	—	23 53.15	—	—	—
22**	—	43 43.79	—	—	—
23**	—	04 03 41.60	—	—	—

注． *印は不発． **印は周波数分析を行なわなかったため、P波の立上り時のほかは計算しなかった。

平均P波速度を図-4によってみると、走時の連続でない地域がTSUKUDEより南80km, 95kmの距離に認められる。

他の観測点の観測値によっても検討したが、同様な傾向が認められ、発破時刻は正しいであろうから当該地域付近に速度の遅い層の存在が推定される。ただしその付近の地質構造についての検討は行っていない。

3.2 周波数分析

TOSBAG-3400を使用し、次の手順によって作業をした(図-5)。

1) 磁気テープに収録した記録(アナログ)をマルチプレクサーと $\frac{1}{60}$ 変換器を通してデジタル化し、計算機の磁気テープに記録する。 $\frac{1}{60}$ 変換の際抽出間隔は $\frac{1}{60}$ 秒とした。

デジタル・データは純2進10けたである。なほ、原記録は多くのノイズを含んでいるので、モニターのペン書き記録により目視でわかる範囲のノイズは修正した。その方法はパルスのノイズは除去し、そこを補間法によったのである。

また、 $\frac{1}{60}$ 変換したデータから地震波記録のみを選別して分析データとした。

2) コレログラムとパワースペクトルを算出した。

以上によって得られた結果を図-6~8に示す。

図の縦座標(B)は記録波形のエネルギーの相対的な比であり、横座標(T)は周波数を示す。

なほ今回の爆破は20回とも地震動観測に成功してはいるが、目視記録を検討して $\frac{1}{60}$ 比の悪いものを除いてSHOT-1~17(SHOT-7, 16は不発)の15例について分析を行なった。

両観測点の比較

ISHINOMAKI, TSUKUDEのエネルギーの大きさが図-6によれば、SHOT-1~6(SHOT-3はISHINOMAKIのS/N比が悪く分析せず)はTSUKUDEが上回り、SHOT-8以降はISHINOMAKIが上回るかあるいは同程度であるのはすべて増幅器の利得の差による。

表-2 TSUKUDE, ISHINOMAKIの卓越周波数¹⁾

shot No.	TSUKUDE		ISHINOMAKI	
	第1位	第2位	第1位	第2位
1	8.0 % _S	10.5 % _S	6.2 % _S	10.0 % _S
2	8.0	10.5	10.0	8.0
3	—	— 2)	—	— 2)
4	9.0	11.0	9.0	11.0
5	7.5	6.6	7.0	10.0
6	7.2	8.6	7.8	7.5
7	—	—	—	—
8	5.6	7.7	8.4	5.2
9	7.5	6.3	8.0	5.8
10	8.3	7.2	5.9	7.2
11	10.0	7.7	6.2	8.2

注1) P波立上りより $\frac{1000}{60}$ secの分析による

注2) ISHINOMAKIの $\frac{1}{60}$ 比が悪いため分析せず

注3) shot No.12以降の分析はISHINOMAKIの信号が弱いのではない

注4) SHOT No.7は不発

両者の周波数によるエネルギー分布の総体的傾向は、ほぼ同じようであるが、各々のピーク(極大値)の出方は必ずしも一致しない。その原因は各観測点の雑微動によるものか、両観測点間の地質構造・岩質などの影響であるか、今のところ考察はすすんでいない。

表-2に各SHOTごとにエネルギーの大きい順の1番目と2番目のピークの周波数を示す。

5秒間ごとの分析値

P波の立上りから時間とともに周波数特性が変化するか否か、また変化がみとめられた場合には、発破点と観測点間の地質構造・岩質により差がでるかなどを知るために、P波の立上りから5秒間ずつ30秒間についてSHOT-3, 12, 13, 15, 17につきTSUKUDEの記録を分析した。

その結果を図-7に、また最大卓越周期と相対的エネルギーの比を表-3に示す。

表-3 P波の立上りより各5秒間隔内における卓越周波数 (TSUKUDE)

shot No.	区別	サンプリング区間					
		P~5 sec	6~10 sec	11~15 sec	16~20 sec	21~25 sec	26~30 sec
3	T	7.6%	7.9%	7.0%	8.5%	8.2%	8.1%
12	T	7.7	7.8	7.7	7.9	8.3	8.0
13	T	7.6	8.3	7.0	8.1	8.3	8.2
15	T	8.0	7.8	9.2	8.2	9.2	6.1
17	T	12.5	9.0	9.3	8.3	7.1	8.1

注) T = 周波数

これらの図表でみるかぎり、(1)各5秒間隔相互間にも、(2)各爆破点間にも著しい差はみとめられず、(3)図-6の傾向と大差は認められない。5秒間隔の方が全体的に細かい変動がないのは前者に比較し抽出数の少ないためである。SHOT-17をのぞいては、8~9%前後にピークが出ている。しかしSHOT-17-1の2番目のピークの周波数は9.0%であるので1番目の12.5%のピークは雑微動によるものとも考えることもできるが明らかではない。

P波とS波の立上り別による分析

S波の立上りを爆破時刻とP波の立上り時刻から推定し、SHOT-2, 3, 4, 5, 6の爆破地震についてS波の立上りと見られる時刻から1000/60秒間についてTSUKUDEの記録を分析した。

また、以上の分析値とP波の立上りから2000/60秒分析した結果についても比較した。

図-8、表-4によればP-1000/60秒の分析値とS波の立上りS-1000/60秒の分析値による周波数特性を比較するとピークの位置は前者の方が一般に多少周波数の高い方にある。

表-4 P波およびS波各立上り時刻より1000/60sec間隔別卓越周波数(TSUKUDE)

shot No.	サンプリング周波数 間隔 傾位	P-1000/60 sec		1001-2000/60 sec		S-1000/60 sec		S波立上り推定時刻
		第1位	第2位	第1位	第2位	第1位	第2位	
2		7.8 ^B	10.0 ^B	4.9 ^B	7.8 ^B	8.0 ^B	5.0 ^B	2 ^H 38 ^M 49.5 ^S
3		8.5	7.1	9.2	5.2	8.7	5.1	21 53 43.8
4		8.4	10.1	7.8	5.5	8.1	5.1	22 08 50.3
5		7.1	5.2	9.0	7.0	8.9	6.8	22 23 50.6
6		7.5	8.9	7.5	10.4	7.7~8.4	10.7	22 38 49.3

しかし、1001-2000/60秒とS-1000/60秒の周波数特性は非常に類似している。

これは結果的に1001-2000/60秒とS-1000/60秒は両者ともほぼ同じ時間を抽出したことによる。

なほ、SHOT-2, 3のP-1000/60秒にはS波が0.7秒~1秒間程度含まれるが、SHOT-4, 5, 6のP-1000/60秒にはS波は含まれていない。SHOT-2, 3から今回の方法ではP波の分析には、通常の爆破による人工地震においては、S波の混入が6%程度までならば周波数のパワー分布に影響がみられない。

また、各SHOTとも爆破点が異なってもP波、S波とも周波数特性は総体的には同じ傾向である。

SHOT-1~SHOT-17 までの記象を図-9に示す。

換振器の制動について

前述のように、P波とS波の周波数特性が著しくよく似ている点に疑問が生じた。すなわち、4%の換振器にGMA-301増幅器を連結した場合に制動が非常に劣り、ある範囲の周波数入力があった場合、常に同一の共鳴振動を書くのではないかと疑いをもたれた。そこで実験を行なってみたが、その疑いのないことが明らかとなったので、これまでの検討結果は正しいものと考えられる。

4. 結果と考察

1. P波の平均速度からTSUKUDEより80, 95 km南の地域に速度の遅い層の存在が推定される。
2. 周波数分析の結果では
 - a. 2点間(ISHINOMAKI-TSUKUDE間17.1 km)に周波数特性の大略的差は認められない。
 - b. 周波数分析をするのにP波の立上りから30秒間については、抽出時間間隔5秒ならばどこをとっても特性に著しい差はみられない。
 - c. 今回については、P波の周波数特性を求めるのにS波が6%程度混入してもP波の特性を求めることができた。
 - d. 2点間の周波数特性、異なる発破点のP波、S波の周波数特性は詳細にみればそのピークの出方は相異なる。

特に、エネルギーの大きさの順位が2番目のピークに着目するならば、2地点間の差、P波、S波と思われるところのピーク周波数に大きい差が認められるので、地質構造や岩質を周波数分析より求める手がかりとすることができないのではないかと考えられる。

5. あとがき

今回は、2観測点の観測値を分析し、方法と問題点について述べたが、将来の発展方向として

1. すでに岩質・地質構造の明らかにされているところにおいて同様な作業を行ない結果と対比する。
2. 爆破地震動研究グループが人工地震により求めた構造を参考とし、観測点ごとの周波数分析を行ない対比する。

などの作業を行ない検討する。

終りに臨み観測・分析にあたり、東京大学地震研究所助教授南雲昭三郎氏、名古屋大学青木治三氏、作手村立協和小学校、通産省地質調査所爆破地震動研究グループ、国立防災科学技術センター第3研究部長菅原正巳氏、第2研究部地震防災研究室長高橋博氏、第3研究部勝山ヨシ子氏からご指導、ご協力をいただいたので、ここに記して感謝いたします。

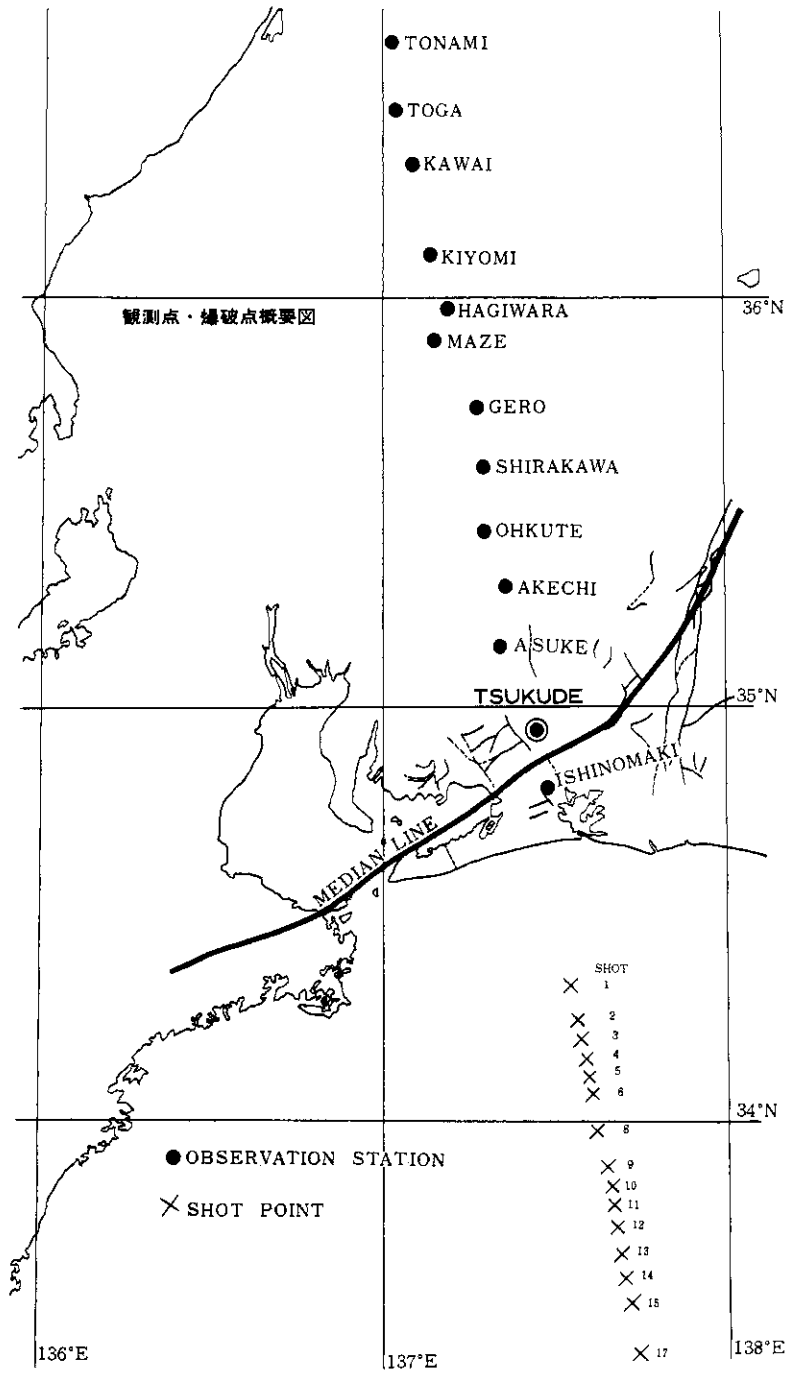


図-1 観測点・爆破点概要図

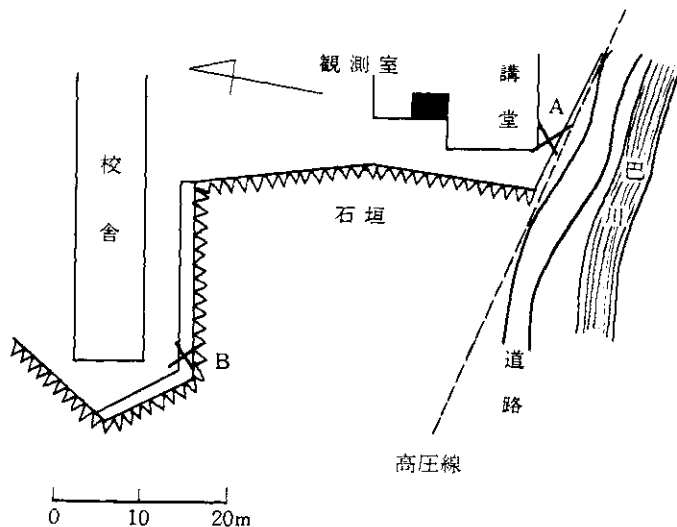


図-2 換振器位置図

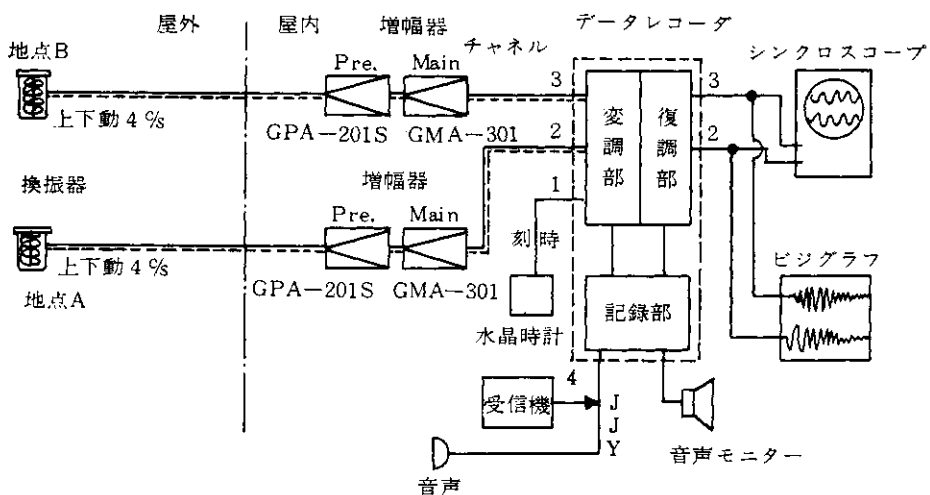


図-3 TSUKUDEの測器構成図

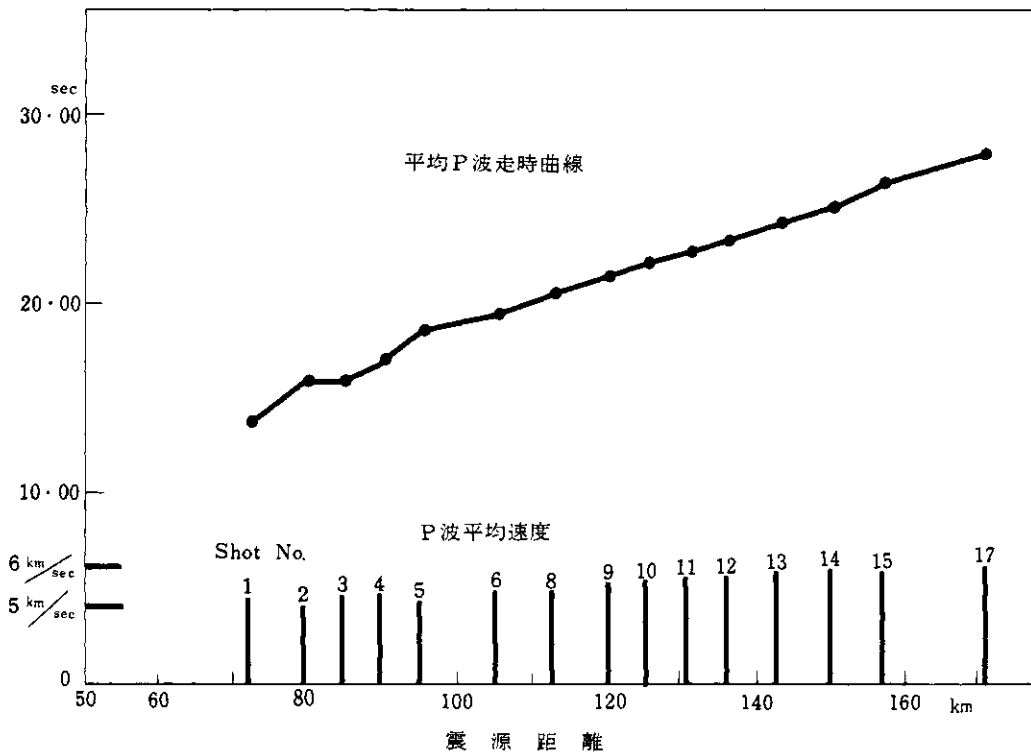


図-4 P波走時曲線、平均速度図

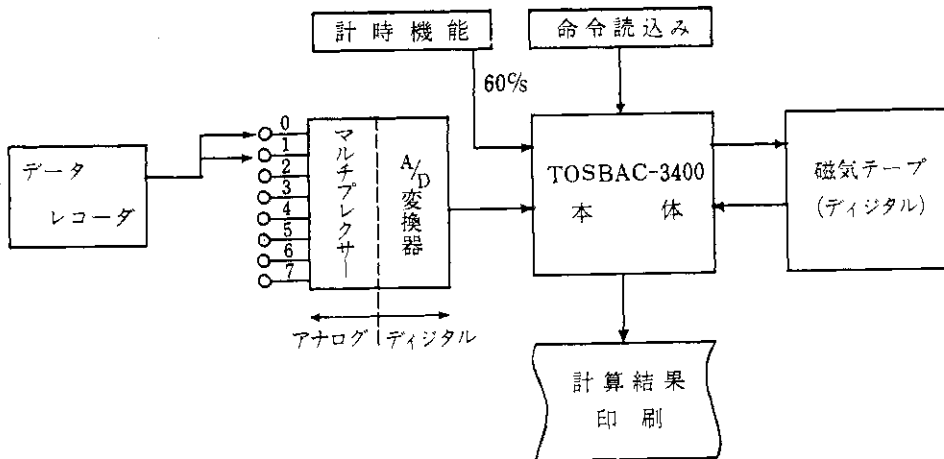
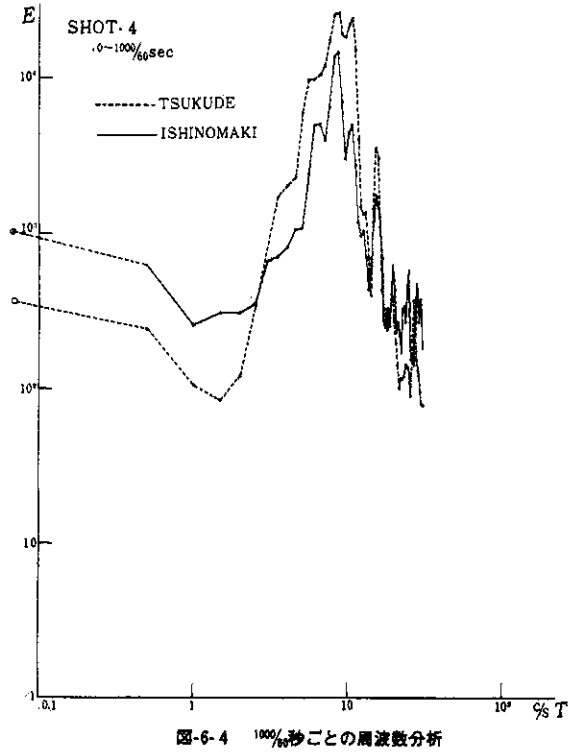
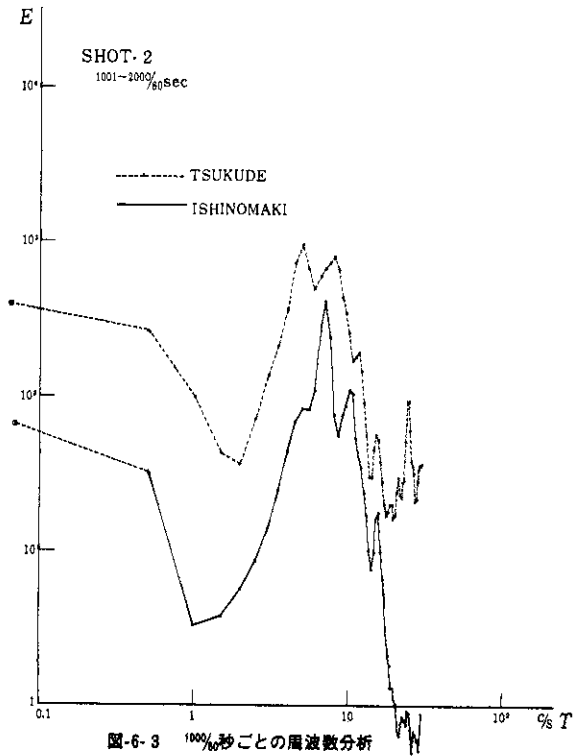
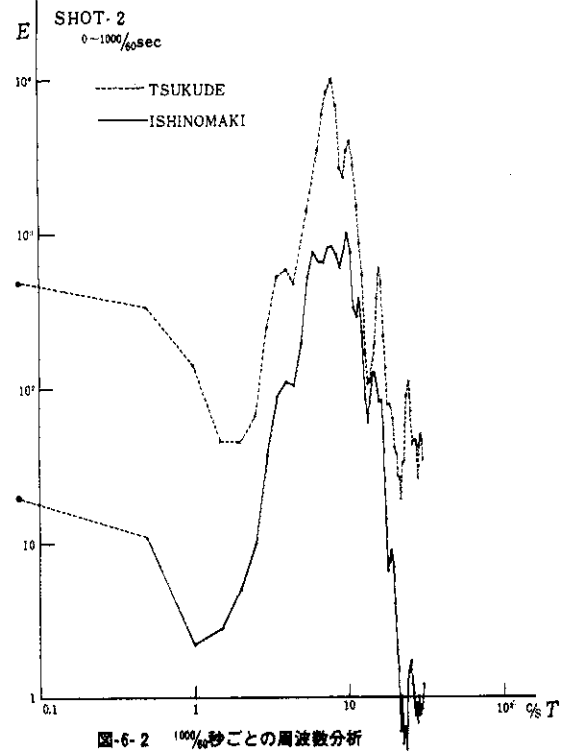
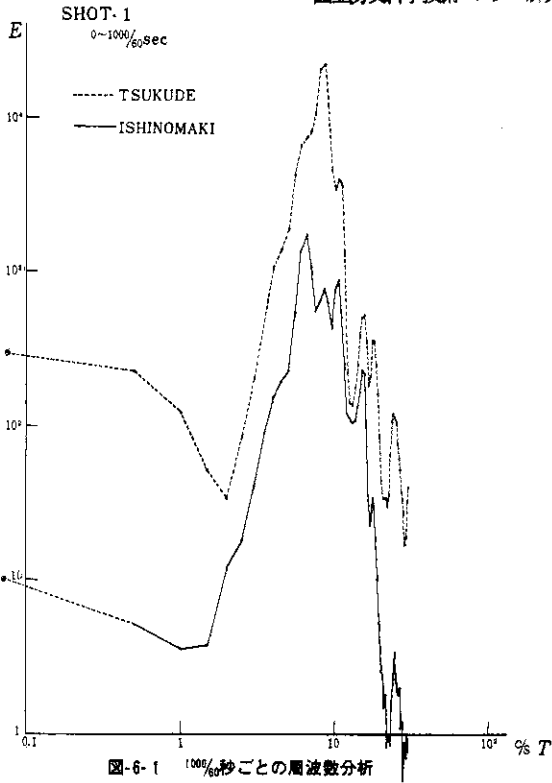
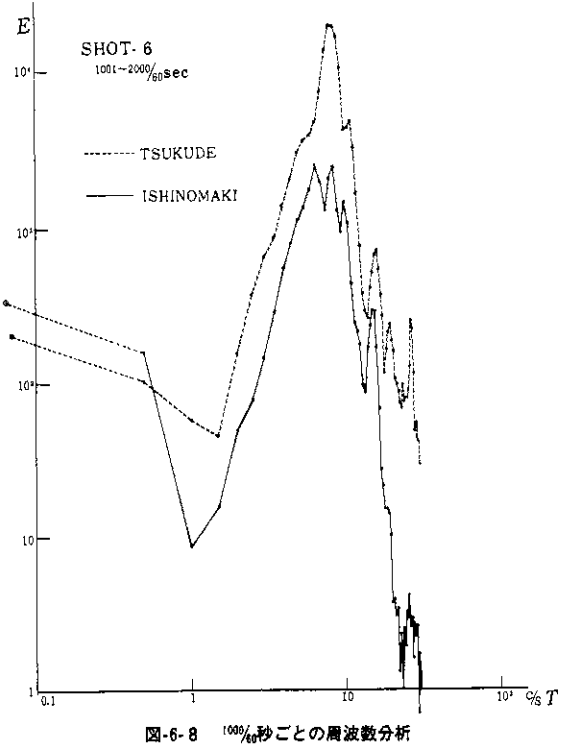
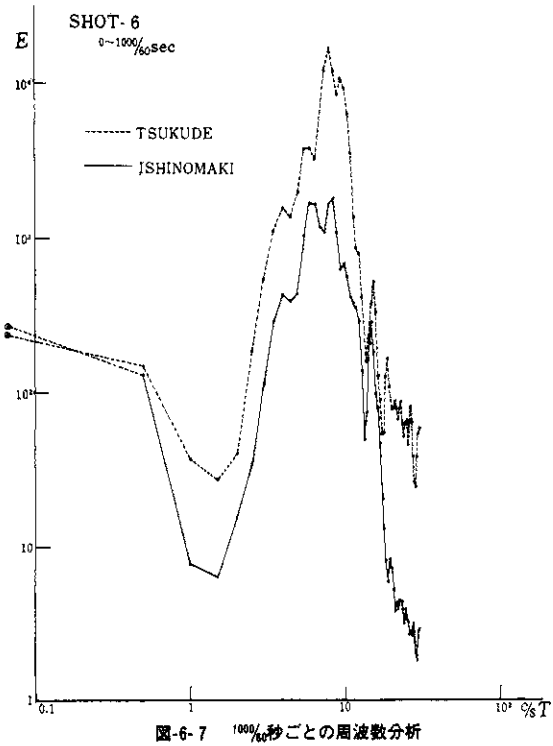
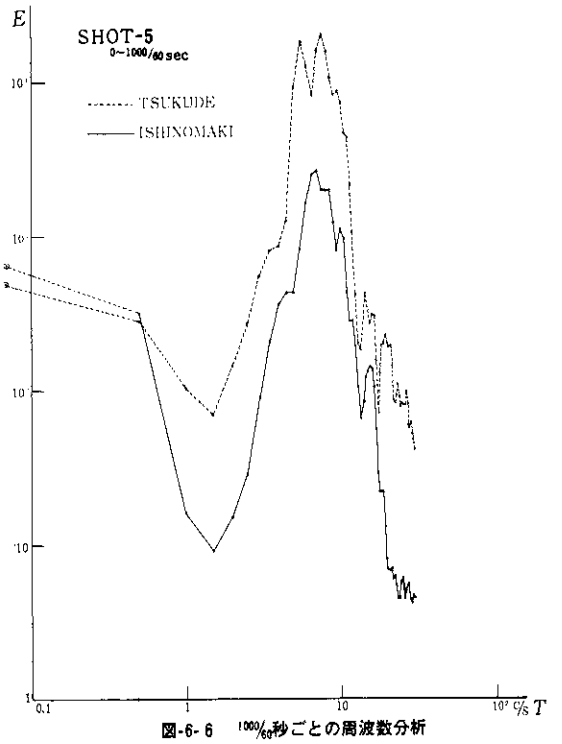
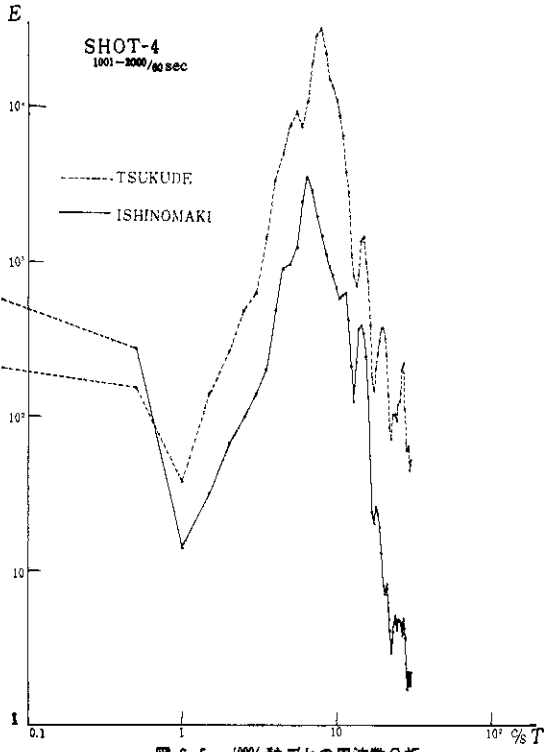
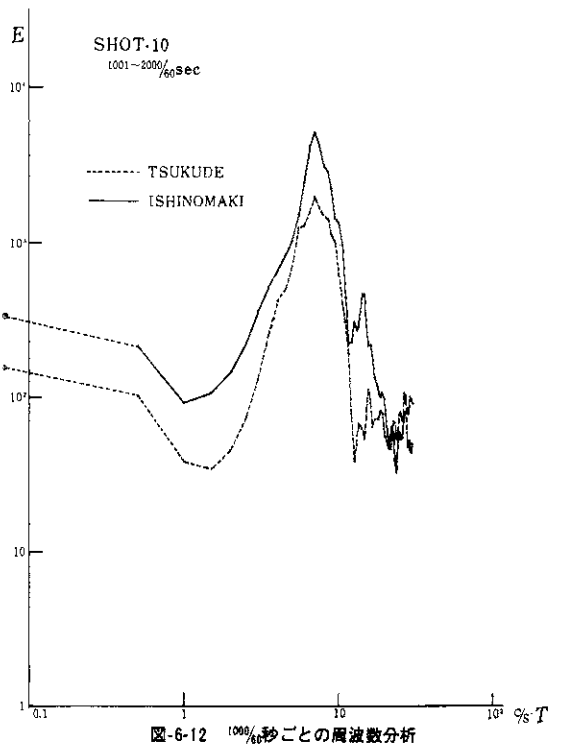
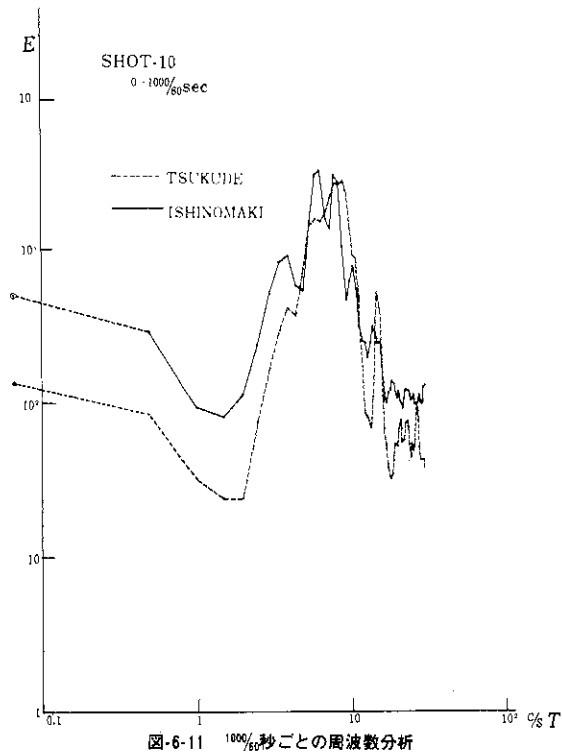
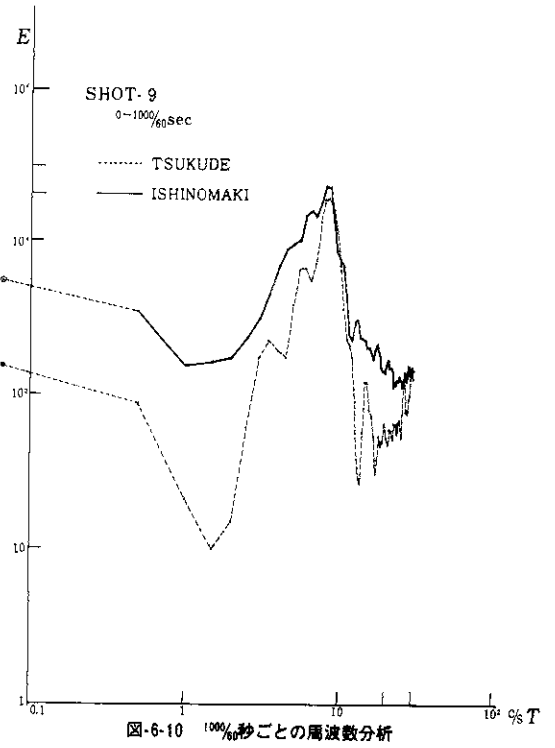
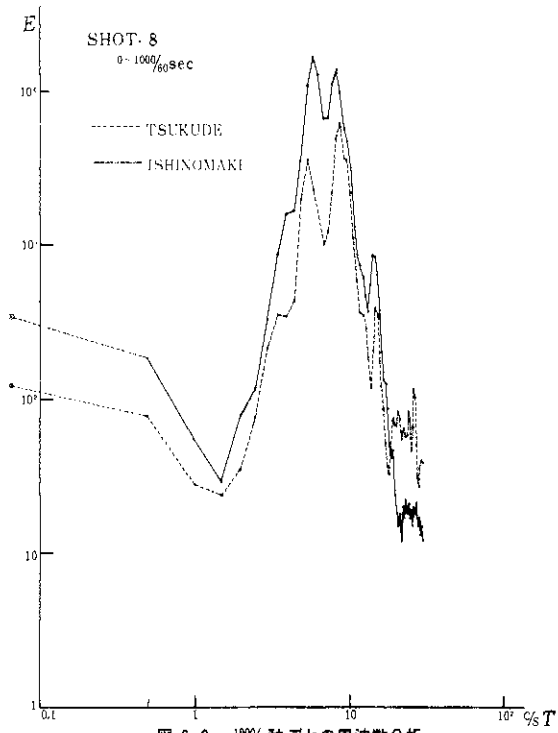
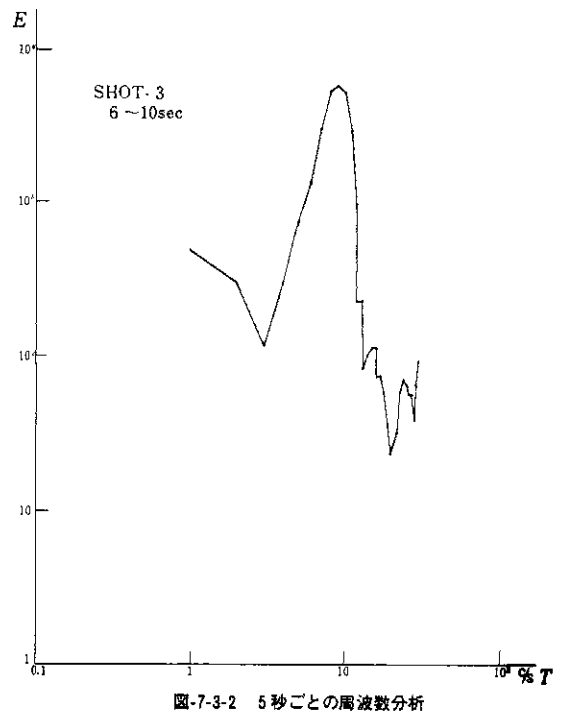
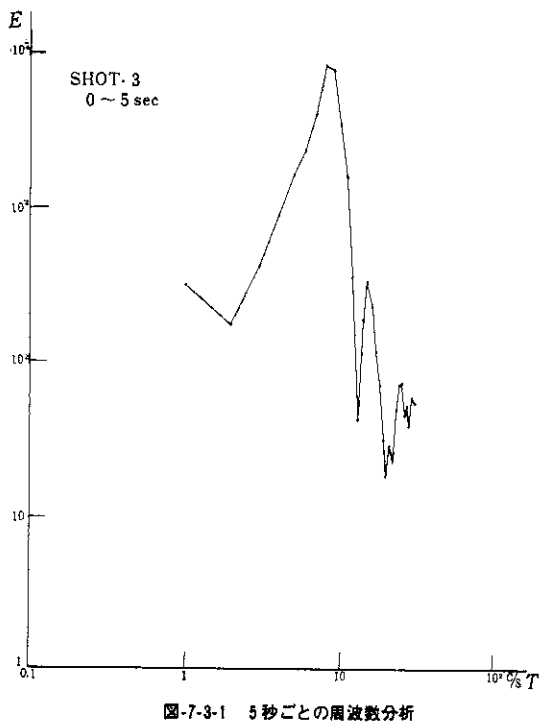
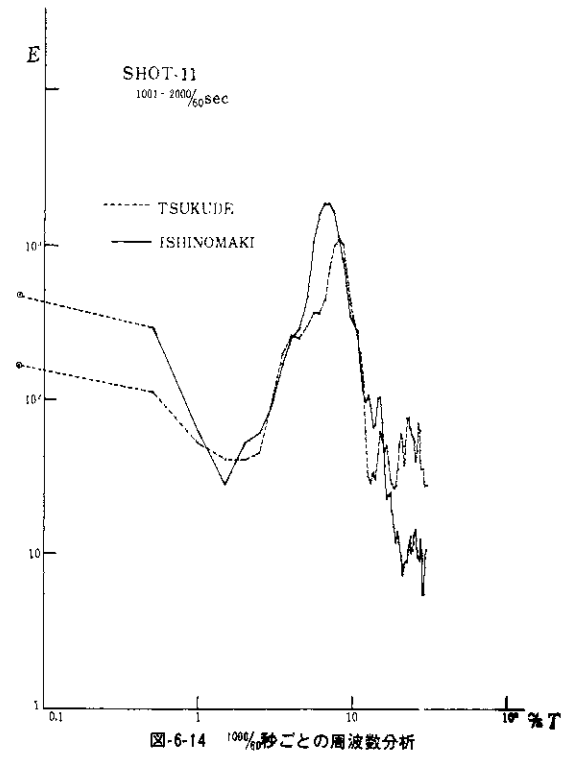
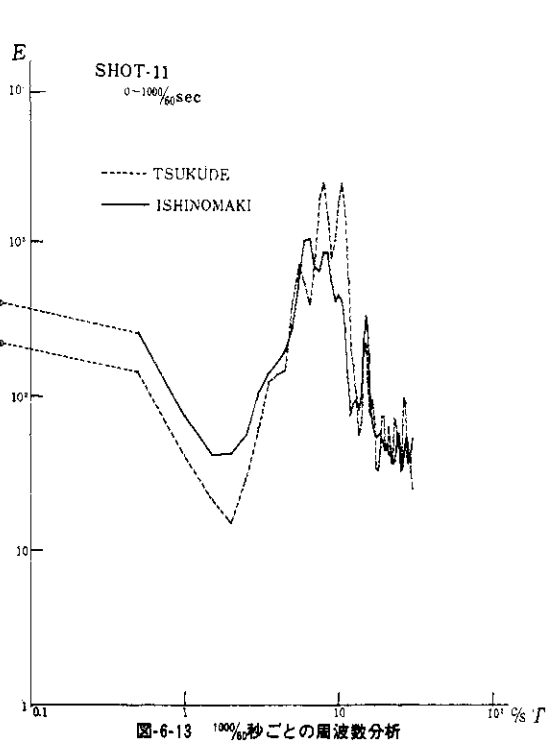


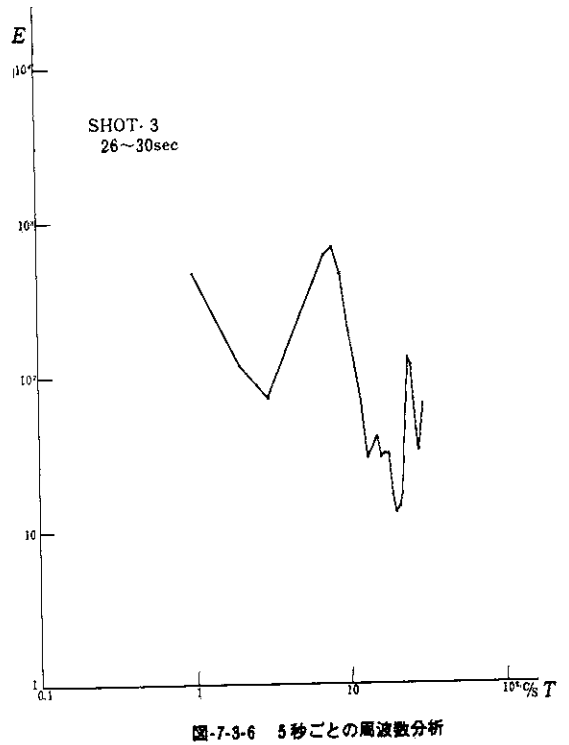
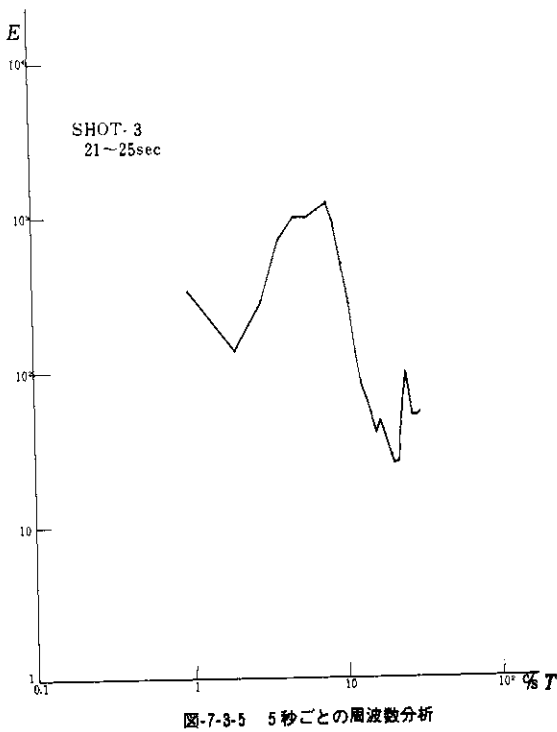
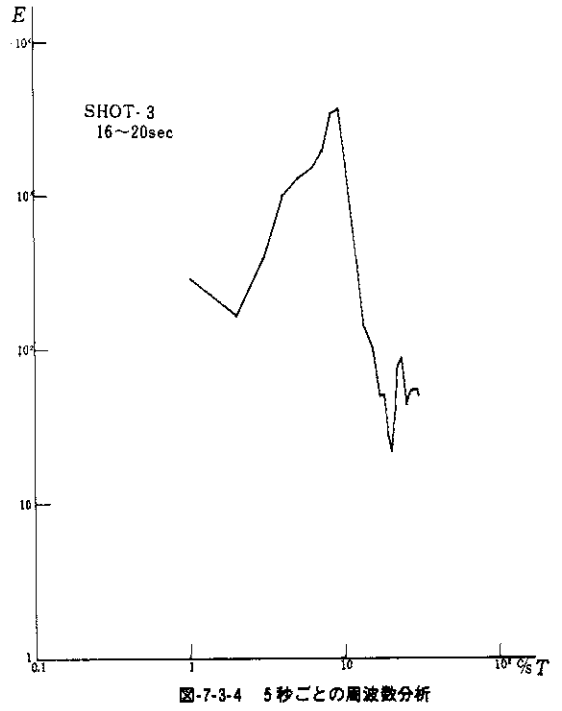
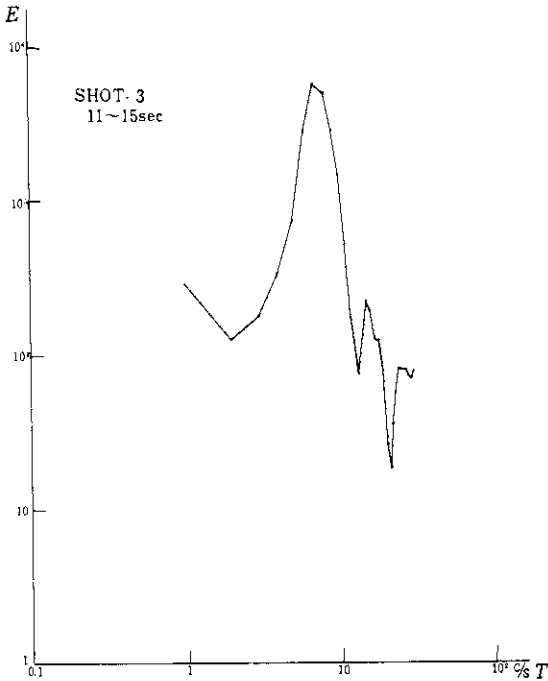
図-5 データ処理および計算システム構成図











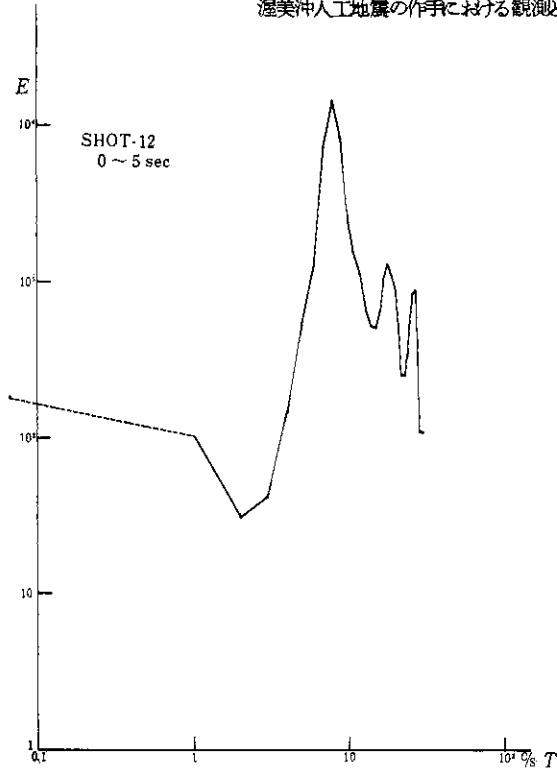


図-7-12-1 5秒ごとの周波数分析

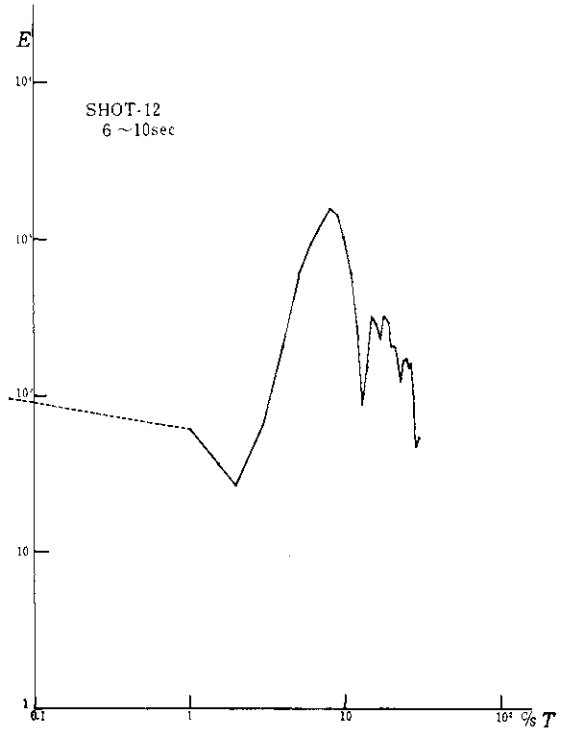


図-7-12-2 5秒ごとの周波数分析

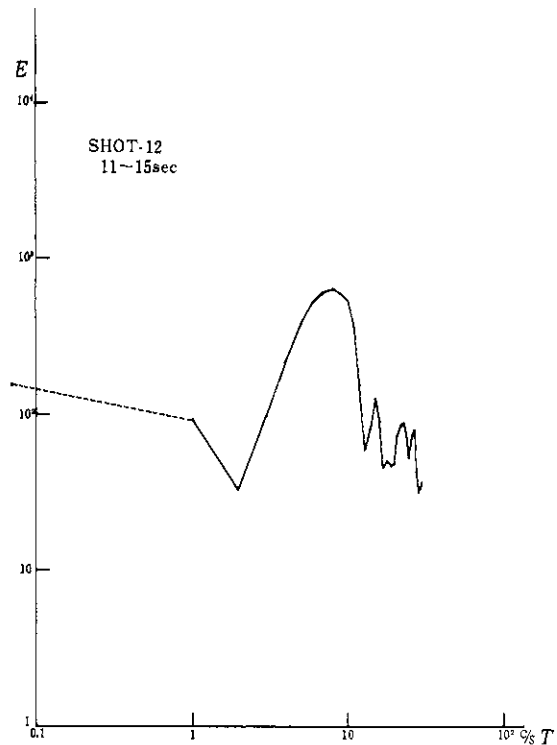


図-7-12-3 5秒ごとの周波数分析

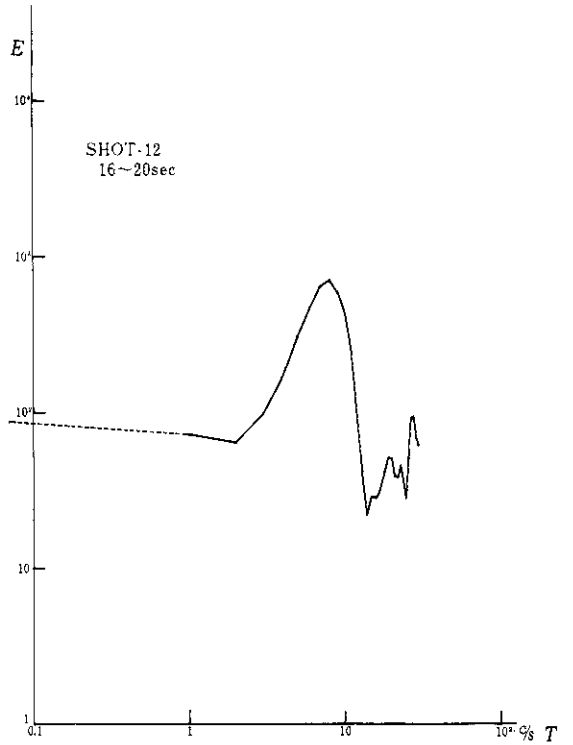
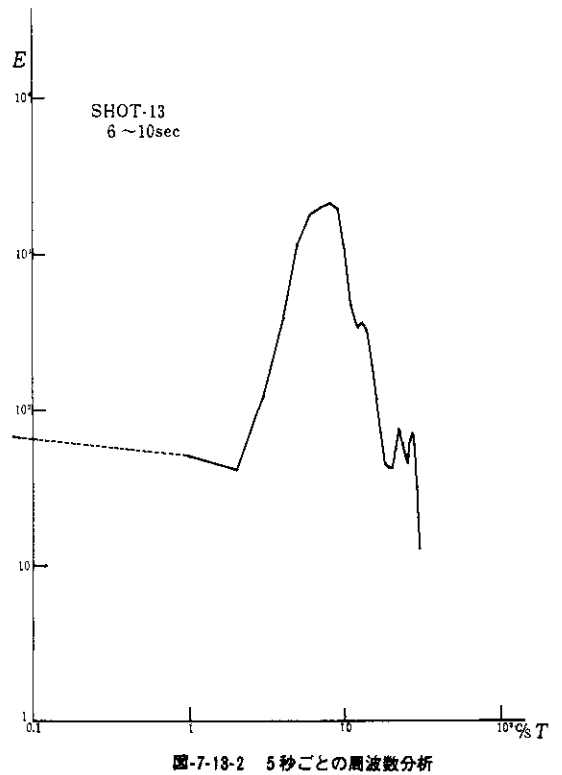
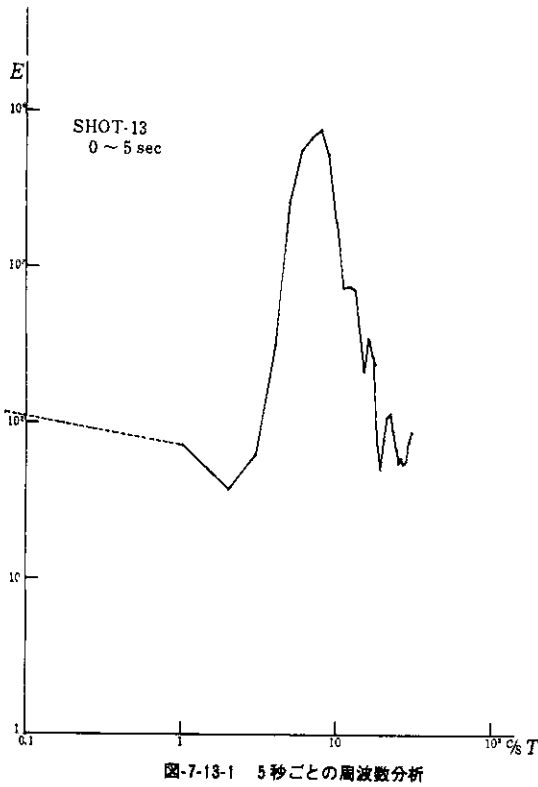
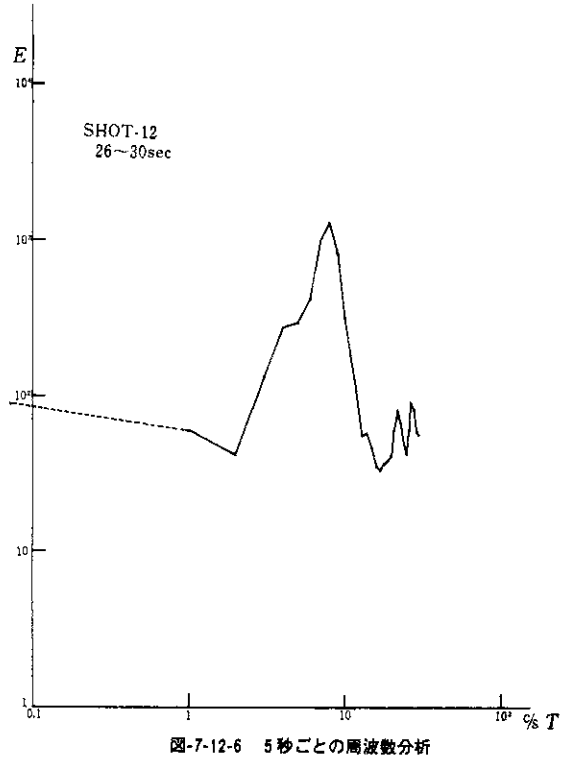
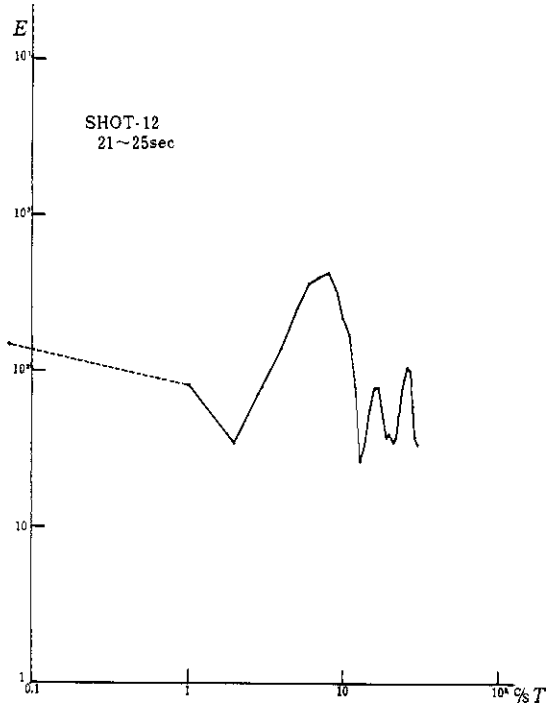


図-7-12-4 5秒ごとの周波数分析



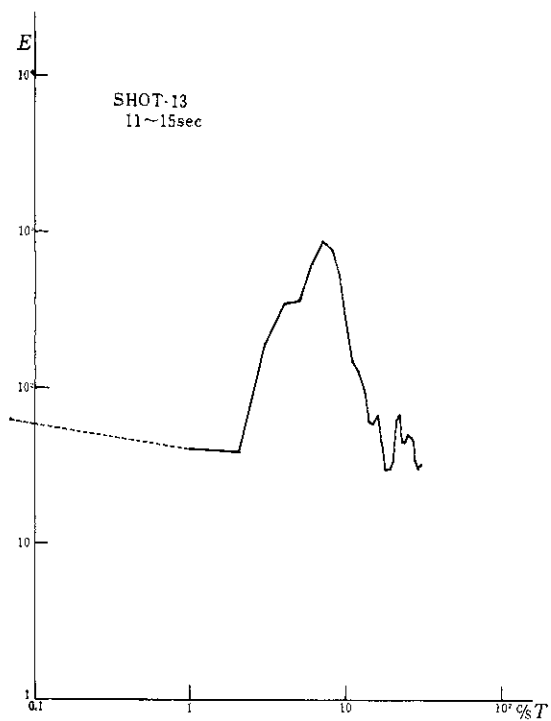


図-7-13-3 5秒ごとの周波数分析

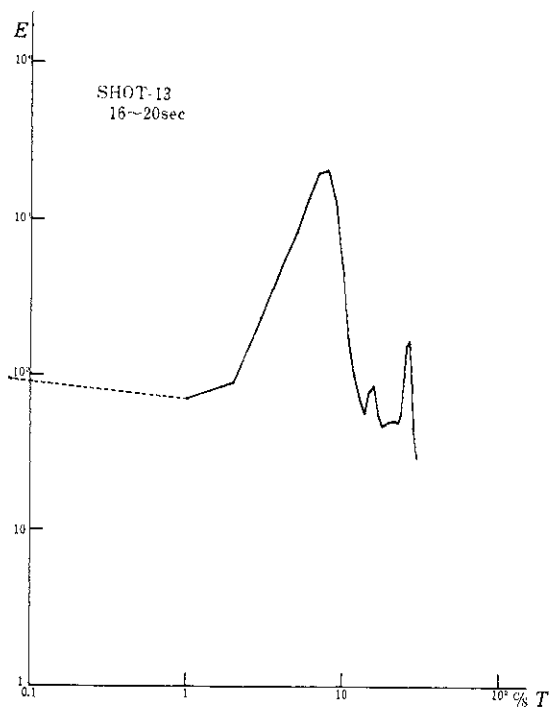


図-7-13-4 5秒ごとの周波数分析

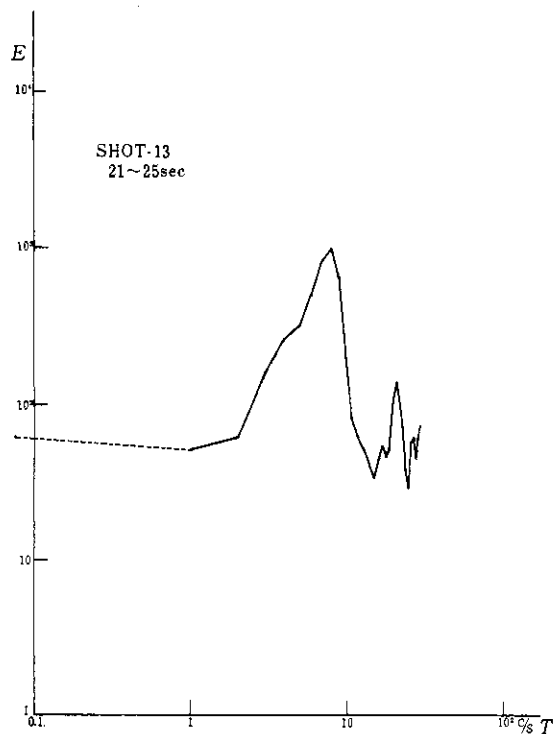


図-7-13-5 5秒ごとの周波数分析

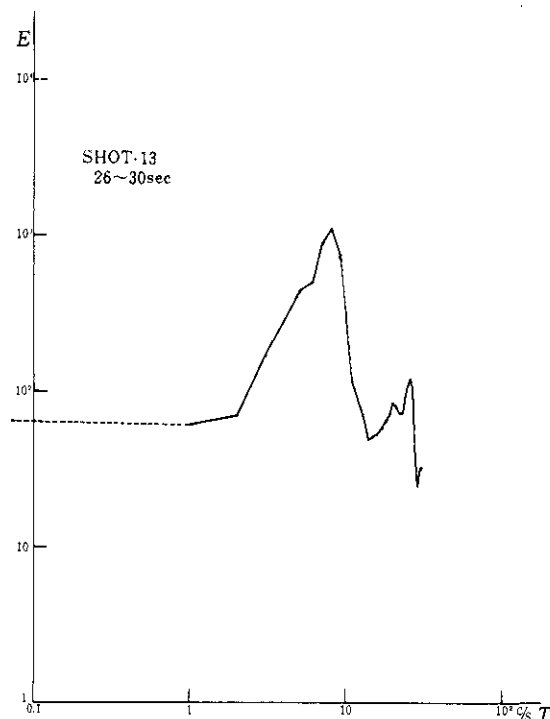


図-7-13-6 5秒ごとの周波数分析

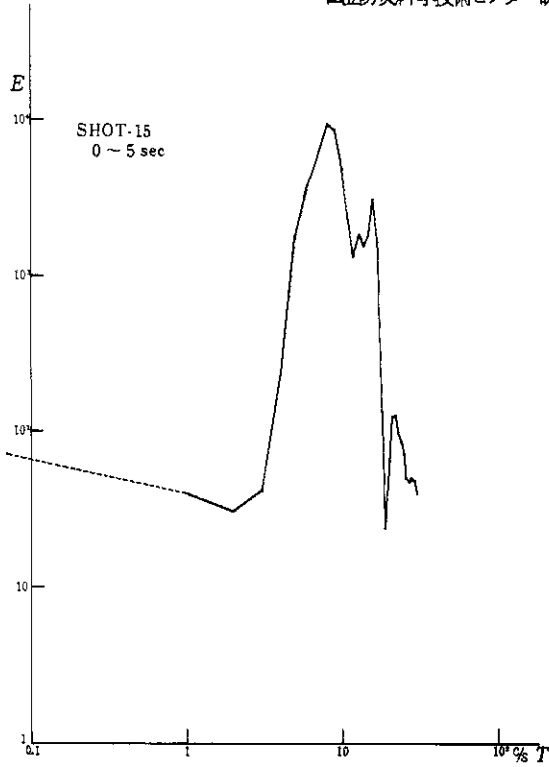


図-7-15-1 5秒ごとの周波数分析

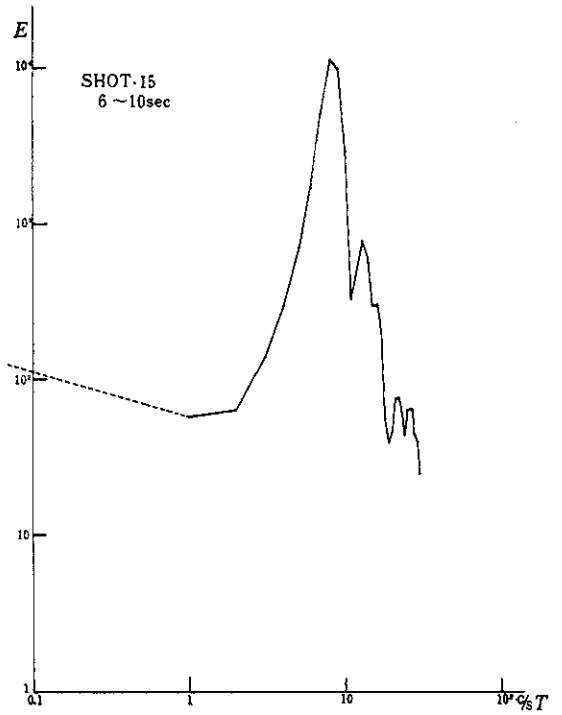


図-7-15-2 5秒ごとの周波数分析

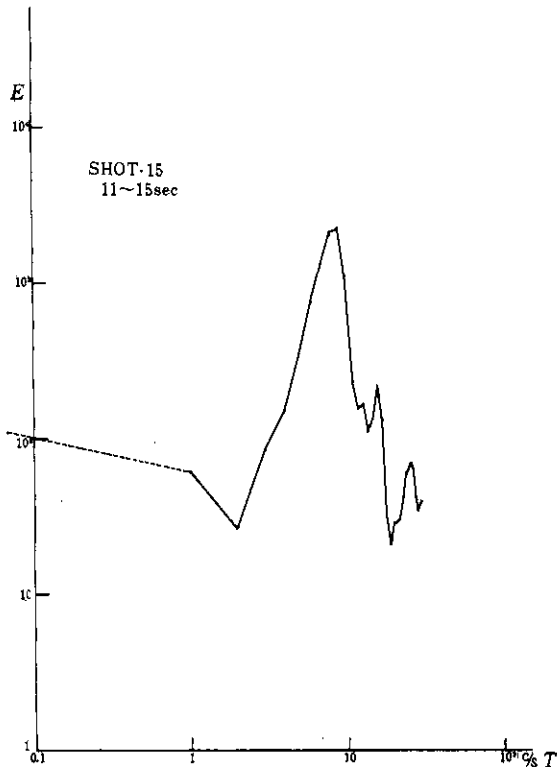


図-7-15-3 5秒ごとの周波数分析

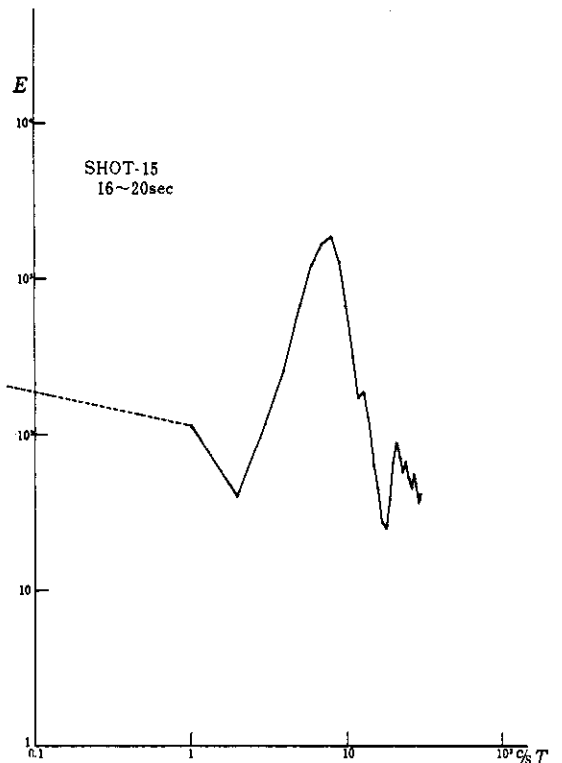
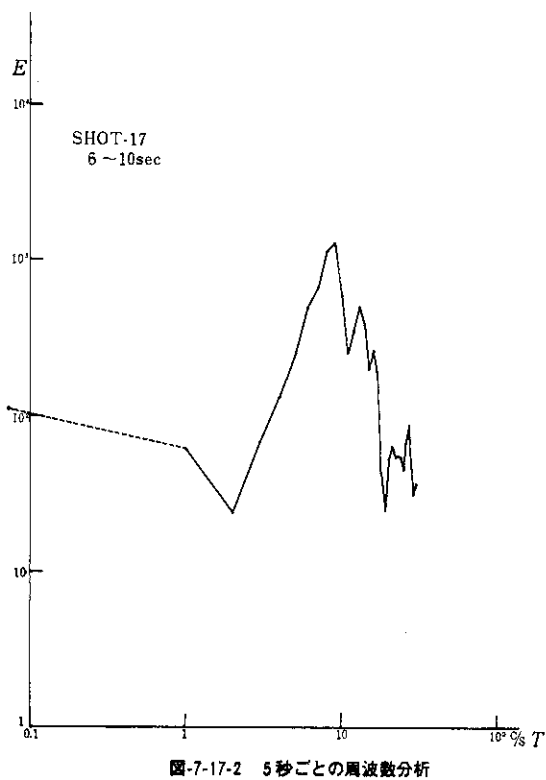
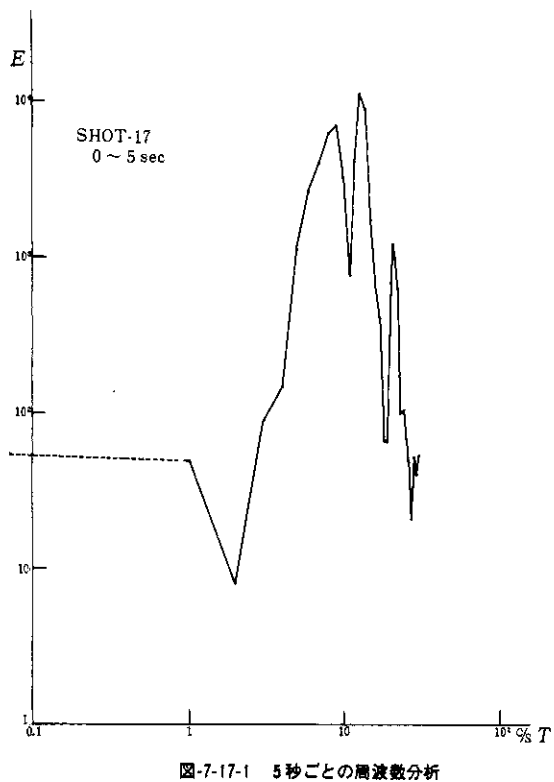
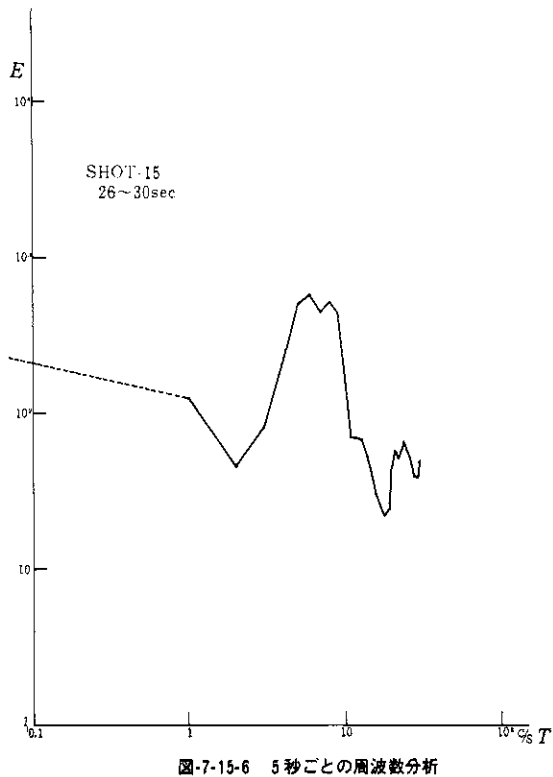
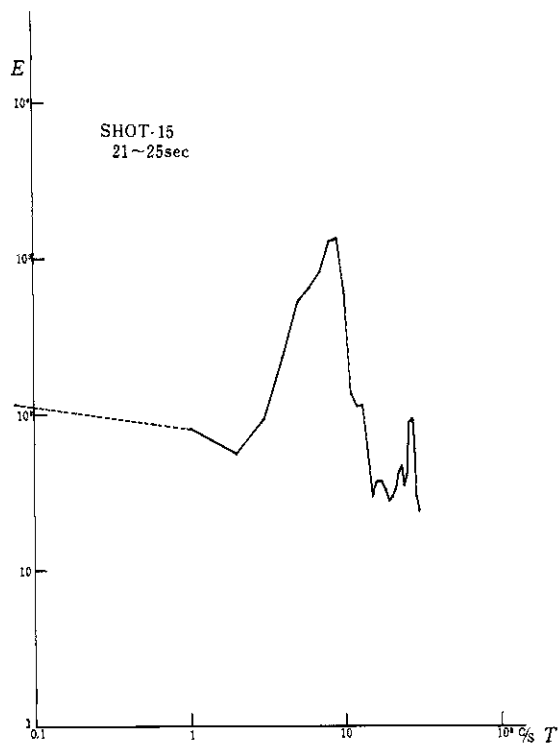
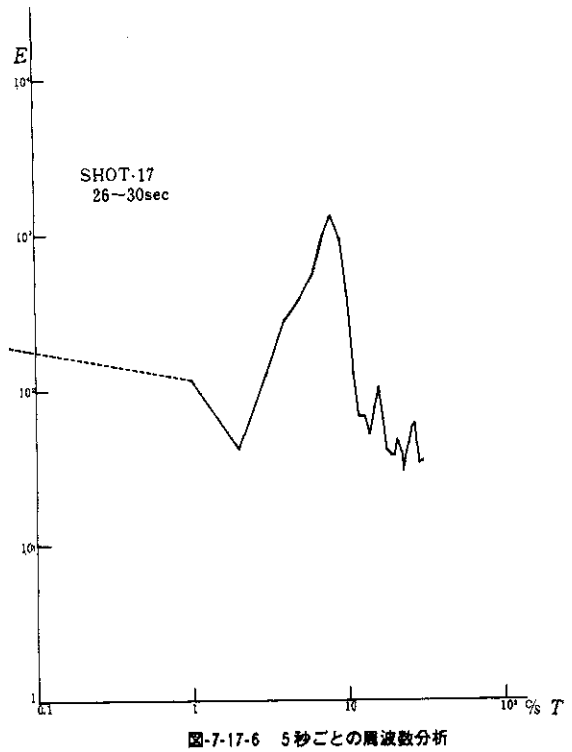
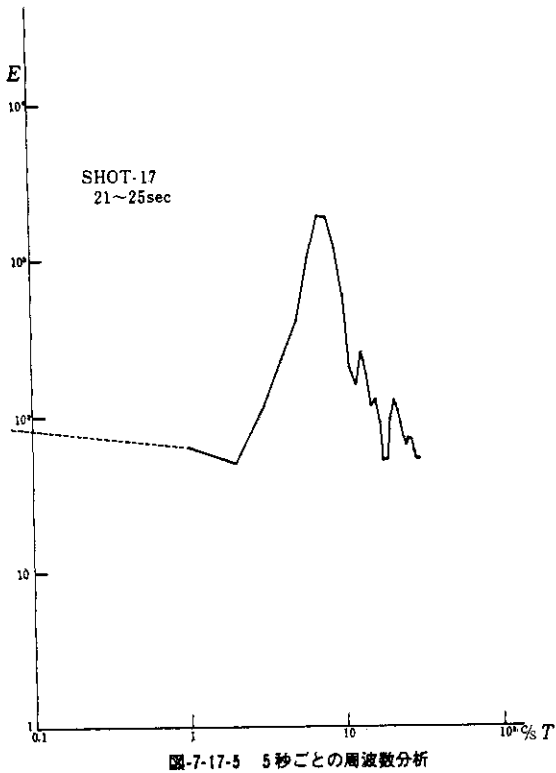
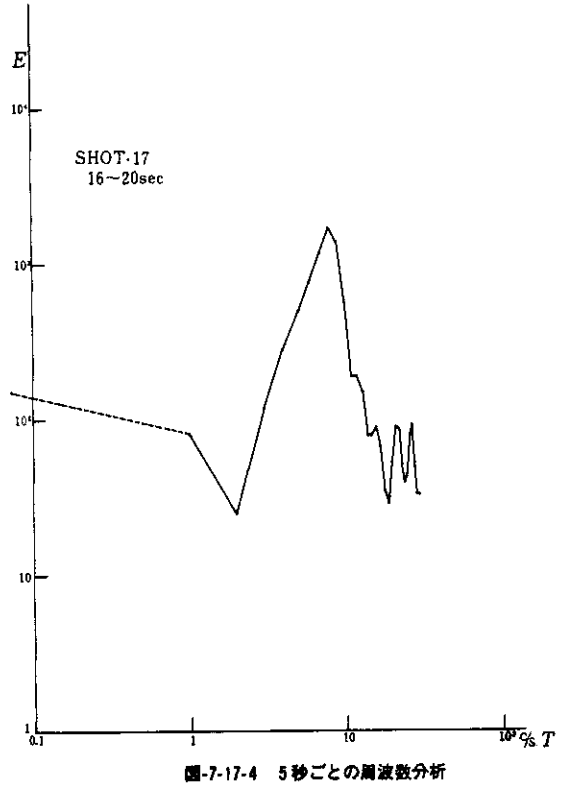
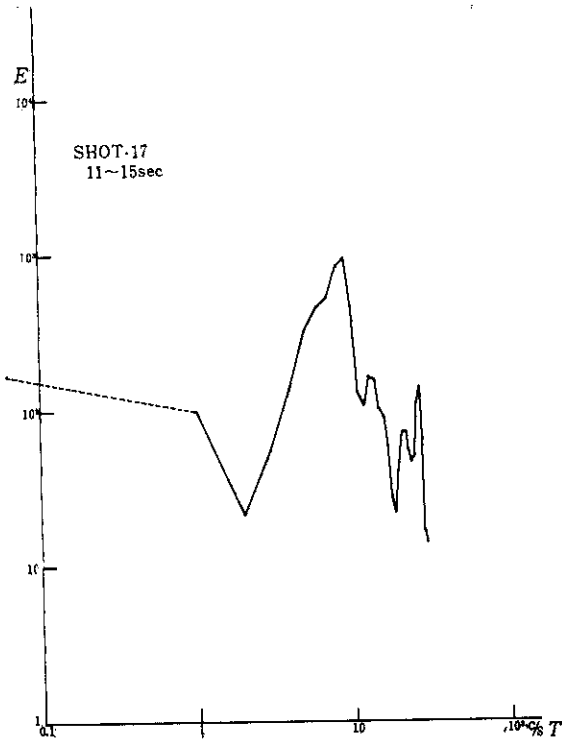


図-7-15-4 5秒ごとの周波数分析





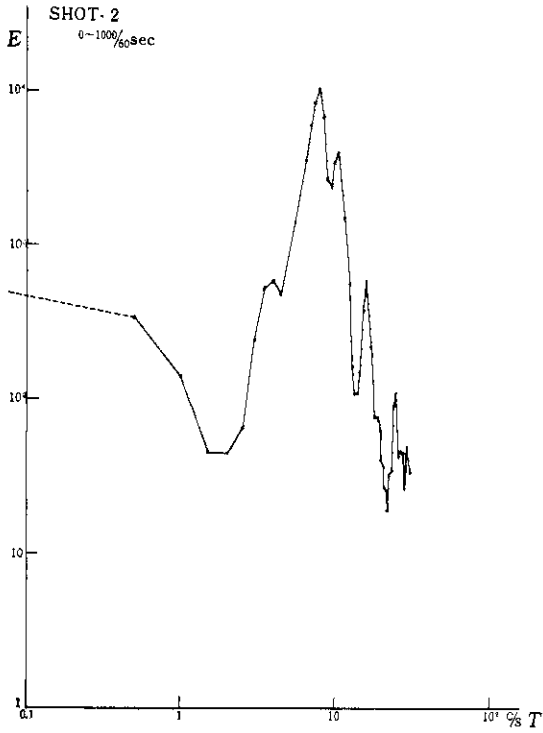


図-8-2-1 P波、S波別周波数分析

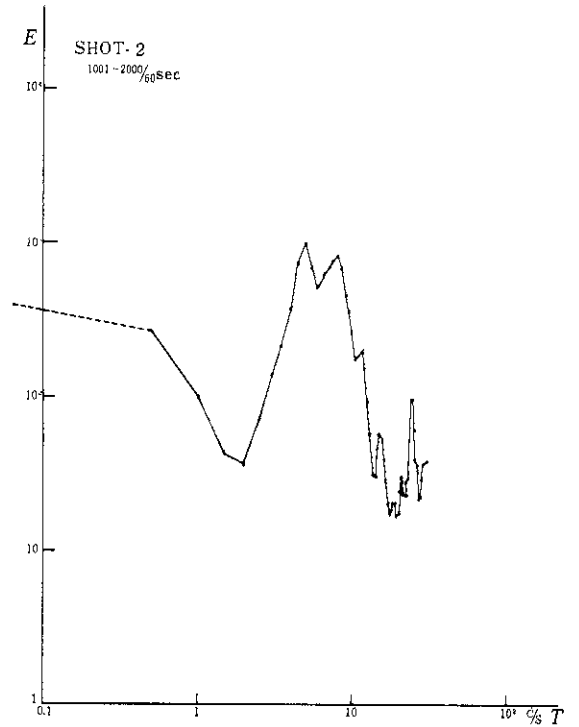


図-8-2-2 P波、S波別周波数分析

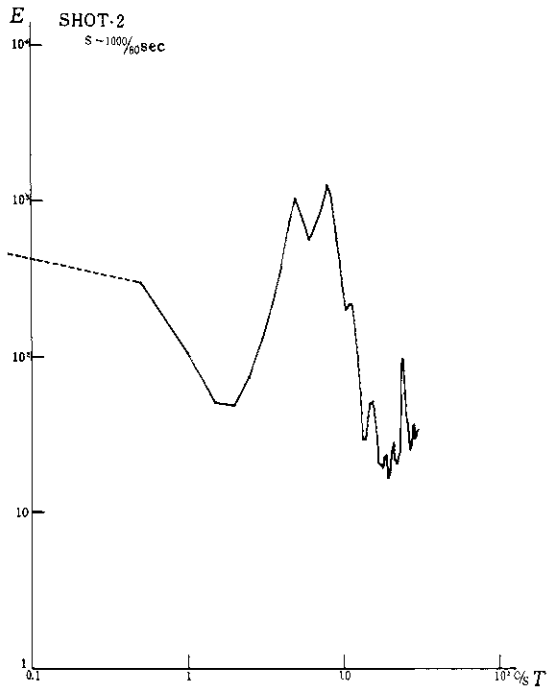


図-8-2-S P波、S波別周波数分析

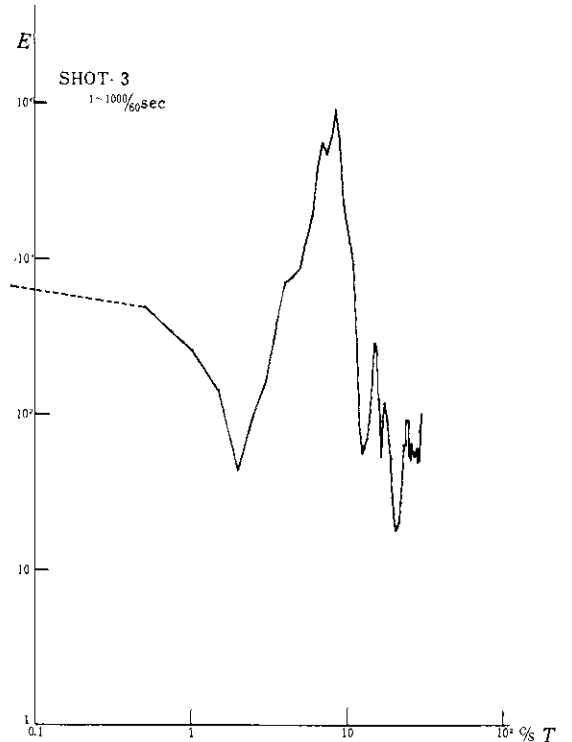


図-8-3-1 P波、S波別周波数分析

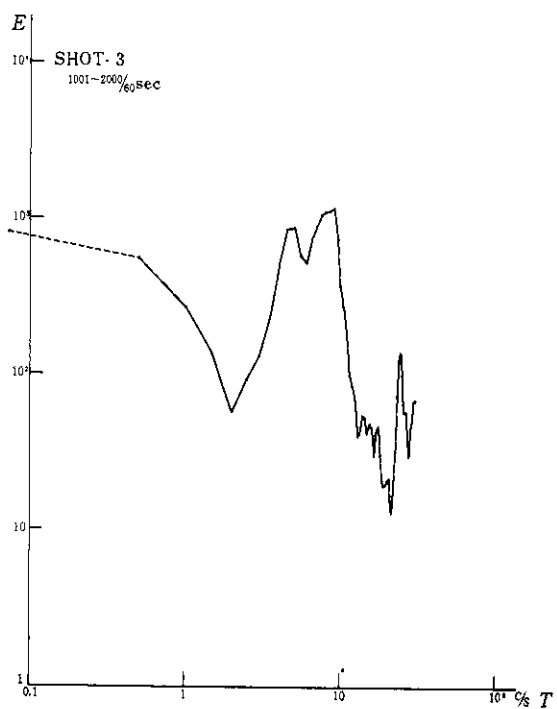


図-8-3-2 P波、S波別周波数分析

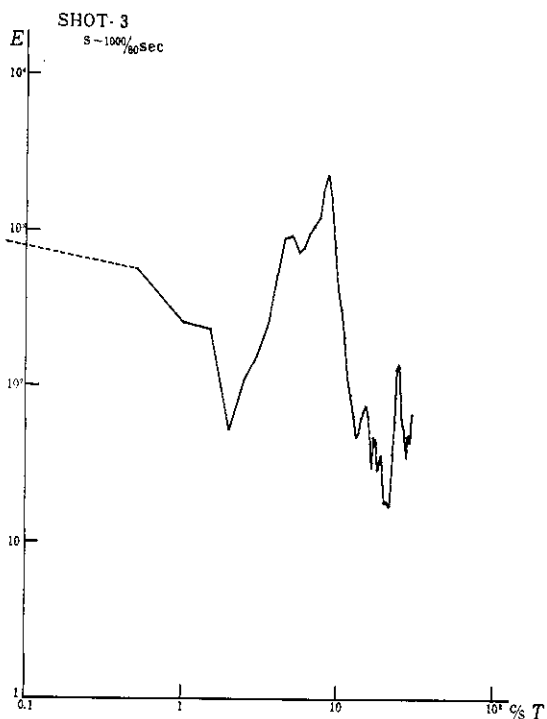


図-8-3-S P波、S波別周波数分析

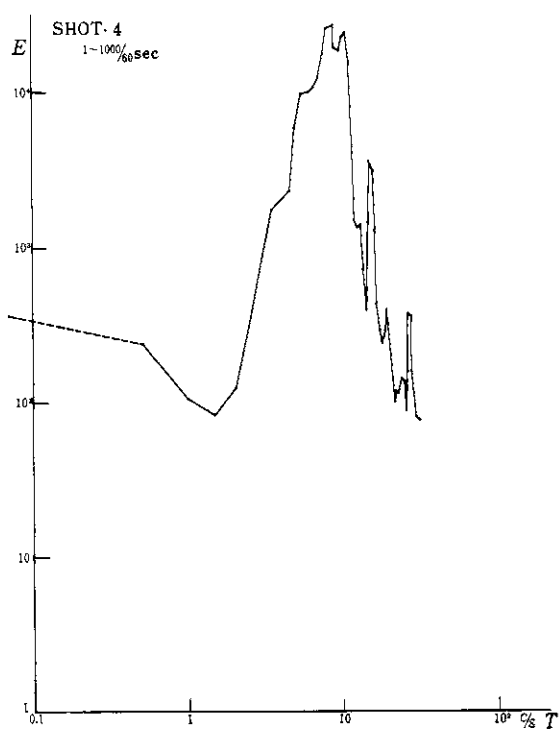


図-8-4-1 P波、S波別周波数分析

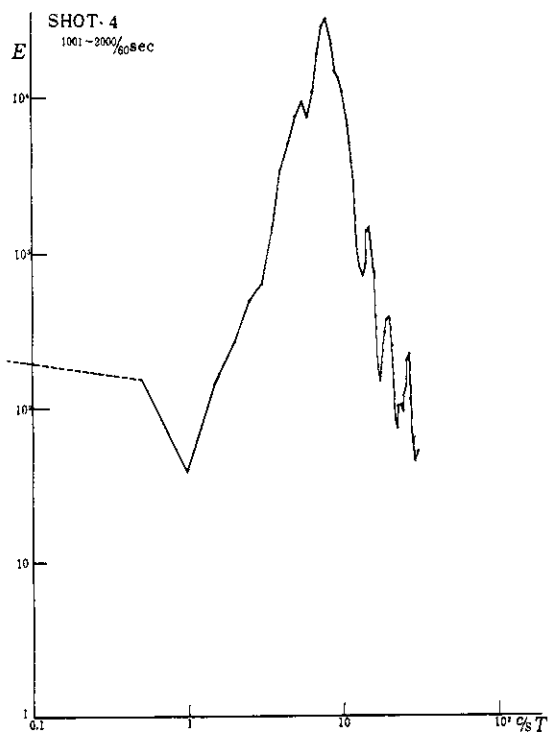


図-8-4-2 P波、S波別周波数分析

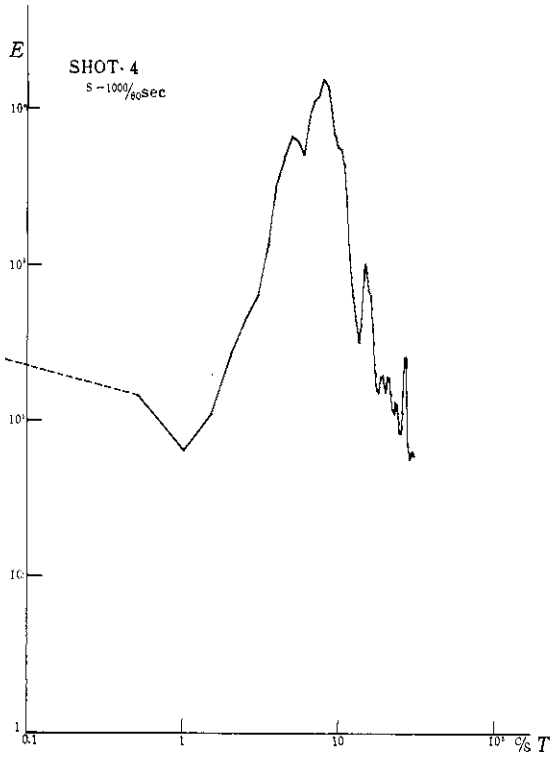


図-8-4-S P波、S波別周波数分析

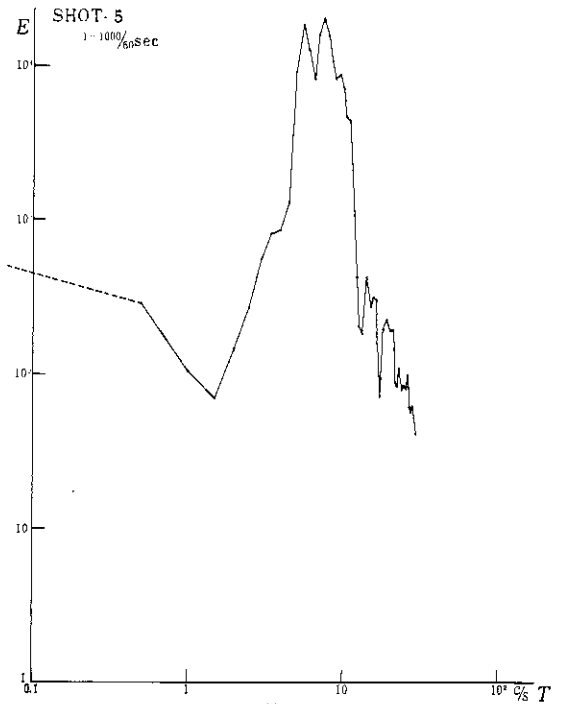


図-8-5-1 P波、S波別周波数分析

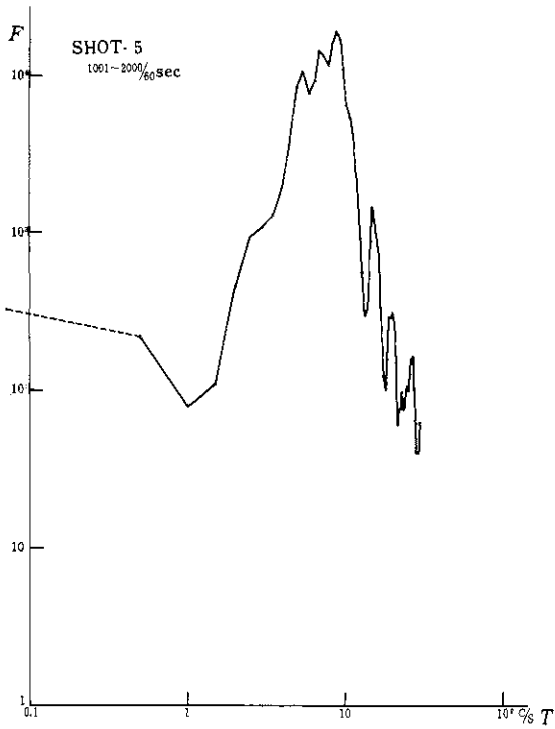


図-8-5-2 P波、S波別周波数分析

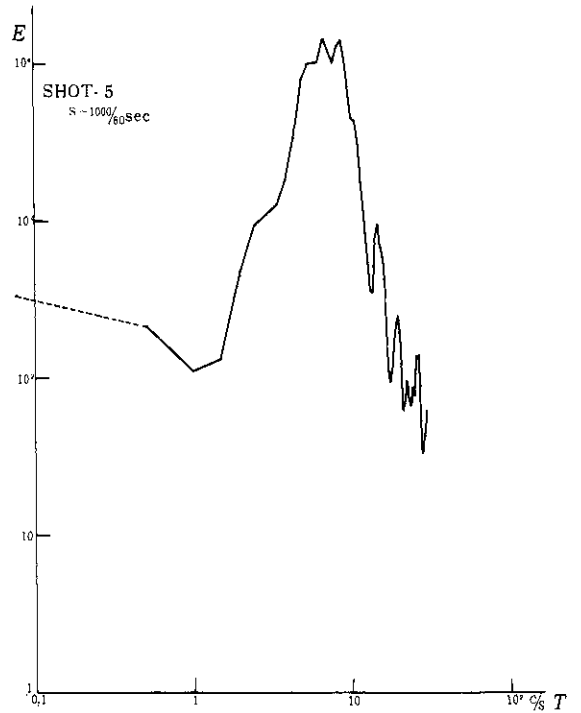


図-8-5-S P波、S波別周波数分析

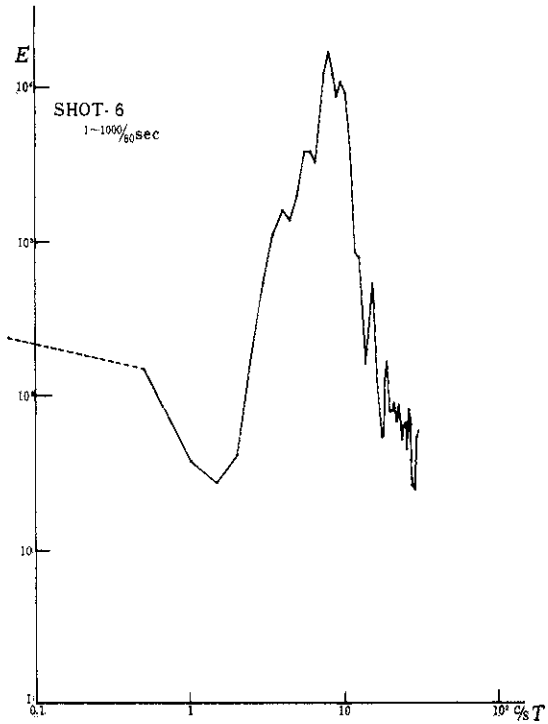


図-8-6-1 P波、S波別周波数分析

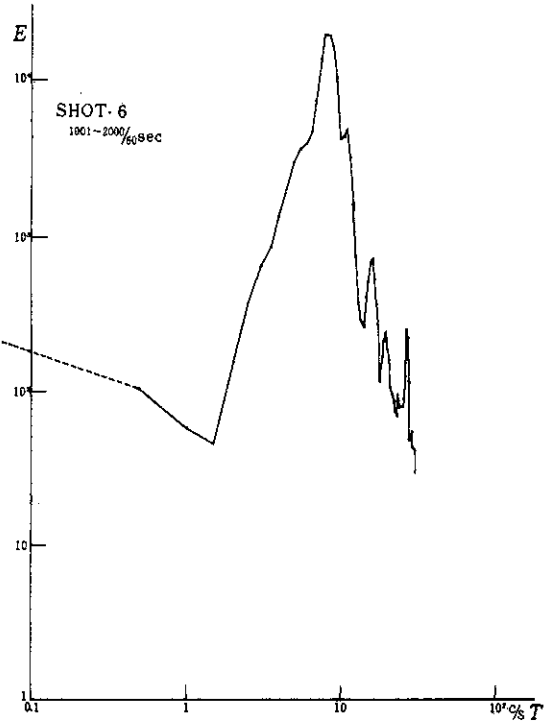


図-8-6-2 P波、S波別周波数分析

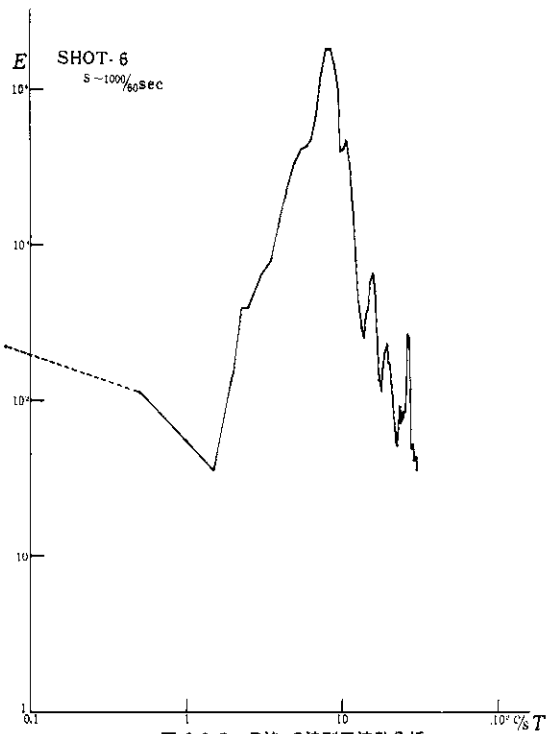


図-8-6-S P波、S波別周波数分析

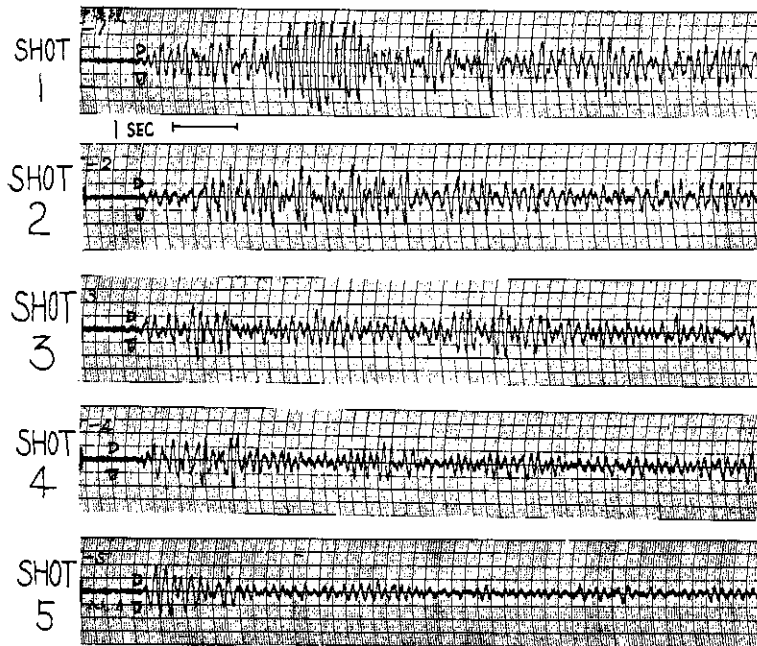


図-9-1 渥美沖人工地震観測図

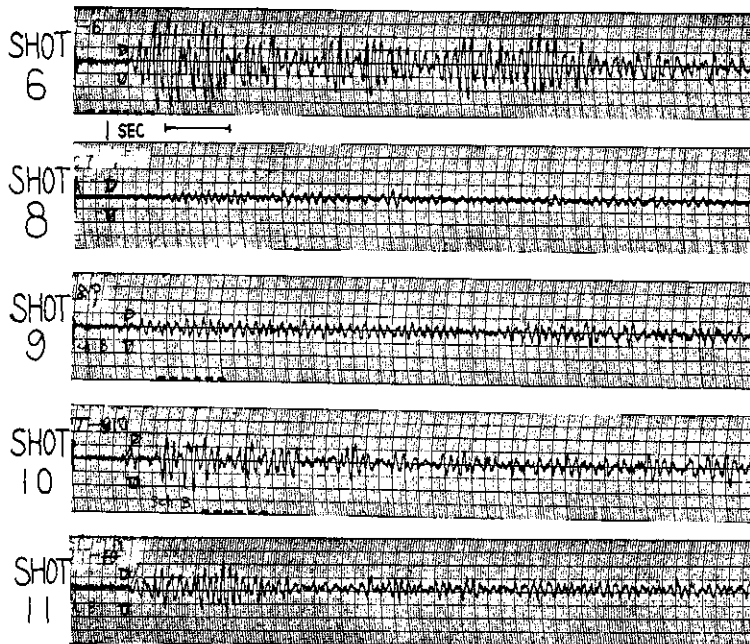


図-9-2 渥美沖人工地震観測図

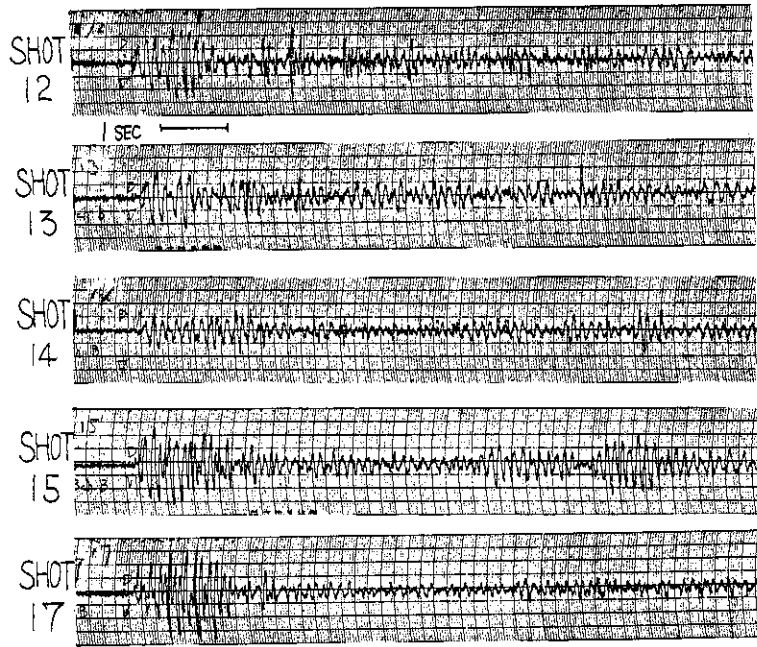


図-9-5 湯浜沖人工地震記録図